

中埃两国垂直绿化研究的比较回顾

Comparative Review of Vertical Greening Studies in China and Egypt

Mohamed Elsadek¹ 董楠楠¹ 李屹楠^{1,2} 陈芃序³ 张德顺^{1*}

Mohamed ELSADEK¹ DONG Nannan¹ LI Yinan^{1,2} CHEN Pengxu³ ZHANG Deshun^{1*}

(1. 同济大学建筑与城市规划学院; 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 安徽新华学院城市建设学院, 合肥 230088; 3. 华中科技大学建筑与城市规划学院, 武汉 430074)

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University; Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Energy-Saving of Dense Habitats, Shanghai, China, 200092; 2. School of Urban Construction, Anhui Xinhua University, Hefei, Anhui, China, 230088; 3. School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China, 430074)

文章编号: 1000-0283(2024)03-0033-09

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2024. 03. 0033. 004

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2023-11-29

修回日期: 2024-01-25

摘要

垂直绿化作为改善人类生活境域、优化人居环境的重要手段, 有着悠久的历史, 是城市精神文明的重要象征。中国和埃及两个文明古国既是垂直绿化的发源地, 也是现代垂直绿化的实践者和先行者, 研究综述了2010–2023年间两国在该主题研究的进展。垂直绿化具有跨学科研究的特点, 包括能源效率、碳减排、感知和恢复、户外热舒适性 and 生态影响等几个方面。中埃两国的研究主要关注应对城市问题的挑战, 内容从节能减排、提高公众福祉到可持续发展。同时, 在面临日益严峻的城市环境问题时, 垂直绿化还是延展绿色空间、增强生态系统韧性、维护生态平衡的有效对策。加强两国交流可以为跨学科、跨国家解决各自面临的问题提供技术路径。

关键词

垂直绿化; 绿色立面; 绿色墙; 中国; 埃及

Abstract

Vertical greening has a long history and is an important symbol of human spiritual civilization. As two ancient civilizations, China and Egypt, are both the birthplaces of vertical greening and the practitioners and pioneers of modern society. This paper focuses on the characteristics of research on this topic in both countries from 2010 to 2023. Based on an overview of the interdisciplinary nature of vertical greening research, key academic fields are classified, including energy efficiency, carbon reduction, perception and restoration, outdoor thermal comfort, and ecological impact. Studies conducted in China and Egypt have highlighted the potential of vertical greening to address various urban challenges, from energy conservation and emission reduction, to improving public well-being and promoting ecological sustainability. This paper expounds that vertical greening will be an effective measure to provide green space, enhance the resilience of ecosystem and promote the sustainable development of cities when the two countries are facing the environmental problems of urbanization.

Keywords

vertical greening; green facade; green wall; China; Egypt

Mohamed Elsadek

1981年生 / 男 / 埃及伊斯梅利亚人 / 博士 / 助理教授 / 研究方向为风景园林感知与规划设计

董楠楠

1975年生 / 男 / 安徽合肥人 / 博士 / 副教授 / 研究方向为景观规划与设计

张德顺

1964年生 / 男 / 山东潍坊人 / 博士 / 教授、博士生导师 / 研究方向为园林植物与应用、风景园林规划设计、生态与气候变化响应规划、园林小气候调控规划、风景旅游区规划

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: zds@tongji.edu.cn

垂直绿化是中、埃乃至世界范围下悠久历史、灿烂文化和人类文明的象征, 从中国战国时期吴王夫差在南京城墙种植植物, 希腊神话春季植物之神阿多尼斯, 到《圣经》古巴比伦花园等, 无不印证这一观点。近几十年来, 中国城市化和发展的步伐前所未有的, 快速的城市建设和更新项目改变了天际线和城市景观, 以垂直绿化加强绿色生态环境的环保举措, 符合降低环境影响和增强城市复原力的广泛战略。埃及也一直积极参与城市

基金项目:

国家自然科学基金项目“华东滨海地区抗风园林树种的选择机制研究: 以上海为例”(编号: 32071824); 安徽省高等学校科学研究项目(自然科学类) 重点项目“气候影响下绿色生态廊道网络模型构建研究”(编号: 2022AH051861)

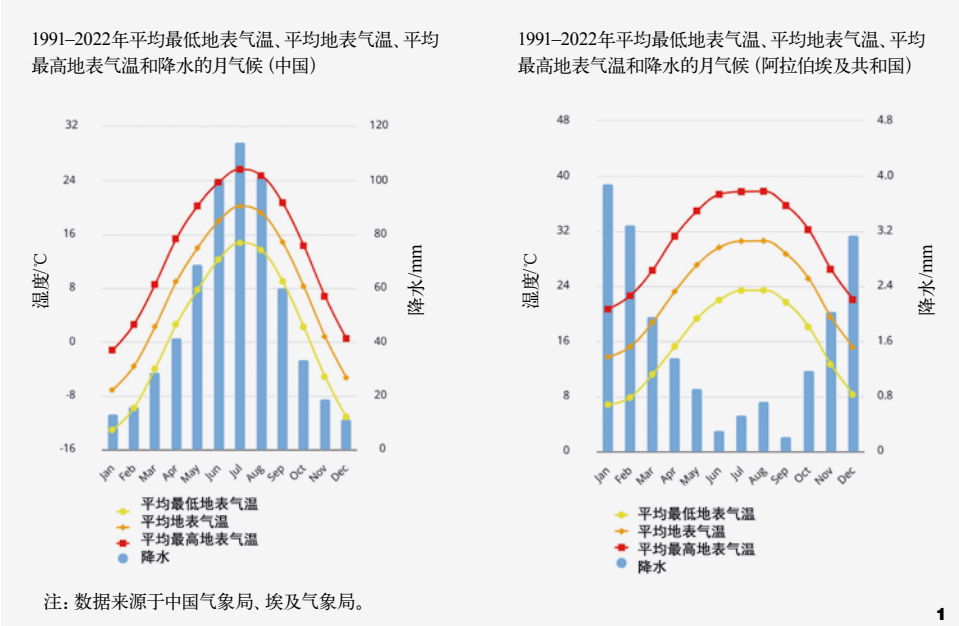


图1 中国与埃及气候特征比较分析
Fig. 1 Comparative analysis of climate characteristics between China and Egypt

建设和振兴工作，在现代化和可持续的城市环境中，实施了多项加强绿地和应对环境挑战的垂直绿化项目。垂直绿化与城市景观的融合受到城市建设和再开发独特轨迹的影响，并且已成为解决世界各地城市面临紧迫挑战的关键解决方案之一。由于能够同时提高环境质量和城市美学，垂直绿化和绿色外墙的融合受到了持续的关注和广泛的赞誉。

本文综述了城市环境中垂直绿化发展的探索，同时对中国和埃及的垂直绿化应用进行比较。气候影响是城市环境发展研究中必不可少的思考着力点，尽管中国和埃及具有独特的气候和城市特征(图1)，但在垂直绿化领域仍有较多合作机会，可以促进城市可持续发展。从可持续城市规划、气候适宜策略、生物多样性保护、专业知识交流等方面应对共同的环境挑战和分享专业知识，达到互惠共赢。研究旨在紧跟世界发展趋势，提升解决城市化问题和增进民生福祉的技术对策。

1 城市垂直绿化

城市化的激增加剧了采取可持续解决方案应对环境挑战的必要性。本研究概述了垂直绿化的全球意义及其在促进可持续城市发展中的关键作用，包括美学增强、空气质量改善和生物多样性保护。垂直绿化属于立体绿化中的一种形式，是充分利用立地空间，在墙壁、阳台、窗台、棚架等处栽种攀缘植物或者植物模块以增加绿化覆盖率，改善居住环境的一种绿化方式。其通常以在建筑物和构筑物的垂直表面种植植被为特征，可有效增加人口稠密地区的空间绿量，改善空气质量、调节温度湿度、助力节能减排、优化市容环境和提升城市颜值。近年来，垂直绿化已成为应对全球紧迫城市挑战的关键解决方案。生态绿墙和绿色外墙的融合因其具有同时提高环境质量和城市美学的独特能力而备受关注。

本文对城市环境中的垂直绿化进行全面

探索，特别关注中国和埃及该领域的发展及应用，探讨两国致力于采用垂直绿化作为城市可持续建设解决方案的实践情况。作为四大文明古国，中国和埃及的风景园林历史悠久，但由于历史、文化、气候、地理、教育、经济的差距，两国的研究水平和实施力度还存在较大差异(表1)。

2 中国垂直绿化的研究状况

使用特定的关键字和布尔运算符对Scopus数据库进行全面搜索，结果如表1所示。2010–2023年间发表的94篇文献，包括74篇论文、11篇会议论文、4篇综述文章、3本书章节、1篇社论和1篇简短调查。文献是研究的数据源，在检索到的文献中，82篇是英文文献，12篇是中文文献，丰富的文献为综述奠定了坚实的基础。发表论文涉及多个学科，包括环境科学、工程、农林科学、社会科学、地球与行星科学、能源、计算机科学、交叉学科、艺术与人文、生物化学、遗传学和分子生物学。对出版趋势的分析显示，这些年来论文数量稳步增加。文献最高数量出现在2022年，共发表了18篇论文，这表明人们对这一主题的兴趣越来越大。2010–2023年间在中国进行的主要研究聚焦在应用、效益和生态影响等方面^[1]，随着垂直绿化系统(VGS)的跨学科研究的不断发展，这种上升趋势预计将持续下去。

Liu等^[2]最新贡献中重点评估了不同的绿化覆盖类型，如屋顶绿化、垂直绿化和地面树木对西安城市绿色基础设施的影响，目的是通过数值模拟来检验冷岛效应与当地气候区(LCZ)之间的关系。总的来说，这些发现为城市设计师提供了有价值的见解，使他们能够在设计不同LCZ的城市绿色基础设施时考虑冷岛强度的时空模式。

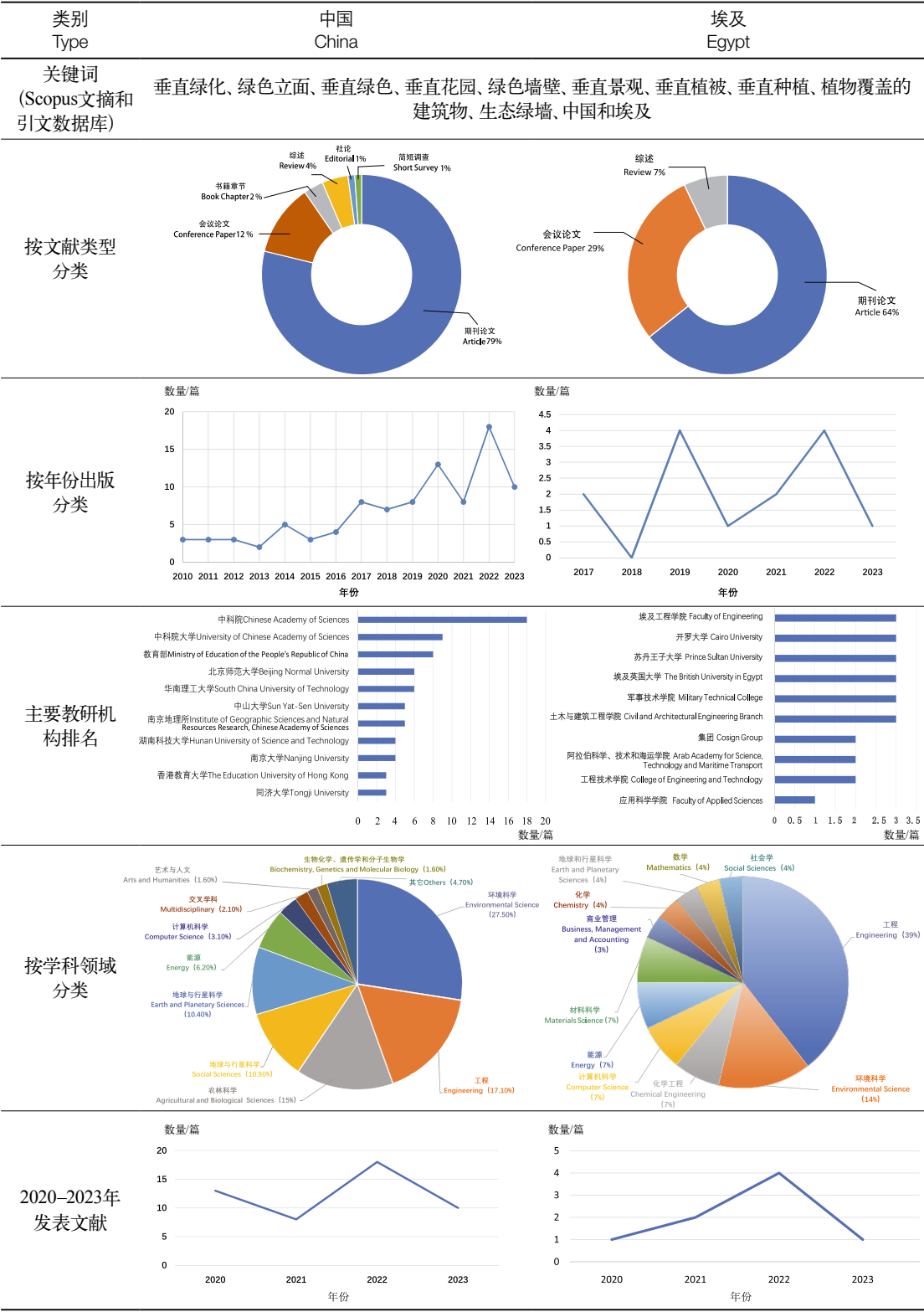
从Scopus发表的文献看，在中国进行的研究集中在以下几个关键的应用领域：

2.1 绿色共生，节能增效

作为一个快速城市化的国家，中国面临着在提高城市可持续性的同时减少建筑能耗的严峻挑战。在可持续建筑和城市发展领域获得关注的创新战略之一是实施垂直植被系统。这些垂直植被系统提供了多方面的益处，重点是节能。

在夏热冬冷地区，制冷需求拉升了建筑物的能耗。2016年Wong和Baldwin^[3]在香港高层建筑中的研究展示了垂直绿色立面的节能潜力，为高密度城市地区提供了显著的平衡举措。此外，Pan和Chu^[4]的研究发现，在炎热潮湿的夏季，公共住宅区8.22 m²的垂直绿化系统 (VGS) 可将制冷用电量减少16%，并估计VGS的环境影响有20年的恢复期，使其成为传统景观空间有限的城市地区中有效、环保的解决方案。2018年，Zhang等^[5]评估了中国北方学校的绿色干预措施：绿色屋顶、绿色外墙、植树和草地人行道。植树造林是减少不适时间和制冷需求的最有效策略，而绿色屋顶和外墙也减少了制冷需求，天然草地

表1 中国和埃及垂直绿化研究数据的比较分析（2010–2023年）
Tab. 1 Comparative analysis of vertical greenery research data: China and Egypt (2010–2023)



路面对舒适度和制冷需求都有轻微影响。此外, 2019年, Lee等^[6]对辐射特性和节能的研究证明了攀爬绿色墙的显著功效, 强调了绿色墙壁遮阳能有效抵消城市热岛效应并节约能源。同年, Chen等^[7]引入了一种为生态垂直绿墙设计的精确太阳辐射模型, 将叶片倾角和叶面积指数考虑在内, 以更准确地评估垂直冠层的影响, 这种模式有助于提高建筑能效。

在追求能源效率的过程中, He等^[8]用3D打印的垂直混凝土绿墙系统(简称3D VIGW)彻底改变了建筑设计。这项位于中国南京的建筑创新通过植物遮阳、蒸发蒸腾和土壤储热来优化能源效率, 大幅节约能源并提高了热舒适性。此外, Tan等^[9]在2020年揭示了中国夏热冬冷地区垂直绿化的节能能力, 垂直绿化解决了绿地稀缺、空气质量退化和城市热岛问题。结果显示与非绿色建筑相比, 绿色建筑冬季节能18%, 夏季节能25%。这也是垂直绿化和能源效率研究的令人信服的案例。

2021年, Madushika等^[10]提供了一个全球视角, 比较了不同气候下绿色墙的节能影响, 强调了气候和区位造成的差异。研究提到, 在斯里兰卡, 绿色墙的能源效率研究中, 80%的绿色墙壁实现了自然通风节能。2022年, Zhang等^[11]和Zhao等^[12]在垂直绿色立面(VGF)动态传热模型方面取得了重大进展。这些研究强调了精确的联合模拟方法和红外辐射特性的重要性, 为建筑师和工程师提供了有效衡量和优化建筑能源使用的工具。研究结果强调了VGF在减少室内冷负荷方面的变革性影响, 特别是在炎热的夏季或温暖的冬季地区, 研究结果十分显著。

总之, 在2010–2023年间, 中国的研究阐明了垂直绿化和绿色外墙的节能能力。这些发现阐释了其对能耗的变革性影响, 为建筑

决策提供了重要的参考, 并提供了多种优化选择, 包括能源效率、美学、环境效益和增强舒适度, 成为可持续城市发展的基础支撑。

2.2 固碳释氧, 助力减排

随着应对气候变化的紧迫性加剧, 节能减排成为风景园林和建筑规划设计的中心议题。在中国, 许多研究调查了绿色建筑特征, 尤其是外墙和屋顶对碳减排和环境可持续性的影响。

2022年, Feng等^[13]采用生命周期方法来衡量建筑内开放式公共空间(开放式屋顶、开放式垂直花园、开放式底层)对上海经济适用房碳排放的影响, 揭示这些空间的碳效应是其目标。该研究揭示了大量的碳减排主要是由于用户运输, 极大超过了建筑以及正在进行的运营排放量。这突出了开放式公共空间在实现显著碳减排方面的关键作用, 并强调了可持续建筑设计综合方法的必要性。2023年, Jiang等^[14]探索了中国亚热带气候下的绿色外墙和屋顶的热性能及其固碳潜力。值得注意的是, 绿色屋顶的节能量因植被而异(529.6 ~ 2 936.3 kW·h), 而单位面积的固碳量也不尽相同: 绿色外墙为1.4 kg/m², 绿色屋顶(各种蔬菜)为0.88 ~ 2.21 kg/m²。这些结果强调了开放式公共空间在减少碳排方面的重要作用, 强调了可持续建筑与绿化共生的必要性。

2.3 激发感知, 平衡身心

绿色建筑特征的影响超出了量化指标, 还包括感知和修复效益。2019年, Elsadek等^[15]研究了绿色外墙景观对生理和心理健健康的影响。结果表明, 在观看绿色外墙时, 相对波(α)显著增加, 副交感神经活动增强, 皮肤电导降低, 情绪状态改善。这项研

究揭示了绿色外墙是应对城市化和高密度城市绿地缺乏带来挑战的一种解决方案。2020年, Zhang等^[16]调查了公众对广州小型城市绿色基础设施的看法。约80%的受访者愿意资助城市绿色基础设施(UGI)维护, 且收入较低的年轻参与者表现出更强的捐款愿意, 结果显示空气污染是紧要问题, 大众强烈倾向于在空气质量监管方面增加投资。2022年, Liu等^[17]和Hui等^[18]分别深入探讨了北京和香港居民对城市绿地(UGS)及绿色屋顶和绿色墙壁(GRGW)的态度, 为符合公民偏好和社会文化背景的定制推广策略提供了有价值的指导。此外, 2022年, Xiao等^[19]将室内垂直绿化与恢复效益和视觉满意度联系起来。发现这对恢复身心、激发感知有积极影响, 关键因素“远离”“魅力和兼容性”以及修复程度与视觉满意度密切相关, 其中“魅力和兼容性”尤为重要。室内绿化的视觉满意度有助于身心恢复, 这体现了恢复效益和视觉满意度之间的互惠关系。

2.4 调控小气候, 改善热舒适性

户外热舒适性在建筑、城规和园林规划设计中不可忽略, 其能确保人们在温度、湿度、风和太阳辐射等因素的影响下获得愉快的户外体验, 在应对气候变化、热岛效应和下垫面性质退化方面有重要意义。中国近年的研究, 揭示了提高户外舒适度和抵御极端气候的创新策略和技术。

2013年, Chen等^[20]研究了湿热气候下的生态绿墙系统(LWS), 揭示了其对墙面和室内空间的显著降温影响。LWS内的密封空气层被证明比自然通风更有效地冷却墙壁, 减少墙壁植被距离(w-v-d)提高了空气温湿度的舒适性。2017年, Lee等^[21]研究了亚热带潮湿气候下的钢丝绳形式的绿色墙壁, 降温效应随天

气条件和墙壁方向而变化。这项研究强调全面了解绿色墙壁设计的必要性,以实现有效的热调控。同年,Yin等^[22]研究了炎热夏季的纯绿色外墙,发现表面温度大幅下降,峰值下降4.67℃。降温效果在中午最为明显,在夜间减弱。该研究强调了植被特征,如覆盖率和植物厚度对降温效果的影响,以及直接绿色立面(DGF)设计提高热舒适性和能源效率的潜力。2018年,Lin等^[23]研究了中国广州一个湿热气候区高层住宅的绿色外墙(GFs)。评估了GFs的遮阳和热反射性能。结果显示,在晴天GFs将空气温度降低了3.8℃,表面温度降低了4.7℃,使整个立面的平均温度降低了3~4℃,该研究诠释了GFs在炎热潮湿气候中节能和改善城市热环境的潜力。

2019年,Zhang等^[24]在中国广州探索了垂直绿色外墙(VGF),评估了其对于室内外温度的影响。研究表明,VGF显著减少了建筑能源使用,通过测量植物净光合和蒸腾作用,推算了VGF的热效应。在室内,VGF降低了气温3.6℃。在室外,由于遮阴和蒸腾,VGF将湿球球体温度(WBGT)降低了2.7℃。这些发现不仅扩大了VGF在冷却之外的应用,还展示了其缓解城市热岛效应的潜力。同年,Lin等^[25]对湿热气候下的绿色外墙进行了研究。现场测量显示,GFs将平均生理等效温度(PET)降低了2.54℃。流体力学模拟确定了夏季热调节中更有效的GFs类型,为改善人们舒适度提供了思路。此外,Li等^[26]还研究了中国“夏热冬冷”气候区庭院水平(绿色屋顶)和垂直绿化对公共建筑的影响,结合宁波的计算机模拟和世界公开数据,表明绿化显著降低了气温和供暖负荷。绿化前后的实际能耗大幅下降,突显出在这种充满挑战的气候下,垂直绿化对公共建筑的正向影响。

2020年,Peng等^[27]评估了城市街区大规模

模立面绿化的降温效果,分析了降温强度与城市形态之间的关系。结果表明,降温强度随海拔和风向的变化而变化,其中下风侧地面空间的降温效果最强。研究强调将不同的策略结合起来对热调节有更大的积极影响。Hao等^[28]发现,在“夏热冬冷”的气候背景,结合垂直绿化系统(VGS)和绿色屋顶(GR)可将室内运行温度降低2.1℃。这些系统还稳定了温度,实现了更高的设置点和同等的舒适度,节省了能源。Nan等^[29]在寒冷潮湿的冬季对杭州的外墙系统进行了研究。土壤填充花盆和LWS植物都能增强室内隔热效果,花盆表现出更一致的效果,强调了植物绿墙的节能优势,在使用竹子和其他隔热植物时效果尤其显著。

2021年,Zhu等^[30]比较了高层住宅区绿色外墙、绿色屋顶和凉爽路面的降温效果,发现绿色屋顶可冷却屋顶,绿色外墙可冷却建筑外部,综合实施可有效解决城市热岛的负面影响。2022年,Ren等^[31]研究了亚热带气候下阳台花园的日间降温影响,其降低了窗格玻璃的温度,改善了室内舒适度,使用土壤温度传感器控制智能滴灌系统来强化降温效果。同年,Hao等^[32]研究了绿色屋顶和绿色墙壁等绿化系统对过渡季节室内热条件的影响。绿色系统(GS)最大限度地降低了温度波动,延长了舒适期,减少了空调的使用,实现了节能减排的目标。2023年,杨等^[33]在常州,通过垂直绿化系统优化了建筑的绿色性能。绿色认证建筑的实时数据和监测显示,温度降低、舒适度提高、空气更清洁、能源使用率降低。该研究强调了垂直绿化对建筑参数的显著积极影响,提高了可持续性。同年Tang等^[34]建议对广州的传统建筑进行VGS改造,以抵消城市热岛效应。利用数字孪生(DT)技术,通过对VGS建筑和灌溉进行建模,研

究了各种绿色类型和立面的能源使用情况。该研究建议,改变西墙和南墙是最有效的选择,推进老式拱廊住宅的绿化,强调了VGS和DT在可持续城市改造方面的潜力。Zheng等^[35]评估了VGS对广州街道峡谷纵横比(H/W)对热环境的影响,在炎热的日子里,VGS显著降低了H/W=1峡谷的38.0%和H/W=2峡谷的21.0%的风速和气温,包括墙壁、地面和空气温度。例如,在H/W=1和2的峡谷中,朝西壁温度的最大下降幅度分别为20.3℃和16.8℃,H/W=2的峡谷由于风速较低和反射率较高而表现出更显著的冷却,揭示了VGS在改善城市街道峡谷热环境作用。

2.5 植物修复, 绿色环保

2019年,Pettit等^[36]测试了在环境中控制空气污染的植物修复方法,在悉尼和北京进行试验,使用盆栽、被动绿墙和主动绿墙(AGW)。在北京的一间教室里,与没有绿色墙壁和过滤暖通空调系统的条件相比,AGW在20 min的测试中将总挥发性有机化合物水平降低了约28%。此外,AGW显著降低了42.6%的环境PM水平,改善了室内空气质量。2023年,Wang等^[37]研究了广州垂直绿化系统中不同植物PM的滞留效果,发现VGS特别是紫露草,可以有效地捕获PM2.5。滞尘中含有自然和车辆排放重金属,显示了VGS对降低城市空气污染的贡献。

2.6 自然生态, 互为借鉴

2018年,Shi等^[38]评估了南京新街口区的立体绿化,以改善人口稠密、绿地有限地区的城市环境。利用GIS和CFD分析了风、光和建筑环境等影响绿色立面发展的因素,约17.3%的面积和30.8%的12 m以下外墙具有绿色外墙的可能性,限制因素包括阳光和灌溉,

以及合适的墙壁位置的特定模式。2022年, Li等^[39]于评估了深圳、香港和新加坡982个空中花园对城市可持续性的影响。该研究采用混合方法, 考察了各城市的空间特征, 发现空中花园可为高密度城市地区公共空间增强可持续性。

Xu、Wu、Zhou、Zhao、Long等^[40-44]研究了五台山清水河流域、雅鲁藏布大峡谷国家级自然保护区、施秉喀斯特世界自然遗产区、太白山自然保护区等的植被特征、水文变化、径流系数、垂直分布、花粉分类、生物多样性等, 揭示了自然生态系统可为因地制宜、师法自然的互鉴思路。

3 埃及垂直绿化

埃及垂直绿化的相关研究分布在工程、环境科学和能源三个领域。自2017年以来, 垂直绿化的研究和实施显著增加, 这表明在城市化挑战中, 人们越来越致力于可持续发展。目前的状况反映了一个充满活力的景观, 各种项目和举措有助于垂直绿化运动。

埃及的快速经济增长和城市发展导致环境挑战增加, 包括能源消耗、污染物增加和绿地减少。来自埃及的相关研究也正是探索了应对这些挑战的创新方法, 重点关注在炎热干旱地区生活的绿色墙壁和外墙的效率。

3.1 提绿增效, 生态友好

2015年, Shawket^[45]探索立面绿化, 特别是阳台, 作为发展中地区的一种性价比较高的城市发展方案, 建筑外墙上使用绿化来改善城市环境是简单易行的。2017年, Fahmy等^[46]的研究调查了埃及城市社区通过绿色覆盖应用对气候变化的适应机会。以室内外耦合模拟揭示了绿色屋顶、立面和城市树木对不同气候区的小气候条件和能源效率的影响。

2019年, Taleb等^[47]以埃及阿斯旺为例, 提出了高温热浪、干旱少雨地区移动集装箱房屋的经济性。绿色屋顶、庭院绿化分别减少了13.5%、3.6%的能源消耗, 光伏电池板产生了12.32 MWh的清洁能源。三项已实施的战略, 包括绿色屋顶和墙壁, 表明能源消耗显著减少。2020年, Fahmy等^[48]采用结合ENVI met和Design Builder的室外—室内耦合模拟方法, 在埃及亚历山大的Borg El Arab进行, 评估城市雨棚绿化覆盖对室内热舒适性和能耗的影响, 强调了以绿色覆盖指标为指导的气候变化适应战略的潜力。对比2020年、2050年和2080年期间的结果, 无论是否有城市冠层绿色覆盖, 其都强调了以室内热舒适指标为指导制定气候变化适应策略的可行性。2023年, Ramadhan和Mahmoud^[49]调查了绿色外墙在降低建筑能耗的功效, 特别是在埃及炎热干旱地区, 由于快速城市化和绿地减少, 这些地区面临着能源使用和碳排增加。用模拟软件比较了有和没有绿色外墙的建筑的能耗, 结果表明与类似尺寸的非绿色外墙相比, 生活绿色外墙, 尤其是带种植箱的绿色外墙, 显著降低能耗、改善热舒适性、降低碳排放, 实现了高达75%的节能效果。

3.2 绿色转型, 降低碳耗

2017年, Fahmy等^[46]研究通过城市冠层绿色覆盖来减少干旱城市环境中的碳足迹, 评估了埃及干旱吉萨地区的一个城市区域在当前和未来气候条件下的碳汇, 提出了城市冠层绿色覆盖, 包括立地树木、绿色屋顶和绿色墙壁, 作为一种适应气候变化的战略。2021年, Zoklah和Refaat^[50]的研究专注于使用绿色外墙系统(GFS)优化埃及住宅建筑的能源效率。使用Design Builder进行模拟, 评估了GFS对墙壁的直接影响, 即在10月6日城市住

宅单元的12 cm厚的墙壁上有60 cm的空气间隙。结果表明, 东向和西向安装后显著节省了供暖和制冷负荷以及电力成本, 在25 cm厚的墙壁上具有更好的性能。该模拟显示了对能源消耗、二氧化碳排放和总体运营成本的积极影响。2022年, Aboubakr等^[51]重点关注气候变化引起的极端降水和温度。该研究提出了一个双框架的动态绿色立面, 旨在缓解极端温度并利用极端降水, 开发了生物—生态弹性复合指标(BER-CI), 评估了埃及新博格阿拉伯城现有住宅楼的影响。大量的植被覆盖有效缓解了气候风险, 实现了可持续的碳封存, BER-CI得分为21.64。

3.3 恢复感知, 美化环境

2019年, Elhady等^[52]评估了埃及对垂直绿色墙的认识和偏好, 考察了在人口稠密的城市地区应对环境挑战的感知效应, 关注环境、社会和经济方面, 并收集了埃及专家和用户的问卷调查。研究发现了优先级的差异, 园林专家重视生态效益, 用户优先考虑美学特征。2020年, Lotfi等^[53]进行的“垂直花园作为新开罗城市空间的修复工具”研究了垂直花园在城市环境中的修复可行性。实验比较了有垂直绿化空间和无垂直绿化空间下受试者的生理记录, 结果显示垂直绿化具有更高的恢复效果和更低的压力水平, 突出了垂直花园在城市环境建设中的重要意义。

3.4 小气候调控, 提高热舒适性

2019年, Wahab等^[54]的题为《干旱气候下降低空气温度和增强户外热舒适性的绿色包络影响》的研究中, 讨论了城市能源和环境挑战, 特别是在干旱气候下, 绿色屋顶将室外气温降低10℃, 同时提高了室外热舒适度, 预测平均投票(PMV)值降低了2%, 推

理了绿色覆盖下可缓解城市热岛效应和增强干旱地区城市整体生态系统韧性。埃及对垂直绿化研究的兴趣越来越大，旨在提高能源效率、减少碳排放、提高公众意识和提高户外热舒适度。

3.5 模式更新, 适应环境

Menshawy等^[55]研究了埃及阿斯旺的AASTMT南谷校区的绿色墙壁系统，探索了突破城市扩张引发种植空间有限的瓶颈。绿色墙壁能有效增加建成环境绿量，降低能源使用，改善微观气候，提高空气质量，提升美感，促进生产力和丰富生物多样性。2022年，Mahrous^[56]回顾了埃及炎热潮湿的气候中，生物接受性外墙的可行性，这些苔藓和微生物的生长模块是传统绿色墙壁的替代品，它们的低水需求适合埃及的环境；并确定了有前景的苔藓种类，用可持续材料促进垂直绿化，减少灌溉，维护成本低，增强城市绿化对气候的适应性。

4 讨论

4.1 中国

垂直绿化在中国的发展还有很多挑战，主要存在于：由于快速的城市化进程限制了可用绿化空间，并阻碍了广泛采用。中国具有多样化的气候，从北部的亚北极到南部的热带，从潮湿的亚热带到干旱地区的气候变化；此外，受季风和区域变化的影响，中国的降水模式也多种多样，了解这些气候差别对于成功实施垂直绿化举措至关重要。将绿化融入现有结构需要精心规划，以确保结构完整性并克服潜在挑战。

基于此，主要在以下7个方面起到改善性促进。(1) 垂直绿化为缓解城市热岛效应提供了可持续的解决方案，有助于提高户外

舒适度和应对气候挑战。(2) 绿色系统积极促进空气净化，对城市空气质量产生积极影响，促进更健康的生活环境。(3) 绿色墙壁和立面提供美观环保的建筑解决方案，有助于城市景观的整体改善。(4) 垂直绿化促进了城市环境中的生物多样性，为各种动植物创造了栖息地，并有助于保持生态平衡。(5) 垂直绿化举措是公众教育的有力工具，提高了群众的认识与参与。(6) 政府层面的支持政策可以激励和加快在城市规划和发展中采用垂直绿化，为可持续举措创造有利的环境。(7) 智能技术和创新设计方法的融合可以提高中国垂直绿化项目的效率、弹性和整体成功率。

4.2 埃及

尽管势头积极，但埃及的垂直绿化也面临挑战，主要挑战之一是需要公众和相关利益攸关方中广泛认识和理解垂直绿化的好处。有限的资源和资金也可能对广泛采用垂直绿化做法构成挑战。此外，埃及干旱的气候需要有弹性的植物选择和高效的灌溉系统来维持垂直绿化，面对水资源缺乏的问题，需要节水型垂直绿化技术作为支撑，采用针

对性改造和创新举措，推进埃及垂直绿化的成功和可持续性。

虽然气候研究是一个关键因素，但当深入研究垂直绿化的影响时，两国都能提供大量交流和具有参考价值的地区，其中城市建筑环境的高密度性和城市化的独特性特点则更值得参考。中国特大型城市或经济发达地区，如上海、北京和广州，以快速的城市发展和多样化的气候条件为特征，提供了令人信服的案例研究。同样，埃及的开罗和亚历山大等城市中心以独特的城市化模式和环境挑战为标志，为垂直绿化的讨论提供了不可或缺的意见。通过将讨论重点放在这些特定区域，未来的研究可以寻求对不同的城市环境如何影响垂直绿化实践的有效性提供细致的参照。在城市化挑战中，垂直绿化的未来有着充满希望的机遇。人们对可持续性的日益关注为该领域的进一步增长和发展奠定了基础。研究人员、政策制定者和社区之间的合作为知识交流和实施有效的垂直绿化战略提供了机会，利用技术进步和创新设计方法，以垂直绿化做为改善埃及城市环境方法开辟新的可能性。

基于以上研究进行对比归纳，两国垂直


表2 中国和埃及垂直绿化发展异同点比较分析
Tab. 2 Comparative analysis of similarities and differences in vertical greening development between China and Egypt

类别 Type	中国 China	埃及 Egypt
地理和气候方面	跨度各个气候区	炎热干旱地区
能源效率和碳减排方面	提高能源效率, 减少碳排放	缓解城市热岛效应, 提高室内热舒适性
公众认知和环境意识方面	探讨公众看法, 强调审美、环境和舒适相关的好处	探讨人们的意识和偏好
生态影响和城市提升方面	侧重于生物多样性效益和建筑创新	侧重城市改善的潜力, 包括改善微观气候、空气质量和美学
跨学科方法和未来发展方面	可持续材料为重点的整体研究方案	模拟和生物—生态弹性复合指标 (BER-CI) 进行综合评估
研究重点方面	通过空气质量改善和生理影响, 以应对其城市化挑战	通过提高能源效率、减少碳排放和加强公共空间来优先考虑可持续性

绿化的发展主要存在6个方面的异同(表2)。

本研究的审查主要依靠Scopus作为相关出版物来源的主要数据库。虽然Scopus是一个强大且广泛使用的学术数据库,但独家使用该平台可能会在研究选择中引入潜在的偏见,来源其他数据库的某些有价值的贡献可能没有被包括在内。未来的研究可以受益于更广泛的搜索策略,包括多数据库来源,以确保对现有文献进行更详尽和公正的表述。

5 结论

本文综述了中埃两国对垂直绿化日益增长研究趋势,两国气候、经济、社会、文化、历史各不相同,但气候变化和城市化挑战是相同的。埃及强调节约能源和减少碳排放,中国关注改善空气质量和民众的生理心理身心影响。垂直绿化在节能减排、净化空气、降低城市热岛、减缓气候变化方面具有重大生态效益的促进手段,同时还是提升景观水平、增进居民福祉的重要方法^[57-58]。未来将进一步加强中埃全球跨区域、跨学校和跨学科的研究,为日益严峻的碳排压力、气候胁迫、环境问题贡献节能减排和可持续发展的解决路径。 

注:图1源自<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country>,其余图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] LIU Y, GUO R, SUN S. Variations in the Vertical Vegetation Zonation of Subtropical Chinese Mountains: The Importance of Climatic Seasonality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010(30): 3912-3922.
- [2] LIU A, MA X, DU M, et al. The Cooling Intensity of Green Infrastructure in Local Climate Zones: A Comparative Study in China's Cold Region [J]. *Urban Climate*, 2023(51): 101631.
- [3] WONG I, BALDWIN A. Investigating the Potential of Applying Vertical Green Walls to High-Rise Residential Buildings for Energy-Saving in Sub-Tropical Region[J]. *Building & Environment*, 2016(97): 34-39.
- [4] PAN L, CHU L. Energy Saving Potential and Life Cycle Environmental Impacts of a Vertical Greenery System in Hong Kong: A Case Study[J]. *Building & Environment*, 2016(96): 293-300.
- [5] ZHANG A, HUANG Q, ZHANG Q. Environmental Impacts and Energy Saving Potential of Green Actions for Schools: A Case Study in Northern China. In *Proceedings of the PLEA-Smart and Healthy within the Two-Degree Limit[C]* // *Proceedings of the 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 2018(3): 974-975.
- [6] LEE H, JIM Y. Energy Benefits of Green-Wall Shading Based on Novel-Accurate Apportionment of Short-Wave Radiation Components[J]. *Applied Energy*, 2019(238): 1506-1518.
- [7] CHEN Q, DING Q, LIU X. Establishment and Validation of a Solar Radiation Model for a Living Wall System[J]. *Energy and Buildings*, 2019(195): 105-115.
- [8] HE Y, ZHANG Y, ZHANG C, et al. Energy-Saving Potential of 3D Printed Concrete Building with Integrated Living Wall[J]. *Energy and Buildings*, 2020(222): 110110.
- [9] TAN H, YANG Z, HAO X, et al. Investigation on Energy Saving Potential of a Vertical Greening System in Hot Summer and Cold Winter Areas in China[C] // *11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*, 2020(23): 1277-1283.
- [10] MADUSHIKA U, RAMACHANDRA T, ZAINUSEEN N. Operational Energy Saving in Buildings: A Comparison of Green vs Conventional Wall[C] // *In Proceedings of the World Construction Symposium*, 2021(9): 422-432.
- [11] ZHANG Y, ZHANG L, MENG Q. Dynamic Heat Transfer Model of Vertical Green Façades and Its Co-Simulation with a Building Energy Modelling Program in Hot-Summer/Warm-Winter Zones[J]. *Energy and Buildings*, 2022(58): 105008.
- [12] ZHAO C, ZHANG L, YANG Y, et al. Long-Wave Infrared Radiation Properties of Vertical Green Façades in Subtropical Regions[J]. *Building & Environment*, 2022(223): 109518.
- [13] FENG T, HUANG Y, ZHOU B. Carbon Emissions and In-Building Open Public Spaces: A Case Study on Hypothetical Building Models in Shanghai[J]. *Open House International*, 2022(47): 451-472.
- [14] JIANG C, ZHOU Y, LI K, et al. Impact of Green Roof and Green Facade on Building Thermal Performance and Carbon Sequestration in Subtropical Climate of China[J]. *Journal of Building Physics*, 2023(46): 602-629.
- [15] ELSADEK M, LIU B, LIAN Z. Green Façades: Their Contribution to Stress Recovery and Well-Being in High-Density Cities[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019(46): 126446.
- [16] ZHANG X, NI Z, WANG Y, et al. Public Perception and Preferences of Small Urban Green Infrastructures: A Case Study in Guangzhou, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020(53): 126700.
- [17] LIU F, TIAN Y, JIM C, et al. Residents' Living Environments, Self-Rated Health Status and Perceptions of Urban Green Space Benefits[J]. *Forests*, 2022(13): 9.
- [18] HUI C, JIM C, TIAN Y. Public Views on Green Roofs and Green Walls in Two Major Asian Cities and Implications for Promotion Policy[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022(70): 127546.
- [19] XIAO L, WU R, HUANG J, et al. Study on the Relationship between Restoration Benefit and Visual Satisfaction of LONG-PLAN's Indoor Vertical Greenery[J]. *Buildings*, 2022(12): 1267.
- [20] CHEN Q, LI B, LIU X. An Experimental Evaluation of the Living Wall System in Hot and Humid Climate[J]. *Energy and Buildings*, 2013(61): 298-307.
- [21] LEE L, JIM C. Subtropical Summer Thermal Effects of Wire-rope Climber Green Walls with Different Air-Gap Depths[J]. *Building and Environment*, 2017(126): 2017.
- [22] YIN H, KONG F, 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 & Environment*, 2017(116): 195-206.
- [23] LIN H, XIAO Y, MUSSO F. Shading Effect and Heat Reflection Performance of Green Façade in Hot Humid Climate Area: Measurements of a Residential Project in Guangzhou, China[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018(146): 012006.
- [24] ZHANG L, DENG Z, LIANG L, et al. Thermal Behavior of a Vertical Green Facade and Its Impact on the Indoor and Outdoor Thermal Environment[J]. *Energy and Buildings*, 2019(204): 109502.
- [25] LIN H, XIAO Y, MUSSO F, et al. Green Façade Effects on Thermal Environment in Transitional

- Space: Field Measurement Studies and Computational Fluid Dynamics Simulations[J]. *Sustainability*, 2019(11): 5691.
- [26] LI Z, CHOW D, YAO J, et al. The Effectiveness of Adding Horizontal Greening and Vertical Greening to Courtyard Areas of Existing Buildings in the Hot Summer Cold Winter Region of China: A Case Study for Ningbo[J]. *Energy and Buildings*, 2019(196): 227-239.
- [27] PENG L, JIANG Z, YANG X, et al. Cooling Effects of Block-Scale Facade Greening and Their Relationship with Urban Form[J]. *Building & Environment*, 2020(169): 106552.
- [28] HAO X, XING Q, LONG P, et al. Influence of Vertical Greenery Systems and Green Roofs on the Indoor Operative Temperature of Air-Conditioned Rooms[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020(31): 101373.
- [29] NAN X, YAN H, WU R, et al. Assessing the Thermal Performance of Living Wall Systems in Wet and Cold Climates during the Winter[J]. *Energy and Buildings*, 2020(208): 109680.
- [30] ZHU Z, ZHOU D, WANG Y, et al. Assessment of Urban Surface and Canopy Cooling Strategies in High-Rise Residential Communities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(288): 125599.
- [31] REN J, TANG M, ZHENG X, et al. The Passive Cooling Effect of Window Gardens on Buildings: A Case Study in the Subtropical Climate[J]. *Energy and Buildings*, 2022(46): 103597.
- [32] HAO X, LIU L, TAN H, et al. The Impacts of Greenery Systems on Indoor Thermal Environments in Transition Seasons: An Experimental Investigation[J]. *Buildings*, 2022(12): 506.
- [33] YANG Y, HU K, LIU Y, et al. Optimisation of Building Green Performances Using Vertical Greening Systems: A Case Study in Changzhou, China[J]. *Sustainability*, 2023(15): 4494.
- [34] TANG Y, GAO F, WANG C, et al. Vertical Greenery System (VGS) Renovation for Sustainable Arcade-Housing: Building Energy Efficiency Analysis Based on Digital Twin[J]. *Sustainability*, 2023(15): 2310.
- [35] ZHENG X, HU W, LUO S, et al. Effects of Vertical Greenery Systems on the Spatiotemporal Thermal Environment in Street Canyons with Different Aspect Ratios: A Scaled Experiment Study[J]. *Science of The Total Environment*, 2023(859): 160408.
- [36] PETTIT T, IRGA P, TORPY F. The in Situ Pilot-Scale Phytoremediation of Airborne VOCs and Particulate Matter with an Active Green Wall[J]. *Air Quality Atmosphere & Health*, 2019(12): 33-44.
- [37] WANG H, HU W, LUO S, et al. Size Distribution and Elemental Composition of Airborne Particulate Matter on Four Plant Species in Vertical Greenery Systems[J]. *Building & Environment*, 2023(245): 110888.
- [38] SHI B, YIN H, KONG F. Assessment of the Potential for Urban Facade Greening in Xinjiekou District, Nanjing, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018(29): 1576-1584.
- [39] LI Y, DU H, SEZER C. Sky Gardens, Public Spaces and Urban Sustainability in Dense Cities: Shenzhen, Hong Kong and Singapore[J]. *Sustainability*, 2022(14): 9824.
- [40] XU F, JIA Y, PENG H, et al. Vertical Zonality of the Water Cycle and the Impact of Land-Use Change on Runoff in the Qingshui River Basin of Wutai Mountain[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2019(64): 2080-2092.
- [41] WU P, WANG Z, JIA N, et al. Vegetation Classification and Distribution Patterns in the South Slope of Yarlung Zangbo Grand Canyon National Nature Reserve, Eastern Himalayas[J]. *Plants*, 2022(11): 1194.
- [42] ZHOU Y, WEI Q, XIAO N, et al. Characteristics of Soil Mites Communities Structure Under Vegetation Vertical Gradient in the Shibing World Natural Heritage Property[J]. *Forests*, 2022(13): 598.
- [43] ZHAO T, BAI H, HAN H, et al. A Quantitatively Divided Approach for the Vertical Belt of Vegetation Based on NDVI and DEM — An Analysis of Taibai Mountain[J]. *Forests*, 2023(14): 1981.
- [44] 卓龙香月, 黄康有, 陈聪, 等. 郑华南亚热带武夷山地区垂直植被带表土孢粉散布规律[J]. *热带地理*, 2023, 43(06): 1005-1020.
- [45] SHAWKET I. Facades Planting: Contributing to a Better Environment; Empirical Study on New Cairo District, Egypt[J]. *Sustainability*, 2015(8): 24-32.
- [46] FAHMY M, MAHDY M, ELHADY H, et al. Simulating the Carbon Foot Print Reduction of an Arid Urban Form Applying Canopy Layer Green Coverage Under Climate Change Scenarios[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017(12): 12906-12913.
- [47] TALEB H, ELSEBAEI M, ELATTAR M. Enhancing the Sustainability of Shipping Container Homes in a Hot Arid Region: A Case Study of Aswan in Egypt[J]. *Architectural Engineering and Design Management*, 2019(15): 459-474.
- [48] FAHMY M, MAHDY M, MAHMOUD S, et al. Influence of Urban Canopy Green Coverage and Future Climate Change Scenarios on Energy Consumption of New Sub-Urban Residential Developments Using Coupled Simulation Techniques: A Case Study in Alexandria, Egypt[J]. *Energy Reports*, 2020(6): 638-645.
- [49] RAMADHAN A, MAHMOUD A. Evaluating the Efficiency of a Living Wall Facade as a Sustainable Energy-Saving Alternative in Hot Arid Regions[J]. *Journal of Engineering & Applied Science*, 2023(70): 1-25.
- [50] ELZOKLAH M, REFAAT T. How to Measure the Green Façades Environmental Effectiveness? A Proposal to Green Façade Systems Technical Guide[J]. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2021(12): 154-16.
- [51] ABOUBAKR S, FATHI A, BAKR A. Composite Indicators for Assessing the Carbon Emission Reduction on Bio-Eco-Resilience of Residential Buildings[C] // 16th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability, 2022(206): 289-298.
- [52] ELHady A, ELHALAFAWY A, MOUSSA R. Green-Wall Benefits Perception According to the Users' versus Experts' Views[J]. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2019(12): 3089-3095.
- [53] LOTFI Y, REFAAT M, ELATTAR M, et al. Vertical Gardens as a Restorative Tool in Urban Spaces of New Cairo[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2020(11): 839-848.
- [54] WAHBA S, KAMIL B, NASSAR K, et al. Green Envelop Impact on Reducing Air Temperature and Enhancing Outdoor Thermal Comfort in Arid Climates[J]. *Civil Engineering Journal*, 2019(5): 1124-1135.
- [55] ELMENSHAWY A, MOHAMED A, FATHY N. A Comparative Study on Green Wall Construction Systems, Case Study: South Valley Campus of AASTMT[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022(16): e00808.
- [56] MAHROUS R, GIANCOLA E, OSMAN A, et al. Review of Key Factors that Affect the Implementation of Bio-Receptive Façades in a Hot Arid Climate: Case Study North Egypt[J]. *Building & Environment*, 2022(214): 108920.
- [57] 张德顺, 刘鸣. 基于“植物功能性状-生态系统服务”评价框架的园林树种选择方法——以上海为例[J]. *中国园林*, 2020, 36(02): 106-111.
- [58] 张德顺, 王振. 天穹扇区对夏季广场小气候及人体热舒适度的影响[J]. *风景园林*, 2018, 25(10): 27-31.