

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0302

黄云凤 张项童 崔胜辉,等.2020.绿色城市评价指标体系的构建与权重[J].环境科学学报 40(12):4603-4612

Huang Y F, Zhang X T, Cui S H, et al. 2020. Indicator construction and weight of green city evaluation index system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 40(12): 4603-4612

绿色城市评价指标体系的构建与权重

黄云凤^{1,*} 张项童² 崔胜辉^{3,4} 黄葳^{3,4} 许肃^{3,4} 王岚^{3,4}

1. 集美大学港口与环境工程学院, 厦门 361021

2. 集美大学食品与生物工程学院, 厦门 361021

3. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

4. 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

摘要: 在全球城市化的高速进程中,城市经济的快速增长与资源环境的矛盾日渐加剧,城市的“绿色”转型势在必行。对城市绿色发展程度进行评估,是建设绿色城市的重要内容。绿色城市评价指标体系能够反映绿色城市发展潜力及存在问题,而如何选择评价指标及指标权重的设置是开展绿色城市评价的首要科学问题。本文首先基于绿色城市发展理念与指标构建原则,从绿色生产、绿色生活、环境质量 3 个维度构建了 10 个二级指标、29 个三级指标,并按照属性将基础指标分为正向、负向、特定向指标 3 类;然后,基于主体功能区与城市发展阶段,分别对不同类型城市设立权重系数,通过整合综合权重系数,实现了对不同类型城市的差异化评价,提升了评价结果的公正性。本研究建立的绿色城市评价指标体系充分结合了联合国可持续发展目标,可为绿色城市评价提供科学依据。

关键词: 绿色城市; 指标体系; 评价指标; 指标权重; 可持续发展目标

文章编号: 0253-2468(2020)12-4603-10

中图分类号: X826

文献标识码: A

Indicator construction and weight of green city evaluation index system

HUANG Yunfeng^{1,*}, ZHANG Xiangtong², CUI Shenghui^{3,4}, HUANG Wei^{3,4}, XU Su^{3,4}, WANG Lan^{3,4}

1. College of Port and Environmental Engineering, Jimei University, Xiamen 361021

2. College of Food and Bioengineering, Jimei University, Xiamen 361021

3. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021

4. Key Laboratory of Urban Metabolism of Xiamen City, Xiamen 361021

Abstract: In the rapid process of global urbanization, the contradictions between the urban economic growth and the environmental deterioration is increasingly intensified, and the green transformation of city is imperative. To evaluate the green development of the city is a significant content in the construction of green cities. The green city evaluation index system can reflect the development potential and existing problems of green city. How to set the indicator and its weight are principal scientific questions for green city evaluation. Firstly, based on the concept of green cities and the principle of indicator construction, we constructed an indicator system from the three dimensions of green production, green living, and environmental quality, with 10 secondary indicators and 29 tertiary indicators. The basic indicators are divided into positive, negative, and specific directions according to attributes. Then, based on the Main Functional areas and the urban development stage, weight coefficients are set for different types of cities. By integrating the comprehensive weight coefficient, the differential evaluation of different types of cities is realized, improved the fairness of evaluation results. The green city evaluation index system fully combines the Sustainable Development Goals of United Nation and provides scientific basis for green city evaluation.

Keywords: green city; index system; evaluation indicator; indicator weight; sustainable development goals

1 引言(Introduction)

全球经济的快速增长往往伴随着能源消耗和环境污染,而城市化是造成这些问题的主要因素

(Wang et al., 2018). 研究表明,城市面积仅占全球陆地总面积的 1%,却拥有超过 54% 的人口,消耗了全球 70% 以上的能源,排放了全球 70% 以上的温室气体(Cohen et al., 2016). 随着全球城市化进程的

收稿日期: 2020-06-16

修回日期: 2020-08-02

录用日期: 2020-08-02

基金项目: 中国科学院重点部署项目(No. KFZD-SW-324); 福建省自然科学基金面上项目(No. 2017J01660); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 71704171)

作者简介: 黄云凤(1977—), 女, E-mail: yfhuang@jmu.edu.cn; * 责任作者

飞速发展,世界城市人口将在 2030 年达到 50 亿(王 小鲁, 2010)。自改革开放 40 年以来,中国也经历了大规模的快速城市化,城市化率由 1978 年的 17.9% 增长到 2018 年的 59.6%,然而,快速的城市化也带来了温室效应、大气臭氧损耗、土壤侵蚀、森林砍伐、土地荒漠化和水污染等一系列生态环境问题(Sun *et al.*, 2018)。因此,提高城市化的质量,寻求一条“绿色”的城市发展道路已经成为国际社会的共识。绿色城市的理念诞生于人们对经济增长与资源环境之间矛盾的探究,其中,“绿色”的内涵与“可持续”、“可持续发展”等密不可分(欧阳志云等, 2009)。1991 年,联合国人居署(United Nations Human Settlements Program, UN-Habitat)和联合国环境署(United Nations Environment Program, UNEP)在全球范围内提出并推行的“可持续城市发展计划”(Sustainable Cities Programme, SCP),初步推动了全球的绿色发展(赵景柱等, 2009)。2002 年,联合国开发计划署(United Nations Development Program, UNDP)提出绿色发展,开启了全球绿色发展的潮流(Song *et al.*, 2019)。2005 年,联合国亚太经济社会委员会(United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, UNESCAP)提出走绿色增长道路,在促进经济增长及发展的同时,确保自然资源能不断提供人类福祉所不可或缺的资源和服务(OECD, 2011)。

绿色城市的概念不仅仅局限于经济进步,而更倾向于经济、社会和资源环境的协调发展,旨在保证经济持续稳定发展的前提下,尽可能减少经济活动对资源环境的不良影响(石敏俊等, 2013)。随着人们对绿色城市内涵的补充与完善,绿色城市在涵盖经济发展、资源消耗和环境污染等方面内容的基础上,还加入了气候变化、生活质量、人体健康、生态安全等新的内容(张梦等, 2016)。绿色城市作为一种以人为本的城市模式,是一种兼具了经济绿色增长与人居环境健康,不以破坏生态环境与降低人们生活质量为代价的城市建设模式。绿色城市的建设应该结合城市自身的功能、经济、文化及地域特征,寻求一条适用于城市自身特点的绿色发展道路,目标在于通过完善城市功能来满足城市居民的各种需求及生态系统健康发展。

绿色城市评价是绿色城市理念的具体化(Wang *et al.*, 2018)。为服务于绿色城市的建设,将绿色城市理念变成现实的可操作的管理模式,需要对城市

的绿色发展进行评估,使得人们能够了解城市目前所处的状态及与绿色城市目标的距离,因此,构建一套能反映绿色城市内涵的评价指标体系是绿色城市建设中的重要内容。绿色城市评价指标体系要能客观地反映城市绿色发展现状,找出城市的发展潜力与不足,并鼓励城市为绿色发展做出努力,这对绿色城市的建设具有重要的理论和现实意义。因此,本文基于对全国大范围地区进行评价的目的,建立一套科学的、符合绿色城市理念的评价指标,并基于城市功能与发展阶段分别为指标体系设立权重,通过整合的 12 组权重系数实现对不同类型城市的差异化评价。

2 指标体系研究现状 (Research status of index system)

近年来,国内外学者及相关机构对绿色城市评价指标体系进行了大量探讨(表 1)。国外对于指标体系的研究相对较早,联合国可持续发展委员会(United Nations Commission on Sustainable Development, UNCSD)在 1995 年就批准实施了“可持续发展指标工作计划”(Work Programme on Indicators of Sustainable Development)并提出了初步指标体系,同时联合国统计局(United Nations Statistics Division, UNSD)也提出了包含 88 个指标的可持续发展指标体系,但这些指标都对环境方面反映较多,对社会、经济方面反映较少,并且指标数量过多,实用性有待提高(张志强等, 2002)。在 2000 年提出的“千年发展目标”到期后,联合国(2015)又提出了“2030 可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)”。随后有学者基于这 17 项发展目标构建了适用于中国的指标体系(Wang *et al.*, 2019),但仅限于省级尺度的比较。绿色社区评价体系(LEED-ND)的指标体系较为完善(张佑等, 2017),但部分指标与中国城市难以衔接。欧盟设立的欧洲能源奖评价体系(EEA)与欧洲绿色之都评价体系(EGCA)也只适用于欧洲的城市(Meijering *et al.*, 2014)。经济学人智库与西门子公司从 2009 年起相继推出了欧洲绿色城市指数、拉丁美洲绿色城市指数、亚洲绿色城市指数、美国和加拿大绿色城市指数、非洲绿色城市指数,为全球城市绿色发展评价提供了借鉴。虽然中国对绿色城市评价体系的研究处于初级阶段,但得到了政府部门的高度重视。21 世纪以来,国家发改委、生态环境部等从不同的角度发布了多个城市评价体系,其中,《绿色城市评价指标(征求意见稿)》

表 1 绿色城市指标体系比较

Table 1 Comparison of green city index system

指标体系名称	机构/作者	指标体系构成
可持续发展指标体系	联合国可持续发展委员会 (张志强等, 2002)	从经济、社会、环境、制度 4 个角度构建了由 134 个指标(经济指标 23 个、社会指标 41 个、环境指标 55 个、制度指标 15 个)组成的初步指标体系,通过检验最终确定了 58 个核心指标(经济指标 14 个、社会指标 19 个、环境指标 19 个、制度指标 6 个)
绿色城市指数 (Green City Index)	西门子公司、经济学人智库 (Katherine <i>et al.</i> , 2009)	包括欧洲绿色城市指数、拉丁美洲绿色城市指数、亚洲绿色城市指数、美国和加拿大绿色城市指数、非洲绿色城市指数,各指数包含 8~9 个类别(二氧化碳排放、能源供应、建筑和土地使用、交通、水资源、废弃物、卫生、空气质量和环境治理)及 30 项具体指标
生态低碳城市评价指标 (ELITE cities)	美国劳伦斯伯克利国家实验室 (Zhou <i>et al.</i> , 2015)	深入回顾了 16 个国际城市指标体系和中国城市指标体系,基于 SMART 原则,从 8 个角度选取了 33 个关键指标
欧洲能源奖评价体系(EEA)	EEA 国际办事处 (Meijering <i>et al.</i> , 2014)	指标体系分为发展与空间规划、市政建筑与设施、供应与处置、流动性、内部组织、交流合作共 6 个类别,共 26 项二级指标与 79 项具体指标
绿色社区评价体系(LEED-ND)	美国绿色建筑委员会(张信等, 2017)	包括 5 个主题、13 条先决条件、44 个评价指标,满分 110 分,需满足 13 条先决条件才可进行打分,前 3 个主题分别是明智的选址与连接(27 分)、社区空间设计(44 分)、绿色基础设施与建筑(29 分),共 41 个指标,满分 100 分,另两大主题是加分项目,有 3 个指标,满分 10 分,分别是技术创新(6 分)、区域优选项(4 分)
欧洲绿色之都评价体系(EGCA)	欧盟环境委员会 (Meijering <i>et al.</i> , 2014)	包括应对气候变化的贡献、本地交通、土地可持续利用、自然和生物多样性、空气质量、声环境、废弃物产生与管理、水环境、废水处理、生态创新和可持续就业、能源使用、环境综合管理共 12 个类别的指标
绿色之星评价体系(Green Star)	澳大利亚绿色建筑委员会 (Tam <i>et al.</i> , 2018)	包括管理、室内环境品质、能源、交通、水环境、材料、土地利用、气体排放、创新共 9 大项指标,共 38 个分项指标
Localising 城市可持续性指标	可持续城市发展中心 (Steiniger <i>et al.</i> , 2020)	从访问与出行、环境与公共卫生、管理、健康、社会公平 5 个角度建立了 29 个指标
低碳城市指标框架(LCC)	Tan <i>et al.</i> , 2017	从经济发展、能源格局、社会与生活、碳与环境、城市流动性、固体废物、水环境 7 个角度构建了 20 个量化指标,并为每个指标设立了标准值
低碳城市综合目标指标体 (Target-Integrated indicator)	Lin <i>et al.</i> , 2014	通过分解法从能源消耗、废物处理、农业、工业过程、森林 5 个方面设立了 16 项指标
中国可持续发展评价指标 (SDGs)	Wang <i>et al.</i> , 2019	基于联合国 2030 年可持续发展的 17 项目标,构建了由 52 个基础指标组成的适用于中国省级尺度的可持续发展指标体系
国家生态园林城市分级考核标准	住房和城乡建设部, 2012	包括综合管理、绿地建设、建设管控、生态环境、节能减排、市政设施、人居环境、社会保障 8 个类别的 64 个基础指标,与园林绿化、生态环境、市政设施、节能减排、社会保障 5 个类别的 26 个分级指标
生态文明建设考核目标体系	国家发展和改革委员会、国家统计局、生态环境部, 2016a	从 5 个方面共设立了 23 项指标,其中,资源利用(30 分)、生态环境保护(40 分)、年度评价结果(20 分)、公众满意程度(10 分)为 4 个得分项,生态环境事件为扣分项
绿色发展指标体系	国家发展和改革委员会、国家统计局、生态环境部, 2016b	包括资源利用(29.3%)、环境治理(16.5%)、环境质量(19.3%)、生态保护(16.5%)、增长质量(9.2%)、绿色生活(9.2%)、公众满意程度 7 项一级指标,56 项二级指标
国家节水型城市考核标准	住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会, 2018	包括基本条件、基础管理指标、技术考核指标 3 大类共 25 项指标
绿色城市评价指标 (征求意见稿)	中国标准化研究院, 2017	从绿色生产、绿色生活、环境质量 3 个方面设立了 12 个二级指标与 65 个三级指标
国家环境保护模范城市考核指标	生态环境部, 2011a	从经济社会、环境质量、环境建设、环境管理 4 个方面设立了 23 项具体指标
生态市(含地级行政区)建设指标	生态环境部, 2011b	从经济发展、生态环境保护、社会进步 3 个方面设立了 19 项具体指标
绿色南京城市建设评价指标体系	王婉晶等, 2012	从转型发展(0.25)、社会建设(0.25)、资源利用(0.25)、环境保护(0.25)4 个角度设立了 26 项指标,并设立了目标值
绿色厦门城市评价指标体系	杜芸芝, 2010	包括人口、资源、环境、经济发展 4 个子系统共 32 项指标

从生产、生活与环境 3 个维度构建了较全面的绿色城市指标体系.也有学者从城市的具体情况出发,构建了因地制宜的指标体系,如:绿色南京(王婉晶等,2012)、绿色厦门(杜芸芝,2010).尽管对绿色城市的评价指标体系研究正在逐步发展,但指标体系如何科学公平地对不同类型城市进行评价、如何提升指标体系的稳定性与灵活性等问题依然有待深入研究.

3 绿色城市指标体系的构建(Construction of green city index system)

3.1 指标体系构建原则

绿色城市评价指标体系的构建需要从绿色城市的内涵及评价目标出发,应遵循以下原则:

①科学性与数据可获取性原则.绿色城市评价指标体系应当能充分体现绿色城市的内涵,从科学的角度准确地理解和把握城市绿色发展的实质,指标的选取要以科学且权威的机构发布的统计资料为基础.在保证指标体系科学性的同时,要结合指标的数据可获取性,数据要便于获取与计算,指标数量不宜过多,体现少而精,在实际应用过程中易于操作,需要进行计算的指标尽量选择相对成熟的公式与方法,公式中选择易于获取的参数.

②全面性与相对独立性原则.指标体系中,社会经济、生态环境、资源禀赋等方面都应该得到体现,指标体系要相对完备,使得指标体系作为一个整体能够全面地反映出城市绿色发展中的总体特征.同时各个指标也要彼此相对独立,避免指标之间的重复性,各指标能独立地反映出城市的单方面绿色水平.

③大数据应用原则.指标体系应与大数据相结合,通过对不同分辨率遥感数据(陈鹏,2007)、气象站点数据等多源城市大数据的分析,采用多源数据融合、空间统计分析等多种城市生态学研究方法,来揭示城市绿色发展的规律与特点,以及参评城市的发展现状和未来趋势.

④前瞻性与可比性原则.指标体系要具有前瞻性,应充分体现出国际绿色发展目标的新趋势,要充分借鉴最新研究成果,为城市的绿色发展提供方向.同时,为增加城市之间的可比性,在指标选取时倾向于选取人均和效率性指标,便于反映城市的发展质量,而非总量,各指标要既能充分体现国家在城市绿色发展中的任务、目标,也要与国际趋势接轨,要符合国际规范和国内现行统计的要求,以保证统计数据的可靠性.

3.2 指标体系的构成

对于绿色城市评价指标体系的研究,国内外大多数机构与学者的研究视角也不尽相同,多从绿色生产模式、绿色生活方式及环境质量水平这 3 个角度去建立评价指标体系,所选用的子系统考虑到生产、生活、生态三方面.因此,在遵循指标构建原则的基础上,结合中国城市发展的具体情况,本文从绿色生产、绿色生活、环境质量 3 个角度出发,将 3 个子系统进一步分解成:资源利用、污染控制、绿色市政、绿色交通、绿色消费、生态环境、大气环境、水环境、声环境及城市形态共 10 个二级指标,在此基础上,构建出包含 29 个具体指标的绿色城市评价指标体系(表 2),其中有 16 个正向指标,11 个负向指标,2 个特定向指标.

表 2 绿色城市评价指标与数据来源
Table 2 Green city evaluation index and data source

一级指标	二级指标	三级指标	单位	代码	数据来源
生产	资源利用	单位 GDP 水耗(-)	m ³ 万元 ⁻¹	GP ₁	《中国城市统计年鉴》
		工业用水重复利用率(+)	%	GP ₂	《中国环境年鉴》
		工业固体废物综合利用率(+)	%	GP ₃	《中国城市统计年鉴》
		单位面积建设用地经济产出(+)	万元 km ⁻²	GP ₄	《中国城市统计年鉴》
	污染控制	单位 GDP 二氧化碳排放量(-)	t·万元 ⁻¹	GP ₅	《中国城市温室气体排放数据集》(生态环境部环境规划院)
		非常规水资源利用率(+)	%	GP ₆	《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》
		单位 GDP 氮氨排放量(-)	kg·万元 ⁻¹	GP ₇	《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》
		单位 GDP 化学需氧量排放量(-)	kg·万元 ⁻¹	GP ₈	《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》
		单位 GDP 氮氧化物排放量(-)	kg·万元 ⁻¹	GP ₉	《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》
		单位 GDP 二氧化硫排放量(-)	kg·万元 ⁻¹	GP ₁₀	《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》
		单位 GDP 工业固体废物产生量(-)	t·万元 ⁻¹	GP ₁₁	《中国城市统计年鉴》、《中国环境年鉴》
		危险废物处置率(+)	%	GP ₁₂	《中国环境年鉴》

续表2

一级指标	二级指标	三级指标	单位	代码	数据来源
绿色生活	绿色市政	生活污水集中处理率(+)	%	GL ₁	《中国城市建设统计年鉴》
		供水管网漏损率(-)	%	GL ₂	《中国城市建设统计年鉴》
		生活垃圾无害化处理率(+)	%	GL ₃	《中国城市建设统计年鉴》
	绿色交通	万人公共交通工具保有量(+)	标台/万人	GL ₄	《中国城市统计年鉴》
		公共交通站点 500 m 覆盖率(+)	%	GL ₅	遥感解译数据、POI 数据
		中心城区建成区路网密度(+)	km•km ⁻²	GL ₆	《中国主要城市道路网密度监测报告》
	绿色消费	人均居民生活用水量(*)	L•d ⁻¹	GL ₇	《中国城市建设统计年鉴》
		人均居民生活用电量(*)	kWh•d ⁻¹	GL ₈	《中国城市统计年鉴》
		人均生活垃圾产生量(-)	kg•d ⁻¹	GL ₉	《中国城市建设统计年鉴》
环境质量	生态环境	建成区绿化覆盖率(+)	%	EE ₁	《中国城市建设统计年鉴》
		人均公园绿地面积(+)	m ² 人 ⁻¹	EE ₂	《中国城市建设统计年鉴》
		自然保护区面积占比(+)	%	EE ₃	《全国自然保护区名录》
	大气环境	空气质量优良天数(+)	d	EE ₄	《中国统计年鉴》
		集中式饮用水水源地水质达标率(+)	%	EE ₅	各城市统计年鉴、水资源公报年报环境状况公报年报
	水环境	地表水环境质量 CWQI(-)	/	EE ₆	生态环境网站监测数据
	声环境	交通干线噪声平均值(-)	分贝	EE ₇	《中国统计年鉴》
	城市形态	紧凑度(+)	/	EE ₈	遥感解译数据

注: (+) 表示正向指标 (-) 表示负向指标 (*) 表示特定向指标。

3.3 指标解释与数据来源

绿色城市评价指标体系在城市尺度上具有较高的可操作性,所选取的指标均是定量指标,具有明确的定义、范围及计算方法,数据大多可在统计部门发布的年鉴及相关权威部门发布的资料中直接获取,或者通过多源大数据进行分析计算获取。

其中,单位面积建设用地经济产出是指城市的 GDP 与城市建设用地总面积的比值;中心城区建成区路网密度是指中心城区建成区范围内的道路总里程与该范围面积的比值,数据可参考《中国主要城市道路网密度监测报告》;自然保护区面积占比是指城市自然保护区面积与行政区域土地总面积的比值,数据可参考《全国自然保护区名录》;地表水环境质量 CWQI 是指城市地表水水质综合指数,可通过各城市生态环境网站获取,也可参考《城市地表水环境质量排名技术规定(试行)》,通过环境监测数据计算,具体见式(1)。

$$CWQI = \frac{CWQI_{\text{河流}} \times M + CWQI_{\text{湖库}} \times N}{(M+N)} \quad (1)$$

式中, CWQI 为参评城市的水质指数; CWQI_{河流} 为河流的水质指数; CWQI_{湖库} 为湖库的水质指数; M 为城市的河流断面数; N 为城市的湖库点位数。

公共交通站点 500 m 覆盖率与城市紧凑度需要通过遥感数据计算。公共交通站点 500 m 覆盖率是指建成区内公共交通站点服务面积(以公共交通站点为圆心、以 500 m 为半径的圆 相交部分不得重复

计算) 占建成区面积的百分比,可通过兴趣点(POI) 数据建立缓冲区,与城市的遥感解译数据进行叠加、融合多边形等空间分析方式计算。城市紧凑度能反映出城市形态是否紧凑(林炳耀,1998),可参考中国土地覆盖遥感监测数据,通过遥感解译数据计算获得,具体见式(2)~(3)。

$$CI = \frac{\sum_i \frac{\sqrt{\pi A_i}}{P_i}}{n(n-1)/2} \quad (2)$$

$$CI = \frac{\sum_i \frac{\sqrt{\pi A_i}}{P_i}}{2n-1} \quad (3)$$

式中, CI 为城市紧凑度指数; A_i 为地块 i 的面积; P_i 为地块 i 的周长; n 为地块数量。

3.4 指标权重的设置

目前,绿色城市评价指标的权重确定方法主要有层次分析法(李新等,2011)、多元统计法、熵权法(雷勋平等,2016)、变异系数法、灰色关联度法等。本研究综合考虑了不同城市的资源环境禀赋、现有开发基础与功能定位,以及城市化的发展阶段,并在结合国土空间开发规划和中国城市化发展进程等研究成果的基础上,提出了基于专家咨询法的一种双轨并行的权重系数分配体系(图1)。首先,将绿色生产、绿色生活及环境质量 3 个子系统的重要性分为 0.1~0.9 共 9 个级别;然后,依据《全国主体功能区规划》,请专家对 4 类主体功能区中 3 个子系统

的重要程度进行判别;再根据中国城市化的发展进程,选取两个城市化发展的关键节点,将城市化发展阶段分为高度城市化、中度城市化、低度城市化 3

种类型,请专家对 3 种城市发展阶段中 3 个子系统的重要性进行判断;最后,将两组权重系数加以整合,形成绿色城市指标体系综合权重系数(表 3)。

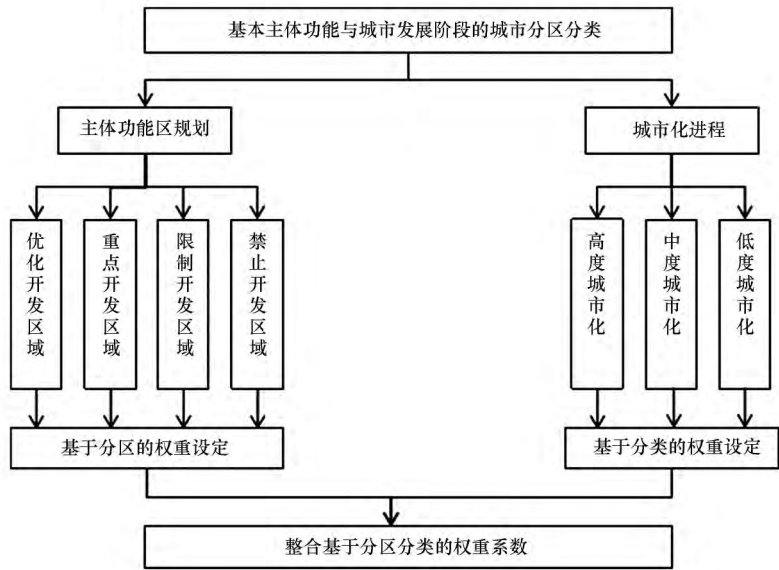


图 1 基于主体功能与城市发展阶段的权重系数设定

Fig.1 The weight coefficient setting based on the main function-oriented and urban development stage

表 3 绿色城市指标体系综合权重系数

Table 3 Integrated weight coefficient of green city index system

权重类别	城市分区分类	权重系数		
		绿色生产	绿色生活	环境质量
基于主体功能区的权重	优化开发区域	0.40	0.40	0.20
	重点开发区域	0.30	0.30	0.40
	限制开发区域	0.20	0.20	0.60
	禁止开发区域	0.10	0.10	0.80
基于城市发展阶段的权重	高度城市化	0.35	0.35	0.30
	中度城市化	0.30	0.30	0.40
	低度城市化	0.20	0.20	0.60
综合权重系数	高度城市化优化开发	0.41	0.41	0.18
	中度城市化优化开发	0.38	0.38	0.24
	低度城市化优化开发	0.29	0.29	0.42
	高度城市化重点开发	0.32	0.32	0.36
	中度城市化重点开发	0.26	0.26	0.48
	低度城市化重点开发	0.17	0.17	0.66
	高度城市化限制开发	0.22	0.22	0.56
	中度城市化限制开发	0.17	0.17	0.66
	低度城市化限制开发	0.09	0.09	0.82
	高度城市化禁止开发	0.11	0.11	0.78
	中度城市化禁止开发	0.08	0.08	0.84
	低度城市化禁止开发	0.04	0.04	0.92

3.4.1 基于主体功能区的权重设定 主体功能区划分是以“因地制宜”的国土开发和区域发展思想

为基础(樊杰,2007),以县区作为基本单位,根据不同区域的资源环境承载能力、现有开发强度和未来发展潜力,将国土空间划分为优化开发区域、重点开发区域、限制开发区域和禁止开发区域 4 种类型,确立中国国土空间发展格局的总体布局(Fan *et al.*, 2010).其中,优化开发区和重点开发区是城市化地区,二者的发展内容基本相同,但发展强度和发展手段不同(Wang *et al.*, 2019).绿色城市评价指标体系基于不同城市的功能差异性,对 4 类主体功能区分别设定了不同的权重系数,结合专家意见,绿色生产与绿色生活具有同等的重要性,随着对开发的限制程度的增加,环境质量的权重升高,绿色生产和绿色生活的权重降低,参评城市根据所处的地理位置,确定其所属的类别。

3.4.2 基于城市发展阶段的权重设定 城市发展阶段的划分选取了两个城市化关键节点,即 70%与 50%,将城市分为高度城市化、中度城市化、低度城市化 3 个类别.城市化率高于 70%的城市属于高度城市化类别,城市人口比重超过 70%,城乡人口格局基本稳定,城市化发展放缓,是城市化发展的成熟阶段,因此,选取 70%作为城市发展阶段的节点.城市化率低于 70%并且高于 50%的城市,属于中度城市化类别,城市人口超过农村人口在城市发展史

上具有重要意义,因此,选取 50% 作为城市化发展阶段的节点。城市化率低于 50%,属于低度城市化类别,此类城市属于城市化发展的初级阶段,发展潜力很大。基于不同发展阶段的的城市之间的可比性,指标体系对 3 个城市发展阶段分别设定了不同的权重系数,结合专家意见,随着城市化率的升高,环境质量的权重降低,绿色生产和绿色生活的权重升高。

3.4.3 绿色城市指标体系综合权重 通过整理专家对 3 个子系统重要性的 9 个级别的打分结果,分别得出 4 类主体功能区与 3 个城市发展阶段的权重,权重取值为 0~1,且 3 个子系统在各组权重系数中的数值之和等于 1。再通过相乘的方式将两组权重系数加以整合,并将整合结果进行标准化,使每组权重系数之和等于 1,最终得到绿色城市指标体系综合权重。此方法对 3 个子系统设立了 12 组权重,各子系统根据所分配的权重,再平均赋予到三级指标中。综合权重能反映出环境质量与另外两个子系

统之间的平衡,参评城市可以根据所属的区域,以及城市化的发展阶段,确定其所在的分组,并匹配相应的权重系数。通过设定综合权重系数,增强了绿色城市评价指标体系的灵活性,使其适用于对不同类别城市的评价。

3.4.4 城市分区分类的应用实例 基于城市的主体功能区与发展阶段对我国城市进行分区分类,目的在于调整 3 个子系统的权重系数,使指标体系能够适用于不同类型的城市。以 27 个省会城市、4 个直辖市与 5 个计划单列市总计 36 个城市为例,首先依据《全国主体功能区规划》,36 个城市分布在优化开发区域与重点开发区域,覆盖到了 4 类主体功能区中的两类,开发强度普遍较高;然后参照 36 个城市的《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中各城市 2015 年的城市化率状况,将 36 个城市分为高、中、低度城市化 3 个阶段;最后加以整合,36 个城市覆盖了 12 个城市类别中的 5 类,具体如表 4 所示。

表 4 基于主体功能与城市发展阶段的 36 个城市分区分类情况

Table 4 Classification of 36 cities based on main function and urban development stage

开发区域	高度城市化	中度城市化	低度城市化
优化开发区域	北京市、天津市、沈阳市、大连市、上海市、南京市、杭州市、宁波市、广州市、深圳市	济南市、青岛市	
重点开发区域	太原市、合肥市、厦门市、武汉市、长沙市、南昌市、海口市、成都市、贵阳市、昆明市、西安市、兰州市、银川市、乌鲁木齐市	石家庄市、呼和浩特市、长春市、福州市、郑州市、南宁市、重庆市、西宁市	哈尔滨市、拉萨市

4 讨论(Discussion)

4.1 指标的选取

在构建绿色城市评价指标体系时,最初共选取了 72 个三级指标,经过多轮筛选,最终呈现出 29 个指标,被筛选掉的指标大多是由于数据缺乏获取性或统计口径不统一。自下而上、层层上报的统计方法容易造成各城市的标准尺度不一致,使“清洁能源公共交通工具比例”、“公众对环境的满意度”、“生态保护红线区面积保持率”等表征意义较好的指标由于数据源的问题不得不被放弃。龙瀛等(2018)基于新数据的人居环境监测指标体系,采取 GIS 空间分析、遥感解译、热力图分析、空间句法模型等时空数据统计方法,提升了数据源的可靠性,为绿色城市评价指标体系的构建提供了参考。本研究结合大数据的应用,选取公共交通站点 500 m 覆盖率与城市紧凑度两项指标。

4.2 指标体系与 SDGs 的关系

联合国在 2015 年制定的《2030 年可持续发展议程》中提出了可持续发展目标,SDGs 包括 17 项不可分割的可持续发展目标及 169 项子目标,旨在鼓励各国在 2015—2030 年期间为地球的可持续发展采取行动(Merino-Saum *et al.*, 2018)。绿色城市评价指标体系与 SDGs 有着密切的联系,表 5 展示了 SDGs 中与绿色城市评价指标体系有关的具体目标,绿色城市评价指标体系可作为 SDGs 实现的有效途径。

绿色城市评价指标体系融合了 SDG6、SDG7、SDG9、SDG11、SDG12、SDG13、SDG15,同时兼顾其他 SDGs(图 2,实线表示指标与 SDGs 直接相关,虚线表示间接相关)。其中,SDG6 为清洁饮水与卫生设施,与集中式饮用水水源地水质达标率等水资源方面的 10 个指标直接相关;SDG7 代表能源普及与提高能源效率,与人均居民生活用电量等 4 个指标直

表 5 SDGs 中与绿色城市评价指标相关的的目标

Table 5 Specific targets related to green city evaluation indicators in SDGs

目标	具体目标
SDG6 为所有人提供水和环境卫生设备并对其进行可持续管理	6.1 人人普遍和公平地获得安全和负担得起的饮用水 6.3 通过以下方式改善水质:减少污染,消除倾倒废物现象,降低危险化学品与材料的排放,降低未经处理废水比例,提升废物回收和安全再利用比例 6.4 所有行业大幅提高用水效率,确保可持续取用和供应淡水,以解决缺水问题,大幅减少缺水人数 6.6 保护和恢复与水有关的生态系统,包括湿地、河流、地下含水层
SDG7 使每个人都能享用可持续的现代能源	7.1 确保人人能获得负担得起的、可靠的现代能源服务 7.3 全球能效改善率提高 1 倍
SDG9 促进具有包容性的可持续工业化,建造具备抵御灾害能力的基础设施	9.4 所有国家根据自身能力采取行动,升级基础设施,提升工业发展的可持续性,提高资源利用效率,降低二氧化碳排放
SDG11 建设包容、安全、有抵御灾害能力和可持续的城市和人类住区	11.2 向所有人提供安全、负担得起的、可持续的交通运输系统,扩大公共交通系统,改善道路安全 11.4 进一步努力保护和捍卫世界文化遗产和自然遗产 11.6 减少城市的人均负面环境影响,包括空气质量以及城市废弃物 11.7 向所有人提供安全、包容、便利、绿色的公共空间
SDG12 确保采用可持续的消费和生产模式	12.2 实现自然资源的可持续管理和高效利用 12.4 实现化学品和所有废物在整个存在周期的无害化管理,并降低它们排入大气以及渗漏到水和土壤的机率以及对人类健康和环境造成的负面影响 12.5 通过减排、回收和再利用,大幅减少废弃物的产生
SDG13 采取紧急行动应对气候变化及其影响	13.2 将应对气候变化的举措纳入国家政策、战略和规划 13.3 降低和适应气候变化带来的影响,加强早期预防与宣传教育工作
SDG15 保护陆地生态系统,遏制生物多样性的丧失	15.1 根据国际协议规定的义务,可持续利用陆地和内陆的淡水生态系统及其服务 15.4 加强保护山地生态系统及其生物多样性

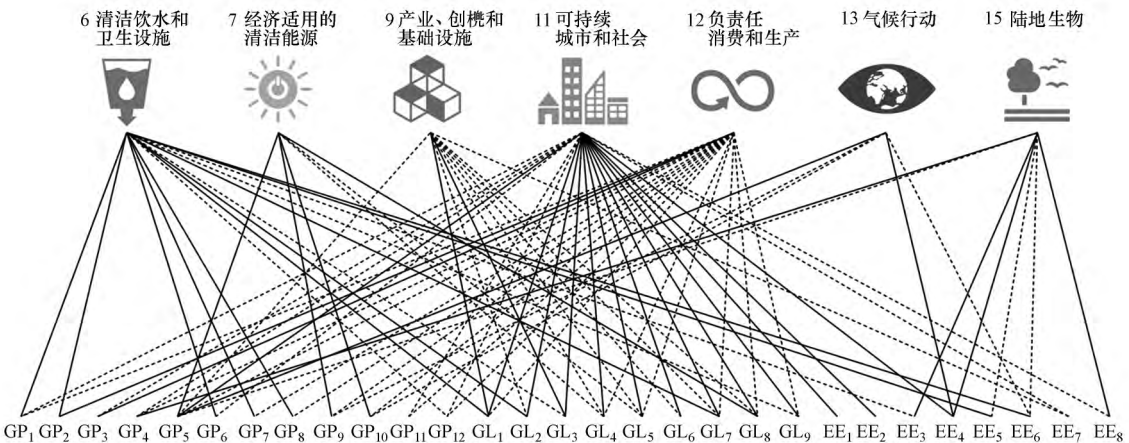


图 2 绿色城市评价指标体系与 SDGs 的关系

Fig.2 The relationship between green city evaluation index system and SDGs

接相关;SDG9 代表基础设施与工业创新,包括建造优质、可靠的的城市基础设施,与生活污水集中处理率、生活垃圾无害化处理率相关;SDG11 为建设安全、包容、可持续的城市和社区,与绿色生活维度及人均公园绿地面积等指标直接相关;SDG12 为可持续的消费和生产模式,与工业固体废物综合利用率等指标相关;SDG13 关注于气候变化带来的影响,与单位 GDP 二氧化碳排放量、空气质量优良天数等

指标相关;SDG15 关注于对陆地生态系统的保护,与自然保护区面积占比、城市紧凑度等指标相关。

4.3 特定指标的设定

通常将定量指标按照指向分为正向指标与负向指标,但有些指标不宜定为正向指标与负向指标,如对于人均居民生活用水量与人均居民生活用电量两项指标,通常将其定位为负向指标,目的在于减少资源的消耗,城市的人均居民生活用水与用

电量越低,绿色城市评价的得分就会越高.但在研究中发现,欠发达地区城市的居民生活用水用电普及率普遍低于发达地区城市,因此,居民生活用水用电量也普遍较低,形成了城市越不发达,表现越优的现象.这种评价结果会造成误导,因为并不是越不发达地区的城市越绿色,提高人们的生活质量,也是城市发展的重要内容,绿色城市的发展方向应以人为本,过低的人均生活用水与用电量会降低人们的幸福感.因此,本文将人均居民生活用水量与人均居民生活用电量两项指标定位为特定向指标,这与SDG6中提到的确保人人能够公平地获得安全清洁的用水,SDG7中提到的确保人人能获得负担得起的、可靠和可持续的能源是一致的,旨在不以降低人们生活质量为代价来减少资源的消耗,通过用水用电的普及来体现城市的服务性与宜居性.

4.4 基于城市分区分类的指标权重设置

与国家标准《绿色城市评价指标(征求意见稿)》中的65个三级指标相比较,指标体系在全国范围的城市尺度上具有较高的数据可获取性,并且结合了多源大数据,因此更具稳定性;通过城市化率将城市分为高、中、低度城市化3个发展阶段,并分别设定权重系数,提升了指标体系对于不同发展阶段城市的公平性;基于城市主体功能与发展阶段对城市进行分区分类,通过设立12组权重系数调整环境质量维度与另两个维度之间的关系,实现对不同类别城市的差异化评价,提升了指标体系的灵活性.

5 结论(Conclusions)

我国正处于绿色经济转型升级的关键阶段,绿色城市已经成为我国城市未来的发展方向,同时也是关系到社会、经济和生态系统良性循环的关键环节(窦攀峰等,2019).构建绿色城市评价指标体系,目的在于在城市尺度上建立具有可比性的评价体系,识别城市间的绿色水平差距,并进一步促进绿色城市的建设.本文从生产、生活和生态3个维度构建了包括10个二级指标和29个基础指标的评价体系,并基于城市的分区分类提出了不同类型城市的指标权重,提升了绿色城市评价的稳定性、公平性和灵活性,可为我国的城市绿色发展评估提供指导.

参考文献(References):

Cohen B, Muñoz P. 2016. Sharing cities and sustainable consumption and production: towards an integrated framework [J]. *Journal of Cleaner*

Production, 134: 87-97

陈鹏. 2007. 基于遥感和GIS的景观尺度的区域生态健康评价——以海湾城市新区为例[J]. *环境科学学报*, 27(10): 1744-1752

窦攀峰, 左舒翟, 任引, 等. 2019. 基于城市分类的绿色城市指标体系构建[J]. *生态学杂志*, 38(6): 1937-1948

杜芸芝. 2010. 基于PRED的厦门绿色城市协调发展评价研究[D]. 福州: 福建农林大学. 34-42

Fan J, Tao A, Ren Q. 2010. On the historical background, scientific intentions, goal orientation, and policy framework of major function-oriented zone planning in China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 1(1): 289-299

樊杰. 2007. 我国主体功能区划的科学基础[J]. *地理学报*, (4): 339-350

国家发展和改革委员会、国家统计局、生态环境部. 2016a. 生态文明建设考核目标体系[EB/OL]. 2020-03-22. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201612/t20161222_962826.html

国家发展和改革委员会、国家统计局、生态环境部. 2016b. 绿色发展指标体系[EB/OL]. 2020-03-22. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201612/t20161222_962826.html

雷勋平, 邱广华. 2016. 基于熵权TOPSIS模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. *环境科学学报*, 36(1): 317-326

李新, 石建屏, 曹洪. 2011. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. *环境科学学报*, 31(6): 1338-1344

联合国. 2015. 可持续发展目标[EB/OL]. 2020-03-07. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/>

Lin J, Jacoby J, Cui S, et al. 2014. A model for developing a target integrated low carbon city indicator system: The case of Xiamen, China [J]. *Ecological Indicators*, 40: 51-57

林炳耀. 1998. 城市空间形态的计量方法及其评价[J]. *城市规划汇刊*, (3): 42-45+65

龙瀛, 李苗裔, 李晶. 2018. 基于新数据的中国人居环境质量监测: 指标体系与典型案例[J]. *城市发展研究*, 25(4): 86-96

Meijering J V, Kern K, Tobi H. 2014. Identifying the methodological characteristics of European green city rankings [J]. *Ecological Indicators*, 43: 132-142

Merino-Saum A, Baldi M G, Gunderson I, et al. 2018. Articulating natural resources and sustainable development goals through green economy indicators: A systematic analysis [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 139: 90-103

OECD. 2011. Towards Green Growth [EB/OL]. 2020-03-06. <http://www.oecd.org/greengrowth/48728959.pdf>

欧阳志云, 赵娟娟, 桂振华, 等. 2009. 中国城市的绿色发展评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 19(5): 11-15

生态环境部. 2011a. 国家环境保护模范城市考核指标及其实施细则(第六阶段)[EB/OL]. 2020-03-23. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201101/t20110125_200178.htm

生态环境部. 2011b. 国家生态文明建设示范县、市指标(试行)[EB/OL]. 2020-03-23. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201601/t20160128_327045.htm

石敏俊, 刘艳艳. 2013. 城市绿色发展: 国际比较与问题透视[J]. *城市发展研究*, 20(5): 140-145

Song X, Zhou Y, Jia W. 2019. How do economic openness and R&D

- investment affect green economic growth? —Evidence from China [J]. *Resources ,Conservation and Recycling* ,146: 405-415
- Steiniger S ,Wagemann E ,de la Barrera F ,*et al.* 2020. Localising urban sustainability indicators: The CEDEUS indicator set and lessons from an expert-driven process [J]. *Cities* , DOI: 10. 1016/j. cities. 2020.102683
- Sun C ,Tong Y ,Zou W. 2018. The evolution and a temporal-spatial difference analysis of green development in China [J]. *Sustainable Cities and Society* 41: 52-61
- Tam V W Y ,Karimipour H ,Le K N ,*et al.* 2018. Green neighbourhood: Review on the international assessment systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82: 689-699
- Tan S ,Yang J ,Yan J ,*et al.* 2017. A holistic low carbon city indicator framework for sustainable development [J]. *Applied Energy* ,185: 1919-1930
- The Economist Intelligence Unit. 2011. Asian Green City Index [EB/OL]. 2018-08-14. <https://www.siemens.com/global/en/home.html>
- The Economist Intelligence Unit. 2009. European Green City Index [EB/OL]. 2018-08-14. <https://www.siemens.com/global/en/home.html>
- Wang M X ,Zhao H H ,Cui J X ,*et al.* 2018. Evaluating green development level of nine cities within the Pearl River Delta ,China [J]. *Journal of Cleaner Production* ,174: 315-323
- Wang N ,Lee J C K ,Zhang J ,*et al.* 2018. Evaluation of urban circular economy development: An empirical research of 40 cities in China [J]. *Journal of Cleaner Production* ,180: 876-887
- Wang W ,Wang W ,Xie P ,*et al.* 2020. Spatial and temporal disparities of carbon emissions and interregional carbon compensation in major function-oriented zones: A case study of Guangdong province [J]. *Journal of Cleaner Production* ,245 , DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2019.118873
- Wang Y ,Lu Y ,He G ,*et al.* 2019. Spatial variability of sustainable development goals in China: A provincial level evaluation [J]. *Environmental Development* ,DOI: 10.1016/j.envdev.2019.100483
- 王婉晶 ,赵荣钦 ,揣小伟 ,等. 2012. 绿色南京城市建设评价指标体系研究 [J]. *地域研究与开发* ,31(2) : 62-66
- 王小鲁. 2010. 中国城市化路径与城市规模的经济分析 [J]. *经济研究* ,45(10) : 20-32
- 张信 ,钱秉玺. 2017. 寻找理想与现实的平衡—基于美国 LEED-ND 评估体系与实践的思考 [J]. *城市规划* 41(11) : 102-110
- 张梦 ,李志红 ,黄宝荣 ,等. 2016. 绿色城市发展理念的产生、演变及其内涵特征辨析 [J]. *生态经济* ,32(5) : 205-210
- 张志强 ,程国栋 ,徐中民. 2002. 可持续发展评估指标、方法及应用研究 [J]. *冰川冻土* (4) : 344-360
- 赵景柱 ,崔胜辉 ,颜昌宙 ,等. 2009. 中国可持续城市建设的理论思考 [J]. *环境科学* ,30(4) : 1244-1248
- 中国标准化研究院. 2017. 绿色城市评价指标(征求意见稿) [EB/OL]. 2020-03-11. https://www.cnis.ac.cn/ynbm/jhkyc/bzyjq/gbyjq/201711/t20171113_25801.html
- Zhou N ,He G ,Williams C ,*et al.* 2015. ELITE cities: A low-carbon eco-city evaluation tool for China [J]. *Ecological Indicators* 48: 448-456
- 住房和城乡建设部 ,国家发展和改革委员会. 2018. 国家节水型城市考核标准 [EB/OL]. 2020-03-23. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201803/t20180301_235261.html
- 住房和城乡建设部. 2012. 生态园林城市分级考核标准 [EB/OL]. 2020-03-11. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201212/t20121207_212220.html