

DOI: 10.20103/j.stxb.202404130818

徐可西, 詹冰倩, 陈王宇, 鲍海君. 城市绿色低碳发展质量评估: 指标体系及其应用. 生态学报, 2025, 45(6): 2877-2890.

Xu K X, Zhan B Q, Chen W Y, Bao H J. Assessment of urban green low-carbon development quality: index system and its application. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2877-2890.

## 城市绿色低碳发展质量评估: 指标体系及其应用

徐可西<sup>1,2</sup>, 詹冰倩<sup>1,2</sup>, 陈王宇<sup>1</sup>, 鲍海君<sup>1,\*</sup>

1 浙大城市学院国土空间规划学院, 杭州 310015

2 浙江财经大学公共管理学院, 杭州 310018

**摘要:** 开展城市绿色低碳发展质量评估, 推动城市绿色低碳转型是实现“双碳”战略目标和经济社会发展全面绿色转型的重要支撑。立足降碳、减污、扩绿、增长协同推进的视角, 基于城市是一个复杂生态系统的基本认知, 解析城市绿色低碳发展质量内涵, 借鉴人居环境健康圈层模型解构城市多尺度空间的核心要素, 进而关联 SDGs 目标构建多尺度空间与多目标交互的城市绿色低碳发展质量评估理论框架, 综合指标的合理性和可操作性开发本土化的评估指标体系。在此基础上, 选取杭州为案例城市开展指标体系的实证研究。研究发现: (1) 城市绿色低碳发展质量的基本内涵应是协同实现减污降碳、经济增长、民生改善等城市绿色低碳发展目标的综合水平; (2) 城市绿色低碳发展质量评估指标体系涵盖 49 个关键指标, 分为强制性、引导性和倡导性三类指标, 涉及单体建筑、基本单元、基础设施、城市环境四个空间尺度; (3) 杭州四个阶段 (2008—2023 年) 的城市绿色低碳发展质量评估结果与实际情况相符, 验证了指标体系的科学性和有效性; (4) 推动城市绿色低碳高质量发展需综合考虑单体建筑、基本单元、基础设施和城市环境四个维度的发展策略和协同效应。本文扩充了城市绿色低碳发展质量评估研究的理论体系, 也为推动我国城市绿色低碳高质量发展提供了实践参考。

**关键词:** 城市绿色低碳发展; 多尺度空间; 指标体系; 碳减排; 杭州

## Assessment of urban green low-carbon development quality: index system and its application

XU Kexi<sup>1,2</sup>, ZHAN Bingqian<sup>1,2</sup>, CHEN Wangyu<sup>1</sup>, BAO Haijun<sup>1,\*</sup>

1 School of Spatial Planning and Design, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China

2 School of Public Administration, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018, China

**Abstract:** Assessing urban green and low-carbon development quality to promote urban green and low-carbon transformation is essential for reaching the ambitious goals outlined in the “dual carbon” strategy in China. The assessment also plays a crucial role in supporting the overall green transformation of economic and social development. To build the assessment framework, the study adopts a comprehensive approach, integrating efforts focused on carbon reduction, pollution control, green space expansion, and sustainable growth, starting from the understanding that cities operate as complex ecological systems. In exploring the essence of urban green and low-carbon development quality, this study employs the human-environment health circle model to dissect the core elements within various scales of urban spaces. Then, by aligning these elements with the Sustainable Development Goals (SDGs), which were proposed by the United Nations, this study constructs a theoretical framework aimed at evaluating urban green and low-carbon development quality, emphasizing the interaction between multiple spatial scales and diverse goals. Next, a localized evaluation index system is developed. It considers the rationality and feasibility of the selected indicators. This study conducts an empirical analysis using Hangzhou as a case

基金项目: 国家社科基金重大项目 (23&ZD099)

收稿日期: 2024-04-13; 网络出版日期: 2024-12-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baohaijun@hzc.edu.cn

study to apply this index system effectively. Several important findings are revealed. First, the fundamental connotation of urban green and low-carbon development quality is identified as the comprehensive level of achieving synergistic goals such as pollution reduction, carbon reduction, economic growth, and improvement in citizens' livelihoods. Second, the evaluation index system comprises 49 key indicators, which are categorized into three main types: mandatory, orientative, and advocated indicators. These indicators span four spatial dimensions: building, basic unit, infrastructure, and the urban environment. This multi-dimensional perspective ensures a thorough evaluation of urban green and low-carbon development quality. Third, the assessment results for Hangzhou, which span four distinct phases from 2008 to 2023, align well with the actual circumstances observed in the city. This alignment not only validates the scientific integrity of the proposed index system but also demonstrates its practical applicability. Finally, the promotion of high-quality green and low-carbon urban development requires a holistic view that considers strategies and synergies across the four identified dimensions of building, basic unit, infrastructure, and urban environment. Recognizing the development measures of these dimensions allows for more effective policy formulation and urban planning. In summary, this study not only expands the theoretical framework for assessing urban green and low-carbon development quality but also provides practical reference for promoting green, low-carbon and high-quality development in Chinese cities.

**Key Words:** urban green low-carbon development; multi-scale space; index system; carbon reduction; Hangzhou

全球气候变化背景下,绿色低碳发展逐渐成为世界各国的重要共识<sup>[1]</sup>。2020年,我国提出了“碳达峰碳中和”愿景,党的二十大就“积极稳妥推进碳达峰碳中和”作出了战略部署。为实现双碳战略目标从“量的积累”向“质的跃升”转变,2024年中共中央、国务院印发《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》,明确提出要走绿色低碳高质量发展道路,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式。城市不仅是碳排放的主要贡献者,也是社会经济的核心引擎<sup>[2]</sup>。推动城市绿色低碳发展是深入推进经济社会发展全面绿色转型的重要抓手,也是实现我国双碳战略目标的关键着力点<sup>[3]</sup>。监测评估是保障城市绿色低碳发展质量的主要手段,也是调整优化城市绿色低碳发展策略的重要依据。因此,建立科学的城市绿色低碳发展质量评估体系并开展监测评估,协同联动顶层设计与基层探索,对有序推动我国城市绿色低碳发展具有重要意义。

自可持续发展战略提出以来,国内外围绕城市的绿色、低碳等发展目标开展了评估体系开发及应用的探索。如联合国持续发布可持续发展目标指数,以评估和衡量各成员国在可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)上的实施进展;我国国家发展改革委、林草局等政府部门以及社科院城市发展与环境所、科学院城市环境所等科研机构开发了《绿色发展指标体系》《生态文明建设考核目标体系》《ELITE Cities 低碳生态城市指标体系》《城市和社区可持续发展低碳发展水平评价导则》等评估体系并推动了低碳城市建设试点<sup>[4-5]</sup>。尽管绿色和低碳发展理念在推动城市绿色低碳发展方面发挥了一定作用,但现有评估体系多从生态保护<sup>[6]</sup>、减污降碳<sup>[7]</sup>等城市单一发展目标出发,欠缺对经济社会发展与减污降碳关系的协调,无法有效支撑城市绿色低碳发展实践。因此,本文立足降碳、减污、扩绿、增长协同推进的视角,在厘清城市绿色低碳发展质量的基本内涵基础上构建城市绿色低碳发展质量评估理论框架,进而开发城市绿色低碳发展质量评估指标体系并对其应用效果进行验证,以为推动我国城市的绿色低碳转型发展提供理论支撑与实践指导。

## 1 城市绿色低碳发展质量的研究进展

### 1.1 城市绿色低碳发展质量的内涵

立足降碳、减污、扩绿、增长协同视角,城市绿色低碳发展追求资源环境、经济发展、社会民生等城市核心系统要素的整体提升,“以人为本、生态优先、绿色发展”是其基本发展原则<sup>[8]</sup>。其中,以人为本是城市绿色低碳发展的基本前提,要求通过提升公共服务效率、改善生活环境质量、优化公共服务配置等举措<sup>[9]</sup>持续增强

人民的获得感、幸福感和安全感,从而满足人民群众日益增长的对美好生活需要。生态优先是城市绿色低碳发展的基本要求,一方面强调通过增设生态空间、优化生态复合功能等措施优化城市自然本底,激活生态环境对城市经济发展的正向效用<sup>[10]</sup>;另一方面,追求资源节约和循环利用以提高资源环境承载力,从而化解城市生态危机<sup>[11]</sup>。绿色发展是城市绿色低碳发展的基本导向,其重点在于采取低碳的生产生活方式推动能源、建筑、交通、工业等高碳排放领域的减污降碳,以实现减少碳排放总量和碳排放强度的城市碳排放“双控”目标<sup>[12]</sup>;同步强调通过产业转型升级、引导绿色消费来创造新的经济增长点,以实现经济稳步增长<sup>[13]</sup>。因此,城市绿色低碳发展质量的基本内涵应是在推动各领域快速绿色低碳转型的同时保障资源环境系统、经济发展系统、社会民生系统的协同发展<sup>[14]</sup>,从而达成减污降碳、经济增长、民生改善等城市绿色低碳发展目标的综合水平。

## 1.2 城市绿色低碳发展质量的评估

目前有关城市绿色低碳发展质量评估的研究尚处于探索阶段,学界分别从城市碳减排重点领域、低碳城市空间格局、城市空间尺度异质性等视角出发对评估体系的开发及应用进行了探讨。城市碳减排重点领域视角下,学者们多立足生态城市理论<sup>[6]</sup>、可持续发展理论<sup>[15-16]</sup>、健康城市理论<sup>[17]</sup>等理论,将城市视为一个复杂生态系统,从能源消费、土地利用、人居环境、经济发展等维度开发囊括生产、生活、生态要素的评估体系。低碳城市空间格局视角下,学者们在国土空间规划对城市碳减排具有引领性作用的共识上,基于城市规模、城市形态、功能布局、蓝绿空间等城市空间格局要素开发评估体系<sup>[18]</sup>,以引导城市空间格局的优化和低碳转型。城市空间尺度异质性视角下,学者们关注到不同尺度的城市空间具有显著的异质性特征,进而立足城市、社区等不同城市尺度空间发展需求的差异性构建多尺度评估体系<sup>[15]</sup>。尽管城市绿色低碳发展质量评估体系尚未搭建,但现有研究在两方面形成的共识为该体系的构建提供了方向与参考:一是城市是由自然、社会、人文等多重要素耦合而成的复杂生态系统<sup>[19]</sup>;二是不同尺度的城市空间与城市发展质量具有差异化的交互机制<sup>[15]</sup>。因此,绿色低碳发展质量评估须立足城市复杂生态系统的整体性与完整性,遵循不同尺度空间与城市绿色低碳发展目标的交互规律,构建城市系统要素与城市空间尺度相适配的多目标协同、多尺度交互的评估体系。

## 2 城市绿色低碳发展质量评估的理论框架

解析城市多尺度空间与城市系统复杂要素的关联性,进而厘清不同尺度城市空间与城市绿色低碳发展目标之间的交互规律是科学开展城市绿色低碳发展质量评估的理论与现实基础。空间尺度上,本文借鉴 Barton 等的人居环境健康圈层模型<sup>[20]</sup>,从城市生成机理出发,将城市空间划分为“单体建筑-基本单元-基础设施-城市环境”四个尺度。发展目标上,以 SDGs 为参照<sup>[21]</sup>,以城市绿色低碳发展质量的内涵为准则,聚焦资源环境、经济发展和社会民生三大系统要素,解构资源节约、能源永续、经济繁荣、治理有效、生态宜居、绿色生活六个关键领域的城市绿色低碳发展目标。基于空间尺度和系统要素的关联性,本文建立多尺度空间和多目标交互的城市绿色低碳发展质量评估理论框架,明确各空间尺度下的具体发展目标,为城市不同空间尺度绿色低碳发展提供清晰指引(图 1)。

首先,单体建筑是城市的细胞,打造零碳建筑是实现城市绿色低碳发展的基础<sup>[22]</sup>。该尺度旨在推行建筑设计阶段的人本化与可再生能源化、建造阶段的工业化、运维阶段的电气化与数字化,引导建筑全生命周期的降碳减排,并在推动建筑用能结构优化的同时改善居住品质。因此,该空间尺度的发展目标包括低碳指引、节能节材、智能建造、建筑产能、废料处理、安全健康六个方面。其次,基本单元是城市居民生产、生活的基本场域<sup>[23]</sup>,构建零碳基本单元是实现城市绿色低碳发展的核心。该尺度以实现绿色低碳的社区生活为重点,不仅强调社区外部生活服务圈的便利性,还注重社区内部生态环境、经济环境、资源环境、运营模式和居民消费方式的绿色低碳转型。因此,主要从生活便利、生态碳汇、单元经济、智慧运营、资源循环、行为低碳六个方面对基本单元的绿色低碳发展质量进行评估。再者,基础设施是城市的基础骨架和动脉,基础设施的低碳化、绿色化和数智化发展是实现城市绿色低碳发展的关键<sup>[24]</sup>。基础设施的发展目标包括优化能源结构、推进节水型城市建设、发展低碳交通、完善城市垃圾处理系统和城市绿地建设、推动数字智能化建设、保障城市安全。其

评价维度涵盖清洁能源、节约用水、低碳交通、智慧通信、绿色环保、以及防灾减灾六个维度。最后,城市环境作为综合控制城市碳排放的高级空间尺度,其绿色低碳转型是实现城市绿色低碳发展的保障<sup>[25]</sup>。该尺度旨在通过紧凑的城市布局、资源的高效利用、绿色金融的推广、低碳技术的研发、低碳经济的提升和对自然人文的保护等宏观层面的碳排放控制手段,实现城市环境尺度的绿色低碳发展。因此,该空间尺度的发展目标包括集约紧凑、资源有效、绿色金融、技术创新、低碳经济、自然人文六个方面。

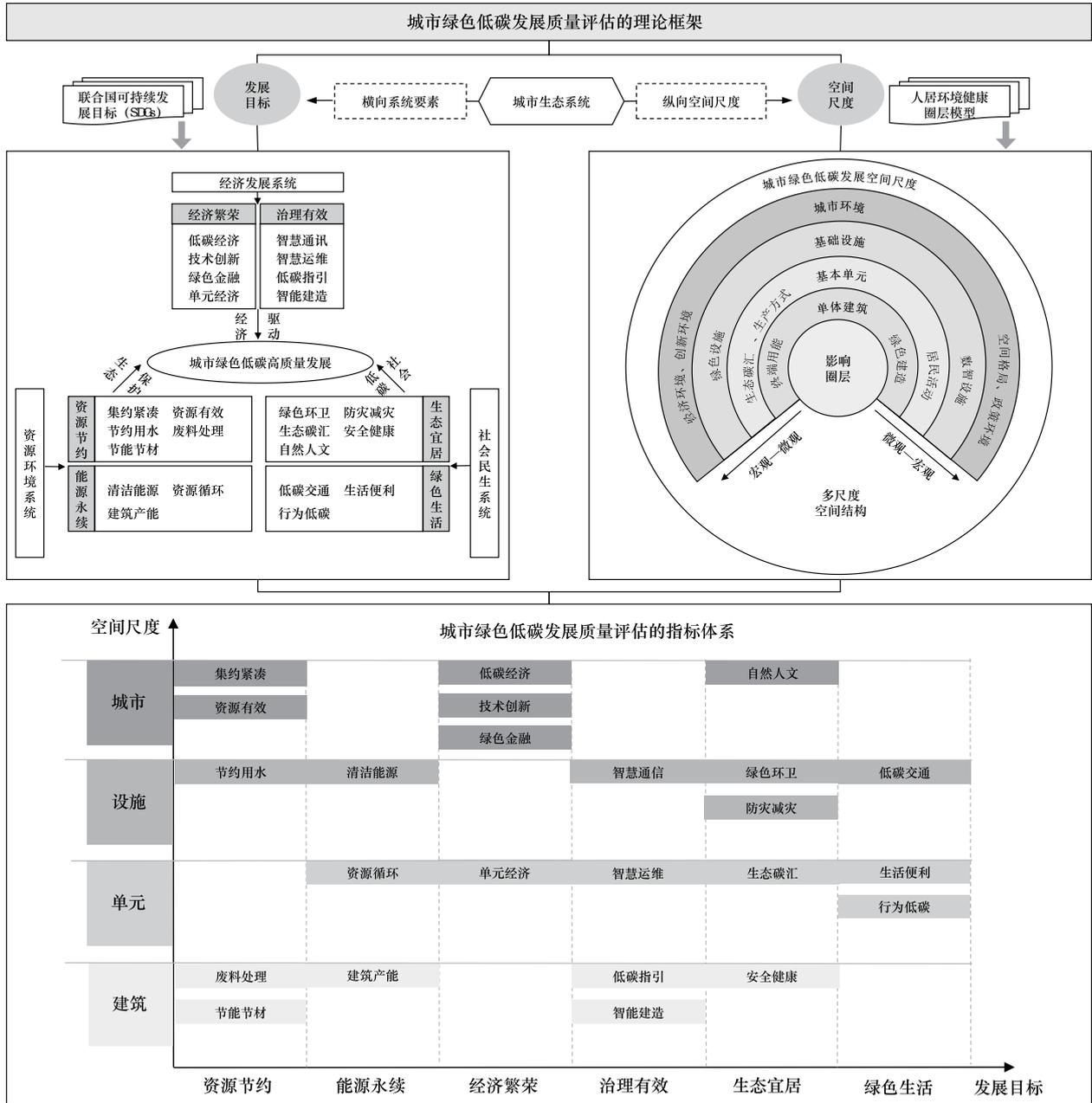


图1 城市绿色低碳发展质量评估理论框架

Fig.1 Theoretical framework of urban green low-carbon development quality assessment

### 3 城市绿色低碳发展质量评估的指标体系

#### 3.1 体系构建与指标内涵

基于城市绿色低碳发展质量评估理论框架,本文以国内外政府部门及研究机构发布的城市绿色低碳发展

质量评估相关指标体系为重要参考,如《联合国可持续发展指数》《国土空间规划城市体检评估规程(TD/T 1063—2021)》《城市体检基础指标体系(试行)》《绿色发展指标体系》《生态文明建设考核目标体系》《绿色建筑评价标准(GB/T50378—2019)》《全国健康城市评价指标体系(2018版)》《城市发展质量评价指标(GB/T 40482—2021)》《城市可持续发展—城市服务和生活品质的指标(GB/T 36749—2018)》《英国建筑研究院环境评估方法》《美国能源与环境设计先导评价标准》等,综合文献研究得到涵盖单体建筑、基本单元、基础设施、城市环境四个维度,包含 66 个指标的城市绿色低碳发展质量评估指标库(表 1—表 4)。

表 1 城市绿色低碳质量发展评估指标—单体建筑维度

Table 1 Urban green low-carbon development quality assessment indicators-Building dimension

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unite	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
单体建筑 Building	低碳指引	1	新建居住建筑节能率	%	当年城市新建居住建筑节能率和公共建筑节能率(判断该城市是否达到《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中严寒和寒冷地区城市居住建筑平均节能率应为 75%;除严寒和寒冷地区外,其他气候区居住建筑平均节能率应为 65%;公共建筑平均节能率应为 72%的要求)。	0.93	0.98
		2	新建公共建筑节能率	%	市辖区内新建建筑是否全面执行绿色建筑标准。	0.98	0.98
		3	新建建筑执行绿色建筑标准比例	%	市辖区内二星、三星级绿色建筑总量与绿色建筑总量的比值。	0.78	0.98
		4	高星级绿色建筑占新建建筑比例	%	市辖区内超低、近零能耗建筑总面积。	0.78	0.83
	节能节材	5	超低、近零能耗建筑总面积	m <sup>2</sup>	市辖区内既有居住建筑节能改造总面积与非节能居住建筑面积的比值。	0.75	0.75
		6	既有居住建筑节能改造占非节能居住建筑面积比例	%	市辖区内既有公共建筑节能改造总面积与公共建筑总面积的比值。	0.75	0.78
		7	既有公共建筑节能改造占公共建筑总面积比例	%	市辖区内建筑电力消费总值与建筑能源消耗总量的比值。	0.83	0.80
		8	建筑能耗中电力消费占比	%	市辖区内新建建筑精装修住宅面积与新建建筑总面积的比值。	0.78	0.80
		9	新建精装修住宅建筑面积占比	%	市辖区内新建建筑绿色建材应用面积与新建建筑总面积的比值。	0.70	0.83
		10	新建建筑绿色建材应用比例	%	市辖区内装配式建筑应用总面积与新建建筑总面积的比值。	0.85	0.83
		11	装配式建筑面积占新建建筑面积比例	%	当年市辖区内建筑太阳能光伏发电系统的总装机容量与上一年的差值。	0.80	0.83
	建筑产能	12	新增建筑太阳能光伏装机容量	kW	当年市辖区内建筑中使用可再生能源所形成的常规能源替代量或节约量在建筑总能源消费中所占的比率。	0.75	0.83
		13	建筑可再生能源替代率	%	市辖区内建筑垃圾综合利用量与建筑垃圾产生量的比值。	0.83	0.77
	废料处理	14	建筑垃圾综合利用率	%	市辖区内危旧房总面积与总住宅建筑面积的比值。	0.83	0.80
	安全健康	15	危旧房占总住宅建筑面积比例	%		0.60	0.80

表 2 城市绿色低碳质量发展评估指标—基本单元维度

Table 2 Urban green low-carbon development quality assessment indicators-Basic unit dimension

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unite	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
基本单元 Basic unit	生活便利	16	15min 公共服务圈覆盖率	%	社区卫生、教育、医疗、养老等服务设施可覆盖的社区个数占社区总个数的比值。	0.93	0.83
	生态碳汇	17	公园绿地服务半径占居住区面积覆盖率	%	公园绿地服务半径覆盖的居住用地面积与居住用地总面积的比值。	0.83	0.85

续表

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unite	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
单元经济		18	社区绿化率	%	市辖区内社区绿化垂直投影总面积与社区总面积的比值。	0.90	0.90
		19	产业用地与居住用地占比达标率	%	市辖区内社区产业用地与居住用地占比达到 1/3—1/4 的社区数量占总社区数量的比值。	0.73	0.80
		20	通勤距离小于 5km 的人口比例	%	市辖区内常住人口中通勤距离小于 5km 的人口数量占全部通勤人口数量的百分比。	0.80	0.78
智慧运营		21	碳排放信息管理系统		城市社区中是否有采用碳排放信息管理系统等相关系统。	0.80	0.73
		22	社区生活信息智能化服务平台		城市社区中是否有采用社区生活信息智能化服务平台等相关平台。	0.73	0.65
资源循环		23	社区低碳能源设施覆盖率	%	市辖区建成区内配备充电站(桩)、换电站、分布式能源站等低碳能源设施的社区数量占社区总数的百分比。	0.78	0.68
		24	居民小区生活垃圾分类覆盖率	%	市辖区内实行生活垃圾分类的社区占总社区数量的比值。	0.85	0.83
		25	屋顶太阳能光电、光热利用覆盖率	%	市辖区内利用屋顶太阳能光电、光热利用的社区占总社区数量的比值。	0.80	0.73
		26	雨污分流社区占比	%	市辖区内雨污分流社区占总社区数量的比值。	0.73	0.80
行为低碳		27	居民人均生活用水量	L 人 <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	市辖区内居民生活总用水量与常住人口的比值。	0.73	0.90
		28	居民人均生活垃圾产生量	kg 人 <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	市辖区内居民生活垃圾总量与常住人口的比值。	0.75	0.83
		29	居民人均生活用电量	kW h 人 <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	市辖区内居民生活总用电量与常住人口的比值。	0.75	0.85
		30	自行车租赁站点覆盖率	%	市辖区内配备自行车租赁站点的社区与总社区数量的比值。	0.73	0.88
		31	新能源汽车占比	%	城市居民新能源汽车总量与总汽车量的比值。	0.75	0.85

表 3 城市绿色低碳质量发展评估指标-基础设施维度

Table 3 Urban green low-carbon development quality assessment indicators-Infrastructure dimension

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	单位 Unite	指标 Indicators	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
基础设施 Infrastructure	清洁能源	32		分布式清洁能源设施覆盖面积	分布式发电及储能设施的覆盖面积, 既包括独立占地面积, 也包括位于其他建筑屋顶等非独立占地面积。	0.75	0.68
		33		绿电占城市供电比例	城市在生产电力的过程中, 二氧化碳排放量为零的绿色电力与总供电量的比值。	0.90	0.83
		34		可再生能源利用比例	可再生能源设备转化为可用能源总量与可再生能源设备输入能源的比值。	0.85	0.83
	节约用水	35		城市供水管网漏损率	市辖区内公共供水总量与城市公共供水注册用户用水量之差与城市公共供水总量的比值, 减去修正值。	0.90	0.83
		36		再生水利用率	城市污水再生利用量占污水处理厂污水处理总量的百分比。	0.85	0.83
		37		城市建成区平均可渗透面积占比	市辖区建成区内具有渗透能力的地表面积占建成区面积的百分比。	0.78	0.73

续表

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	单位 Unite	指标 Indicators	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
低碳交通	低碳交通	38	公交站点 300m 半径服务覆盖率	%	城市公共汽车站 300m 半径内服务覆盖面积的总和占城市建成区面积的百分比。	0.90	0.83
		39	轨道交通站点 800m 半径服务覆盖率	%	城市轨道站点 800m 半径内所覆盖的常住人口与就业岗位之和与占市辖区内现状总常住人口与总就业岗位之和的比值。	0.85	0.80
		40	公交道路网密度	km/km <sup>2</sup>	市辖区建成区内公交线路的道路中心线总长度与有公共交通服务的城市用地面积的比值。	0.85	0.85
		41	专用自行车道密度	km/km <sup>2</sup>	市辖区建成区内具有物理隔离的专用自行车道长度与建成区面积的比值。	0.80	0.80
		42	人均绿道长度	m	市辖区内绿道长度与常住人口的比值。	0.78	0.83
		43	绿色交通出行比例	%	市辖区内采用步行、公共交通、轨道交通等出行方式的出行量占所有方式的出行总量的比值。	0.90	0.75
智慧通讯	智慧通讯	44	城市信息模型平台建设三维数据覆盖率	%	市辖区建成区内 CIM 基础平台汇聚的三维数据投影面积占建成区面积的比值。	0.68	0.75
		45	市政管网管线智能化监测管理率	%	市辖区内城市供水、排水、燃气、供热等管线中,可由物联网等技术进行智能化监测管理的管线长度占市政管网管线总长度的百分比。	0.78	0.73
绿色环保	绿色环保	46	人均公园绿地面积	m <sup>2</sup>	市辖内公园绿地总面积与常住人口的比值。	0.85	0.90
		47	城市生活垃圾资源化利用率	%	市辖区内生活垃圾资源化利用量占生活垃圾产生总量的比值。	0.90	0.83
		48	大宗固废综合利用率	%	市辖区内大宗固体废物综合利用率与大宗固体废物产生量和综合利用往年贮存量的和的比值。	0.85	0.85
防灾减灾	防灾减灾	49	人均应急避难场所面积	m <sup>2</sup>	市辖区建成区内避难场所有效避难面积与常住人口的比值。	0.83	0.88
		50	城市年自然灾害和安全事故死亡率	人/万人	市辖区内因自然灾害和安全事故等死亡人数与常住人口的比值。	0.83	0.85

表 4 城市绿色低碳质量发展评估指标—城市环境维度

Table 4 Urban green low-carbon development quality assessment indicators-Urban environment dimension

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unite	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
城市环境 Urban environment	集约紧凑	51	人均建设用地面积	m <sup>2</sup>	市辖区范围内的建设用地面积与城镇常住人口规模的比值。	0.80	0.95
		52	人均地下空间面积	m <sup>2</sup>	市辖区范围内的地下空间面积与城镇常住人口规模的比值。	0.78	0.88
	资源有效	53	单位 GDP 能耗	t/W	城市能源消费总量与 GDP 的比值。	0.95	0.95
		54	单位 GDP 水耗	m <sup>3</sup> /W	城市用水总量与 GDP 的比值。	0.95	0.95
		55	单位 GDP 地耗	m <sup>2</sup> /W	城市建设用地面积与 GDP 的比值。	0.88	0.93
	绿色金融	绿色金融	56	人均碳排放量	t	市辖区范围内的碳排放总量与城镇常住人口规模的比值。	0.93
57			碳排放权交易市场规模	亿元	城市碳市场碳排放配额累计成交额。	0.75	0.80

续表

维度 Dimension	发展目标 Goal	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unit	指标说明 Indicator description	合理性 Rationality	可操作性 Feasibility
		58	碳普惠减排量	t	城市内企业与公众等通过碳普惠平台交易所产生的减碳排量。	0.78	0.70
	技术创新	59	绿色技术专利数量	个	通过国家知识产权局认证的绿色技术专利数量。	0.65	0.78
	低碳经济	60	碳排放脱钩指数		市辖区能源消费碳足迹指数与 GDP 增长指数之间的比值。	0.83	0.78
		61	人均 GDP	万元	城市在一定时期内的总经济产值与城市常住人口的比值。	0.70	0.90
		62	经济增长波动率	%	城市当年生产总值增长率与上年生产总值增长率的差值与上年生产总值增长率的比值。	0.70	0.83
	自然人文	63	蓝绿空间占比	%	市辖区内林地、草地、耕地、湖泊、河流等能产生生态效益的土地面积占城市总面积的比值。	0.88	0.83
		64	新增生态修复面积	m <sup>2</sup>	市辖区内经过山水林田湖草沙一体化保护与治理等国土空间生态修复的累计面积。	0.80	0.80
		65	自然和文化遗产	处	由国家和各级政府认定的依法实施保护的自然和文化遗产数量。	0.70	0.78
		66	破坏历史文化遗产本体及其与环境事件数量	件	市辖区内存在拆除历史建筑、破坏传统风貌和街道格局等负面事件的个数。	0.80	0.93

### 3.2 指标筛选与指标分类

本文采用专家打分法对指标选取的合理性和可操作性进行评估。为确保可信度,邀请了 8 位政府部门、高校及科研院所的专家进行评分,专业领域覆盖低碳城市建设、低碳空间规划、绿色基础设施、建筑节能、碳排放监管等(表 5)。问卷设计采用李克特五级评分法,1 到 5 分代表合理性和可操作性的程度,得分越高表明该指标越适合被选用。同时为避免专家对某些指标不熟悉的情况,问卷中设置 0 分选项,代表放弃该选项,并在后续指标筛选时剔除专家对该指标的打分意见。基于专家打分结果,计算得到专家一致性信度  $\alpha$  为 0.989,说明专家意见一致性信效度较好,可以参考其评分结果对指标进行筛选<sup>[26]</sup>。

表 5 城市绿色低碳质量发展评估指标调查专家权威度

Table 5 Expert authority of urban green low-carbon development quality assessment indicators

专家序号 Expert No.	工作单位 Work unit	专业领域 Research field	从业年限/a Years of experience
1	高校及科研院所	低碳空间规划	10
2	高校及科研院所	绿色基础设施、碳排放监管	14
3	高校及科研院所	低碳空间规划	8
4	高校及科研院所	低碳城市建设	13
5	高校及科研院所	低碳空间规划	7
6	高校及科研院所	建筑节能	15
7	政府机构	建筑节能	9
8	政府机构	低碳空间规划	5

本文从指标的合理性和可操作性两个维度对初始指标进行优化筛选。根据模糊综合评判方法,确定有效专家评分指标集合为  $X=(x_1, x_2, \dots, x_i)$ ,  $x_i$  为各单项指标;评价集  $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ ,  $v_i$  代表对  $x_i$  的评价等级。指标在合理性和可操作性的重要程度可通过式(1)进行计算。

$$U_i = \sum_{v_i}^5 [f(v_i) \times v_i / 5] \quad (1)$$

式中,  $U_i$ 代表专家对指标合理性或可操作性的综合评分,  $v_i$ 代表第  $i$  个指标的得分,  $f(v_i)$ 代表在 8 位专家中的得分为  $v_i$  频率。

$$f(v_i) = \frac{M(v_i)}{n} \quad (2)$$

式中,  $M(v_i)$ 代表打分为  $v_i$  的专家数量,  $n$  为有效专家评分的个数。

综合运用式(1)与式(2),结合专家打分结果,将合理性和可操作性得分汇总于表 1—表 4。选取专家打分的平均值作为指标类型划分依据<sup>[27]</sup>,合理性得分大于等于 0.80 且可操作性大于等于 0.82 分的指标归属强制性指标,合理性大于等于 0.80 但可操作性小于 0.82 的归属引导性指标,合理性小于 0.80 但可操作性大于等于 0.82 的归属倡导性指标,合理性和可操作性都分别小于 0.80 和 0.82 的归为非关键指标。

基于计算结果,本文剔除 17 个非关键指标,最终得到 49 个城市绿色低碳发展质量核心评估指标,如表 6 所示。强制性指标是城市绿色低碳发展质量评估的关键指标,其评估结果是制定、调整城市绿色低碳发展策略的核心依据。引导性指标具备较高的合理性,但鉴于目前数据获取的阻碍或是政策倡导力度的不足,导致其实际数据获取较为困难。随着大数据采集、数据挖掘算法、机器深度学习等数据采集分析技术的改进和绿色低碳发展战略的深入实施,可逐步重视这类指标的应用。倡导性指标具备较好的可操作性,一定程度上能反映城市绿色低碳发展质量的实际水平,但其对部分城市的绿色低碳发展策略指导效果有限。因此,不同城市可根据实际工作需要,因地制宜的考虑是否将这类指标纳入城市绿色低碳发展质量评估指标体系。非核心指标中虽存在“碳排放权交易市场规模”“分布式清洁能源设施覆盖面积”等与城市绿色低碳发展质量相关性高的指标,但受当前技术、经济条件的限制,该类指标应用场景较为有限,故仍将其剔除。在此基础上,本文进一步明确了 49 个指标在不受其他条件干扰前提下对城市绿色低碳发展质量的引导方向(表 6),其中,指标增长有利于城市绿色低碳发展目标达成的归为正向指标,如“新建居住建筑节能率”“可再生能源利用比例”等;指标增长不利于城市绿色低碳发展目标达成的归为负向指标,如“单位 GDP 能耗”“城市年自然灾害和安全事故死亡率”等;指标增长对城市绿色低碳发展目标达成效果显现正 U 型或倒 U 型的,以国家十四五发展规划、市级国土空间规划等规划中该指标的规划目标值作为指标方向的判定依据,即指标现状值小于规划目标值的归为正向指标,反之则归为负向指标,如“人均建设用地面积”等<sup>[28]</sup>。

### 3.3 指标权重与评价方法

为保证指标赋权的客观性,本文采用熵权法来确定指标权重和城市绿色低碳发展质量的综合得分。首先,采用极差标准化方法进行数据标准化处理,将归一化后的数据记为  $x_{ij}$ ,再计算第  $j$  项指标的熵值  $E_j$  和信息熵冗余度  $d_j$ <sup>[29]</sup>:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$d_j = 1 - E_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中,  $p_{ij}$ 代表矩阵归一化的概率矩阵,为第  $j$  项指标下第  $i$  各样本值占该指标的比重。  $k = 1/\ln(n) > 0$ , 满足  $E_j \geq 0$ 。

最后,计算出各项指标的权重  $w_j$  和城市绿色低碳发展质量的综合得分  $Y_i$ <sup>[30]</sup>。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

表 6 城市绿色低碳发展质量核心评估指标

Table 6 Key performance indicators of urban green low-carbon development quality assessment

指标类型 Indicator type	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unit	指标方向 Indicator direction	指标类型 Indicator type	编码 Code	指标 Indicators	单位 Unit	指标方向 Indicator direction
强制性指标 Mandatory	1	新建居住建筑节能率	%	正向	引导性指标 Orientative	7	既有公共建筑节能改造占公共建筑总面积比例	%	正向
indicators	2	新建公共建筑节能率	%	正向	indicators	13	建筑可再生能源替代率	%	正向
	10	新建建筑绿色建材应用比例	%	正向		14	建筑垃圾综合利用率	%	正向
	11	装配式建筑面积占新建建筑面积比例	%	正向		20	通勤距离小于 5km 的人口比例	%	正向
	16	15 分钟公共服务圈覆盖率	%	正向		21	碳排放信息管理系统		正向
	17	公园绿地服务半径占居住区面积覆盖率	%	正向		25	屋顶太阳能光电、光热利用覆盖率	%	正向
	18	社区绿化率	%	正向		39	轨道交通站点 800m 半径服务覆盖率	%	正向
	24	居民小区生活垃圾分类覆盖率	%	正向		41	专用自行车道密度	km/km <sup>2</sup>	正向
	33	绿电占城市供电比例	%	正向		43	绿色交通出行比例	%	正向
	34	可再生能源利用比例	%	正向		60	碳排放脱钩指数	负向	
	35	城市供水管网漏损率	%	负向		64	新增生态修复面积	m <sup>2</sup>	正向
	36	再生水利用率	%	正向					
	38	公交站点 300 米半径服务覆盖率	%	正向	倡导性指标 Advocated	3	新建建筑执行绿色建筑标准比例		正向
	40	公交道路网密度	km/km <sup>2</sup>	正向	indicators	4	高星级绿色建筑占新建建筑比例	%	正向
	46	人均公园绿地面积	m <sup>2</sup>	正向		12	新增建筑太阳能光伏装机容量	kW	正向
	47	城市生活垃圾资源化利用率	%	正向		27	居民人均生活用水量	L 人 <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	负向
	48	大宗固废综合利用率	%	正向		28	居民人均生活垃圾产生量	kg 人 <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	负向
	49	人均应急避难场所面积	m <sup>2</sup>	正向		29	居民人均生活用电量	kW h 人 <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	负向
	50	城市年自然灾害和安全事故死亡率	人/万人	负向		30	自行车租赁站点覆盖率	%	正向
	51	人均建设用地面积	m <sup>2</sup>	正向		31	新能源汽车占比	%	正向
	53	单位 GDP 能耗	t/W	负向		42	人均绿道长度	m	正向
	54	单位 GDP 水耗	m <sup>3</sup> /W	负向		52	人均地下空间面积	m <sup>2</sup>	正向
	55	单位 GDP 地耗	m <sup>2</sup> /W	负向		61	人均 GDP	万元	正向
	56	人均碳排放量	t	负向		62	经济增长波动率	%	负向
	63	蓝绿空间占比	%	正向					
	66	破坏历史文化遗存本体及其与环境事件数量	件	负向					

$$Y_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

## 4 实证研究

### 4.1 案例选择

杭州是城市绿色低碳发展理念的先行者<sup>[31]</sup>。早在 2008 年,杭州就在全国率先提出打造“低碳城市”的目

标并于 2010 年成为全国首批低碳试点城市之一。国家“双碳”战略实施后,杭州率先在全国实施了减污降碳协同创新试点,将减污降碳与城市社会经济发展深度融合,在推进低碳经济、低碳交通、低碳建筑、低碳生活等方面取得了显著成效。2023 年,杭州成功入选首批国家碳达峰试点城市。因此,选择杭州作为案例开展城市绿色低碳发展质量评估体系的实证研究,一方面可有效检验评估体系的科学性和实用性,另一方面能够判断杭州在城市绿色低碳发展领域创新实践的真实效果,为全国其他城市的绿色低碳发展提供参考。

#### 4.2 数据来源及处理

综合考虑指标的代表性和数据的可获性,本文选用强制性指标对杭州市绿色低碳发展质量开展实证评估,评估时间跨度为 2008—2023 年。研究数据来源包括《杭州市统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及高德地图 POI 信息点数据库、中国碳核算数据库、百度搜索引擎数据等统计数据和城市大数据。指标数据处理包括:指标 1、2、10 等 21 个指标数据主要通过《杭州市统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和中国碳核算数据库等统计数据计算得出;指标 16、17、38 等 4 个指标数据使用 ArcGis 软件处理高德地图 POI 数据(公交站点、公园、学校、医院等)得到;指标 66 的数据采用 Python 软件从百度搜索引擎中爬取相关字段得到。在计算 2008—2023 年杭州城市绿色低碳发展质量综合得分和各维度得分的基础上,采用 Matlab 软件划分发展阶段并分析各阶段的生长趋势。

#### 4.3 结果分析

通过式(6)计算得到强制性指标的权重如表 7 所示。其中,12 个指标的权重超过了平均权重值 0.038,表示其重要性程度较高。

表 7 强制性指标权重值

Table 7 Weight of mandatory indicators

编码 Code	强制性指标 Mandatory indicators	单位 Unite	权重 Weight	编码 Code	强制性指标 Mandatory indicators	单位 Unite	权重 Weight
1	新建居住建筑节能率	%	0.068	40	公交道路网密度	km/km <sup>2</sup>	0.026
2	新建公共建筑节能率	%	0.083	46	人均公园绿地面积	m <sup>2</sup>	0.028
10	新建建筑绿色建材应用比例	%	0.040	47	城市生活垃圾资源化利用率	%	0.009
11	装配式建筑面积占新建建筑面积比例	%	0.051	48	大宗固废综合利用率	%	0.014
16	15min 公共服务圈覆盖率	%	0.072	49	人均应急避难场所面积	m <sup>2</sup>	0.031
17	公园绿地服务半径占居住区面积覆盖率	%	0.039	50	城市年自然灾害和安全事故死亡率	人/万人	0.033
18	社区绿化率	%	0.019	51	人均建设用地面积	m <sup>2</sup>	0.051
24	居民小区生活垃圾分类覆盖率	%	0.021	53	单位 GDP 能耗	t/W	0.023
33	绿电占城市供电比例	%	0.042	54	单位 GDP 水耗	m <sup>3</sup> /W	0.025
34	可再生能源利用比例	%	0.040	55	单位 GDP 地耗	m <sup>2</sup> /W	0.025
35	城市供水管网漏损率	%	0.032	56	人均碳排放量	t	0.024
36	再生水利用率	%	0.041	63	蓝绿空间占比	%	0.106
38	公交站点 300m 半径服务覆盖率	%	0.045	66	破坏历史文化遗存本体及其与环境事件数量	件	0.013

根据式(7)计算得到 2008—2023 年杭州城市绿色低碳发展质量评估综合得分,其呈现逐年增长趋势(图 2)。基于指标数据分析结果,以 2008 年杭州市率先提出低碳城市建设、2010 年杭州市成为全国低碳城市试点、2016 年杭州成功创建国家级生态市、2020 年我国提出“双碳”战略目标四个重点时事为节点,将杭州城市绿色低碳发展划分为初期创建(2008—2010 年)、试点探索(2010—2016 年)、转型深化(2016—2020 年)、高质量发展(2020—2023 年)四个阶段(图 3)。

初期创建阶段(2008—2010 年),杭州城市绿色低碳发展质量综合水平的提高主要得益于基础设施和城市环境维度的快速增长。其中,基础设施维度受绿电占城市供电比例、可再生能源利用比例、再生水利用率、

生活垃圾资源利用率等指标的共同影响,城市环境维度主要受作用于蓝绿空间占比指标的变化。这一阶段,杭州市积极实施“阳光屋顶示范工程”,通过推动光伏发电在公共建筑中大规模应用,大幅提高了绿色电力在城市供电中的占比和可再生能源利用率。同时,杭州先后组织实施了生活污水和生活垃圾处理等连片整治示范工程,再生水利用率和生活垃圾资源利用率得以明显提升。此外,2008年杭州市制定了《杭州市生态环境功能区规划》,重点采取了扩充城市绿化、强化生态环境保护等措施提高了城市蓝绿空间占比。然而,该阶段的绿色建筑和低碳社区建设尚处于起步阶段,故单体建筑和基本单元维度的增速相对缓慢。



图2 2008—2023年杭州市城市绿色低碳发展质量评估总得分(强制性指标)

Fig.2 Total score for urban green low-carbon development quality assessment in Hangzhou (2008—2023) (Mandatory indicators)

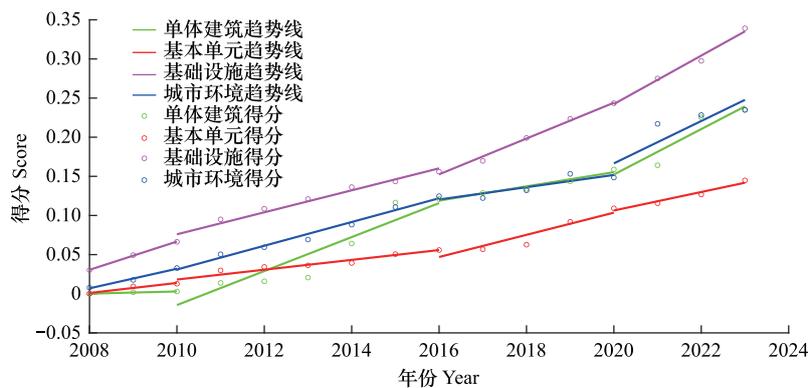


图3 2008—2023年杭州市城市绿色低碳发展质量评估各维度得分(强制性指标)

Fig.3 Scores of the dimensions for urban green low-carbon development quality assessment in Hangzhou (2008—2023) (Mandatory indicators)

试点探索阶段(2010—2016年),杭州城市绿色低碳发展质量综合水平上升趋势相较第一阶段有所提升。其中,单体建筑维度增长趋势最为显著,这得益于新建居住建筑和公共建筑的节能率指标得分的大幅提升。该阶段,《杭州市2013年节能工作实施方案》中提出了积极推进居住建筑节能65%设计标准的要求,同时国家出台《公共建筑节能设计标准(GB 50189—2015)》,将新建公共建筑节能率要求从50%提升到了65%。此外,基本单元和城市环境维度增长趋势基本维持上一阶段水平。出台的《杭州市“十二五”低碳城市发展规划》提出了将立体绿化与低碳社区建设相结合、提高城市自然生态系统固碳增汇能力等举措,促进了社区绿化率等基本单元指标得分的增长和人均碳排放量等城市环境指标得分的下降。然而,相比上一阶段,基础设施维度指标得分增速有所放缓,但仍呈现稳步上升的态势。杭州在这一阶段开始注重基础设施建设的系统性、长远性发展,在2010年提出构建“五位一体”绿色低碳交通运输体系的要求,并于2015年出台了《关于推进结构性节能减排工作实施意见的通知》,开始探索更加系统的交通基础设施结构和能源基础设施结构。

转型深化阶段(2016—2020年),杭州城市绿色低碳发展质量综合水平稳步上升,但增长趋势相较第二阶段有所放缓。究其原因,单体建筑和城市环境两个维度指标得分的增速慢于上一阶段。其中,单体建筑维度得分增速放缓归因于新建居住建筑和公共建筑的节能率维持上一阶段水平,导致该两项指标的得分没有增长。而城市环境维度的指标得分增长缓慢主要跟人均碳排放量、单位GDP能耗等负向指标得分的增长有关。由于G20峰会产生的溢出效应,杭州市常住人口数量急剧增长,带来了大规模高能耗、高排放的城市建设活动,如2016年前三季度杭州市的建筑拆除量就达到了2045万 $m^2$ ,显著影响了人均碳排放等指标。然而,这

一阶段基本单元和基础设施维度的指标得分急剧增长。一方面是浙江省于 2019 年开始启动未来社区工作,推动了 15 分钟生活圈覆盖率、社区绿化率等基本单元维度指标得分的快速上升。另一方面,杭州抓住“前峰会,后亚运”的窗口期,大规模推进基础设施建设,带来了公交道路网密度、公交站点服务覆盖率等基础设施维度指标得分的快速增长。

高质量发展阶段(2020—2023 年),杭州城市绿色低碳发展质量综合水平提升幅度相较前三个阶段最为突出。单体建筑、基础设施和城市环境三个维度指标得分都呈现出四个发展阶段中最强劲的增长态势。单体建筑维度,在《杭州市人民政府办公厅关于促进我市建筑业高质量发展的实施意见》等政策的指引下,杭州采取了提升建筑能效、节能改造、推广绿色建材应用等减碳措施,并持续推进装配化建筑从“有”向“优”升级发展,从而显著提升了新建建筑绿色建材应用比例、装配式建筑面积占新建建筑面积比例等指标的得分。基础设施维度,杭州市发布了《杭州市人民政府办公厅关于加快推进绿色能源产业高质量发展的实施意见》,进一步强化了绿色能源产业的发展,为可再生能源利用比例等基础设施维度指标得分的增长注入了新动力。城市环境维度,杭州实施的能耗“双控”制度有效降低了人均碳排放量和单位 GDP 能耗,大幅促进了单位 GDP 能耗等正向指标得分的提升和人均碳排放量等负向指标得分的下降。与此同时,基本单元维度的指标得分增速有所放缓。虽然《杭州市绿地系统专项规划(2021—2035 年)》提出要提高社区绿化率和增大公园绿地服务半径以实现居民“300 米见绿、500 米见园”的需求,但由于规划落地进程较为缓慢,导致该维度指标得分在该阶段未能大幅提升。

## 5 结论与讨论

(1) 本文开发了一套“单体建筑-基本单元-基础设施-城市环境”多尺度空间与“经济-环境-社会”多要素系统交互的城市绿色低碳发展质量评估指标体系。该指标体系虽继承了 SDGs 在城市层面的评估原则和核心目标,但与 SDGs 在应用尺度和适用场景上有明显的差异。SDGs 适用于全球范围内的可持续发展问题,而本文所构建的指标体系聚焦于城市层面的绿色低碳发展目标,在本土化经验探索基础上开发了城市绿色低碳发展质量评估指标库,并创造性地提出指标体系在城市不同空间尺度的具体应用。此外,本文基于指标数据获取难度和指标应用效果的综合评判,将核心指标划分为强制性、引导性和倡导性三类,当前城市绿色低碳发展质量水平评估应以强制性指标为主。

(2) 杭州市的实证研究结果表明杭州各阶段的城市绿色低碳发展质量综合水平增长趋势与实际情况相符,验证了强制性指标的合理性和科学性。通过结果分析可知,针对单体建筑、基本单元、基础设施和城市环境等单一维度的政策支持均会对不同阶段城市绿色低碳发展质量综合水平产生影响。因此,为持续推动城市绿色低碳高质量发展,应综合考虑四个维度的应用措施。其中,单体建筑维度综合水平提升的策略核心是提高建筑能源效率以减少建筑碳排放,如推广绿色建材和装配式建筑技术应用、提升居住建筑和公共建筑节能标准;基本单元维度需以优化居住区公共服务供给水平来改善城市居民生活环境质量作为着力点,如提高 15 分钟生活圈覆盖率、新增公园绿地优先向公园绿地服务半径覆盖率低和人口密度高的居住区布局等;基础设施维度应聚焦于增量、提质并举,通过指引绿色能源技术应用、多层次高密度的公交道路网络构建、生活垃圾全域一体治理模式开发,推动基础设施低碳化、绿色化发展;城市环境维度需综合考虑土地利用、能源消耗与人口增长的关系,通过严格控制新增建设用地规模、建立健全节约能源资源管理制度、加强碳排放环境监测与管理等举措提高城市整体环境质量和绿色低碳发展水平。

(3) 科学评估是有效实施的前提与基础,未来针对城市绿色低碳发展质量评估的理论研究和实践探索可从以下三方面进行拓展。一是丰富评估指标体系的内涵,可考虑将城市韧性、城市气候适应性等内涵纳入评价指标体系,将城市绿色低碳发展质量与安全保障、气候改善等目标紧密结合。二是提高评估指标体系的准确性,基于不同的应用场景和城市类型设定差异化的指标权重和评价标准,为开展针对性的决策制定与政策优化奠定基础。三是拓展评估指标体系的适用性,以全国 293 个地级市为研究对象开展绿色低碳质量的实证

测度,揭示我国各城市绿色低碳质量综合水平及差异,为政府机构制定政策方针和实践策略提供参考。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 邓世成,吴玉鸣. 低碳城市试点政策对中国资源型城市绿色转型发展的影响. 中国人口·资源与环境,2024,34(6): 65-79.
- [ 2 ] 董照樱子,孙思琪,夏楚瑜,周辰溪,赵晶,张蔚文. “生态修复、城市修补”政策对城市碳排放的影响. 生态学报,2024,44(14): 6142-6153.
- [ 3 ] 胡剑波,张宽元. 试点政策对城市减污降碳的协同增效研究——基于国家生态文明先行示范区的准自然试验. 长江流域资源与环境,2023,32(10): 2196-2211.
- [ 4 ] 王敏,杨儒浦,李丽平. 城市减污降碳协同度评价指标体系构建及应用研究. 气候变化研究进展,2024,20(2): 242-252.
- [ 5 ] 闫明,陈利顶,孙然好. 城市生态品质的内涵及其核心指标体系构建. 应用生态学报,2023,34(6): 1459-1466.
- [ 6 ] 赵立君,李海东,马伟波,王楠,仇宽彪,张龙江,刘臣伟. 生态城市建设观测指标: 基于人与自然和谐共生的考察. 生态与农村环境学报,2022,38(8): 953-962.
- [ 7 ] 王涵,李慧,王涵,王淑兰,张文杰. 我国减污降碳与地区经济发展水平差异研究. 环境工程技术学报,2022,12(5): 1584-1592.
- [ 8 ] 曹孟勤. “生态优先,绿色发展”理念的深层价值. 江苏大学学报(社会科学版),2023,25(1): 11-21.
- [ 9 ] 胡洪曙,武德芪. 基于获得感提升的基本公共服务供给结构优化研究. 财贸经济,2019,40(12): 35-49.
- [ 10 ] 周媛,黎贝,李朋瑶,姚婧,陈明坤,唐密,张莉,陈娟. 基于“生态—气候适应性—游憩”多功能耦合的复合绿地生态网络格局优化. 生态学报,2024,44(13): 5854-5866.
- [ 11 ] 李诚浩,任保平. 中国区域资源环境承载力的空间特征及收敛性分析. 人文地理,2023,38(2): 88-96.
- [ 12 ] 商迪,李华晶,姚娟. 绿色经济、绿色增长和绿色发展: 概念内涵与研究评析. 外国经济与管理,2020,42(12): 134-151.
- [ 13 ] 邓毛颖,韦晓莉,张国俊. 中国新型城镇化与绿色发展协调演进关系研究. 自然资源学报,2024,39(7): 1682-1697.
- [ 14 ] 董会忠,韩沉刚. 复合生态系统下城市高质量发展时空演化及驱动因素研究——以黄河流域7大城市群为例. 人文地理,2021,36(6): 96-107.
- [ 15 ] 王文学,曹可心,林静. 可持续城市多尺度评价框架及指标体系的研究进展与展望. 城市发展研究,2022,29(11): 1-7.
- [ 16 ] Liu Q, Li F J, Peng L, Dong S C, Yang Y, Cheng H. Multiple evaluation framework of sustainability development in resource-based cities: a case study of China. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111338.
- [ 17 ] 鲍海君,李灵. 国土空间规划视角下健康城市规划评价指标体系构建. 生态学报,2024,44(10): 4081-4091.
- [ 18 ] 徐可西,詹冰倩,姜春,鲍海君,苏婕好,何旻宇. 碳排放约束下的城市空间格局优化: 理论框架、指标体系与实践路径. 自然资源学报,2024,39(3): 682-696.
- [ 19 ] 史晨辰,朱小平,王辰星,吴锋. 韧性城市研究综述——基于城市复杂系统视角. 生态学报,2023,43(4): 1726-1737.
- [ 20 ] Barton H, Grant M. *Shaping neighbourhoods: a guide for health, sustainability and vitality*. London: Spon, 2003.
- [ 21 ] Wang C X, Quan Y, Li X Y, Yan Y, Zhang J, Song W T, Lu J C, Wu G. Characterizing and analyzing the sustainability and potential of China's cities over the past three decades. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108635.
- [ 22 ] 张时聪,王珂,杨芯岩,徐伟. 低碳、近零碳、零碳居住建筑碳排放控制指标研究. 建筑科学,2023,39(2): 11-19.
- [ 23 ] 杜昱东,刘恋,王佳斌,白羽萍,回文颖,李嘉劲,张帆. 基于碳排放约束的北京市社区生态效率评价. 生态学报,2023,43(2): 590-602.
- [ 24 ] 周君. 城市基础设施低碳建设的项目集成交付模式与价值评价方法. 城市发展研究,2014,21(6): 6-8.
- [ 25 ] 杨新梅,黄和平,周瑞辉. 中国城市绿色发展水平评价及时空演变. 生态学报,2023,43(4): 1353-1365.
- [ 26 ] 鲍海君,章笑艺,蒋明利,章鸣. 韧性视角下城市国土空间安全体检评估指标体系研究. 中国土地科学,2022,36(5): 21-30.
- [ 27 ] 陈骥,苏为华. 关于群组评价技术若干问题的探讨. 统计研究,2008,25(8): 79-84.
- [ 28 ] 方创琳,李广东,张蕾. 中国城市建设用地的动态变化态势与调控. 自然资源学报,2017,32(3): 363-376.
- [ 29 ] 王林靖,葛星,钟敏. 十大城市群经济韧性的区域差异、动态演进及收敛性分析. 统计与决策,2024,40(10): 112-117.
- [ 30 ] 谢寿琼,刘凯迪. “以人为核心”的新型城镇化水平测度与空间差异研究. 统计与决策,2023,39(21): 75-79.
- [ 31 ] 庄贵阳. 中国低碳城市试点的政策设计逻辑. 中国人口·资源与环境,2020,30(3): 19-28.