

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241118006

基于高架城市LUCC策略的居住区 绿地固碳潜力研究*

郑锐锋^{1,2}, 刘思艺¹, 丛蕾³, 唐春安^{1,2}

(1. 浙江科技大学土木与建筑工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江-新加坡城市更新与未来城市联合实验室, 浙江 杭州 310023; 3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310030)

摘要: 研究高架城市设计(Elevated Urban Design, EUD)作为一种应对土地利用和生态资源稀缺问题的创新解决方案, 提高城市空间绿地碳储量和提升生态系统服务的价值(Ecosystem Service Value, ESV)。聚焦于EUD模式下的土地利用(Land Use and Cover Change, LUCC)及居住区绿地碳汇增量和ESV的耦合关系。以15 min生活圈作为研究尺度, 采用碳排放因子法估算土地利用变化带来的绿地碳储量增量; 根据生态经济学原理, 分析生态系统服务价值潜力。研究结果表明: (1)以15 min生活圈为规划范围, EUD模式下的居住区绿地增量为24.4~59 hm², 绿地覆盖率增量为6.1%~14.75%。(2)EUD模式下居住区绿地碳排量减少6.68~16.16 t/hm²。(3)居住区绿地与ESV存在正相关性, ESV增加58.73~141.83万元。(4)EUD模式以土地集约化置换利用方式促进城市生态系统目标导向下的发展完整性。

关键词: 土地利用变化(LUCC); 15 min生活圈; 高架城市设计(EUD); 生态系统服务价值(ESV); 居住区绿地
中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1118-07

Research on Carbon Sequestration Potential of Residential Green Spaces Based on LUCC Strategies in Elevated Cities

ZHENG Ruifeng^{1,2}, LIU Siyi¹, CONG Lei³, TANG Chunan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China;
2. Zhejiang-Singapore Joint Laboratory for Urban Renewal and Future City, Hangzhou 310023, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310030, China)

Abstract: This study investigates elevated urban design (EUD) as an innovative solution to address the scarcity of land use and ecological resources, aiming to increase the carbon storage of urban green space and enhance ecosystem service value (ESV). The focus was placed on the coupling relationship between land use and cover change (LUCC), green space carbon sink increment in residential areas, and ESV under the EUD mode. Using the 15-minute living circle as the research scale, the carbon emission factor method was used to estimate the increment of green space carbon storage caused by LUCC. Based on the principles of ecological economics, the ESV potential was analyzed. The results showed that: (1) using the 15-minute living circle as the planning scope, the increment of residential green space under the EUD mode ranged from 24.4 hm² to 59 hm², with an increase in green space coverage of 6.1%-14.75%. (2) Under the EUD mode, the carbon emissions from residential green

* 收稿日期:2024-11-18;修回日期:2025-01-02

基金项目:浙江省乡村振兴咨询委员会软课题项目(RKT202319)资助

作者简介:郑锐锋(1975—),女,副教授。主要从事低碳城市与建筑碳中和研究。E-mail:103042@zust.edu.cn

spaces decreased by 6.68 t/hm²-16.16 t/hm². (3) A positive correlation was observed between residential green spaces and ESV, with ESV increasing by 587 300-1 418 300 yuan. (4) The EUD mode promoted the integrity of development under the goal-oriented urban ecosystem through intensive land replacement and utilization.

Keywords: land use and cover change (LUCC); 15-minute living circle; elevated urban design (EUD); ecosystem service value (ESV); residential green space

0 引言

随着全球城市化进程的加速,中国城镇常住人口已达到 9.21 亿,且城市建成区面积仍在持续扩张。城市能源消耗所产生的二氧化碳排放量占中国总排放量的 80% 以上,直接加剧了碳排放问题。碳排放量增加不仅导致城市温室效应加剧,还引发了生物多样性丧失以及生态系统服务功能退化,这些问题的严重性日益凸显。

IPCC 曾指出在快速城市化的地区,空间规划的统筹和高效基础设施的布局能够避免高碳排放模式^[1]。土地利用和生态系统服务在这一进程中扮演着至关重要的角色,因此在国土空间规划设计层面需要进行系统性变革。土地利用/覆被变化(Land Use and Cover Change, LUCC)是人类活动与自然环境相互作用的结果,与生态安全、生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)创造相关联。LUCC 通过改变土地覆盖类型和利用方式,直接影响生态系统的结构和功能,推动资源利用方式的根本转变,进而影响 ESV。R. Costanza 等^[2]最早利用土地利用(覆盖)数据和生态系统服务价值当量,估算了全球生态系统服务。城市土地利用结构深刻地影响着城市的碳排放水平,E. L. Glaeser 等^[3]研究表明,高密度的中心城市区域的碳排放水平显著低于低密度地区,土地使用限制越严格,居民的碳排放水平则越低。联合国 2030 年可持续发展议程将城市绿地作为全球发展战略的独立目标,R. S. Stephan^[4]认为城市内部的绿化具有显著的综合减碳效应,并从五个方面提出了应对气候变化的综合策略,同时提出保护和发展城市绿带、森林及农业等碳汇空间。采用在优化绿地的减碳效益方面,仇保兴^[5]提出绿地系统的设计应采用网格化的布局,并结合社区空间结构,通过在适当的空隙中多种植占地小且遮阳效果良好的高大乔木。上述研究表明,优化土地利用结构并采用合理的绿地空间布局

对我国实现双碳目标及生态系统服务价值提升具有重要意义。

1 土地空间利用转型降碳策略

实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的社会系统性变革,国土空间面临发展新机遇和转型挑战。2022 年 4 月,政府间气候变化专门委员会首次将“城市系统”放在与能源、建筑、交通等关键部门并列位置论述降碳措施,强调跨领域协同的重要性。在这一背景下,研究者们转向研究碳排放与国土空间规划、土地利用类型、结构变化及其使用方式之间的协同作用机制。上海市城市规划设计研究院熊健团队提出了碳约束背景下集约紧凑的空间格局,通过组织集约交通设施、加强通风廊道和增加城区蓝绿空间规划生态系统面积的战略发展导向和实施策略^[6];南京大学黄贤金教授团队提出了基于情景设计、土地利用模拟、效果比较的研究框架^[7],通过优化土地利用格局来实现碳中和,为低碳发展和可持续土地利用管理提供了政策建议;浙江科技大学未来城市研究院唐春安教授团队提出了发展地上空间的高架城市设计技术策略及规划框架^[8],通过土地利用角度系统性地提供了降碳固碳解决方案。在应对气候变化的同时,促进未来城市的转型升级,解决未来城市生态降碳固碳的难题。这些前沿策略方法为土地利用与碳中和之间的相互关系提供了新的实施路径。

2 EUD 及数据来源

本文聚焦唐春安高架城市技术方案,旨在通过创新性的交通密集型未来城市结构框架带动土地生态空间利用的策略,一方面根据生态经济学原理和方法,评估高架城市技术方案的 EVS,探讨高架城市绿地降碳增汇和 ESV 的增量耦合关系;另一方面,从规划设计策略角度带来的置换利用关系,为未来城市发展提供生态空间利用价值的设计策略。

2.1 研究对象

高架城市技术方案概念界定:基于土地利用角度、对空间进行重塑置换以提升生态系统碳汇潜力,唐春安等^[8]提出了高架城市设计策略方案(Elevated Urban Design, EUD),此为系统性的城市设计技术性的变革。EUD倡导以地表层为基准,城市空间结构向上发展,通过高架“一层板”,将城市空间划分为人居活动层、城市物流层和城市交通层的三层式空间结构模式(图1),实现人、车、货分流。有效破解人居活动空间的短缺、调节城市碳循环和增

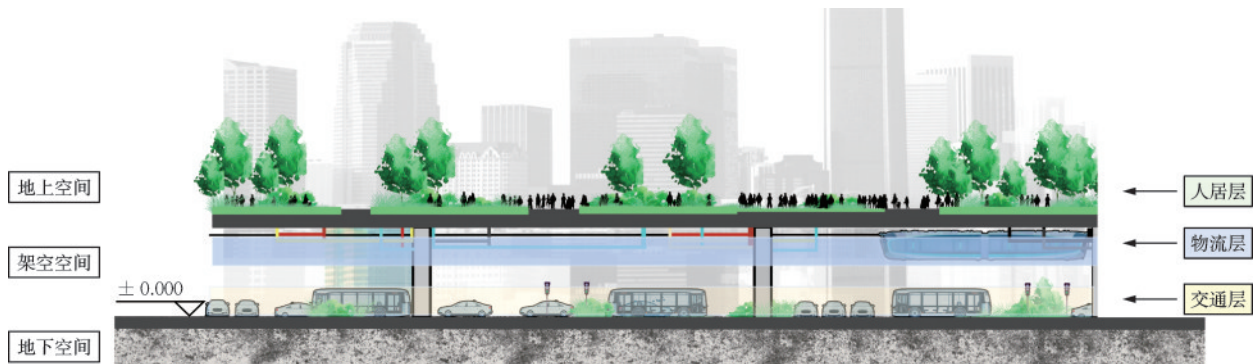


图1 高架城市结构图

Fig.1 Structure of elevated city

2.2 数据来源

根据《城市居住区规划设计标准》^[9]及《城市综合交通体系规划标准》^[11]确定高架城市研究区域规范。结合现有分类标准以及高架城市土地利用情况,将土地类型分为城市绿地、水域、建设用地。计算ESV碳排放量及所需的社会经济数据来源于所研究年份的《中国能源统计年鉴2023》^[12];部分参数的选取参考了公开发表的文献相关数据。

3 EUD与居住区绿地固碳潜力研究

EUD转变了土地利用结构属性及生态绿地增量,通过架高人居活动层与交通空间的置换,分析机动车交通空间需求降级,与生态绿地空间置换。一方面从碳汇方法学探索生态绿地与碳汇量化关系,另一方面从生态经济学原理和经济价值角度出发探讨其对城市生态系统服务价值的影响;而ESV作为生态系统服务经济性的量化表现形式,能够反映城市绿地对生态环境的贡献。因此,从碳汇和

强碳捕集技术的实施、增强城市碳汇能力与生态系统可持续发展。同时,也对城市交通拥堵、城市地下空间易发灾害等当代城市病“综合征”难题、缓解全球气候变化提供了系统可行的有效解决方案。

本文聚焦于城市研究的中微观尺度,以《城市居住区规划设计标准》^[9]为规范研究标准,选取规范中认定的15 min生活圈为研究地理单元^[10]。开展对EUD模式下城市居住区的绿地碳储量及生态价值研究,以揭示国土空间规划制度对空间格局优化及碳储量的耦合关系,共同构建降碳多元共治机制。

ESV的双重视角对高架城市的研究提供了科学依据。

3.1 高架城市绿地增量

本研究以15 min生活圈为研究尺度,其服务半径800~1 000 m、总用地面积400 hm²,街区宽度2 km,最小生活圈单元宽度500 m(图2(a))。根据EUD在原有城市建设基地上,通过搭建平台营建高架空间,将人居活动空间上移至高架层,使城市交通空间得以释放,转变为巨大的绿地空间潜力增量,提高城市绿地率占比、调节城市碳循环。

根据国家现行标准《城市综合交通体系规划标准》^[11]中,主干道Ⅰ类宽度:40~50 m,次干道:25~35 m,支路Ⅰ类宽度:14~20 m(表1);按照EUD模式,交通层与人居活动层垂直分层,人居活动层交通需求降级,仅需满足人、非机动车及消防车通行。结合国家标准《建筑设计防火规范》(2018年版)^[13]对消防车道的净宽度要求,15 min生活圈道路(主、次、支路)在EUD模式下的人居活动层通路均为7.5 m(图2(b)、图3)。

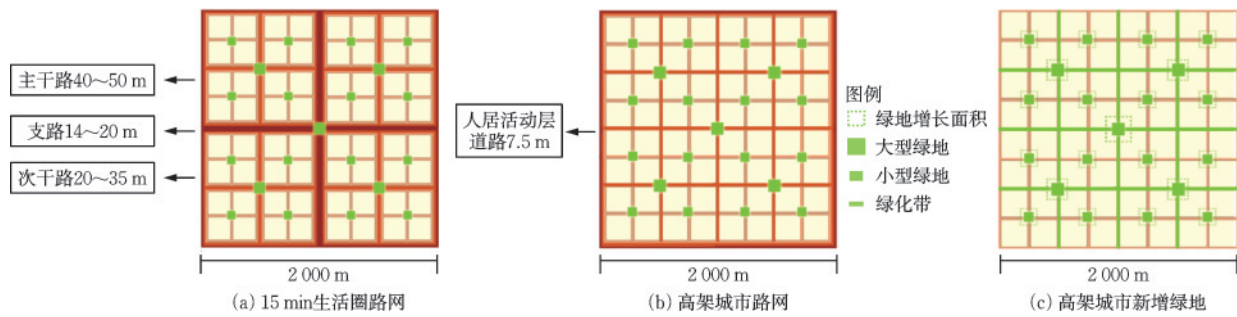


图2 城市道路及绿地平面图

Fig.2 Plan of urban roads and green spaces

表1 高架城市绿地面积增量

Table 1 Increment of green space area in elevated cities

道路	15 min 生活圈/m	高架城市/ m	新增绿地面积/m ²
主干路	40~50	7.5	130 000~170 000
次干路	20~35	7.5	100 000~220 000
支路	14~20	7.5	10 400~200 000

结合已有碳汇计量方法,提出适用于EUD城市绿地碳汇计量框架。城市绿地碳汇估算需遵循边界性、普适性、可操作性原则,即在碳汇项目计入期内,考虑项目地理边界范围内的碳储量变化和碳排放。土地利用碳排放根据已有研究,城市绿地、水域采用碳排放系数进行碳排放测算,其中负值表示碳吸收^[14-15]。公式如下:

$$CE_a = \sum(\alpha_i \times S_i) \quad (1)$$

式中, CE_a 为土地利用碳排放量; α_i 为第*i*种地类对应的碳排放系数; S_i 为第*i*种地类的面积。

从绿地空间布局图上看(图2(c)),高架城市的绿地分布呈均值形式为集中绿地为主,宅旁绿地为辅,采用单核心辐射型及绿带或绿廊连接各区域。直径500 m区域配备小型绿地,直径1 000 m区域配备大型绿地。经过验证,EUD模式的绿地增量为24.4~59 hm²(表1)。根据《城市居住区规划设计标准》^[9],住宅建筑类别划分为多层I类、多层II类和高层I类,这一分类基于人均居住区用地面积的标准。因此,高架城市各类别住宅建筑的公共绿地面积按人口占比均值化分布,以确保绿地资源的合理分配和利用。通过交通与绿地空间置换,高架城市新增总面积及比例(6.1%~14.75%)配比多层I类公共绿地面积为52.4~103 hm²(13.1%~25.75%),多层II类公共绿地面积为36~52 hm²(15.1%~27.75%),高层I类公共绿地总面积68.4~123 hm²(17.1%~30.75%)(表2)。

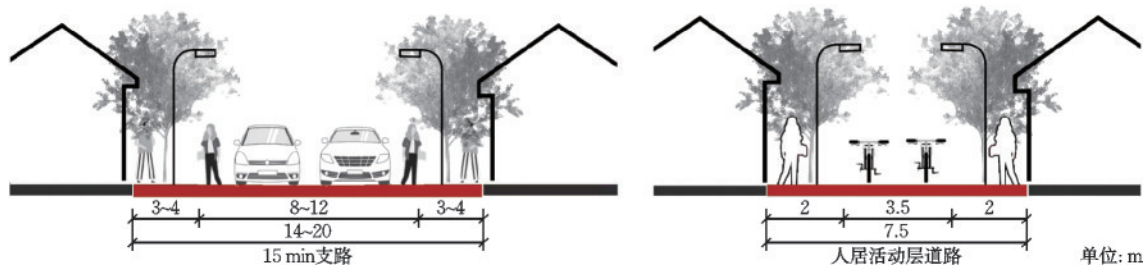


图3 15 min生活圈支路与人居活动层道路对比

Fig.3 Comparison between branch roads in 15-minute living circle and roads in residential activity layer

表2 建筑类型与绿地占比^[9]

Table 2 Building type and green space ratio^[9]

住宅建筑 平均层数类别	《城市居住区规划设计标准》			EUD模式	
	公共绿地占比/%	道路用地占比/%	公共绿地面积/hm ²	公共绿地占比/%	公共绿地面积/hm ²
多层I类	7~11	15~20	28~44	13.1~25.75	52.4~103
多层II类	9~13	15~20	36~52	15.1~27.75	60.4~111
高层I类	11~16	15~20	44~64	17.1~30.75	68.4~123

3.2 EUD 绿地碳储量

城市绿地植被通过光合作用吸收大气中 CO₂ 的过程称为碳吸收,以生物质形式固定并存储在植物体及土壤中的有机碳含量称为碳储量^[16],增强居住区生态环境效益,有效发挥生态系统绿地固碳减排作用。城市绿地具有碳汇潜力^[17],城市绿地量与碳储量直接相关,本研究将居住区绿地增量作为定量研究,探索高架城市模式居住区绿地与碳储量之间的耦合关系。

根据前文已有研究结论,由公式及碳排放系数可得 EUD 可增加 6.68~16.16 t/hm² 碳储量。其中,高架城市多层 I 类碳排量为 14.36~28.22 t/hm²,多层 II 类碳排量为 16.55~30.41 t/hm²,高层 I 类碳排量 18.74~33.7 t/hm²。可得知,EUD 模式下的绿地增量与碳储量呈正相关性(表 3),有助于提高城市碳密度、实现高密度、高效益的土地利用,实现绿色资源共享、降低碳排放,改善绿色基础设施、构建宜居的生态型城市,提升城市的整体环境质量。

表 3 面积增量及碳储量^[9]

Table 3 Area increment and carbon storage^[9]

住宅建筑 平均层数类别	《城市居住区规划设计标准》		EUD 模式	
	公共绿地面积/hm ²	公共绿地碳储量/(t·hm ⁻²)	公共绿地面积/hm ²	公共绿地碳储量/(t·hm ⁻²)
多层 I 类	28~44	7.67~12.06	52.4~103	14.36~28.22
多层 II 类	36~52	9.86~14.25	60.4~111	16.55~30.41
高层 I 类	44~64	12.06~17.54	68.4~123	18.74~33.7

4 EUD 模式生态系统服务价值分析

生态系统服务价值是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[18]。其内涵为维护生存环境与促进自然生态系统的健康和可持续发展提供了至关重要的保障与作用。生态系统服务价值的定量评估方法通常采用碳税法、工业制氧影子价格法和恢复成本法。分别为针对温室气体排放以国际碳税市场价值估算城市绿地固碳服务的经济价值(碳税法)、通过参考工业制氧的成本来估算自然绿地生态系统提供氧气服务的经济价值(工业制氧影子价格法)、以及评估城市绿地在环境净化方面服务的经济价

值(恢复成本法)。EUD 模式的居住区绿地由多种分布方式组合,结合植物种类、释氧固碳、应对环境破坏损失、吸收大气中的有害气体(如 NO_x 和 SO₂)^[19]和滞尘等功能,形成氧源绿地合理平衡碳源碳汇分布空间。

依照生态经济学原理,参照 R. Costanza 等^[2]提出的生态系统服务价值研究方法,同时,借鉴国内外学者的研究成果^[20],从 ESV 中选取调节服务价值计算方法(表 4)对高架城市绿地进行价值评估。绿色植物通过光合作用来吸收 CO₂、释放 O₂ 是生态系统的气体调节服务,包括固碳服务和释氧服务 2 个方面。城市绿地的气体调节服务对维持城市大气碳氧平衡、缓解大气中温室气体 CO₂ 浓度的升高有重要作用。

表 4 生态系统调节服务价值计算方法

Table 4 Calculation methods of ecosystem regulation service value

调节服务要素	公式	各项定义
固定 CO ₂ 的价值	$Y_c = A \times Q_c \times T_c$	Y_c 为城市绿地固碳价值; A 为绿地面积; Q_c 为单位绿地面积固碳量(t/hm ²); T_c 为碳税率(元/t)
释放 O ₂ 的价值	$Y_o = A \times Q_o \times P_o$	Y_o 为城市绿地释氧价值; A 为绿地面积; Q_o 为单位绿地面积释氧量(t/hm ²); P_o 中国近年来平均工业制氧价格
吸收 NO _x 的价值	$Y_n = A \times Q_n \times P_n$	Y_n 为城市绿地吸收 NO _x 的价值; A 为绿地面积; Q_n 为单位绿地面积吸收 NO _x 的量(t/hm ²); P_n 为 NO _x 的治理费用
吸收 SO ₂ 的价值	$Y_s = A \times Q_s \times P_s$	Y_s 为城市绿地吸收 SO ₂ 的价值; A 为绿地面积; Q_s 为单位绿地面积吸收 SO ₂ 的量(t/hm ²); P_s 为 SO ₂ 的治理费用
滞尘的价值	$Y_d = A \times Q_d \times P_d$	Y_d 为城市绿地滞尘的价值; A 为绿地面积; Q_d 为单位绿地面积滞尘量(t/hm ²); P_d 为除尘费用

对高架城市绿地系统的生态服务价值进行定量分析。根据计算由表5可知,EUD模式下土地利用带来的绿地增量显著提升城市生态系统的调节服务价值,增量为58.73~141.83万元。①固碳增值为14.34~34.68万元,同时通过选配固碳因子高的植物种类、优化植物配置可以进一步提升;②释氧服务对于维持城市生态平衡和居民健康至关重要,EUD扩大植被覆盖率,增加释氧价值39.39~94.97万元;③氮氧化物的吸收能力在EUD模式下价值提升范围为0.58~1.41万元;④二氧化硫吸收

服务价值提升范围为0.23~0.63万元;最后,滞尘服务价值提升范围为4.19~10.14万元,结合城市绿地中的植被密度,尤其是灌木、草地和土壤表面截留和吸附空气中的颗粒物,减少空气中的悬浮颗粒物。

EUD优化居住区绿地的结构和功能,有效地平衡了经济发展与生态保护的关系,促使ESV稳固增长。打破了高强度城市化空间伴随着ESV低的常规性,为城市低碳规划的可持续性提供更大的灵活性与空间。

表5 高架城市生态系统调节服务价值

Table 5 Ecosystem regulation service value of elevated cities

生态系统调节服务价值增量					
调节服务(因素)	固碳价值	释氧价值	吸收氮氧化物	吸收二氧化硫	滞尘
研究方法	国际碳税法	工业制氧影子价格法	恢复成本法	恢复成本法	恢复成本法
金额/万元	14.34~34.68	39.39~94.97	0.58~1.41	0.23~0.63	4.19~10.14
合计/万元	58.73~141.83				

5 EUD建设可行性分析

EUD模式推广还存在很多亟待解决的问题,尤其是缺乏体系化的顶层开发设计策略。其一,需科学制定针对性的国土空间专项规划、详细的规划程序,制定行动计划、打造标准规划样板,允许试点项目;其二,对规划技术指标进行科学性制定,包括对人口密度、建筑密度、绿化率等关键指标,需打破常规容积率定义,地面架空空间建设面积不计入容积率等;其三,EUD新区与旧城区的衔接问题,包括城市水平及垂直交通组织及综合管线布置;其四,EUD模式的公共安全方面体现了本质安全理念,由于避免对地下空间的过度利用,城市防洪和应对自然灾害能力得以显著提升。技术问题是实施高架城市的关键问题,须综合、系统的设计,做好工作规划。

6 结语与展望

EUD模式对于土地利用的贡献:体现在生态土地利用结构与ESV具有显著的空间耦合特征,通过将人居活动和交通功能分层,实现土地集约化利用,基于15 min生活圈的规划范围,EUD模式显著提升了城市的绿地覆盖率,增幅介于24.4~59 hm²。有效解决了绿地空间稀缺的生态土地使用困境,为未来城市的绿地基础设施发展提供了更多可行性,

优化了城市碳循环应对气候的适应能力。

EUD模式对于固碳及ESV的贡献:①在24.4~59 hm²的新增绿地范围内,每公顷绿地面积可以减少6.68~16.16 t的碳排放量。②固碳增量提升ESV 58.73~141.83万元。③有助于保护和恢复生态系统、实现了经济与环境的双赢。

EUD作为一种创新的城市规划策略,在多个层面上促进城市低碳的可持续发展。对于参与零碳建筑、零碳社区、零碳城市的抵消机制、促进碳交易以及转化为碳信用具有重要的推动作用,城市管理者可利用这一优势,激励更多的减排行动和碳汇项目,以实现环境和经济的双赢;EUD模式对维护生物多样性和城市生态系统的连通性,对于植被类型和结构规划生态廊道、提供动植物在城市内部生存空间提供完整性,为城市可持续发展提供了坚实的生态基础;进一步优化高架城市设计,未来的研究工作需从长期效果评估、多尺度研究、社会经济影响、技术集成与创新、政策支持与公众参与等多个角度进行深入探索,为高架城市设计的广泛应用提供科学依据和技术支持。

参考文献:

- [1] 熊健,卢柯,姜紫莹,等.“碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J].城市规画学刊,2021(4):74-80.
Xiong J, Lu K, Jiang Z Y, et al. Research and thinking

- on national spatial planning under the goal of "carbon peak and carbon neutrality"[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(4): 74-80. (in Chinese)
- [2] Costanza R, D'Arge R, de Groot R D, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital [J]. *Cological Economics*, 1997(25): 3-15.
- [3] Glaeser L E, Kahn E M. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development[J]. *Journal of Urban Economics*, 2010, 67(3): 404-404.
- [4] Stephan R S. Climate change: Integrated strategies case study Munich, Germany [C]//45th ISOCARP Congress. The Hague: International Society of City and Regional Planners (ISOCARP), 2009: 1-11.
- [5] 仇保兴. 城市如何实现碳达峰碳中和[J]. *城乡建设*, 2021(19): 76-81.
Qiu B X. How cities can achieve carbon peak and carbon neutrality[J]. *Urban and Rural Construction*, 2021 (19): 76-81. (in Chinese)
- [6] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. 上海落实“双碳”目标的国土空间发展战略与实施策略研究[J]. *上海城市规划*, 2024(4): 1-8.
Xiong J, Lu K, Jiang Z Y, et al. Research on the national space development strategy and implementation strategy of implementing the "dual carbon" goal in Shanghai[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2024 (4): 1-8. (in Chinese)
- [7] Li L, Huang X J, Yang H. Optimizing land use patterns to improve the contribution of land use planning to carbon neutrality target [J]. *Land Use Policy*, 2023 (135): 106959.
- [8] 唐春安, 杨菊英, 王凯凯. 高架城市及其城市空间发展的三层结构模式[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(3): 637-642.
Tang C A, Yang J Y, Wang K K. Elevated city and its three-layer structure model for urban spatial development[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(3): 637-642. (in Chinese)
- [9] 城市居住区规划设计标准: GB 50180—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] 钱征寒, 刘泉, 黄丁芳. 15分钟生活圈的三个尺度和规划趋势[J]. *国际城市规划*, 2022, 37(5): 63-70.
Qian Z H, Liu Q, Huang D F. Three dimensions and planning trends of 15-minute life circle[J]. *The International Urban Planning*, 2022, 37(5): 63-70. (in Chinese)
- [11] 城市综合交通体系规划标准: GB/T 51328—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [12] 国家统计局.《中国统计年鉴 2023》[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024: 380-400.
- [13] 建筑设计防火规范: GB 50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [14] 刘锦盛, 王世航, 赵明松, 等. 山西省土地利用碳排放时空差异及影响因素分析[J]. *宜春学院学报*, 2023, 45(9): 6-11, 87.
Liu J S, Wang S H, Zhao M S, et al. Spatial and temporal differences of land use carbon emissions and their influencing factors in Shanxi Province [J]. *Journal of Yichun University*, 2023, 45(9): 6-11, 87. (in Chinese)
- [15] 刘学荣, 杨琳, 王颖, 等. 基于土地利用变化的东北地区碳排放效应研究[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 107-114.
Liu X R, Yang L, Wang Y, et al. Northeast China carbon emissions effect based on land use change research [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37 (2): 107-114. (in Chinese)
- [16] 陶晓, 杨军, 骆翔宇, 等. 城市绿地碳汇核算和监测研究进展[J]. *中国园林*, 2024, 40(3): 108-113.
Tao X, Yang J, Luo X Y, et al. Urban green space carbon sinks accounting research progress and monitoring [J]. *Chinese Garden*, 2024, 40(3): 108-113. (in Chinese)
- [17] 王晶懋, 王一凡, 张涛, 等. 城市街区单元绿地空间格局与植物群落碳汇效益优化研究[J]. *风景园林*, 2024, 31(6): 37-45.
Wang J M, Wang Y F, Zhang T, et al. Study on spatial pattern of green space in urban block units and optimization of carbon sink benefits of plant communities [J]. *Journal of Landscape Architecture*, 2024, 31(6): 37-45. (in Chinese)
- [18] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A preliminary study on the service function and eco-economic value of terrestrial ecosystem in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613. (in Chinese)
- [19] Penttinen P, Timonen K L, Tiittanen P, 等. 城市空气中颗粒物的数量浓度和大小: 对成年哮喘受试者肺活量肺功能的影响[J]. *环境健康展望*, 2001, 109(4): 319-323.
Penttinen P, Timonen K L, Tiittanen P. et al. Quantity concentration and size of particulate matter in urban air: Effects on vital capacity lung function in adult subjects with asthma [J]. *Environmental Health Outlook*, 2001, 109(4): 319-323. (in Chinese)
- [20] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 5-9.
Xie G D, Lu C X, Cheng S K. Research progress of global ecosystem service value assessment [J]. *Resources Science*, 2001, 23(6): 5-9. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)