数字孪生与未来城市

Digital Twin and Future Cities

2026年·第1卷·第1期（总第1期）

学术指导单位：重庆大学
主管单位：重庆市住房和城乡建设委员会
主办单位：重庆市建设信息中心
重庆建筑工程职业学院
出版单位：維澤科技有限公司

ISSN 3137-0551
发行周期：季刊
出版时间：2026 年 10 月
投稿/查稿邮箱：viserL@archsouth.com
地　　址：17/F 80 GLOUCESTER ROAD WANCHAI HONG KONG

主　　编：董必钦
执行主编：张育新
编　　委（按姓氏笔画排序）：
王玉合　牟　萍　刘　礼　刘亚南　朱正伟
郑周练　钱　锋　高景鑫　雷　华
责任编辑：王玉合
美工编辑：李　亚

定　　价：HK$ 130.00

本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点；作者文图责任自负，如有侵犯他人版权或者其他权利的行为，本刊概不负连带责任。版权所有，未经许可，不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人：稿件凡经本刊使用，如无电子版或书面的特殊声明，即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。



《数字孪生与未来城市》由香港維澤科技有限公司出版，聚焦城市数字孪生与未来城市建设的跨学科 OA 期刊。期刊专注数字孪生理论、关键技术、平台架构、CIM 城市信息模型、智慧城市、韧性城市、城市治理数字化等前沿研究，汇聚理论创新、技术研发与工程实践成果，打造数字孪生城市领域国际化学术交流载体，服务城市全域数字化、可持续、智慧化发展。

本刊设立数字孪生基础理论与核心技术，数字孪生城市典型场景应用，未来城市发展与数字化治理等栏目，面向数字孪生、人工智能、时空信息技术赋能城市智慧化、可持续发展的交叉创新研究，及相关领域常年征稿。

数字孪生与未来城市

DIGITAL TWIN AND FUTURE CITIES

第 1 卷 第 1 期　　2026 年 10 月

目　　次

城市热岛对城市建筑能耗影响的相关研究文献计量分析

刘亚南，邹春阳，蔡贤云，赖小红 1

硅藻新材料在未来建筑中的应用：场景驱动与规模化路径

张育新，杜智岚，王玉合，王　春 17

基于 BIM 和群智能算法的施工管理智能优化

雷　华，郑童宜 27

理想建筑安全通风设计及其量化评价研究

李永强，陈福浩，黄瑶瑶 33

三阶贯通 • 三堂联动 • 三圈协同：工程计量计价类职教金课建设与实践

王玉合，袁　俊，柴　盼，罗珍妮 45

城市热岛对城市建筑能耗影响的相关研究文献计量分析

刘亚南，邹春阳，蔡贤云，赖小红

（重庆交通大学 建筑与城市规划学院，重庆 400074）

摘　要：在国家“双碳”目标背景下，城市热岛效应（UHI）及其对城市建筑能耗的影响备受关注。以 Web of Science 数据库中城市热岛效应和城市建筑能耗相关的期刊论文为研究对象，使用 CiteSpace 与 VOSviewer 软件，通过文献计量学方法，系统探讨了城市热岛效应与城市建筑能耗的相互关系。研究表明，城市热岛效应的影响因素研究主要集中于城市绿化、城市形态、冷表面、水体和城市通风 5 个方面，其对城市建筑能耗的影响研究则聚焦于制冷与供暖影响、季节性差异、昼夜差异、地域差异及建成环境差异 5 个方面。通过分析相关文献，进一步探讨了城市热岛效应的成因、影响因素及其对城市建筑能耗的具体影响，并提出了未来研究的方向与建议。

关键词：城市热岛效应；城市建筑能耗；文献计量

中图分类号：TU111　　**文献标识码：**A

Bibliometric Analysis of Research on the Correlation between Urban Heat Island and Urban Building Energy Consumption

LIU Yanan, ZOU Chunyang, CAI Xianyun, LAI Xiaohong

(College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Under the national "dual carbon" goals, the urban heat island effect (UHI) and its impact on urban building energy consumption have attracted much attention. Taking the journal papers related to the urban heat island effect and urban building energy consumption in the Web of Science database as the research object, this study used CiteSpace and VOS viewer software and adopted bibliometric methods to systematically explore the interrelationship between the urban heat island effect and urban building energy consumption. The research shows that the studies on the influencing factors of the urban heat island effect mainly focus on five aspects: urban greenery, urban morphology, cold surfaces, water bodies, and urban ventilation. The research on its impact on urban building energy consumption focuses on five aspects: the impact on cooling and heating, seasonal differences, diurnal differences, regional differences, and differences in the built environment. By analyzing the relevant literature, this study further explores the causes, influencing factors, and specific impacts of the urban heat island effect on urban building energy consumption, and puts forward suggestions for future research directions.

Keywords: urban heat island effect; urban building energy consumption; bibliometric analysis

在 2020 年 9 月举行的联合国大会上，中国政府承诺“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”。据统计，2019 年我国建筑行业运营阶段能耗占全国总能耗的 21.2%，碳排放量占全国总排放量的 21%[1]。从全球范围看，城市及建筑领域消耗了超过 2/3 的最终能源，贡献了超过 70% 的碳排放量[2]。随着全球城市化进程的持续推进，建筑领域能耗预计将进一步上升[3]。因此，降低建筑能

收稿日期：2025 年 9 月 28 日

基金项目：2025 重庆市社会科学规划培育项目（2025PY37）

第一作者：刘亚南(1987—)，男，博士，副教授。E-mail：lyn3620@cqjtu.edu.cn。

耗、落实城市建筑节能，已成为世界各国共同面临的核心挑战，也是我国实现可持续城市建设与“双碳”目标的关键举措。现有研究表明，城市热岛效应（Urban Heat Island effect，UHI）作为城市化进程中典型的气候环境问题，对城市建筑能耗调控具有不可忽视的作用[4-6]。具体而言，其影响呈现多维度特征：一方面，通过提升城市区域夏季平均气温与极端高温频次，显著增加建筑空调系统的运行负荷与能耗需求；另一方面，虽可能降低冬季部分区域的基础供暖需求，但城乡热力环境的剧烈差异会加大城市建筑供暖系统的动态调节难度、降低能源利用效率，最终对建筑总能耗的稳定控制造成负面影响[7]。需要注意，影响强度与作用路径在城乡梯度上差异显著，这是因为城市核心区下垫面硬化率高、人为热排放集中、绿地水体覆盖率低，其建筑能耗受热岛效应的扰动程度远高于郊区及乡村[8]。因此，研究 UHI 对城市建筑能耗的影响机制，可为城市空间形态优化、绿地系统布局、建筑节能设计等规划实践提供精准的理论支撑与科学依据，助力实现气候适应性城市与低能耗建筑的协同发展目标。

1 研究内容

1.1 UHI 及其影响因素

UHI 是指森林砍伐、城市发展、人口增长和温室气体排放等人类活动，导致城市区域的气温高于周边农村地区的气候现象。联合国的报告显示，2010—2020 年，非洲、亚洲、拉丁美洲等地区的大都市迁入居民超过 6 000 万人[9]。城市化进程的加速推动了人口集聚，不仅重塑了城市空间结构，更催生了对住房、交通路网及公共服务配套等基础设施的迫切需求。为满足人口增长带来的功能承载需求，大规模基础设施规划与建设随之开展，但此类活动往往伴随城市下垫面的剧烈改变。例如，硬化路面、高密度建筑屋顶逐步取代自然绿地与水体，同时交通尾气排放、建筑施工散热及基础设施运行产生的人为热显著增加。城市人口密度和人类活动的增加，既扩大了建筑能耗需求，又加剧了 UHI[10]；由基础设施建设和人口增长引发的环境变化，共同构成 UHI 加剧的关键驱动因素：下垫面硬化降低了地表蒸散散热能力，人为热排放则进一步抬升区域气温，两者叠加导致城市核心区与周边郊区温差持续扩大，UHI 的强度与影响范围均显著提升。由于 UHI 已不再局限于气候学领域，而是直接关联城市人居舒适度、建筑能源消耗效率及区域生态系统稳定性，其逐渐跨越单一学科边界，成为城市规划、环境治理与可持续发展领域共同关注的核心议题。

1.2 UHI 对城市建筑能耗的影响

城市建筑能耗是城市范围内各类建筑全生命周期消耗的能源总和，是城市总能耗的核心组成部分，主要集中于运营维护阶段，涵盖采暖、空调、通风、照明、电梯运行及各类生活办公用电等。

UHI 引发的温度变化，会直接影响建筑采暖和空调能耗。一项全球研究的综述报告显示，UHI 可能导致建筑冷却能耗的中位数增加 19.0%，供暖能耗中位数减少 18.7%[8]。城市气候本身会对建筑能耗产生影响，且在不同建筑气候区中，UHI 对城市建筑能耗的影响程度存在差异[11]。此外，UHI 对建筑能耗的影响还受到城市规模、土地利用方式、地形地貌、植被覆盖率、城市化率和工业率、季节变化等气象与人为因素的共同作用[12]。

本文系统回顾了国际上 UHI 与城市能耗关联性的研究进展，梳理了其学术脉络与发展趋势，并在此基础上对未来两者关联性研究提出深入思考与启示。

2 研究现状

2.1 数据获取及分析方法

本文的文献来源于 Web of Science 数据库，检索时间为 2000 年 1 月至 2024 年 12 月。为获取全面的文献资料，采用高级检索方式，以（“urban heat island” OR “HEAT-ISLAND” OR “UHI” OR “Heat island” OR “surface urban heat island”）AND（“building energy consumption” OR “Energy consumption” OR “urban energy”）为检索式筛选文献，并结合人工筛选方式排除与 UHI 和城市建筑能耗无关的文献，最终得到符合要求的外文文献 945 篇，文献主题涵盖了 UHI 及其与城市建筑能耗的相互作用机制。

为开展系统综述分析，本文运用 CiteSpace 和 VOSviewer 两款文献分析工具，对 UHI 与城市建筑能耗等相关领域的研究现状进行深入分析。其中，CiteSpace 作为一种广泛应用于文献可视化分析的软件，在当前科研领域内较为流行。其核心优势在于能通过量化分析特定领域的科学文献，揭示研究新趋势与动态，进而梳理出该领域的研究进展、关键人物、现状及前沿转向。

2.2 文献发表数量趋势分析

2.2.1 城市热岛领域期刊文献年发文量统计

研究采用 Excel 工具对 945 篇英文文献的年发文量进行统计，城市热岛领域期刊文献年发文量统计如图 1 所示。2000—2024 年，UHI 对城市建筑能耗影响的文献发表数量整体呈逐步上升趋势，表明该领域研究热度近年来持续增长。由图 1 可知，2000—2010 年，核心期刊年发文量不超过 10 篇，原因可能是当时计算机模拟软件和气象观测技术尚未成熟；2010 年后，该领域核心文献年发文量不断增长，并于 2023 年达到 110 篇，发文量比往年显著增加，原因可能是 2010 年后学界对 UHI、建筑能耗、建筑节能等的研究处于快速发展阶段，全球范围内对环境保护的日益重视也促进了该领域的进步；2020 年后，该领域的发展趋于稳定，可能是由于研究逐步走向成熟，理论基础研究逐渐饱和。

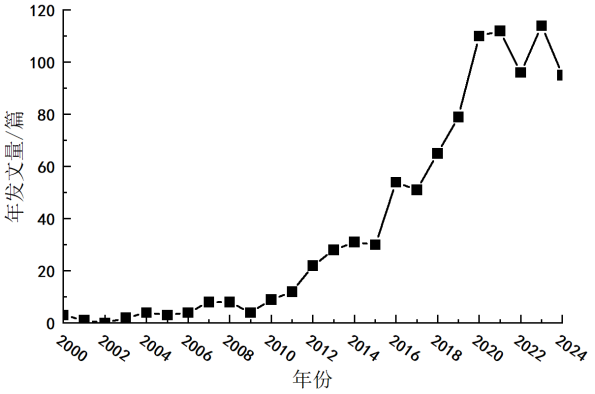


图 1 城市热岛领域期刊文献年发文量统计

Fig.1 Statistics of the annual publication volume of journal articles in the field of urban heat island

2.2.2 发文核心期刊分析

城市热岛领域主要发文期刊统计如图 2 所示，可见《ENERGY AND BUILDINGS》是该领域发文量最高的期刊，共 126 篇；其次为《SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY》《BUILDING AND ENVIRONMENT》《SUSTAINABILITY》《URBAN CLIMATE》，排名前 5 的期刊发文数量占核心文献总数的 39.2%。

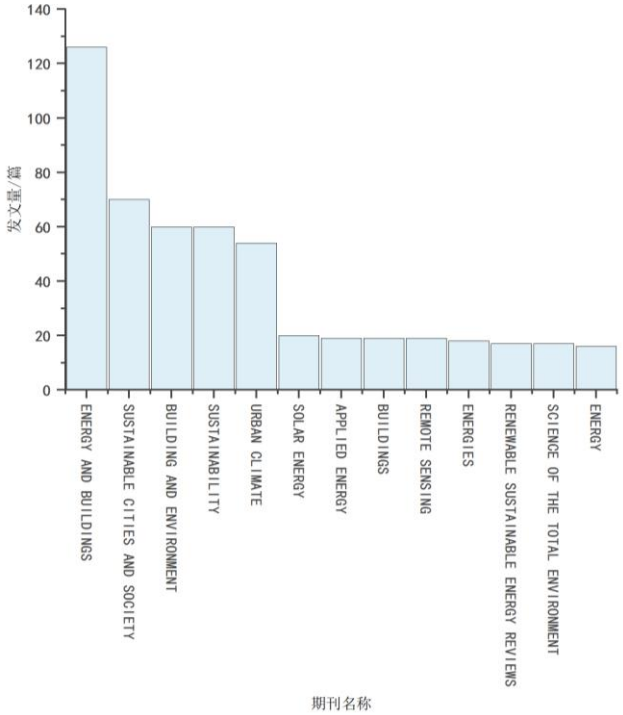


图 2 城市热岛领域主要发文期刊统计

Fig.2 Statistics of the main publishing journals in the field of urban heat island

2.2.3 发文作者分析

本文运用 CiteSpace 工具对 945 篇相关文献的作者发文量进行筛选与可视化分析，设置个人发文量＞5，时区为 2000—2024 年。城市热岛领域作者发文网络如图 3 所示。

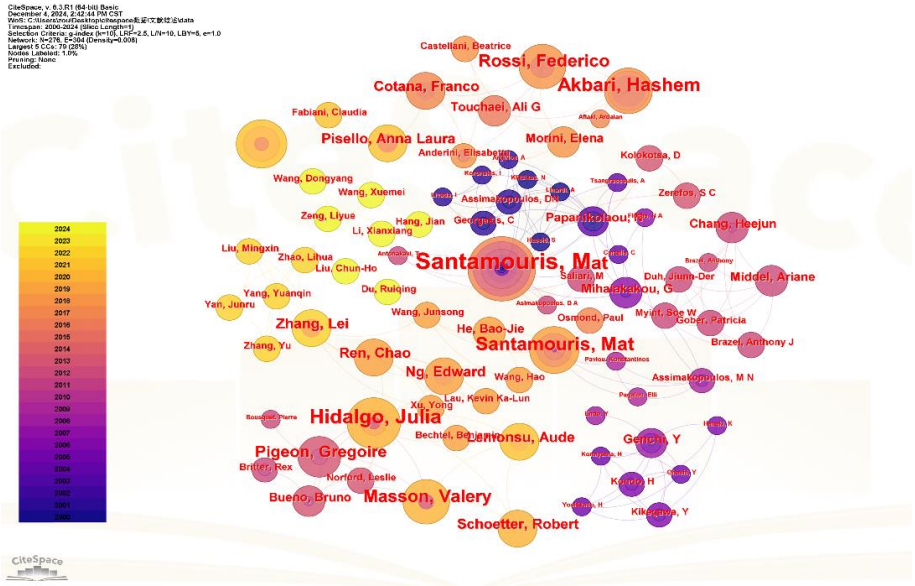


图 3　城市热岛领域作者发文网络

Fig.3　Shows the author Posting network in the field of urban heat island

由图 3 可知，Santamouris, Matthaios 在该领域发文量最高（13 篇），主要研究太阳能对城市热环境的影响和建筑节能，并结合卫星遥感和地面数据探索城市地区的热环境及高温缓解策略；其次为 Hidalgo, Julia（8 篇），其主要探讨了城市气候学在运营、城市规划中的应用，以及气候变化适应与缓解策略，旨在推动气候问题纳入城市政策；Akbari, Hashem 以 7 篇发文量紧随其后。总体而言，该领域学者通常以个体或团队形式开展研究，同时存在部分跨团队合作。

2.2.4 发文机构分析

研究使用 CiteSpace 软件对 945 篇文献的发表机构进行数据可视化分析，得到城市热岛领域主要研究机构关系，如图 4 所示。

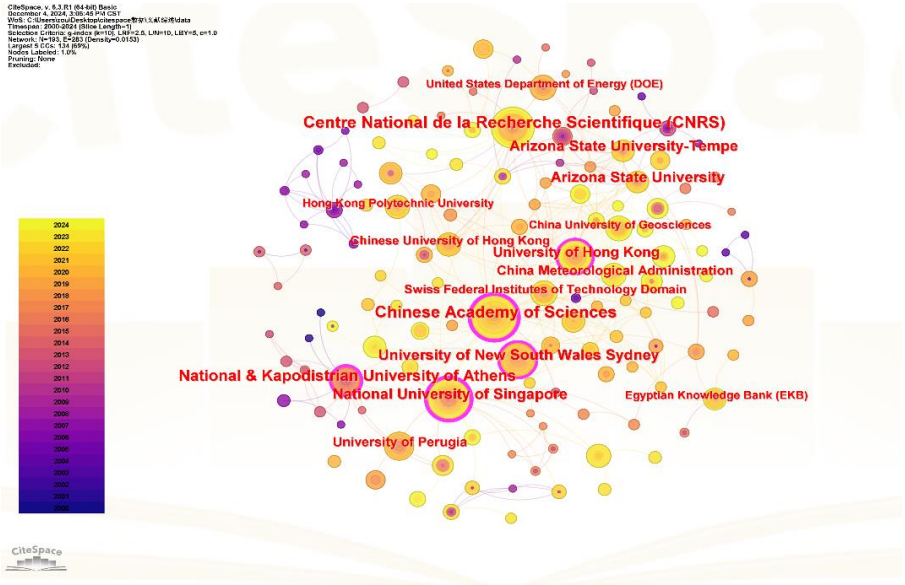


图 4　城市热岛领域主要研究机构关系

Fig.4　Shows the relationship among the main research institutions in the field of urban heat island

可视化图谱以发文量 5 篇为界限，时区为 2000—2024 年。由图 4 可知，在统计的相关文献中，发表相关文献＞25 篇的机构共 7 个；图中节点圆点越大表示机构发文量越多，其中法国国家科学研究中心（Centre National de la Recherche Scientifique）和中国科学院（Chinese Academy of Sciences）发文量最高，均为 38 篇；其次为雅典国立和卡波季斯特里安大学（National & Kapodistrian University of Athens）、新南威尔士大学（University of New South Wales Sydney）、亚利桑那州立大学（Arizona State University）及新加坡国立大学（National University of Singapore），发文量分别为 30、27、26 及 25 篇。图 4 中连线表示机构之间存在合作关系，提示各机构应注重实践和理论结合，推动研究院所、高等院校与相关企业加强交流合作，以促进研究者能力提升，挖掘更多新颖的研究方向，产出更具价值的研究成果。

2.3 研究内容及发展趋势

2.3.1 研究热点分析

本文采用 VOSviewer 工具对 945 篇文献的关键词进行可视化共现分析，得到城市热岛领域的关键词聚类，如图 5 所示。在进行可视化分析时，节点尺寸与关键词出现频次正相关，节点越大表明关键词重复次数越多，反映了该聚类研究的中心议题与主要论点；聚类颜色不具有时间维度，仅代表分类结果，每个聚类均以出现频率最高的研究热点为代表，这些热点可能位于聚类中心或边缘。由图 5 可知，UHI 和城市能耗研究主要围绕城市热岛展开，其中“能源消耗”“模拟”和“热舒适性”等术语提及频次最高，是该领域的核心研究焦点。聚类图不仅展现了研究的关键议题，也在一定程度上反映了学科的发展趋势。基于聚类分析的结果，本文对 UHI 与城市建筑能耗领域的研究热点进行了归纳。

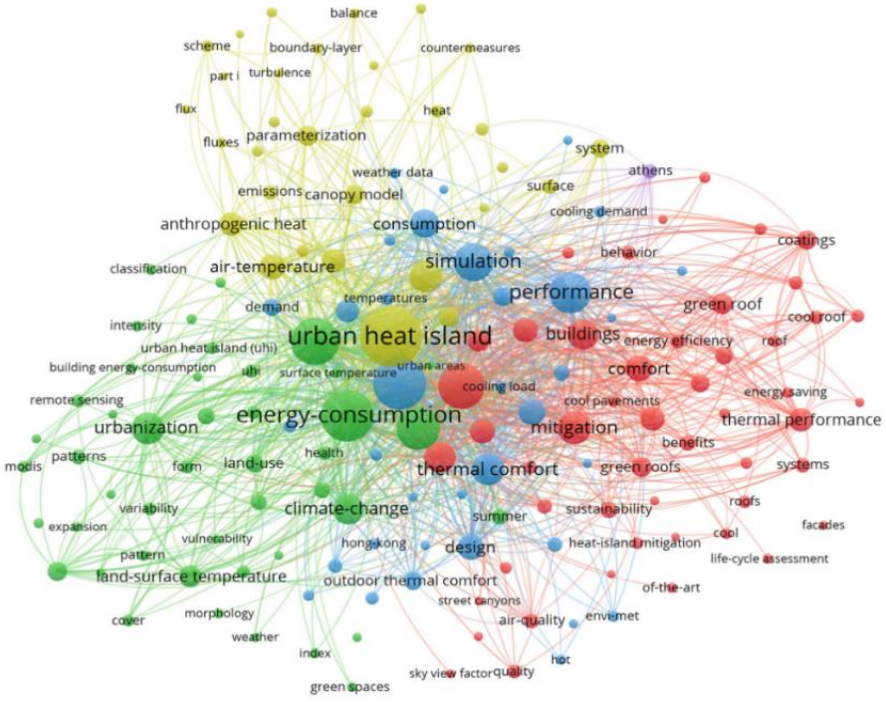


图 5 城市热岛领域的关键词聚类

Fig.5 Keyword clustering in the urban heat island field

2.3.1.1 UHI 的影响因素研究

通过对 945 篇文献的梳理，本文将 UHI 的重要影响因素总结为城市绿化、城市形态、冷表面、水体和城市通风 5 类。

（1）城市绿化

建筑物和道路等人造城市用地通常被不透水面覆盖，这类表面主要通过减少蒸发冷却、增加热量积累和传递、降低空气流动来加剧 UHI[13]；城市植被可清洁空气、调节气温、调控局部气候，维系城市生态系

统的健康[14]。大量研究评估了潜在的城市绿化措施，以减轻温度升高对人类健康的影响[15-16]；研究成果证实，城市公园、屋顶花园和立体绿化等城市绿化措施，至少能在局部范围产生降温效应。

城市绿色空间可有效降低环境温度、缓解空气污染、提升居民舒适度，并减少夏季空调能耗[14-16]。通过合理的景观设计，城市绿地能产生城市冷岛效应，有效缓解热岛现象[16]。Tan 等[14]的研究表明，植树遮阳及绿地面积较小的公园可显著降温并内部形成城市冷岛，且这种冷却效应能扩散至公园边界处，影响范围与周边环境特征密切相[17-18]。Yan 等[17]的研究发现，公园的降温效果可扩展至边界外约 1.4 km；Chang 等[18]指出，园区规模越大，城市冷岛效应越强。另有研究分析了城市绿地在减少区域冷却能耗中的潜在效益。香港地区研究显示，当城市绿地覆盖率达到 30%时，夏季日均能耗可至少减少 1 900 kW·h；南京地区的研究发现，炎热夏季的白天因城市绿地冷却效应，能源节省可达 1.3 万 kW·h[19]；Zhang 等[20]的研究发现，北京城市绿地的降温作用可显著降低 60%的净降温能耗，且该效果与城市区域结构类型紧密相关。城市绿地的冷却效果主要受植被类型、树冠密度、绿地规模及形态影响；Xiao 等[21]探讨了不同规模城市绿地对 UHI 的缓解作用，发现相较于大型绿地，小型绿地不仅未能发挥冷却和增湿效果，部分情况下甚至产生保温效应；不同形态绿地的城市冷岛强度排序为楔形绿地＞放射状绿地＞点状绿地＞条状绿地[22]。

屋顶绿化又称生态屋顶、绿色屋顶或屋顶花园，由于屋顶占城市总面积的 20%～25%，对城市环境具有显著的影响潜力[23]。北京、上海、重庆和香港等主要城市建筑物密集，实施屋顶绿化可有效提升城市绿化覆盖率、节省能源、降低噪声和空气污染[24-26]。尽管屋顶绿化的初期投资高于传统屋顶，但绿色植被能显著提高反照率并减少向建筑内部的热量传递，有效缓解了 UHI[27-28]。He 等[29]通过敏感性分析发现，增加基质层厚度或在非隔热建筑上应用屋顶绿化，可在夏季和冬季实现更佳的热效能；Tam 等[30]对 3 个案例的研究表明，屋顶绿化能显著降低顶层室内温度，降幅高达 3.4 ℃；He 等[29]发现，上海地区屋顶绿化的降温效果在夏季最强、冬季最弱。

垂直绿化又称垂直绿化系统（Vertical Greenery Systems，VGS），因体积小、美学价值高且具备缓解热岛效应的能力，在城市绿化中应用日益广泛。该系统可进一步对心理健康和声学防护、建筑围护结构保护及生物多样性维持产生积极影响[31-32]。根据结构特性，绿色立面和生命墙是 VGS 中应用最广泛的类型[31,33-35]，其中绿色立面可分为传统绿色立面（又称直接绿色立面）、双层绿色立面和生活墙系统 3 类[36-37]。

（2）城市形态

城市规划既能塑造城市结构、影响城市气候，又可通过优化策略调节城市气候以适应居民需求[38]。通过调整或优化城市形态[39-40]来减轻特定区域的 UHI，是城市规划与设计的重要环境价值体现，城市规模、城市布局和植被覆盖则是塑造城市热环境的核心形态要素。

Hu 等[40]指出，城市区域的紧凑度是决定 UHI 强度的关键因素，紧凑度提升通常伴随 UHI 增强，与离散形态不同，区域平均天空视域因子（Sky View Factor，SVF）较大的紧凑形态可能更有利于降低 UHI；Wei 等[41]研究了 SVF、容积率、场地覆盖率和建筑楼层数等形态参数对城市小气候的影响，发现 25%的建筑覆盖率是缓解夏季夜间 UHI 的最佳选择；Lin 等[42]的研究表明，较高的容积率、建筑密度和树木覆盖率有助于降低高密度城市区域白天的热岛强度；Tong 等[43]发现，高层建筑附近通常遮蔽性较好、SVF 较低，有助于降低白天的环境温度，但夜间高层建筑与低 SVF 形成的狭窄街道峡谷易积聚热量，可能加剧 UHI；Zhou 等[44]的研究指出，建筑密度是影响 UHI 强度的首要因素，其次为体积比和绿化覆盖率；Xu 等[45]的研究进一步证实，绿化覆盖率可解释约 50%的 UHI 变化；Yue 等[46]揭示了 UHI 与城市布局的关联性：一是在总建筑面积固定的情况下，建筑面积越小、分布越分散，UHI 越弱；二是单个地块形状复杂度较高，越能减轻 UHI。

（3）冷表面

UHI 与城市结构布局和物质构成密切相关，且城市形态一旦确立便具有持久性，改变难度较大。因此，可通过在城市地区采用浅色低热材料，缓解 UHI 对城市微气候的过热影响[47]。

冷屋顶是指具有较高太阳反射率和热辐射率的屋顶系统[48]，例如在重庆和广东地区，涂覆白色涂料的屋顶可分别降低表面温度约 20 和 17 ℃；在重庆、上海、武汉和广州等夏季高温城市，使用反射率为 0.6 的白色屋顶替代反射率为 0.2 的灰色屋顶，可有效减少建筑能耗。Han 等[49]发现，与传统材料相比，屋顶冷涂层可使室内温差超过 4.5 ℃；Lu 等[50]开发了一种结合相变材料与蓄冷材料的新型蓄冷屋顶，实地测试证实其具有出色的保温和隔热性能，并能达到降低温度峰值的效果。此外，冷屋顶作为缓解 UHI 的关键措施，已被广泛纳入绿色建筑评价体系。

除了屋顶，道路表面也会改变天然地面的原始热特性：路面温度升高会带动周围空气升温，进而促成 UHI[51-52]。因此，用冷路面替代传统路面以降低道路温度，可有效缓解 UHI；当前采用的降温措施主要包括提升太阳辐射反射率、增强蒸发作用、减少城市大气中的显热传递及改造路面结构[53-54]。与冷路面相关的技术分为反射路面、蒸发路面和热利用路面[53]。路面的反射率是评估其辐射反射性能的指标，与路面温度成反比[55]。需要注意，在高楼密集区域，反光路面的 UHI 缓解效果不及开阔街道[51]。Qin 等[56]提出，当城市峡谷高宽比低于 1.0 时应采用反光路面；Jiang 等[52]研制的太阳能反射涂层，可使沥青路面温度降低 8.5～9.5 ℃；Chen 等[57]的研究表明，高导热性的混凝土路面相较于传统混凝土，表面最高温度可降低 13 ℃。

（4）水体

水体在城市区域同样发挥着关键作用，其具有较大的热容量和较低的导热系数，可有效缓解 UHI[58]。城市水体的冷却效果被视为重要的生态调节服务，不仅有助于减少能源消耗、提升户外行人的热舒适度，还能形成城市冷岛[59-60]，具有多重潜在效益。

城市水体（如河流、湖泊和水库）是形成城市冷岛效应的关键要素之一[61]。Yang 等[58]的研究表明，在亳州区域，水域是夏季城市降温的主要因素；Wang 等[62]的研究发现，湿地对温度具有显著的调节作用，且越接近城市湿地，效果越显著；Xue 等[63]指出，长春市湿地的归一化制冷能力指数（Normalized Cooling Capacity Index，NCCI）是绿地的 42.3 倍，与其他水体相连的湿地 NCCI 值为孤立湿地的 6 倍，其中河流的降温效果尤为突出；Du 等[16]观察到，城市河流可影响周边气流，使河流附近的城市热岛强度（Urban Heat Island Intensity，UHII）维持在较低水平；Syafii 等[60]通过试验证实，人工池塘对城市热环境具有积极影响，且白天大表面积池塘的降温效果更显著；Xu 等[64]得出结论，水体中心区域的冷却效果最强，最高可达 0.8 ℃以上；Du 等[65]的研究还表明，由多面水体构成的城市冷岛效应，强度高于线性水体。

（5）城市通风

城市通风措施利用自然风力将郊区新鲜空气引入城市中心，是缓解 UHI 的重要手段之一[65-66]。这种通风不仅能促进热量散发，还对提高居住环境品质、降低空气污染和节能具有显著作用[66-67]。以深圳某新开发区为例，由于城市发展未遵循原定通风规划，风道受阻，进一步加剧了 UHI[68]；同时，结合我国城市地面气溶胶污染加剧、冬季雾霾频发，以及 UHI 与通风不畅的关联性，制定城市通风规划显得尤为迫切[67-69]。

Xu 等[70]基于典型气象条件下的日平均温度分布，分析了城市热岛与冷源的空间格局，并建议通过规划城市通风通道缓解 UHI；Su 等[67]针对新城区的城市通风廊道，明确了具体位置、数量及规划控制要求；Luo 等[68]以广西荔浦县为研究对象，从道路布局、建筑规划、绿地配置、开放休闲空间等多个维度，提出了改善城市通风的具体措施。Guo 等[71]针对大连市高密度城市扩张导致的风速下降问题，利用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）模拟工具评估了不同建筑形态的自然通风效能，结果表明：长条形公寓、高层大平台等围合结构不利于自然通风；而保留开放空间、规划通风通道、适度提升建筑高度、减少低层大平台、采用流线型建筑设计及缩减建筑立面面积等措施，可有效促进通风，减轻 UHI。此外，非均匀建筑高度在低密度区域通风效能较差，在高密度区域则相反[72]。

2.3.1.2 UHI 对城市建筑能耗的影响研究

通过对 945 篇文献的梳理，本文将 UHI 与城市建筑能耗的核心关联影响因素归纳为制冷与供暖影响、季节性差异、昼夜差异、地域差异及建成环境差异 5 类。

（1）制冷与供暖影响

UHI 对建筑能耗最直接的影响体现在制冷与供暖需求上。Li 等[8]的研究表明，UHI 可通过增加空间制冷需求和减少空间供暖需求，对建筑能耗产生显著影响；Tariku 等[7]发现，UHI 使总制冷能耗增加 23%，总供暖能耗降低 29%，整体对建筑总能耗产生负面影响；Tian 等[73]指出，UHI 对建筑能耗的影响，很大程度上取决于当地小气候、城市区域特征及建筑类型与属性，在以空调为主的城市，UHI 可能导致冷却能耗增加 10%～16%；Yang 等[74]根据锋面面积指数将我国 31 个主要城市的通风条件划分为 4 个等级，并分析了 5 个气候带城市的自然通风效果，发现改善通风可直接或间接减少城市能源消耗，通风良好区域的能源需求最高可降低 6.704%。Zhao 等[75]基于城市天气生成器（Urban Weather Generator，UWG）的计算结果，通过建筑能源建模（Building Energy Modeling，BEM）分析了 UHI 对建筑能源需求的直接与间接影响，结果表明：气温升高使制冷需求平均增加 16%～46%，供暖需求减少 8%～17%；与独立建筑相比，周围建筑的遮阳作用使供暖需求增加 7%～36%，制冷需求减少 14%～48%，且遮阳的直接影响在双鸭山、徐州和福州尤为突出，分别占建筑能耗变化的 50%、80%和 57%。

（2）季节性差异

季节变异是评估 UHI 影响的关键因素：夏季 UHI 会加剧冷却负荷，冬季则可能通过减少供暖需求实现节能，尤其在供暖主导的气候区，其净效应取决于主导气候模式。在我国不同气候区，UHI 使空间制冷需求增加 16%～46%，供暖需求减少 8%～17%，且季节互动存在显著的区域差异[75]。该研究通过 UWG 模拟证实，供暖主导季节受益于 UHI，而制冷主导季节的能耗需求会因 UHI 进一步放大。在美国中西部，当前 UHI 使制冷能耗强度增加 7%，供暖能耗减少 2.7%；预计到 2080 年，受未来气候影响，制冷需求可能增加 154%，UHI 将额外使夏季制冷需求增加 6.2%，冬季供暖需求减少 3.1%[76]，这些结果凸显了季节不对称性，即夏季升温对能耗的影响更显著。

Du 等[77]借助遥感数据、统计数据和气象数据，评估了长江三角洲城市群（Yangtze River Delta Urban Agglomeration，YRDUA）的地表 UHI 及其与土地类型、气象条件、人为热源和城市规模的关系，发现 YRDUA 的 UHI 强度在夏季最强（0.84 ℃），其次为秋季（0.81 ℃）、春季（0.78 ℃），冬季（0.53 ℃）最弱；白天的 UHI 强度（0.98 ℃）高于夜间（0.50 ℃）；人口密度与 UHI 强度相关性不显著，能耗、平均气温和城市面积与 UHI 强度呈显著正相关，平均风速和平均降水量与 UHI 强度呈显著负相关。

（3）昼夜差异

昼夜模式对 UHI 产生细微影响，因城市热容量，夜间热量释放缓慢，UHI 强度通常夜间更强，这可能延长夜间制冷需求或减少供热需求，且能耗与 UHI 的相关性夜间更强。例如，在首尔，夜间 UHI 每增加 0.5 K，冷却能耗增加 0.69～1.51 kW • h/m²，而白天仅增加 0.17～0.38 kW • h/m²，突显了夜间 UHI 对能耗波动的主导作用[78]。Cao 等[79]对我国地表 UHI 的研究显示，夏季白天地表 UHI 强度高于夜间，但三维城市形态对夜间温度的影响更显著，导致高密度区夜间能耗潜在增加；Mathew 等[80]对印度城市的分析发现，地表 UHI 在夜间更显著，白天可能呈负值，说明时间维度的观察对能耗研究至关重要。

（4）地域差异

北方城市冬季 UHI 可能减少供暖需求，形成正面影响；南方城市夏季制冷需求激增，受 UHI 的负面影响更突出，且 UHI 强度对能耗的影响随纬度、气候带不同而变化。Cao 等[81]的研究表明，在我国寒冷气候区，城市干燥岛（Urban Dry Island，UDI）使供暖期显热负荷降低 15.1%，但制冷期增加 4.6%，南方温暖区则呈相反趋势；Magli 等[82]的全球视角研究显示，冬季城市供暖需求比乡村低 30%～50%，北方城市受益更显著，南方城市夏季制冷需求翻倍；Ma 等[83]基于香港一个城市和一个农村站点长达 30 年的实测气象数据，结合典型气象年（Typical Meteorological Year，TMY）数据，利用 EnergyPlus 进行模拟，研究发现高层写字楼在湿热环境下的能耗对温度和湿度变化的敏感度高于寒冷干燥环境。

（5）建成环境差异

建成环境因素会调制 UHI 与能耗的关联：相同 UHI 强度下，大规模城市由于热惯性更大，能耗变化更剧烈。Hirano 等[84]研究指出，UHI 增加了东京都市区的商业能耗，但降低了住宅能耗，能源消耗总体呈净减少趋势，这表明 UHI 缓解措施应重点针对商业建筑集中的市中心，而在住宅区引入缓解措施前需进行充分评估；Assimakopoulos 等[85]借助 TRNSYS 模型，计算了大雅典地区 20 个不同地点夏季典型建筑的能耗，发现 UHI 显著影响了建筑物的热行为，郊区的冷负荷成本和能源成本远低于城区；Meng 等[86]对天津地区的研究证实，与郊区和近郊区相比，城市中心年平均供暖强度分别下降 8.08%和 10.30%，气温分别上升 1.46 和 1.90 ℃，且城市中心与郊区的小时平均供暖强度（HMHI，Hourly Mean Heating Intensity）差异在早上 07：00 达到峰值，HMHI 从郊区到城市中心逐渐减小。

Lu 等[87]发现，增加城市绿地总面积和聚集水平，可有效缓解研究区 UHI 的负面影响；Spyrou 等[88]指出，在半干旱地区 200 m×200 m 的城市街区，广泛种植植物，并将建筑面积减少约 10%，可使区域气温下降 1.5 ℃；Gao 等[89]基于北半球 17 座大型工厂的研究，探讨了周边景观对地表工业热岛效应的影响，结果表明不透水表面覆盖率是影响环境地表温度的主导因素，工业类型和纬度为次要影响因素，且景观斑块大小和宽度相较于厂房尺寸，对地表温度冷却速度有显著影响；Shen 等[90]对比了西湖和西溪湿地周边典型的办公楼在不同生态资源开发场景下的制冷能耗，发现若将两块湿地均改造为建筑施工区，则城市平均气温与热强度将增加 0.5 ℃以上，且环境温度每升高 0.5 ℃，夏季典型办公楼的制冷需求将增加 10.8%；Du 等[91]的研究指出，各研究年度平均地表温度从高到低依次为建设用地、裸地、绿地、农业用地和湿地，其中建设用地对 UHI 的贡献最大，湿地与绿地则是缓解 UHI 的核心土地类型。

城市建筑能耗作为人为热排放的核心来源，与 UHI 形成复杂的双向反馈机制。建筑能耗通过直接废热排放与间接环境干预双重路径作用于 UHI 演化：一方面，暖通空调系统运行产生的瞬时高负荷热量直接抬升局地气温，多项研究表明，建筑空调系统等冷却设备产生的热排放可使城市局部气温升高 0.5～2.0 ℃，导致 UHI 峰值增加 5%～10%，从而提升峰值电力需求并使整体冷却能耗增加 20%～35%[8,92]；另一方面，高能耗建筑往往伴随高密度不透水面与低反照率围护结构，削弱城市蒸散发冷却效应，最终形成能耗-热岛-更高能耗的正反馈循环。

2.3.2 研究趋势分析

本文利用 CiteSpace 工具对 945 篇英文文献进行关键词突变分析，形成城市热岛领域研究热点突变图，如图 6 所示。结合图 6，将 UHI 对城市能耗影响的研究热点划分为 3 个发展阶段。

（1）2000—2006 年：突现关键词主要为“参数化”“区域”“边界层”等，表明此阶段研究主要基于当时技术对 UHI 的粗略分析。

（2）2007—2020 年：突现关键词集中于“能量平衡模型”“冷屋面”“绿色屋面”和“微气候”等，表明研究者开始利用更先进的计算机模拟软件与材料技术，对 UHI 和城市能耗开展更深入细致的研究。

（3）2021—2024 年：突现关键词主要为“热环境”“城市设计”和“热浪”等，研究热点进一步深化，这与全球“碳中和”目标推进、我国 2020 年提出的“2030 碳达峰、2060 碳中和”目标，以及学界开始关注全产业链、全生命周期节能降碳密切有关。

总体而言，“土地利用”和“地区”等关键词贯穿研究全程；从整体趋势来看，UHI 对城市能耗研究的深化既依赖计算机技术的发展水平（更多高精度模拟软件投入应用），又得益于全球对环境保护和绿色低碳领域的重视。

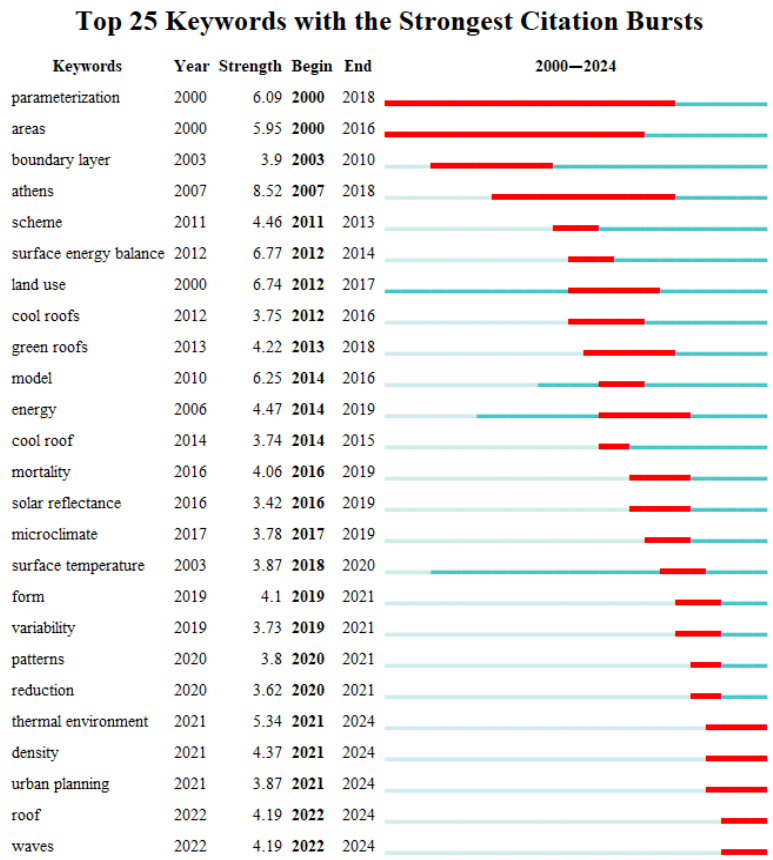


图 6 城市热岛领域研究热点突变图

Fig.6 A sudden change map of research hotspots in the field of urban heat islands

3 挑战和未来研究

3.1 挑战

UHI 的研究主要面临两方面挑战。一方面，缺乏具有高空间分辨率和大空间覆盖范围的数据，如 UHI 有无对比的温度数据、建筑详细特征数据等。以往研究报告显示，城市热岛对能耗的影响呈现城市中心最强、向边缘递减的空间模式，但这种模式主要基于有限数量的观测点，缺乏对空间变化细节的揭示；即便采用地统计技术将观测点数据在空间上插值至全城，但空间细节仍局限于热岛影响的光滑表面[93]。另一方面，缺乏大尺度模型研究方法。现有研究多集中于重点大型城市热环境的时空变化及驱动机制，对大规模城镇地表城市热岛的分析尤为不足。因此，开发并应用可跨越不同城市规模和气候区的大尺度模型，对深入理解 UHI 及其能耗影响具有重要意义。

3.2 城市热岛缓解策略

（1）优化城市绿化。植被通过蒸腾和遮荫作用降低环境温度，是缓解 UHI 的关键手段，城市公园、绿色屋顶等绿化措施均能有效降温。设计时，需综合考虑公园面积、形状、植被覆盖度、植物种类、硬质铺装比例等因素，以提升降温效果。

（2）推广“冷材料”应用。“冷材料”是指高反射率、高红外辐射率的材料，通过减少热量吸收、增加热量释放降低表面温度，主要包括高反射率/高辐射率冷材料、含相变材料的冷色调涂料及热敏变色材料等。在城市建筑屋顶和道路中广泛应用此类材料，是缓解 UHI 的有效策略。

（3）合理规划土地利用。城市土地利用类型与布局直接影响城市气候，植被覆盖率高的区域地表温

度较低，分散布局比集中布局更有助于缓解 UHI；可利用地理信息系统（Geographic Information System，GIS）空间分析技术与遥感影像进行地表温度的反演分析，明确土地利用与 UHI 的关联。

（4）构建通风廊道。城市通风通道可提升空气流动性，避免废热再循环，对缓解 UHI 具有积极作用。设计时需综合考虑城市地理条件、气候特点和建筑分布，根据城市的实际情况制定规划方案。

（5）升级空调系统。引入新型空调系统和冷凝热回收技术，可有效减少建筑向环境的排热量，降低周边大气温度，既能减轻 UHI，又能提升建筑能效。

3.3 对相关研究的启示

在学术领域，UHI 与城市能耗关联性研究已历经数十年，形成较为系统全面的研究体系。该体系深入探讨了不同场景下 UHI 与城市能耗的耦合机制及量化关系。基于此，研究者们开发了多种城市能耗评估模型，并将其应用于城市能源规划与节能城市设计领域，初步构建了从理论到实践的框架，用以研究城市形态与建筑能耗的关联性，具有重要的参考意义和借鉴价值。

然而，受气候、地理、文化背景及治理体制差异的影响，我国与西方国家在该领域的研究现状存在显著不同。此外，气候条件和用户用能行为的差异也导致建筑用能特征不同。因此，有必要开展针对性的本土化研究，深入探讨 UHI 与城市能耗的关联性，推动城市建筑的节能发展。

4 结论

尽管城市热岛对建筑能耗的作用机理与总体方向已获广泛共识，但在不同气候区、城市形态与时段尺度下，定量影响的研究仍存在证据不足的问题。既有研究多采用物理模型结合城乡站点气温差的方式表征典型城市的热岛及其空间变化，但受限于站点稀疏、城市内部异质性强及能耗数据可得性差等问题，该路径难以准确刻画热环境与建筑能耗的跨尺度耦合强度及时空演变规律，也无法直接支撑情景评估与治理决策。因此，未来研究中应建立城市尺度高精度温—湿—风—辐射与建筑存量多源数据底座，并推动数据开放共享；同时，构建气候变化—城市扩张—UHI—建筑能耗的多尺度耦合模型与标准化评估框架，加强对发展中国家与快速城镇化地区的实证与对比分析，将健康、韧性、电力峰荷管理及碳减排目标协同纳入综合评价与决策支持体系，强化从模型构建到工程落地的闭环验证与经济性分析，并开展分区、分时的精细化治理研究。

参考文献

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Research Center for Building Energy Efficiency, Tsinghua University. Annual development research report on building energy conservation in China[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[2] RIBEIRO H V, RYBSKI D, KROPP J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 3204.

[3] HUO T F, MA Y L, CAI W G, et al. Will the urbanization process influence the peak of carbon emissions in the building sector? A dynamic scenario simulation[J]. Energy and Buildings, 2021, 232: 110590.

[4] STRØMANN-ANDERSEN J, SATTRUP P A. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8): 2011-2020.

[5] KO Y, RADKE J D. The effect of urban form and residential cooling energy use in Sacramento, California[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2014, 41(4): 573-593.

[6] LI C S, SONG Y, KAZA N. Urban form and household electricity consumption: A multilevel study[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 181-193.

[7] TARIKU F, GHARIB MOMBENI A. ANN-based method for urban canopy temperature prediction and building energy simulation with urban heat island effect in consideration[J]. Energies, 2023, 16(14): 5335.

[8] LI X M, ZHOU Y Y, YU S, et al. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings[J]. Energy, 2019, 174: 407-419.

[9] TACOLI C, MCGRANAHAN G, SATTERTHWAITE D. Urbanisation, rural-urban migration and urban poverty[M]. London: Human Settlements Group, International Institute for Environment and Development, 2015.

[10] KOLOKOTRONI M, GIRIDHARAN R. Urban heat island intensity in london: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer[J]. Solar Energy, 2008, 82(11): 986-998.

[11] WANG S P, WANG Z H, ZHANG Y C, et al. Characteristics of urban heat island in China and its influences on building energy consumption[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15): 7678.

[12] TZAVALI A, PARAVANTIS J P, MIHALAKAKOU G, et al. Urban heat island intensity: A literature review[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2015, 24(12): 4537-4554.

[13] ONISHI A, CAO X, ITO T, et al. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9(4): 323-332.

[14] TAN Z, LAU K K, NG E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment[J]. Energy and Buildings, 2016, 114: 265-274.

[15] XU X Y, SUN S B, LIU W, et al. The cooling and energy saving effect of landscape design parameters of urban park in summer: A case of Beijing, China[J]. Energy and Buildings, 2017, 149: 91-100.

[16] DU X Y, LI Q. The effect of Pearl River on summer urban thermal environment of Guangzhou[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1785-1791.

[17] YAN H, WU F, DONG L. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 882-891.

[18] CHANG C R, LI M H. Effects of urban parks on the local urban thermal environment[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(4): 672-681.

[19] KONG F H, SUN C F, LIU F F, et al. Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer[J]. Applied Energy, 2016, 183: 1428-1440.

[20] ZHANG B, XIE G D, GAO J X, et al. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China[J]. Building and Environment, 2014, 76: 37-43.

[21] XIAO X D, DONG L, YAN H N, et al. The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 428-439.

[22] DU H Y, CAI Y L, ZHOU F Q, et al. Urban blue-green space planning based on thermal environment simulation: A case study of Shanghai, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 106: 105501.

[23] BESIR A B, CUCE E. Green roofs and facades: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 915-939.

[24] KOKOGIANNAKIS G, TIETJE A, DARKWA J. The role of green roofs on reducing heating and cooling loads: A database across Chinese climates[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 604-610.

[25] WONG J K W, LAU L S K. From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong[J]. Habitat International, 2013, 39: 25-35.

[26] LUO H B, HUANG B, LIU X L, et al. Green roof assessment by GIS and google earth[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 2307-2313.

[27] CHEN C F. Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 51-58.

[28] KOKOGIANNAKIS G, DARKWA J. Support for the integration of green roof constructions within Chinese building energy performance policies[J]. Energy, 2014, 65: 71-79.

[29] HE Y, YU H, OZAKI A, et al. Long-term thermal performance evaluation of green roof system based on two new indexes: A case study in Shanghai area[J]. Building and Environment, 2017, 120: 13-28.

[30] TAM V W Y, WANG J Y, LE K N. Thermal insulation and cost effectiveness of green-roof systems: An empirical study in Hong Kong[J]. Building and Environment, 2016, 110: 46-54.

[31] OMRANY H, GHAFFARIANHOSEINI A, GHAFFARIANHOSEINI A, et al. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62: 1252-1269.

[32] WONG I, BALDWIN A N. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region[J]. Building and Environment, 2016, 97: 34-39.

[33] SAFIKHANI T, ABDULLAH A M, OSSEN D R, et al. A review of energy characteristic of vertical greenery systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 450-462.

[34] YIN H W, KONG F H, MIDDEL A, et al. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data[J]. Building and Environment, 2017, 116: 195-206.

[35] DAHANAYAKE K C, CHOW C L, GUO L H. Selection of suitable plant species for energy efficient Vertical Greenery Systems (VGS)[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 2473-2478.

[36] MEDL A, STANGL R, FLORINETH F. Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement[J]. Building and Environment, 2017, 125: 227-239.

[37] SEYAM S. The impact of greenery systems on building energy: Systematic review[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26: 100887.

[38] ZHAO C J, FU G B, LIU X M, et al. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China[J]. Building and Environment, 2011, 46(5): 1174-1183.

[39] ZHOU X F, CHEN H. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1467-1476.

[40] HU Y P, WHITE M, DING W W. An urban form experiment on urban heat island effect in high density area[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 166-174.

[41] WEI R H, SONG D X, WONG N H, et al. Impact of urban morphology parameters on microclimate[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 142-149.

[42] LIN P Y, LAU S S Y, QIN H, et al. Effects of urban planning indicators on urban heat island: A case study of pocket parks in high-rise high-density environment[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 48-60.

[43] TONG S S, WONG N H, JUSUF S K, et al. Study on correlation between air temperature and urban morphology parameters in built environment in northern China[J]. Building and Environment, 2018, 127: 239-249.

[44] ZHOU Y, ZHUANG Z, YANG F, et al. Urban morphology on heat island and building energy consumption[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 2401-2406.

[45] XU D, ZHOU D, WANG Y P, et al. Field measurement study on the impacts of urban spatial indicators on urban climate in a Chinese basin and static-wind city[J]. Building and Environment, 2019, 147: 482-494.

[46] YUE W Z, LIU X, ZHOU Y Y, et al. Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study

in China mega-cities[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 1036-1046.

[47] SHI Y, SONG Z, ZHANG W, et al. Physicochemical properties of dirt-resistant cool white coatings for building energy efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion, 2013, 110: 133-139.

[48] ZHANG L, FUKUDA H, LIU Z H. The value of cool roof as a strategy to mitigate urban heat island effect: A contingent valuation approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 770-777.

[49] HAN A J, YE M Q, LIU L L, et al. Estimating thermal performance of cool coatings colored with high near-infrared reflective inorganic pigments: Iron doped $La_2Mo_2O_7$ compounds[J]. Energy and Buildings, 2014, 84: 698-703.

[50] LU S L, CHEN Y F, LIU S B, et al. Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials[J]. Energy and Buildings, 2016, 127: 159-169.

[51] CHEN J Q, WANG H, ZHU H Z. Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 739-748.

[52] JIANG L, WANG L C, WANG S Y. A novel solar reflective coating with functional gradient multilayer structure for cooling asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 13-21.

[53] QIN Y H. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 445-459.

[54] LIU Y, LI T, PENG H Y. A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1119-1125.

[55] CHEN J, ZHOU Z, WU J T, et al. Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 46-57.

[56] QIN Y H. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements[J]. Energy and Buildings, 2015, 96: 86-94.

[57] CHEN J Q, CHU R X, WANG H, et al. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237: 117722.

[58] YANG L, QIAN F, SONG D X, et al. Research on urban heat-island effect[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 11-18.

[59] LI A N, DENG W, KONG B, et al. A comparative analysis on spatial patterns and processes of three typical wetland ecosystems in 3H area, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 315-332.

[60] SYAFII N I, ICHINOSE M, KUMAKURA E, et al. Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 34: 79-89.

[61] CHENG L D, GUAN D J, ZHOU L L, et al. Urban cooling island effect of main river on a landscape scale in Chongqing, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 47: 101501.

[62] WANG C Y, ZHU W P. Analysis of the impact of urban wetland on urban temperature based on remote sensing technology[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1546-1552.

[63] XUE Z S, HOU G L, ZHANG Z S, et al. Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data: Case study of cities of Northeast China[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 182: 92-100.

[64] XU X Y, LIU S M, SUN S B, et al. Evaluation of energy saving potential of an urban green space and its water bodies[J]. Energy and Buildings, 2019, 188: 58-70.

[65] HSIEH C M, HUANG H C. Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 57: 130-143.

[66] SU N, ZHOU D, JIANG X T. Study on the application of ventilation corridor planning in urban new area: A case study of Xixian new area[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 340-349.

[67] YANG L N, LI Y G. Thermal conditions and ventilation in an ideal city model of Hong Kong[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(5): 1139-1148.

[68] LUO Y W, HE J, NI Y L. Analysis of urban ventilation potential using rule-based modeling[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017, 66: 13-22.

[69] REN C, YANG R Z, CHENG C, et al. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan–The implementation in Chinese cities[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 182: 170-188.

[70] XU D, ZHOU D. Research on the planning methods of mitigating summer urban heat island effects among basin cities: A case study at Xi’an, China[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 248-255.

[71] GUO F, ZHU P S, WANG S Y, et al. Improving natural ventilation performance in a high-density urban district: A building morphology method[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 952-958.

[72] WANG W W, NG E, YUAN C, et al. Large-eddy simulations of ventilation for thermal comfort: A parametric study of generic urban configurations with perpendicular approaching winds[J]. Urban Climate, 2017, 20: 202-227.

[73] TIAN L, LI Y C, LU J, et al. Review on urban heat island in China: Methods, its impact on buildings energy demand and mitigation strategies[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 762.

[74] YANG J, WANG Y C, XUE B, et al. Contribution of urban ventilation to the thermal environment and urban energy demand: Different climate background perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148791.

[75] ZHAO Y M, DING X T, WU Z Y, et al. Impact of urban form on building energy consumption in different climate zones of China[J]. Energy and Buildings, 2024, 320: 114579.

[76] HASHEMI F, NAJAFIAN P, SALAHI N, et al. The impact of the urban heat island and future climate on urban building energy use in a Midwestern U.S. neighborhood[J]. Energies, 2025, 18(6): 1474.

[77] DU H Y, WANG D D, WANG Y Y, et al. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. Science of the Total Environment, 2016, 571: 461-470.

[78] SU M A, NGARAMBE J, SANTAMOURIS M, et al. Empirical evidence on the impact of urban overheating on building cooling and heating energy consumption[J]. iScience, 2021, 24(5): 102495.

[79] CAO S S, CAI Y L, DU M Y, et al. Seasonal and diurnal surface urban heat islands in China: An investigation of driving factors with three-dimensional urban morphological parameters[J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1121-1142.

[80] MATHEW A, KHANDELWAL S, KAUL N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities[J]. Energy and Buildings, 2018, 159: 271-295.

[81] CAO J F, LI M C, YANG X S, et al. The impact of urban dry island on building energy consumption is overlooked compared to urban heat island in cold climate[J]. Energy and Buildings, 2024, 320: 114655.

[82] MAGLI S, LODI C, LOMBROSO L, et al. Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption[J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2015, 6(1): 91-99.

[83] MA Y X, YU C. Impact of meteorological factors on high-rise office building energy consumption in Hong Kong: From a spatiotemporal perspective[J]. Energy and Buildings, 2020, 228: 110468.

[84] HIRANO Y, FUJITA T. Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo[J]. Energy, 2012, 37(1): 371-383.

[85] ASSIMAKOPOULOS M N, MIHALAKAKOU G, FLOCAS H A. Simulating the thermal behaviour of a building during summer period in the urban environment[J]. Renewable Energy, 2007, 32(11): 1805-1816.

[86] MENG F C, LI M C, GUO J, et al. Impact of urban heat island effect on building heating intensity in Tianjin, China[J]. International Journal of Global Warming, 2020, 21(1): 20.

[87] LU L L, WENG Q H, XIAO D, et al. Spatiotemporal variation of surface urban heat islands in relation to land cover composition and configuration: A multi-scale case study of Xi’ an, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2713.

[88] SPYROU G, IOANNOU B, SOULIOTIS M, et al. The adaptability of cities to climate change: evidence from cities’ redesign towards mitigating the UHI effect[J]. Sustainability, 2023, 15(7): 6133.

[89] GAO J F, MENG Q Y, ZHANG L L, et al. How does the ambient environment respond to the industrial heat island effects? An innovative and comprehensive methodological paradigm for quantifying the varied cooling effects of different landscapes[J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1643-1659.

[90] SHEN T, CHOW D H C, DARKWA J. Simulating the influence of microclimatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2013: ctt050.

[91] DU H Y, ZHOU F Q, LI C L, et al. Analysis of the impact of land use on spatiotemporal patterns of surface urban heat island in rapid urbanization, a case study of Shanghai, China[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1171.

[92] SANTAMOURIS M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 82: 100-113.

[93] SANTAMOURIS M, PAPANIKOLAOU N, LIVADA I, et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings[J]. Solar Energy, 2001, 70(3): 201-216.

硅藻新材料在未来建筑中的应用：场景驱动与规模化路径

张育新[1]，杜智岚[1]，王玉合[2]，王 春[3]

（1.重庆大学 材料科学与工程学院，重庆 400044；2.重庆建筑工程职业学院 城市治理学院，重庆 400072；3.重庆科技大学 管理学院，重庆 401331）

摘 要：硅藻材料凭借独特的二氧化硅骨架结构与表面活性特征，在推动建筑材料绿色低碳化与多功能化方面展现出巨大潜力。研究表明，硅藻基复合材料可高效吸附 CO_2 并调控环境湿度，在废水处理中去除氮、磷及有机污染物，并具备优异的抗菌除螨性能。硅藻与光子晶体或相变储能材料的复合进一步实现光学调控与热能管理，为建筑节能与环境舒适性提升提供了新途径。从场景培育与大规模应用的视角看，硅藻新材料的微纳米多孔结构、高比表面积与生态兼容性，使其成为构建健康建筑、节能建筑与资源循环型建筑等新场景的理想材料，其发展需经历从实验室验证、典型场景示范到规模化推广的路径。本文系统梳理了硅藻新材料在未来建筑中的多功能应用，旨在为相关新场景的培育与大规模应用提供理论参考。

关键词：硅藻；材料；绿色；场景培育；大规模应用

中图分类号：TU52 **文献标识码**：A

The Application of Diatom-Based New Materials in Future Architecture

Zhang Yuxin[1], Du Zhilan[1], WANG Yuhe[2], WANG Yuhe[3]

(1.College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2.School of Urban Governance, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China; 3.School of Management,Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Diatom-based materials, characterized by their unique silica frustule structure and surface reactivity, exhibit great potential in promoting the green, low-carbon, and multifunctional development of building materials. Studies have demonstrated that diatom composites can efficiently adsorb CO_2 and regulate ambient humidity, remove nitrogen, phosphorus, and organic pollutants from wastewater, and provide excellent antibacterial and mite-resistant properties. Moreover, the integration of diatoms with photonic crystals or phase-change materials enables optical regulation and thermal energy management, offering new approaches for building energy conservation and indoor environmental optimization. From the perspective of scene cultivation and large-scale application, the micro nano porous structure, high specific surface area and ecological compatibility of diatom new materials make it an ideal material for building new scenes such as healthy buildings, energy-saving buildings and resource recycling buildings. Its development needs to go through the path from laboratory verification, typical scene demonstration to large-scale promotion. This paper systematically reviews the multifunctional application of diatom new materials in future buildings, aiming to provide theoretical reference for the cultivation and large-scale application of relevant new scenes.

Keywords: diatom; materials; green; Scene cultivation; Large scale application

收稿日期：2026 年 7 月 24 日

基金项目：重庆市建设信息中心信息化能力提升重点项目（2026-002）。

作者简介：张育新（1978—），男，博士，教授。E-mail：zhangyuxin@cqu.edu.cn。

0 引言

在全球城市化迅速推进与现代生活方式日益复杂的背景下，建筑已不再是单纯的空间承载体，而成为集环境调控、能源管理与健康保障于一体的综合系统。然而，传统建筑材料在应对室内空气污染、温湿不均、能源高消耗及密闭空间健康风险方面仍存在明显局限，如二氧化碳积聚、挥发性有机物浓度升高以及地下或封闭空间缺氧等问题，直接影响人类健康与生活质量。因此，开发具有多功能与可持续性的建筑材料已成为绿色建筑设计与未来建筑技术发展的核心方向[1]。在这一过程中，新场景的培育与开放为新材料提供了关键的验证空间和应用载体。硅藻材料凭借天然微纳米孔结构、高比表面积及丰富表面官能团展现出独特优势[2]，其多孔骨架赋予优异的气体与污染物吸附能力，可用于室内空气净化；光学特性及可负载功能分子的能力使光催化降解、杀菌抑螨及智能响应成为可能；与水凝胶、混凝土等基材复合应用，或作为微胶囊的外壳负载功能物质，则进一步拓展了其在温湿调控、养分吸附、氧气生成及空气质量改善等综合性建筑场景中的潜力。因此，硅藻新材料有望在未来建筑中实现“结构功能化”与“环境智能化”的融合，为绿色与健康建筑提供全新材料方案，其大规模应用将依赖于特定场景的持续培育、开放验证与系统集成。本综述旨在系统梳理硅藻新材料在未来建筑中的多功能应用，并初步探讨其场景化推广路径，以期为相关研究与实践提供理论支撑与创新思路。

1 硅藻新材料的类型与特性

1.1 硅藻壳体

硅藻壳体是由二氧化硅构成的天然微纳米级多孔结构，具有高度规则的三维骨架和多级孔道分布，其孔径范围通常在纳米至微米级别[3]。该微纳结构不仅赋予壳体较高的比表面积和优异的流体渗透性，还能在气体吸附、污染物捕获及界面反应中发挥显著作用[4]。硅藻壳的光学特性同样独具特色，其规则排列的孔道结构使其具备光子晶体效应和特殊的光散射性能，可在光传导、光催化及光学调控材料中展现潜在应用价值[5]。与此同时，硅藻壳表面富含硅羟基（Si-OH）等官能团，赋予其优良的表面化学活性[6]。硅羟基既可与金属氧化物、功能高分子或生物分子发生结合，又便于通过物理吸附或化学修饰实现功能化负载，从而扩展其在空气净化、光催化降解、杀菌抑螨以及复合建筑材料中的应用潜能。凭借这种兼具结构与化学优势的天然模板，硅藻壳体被认为是未来功能化建筑材料设计的重要基础单元。

1.2 硅藻水凝胶

硅藻水凝胶是以硅藻壳体或其改性产物为骨架基础，通过与高分子凝胶材料复合而形成的一类功能性材料[7]。其显著特征在于具有高吸附性和可调控的孔隙结构，能够在吸湿释湿、气体吸附及污染物捕获等方面表现出优异性能。由于水凝胶具有高度的柔性和可塑性，结合硅藻壳体的刚性骨架与多孔特性，可实现湿度响应性和良好的力学稳定性。更为重要的是，硅藻水凝胶表面丰富的官能团为其负载金属离子、光催化剂或生物活性分子提供了条件，使其在室内空气净化、CO_2 吸附与转化、温湿度调控及环境友好型建材中具有广阔的应用前景。

1.3 硅藻微胶囊

硅藻微胶囊通常是利用硅藻壳体作为天然外壳，将功能物质（如药剂、抗菌因子、光催化剂或相变储能材料）包裹其中，从而形成具有缓释或定向释放特性的微纳米载体体系[8]。这类微胶囊兼具硅藻的结构优势与负载功能，一方面通过其多孔骨架和表面孔口实现对功能物质的高效封装与保护，另一方面利用壳体表面官能团的化学可修饰性实现对释放速率与反应活性的调控。与传统微胶囊相比，硅藻微胶囊具有来源天然、结构规则、机械强度高和环境相容性好等优点，可在空气净化、杀菌抑螨、室内健康管理以及水处理等建筑相关领域中展现出独特应用潜力。

1.4 硅藻复合建筑材料

硅藻复合建筑材料是将硅藻壳体或其衍生物与混凝土、泡沫材料、涂层或聚合物基材结合，形成兼具

力学性能与环境功能的多功能建材[9]。硅藻的多孔结构和高比表面积不仅有助于改善基材的轻质化、隔热性与透气性[10]，还能为功能分子的负载和反应界面提供空间，从而赋予材料空气净化、光催化和热湿调控等附加性能。这类复合建筑材料通过将硅藻的天然功能性与传统建材的结构性相融合，为实现建筑材料的“结构-功能一体化”提供了新的可能性，也为绿色建筑和健康建筑的开发奠定了重要基础。

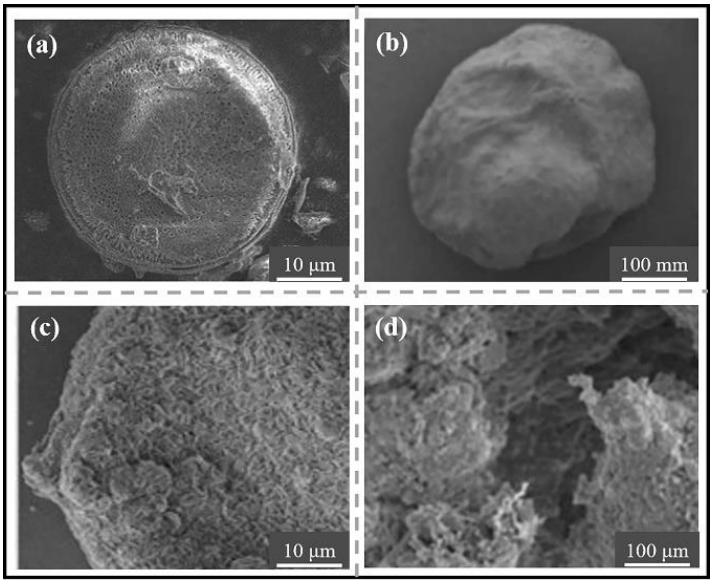


图 1 （a）硅藻结构[11]；（b）硅藻水凝胶[12]；（c）硅藻微胶囊[13]；（d）硅藻泡沫混凝土[14]

2 功能应用场景与大规模应用潜力

2.1 空气净化与温湿调节

在空气净化与温湿调节方面，硅藻材料由于其比表面积大和独特的孔隙结构及分布展现出显著的应用潜力[10]。Zhang 等[15]设计的由人工培养硅藻截头体与聚乳酸组成的新型纳米纤维膜，不仅具备优异的过滤性能和可控的降解速率，对空气污染物的去除效率高达 99.99%。此外，研究者还开发了富含硅藻的微藻生物炭作为室内空气洗涤材料，显著提升了颗粒物、总挥发性有机物和甲醛的去除效果。Ouwhand 等[16]则利用二氧化钛功能化的硅藻截头体光催化剂，在高湿度和长时间反应条件下表现出良好的空气净化性能。这些成果充分证明，基于硅藻独特的多孔结构和表面活性设计，可以为室内空气质量的改善提供高效且可持续的解决方案。同时，利用硅藻土封装相变材料用于建筑材料，例如混凝土或石膏中，可以提高墙壁和地板的温度调节性能[17]。在实际建筑应用中，已有研究将硅藻基净化材料融入室内墙面和天花板装饰层，实现对甲醛和 $PM_{2.5}$ 的高效去除，同时利用其多孔结构调节湿度，从而提升居住环境的舒适性。未来，硅藻基空气净化与调湿材料可率先在密闭或半密闭建筑场景（如地下空间、地铁站、医院病房）中开展示范应用。通过将硅藻水凝胶薄膜集成于通风系统或墙面材料中，构建“吸附-释放”动态调控场景，验证其在实际复杂环境下的性能与耐久性。其大规模推广有赖于低成本制造工艺的突破以及与现有建筑部品的集成技术标准化。

未来，硅藻水凝胶和硅藻/微藻复合体系有望在空气净化与温湿调节方面展现更广阔的应用前景。硅藻水凝胶凭借其高度可调的微纳米孔结构，具有显著的 CO_2 吸附和储存潜力，若与功能性基团或金属有机骨架结合，可能进一步提升对温室气体的选择性捕获效率；同时，材料在保持吸附性能的同时还可通过结构优化实现湿度的动态调节，满足不同环境的舒适需求。硅藻/微藻复合体系则利用微藻的光合作用实现持续的 O_2 释放与 CO_2 消耗，构建“自循环”空气净化系统，为密闭或半密闭环境（如地下空间、地铁、潜艇、航天舱）提供更加稳定和可持续的空气质量调控路径，例如在地铁车厢内集成硅藻水凝胶薄膜，不仅可降

低乘客密集时的 CO_2 累积，还能在空气干燥时缓释湿度，从而提升舒适性。在材料设计层面，未来的重点可能集中在多功能协同与智能化调控：例如，通过孔隙结构精细调控提升 CO_2 吸附容量，通过表面功能化改善与水分子或污染物的相互作用，或将光响应、温湿响应等智能单元引入硅藻材料中，使其在环境条件变化时能够自动调节吸附与释放过程。同时，复合体系也可以通过三维打印、涂层化等方式与墙体、通风管道或空气净化设备集成，实现建筑材料与空气净化装置的深度融合。在性能评价方面，除常规的 CO_2 吸附容量、O_2 释放速率和湿度调控能力外，未来研究还需关注动态工况下的稳定性、循环使用寿命以及能耗与碳足迹，以评估其在绿色建筑和低碳城市中的实际应用价值。

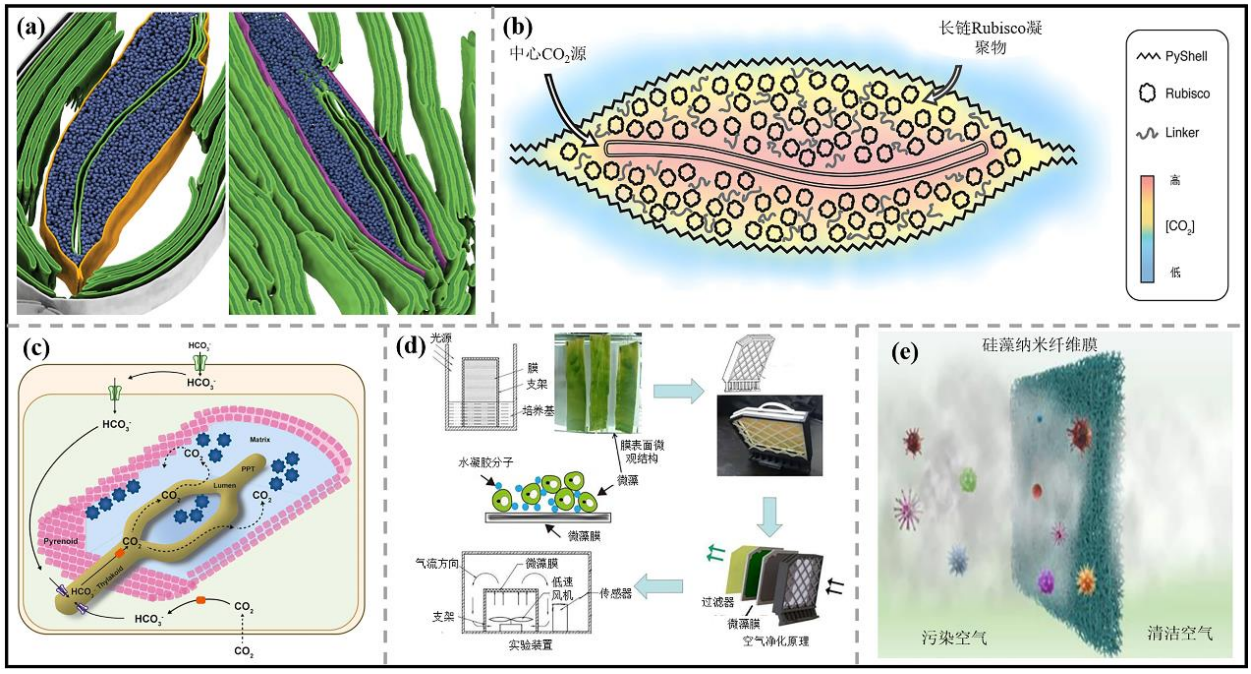


图 2 （a）硅藻断层扫描和 3D 分割的二维概览切片[18]；（b）硅藻细胞碳固定[18]；（c）CO_2 浓缩机制的结构和功能模型[19]；（d）微藻膜的空气净化器[20]；（e）硅藻纳米纤维膜净化空气示意图[15]

2.2 健康防护与杀菌抑螨

在健康防护与杀菌抑螨方面，硅藻材料展现出独特的优势。已有研究表明，硅藻材料本身可对一些公共卫生害虫产生致死作用，天然和合成二氧化硅产品均被用于害虫防治，其中合成产品主要由无定形 SiO_2 构成，而天然产物则主要基于硅藻土。硅藻颗粒能够附着在昆虫或螨虫的角质层表面，通过机械磨损和/或吸附角质层中的保护性脂质，导致生物体水分流失，最终引起脱水和死亡[21]。此外，硅藻材料还可作为微胶囊壳体，用于负载并缓释杀菌剂或天然抗菌物质，从而实现持续、可控的抗菌与抑螨效果。通过调控硅藻壳体的孔径和壁厚，可以有效控制活性物质的释放速率与稳定性，其性能评价通常依赖于杀菌效率、抑螨率及长期作用持久性。已有研究表明，硅藻作为残余墙喷雾剂施用于水环境中时，能够有效控制蚊虫种群长达六个月[22]；Ulrichs 等[23]发现天然硅藻土在 48 小时内可杀死 100%的成年鸡虱，其对螨虫的半致死时间分别为 31.7 和 34.9 小时。Dong 等[24]进一步证实，硅藻土对长角螨的幼虫、若虫和成虫均具有显著杀灭作用。而 He 等[25]则开发了一种硅藻土@聚多巴胺与壳聚糖@葛根素复合的水凝胶，展现出优异的防螨、抗菌及活性氧清除性能，同时具有良好的生物安全性。医院、学校、老年公寓等对卫生环境要求高的公共建筑，是硅藻基健康防护材料的首要示范场景。通过在内墙涂料、建材涂层中复合硅藻微胶囊，构建“长效抗菌防螨”的健康环境场景。大规模应用需解决活性物质缓释控制的精确性、长期使用的安全性评价以及成本控制等关键问题。

未来，硅藻基杀菌与防螨技术的发展可进一步朝着靶向性提升、智能响应、多功能协同和可持续利用

方向推进。例如，通过对硅藻壳体表面进行功能化修饰（如引入特定配体或带电基团），有望实现对尘螨或耐药菌的定向作用，从而降低对非靶生物的干扰；结合智能高分子材料，则可赋予硅藻微胶囊在温度、湿度或病原体代谢产物变化时按需释放的能力，避免药物过量释放并延长有效期；同时，硅藻基材料还可与空气净化或抗过敏功能结合，构建多功能室内防护体系；在应用形式上，除了传统粉末外，还可拓展至纺织品、建筑涂层或空气净化膜，实现从卧室到医院的多场景健康保障；在可持续性方面，硅藻与天然抗菌剂（如茶多酚、壳聚糖、植物精油）复合，不仅减少了环境负担，还能利用可再生资源制备低碳环保的防护材料。以医院病房为例，若将硅藻微胶囊复合涂层应用于墙面和天花板，不仅能够持续缓释抗菌成分，降低耐药菌感染风险，还可同时实现空气净化和湿度调控，为高危患者提供一个更加安全、健康的医疗环境。

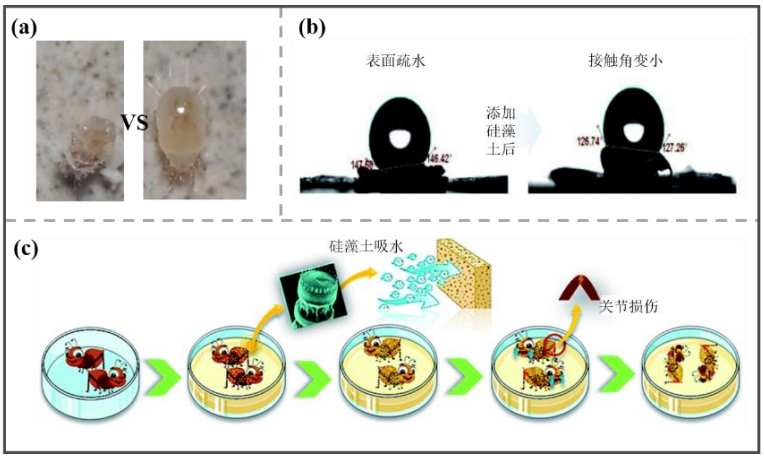


图 3 （a）经过硅藻土处理的和未经处理腐烂酪蚜成虫[26]；（b）不含硅藻土和含硅藻土的锯齿谷甲虫尸体接触角[27]；（c）硅藻土杀虫剂的杀虫机制[27]

2.3 光催化与尾气降解

在光催化方面，与常规无机光催化剂相比，硅藻材料因其独特的硅质三维结构和高度有序的多孔骨架，展现出显著的应用潜力[28]。这种天然形成的微纳米结构能够增强光的散射与捕获，从而有效提升光催化剂的利用效率和稳定性[29]。Putri 等[30]发现，二氧化钛负载的硅藻生物二氧化硅具有优异的光催化活性；Gholami 等[31]利用硅藻截头体作为天然模板制备的氮掺杂磁性 WO_{3-x}@介孔碳材料表现出更强的光催化效率和持久性能；Pan 等[32]报道的硅藻状分层二氧化钛（TiO_2）-聚氰胺装饰双层三聚氰胺泡沫结构，则通过多重光反射与光散射实现了全光谱吸收和高效的光热转换。这些成果充分表明，基于硅藻的天然光学特性与多孔骨架设计，可以大幅提升光催化材料在污染物降解中的性能。在实际应用中，已有研究提出将硅藻/TiO_2 复合透光混凝土应用于建筑墙体和地面装饰层，以改善空气中挥发性有机化合物（Volatile Organic Compounds，简称 VOC）与氮氧化物（NO_x）的去除效率，同时赋予材料透光与装饰功能。城市隧道、地下车库、临近交通干道的建筑外围护结构是典型的高浓度尾气污染场景。在此类场景中开放并部署硅藻基光催化建材，可系统验证其在真实污染负荷下的净化效能与维护周期。推动其大规模应用，需要开发适应低光照条件的催化材料，并建立与建筑结构一体化的设计与施工规范。

未来，硅藻基光催化材料有望在尾气净化与绿色建筑建材中展现更广阔的发展前景。通过调控硅藻壳体的孔径分布与表面功能化，可进一步优化光的散射路径和催化剂负载方式，从而在低光条件下依旧保持高效催化反应。同时，将硅藻基光催化剂与导电聚合物、金属有机骨架或碳基材料复合，可能实现光催化与光热效应、吸附作用的协同，提升多污染物降解效率。在应用层面，硅藻光催化材料不仅可作为室内装饰层，还可直接应用于地下车库等半封闭空间的建材中。例如，在车库墙体或天花板中引入硅藻/TiO_2 透光混凝土，并结合自然采光井或节能 LED 光源，可在高车流量时显著分解尾气中的 NO_x 和 VOC。若在中型地下车库全面铺设此类材料，能够有效降低 NO_x 浓度，既改善空气质量，又减少机械通风需求，降低能源

消耗。在性能评价方面，除关注 VOC/NO_x 去除效率和光催化持久性外，未来研究还需重视低光环境下的催化活性、建材长期耐候性以及能耗与碳减排效益，以支撑其在绿色城市与低碳建筑中的推广应用。

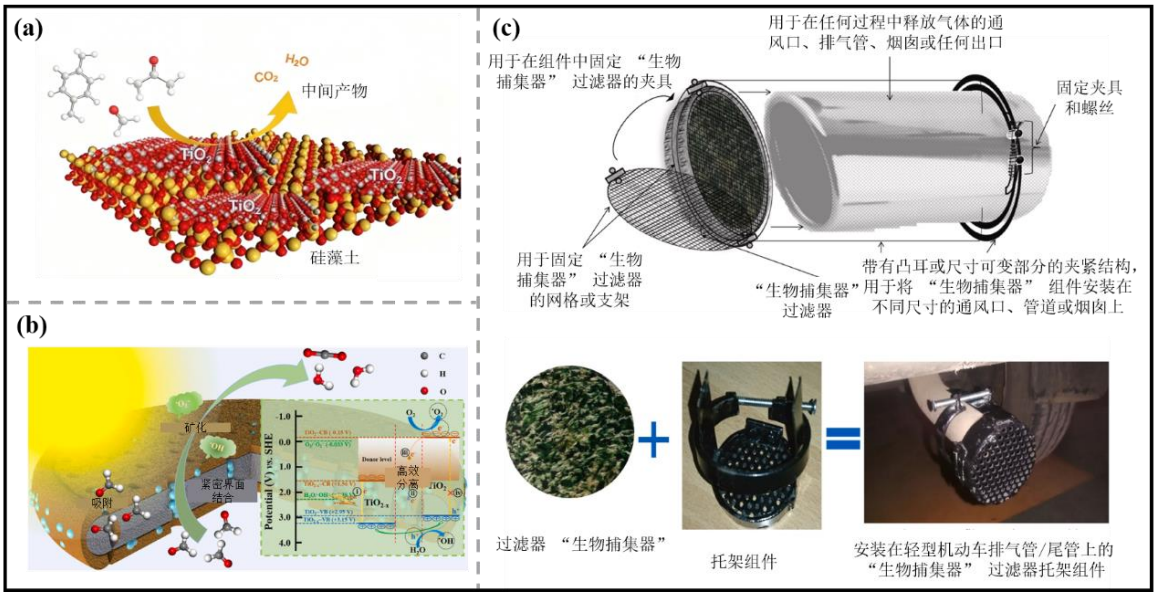


图 4 （a）TiO_2/硅藻土复合材料光催化降解 VOC[33]；（b）天然硅藻土负载富氧空位 TiO_{2-x}-TiO_2 同质结光催化性能增强机理示意图[34]；（c）安装在尾气尾管上的生物渗透捕集器设计和实际图像[35]

2.4 水处理与养分吸附

在水处理与养分吸附方面，与其他微藻不同，硅藻凭借独特的二氧化硅细胞结构和代谢特性，展现出显著的应用潜力。硅藻能够在包括废水在内的多种环境中生长，既可通过自身的吸附作用去除污染物[36]，又能在胁迫条件下产生次生代谢物，从而增强环境适应性。作为水生生态系统的重要初级生产者，硅藻在利用废水中残余氮、磷等营养物促进生长的同时，还能释放氧气并实现养分的循环利用，为生物质生产和肥料开发带来双重生态与经济效益[37, 38]。已有研究表明，经十六烷基三甲基溴化铵改性的锂皂石@硅藻土对有机污染物表现出优异的吸附能力[39]；亚铁离子改性锂皂石@硅藻土展现出良好的光-芬顿性能，可有效去除复杂有机污染物[40]；Liao 等[41]制备的低成本 CuNiFe 双层氢氧化物@硅藻土复合材料，则兼具吸附与光催化功能，在四环素废水治理中取得了理想效果。这些研究充分证明，基于硅藻多孔骨架与表面活性位点的设计，可以为废水净化和资源回收提供高效、可持续的材料途径。在建筑领域的应用探索中，硅藻改性泡沫混凝土不仅具备轻质与隔热特性，还能通过多孔结构和微胶囊负载实现对氮、磷的高效捕获，屋顶绿化实践表明该材料可使雨水中氮、磷去除率超过 70%，同时保持良好的隔热性能，为绿色屋顶与雨水收集系统提供了兼具功能与环境效益的解决方案。“海绵城市”建设中的绿色屋顶、雨水花园、生态滤池等，是硅藻基水处理材料理想的培育场景。在此类场景中，材料同时发挥结构、保温和水处理三重功能。大规模应用的关键在于提升材料在干湿循环和冻融环境下的稳定性，并评估其长期运行下的养分饱和与再生能力。

未来，硅藻基材料在水处理与养分吸附领域有望进一步拓展应用边界。通过精准调控硅藻壳体孔径分布与表面官能团，可实现对多种污染物的高选择性捕获，并结合光-芬顿或光催化反应实现吸附与降解的协同；此外，将硅藻材料与导电聚合物或碳基材料复合，还可能提升其电子传输性能和反应活性。在建筑工程中，硅藻土是制备轻质混凝土的优质骨料来源，且煅烧后或经发泡处理的硅藻土有利于减小混凝土的密度和导热系数[42]。硅藻基吸附/催化材料可作为地下水收集池或景观水体的衬层，不仅有效去除雨水径流中的氮、磷及有机污染物，还能实现养分回收并用于后续的屋顶农业或立体绿化。例如，在城市综合体的雨水花园系统中集成硅藻改性泡沫混凝土模块，可在保证景观功能与生态调节的同时，大幅降低水体富营养

化风险，推动建筑与环境的双重可持续发展。在性能评价方面，除氮、磷吸附量和有机污染物去除率外，未来研究还应重视材料在动态水力条件下的稳定性、再生循环利用效率以及长期环境安全性，从而为其在绿色建筑和海绵城市中的规模化推广提供科学支撑。

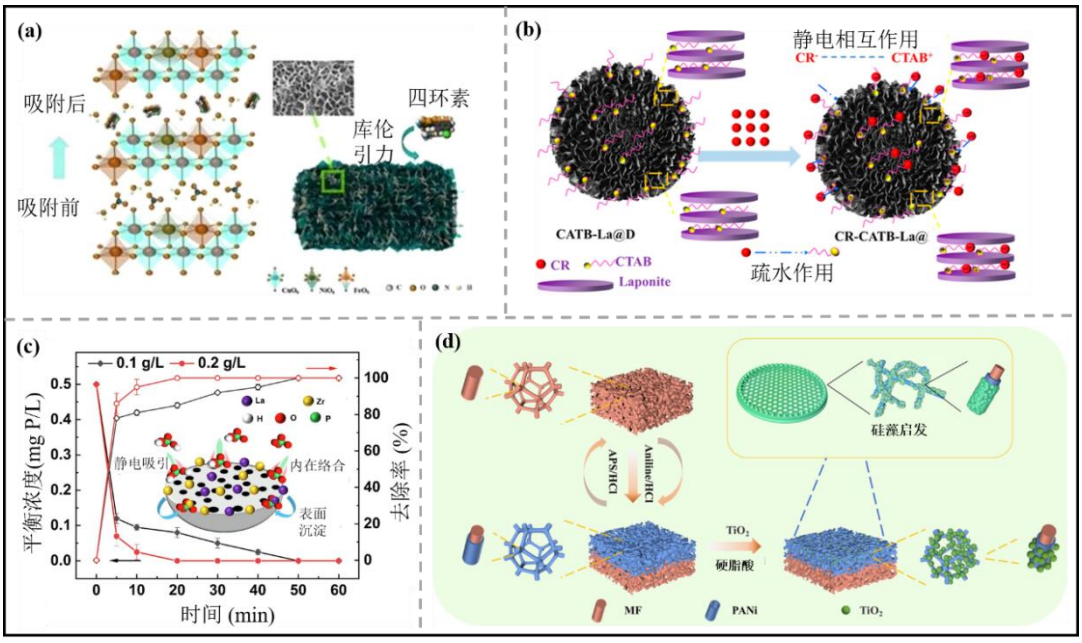


图 5 （a）CuNiFe 双层氢氧化物@硅藻土吸附去除四环素示意图[41]；（b）十六烷基三甲基溴化铵改性的锂皂石@硅藻土吸附刚果红机理图[39]；（c）La/Zr 氢氧化物改性硅藻土吸附磷酸盐[43]；（d）硅藻启发 TiO_2-聚氰胺装饰双层三聚氰胺的装饰的双层光热泡沫制造工艺图[32]

2.5 前沿探索与智能响应

在未来建筑发展中，硅藻材料与光子晶体或相变储能材料的复合被视为实现智能化与低碳化的前沿方向。其多孔透明“玻璃壳”结构不仅能够提升自然光利用效率，还可通过与光子晶体耦合实现光流导向，从而改善室内采光与空间舒适度。同时，相变储能单元的引入为热湿环境的平衡提供了可能[44]，使建筑材料具备白天吸收并存储能量、夜间逐步释放的功能[45]，显著降低室温波动和能耗[46]。未来研究的重点将集中在智能传感与动态调控的深度融合，例如通过湿度、温度或污染物浓度的实时监测，使材料能够自主调节空气流通与光通道，构建动态适应性强的室内环境。性能评价不仅局限于光导效率与能量释放能力，还需关注长期循环使用下的稳定性与全生命周期碳足迹。一个前沿设想是利用硅藻/微藻复合体系在密闭或半密闭建筑空间中构建“人工氧吧”，通过光合作用持续消耗 CO_2、释放 O_2，同时调节湿度与空气质量，为地下室、封闭会议室甚至深海舱和航天居住舱等极端环境提供可持续的生命支持与舒适保障。这种融合了空气净化、能量调控与智能响应的硅藻复合体系，将成为未来智慧建筑实现健康、低碳与生态化的关键突破口。“近零能耗建筑”、“智慧建筑”是这些前沿技术的高端示范场景。通过在示范建筑中集成硅藻-相变墙体、硅藻光导系统等，构建“光-热-湿”协同调控的智能场景。这些前沿技术的成熟与成本下降，是其未来能否走向大规模应用的决定性因素。

3 挑战与发展前景

尽管硅藻新材料在建筑领域展现出多功能性与可持续发展的巨大潜力，但其实际推广与应用仍面临诸多挑战。首先，材料的长期耐久性与场景适应性有待进一步验证。硅藻材料在高湿度、强紫外辐射或酸碱等特定建筑场景环境下可能出现结构劣化或性能衰减，影响其长期稳定性和功能发挥。因此，亟需通过表面改性、复合包覆或结构优化来提升其在复杂建筑环境中的耐久性。

其次，大规模场景应用的可行性与成本问题亦是制约其推广的重要因素。目前，硅藻基水凝胶、微胶囊及透光混凝土的制备多停留在实验室或中试阶段，工艺复杂、成本偏高，难以满足建筑行业对于大批量、低成本材料的需求。因此，未来需发展面向规模化场景的低能耗、可规模化的制备与改性工艺，探索利用天然硅藻资源或工业副产硅藻土进行绿色高效转化。

再次，硅藻新材料在与智能建筑和绿色建筑技术的场景融合深度方面尚处于起步阶段。尽管已有研究将硅藻与光伏、传感或储能单元结合，但其在智慧调控、实时监测及建筑能耗管理等方面的系统性应用仍不足。未来研究可考虑通过多功能集成与跨学科合作，推动硅藻材料与物联网、大数据及人工智能在具体运营场景中的深度结合，实现建筑环境的动态感知与智能调节。

最后，推动硅藻新材料的场景化与规模化应用，需要构建“技术-场景-政策”的协同生态。通过在国家重点研发计划、绿色建筑标准中纳入硅藻材料应用导向，鼓励政府与市场主体开放测试场景，建设从材料研发、场景验证到产业推广的全链条创新体系。

综上所述，硅藻新材料在建筑应用中仍需解决耐久性、成本与系统集成等关键问题，但随着绿色建材技术与智能建筑理念的不断发展，其在未来建筑中的广泛应用前景值得期待。

4 结语

硅藻新材料凭借其独特的微纳米多孔结构、高比表面积和表面化学活性，在建筑领域展现出广阔的应用潜力。从空气净化、温湿调控、杀菌抑螨到光催化降解与水处理，硅藻材料为解决室内环境污染和能源消耗问题提供了新思路。

总体来看，硅藻新材料的多功能性与可持续性，是其有望成为推动向绿色化、健康化、智能化转型的重要材料选择。然而，要实现其在不同建筑场景中的大规模应用，仍需解决材料在真实场景中的耐久性、规模化制备的经济性以及与建筑系统深度融合等技术与管理难题。未来，应加强以场景需求为牵引的跨学科研发，加速从实验室到典型场景的示范验证，并构建有利于其规模化推广的政策标准体系，从而充分释放硅藻新材料在未来建筑中的巨大价值。

参考文献

[1] 张海昆, 李杨红. 节能环保建筑材料与传统建筑材料的对比及应用[J]. 粘接, 2022, 49(10): 101-104.

[2] LI B W, WANG T, LE Q J, et al. Surface reconstruction, modification and functionalization of natural diatomites for miniaturization of shaped heterogeneous catalysts[J]. Nano Materials Science, 2023, 5(3): 293-311.

[3] 刘萍, 谭浩若, 冯民生, 等. 硅藻基相变储能材料的研究进展[J]. 功能材料, 2024, 55(09): 9053-9063.

[4] 闫良国, 任丽瑶, 于欢, 等. 硅藻土复合催化材料在有机污水治理中的应用[J]. 中国粉体技术， 2025, 31(04): 131-142.

[5] 邵亚馨, 李强文, 杨小盛, 等. TiO2/硅藻土材料复合方法及应用研究进展[J]. 化工管理 2020, (10): 89-90.

[6] ROYCHOUDHURY P, BOSE R, DĄBEK P, et al. Photonic Nano-/Microstructured Diatom Based Biosilica in Metal Modification and Removal-A Review[J]. Materials, 2022, 15(19).

[7] 伊天星. 硅藻土复合隔膜及改性水凝胶材料的制备及性能研究[D]. 吉林大学, 2024.

[8] LIU S P, LI J J, ZHANG Y C, et al. Progress in the Preparation and Applications of Microcapsules for Protective Coatings Against Corrosion[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(4).

[9] LIU S P, JIN Z Y, LIU D D, et al. Recent Progress and Development Trends in the Research and Application of Anti-Icing Coatings[J]. Chemistry – A European Journal, 2025, 31(38).

[10] 王鑫, 张杰. 硅藻土的改性及在室内设计中的研究进展[C]. 2020 年全国土木工程施工技术交流会论文

集（上册）, 2020: 612-615.

[11] LU W, ZHANG X F, YIN C Q, et al. Diatomite@MoS_2 Nanocomposite Layers as Composite Coating Targeting for Mg Alloys Endowed with Properties of Anticorrosion and Antiwear[J]. Langmuir, 2024, 40(15): 8233-8247.

[12] LI X, XU W, PAN G, et al. Sodium alginate/ diatom-based blotting hydrogel material for Pb(II) removal: Effect of crosslinker optimization on its composition, selectivity, and desorption rate[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 688.

[13] LI M H, LIU S P, CAO M M, et al. Fabrication of natural mesoporous Diatom biosilica microcapsules with high oil-carrying capacity and tribological property[J]. Tribology International, 2024, 200.

[14] NING H L, LI Z W, LIU N, et al. Fabrication of Sustainable Diatomite-Based Foams with a Micro-Macroporous Synergistic Structure[J]. Materials, 2025, 18(9).

[15] ZHANG C T, SUN J X, LYU S, et al. Poly(lactic acid)/artificially cultured diatom frustules nanofibrous membranes with fast and controllable degradation rates for air filtration[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(2): 1221-1232.

[16] OUWEHAND J, VAN EYNDE E, DE CANCK E, et al. Titania-functionalized diatom frustules as photocatalyst for indoor air purification[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2018, 226: 303-310.

[17] 缪鹏. 硅藻土相变混凝土力学性能与热工性能试验研究[D]. 安徽理工大学, 2025.

[18] SHIMAKAWA G, DEMULDER M, FLORI S, et al. Diatom pyrenoids are encased in a protein shell that enables efficient CO_2 fixation[J]. Cell, 2024, 187(21): 5919-5934.e5919.

[19] NAM O, MUSIAŁ S, DEMULDER M, et al. A protein blueprint of the diatom CO_2-fixing organelle[J]. Cell, 2024, 187(21): 5935-5950.e5918.

[20] LU Q, JI C C, YAN Y P, et al. Application of a novel microalgae-film based air purifier to improve air quality through oxygen production and fine particulates removal[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2018, 94(4): 1057-1063.

[21] ZENI V, BALIOTA G V, BENELLI G, et al. Diatomaceous Earth for Arthropod Pest Control: Back to the Future[J]. Molecules, 2021, 26(24).

[22] DEGUENON J M, AZONDEKON R, AGOSSA F R, et al. ImergardTMWP: A Non-Chemical Alternative for an Indoor Residual Spray, Effective against Pyrethroid-Resistant Anopheles gambiae (s.l.) in Africa[J]. Insects, 2020, 11(5).

[23] ULRICHS C, HAN Y J, ABDELHAMID M T, et al. Management of the poultry red mite, Dermanyssus gallinae, using silica-based acaricides[J]. Experimental and Applied Acarology, 2020, 82(2): 243-254.

[24] DONG L, THEKISOE O, RAMATLA T, et al. Acaricidal effects of diatomaceous earth on Haemaphysalis longicornis under laboratory conditions[J]. Experimental and Applied Acarology, 2025, 95(3).

[25] HE T S, TANG W L, CHEN J L, et al. Hydrogel-Based Treatment of House Dust Mite-Induced Atopic Dermatitis through Triple Cleaning of Mites, Bacteria, and ROS-Related Inflammation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(26): 33121-33134.

[26] KıLıç N. Efficacy of Dust and Wettable Powder Formulation of Diatomaceous Earth (Detech®) in the Control of Tyrophagus putrescentiae (Schrank) (Acari: Acaridae)[J]. Insects, 2022, 13(10).

[27] LI C Y, SHENG X R, LI N, et al. Insecticidal characteristics and mechanism of a promising natural insecticide against saw-toothed grain beetle[J]. RSC Advances, 2022, 12(12): 7066-7074.

[28] 刘晓丹, 任庆敏, 王寅初, 等. 硅藻纳米材料研究进展[J]. 生物学杂志, 2019, 36(01): 79-82.

[29] 王利剑, 岳昊. 负载量对硅藻土基 TiO_2 复合材料应用性能的影响[J]. 非金属矿, 2024, 47(04): 6-8.

[30] PUTRI R M, ALMUNADYA N S, AMRI A F, et al. Structural Characterization of Polycrystalline Titania Nanoparticles on C. striata Biosilica for Photocatalytic POME Degradation[J]. ACS Omega, 2022, 7(48): 44047-44056.

[31] GHOLAMI P, KHATAEE A, BHATNAGAR A, et al. Synthesis of N-Doped Magnetic WO_{3-x}@Mesoporous Carbon Using a Diatom Template and Plasma Modification: Visible-Light-Driven Photocatalytic Activities[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(11): 13072-13086.

[32] PAN J F, YU X H, DONG J J, et al. Diatom-Inspired TiO_2-PANi-Decorated Bilayer Photothermal Foam for Solar-Driven Clean Water Generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(48): 58124-58133.

[33] ZHANG G X, LIU Y Y, HASHISHO Z, et al. Adsorption and photocatalytic degradation performances of TiO2/diatomite composite for volatile organic compounds: Effects of key parameters[J]. Applied Surface Science, 2020, 525.

[34] YUAN F, YANG R F, LI C Q, et al. Enhanced visible-light degradation performance toward gaseous formaldehyde using oxygen vacancy-rich TiO_{2-x}/TiO_2 supported by natural diatomite[J]. Building and Environment, 2022, 219.

[35] YEWALE P, WAGLE N, LENKA S, et al. Studies on Biosmotrap: A multipurpose biological air purifier to minimize indoor and outdoor air pollution[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357.

[36] DAI N, FENG L, ZHAO L, et al. A high-performance adsorbent of 2D Laponite in-situ coated on 3D diatomite for advanced adsorption of cationic dye[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(10): 2304-2316.

[37] 张义, 朱吉颖, 张聪, 等. 硅藻土在环境领域的研究和应用[J].生态环境学报, 2022, 31(12): 2441-2448.

[38] 张育新, 丁杰航, 鄢文磊, 等. 硅藻土基硅肥的研究进展[J].矿产保护与利用, 2022, 42(04): 85-93.

[39] DAI N, LIU X Y, YANG L, et al. Cetyltrimethylammonium Bromide-Modified Laponite@Diatomite Composites for Enhanced Adsorption Performance of Organic Pollutants[J]. Langmuir, 2024, 40(16): 8427-8439.

[40] DAI N, YI S, ZHANG X T, et al. Typical synthesis of an iron-modified Laponite@diatomite composite for photo-Fenton degradation of methyl orange dyes[J]. Applied Surface Science, 2023, 607.

[41] LIAO Q Y, DAI N, ZHANG C Z, et al. S-Cu Doubly Doped NiFe LDH@Diatomite with Adjustable Surface Characteristics for the Efficient Removal of Tetracycline[J]. Langmuir, 2024, 40(41): 21499-21513.

[42] 代楠, 张育新, 李凯霖, 等. 硅藻土在胶凝材料领域的应用进展[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 145-153.

[43] YU L Y, MA L, ZHU N, et al. Enhanced phosphate adsorption in low-concentration solutions using La/Zr hydroxide-modified diatomite: mechanisms and efficiency[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 372.

[44] 姚立民, 王伟芳, 谢恒星. 一种改性节能硅藻土载体建筑材料制备及应用性能[J]. 粘接, 2025, 52(04): 75-78.

[45] 柯倩倩. 石蜡/硅藻土基相变储能砂浆制备及其保温隔热性能研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(09): 90-93.

[46] 曾嘉令. 硅藻土基相变储能材料的制备、性能及建筑应用研究[D]. 西京学院, 2024.

基于 BIM 和群智能算法的施工管理智能优化

雷　华，郑童宜

（广州城市职业学院，广东 广州 510405）

摘　要：在“数字住建”战略推动下，建筑行业正向数字化、智能化转型，但传统施工组织管理仍存在信息孤岛、协同低效等问题。提出一种融合建筑信息模型（BIM）技术与群智能算法的施工组织管理优化框架，以 BIM 构建的数字孪生模型为基础，集成施工多维度数据，引入群智能优化算法，对施工过程进行全局、动态、智能优化；通过建立多目标权衡函数，该算法能高效求解最优方案，在保障工程质量的同时显著缩短工期、降低成本，减少施工阶段的碳排放。

关键词：建筑信息模型（BIM）；群智能算法；施工组织管理；优化策略

中图分类号：TU71　　**文献标识码**：A

Intelligent Optimization of Construction Management Based on BIM and Swarm Intelligence Algorithm

LEI Hua, ZHENG Tongyi

（Guangzhou City Polytechnic，Guangzhou 510405，China）

Abstract: Under the impetus of the "Digital Construction" strategy, the construction industry is undergoing a transformation towards digitalization and intelligence. However, traditional construction organization and management still suffer from problems such as information silos and low efficiency in collaboration. This paper proposes an optimization framework for construction organization and management that integrates Building Information Modeling (BIM) technology with swarm intelligence algorithms. Based on the digital twin model constructed by BIM, it integrates multi-dimensional data of construction and introduces swarm intelligence optimization algorithms to globally, dynamically and intelligently optimize the construction process. By establishing a multi-objective trade-off function, this algorithm can efficiently solve for the optimal solution, significantly shortening the construction period, reducing costs, and lowering carbon emissions during the construction phase while ensuring project quality.

Keywords: building information modeling (BIM); swarm intelligence algorithm; construction organization and management; optimization strategy

随着国家新型城镇化战略的持续推进，大规模城市扩张催生了海量的建设工程需求。在此背景下，为响应“双碳”国家战略，建筑行业正面临前所未有的绿色转型压力。作为国民经济增长的关键引擎，该行业亟需在项目全生命周期内实现效率提升、品质保障、成本控制与碳排放削减等多重目标的协同优化[1]。为应对这一系列挑战，国家层面提出了“数字住建”的发展战略，旨在通过物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术，全面赋能传统建造模式，推动建筑项目向数字化、网络化和智能化的全生命周期管理转型[2]。

收稿日期：2025 年 9 月 24 日

基金项目：2022 广东省普通高校科研平台与科研项目（2022CJPT017）；2022 广州市教育局高校科研项目（202235424）

第一作者：雷华（1976—），男，硕士，副教授。E-mail：lyt2006@gcp.edu.cn。

通信作者：郑童宜（1993—），女，博士，讲师。E-mail：zhengty@gcp.edu.cn。

然而，当前建筑施工组织管理实践与数字住建的理想蓝图仍存在显著差距。传统管理模式过度依赖项目经理及资深工程师的经验判断与人工协调，导致一系列系统性弊端：（1）信息孤岛现象严重，设计、施工、采购、运维等部门间的数据壁垒难以打破，信息传递链条冗长且易失真，使得管理决策缺乏及时、全面的数据支撑；（2）多方协同效能低下，业主、设计、施工、监理等参与方沟通协调成本高、响应速度慢，难以适应复杂多变的现场环境；（3）动态响应能力薄弱，当遭遇设计变更、材料供应中断或极端天气等突发状况时，管理人员往往难以快速评估影响并生成最优调整方案[3]。

在此背景下，建筑信息模型（Building Information Modeling，BIM）凭借强大的数据集成与三维可视化能力，成为打通项目各阶段信息壁垒、构建统一数据平台的关键技术。BIM 可将项目的几何信息、物理属性、进度、成本等多维数据整合于共享数字化模型，有效促进跨专业、跨阶段的协同工作。但目前 BIM 应用多停留于碰撞检测、4D/5D 施工模拟等可视化展示层面，其深层价值——即利用模型中蕴含的海量数据进行自动化分析与智能决策支持——尚未得到充分挖掘，施工现场优化仍以“人脑经验”为主，并未真正实现“数据驱动”。

同时，人工智能尤其是群智能优化算法，因具备自组织、自适应和分布式计算的天然优势，在求解复杂系统优化问题上展现出巨大潜力[4]。此类算法通过模拟蚁群、鸟群等自然界群体的智能行为，可在庞大的解空间中高效搜索全局最优解。近年来，遗传算法（Genetic Algorithm，GA）、粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法等群智能算法已在施工调度、资源分配等领域开展了探索性应用[5]。但这些传统算法普遍存在参数敏感、易早熟收敛和计算耗时长等问题，限制了其在实际工程中的实时应用。

因此，将 BIM 提供的坚实数据基础与具有鲁棒性和高效性的群智能算法进行深度融合，构建一个数据驱动—算法求解—智能决策的闭环体系，是突破当前施工管理瓶颈、迈向真正智能化的关键路径。本研究基于此洞察，提出一套完整的、基于 BIM 与群智能算法的施工组织管理智能化优化体系，不仅致力于解决数据与算法融合的难题，更通过引入创新优化机制，提升系统整体的求解效率与稳定性，为数字住建战略下的智慧建造提供可落地、高效益的理论与实践解决方案。

1 研究现状与挑战

1.1 BIM 技术在施工管理中的应用现状

作为实现建筑业数字化转型的核心技术，BIM 在施工阶段的应用已取得显著进展。通过构建集成工作分解结构与资源分配的 4D-BIM 模型，项目团队可对施工全过程进行可视化模拟，有效预演施工流程，提前识别工序间的时间与空间冲突，从而优化施工顺序，规避潜在风险。在此基础上发展的 5D-BIM 技术，实现了工程量与成本数据的动态关联，为项目管理人员提供了实时的成本监控与预测能力。例如，当某构件实际进度偏离计划时，系统可即时计算出相应的成本偏差，为成本控制提供决策依据。

尽管 BIM 技术展现出强大的潜力，但其在施工管理中的实际应用仍面临两大核心瓶颈，限制了其向更高层次智能决策的演进。首要瓶颈为决策过程的主观性，当前基于 BIM 模型的方案优化往往高度依赖项目经理或资深工程师的个人经验与直觉判断，这种“经验驱动”模式缺乏客观、可量化的评估标准，难以对多种备选方案进行全面、公正比选，易受主观偏见影响。其次，人工调整在复杂的多目标、多约束优化问题中存在固有局限，施工管理需同时权衡工期、成本、质量、安全与碳排放等多重目标，并受人力、材料、机械及场地等多种资源约束，在这种高维度、非线性的复杂场景下，人脑几乎无法穷尽所有可能的组合方案，极易陷入局部最优解，从而错失全局更优方案。因此，如何将 BIM 承载的海量、多维数据转化为驱动自动化、智能化决策的引擎，已成为学界与业界共同关注的研究焦点。

1.2 群智能算法在建筑优化中的机遇与困境

为应对上述挑战，以 GA、PSO 和蚁群算法（Ant Colony Optimization，ACO）为代表的群智能优化算法，被广泛探索应用于施工调度、资源分配与工期优化等领域[5]。这类算法的核心思想是将复杂的施工管理问题抽象为数学优化模型，通过模拟鸟群、蚁群等自然界群体的自组织、自适应行为，在庞大的解空间

中迭代搜索，以求得全局或近似全局的最优解，为突破传统人工调整的局限提供了新思路。

然而，这些经典群智能算法在实际工程应用中暴露出一系列亟待解决的问题：

（1）参数敏感性高：多数算法的成功运行依赖于大量特定参数的精细调节。例如，PSO 算法需设置惯性权重、学习因子，GA 算法需确定交叉概率与变异率。这些参数的设定极具经验性，若调整不当，则极易导致算法过早收敛至次优解（早熟收敛），或收敛速度缓慢，严重削弱算法的鲁棒性和实用性。

（2）早熟收敛风险：优化初期种群多样性快速丧失，个体过早聚集于局部区域，使算法失去探索更大范围解空间的能力，最终收敛至非全局最优的局部极值点。

（3）计算效率不足：针对大型、高维度的实际工程项目，此类算法的求解过程往往耗时较长，难以满足施工现场快速响应、实时动态调整的需求。当遭遇设计变更、天气突变或资源短缺等突发状况时，冗长的计算周期可能导致决策严重滞后。

针对上述问题，本研究引入一种新型基于经验的学习（Experience-Based Learning，EBL）驱动型群智能优化算法[6]。该算法具备无须设置特定控制参数、结构简洁、收敛速度快且不易陷入局部最优的独特优势，通过借鉴种群内不同个体的历史搜索经验，实现自驱动的学习与进化，为解决大规模、多目标的建筑施工优化难题提供了高效稳健的新工具。

2 智能化优化框架与流程

本研究构建了一个以 BIM 提供数据基础、群智能算法驱动决策为核心理念的智能化施工管理优化体系，旨在打破传统管理模式中“人脑经验主导”的局限，建立从数据采集到智能决策再到动态反馈的闭环系统。整个优化流程可解构为 5 个相互关联、迭代演进的关键阶段，施工管理智能优化流程如表 1 所示。

表 1 施工管理智能优化流程

Tab.1 Intelligent optimization process of construction management

序号	步骤	具体流程
1	多源数据集成与建模	全面收集并整合项目全生命周期各维度数据，构建高保真度的 5D-BIM 数字孪生模型
2	优化目标与策略制定	基于项目具体需求，定义多目标优化函数，并设定严格的求解约束条件
3	智能优化引擎运行	将 BIM 模型中的工程数据作为输入，启动 EBL 驱动型群智能优化算法进行全局寻优计算
4	优化方案评估与验证	对算法生成的候选方案进行定量、定性及动态适应性等多维度综合评估
5	结果反馈与闭环迭代	将评估结果用于指导方案实施，并在环境变化时触发模型更新与新一轮优化

2.1 数据准备与 BIM 模型构建

高质量决策依赖全面、精准的数据支撑，因此体系第一步是系统性汇集项目相关的多源异构数据，以此为基础构建能真实映射物理建筑的数字化孪生体。数据集主要涵盖以下 4 类：

（1）设计域数据：包括建筑、结构、机电等专业的计算机辅助设计（Computer Aided Design，CAD）图纸与三维几何模型，定义了项目的空间形态与物理属性。

（2）施工域数据：涵盖详细的施工组织设计文件、明确的工序逻辑关系（即紧前紧后关系），以及详尽的人力、机械设备和材料资源清单，是规划施工活动的基础。

（3）进度与成本域数据：包含各项工序的预估持续时间、劳动力投入量、机械台班数、材料消耗量及其单价，为 5D-BIM 的成本动态核算功能提供支持。

（4）环境与风险域数据：涉及历史气象资料、施工现场地理与地质条件、安全规范要求，以及基于风险识别形成的潜在风险事件库。

利用专业的 BIM 软件平台，将上述数据无缝集成于统一的精细化三维模型。在此过程中，为每个构件赋予唯一标识码（Identification Code，ID），并与外部的进度计划数据库和成本数据库建立动态链接，从而形成具备时间与成本维度的 5D-BIM 数字孪生模型。此模型不仅是可视化工具，更是后续所有智能分析与优化计算的唯一数据来源和核心知识库。

2.2 多目标优化策略设计

施工管理本质上是在工期、成本、质量、碳排放和风险等相互制约的多个目标间寻求平衡的复杂系统工程。因此，本研究构建了综合性多目标优化模型。该模型的核心是一个综合目标函数 $F(x)$，其通过加权归一化的方式，将 5 个独立的子目标统一在一个评价体系下，数学表达为：

$$F(x)=\frac{T-T_{\min}}{T_{\max}-T_{\min}}+\frac{C-C_{\min}}{C_{\max}-C_{\min}}+\frac{R-R_{\min}}{R_{\max}-R_{\min}}+\frac{E-E_{\min}}{E_{\max}-E_{\min}}+\frac{Q_{\min}-Q}{Q_{\max}-Q_{\min}} \tag{1}$$

式中：$T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为最长和最短施工时间；$C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 分别为最大和最小施工成本；$R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别为最大和最小施工风险；$E_{\max}$ 和 $E_{\min}$ 分别为最大和最小 CO_2 排放量；$Q_{\max}$ 和 $Q_{\min}$ 分别为最优和最差施工质量；T、C、R、E、Q 分别为工期、施工成本、施工风险、CO_2 排放量及施工质量。

各子目标函数定义如下：

（1）工期最短：最小化项目总工期是施工管理的重要目标之一，通过合理安排施工顺序和资源分配可缩短总工期，提高项目的经济效益。

$$T=\min\left(\max\left(T_{\mathrm{S}i}+D_i\right)\right)=\min\left(\max\left(T_{\mathrm{F}\,i}\right)\right), i=1,2,\ldots,m \tag{2}$$

式中：D_i 为项目中每项活动的持续时间；$T_{\mathrm{S}i}$ 和 $T_{\mathrm{F}i}$ 分别为第 i 项活动的开始时间和结束时间；m 为项目进度安排中的节点总数。

（2）成本最低：最小化项目总成本包括直接成本和间接成本，其中直接成本是指与施工直接相关的费用，如人工费、材料费、机械设备费等；间接成本是指与施工间接相关的费用，如管理费、规费、利润等。同时，需考虑工期延误产生的违约金、设备闲置费等延误成本。

$$C=\min\left(D_{\mathrm{C}i}^{j}+I_{\mathrm{C}i}^{j}+T_{\mathrm{C}}\right) \tag{3}$$

式中：$\mathrm{D_C}$ 为直接成本；$\mathrm{I_C}$ 为间接成本；$\mathrm{T_C}$ 为延误成本；$D_{\mathrm{C}i}^{j}$ 和 $I_{\mathrm{C}i}^{j}$ 分别为第 i 项活动的第 j 种执行模式的直接成本和间接成本。

（3）质量最优：最大化关键工序的质量得分可通过历史数据或专家评分量化，关键工序的质量直接决定项目整体质量，因此需严格控制。

$$Q=\max\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{QPI_i}{m}\right) \tag{4}$$

$$QPI_i=a_i t_i^2+b_i t_i+c_i \tag{5}$$

式中：其中，QPI_i 为质量绩效指数；t_i 为第 i 项活动的持续时间；a_i、b_i 和 c_i 为最佳持续时间的二次函数的决定系数。

（4）碳排放最少：在“双碳”目标背景下，减少施工阶段 CO_2 排放总量是施工管理的重要任务，通过优化施工方案、采用节能环保材料与设备降低碳排放。

$$E=\sum_{i=1}^{m}E_{\mathrm{di}}+\sum_{i=1}^{m}E_{\mathrm{ini}} \tag{6}$$

式中：E 为项目中的总 CO_2 排放量；E_{di} 和 E_{ini} 分别为项目中的直接和间接 CO_2 排放量。

（5）风险最低：以最小化综合风险指数为目标，降低项目的不确定性和损失，该综合指数考虑了项目的总当前时差、总灵活调度时差、资源水平等因素。

$$R=\min\left(w_1\times\left(1-\frac{TF_c+1}{TF_{\max}+1}\right)+w_2\times\left(\frac{\sum_{t=1}^{Pd}\left(R_t-\overline{R}\right)^2}{Pd\left(\overline{R}\right)^2}\right)+w_3\times\left(1-\frac{\overline{R}}{\max\left(R_t\right)}\right)\right) \tag{7}$$

式中：T_{Fc} 和 T_{Fmax} 分别为项目的总当前时差和总灵活调度时差；$\overline{R}$ 为统一资源水平；Pd 为项目持续的总天数；R_t 为第 t 天所需资源；w_1、w_2、w_3 为权重。

此外，优化过程需满足严格的约束条件，如工序逻辑约束、资源供给上限、合同工期要求等。其中，工序逻辑约束确保了施工工序的先后顺序和依赖关系，避免了工序冲突与延误；资源供给上限限定了资源使用量，保障资源合理调配；合同工期要求则明确了项目总工期，确保项目按期交付。

2.3 群智能算法实施

本研究采用 EBL 驱动型群智能优化算法，该算法具有独特的学习机制，能够依据种群内不同个体积累的信息与经验，实现自驱动学习。这种机制使算法在搜索解空间时具备较强的全局探索能力，同时有效避免早熟收敛问题，即防止算法未充分探索解空间便陷入局部最优解。

算法实施步骤如下：

（1）算法初始化：根据问题规模设定种群大小和最大迭代次数，其中种群大小是指算法中个体的数量，合理取值可提高算法的搜索效率；最大迭代次数是指算法的最大运行次数，当达到该次数后算法停止运行。

（2）问题编码：将施工优化问题编码为算法可处理的形式，例如用实数向量表示各工序的开始时间，用整数向量表示资源的分配比例。编码的目的是将施工优化问题转化为算法可处理的数学问题，方便搜索和优化。

（3）算法运行：在 Matlab 或 Python 环境中执行优化算法。算法通过迭代搜索不断更新候选解，迭代过程中根据个体的适应度值选择优秀的个体进行繁殖和变异，逐步逼近最优解，直至满足终止条件。

（4）结果输出：输出最优的施工计划方案（即在满足所有约束条件下，使综合目标函数达到最优值的方案），可缩短工期、降低资源负荷、减少累计成本和碳排放，实现施工管理的智能化优化。

2.4 结果评估与反馈调整

对优化结果进行全面评估，评估内容包括定量评估、定性评估和动态反馈 3 个方面。

（1）定量评估：对比优化前后工期、成本、碳排放等指标的改善情况，直观呈现优化方案的实施效果，为进一步优化提供依据。

（2）定性评估：对优化方案的可行性、安全性进行评估。可行性评估主要考虑方案在实际施工过程中的可操作性，包括资源的可获取性、技术的可行性等；安全性评估则主要考虑方案对施工人员及周围环

境的安全影响，排除安全隐患。

（3）动态反馈：在项目执行过程中，若遭遇设计变更、材料短缺等意外情况，则可实时更新 BIM 模型数据，重新启动优化流程，生成新的应对方案，实现闭环管理。该机制显著提升了施工管理系统的适应性和灵活性，能及时应对各类突发情况，保证项目顺利进行。例如，当发生设计变更时，系统可及时更新 BIM 模型，并重新运行群智能算法，快速生成与之适应的新施工计划。

3 结论

本研究构建了基于 BIM 与群智能算法的施工组织管理智能化优化体系，有效解决了传统施工管理和 BIM、群智能算法单独应用的局限。该体系通过 BIM 集成多维度施工数据，采用 EBL 驱动型群智能优化算法开展优化，实现了施工过程的全局、动态、智能化管控，在保障工程质量的同时，显著缩短工期、降低成本、减少碳排放。后续可进一步完善模型与算法，为建筑行业智能化发展提供更多助力。

参考文献

[1] 郎思琦, 刘海芳, 陈洁, 等. 建筑科技创新与节能减排系统的协同演化研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(增刊 1): 491-495.
LANG S Q, LIU H F, CHEN J, et al. Research on the co-evolution of building technology innovation and energy conservation and emission reduction system[J]. Construction Economy, 2023, 44(S1): 491-495.

[2] 袁烽, 柴华, 谢亿民. 走向数字时代的建筑结构性能化设计[J]. 建筑学报, 2017(11): 1-8.
YUAN F, CHAI H, XIE Y M. Towards a structural performance-based architectural design in digital age[J]. Architectural Journal, 2017(11): 1-8.

[3] 刘晓伟, 张永超, 姚石顺. 建设工程项目施工阶段风险的评估与防范[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(24): 37-47.
LIU X W, ZHANG Y C, YAO S S. Research on risk assessment and prevention in the construction stage of construction project[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(24): 37-47.

[4] 卢颖, 庞黎晨, 陈雨思, 等. 一种面向城市战的无人机路径规划群智能算法[J]. 兵工学报, 2023, 44(增刊 2): 146-156.
LU Y, PANG L C, CHEN Y S, et al. A swarm intelligence algorithm for UAV path planning in urban warfare[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(S2): 146-156.

[5] 李汝宁, 冯兴, 姚仰平, 等. 基于改进遗传算法的机场场道施工方案多目标优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(12): 3720-3728.
LI R N, FENG X, YAO Y P, et al. Multi-objective optimization of airport runway construction schemes based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(12): 3720-3728.

[6] ZHENG T Y, LUO W L, HOU R R, et al. A novel experience-based learning algorithm for structural damage identification: Simulation and experimental verification[J]. Engineering Optimization, 2020, 52(10): 1658-1681.

理想建筑安全通风设计及其量化评价研究

李永强[1]，陈福浩[1]，黄瑶瑶[2]

（1.重庆科技大学 机械与智能制造学院，重庆 401331；2.重庆工商大学 国家智能制造服务国际科技合作基地，重庆 400067）

摘 要：随着世界范围内城镇化水平的不断提高以及建筑技术的飞速发展，当代建筑已经向高标准、高品质方向发展。然而在城市建筑快速发展的同时，2019 年新型冠状病毒给人们的工作和生活方式也带来了极大影响。本研究采取实验测量与理论分析结合的方法，基于建筑水平方向与竖直方向上关键位置的压力、竖向速度分量、颗粒污染物浓度的定性及定量描绘，揭示建筑安全通风设计的原则。以实际在建项目为测量载体，验证设计理论的可靠性。为气态污染所造成的大型公共卫生安全事件的事前预防、事中紧急避险和事后复盘优化上发挥社会价值，为新时期建筑方针提供理论基础。

关键词：建筑通风；城市规划；空气污染物；建筑环境

中图分类号：TU-023 **文献标识码：**A

Research on Ideal Building Safety Ventilation Design and the Quantitative Evaluation

LI Yongqiang[1], CHEN Fuhao[1], HUANG Yaoyao[2]

(1. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. National Intelligent Manufacturing Service International Science and Technology Cooperation Base, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: With the continuous improvement of urbanization levels and the rapid development of construction technology worldwide, contemporary architecture has been evolving towards high standards and high quality. However, while urban construction was developing rapidly, the novel coronavirus epidemic in 2019 also had a great impact on people's work and lifestyle. This study adopts a method combining experimental measurement and theoretical analysis. Based on the qualitative and quantitative depiction of pressure, vertical velocity components, and particulate pollutant concentrations at key positions in the horizontal and vertical directions of buildings, it reveals the principles of building safety ventilation design. Take the actual ongoing projects as the measurement carrier to verify the reliability of the design theory. It plays a social role in the pre-event prevention, emergency avoidance during the event and post-event review and optimization of large-scale public health security incidents caused by gaseous pollution, and provides a theoretical basis for the new era's architectural policy.

Keywords: building ventilation; urban planning; air pollutant; built environment

收稿日期：2025 年 12 月 4 日

基金项目：重庆市建设科技计划（编号 20220184）；重庆市博士后科研项目特别资助（编号 2211013357670761）；重庆市科技局自然科学基金项目（编号 CSTB2022NSCQ-MSX1430）

通信作者：李永强（1987—），男，博士，副研究员，主要从事建筑通风研究，E-mail：yongqiang.li@nusricq.cn。

0 引言

中国城镇化率自 2000 年的 36.5%增长至 2018 年的 59.6%，并预计将达到 81.6%[0]。在 2010—2020 年的房地产高速建设中，建筑规模扩张与环境品质提升并不同步；而 2019 年 COVID-19 在武汉暴发[0]并造成深远影响[0]，进一步凸显城市通风与微生物气溶胶扩散控制的重要性。

新冠病毒推动全球相关研究激增[0]。美国 Pulle[0]用拉格朗日法分析气溶胶 30 分钟内传播；Yuan[0]提出高分辨率非 CFD 风场方法；Bauer[0]基于 WRF 模拟纽约公共安全事件。欧洲 Gromke[0]以风洞研究树篱对街道峡谷扩散的影响；Ramponi[0]以“有效空气龄”评估城市去污效率。新加坡 Li[0]揭示稳定分层下污染累积机制；Yuan[0]构建多层 UCL 模型。

国内研究同样加速发展[0]，彭云龙指出通风指标需结合城市形态[0]；清华大学与气象局模拟北京交通污染[0]；Dai[0]基于 CO_2示踪揭示房间通风差异；彭云龙指出通风指标需结合城市形态。Huang[0]提出“城市透气性地图”并研究热辐射与高架桥影响；Yang[0]构建城市—社区—建筑多尺度防疫框架。

尽管成果丰富，但仍存在三大科学空白：①缺乏 UCL 与峡谷中气溶胶最优疏散模型；②健康建筑标准 T/ASC 02-2021[0]后仍缺少面向超级传播的城市级规划导则；③不足以支撑高危人群识别与疏散管理。本研究旨在为建筑通风优化、健康建筑设计及城市防疫规划提供关键技术支撑。

1 方法

在开展理论分析之前，需要先对建筑市场现状及设计市场现状进行分析。大量城市因新冠病毒的不可控扩散，大量的人群感染而被迫进行隔离或者局部隔离，给人们的生命财产安全造成了极大影响的同时也引发了人们对现代建筑居住安全的深入思考主流房地产公司建筑设计现状分析。

1.1 主流房地产公司建筑设计现状分析

在世界各地的相关研究中，建筑通风已经有了数百年的研究历史，现代建筑技术、规划理念、设计概念也不断进化。针对当前仍在继续扩大的中国建筑市场，本研究首先依据大型网站官方发布数据，对典型居住建筑前十的开发商进行分析（搜狐网 2022），探讨其市场占比与其建筑设计品质之间的关系，探寻其量与质的相关性（如图 1 所示）。

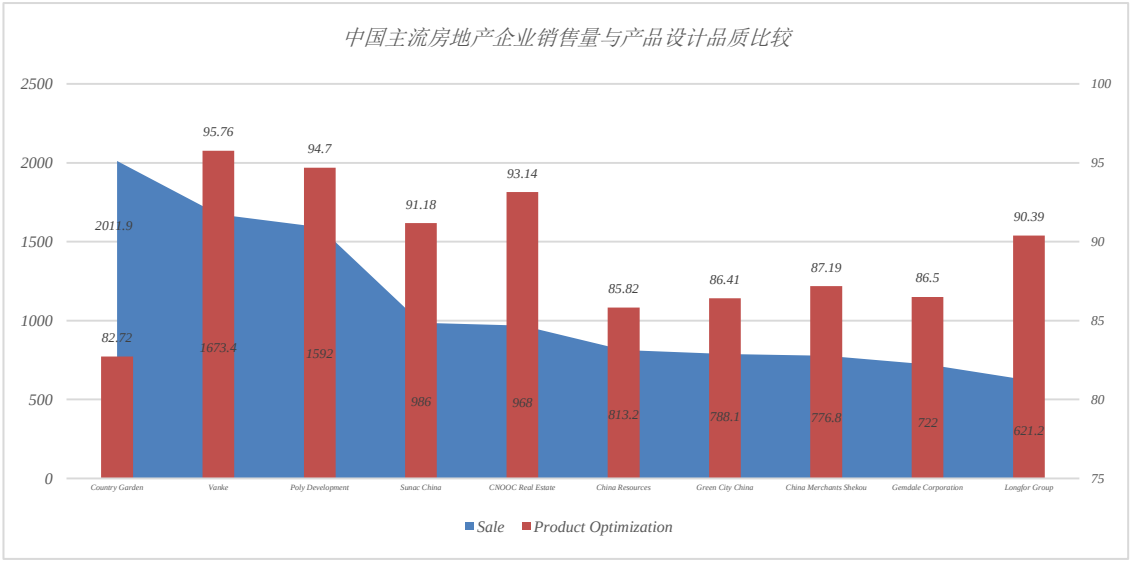


图 1　2022 年中期中国主流房地产企业销售量与产品设计品质比较

图 1 说明（源自 www.sohu.com，数据截止 2022 年 6 月 30 日）：

1. 销售总额：来源于 CRIC 交易额和中科院数据。
2. 销售均价：来源于 CRIC 交易量除以交易面积和中科院数据。

3. 奖项数量：计算最新一届金牌奖数量（建筑设计典型奖项“金牌奖”和“金房奖”）。
4. 项目视图：365 天内所有项目的现场视图（次数）。
5. 平均浏览时长：365 天内浏览的所有项目的平均值。
6. 认证供应商：365 天内企业新认证的工程公司和材料供应商数量。
7. 排名是基于产品功率指标的综合排名。

如图 1 所示，中国前十地产之间的销量差异明显。然而在销量相对较大与销量相对较小的不同地产公司对比而言，其设计水平也各异，与其销量呈现出了明显的不相关性。如作为销量居首的碧桂园集团，其设计水平评价却相对较低；而市场份额占比稍低的龙湖集团，其设计水平却得到较高评价。综合来讲，各品牌地产的销量与其设计品质之间出现了较大偏差。中国的建筑市场表现出不平衡与不稳定的双重特点，需要从项目建设的全周期过程探讨产生这种结果的原因及提出合理的解决办法。

1.2 不同建筑高度模拟分析

以上研究以定性研究为主，首先识别建筑周边涡流区影响的关键位置，以及涡流区在前后建筑布局中的扰动。在该部分研究中，针对以上研究重点区域进行定量研究，以便准确指导建筑设计。在理想条件下，我们研判了自然梯度风在高度风向上、尾流方向上以及建筑两侧间距的影响，在以上位置从建筑表面几何中心位置进行线性延伸，建立监测线，对监测线上各点进行数据捕捉，并最终描述其函数分布区间。模型设计方面，选取 3.3 m 层高作为研究对象，在高层建筑范围内（100 m 高度/30 层），进行建筑分析。选取以上典型研究区域的高阶变量湍流耗散率作为研究对象。

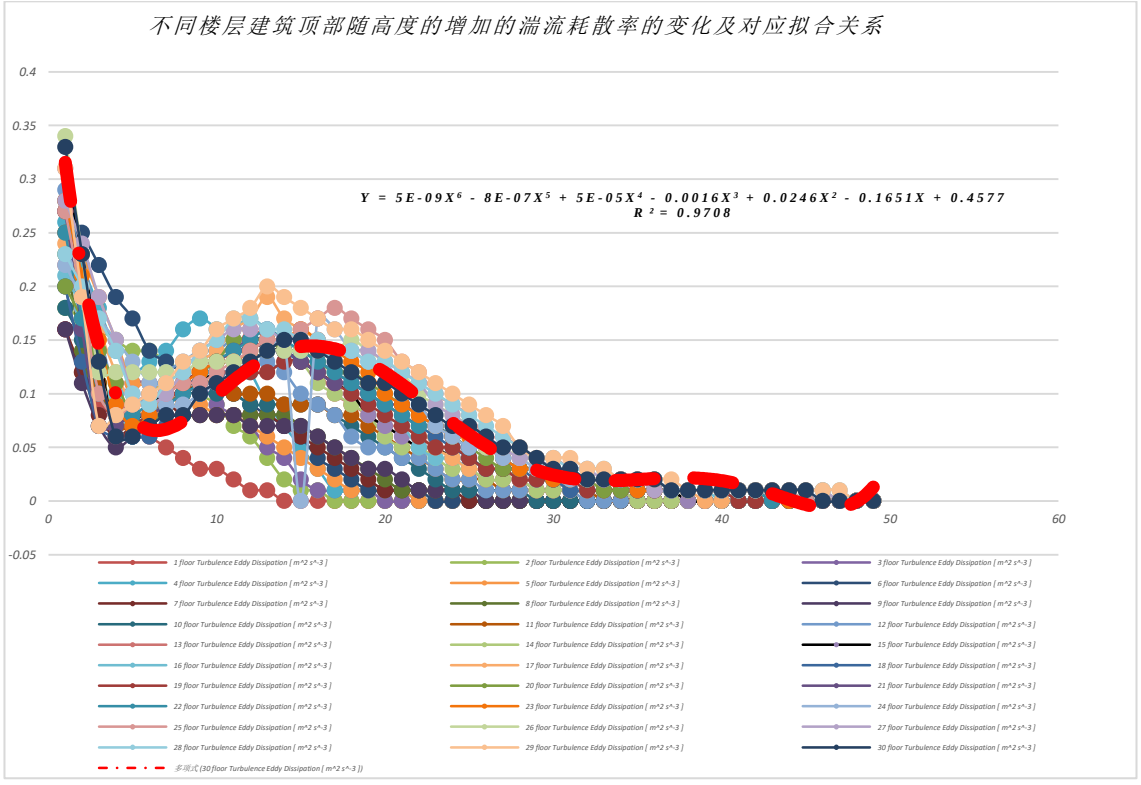


图 2 不同的楼层建筑顶部随高度的增加的 Velocity-Z 的变化及对应拟合关系

如图 2 所示，随着建筑层数的增加，湍流耗散率在其整个变化过程中的数值也增大。同一栋建筑也出现了湍流耗散率数值由较大到迅速减小再增大而后缓慢减小的过程。其最大值出现在约 TED=0.34 m^2/s^3 位置，迅速减小的最小值出现在 TED=0.05 m^2/s^3 位置，而后形成波动。楼层越高，湍流耗散率变化越慢，所形成影响的区域范围越大，但是其最大值出现在楼面附近位置，受建筑羽流及自然梯度风的共同作用而在近楼面位置迅速形成湍流产生面。通过观察各楼层建筑的湍流耗散率发现，在 0～5 m 范围内，湍流耗散

率迅速减小，而后逐渐增大，在 Z=50 m 处才逐渐归零。其多项式的提取为建筑顶部安全通风，尤其是建筑顶部污染物排放的设计提供参考数理参考依据。

1.2.1 水平方向模拟分析

如图 3 所示，随着建筑楼层的增加，建筑尾流区所形成的湍流耗散率最值增大，波动（波峰及周期）也增大。楼栋经历了湍流耗散率先增大，而后缓慢减小至 0 的过程。在高层建筑以内，湍流耗散率的最大值达到 0.07 m^2/s^3，且在接近 Y=900 m 的位置才逐渐减小至接近 0。楼层越高，对应湍流耗散率数值越大，达到稳定所需的距离越长。在 Y=100 m 范围内，湍流耗散率迅速增大，而后再次迅速减小，在 Y=400 m 处才逐渐过渡到接近 0 的平稳状态。在自然梯度风和建筑扰流的共同作用下，湍流耗散率最终减小并耗散。湍流耗散率的存在同样会影响人们出行的舒适性，对以上湍流耗散率的数值描述，有利于建筑尾流区园林及道路的设计。

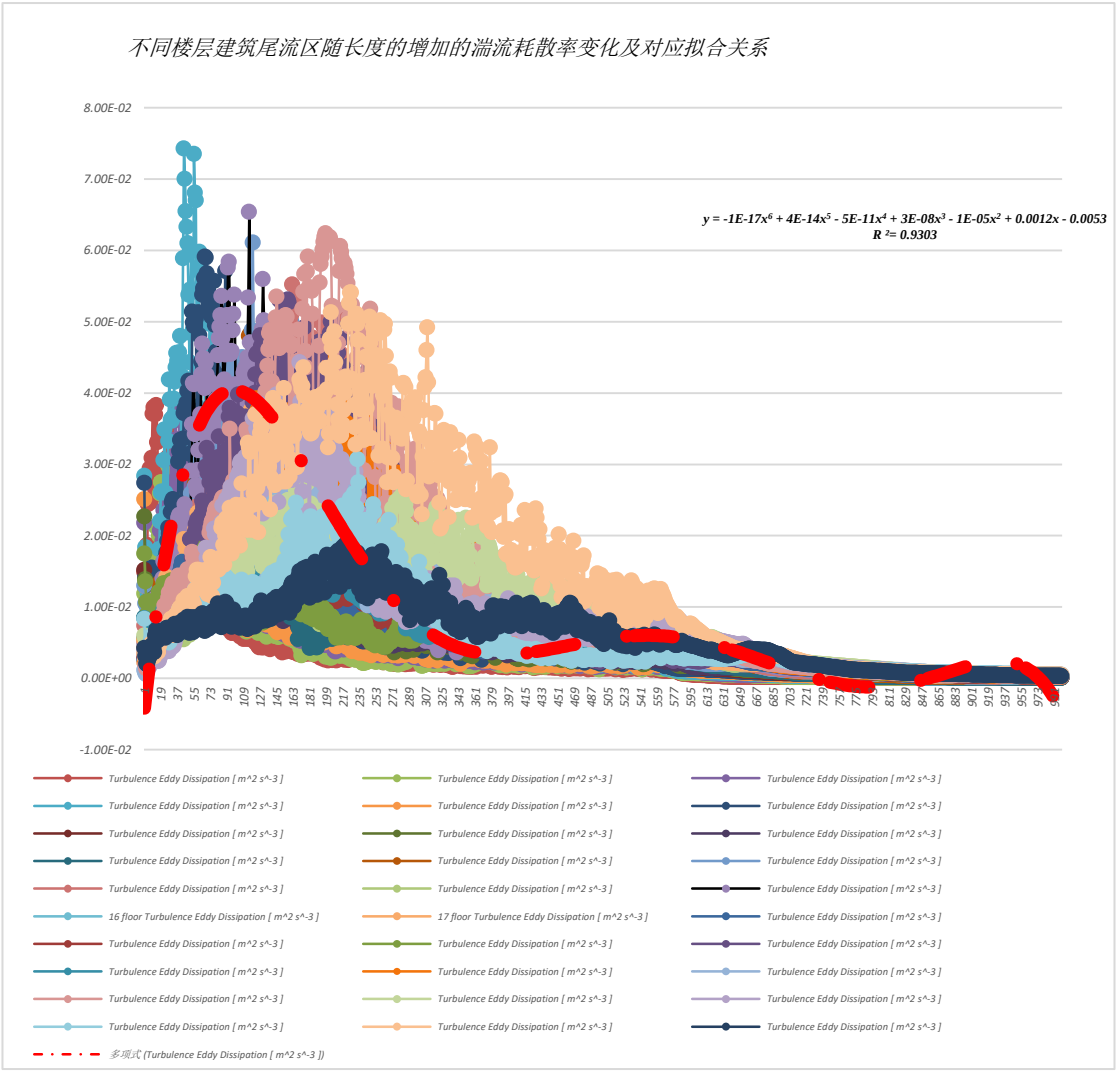


图 3 不同的楼层建筑尾流区随长度的增加的湍流耗散率变化及对应拟合关系

2 结果

通过以上对建筑高度方向及建筑尾流区域的分析，本研究定量化描述了建筑顶部，尾部涡流对周边建筑的影响。如上所述，单体建筑对于周边建筑的影响我们也重点关注其污染物分布所带来的影响。选取 1 层到 30 层建筑的迎风面作为污染物释放面，释放强度为 0.00167 kg/s（模拟 100 名感染人员同时呼吸，平

均粒径为 10 μm，分布范围为直径[1 μm～100 μm 的正态分布]的空气漂浮颗粒作为释放源，COVID-19 附着在悬浮颗粒上），探寻以上关键位置污染物的分布特点。

2.1 单体建筑设计通风间距分析

由图 4 可以看出，随着楼栋高度的增高，在建筑顶部以上高度方向上污染物浓度增大，且污染物对上传播的距离也增大。同一栋建筑，随楼顶高度的增加，污染物浓度经历了先增大后减小的过程，最终回归至 0。在百米建筑的高度方向上，污染物浓度最大值达到 3.5×10^{-9} kg/m^3。且在临近楼顶屋面位置，病毒颗粒与楼面进行直接接触而形成某一起始数值。因此在楼栋产生污染之际，楼顶活动通常情况下需要严格注意。污染物浓度稳定在 Z=30 m 高度处，且在 Z=15 m 处达到最大，最终被上升的建筑羽流与水平的自然梯度风双重作用下耗散。在 Z=15 m 至 Z=30 m 之间污染物的升高及下降趋势呈现出对称分布。不同的楼层建筑在其建筑顶部污染物浓度变化曲线，为楼面设计以及下游建筑的高度设计提供依据。

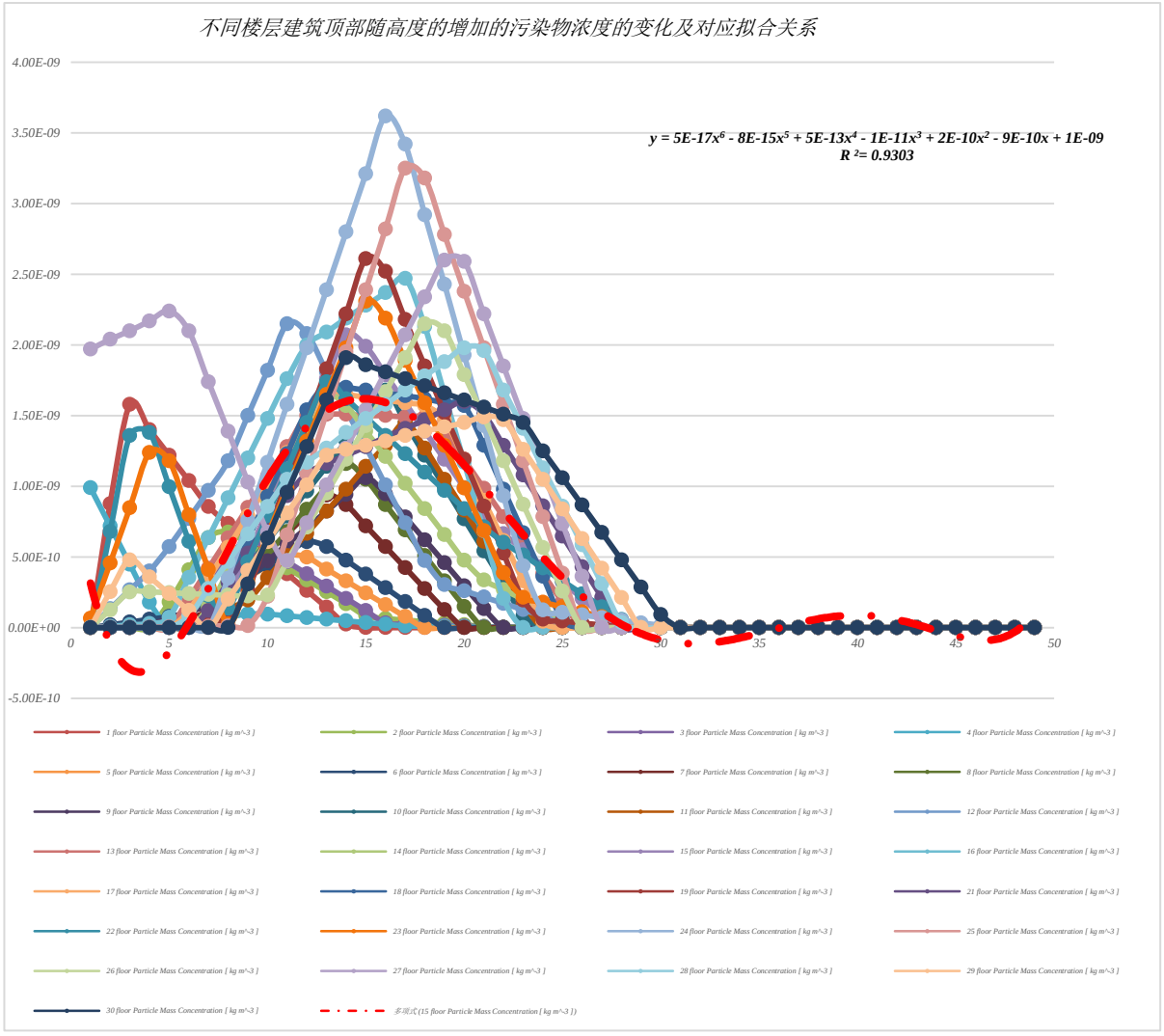


图 4 不同的楼层建筑顶部随高度的增加污染物浓度的变化及对应拟合关系

从图 5 可以看出，随着建筑高度的增加，建筑尾流区污染物浓度呈现出规律较为模糊，波动较大。同一栋建筑上，建筑尾流区域基本也经历了先增大再减小的变化趋势，在建筑尾流区出现最大污染浓度为 1.4×10^{-8}kg/m^3，明显大于在建筑水平方向上出现的污染物浓度。总体而言，楼层越高尾流区域的污染物浓度越大。污染物浓度归零位置约在 Y=700 m 处，影响范围巨大。然而在 Y=550 m 范围内，受多阶涡流的影响，污染物浓度达到最大值的位置和变化规律较难预测。利用六阶多项式进行回归，得到回归系数 R2 仅

为 0.399，在实际建筑设计分析中，准确把握尾流区污染物浓度难度大，在设计过程中宜单独讨论。

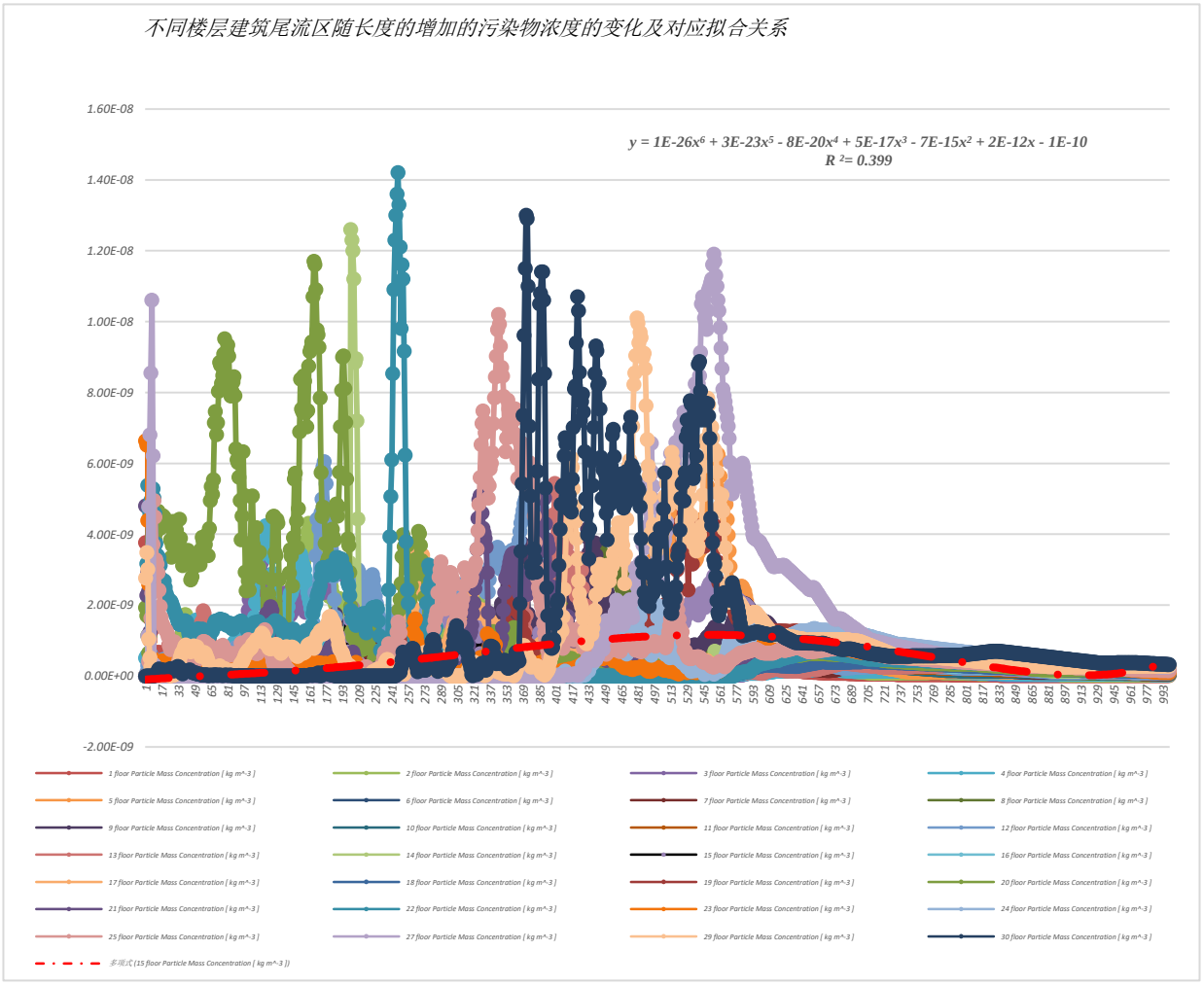


图 5　不同的楼层建筑尾流区随长度的增加的污染物浓度的变化及对应拟合关系

3　讨论

通过以上讨论，我们通过单体建筑，纵向排布建筑，横向不同高度建筑的定量分析，找到建筑周边关键位置产生的涡流对周边建筑的扰动。然而实际建筑设计过程中需要按照以上理论分析进行设计落地是否具有可行性，以及这种设计在实际应用过程中是否能反应其计算效果，需要进一步研讨分析。在该部分研究内容中，我们选取实际工程作为示范项目，应用以上建筑分析技术，在园区的设计过程中加以运用。

3.1　项目简介

本研究的开展将依托以某“科技创新基地”为工程项目示范与实验测量载体。2021 年，四川省与重庆市联合签订“科技创新基地协议”，将在新区建设“某科技创新基地”。该项目总用地面积约 567 亩，总建筑面积约 47.4 万 m^2，项目分为产业孵化区、科技创新孵化区、配套服务区三个功能区。图 6 展示了科技创新基地首期复杂的城市功能分区及项目概况，为本研究的顺利开展提供了工程项目示范与实验测量载体。

本研究联动当地建设主管部门、当地气象站开展项目相关城市冠层、峡谷效应、建筑设计的规划设计工作。通过仪器现场实测，采集现场气象条件，并制作风速边界条件，以支持模拟分析研究。现场气象条件测量及使用设备清单如图7及表1所示。



图 6 本研究的项目示范和实验载体某“创新基地”



图 7 创新基地现场气象条件测试

表 1 创新基地现场测试实验仪器

仪器名称	WWFWZY-1 记录仪		JTR04 黑湿球温度计	PpbRAE 3000 VOC 检测仪 PGM-7340		DUSTTRAK II 检测仪 8532
测量精度	温度	0.01 ℃	0.1 ℃	±3%的校准点（10~2000 ppm 异丁烯）		±0.1% or ±0.001 mg/m³
	风速	0.01 m/s				
测量量程	温度	0.01 m/s	-20~125 ℃	10.6 eV	1 ppb~10 000 ppm 1ppb	0.001-150 mg/m³
				9.8 eV	1 ppb~10 000 ppm 1ppb	
	风速	0.05-30m/s		11.7 eV	0.1 ppm~2 000 ppm 10ppb	
校核精度	温度	±0.5 ℃	±0.5 ℃	温度范围	-20 ºC-50 ºC	±0.002 mg/m³ 24 小时误差
	风速	5%±0.05 m/s (0.05~30 m/s)		湿度范围	0% to 95% 相对湿度（无凝结）	
测试间隔	2 sec~24 hour		1~255 min		1~3 600 sec	1 sec~1 hour

通过现场测试气象数据，得到风速梯度函数如下：

通过以上测量制作自然梯度风 UDF 如下：

```
#include "udf.h"
#define z0 10
#define u0 2.0
#define a    0.22

DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity,thread,index)
{
   real x[ND_ND];
   real z;
   face_t f;
   begin_f_loop(f,thread)
   {
      F_CENTROID(x,f,thread);
      z=x[2];
      F_PROFILE(f,thread,index)=u0*pow(z/z0,a);
   }
```

```
    end_f_loop(f,thread)
}
```

3.2 模型简介

本研究利用已检验的 LES 模型 [0] 在自然风速场中模拟城市人口密集区微生物气溶胶扩散过程。选取 LES 模型原因如下：大尺寸上 LES 模型更具有通用性；大涡流在主要流动中起主导作用，小涡流不起主导作用；动量、质量及能量主要由大尺寸涡流传输。在近地面及近壁面附近分别采用 Realizable k-ε 模型（植物屏障处理）和 RNG k-ε 模型（建筑立面及构筑物处理）来模拟，这是因为本研究中污染物与壁面碰撞时，会发生以下情况：①捕获边界（trap）：颗粒或液滴中的挥发性物质在壁面处被捕获，在此处被释放到气相中，其全部质量瞬间转化为蒸汽相并进入与壁面相接的计算网格中；而非挥发性颗粒在此处终止计算；②反射边界（reflection）：颗粒发生弹性或非弹性碰撞反射，动量发生改变，变化量由反弹系数确定。

3.2.1 计算域

根据风场模拟要求，建筑覆盖面积小于整个计算域的 7%，目标建筑群设置在机场中心。参数 H1 设置为产业园区横向最大长度，H2 设置为产业园区纵向最大长度。根据工业园区建筑设计尺寸，XYZ 方向立体尺寸分别为 7500 m、13627 m、600 m。

3.2.2 边界条件

利用现场实测风速，边界条件分别采用南向速度入口和北向压力出口的组合。定义气域东、西、顶面为自由滑移面，剪切力为 0。形成了平均粒径为 10 μm、分布范围为直径[1 μm ~ 100 μm]的空气漂浮颗粒作为释放源，COVID-19 附着在悬浮颗粒上。

3.2.3 网格简介

空气域网格总数为 3 369 万个，含构造面 715 个单元，构造线 3 127 个，四面体单元 3128 万个。为了在关键区域获得更高的精度，将靠近地面和建筑群的单元分别致密化为 2 133 263 和 17 955 个四面体。网格质量最好为 0.99，最差为 0.10（占总网格数的 4.12%），平均质量值为 0.74，网格质量最集中的区域为[0.90,0.95]（占总网格数的 23.36%）。

3.2.4 计算设置

在瞬态计算条件下，对基于压力的模型进行了仿真。在模拟过程中，重力场和温度场是耦合的，多分量模型和离散相模型是相互作用的。为了保证粒子迁移的模拟精度，湍流结合拉格朗日扩散模式选择标准 k-ε 模型。为了保证效果收敛，连续性方程和能量方程的残差监测器分别定义为 1×10^{-3} 和 1×10^{-6}。

依据中国绿色建筑评价标准（GB/T 50378-2019）对建筑设计方案进行了两个维度分析：（1）室外行人活动区，距地面1.5 m高平面；（2）建筑开窗通风区，距建筑立面0.5 m偏移。根据现有的设计方案，在易发生污染的区域，根据建筑方案创建了与排风口、行人出入口、出口相对应的污染源面共35个，如图8所示。

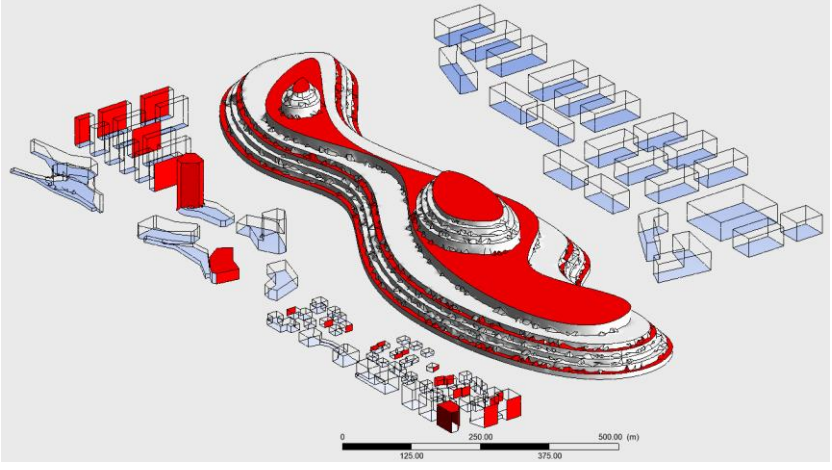


图 8 建筑设计方案中典型污染物扩散源的提取（红色平面所示）

3.3 模拟结果验证

对比模拟实验，以实际气象条件和实验期间施工现场工作粉尘颗粒浓度作为输入边界条件。在三维模型空间中选取10个监测点，与对应监测点的现场实测数据进行对比。仿真结果与现场测试结果对比如图9、图 10 所示。在典型环境参数（风速、压力等）和颗粒浓度方面，模拟计算结果与现场试验结果吻合较好。模拟结果在变化趋势和数值量级上与现场试验结果一致，表明模拟结果反映了现场通风场景。



图 9 以粉尘颗粒浓度为检测对象的施工现场监测点实测

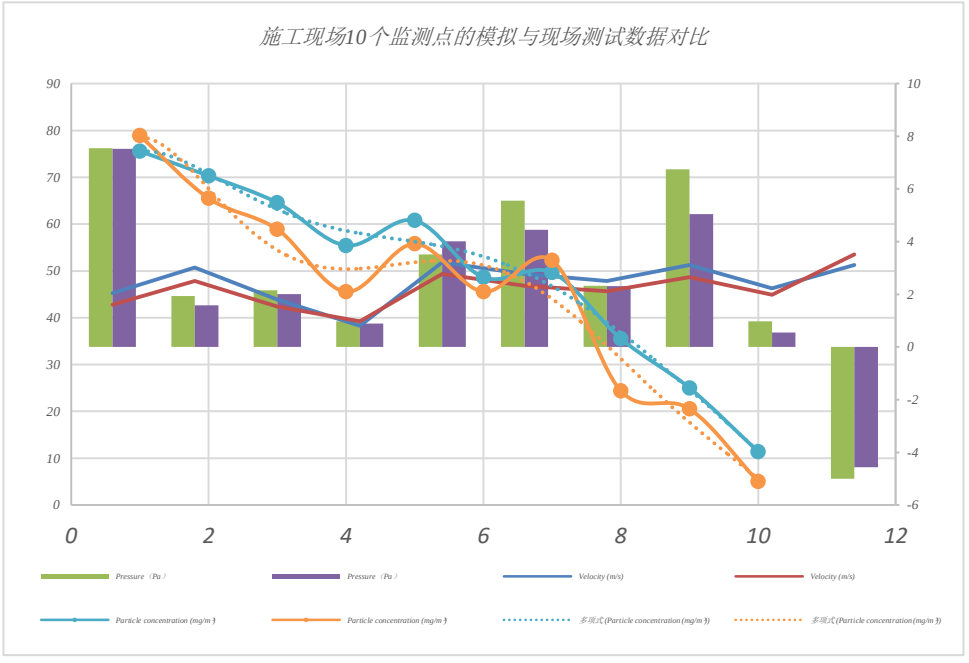


图 10 施工现场 10 个监测点的模拟与现场测试数据对比

3.4 理论成果应用

在以上模拟及测试工作的基础上，我们选取园区后排建筑作为典型建筑（后排建筑受到建筑间的耦合影响等最多，代表性最强），分析其在建筑高度方向及水平方向上压力、竖向速度分量以及湍流耗散率之间的关系，如下图 11、图 12 所示。可以看出，在水平方向上以上三项特征变量的分布特点与本研究中理论分析部分结果一致，表现出一致性的波动趋势或变化趋势。理论研究所得的基础拟合关系在复杂建筑群中仍然适用，有其应用价值。

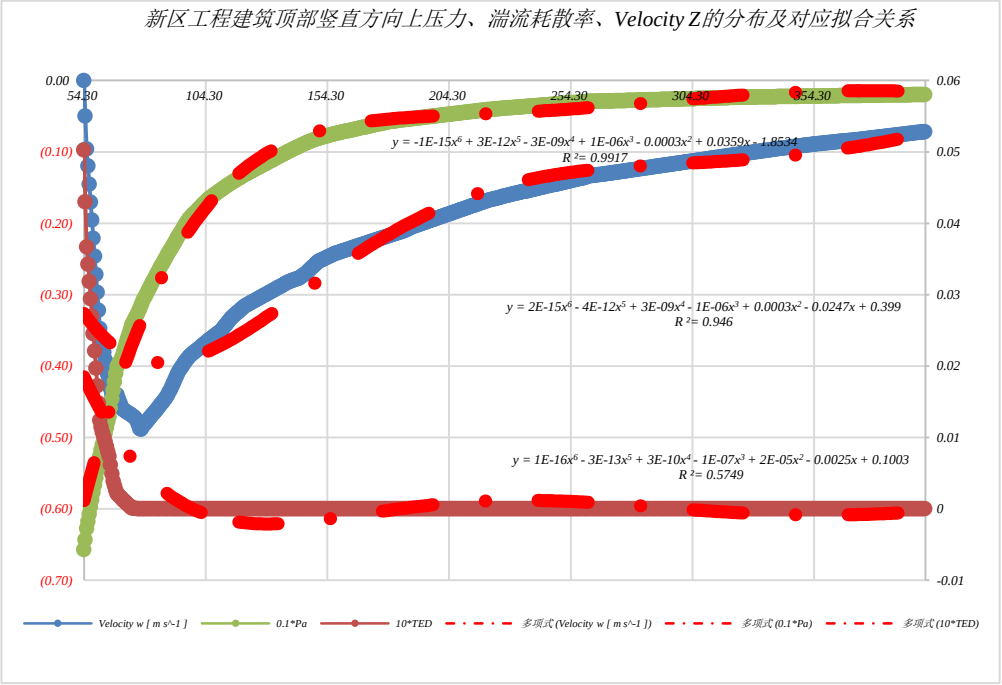


图 11　新区工程建筑顶部竖直方向上压力、湍流耗散率、Velocity Z 的分布及对应拟合关系

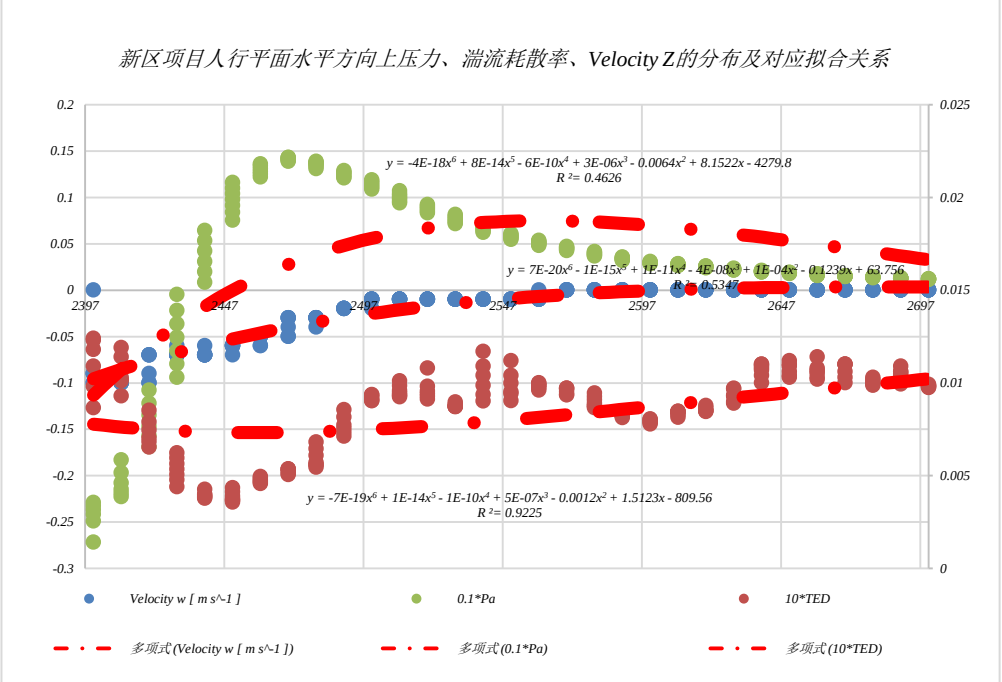


图 12　项目人行平面水平方向上压力、湍流耗散率、Velocity Z 的分布及对应拟合关系

4　结论与展望

本研究采取数值模拟为主，实验测量与理论分析为辅的研究方法，定性及定量的描绘建筑健康通风设计的要求。以实际在建项目为示范基地，验证模拟所得理论的可靠性，同时对于已形成建筑方案，进行健康通风综合评价。在所测得气象条件下，得到如下主要结论。

（1）建筑顶部高度方向上：涡流主要集中于 H=45 m 以内，在此高度以上负压迅速消失。竖向速度在 H=35 m 以下迅速增大，当高度超过 35 m 时，竖向速度逐渐减小至 0。在 0～5 m 范围内湍流耗散率迅速减

小，在 Z=50 m 处逐渐归零。污染物浓度稳定在 Z=30 m 高度处耗散，且在 Z=15 m 处达到最大。

（2）建筑尾流水平方向上：建筑尾流区最大负压值出现在约 Y=90 m 处，在 Z=360 m 处才逐渐归零。尾流区域竖向速度在 Y=450 m 处衰减到基本接近于 0。湍流耗散率在 Y=100 m 范围内迅速增大，在 Y=400 m 处才逐渐过渡到接近 0 的平稳状态。污染物浓度归零位置约在 Y=700 m 处，影响范围巨大，且受多阶涡流的影响，污染物浓度最大值位置较难预测。

以上本研究所得出的系列定性及定量分析，为实际工程案例的应用提供了切实可行的设计指导原则。在未来的进一步研究中，我们将在建筑安全通风设计原则基础上，进一步探讨建筑安全通风机理，以实现：

（1）污染物的最优疏散路径计算方法（包括最小紊流度衰减、致病区域识别、城市冠层最佳疏散效率等指标）。

（2）病毒或化学衰减污染物全生命周期内动态传播机理（包括动态扩散形态、高致病性风险区域预测、室内通风逻辑及人员行为模型）。

（3）街道峡谷尺度及城市尺度下的建筑健康通风规划设计原则。

5 致谢

感谢“重庆市博士后科研项目特别资助（编号2211013357670761）”，“重庆市科技局自然科学基金项目（编号CSTB2024NSCQ-MSX0825）”，“重庆市博士后出站留（来）渝资助（编号2025-18）”，“重庆科技大学青年科学基金项目（编号ckrc20241216）”，“重庆市沙坪坝区2025年度技术创新项目（编号2025058）”，“2025年度市教委科学技术研究计划项目（编号2025-592）”的支持。

参考文献

[1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[N]. 人民日报, 2021-03-13. 001(11-0065).Outline of the Fourteenth Five-Year Plan for the National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Vision for 2035[N]. People's Daily, 2021-03-13. 001(11-0065). (in Chinese)

[2] Lin B Q, and Zhu J P, Changes in urban air quality during urbanization in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 312-321.

[3] Xu G, Jiao L M, Yuan M, et al. How does urban population density decline over time? An exponential model for Chinese cities with international comparisons[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 183: 59-67.

[4] Yang L, Yu X, Wu X L, et al. Emergency response to the explosive growth of health care wastes during COVID-19 pandemic in Wuhan, China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 164: 105074.

[5] Cruz M P, Santos E, Velázquez Cervantes M A, et al., COVID-19, a worldwide public health emergency[J]. Revista Clínica Española (English Edition), 2021, 221(1): 55-61.

[6] 刘伟. 自然风速场下微生物气溶胶的室内外扩散与风险研究[D].天津大学,2011.Liu W. Indoor and outdoor dispersion and risk of microbial aerosols under natural wind speed field[D]. Tianjin University, 2011. (in Chinese)

[7] 郑云昊,李菁,陈灏轩等.生物气溶胶的昨天、今天和明天[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 878-894.Zheng Y H, Li J, Chen H X, et al. Bioaerosol research: Yesterday, today and tomorrow[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(10): 878-894. (in Chinese)

[8] Qian Y, and Fan W. Who loses income during the COVID-19 outbreak? Evidence from China[J]. Research in Social Stratification and Mobility, 2020, 68, 100522.

[9] 段进,杨保军,周岚等. 规划提高城市免疫力——应对新型冠状病毒肺炎突发事件笔谈会[J].城市规划, 2020, 44(02): 115-136.Duan J, Yang B J, Zhou L, et al. Planning improves city's immunity: a written

conversation on COVID-19 breakout[J]. City Planning Review, 2020, 44(02): 115-136. (in Chinese)

[10] 范如国, 王奕博, 罗明等. 基于 SEIR 的新冠肺炎传播模型及拐点预测分析[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(03): 369-374.Fang R G, Wang Y B, Luo M, et al. SEIR-Based COVID-19 transmission model and inflection point prediction analysis[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(03): 369-374. (in Chinese)

[11] Pullen J, P. Boris J, Young T, et al. A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(6): 1049-1068.

[12] Yuan C, Norford L, Britter R, et al, A modelling-mapping approach for fine-scale assessment of pedestrian-level wind in high-density cities[J]. Building and Environment, 2016, 97: 152-165.

[13] Bauer T J, The Effect of the Urban Parametrization on Simulated Contaminant Atmospheric Transport and Dispersion[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2019, 170(1): 95-125.

[14] Gromke C, Jamarkattel N, and Ruck B, Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons[J]. Atmospheric Environment, 2016, 139: 75-86.

[15] Ramponi R, Blocken B, B. de Coo L, et al, CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths[J]. Building and Environment, 2015, 92: 152-166.

[16] Li X X, Britter R, and Norford LK, Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation[J]. Atmospheric environment, 2016, 144: 47-59.

[17] Yuan C, Shan R Q, Zhang Y Y, et al, Multilayer urban canopy modelling and mapping for traffic pollutant dispersion at high density urban areas[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 255-267.

[18] Hang J, Ma L, Wang D, et al, On the influence of viaduct and ground heating on pollutant dispersion in 2D street canyons and toward single-sided ventilated buildings[J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(5): 817-832.

[19] Peng Y L, Buccolieri R, Gao Z, et al, Indices employed for the assessment of "urban outdoor ventilation" - A review[J]. Atmospheric Environment, 2020, 223, 117211.

[20] Liu Y S, Miao S G, Cui G X, et al, Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 107: 106-117.

[21] Dai Y W, Mak C M, Zhang Y, et al, Investigation of interunit dispersion in 2D street canyons: A scaled outdoor experiment[J]. Building and Environment, 2020, 171, 106673

[22] Hang J, Wang Q, Chen X Y, et al, City breathability in medium density urban-like geometries evaluated through the pollutant transport rate and the net escape velocity[J]. Building and Environment, 2015, 94: 166-182.

[23] 杨俊宴, 史北祥, 史宜等. 高密度城市的多尺度空间防疫体系建构思考[J]. 城市规划, 2020, 44(03): 17-24.Yang J Y, Si B X, Si Y, et al, Construction of a multi-scale spatial epidemic prevention system in high-density cities[J]. City Planning Review, 2020, 44(03): 17-24. (in chinese)

[24] Mac V V, Elon L, Smith D J, et al, A modified physiological strain index for workplace-based assessment of heat strain experienced by agricultural workers[J]. American Journal of Industrial Medicine, 2021, 64(4): 258-265.

[25] Nakayama H, Takemi T, and Yoshida T, Large-Eddy Simulation of Plume Dispersion in the Central District of Oklahoma City by Coupling with a Mesoscale Meteorological Simulation Model and Observation[J]. Atmosphere, 2021, 12(7): 889.

三阶贯通·三堂联动·三圈协同：工程计量计价类职教金课建设与实践

王玉合[1]，袁 俊[1]，柴 盼[2]，罗珍妮[2]

（1.重庆建筑工程职业学院 城市治理学院，重庆 400072；2.重庆建筑工程职业学院 智能建造学院，重庆 400072）

摘 要：随着数字住建战略的深化与建筑业数字化转型的加速，工程计量计价领域正发生深刻变革，对高职院校人才培养提出全新挑战。针对当前工程计量计价类课程存在的建设进程割裂、教学场域单一、育人主体协同不足等核心问题，构建并实践了“三阶贯通·三堂联动·三圈协同”的金课建设模式。聚焦课程建设主进程，创建“基础—平台—效果”三阶贯通的递进式体系；聚焦课堂教学主阵地，打造线下、线上、实践三堂联动的教学新生态；聚焦教师队伍主力军，形成核心、拓展、边缘三圈协同的育人共同体。实践表明，该模式显著提升了课程建设质量与育人成效，相关成果已成功应用于海外职教标准开发、行业培训与区域职教改革，为同类课程建设提供了可复制、可推广的系统解决方案。

关键词：数字住建；工程计量计价；课程建设

中图分类号：G710、G712 **文献标识码**：A

Trinity in Integration, Interconnection and Synergy: Construction and Practice of Gold Courses in Engineering Quantity and Cost Measurement for Vocational Education

WANG Yuhe[1], YUAN Jun[1], CHAI Pan[2], LUO Zhenni[2]

(1. School of Urban Governance, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China; 2. School of Intelligent Construction, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China)

Abstract: Facing the accelerated advancement of the digital construction and housing strategy and the digital transformation of the construction sector, the field of engineering quantity and cost measurement is experiencing a profound transformation, presenting entirely new challenges for talent training in higher vocational institutions. Aiming at the core problems existing in current courses, such as the fragmented development process, the singular teaching field, and insufficient collaboration among educating entities, a gold course construction model of "three-stage integration, three-classroom linkage, and three-tier collaboration" was built and practiced. By focusing on the main process of course construction, a progressive system of "foundation—platform—effect" that integrates the three stages was created; by focusing on the main position of classroom teaching, a new teaching ecology linking offline, online, and practical classrooms was built; by focusing on the main force of the teaching team, an educating community that collaborates across core, extended, and peripheral tiers was formed. Practice indicates that this model has significantly improved course construction quality and educational outcomes. The achievements have been successfully applied in the development of overseas vocational education standards, industry training, and regional vocational education reform, providing a replicable and promotable systematic solution for the construction of similar courses.

Keywords: digital construction and housing; engineering quantity and cost measurement; course construction

收稿日期：2025 年 9 月 28 日

基金项目：重庆市教育科学规划课题（K23ZG3230200）

第一作者：王玉合（1985—），男，博士，讲师。E-mail：wyh@cqjzc.edu.cn。

随着智能建造与建筑业数字化转型加速，尤其是近年来数字住建上升为住建行业“举全行业之力持续建设”的战略高度，工程计量计价领域正迎来以建筑信息模型（Building Information Modeling，BIM）技术深度融入、全过程造价管控集成化、工程造价数据资产化为核心的深刻变革[1-2]。在此背景下，作为高素质技能人才培养的主阵地，高职院校工程计量计价类课程必须积极回应“数字技术重构职业能力标准、教学场域跨情境联动、多元主体深度融合育人”的新时代要求。然而，当前该类课程在建设逻辑、场域联动、多元协同等方面仍存在系统性短板：

（1）建设过程割裂化[3-4]，课程建设未贯通“育人基础夯实—育人平台搭建—育人效果验证”的递进式建设进程，基础理论教学与行业新技术应用脱钩，人才培养质量评价缺乏产教融合导向的动态反馈机制；

（2）教学场域单一化[4-5]，教学普遍局限于线下课堂，陷入“理论灌输多、实景项目少、数字赋能弱”的困境，未形成“教学做创”一体化机制，学生难以完成从“计量算量”到“经济决策”的能力跃迁；

（3）育人主体孤岛化[3,6]，教学实施过度依赖校内专任教师，行业企业专家参与度不足，学生自主学习和朋辈互助机制缺失，“教师主导、学生被动”的传统模式难以适应“岗课赛证”融通培养需求。

金课建设是办好高水平高职教育的基石，全面推进职教金课建设是提升职业教育人才培养质量的战略举措。鉴于工程计量计价类课程在高职院校土木建设类专业高素质技能人才培养过程中发挥着重要的支撑作用，针对上述问题，需秉持金课建设与课程思政建设同向同行的理念，全面落实立德树人根本任务，深入推进工程计量计价类职教金课建设，在建设范式、教学模式、育人能力等方面开展一系列改革，着力推动价值塑造、知识传授和能力培养的深度融合，积极营造“教师爱教、善教、乐教，学生勤学、悦学、会学”的良好氛围，探索构建“主进程、主阵地、主力军”的职教金课系统性建设新格局。建设思路如图 1 所示。

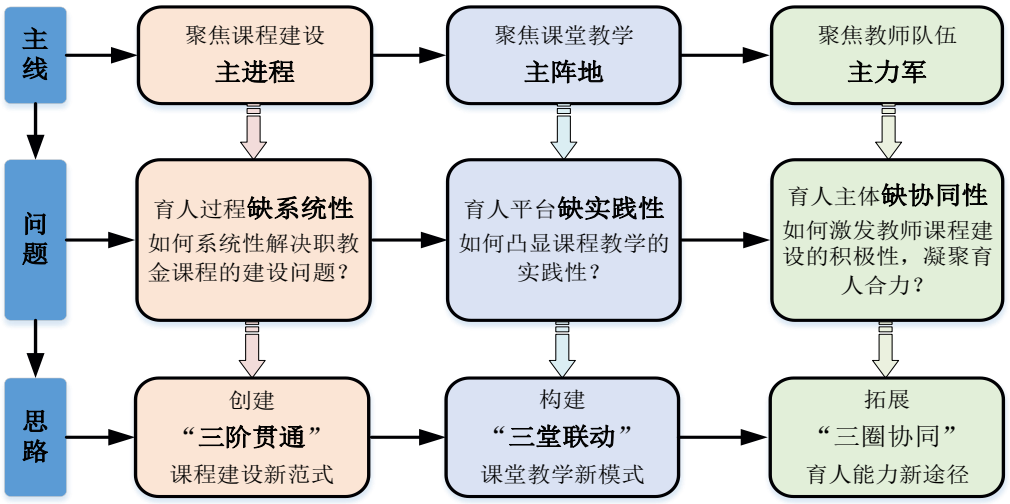


图 1　建设思路

Fig.1　Construction idea

1　聚焦课程建设主进程，创建三阶段金课建设的贯通体系

贯通“育人基础→育人平台→育人效果”改革进程，系统构建三阶段递进衔接的金课建设体系，实现课程育人在时间维度和教学环节上的全程贯通，有效解决课程育人闭环断裂的教学难题。三阶贯通体系构建如图 2 所示。

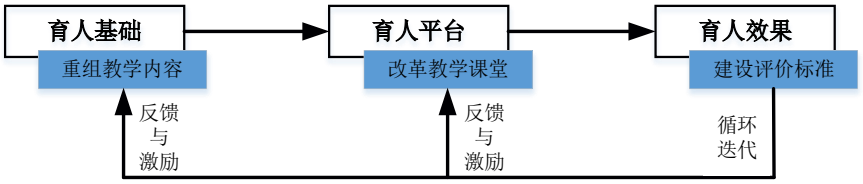


图 2 三阶贯通体系构建

Fig.2 Construction of the third-order through system

1.1 重组教学内容，筑牢课程育人基础

课程内容是课程育人的基础，直接决定后续综合改革成效。因此，必须以学生为中心，结合高职院校学生实际情况，对教学内容进行彻底梳理与重组，开发出与时俱进的课程内容，筑牢课程育人基础。

遵循创新性、高阶性和挑战度（即“两性一度”）的职教金课建设标准，坚持金课建设与课程思政建设同向同行的建立理念，深化课程育人供给侧改革，对教学内容进行系统化、模块化重组，梳理形成理论、计量、计价和综合应用 4 个模块。内容选择上突出创新性，以建筑业数字化转型的前沿技术与案例替代教材中过时的内容；内容组织上强化高阶性，通过知识点的内在关联，将知识传授、能力培养与素质提升有机融合；难度设计上体现挑战度，注重知识点间的难度梯度与组合逻辑。最终围绕基础性、专业性和操作性，形成涵盖工程计量计价原理、各专业工程量计算、工程计价及综合应用等的稳定知识体系，同时注重课程思政的巧妙融入，落实立德树人根本任务。经多次迭代，最终形成稳定的课程内容知识体系，并配套开发教学视频、自我测验、规范节选、扩展阅读和配套教材等多样化的教学资源，筑牢课程育人基础。教学团队还与重庆市建设工程造价管理协会、广联达等行业企业合作，完善教学资源，进一步提高资源的含“金”量与时代性。

1.2 改革教学课堂，优化课程育人平台

课堂是课程育人的主阵地与核心平台，唯有推动课堂改革，教育革新才能真正落实[7]，因此金课建设必须以课堂改革为载体具体执行。根据国家倡导的课堂改革方向（高阶课堂、对话课堂、开放课堂、知行合一课堂及学思结合课堂）和课程建设具体类型（线上、线下、混合式、虚拟仿真与社会实践）[8]，此处的“课堂”不应局限于传统的线下教学场景，还应涵盖线上网络课堂和实践课堂。

但在“控制总学时、鼓励开新课”的高教改革背景下[7]，工程计量计价类课程普遍面临课时与学分缩减带来的严峻挑战。为在有限的课时内最大限度地讲授知识，当前改革主要围绕线下课堂开展，仍以教师、教材和教室为中心，对线上课堂和实践课堂关注不足[5]。因此，课堂改革需以学生为中心革新传统的线下课堂，不仅要利用移动互联网、人工智能（Artificial Intelligence，AI）技术建设线上课堂，以满足学生泛在学习需求，还要依托建设工程数字化计量与计价、全国高校 BIM 毕业设计等工程造价职教类竞赛实践活动开发实践课堂，凸显课程的强实践属性。通过全方位构建课堂体系，优化课程育人平台，最终实现课程教学的彻底改革。

1.3 完善评价标准，提升课程育人效果

评价标准是检验课程育人效果的标尺，也是考核课程改革成效的关键。根据结果导向教育可知，在筑牢育人基础、优化育人平台并有效导入教学内容后，还需进一步建立健全课程评价标准。为更好发挥考核作用，评价标准的构建应重点聚焦挑战度的贯彻与落实。

具体而言，评价体系包括过程评价与最终评价两部分。其中，过程评价标准主要考虑线下线上课堂的参与度、平时测验，通过挑战度的贯彻实施区分学生的努力程度，既让努力学习者得到回馈与激励，又为主动求学者提供学习空间，同时借助朋辈引导与示范，帮助缺乏动力、被动学习的学生找到路径，进而调动其积极性，推动其向主动学习转变。相反，最终评价对挑战度的贯彻，主要坚持考前不划重点、提升考核难度与区分度，改变学生考前突击拿高分的不良认知。通过提升挑战度增强学生课程学习的获得感，反

向强化重视平时学习与积累的正向路径。

通过在评价标准中贯穿挑战度，可充分发挥以考促学的作用。对缺乏学习动力和存在学习困难的学生，通过挑战度的有序控制与引导，帮助其找到正确的学习方法，推动其从普通向优秀进阶；对学有余力的学生，借助挑战度获取更多学习资源，鼓励其持续学习，助力其从优秀向卓越蜕变。根据考核反馈情况，教师可及时调整教学策略、总结经验，为下一轮教学改革提供依据，实现以考促教。这种以考促学、以考促教的良性循环，有助于推动课程三全育人综合改革向纵深发展。

2 聚焦课堂教学主阵地，构建线下、线上和实践课堂的联动体系

利用全方位搭建的课程育人平台，打造线下、线上和实践 3 类教学课堂的联动体系，实现课程全方位育人的空域互动，有效解决工程计量计价类课程教学场域单一、工学结合不紧密、实践性不足等问题。三堂联动体系打造如图 3 所示。

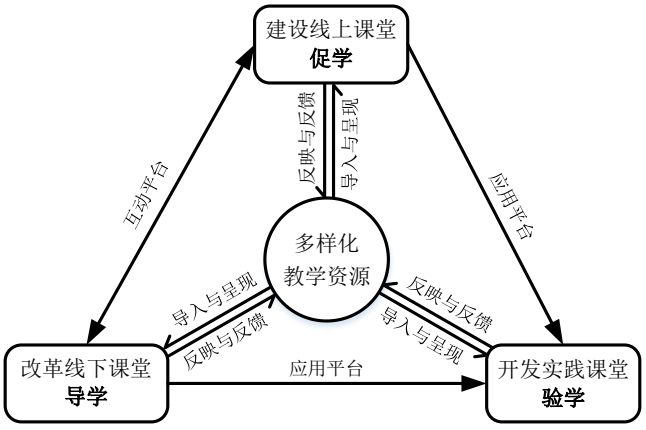


图 3 三堂联动体系打造

Fig.3 Construction of the three-hall linkage system

2.1 改革线下课堂，营造学思结合、对话开放的教学氛围

在线下课堂改革方面，传统的工程计量计价线下课堂主要以教师、教材和教室为中心，属于典型的低阶课堂与封闭课堂[5,9]，普遍存在育人效果不理想的问题。因此，必须对其进行改革，打造全新的线下课堂。

改革的核心在于重导学、促互动，通过制定人性化的教学方案，大力推行探究式、互动式、启发式等契合高职学生认知特点的教学模式；将教学重心从教师转向学生，充分发挥朋辈示范与引导作用，有效提升课堂活动的多样性与参与度。最终将线下课堂打造为对话课堂、开放课堂、学思结合课堂，营造立德树人、润物无声的氛围，从而显著提升面对面教学的育人实效。

2.2 建设线上课堂，构建资源富集、泛在支持的学习空间

在改革第一课堂的同时，需紧密结合互联网时代特征建设线上课堂，打造与线下课堂联动的微平台，既为线下课堂改革提供支撑，也系统响应学生“泛在学习”的需求。

线上课堂的建设核心在于促自学、拓维度。首先，依据媒介丰富性理论，借助学习通等智慧教学工具构建网络互动社区，实现与线下课堂的无缝衔接；其次，将重组开发的模块化教学内容，系统转化为教学视频、音频、在线题库等数字化资源，并通过网络课堂精准推送至课前、课中、课后全环节；最后，针对课程对实践与创新能力的高要求，引入 BIM、计算机辅助设计（Computer Aided Design，CAD）等数字化工具，动态演示工程量计算与计价全过程，确保学生在泛在学习中不仅能掌握知识，还能提升工程造价管理的实践应用能力，使课程的高阶性、创新性与挑战度在线上空间得以延续。

2.3 开发实践课堂，打造教学做创、赛教融合的实战平台

工程计量计价类课程兼具强实践性与高挑战度，需结合课程实践属性和高职学生参与式、互动式等学习特点拓展开发实践课堂，形成三堂联动的微观育人格局，以落实全方位育人要求。

实践课堂的开发强调强能力、验成效。无缝对接线下、线上课堂，以建设工程数字化计量与计价、全国高校 BIM 毕业设计创新大赛等权威职教竞赛为依托，打造实战平台，为理论知识提供综合应用与创新出口。在此过程中，注重将工程实践能力、职业技能、团队协作精神与社会责任感等培养目标深度融入竞赛与实践项目，通过“教学做创”一体化机制，引导学生在团结、友善、合作的氛围中受教育、长才干、作贡献，在了解世情国情民情中坚定“四个自信”，最终实现价值塑造、知识传授与能力培养的深度融合，全面提升学生的综合职业素养。

3 聚焦教师队伍主力军，形成三圈协同体系

在实现课程全程育人时域贯通、全方位育人空域联动的基础上，需进一步统筹教育供给侧与需求端，精准识别并协同各类育人主体，构建由核心圈层、拓展圈层、边缘圈层组成的全员育人协同体系，有效解决育人主体孤立、难以形成育人合力的问题。三圈协同体系如图 4 所示。

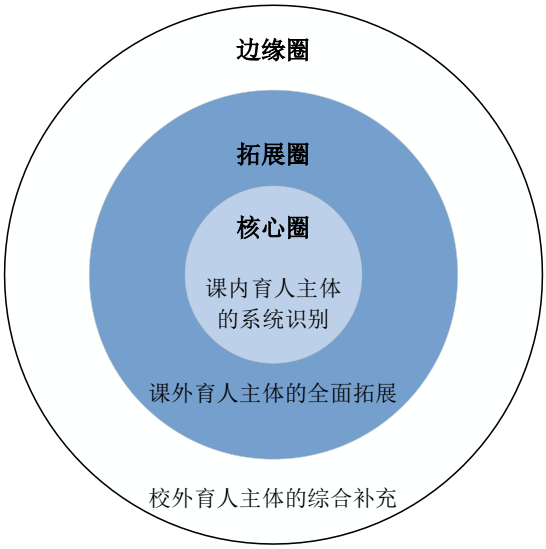


图 4 三圈协同体系

Fig.4 Three-circle collaborative system

3.1 确定育人主体的课内核心圈层，确保课程教学质量兜底

落实全员育人，首要任务是明确育人主体。理论层面，全员育人强调人人有责、人人尽责[10]，具有一定的泛在性和不确定性；但在微观课程育人层面，必须明确育人主体，以便开展实践。考虑到课程教育本质是施教者与受教者双向互动的过程，且二者分别从教育的供给侧和需求端参与教学活动，因此可通过统筹供给侧和需求端以精准识别课程育人主体，为实现全员育人奠定基础。

然而，供给与需求往往具有相对性与动态性，当分析范畴与边界扩大时，识别出的育人主体也会随之扩容。当分析仅局限于最核心的工程计量计价课程时，授课教师是课程育人的供给主体，学生是唯一需求方；但由于课程专业覆盖面广、班级数量多，授课教师通常以教学团队形式开展工作。此外，根据同伴学习理论，学生间的朋辈引导与示范同样能发挥教育作用[7]，因此学生既是课程育人的需求者，也可成为潜在供给者。基于此，将具体授课教师、所在教学团队及受教学生界定为课内核心圈层的育人主体，通过集体备课、朋辈引导等方式协调形成合力，筑牢课程教学质量基础。

3.2 划定育人主体的课外拓展圈层，促进课程教学质量增强

工程计量计价类课程仅为高职院校课程育人体系组成部分，其功效发挥需依托教育环境。因此，在确定育人主体课内核心圈层后，可进一步扩大分析边界，覆盖课内与课外场景。一方面，辅导员、教学管理人员等校内人员应作为课程育人的辅助力量；另一方面，由于工程计量计价对后续专业课学习、毕业设计

影响深远[3]，相关专业课教师、毕业指导教师可视为课程育人的潜在需求者，其关注与诉求需纳入课程教育的供给侧改革。综合上述因素，划定包括辅导员、教学管理人员、后续专业课教师等育人主体的课外拓展圈层，通过协调课内、课外圈层形成育人合力，提升课程教学质量。

3.3 选定育人主体的校外边缘圈层，实现课程教学质量跃升

工程计量计价人才最终需面向社会，满足城乡建设行业的发展需求，因此育人主体的识别边界还应延伸至校外，将社会与行业发展需求融入课程教学改革，行业企业专家、资深工程师及优秀校友等相关人士也可作为补充育人力量。在此基础上，选定育人主体的校外边缘圈层，在线上线下、课内课外、校内校外多个层面形成合力，实现全员育人协同发力，促进课程教学质量整体跃升。

4 实施效果、推广影响与建设启示

4.1 实施效果

通过构建“三阶贯通锚定建设进程、三堂联动重塑育人场域、三圈协同凝聚育人合力”的改革路径，有效解决了工程计量计价类课程存在的课程体系与产业需求脱节、教学场景与岗位实践错位、育人主体与资源协同低效等核心瓶颈，为高职工程类专业“数字赋能、价值引领、多元共育”的课程改革与金课建设提供系统性解决方案，在课程建设、育人成效、团队建设等方面取得显著成果。

4.1.1 课程建设质量显著提升

教学内容选择的创新性、教学内容组织的系统性、教学资源的多样性、教学设计的科学性、教学方法的适切性、泛在学习的便利性、对话与学思结合的持续性、思政的渗透性及知行合一的拓展性，共同塑造了课程的高阶性，提升课程含“金”量。经多轮循环迭代建设，共建成校级精品课程 3 门，其中《安装工程计量与计价》线上课程好评度高，除本校使用外，还被重庆开放大学等 30 余所市内外高校采用，获得近 2 000 名学生的认可，累计访问量达 317.14 万次。

4.1.2 课程育人成效全面提高

课程显著激发了学生学习兴趣，提升其爱国思政人文素养，专业学生在“中华经典诵写讲大赛”“优秀模拟政协提案征集比赛”等活动中均实现了获奖突破，近 3 年获省部级以上奖项 5 项；夯实学生专业基础，课程平均不及格率从 15%降至 10%；营造以赛促学的学习氛围，学生参与工程造价相关竞赛的积极性与获奖率大幅提升，累计获国家级奖项 2 项、省部级奖项 4 项；有效增强学生实操能力，预算员、教育部 1+X 数字造价师等相关职业资格证书的获取率显著提高，其中 1+X 通过率从近年来的 95%提升至 2024 年的 100%，为后续专业课程学习及毕业设计奠定坚实基础，助力学生行稳致远。

4.1.3 教学团队建设成效显著

课程育人效果的全面提升增强了教师的职业成就感，坚定其从教信念，激励团队持续深化改革：先后出版配套教材 2 部，获批省部级教研项目 3 项，2 篇高水平教研论文、1 篇教育资政决策论文获省部级奖励，团队成员每年多人次获评优秀教师、优秀共产党员、优秀教育工作者等荣誉，教师的职业感、使命感、获得感、幸福感显著提升，激励其以更大热情投入教育教学的改革实践，持续不断改善与提高课程育人的效果。

4.2 推广影响

教学团队及时总结改革经验，凝练形成“三阶贯通 • 三堂联动 • 三圈协同”金课建设模式，在海外输出、行业引领、区域辐射及校本示范等多个层面产生广泛影响。

4.2.1 海外标准输出，贡献中国方案

课程建设成果成功推广至埃塞俄比亚、塞舌尔、坦桑尼亚 3 国。团队立足课程建设成果，先后为埃塞俄比亚劳动与技能部制定“法律计量技术员 5 级职业标准”，为塞舌尔教育部研制“造价工程师 6 级职业标准与专业教学标准”，为坦桑尼亚教育部开发“造价工程师 7 级国家职业标准”，团队成员多次获得职教出海“突出贡献奖”，实现了中国职教方案的海外实践与国际认可。

4.2.2 引领行业发展，赋能产业升级

团队撰写的《联动三个课堂，建设“安装工程计量与计价”职教金课》《与数智共生：高职院校实践教学改革与实践》两篇教研论文均获评重庆市高等教育学会优秀论文（分获一、二等奖），已在重庆高教系统推广交流；编写的《建筑工程计量与计价实务（安装工程）》《建筑工程计量与计价实务（土木建筑工程）》被指定为重庆市二级造价工程师职业资格考试培训教材，直接服务于行业人才培养与水平提升。

4.2.3 辐射区域职教，服务战略发展

团队撰写的教研论文《贯通 • 联动 • 协同：构建安装工程计量与计价三全育人的“三阶三堂三圈”实施体系》，在“深化现代职业教育体系改革服务成渝地区双城经济圈建设”主题征文中获专家一致认可，经过评审荣获职业教育科教融汇研究类别一等奖第一名，为区域职业教育改革提供了典型范例。

4.2.4 强化校本示范，形成带动效应

团队教师主讲教学示范课 5 次，积极推广改革经验，校内反馈良好；改革成效吸引了重庆开放大学、重庆电子科技职业大学等近 10 所单位前来交流学习。部分成员凭借专业影响力与改革成效，被推荐受聘为重庆市建设工程造价专家，进一步扩大了社会服务影响力。

4.3 建设启示

通过工程计量计价类职教金课的系统化建设与实践，凝练形成以下建设启示，为同类课程改革提供可借鉴的实施路径与方法论支撑：

（1）坚持系统设计，贯通课程育人全过程，建立金课建设新范式。以“三阶贯通”为主线，系统构建“基础—平台—效果”递进式课程建设路径，实现课程内容与资源开发、教学实施与平台搭建、效果评价与反馈优化的有机衔接，突破传统课程建设中环节割裂、闭环缺失瓶颈，全面提升课程建设的系统性与连续性。

（2）推动场域融合，构建“三堂联动”育人新生态，创建课堂教学新模式。通过线下课堂重导学、线上课堂促自学、实践课堂验成效，实现 3 类课堂深度融合与联动互补，形成“教学做创”一体化育人场域，有效拓展教学时空边界，增强课程教学的适应性、实践性和感染力。

（3）强化多元协同，打造“三圈协同”育人共同体，拓展育人能力提升新途径。通过夯实课内核心圈层、联动课外拓展圈层、融入校外边缘圈层，构建教师、企业、学生等多方主体参与的育人共同体，打破育人主体“孤岛化”困境，形成育人合力，提升课程教学的整体效能与社会契合度。

（4）注重成果转化，扩大改革辐射影响力，开辟职教服务新路径。积极推动课程建设成果在海外职教标准输出、行业培训与教材开发、区域职业教育改革等多层面的应用与推广，实现教学成果从课堂到行业、从国内到国际的有效转化，显著提升课程建设的社会服务能力与品牌影响力。

5 结论

金课建设是办好高水平高职教育的基石。随着数字住建战略深入推进及建筑业数字化转型加速，工程计量计价领域面临职业能力标准重构、教学场域联动与育人主体协同等新要求。针对高职院校该类课程存在的建设进程割裂、教学场域单一、育人主体孤岛化等问题，团队探索提出“三阶贯通锚定建设进程、三堂联动重塑育人场域、三圈协同凝聚育人合力”的系统化改革路径。通过构建“三阶贯通”课程建设体系、重塑“三堂联动”课堂教学模式、形成“三圈协同”育人共同体，全面推动课程内容、教学场域与育人主体的深度融合适配，有效解决知识体系与产业需求脱节、教学场景与岗位实践错位、育人主体与资源协同低效等瓶颈，为高职工程类专业课程改革与金课建设提供系统性解决方案，且在课程建设、育人成效、团队建设等方面取得显著成果。所凝练的“三阶贯通 • 三堂联动 • 三圈协同”建设模式，不仅为高职工程计量计价类课程的高质量发展提供了可复制、可推广的系统性解决方案，也为新工科背景下职业教育的“三教”改革与数字化转型升级提供了有益的理论参考与实践范式。

未来，课程团队将持续深化数字技术与教育教学的融合创新，紧跟建筑业数字化、智能化发展前沿，

动态更新教学内容与模式，进一步拓展课程改革的深度与广度，为构建中国特色职业教育体系、培养更多大国工匠与能工巧匠贡献力量。

参考文献

[1] 吴旭彦. 新城建驱动下的数字住建总体框架构建与研究[J]. 中国建设信息化, 2025(16): 49-52.
WU X Y. Construction and research of the overall framework for digital housing and urban construction driven by new urban construction[J]. Informatization of China Construction, 2025(16): 49-52.

[2] 田国民. 以工程造价事业高质量发展助力中国特色现代化人民城市建设[J]. 建筑, 2025(9): 12-14.
TIAN G M. Helping the construction of a modern people’s city with China characteristics with the high-quality development of engineering cost[J]. Construction and Architecture, 2025(9): 12-14.

[3] 王争. 职业教育 4C/ID 综合学习教学设计模式研究——以《安装工程计量与计价》课程为例[J]. 邢台职业技术学院学报, 2023, 40(1): 6-10.
WANG Z. Research on the teaching design model of 4C/ID comprehensive learning in vocational education: Taking the course of "installation engineering measurement and valuation" as an example[J]. Journal of HeBei Vocational University of Technology and Engineering, 2023, 40(1): 6-10.

[4] 房琼莲, 林超连. 高职“建筑工程计量与计价” 课程教学创新策略[J]. 厦门城市职业学院学报, 2025, 27(2): 46-52.
FANG Q L, LIN C L. Innovative teaching strategies of “measurement and valuation of construction engineering” course in higher vocational colleges[J]. Journal of Xiamen City University, 2025, 27(2): 46-52.

[5] 赵会平, 崔浩. 基于新工科背景的安装工程计量与计价教学改革研究[J]. 陕西教育(高教), 2023(3): 46-48.
ZHAO H P, CUIi H. Research on the teaching reform of installation engineering measurement and valuation based on the background of new engineering[J]. Shaanxi Education (Higher Education), 2023(3): 46-48.

[6] 赵琳琳, 史咏欣, 冯庆. “课证岗赛” 融合在工程造价专业中的应用研究: 以“建筑工程计量与计价”课程为例[J]. 教育教学论坛, 2024(29): 145-148.
ZHAO L L, SHI Y X, FENG Q. Research on the application of the integration of “course, certification, job and competition” based on OBE concept in engineering cost course: Taking the course of measurement and valuation of construction engineering as an example[J]. Education and Teaching Forum, 2024(29): 145-148.

[7] 牟萍, 杨毓岚, 程文婉. 全生命周期视域下的工程制图金课建设与实践[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 438-446.
MOU P, YANG Y L, CHENG W W. Golden course construction and practice of engineering drawing from the perspective of life cycle[J]. Journal of China West Normal University (Natural Science), 2023, 44(4): 438-446.

[8] 吴岩. 建设中国“金课”[J]. 中国大学教学, 2018(12): 4-9.
WU Y. Building a “golden course” in China[J]. China University Teaching, 2018(12): 4-9.

[9] WU Q. Practice and effect analysis of blended teaching mode integrating knowledge mapping in the teaching of the course “installation engineering measurement and valuation”[J]. Educational Innovation Research, 2025, 3(4): 130-135.

[10] 曹智博, 佘明. 行业特色型高校研究生“三全育人” 思政体系构建[J]. 教育教学论坛, 2023(25): 160-163.
CAO Z B, SHE M. Research on the construction of “three-wide education” system for postgraduates in the industry-featured university[J]. Education and Teaching Forum, 2023(25): 160-163.