

刘珊珊, 吴文婕, 王志强. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的乌鲁木齐市绿色发展水平测度及其影响因素[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 857-868.

LIU Shan-shan, WU Wen-jie, WANG Zhi-qiang. Calculation on Green Development Level of Urumqi in Xinjiang, China Based on DPSIR-TOPSIS Model and Its Influencing Factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 857-868.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.12027

· 环境与可持续发展专刊 ·

基于 DPSIR-TOPSIS 模型的乌鲁木齐市 绿色发展水平测度及其影响因素

刘珊珊, 吴文婕*, 王志强

(新疆农业大学 公共管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 城市绿色发展是实现高质量发展的内在要求。科学评价城市绿色发展水平、准确识别绿色发展影响因素是促进城市绿色转型与“资源-环境-经济”协调发展的关键性命题。从社会经济发展、资源禀赋与消耗、环境压力与治理、公众生活与社会状态、技术创新与政策等方面综合构建城市绿色发展水平测度指标体系, 结合 DPSIR-TOPSIS 模型与障碍度模型分析测算乌鲁木齐市 2007~2021 年绿色发展水平动态变化, 识别影响城市绿色发展的限制性因素。结果表明: ①乌鲁木齐市 2007~2021 年绿色发展状况不断改善, 发展水平呈显著上升态势, 绿色发展已见成效; ②城市绿色发展水平的驱动力、状态、影响、响应指数均呈上升趋势, 增幅差异显著, 压力指数则呈小幅下降趋势; 绿色发展政策措施响应积极, 但资源环境压力制约仍然存在; ③2007~2013 年影响乌鲁木齐市绿色发展的主要因素为人均城市道路面积、恩格尔系数、城镇居民可支配收入、第三产业占 GDP 的比重, 2014~2021 年主要因素为 GDP 增长率、单位 GDP 电耗、人口自然增长率、全年供水总量。综上所述, 针对乌鲁木齐市“资源富集、产业聚集、生态脆弱”的特点, 建议加快绿色低碳转型、推动绿色技术创新、倡导绿色消费、实时调整绿色发展思路等。

关键词: 绿色发展; 绿色转型; DPSIR-TOPSIS 模型; 障碍度模型; 测度; 影响因素; 绿洲城市; 新疆
中图分类号: X24 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2023)04-0857-12

Calculation on Green Development Level of Urumqi in Xinjiang, China Based on DPSIR-TOPSIS Model and Its Influencing Factors

LIU Shan-shan, WU Wen-jie*, WANG Zhi-qiang

(School of Public Administration, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Urban green development is the inherent requirement for achieving high-quality development. Scientific evaluation of urban green development level and accurate identification of influencing factors of green development are key scientific issue to promote urban green economy transformation and the coordinated development of “resource-environment-economy”. The urban green development level measurement index system was comprehensively constructed from the aspects of social and economic development, resource endowment and consumption,

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2023-04-01 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01B54); 国家自然科学基金项目(72164035)

作者简介: 刘珊珊(1997-), 女, 内蒙古赤峰人, 管理学硕士研究生, E-mail: 2178146309@qq.com.

* 通讯作者: 吴文婕(1986-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 副教授, 理学博士, E-mail: 15294210239@126.com.

environmental pressure and governance, public life and social status, technological innovation and policy, etc.; and then the DPSIR-TOPSIS model and obstacle model were combined to analyze the dynamic changes of green development levels of Urumqi in Xinjiang from 2007 to 2021, and the restricted factors that affect the green development were identified. The results show that ① the green development status of Urumqi has continued to improve from 2007 to 2021, its levels keep on significantly rising and green development gets some effective achievements. ② The driving force, state, impact and response indexes of green development are on the rise, and the difference in growth rates seems significant, while the pressure index takes on a slight decline; green development policies and measures have responded positively, but the pressure on resources and environment still exists. ③ The main factors affecting green development of Urumqi are not the same during different periods. From 2007 to 2013, the urban road area, Engel coefficient, the disposable income of urban residents, and the proportion of tertiary industries are the main factors; but from 2014 to 2021, GDP growth rate, unit GDP power consumption, natural population growth rate, and total annual water supply factors are the main factors. In summary, taking consideration of the characteristics of “resources rich, industrial agglomeration, and ecological fragility” in Urumqi, some suggestions such as accelerating green low-carbon transformation, promoting green technology innovation, advocating green consumption, and real-time adjustment of green development ideas are put forward.

Key words: green development; green transformation; DPSIR-TOPSIS model; obstacle model; calculation; influence factor; oasis city; Xinjiang

0 引言

自 2008 年联合国环境规划署 (UN Environment Programme, UNEP) 发出全球绿色新政倡议后, 绿色发展成为世界上越来越多国家 and 地区的发展共识, 也为我国新时代高质量发展指明方向。党的二十大报告指出: “中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化”, 明确了我国新时代生态文明建设的战略任务, 总基调是推动区域绿色发展, 促进人与自然和谐共生。绿色发展是在传统发展基础上的一种模式创新, 是建立在生态环境容量和资源承载力的约束条件下, 将环境保护作为实现可持续发展重要支柱的一种新型发展模式和理念^[1]。城市是区域高质量发展的核心力量, 面临生态平衡与环境保护突出矛盾, 是落实绿色发展的重点区域^[2-3]。随着国土空间规划、主体功能定位与资源的分类式开发, 城市生态资源、经济社会协调公平发展问题备受关注。如何在保障经济持续增长的同时促进城市社会公平和资源环境改善, 成为亟需解决的现实问题。绿色发展对传统工业化和城市化模式所存在问题提出质疑, 是对城市生产、生活方式的自省和改进, 应成为区域经济、社会、资源环境协调发展的必然选择。

在自然资源日益枯竭、全球气候变化等多重危

机胁迫背景下, 绿色发展经历了由学术倡议到国际共识的巨大转变, 呈现出地理学、经济学、社会学、环境科学、生态学等众多学科交叉研究的主流趋势^[4-6]。相较国外兴起较早的绿色发展研究热潮, 国内相关研究虽然起步较晚, 但是各界学者对绿色发展的关注和研究一直持续深入推进。在概念内涵解读方面, 1989 年 Pearce 等第一次提出“绿色经济”的概念, 认为应建立人与自然都能承受的经济, 保护生态环境^[7]。2014 年, 胡鞍钢等首次构建了绿色发展的“三圈模型”, 论述了经济、自然和社会系统间复杂的共生性和交互机制^[8]。在评价研究方面, 美国学者鲍勃·霍尔率先提出“绿色指数”这一空白指标^[9]; 国外关于绿色发展已基本形成了较为成熟的指标体系研究, 如经济合作与发展组织 (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 提出的 DPSIR 指标体系^[10]、联合国环境规划署提出的三系统模型^[11]等, 均被国内外学术界广泛选用; 常见的测算研究方法为数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA), 其经过多年发展与完善, 衍生出三阶段 DEA 模型、SBM 模型、Super-SBM 模型以及 Malmquist-Luenberger 指数模型^[12-13]等, 积累了绿色发展效率评价、单一指标评价及多指标体系的综合指标评价 3 种方法。在影响因

素方面,国际上对自然因素关注较少,更多的研究关注社会经济类因素,并与现阶段发展问题进行结合。例如,Zhao 等将可再生能源发展作为绿色经济增长的重要组成部分,发现其同样依赖于环境监管政策的实施^[14];Zhang 等分析了技术进步对发展中国家城市绿色发展的影响机理,并形成“绿色发展与经济-环境-社会系统之间存在复杂的反馈关系”这一共识^[15]。国内主要借助空间分析与计量分析方法模型,进一步科学合理地识别影响绿色发展的社会、经济、环境、政策等因素。常用方法有障碍度模型^[16]、灰色关联法^[17]、Tobit 模型^[18]和地理探测器^[19]等。例如,刘浩然分析证实城镇化和能源消耗是抑制京津冀地区绿色发展效率提升的主要影响因素^[20];邹磊等分析得出长江中游城市群绿色发展主要影响因素为第二、三产业增加值总额、城镇化率和固定资产投资^[21]。在区域选择方面,前人研究在典型区域(如资源型城市^[22]、城市群^[23]、老工业基地^[24]及流域经济带^[25]等)均有涉及。

综上所述,已有成熟相关研究多集中在城市群或更大尺度的国家、地区,且研究区多聚焦于我国东部发达地区,少有学者关注社会经济发展相对滞后、生态脆弱的西部地区。2017 年,新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市入选“城市双修”试点城市,为区域绿色可持续发展提供了重大机遇。2022 年发布的《乌鲁木齐市生态环境保护“十四五”规划》强调:应加快推进节约资源与保护生态的空间开发格局、产业体系、生产及生活方式的形成。本文通过梳理绿色发展的动力、压力、状态、影响及响应机制,构建乌鲁木齐市绿色发展综合评价指标体系,引入 DPSIR-TOPSIS 模型分析测算城市绿色发展综合水平;并结合障碍度模型进一步识别绿色发展瓶颈因素,掌握乌鲁木齐市绿色发展规律与趋势,明确存在问题,提出高质量绿色发展对策建议。

1 研究区概况

乌鲁木齐市位于亚欧大陆腹地的天山北麓、准噶尔盆地南部,属中温带半干旱大陆性气候,季节分配不均、昼夜温差大,常年干燥少雨,年均降水量 236 mm,是典型的西北干旱区特大绿洲城市(图 1)。2020 年乌鲁木齐市常住总人口 405.5 万,人口城镇化率为 90.2%,土地总面积为 13 787.9 km²,建成区面积为 521.6 km²。

“一带一路”倡议提出以来,乌鲁木齐市城市化进程逐步加快,2020 年第七次全国人口普查数据显

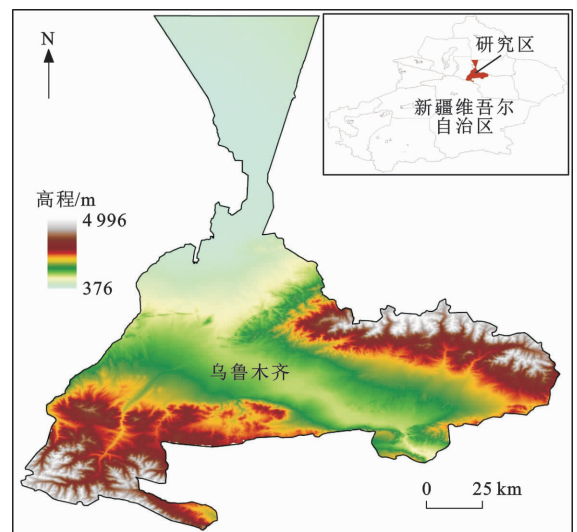


图 1 新疆乌鲁木齐区位图

Fig. 1 Location of Urumqi in Xinjiang

示其人口城镇化率已跻身全国第五,建成区面积较 2010 年扩张 52.07%。乌鲁木齐市通过优化营商开放环境,创新区域协调机制,全面提升公共服务和基础设施通达程度,有效改善居民生活质量,实现与东中部地区互补发展、双向开放协同并进。依托 3 个国家级开发区及 1 个综合保税区、5 个自治区级园区以及 40 个实体产业园,乌鲁木齐市已形成装备制造、能源化工、新材料、新能源、生物医药、纺织服装、环保建筑材料、电力设备制造、绿色食品制造、大数据等十大主导产业集群;2022 年地区生产总值 3 893.22 亿元,第一、二、三产业结构比例为 0.8 : 29.1 : 70.1,产业门类齐全,发展格局日趋合理。

乌鲁木齐市加快推进生态环境治理体系和治理能力现代化,编制《乌鲁木齐市生态环境保护“十四五”规划》等专项规划,发布实施《乌鲁木齐市“三线一单”生态环境分区管控方案》,积极推行清洁生产改造,大力发展新能源产业,提升绿色低碳技术、服务供给能力,促进企业绿色转型,城市生态环境质量明显改善,生态安全格局稳定确立,生态红线全面落地,生态环境治理能力明显提升。但受自然环境、资源禀赋、经济区位、政策支持等因素影响,乌鲁木齐市以重化工为主的产业结构、以煤为主的能源结构以及以公路货运为主的运输结构现状短期内还无法得到根本性转变,生态环境保护结构性、根源性压力仍将持续,全面实现城市绿色可持续发展任重道远。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

以西部城市乌鲁木齐市作为研究区,选择

2007~2021 年为研究年份,数据来源于《新疆统计年鉴》《乌鲁木齐统计年鉴》及《乌鲁木齐市国民经济和社会发展统计公报》。一部分数据直接来源于上述年鉴;另一部分数据通过查找得到基础数据后计算得到;对于个别缺失数据,采取相邻年份平均值、移动平均法等方法合理处理。

2.2 DPSIR 模型

DPSIR 模型包括驱动力(Driving Forces)、压力(Pressure)、状态(State)、影响(Impact)和响应(Responses)5 个模块。欧洲环境署(European Environment Agency,EEA)在 PSR 模型和 DSR 模型的基础上衍生了 DPSIR 模型概念框架^[26-28]。近年来,DPSIR 模型已成为了国内外学者在研究和评价关于资源、环境、社会、经济发展等问题时常用的方法^[29],可将问题分为驱动力(D)、压力(P)、状态(S)、影响(I)和响应(R)5 个要素,通过分析问题中各要素之间的相互作用使问题产生的原因和解决方

案同时体现在模型中,为开展高质量发展目标下城市绿色发展研究奠定理论基础。DPSIR 模型内涵可以表示为经济和社会驱动力长期发展对社会、资源环境造成压力,进而引起经济、社会、资源和环境系统状态发生变化并产生一系列影响,随后采取一些响应措施引导其向更好的方向发展(图 2)。

本文在参考相关评价研究^[30-32]的基础上,通过分析乌鲁木齐市的实际情况,并结合区域自然环境的发展趋势,根据目的性、系统性、合法性、可操作性等原则,与 DPSIR 模型相结合构建指标体系。指标体系共包含 3 个层次:第一层是目标层,度量所评价城市的绿色发展水平;第二层是准则层,包含了驱动力、压力、状态、影响、响应五大系统;第三层是指标层,由 37 个具体基础性指标组成。结合较为成熟的熵权法确定各指标的权重,客观性强,避免了人为主观因素对各评价指标的影响。具体评价指标内容见表 1。

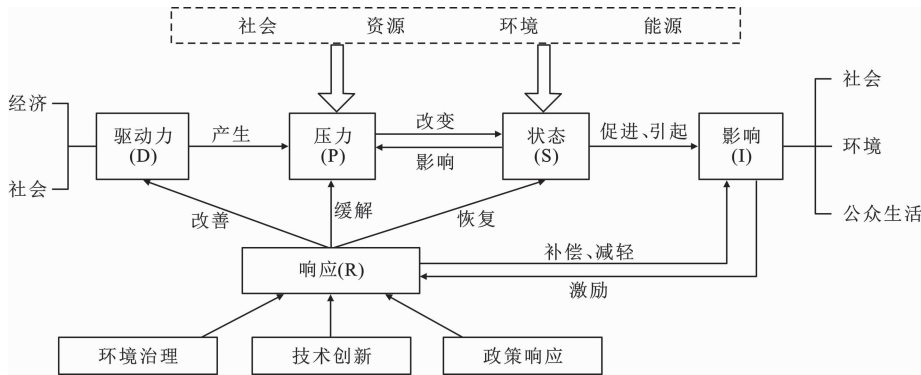


图 2 城市绿色发展水平 DPSIR 模型框架

Fig. 2 DPSIR Model Framework of Urban Green Development Level

2.3 熵权 TOPSIS 模型

TOPSIS 模型是由 Hwang 等于 1981 年初次提出,其依据有限个评价对象与理想对象的接近度进行排序,是一种在所有评价对象中进行相对优劣评价的方法^[33-34]。本文基于 TOPSIS 模型,利用熵权法赋值,旨在通过综合得分表现对乌鲁木齐市绿色发展水平进行评价。具体过程主要包括:规范化处理数据;确定各指标权重,构建加权的决策矩阵;确定正、负理想解;计算距离;计算历年绿色发展水平各指标的相对贴近度。

(1)规范化处理数据。采用极值法对各评价指标数据进行标准化处理,消除绿色发展评价指标体系各指标间量纲和数量级的影响。该方法可将数据固定在区间(0,1)。正向指标值越大,标准化后的值越接近于 1;负向指标值越大,标准化后的值越接近于 0。乌鲁木齐市绿色发展的评价指标标准化矩

阵为

$$\begin{cases} X_{ij}^{+} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \\ X_{ij}^{-} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{ij}^{+} 、 X_{ij}^{-} 分别为第 i 个指标第 j 年的标准化正、负指标; x_{ij} 为第 i 个指标第 j 年的初始值; $i=1, 2, \dots, m, m$ 为指标数; $j=1, 2, \dots, n, n$ 为年份数。

(2)确定各指标权重,构建加权的决策矩阵。采用熵权法确定指标权重,结合熵权构建加权规范化评价矩阵(V)。确立各指标的权重 $W=(W_1, W_2, \dots, W_m)$,建立加权的规范化矩阵为

$$V = X_{ij} \times W = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表 1 基于 DPSIR 模型的乌鲁木齐市绿色发展指标体系

Table 1 Green Development Index System of Urumqi Based on DPSIR Model

目标层	准则层	要素层	指标层	指标性质	指标变量	指标层权重	
绿色发展 评价指标 体系	驱动力	经济发展	人均 GDP/(万元·人 ⁻¹)	+	X ₁	0.025 7	
			GDP 增长率/%	+	X ₂	0.034 8	
			城镇居民可支配收入/元	+	X ₃	0.040 0	
		社会发展	人口自然增长率/%	—	X ₄	0.031 9	
			城镇化率/%	+	X ₅	0.018 5	
			恩格尔系数/%	—	X ₆	0.044 9	
			在岗职工平均工资/元	+	X ₇	0.030 3	
		压力	社会压力	人口密度/(人·km ⁻²)	—	X ₈	0.024 8
			用水压力	人均日生活用水量/t	—	X ₉	0.020 4
				居民家庭用水量/10 ⁴ t	—	X ₁₀	0.014 7
	资源消耗压力		单位 GDP 能耗/(吨标准煤·万元 ⁻¹)	—	X ₁₁	0.010 6	
			单位 GDP 电耗/(kW·h·万元 ⁻¹)	—	X ₁₂	0.037 2	
	环境压力		年人均城市生活垃圾清运量/10 ⁴ t	—	X ₁₃	0.030 0	
			工业废水排放量/10 ⁴ t	—	X ₁₄	0.040 8	
			工业 SO ₂ 排放量/t	—	X ₁₅	0.035 6	
			工业烟(粉)尘排放量/t	—	X ₁₆	0.014 6	
	状态		水资源状况	全年供水总量/10 ⁴ t	+	X ₁₇	0.039 0
		人均水资源量/(m ³ ·人 ⁻¹)		+	X ₁₈	0.023 0	
		资源禀赋	人均建成区面积/(m ² ·人 ⁻¹)	+	X ₁₉	0.016 5	
			人均农作物播种面积/(m ² ·人 ⁻¹)	+	X ₂₀	0.023 8	
		社会状态	人均城市道路面积/m ²	+	X ₂₁	0.052 9	
			人均住房建筑面积/m ²	+	X ₂₂	0.030 8	
		影响	社会影响	第三产业占 GDP 的比重/%	+	X ₂₃	0.036 2
				城镇登记失业率/%	—	X ₂₄	0.023 5
			环境质量	空气质量优良天数比例/%	+	X ₂₅	0.028 8
				建成区绿化覆盖率/%	+	X ₂₆	0.015 8
	公众生活		每万人拥有公共交通工具/(标台·万人 ⁻¹)	+	X ₂₇	0.012 3	
			每万人拥有卫生技术人员/(人·万人 ⁻¹)	+	X ₂₈	0.031 3	
			在校大学生数/万人	+	X ₂₉	0.034 8	
	响应	环境治理	人均当年新增造林面积/(m ² ·人 ⁻¹)	+	X ₃₀	0.014 9	
			污水处理率/%	+	X ₃₁	0.025 4	
			生活垃圾无害化处理率/%	+	X ₃₂	0.012 0	
		技术创新	专利授权量/项	+	X ₃₃	0.037 5	
			R&D 经费内部支出占 GDP 比重/%	+	X ₃₄	0.018 2	
		政策响应	节能环保支出占一般公共预算支出比重/%	+	X ₃₅	0.032 2	
			科教文卫支出占一般公共预算支出比重/%	+	X ₃₆	0.023 8	

注:“+”表示对应指标为正向指标,正向指标的数值越大,代表评价结果越好;“—”表示对应指标为负向指标,负向指标的数值越小,代表评价结果越好。

式中: X_{ij} 为第*i*个指标第*j*年的标准化值; v_{ij} 为第*i*个指标第*j*年的标准化值与权重的乘积。

(3)确定正、负理想解。 $\max V_{ij}$ 是第*i*个指标第*j*年的最大值,将 V^+ 设定为正理想解; $\min V_{ij}$ 是第*i*个指标第*j*年的最小值,将 V^- 设定为负理想解。其表达式为

$$\begin{cases} V^+ = \{\max V_{ij} | i=1,2,\cdots,m\} = \{V_1^+, V_2^+, \cdots, V_m^+\} \\ V^- = \{\min V_{ij} | i=1,2,\cdots,m\} = \{V_1^-, V_2^-, \cdots, V_m^-\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{ij} 为加权决策评价矩阵 \mathbf{V} 中第*i*个指标第*j*年的值; V_i^+ 、 V_i^- 分别为第*i*个指标的正、负理想解。

(4)计算距离。乌鲁木齐市绿色发展指标到正、

负理想解的距离为

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V^+)^2} \tag{4}$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ij} - V^-)^2} \tag{5}$$

式中： D_j^+ 表示到正理想解的距离， D_j^+ 越小越接近正理想解； D_j^- 表示第 j 年到负理想解的距离， D_j^- 越小越接近负理想解。

(5)计算历年绿色发展水平各指标的相对贴进度(T_j)。其表达式为

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \tag{6}$$

式中： $T_j \in [0, 1]$ ，其数值越大，表明第 j 年绿色发展水平越接近最优水平。

根据不同年份相对贴进度的大小，可以确定研究区绿色发展水平的高低，并进行优劣排序。

2.4 障碍度模型

判断乌鲁木齐市绿色发展的主要影响因素，有针对性地制定城市绿色可持续发展相关政策^[35]，有必要引入障碍度模型。其具体计算公式为

$$O_{ij} = \frac{(1 - X_{ij}) \times W_i \times 100\%}{\sum_{i=1}^m (1 - X_{ij}) \times W_i} \tag{7}$$

式中： O_{ij} 为第 i 个指标对第 j 年绿色发展水平的障碍度； W_i 为第 i 个指标的权重。

在分析各单项因子对总目标限制程度的基础上，进一步研究各准则层对城市绿色发展的障碍度。其计算公式为

$$U_i = \sum O_{ij} \tag{8}$$

式中： U_i 为总目标障碍度。

3 结果分析

3.1 绿色发展综合水平

运用 DPSIR-TOPSIS 模型对乌鲁木齐市 2007~2021 年现状数据进行分析，得到绿色发展综合评价指数(图 3)。

由图 3 可知，2007~2021 年乌鲁木齐市绿色发展状况不断改善，综合评价指数由 2007 年的 0.265 增加至 2021 年的 0.625，呈现出显著上升态势。近年来，乌鲁木齐市通过在空间、资源、生态、生活各类场景融入“绿色优先”理念，加快构建高质量发展格局。①空间“绿色优先”，产业转型升级。通过严把项目准入，严禁“三高”项目进驻，严格落实环境影响评价及重点项目“三同时”制度，对不符合要求的项

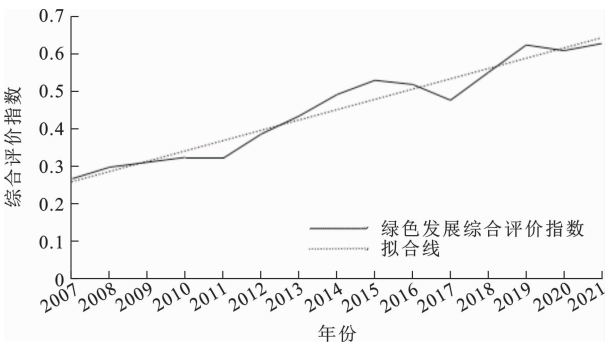


图 3 2007~2021 年乌鲁木齐市城市绿色发展综合评价指数

Fig. 3 Comprehensive Evaluation Index of Urban Green Development of Urumqi from 2007 to 2021

目“一票否决”。同时，培育和扶持知识技术密集、成长潜力大、综合效益好的战略性新兴产业，打造特色鲜明的战略性新兴产业集聚园区，围绕新疆软件园、“天山云计算”基地、乌鲁木齐市云计算中心等信息产业园区，推进移动互联网、大数据、人工智能、云计算与实体产业加速融合。②资源“绿色优先”，能源绿色低碳转型。能源是经济社会发展的重要物质基础，也是碳排放的最主要来源，减少燃煤污染物排放，加快构建清洁低碳高效的能源体系，推动煤炭消费尽早达峰。大力推行绿色设计，加强氢冶金、氢化工和氢交通等领域对工业副产氢提纯利用技术的应用，大力发展氢能特别是绿氢。③生态“绿色优先”，提升生态系统碳汇能力。统筹山、水、林、田、湖、草、沙等环境要素总体规划，实现绿色全覆盖。实施“树上山”，逐步实现“城在林中”；通过道路绿化、“口袋”公园，见缝插绿、提档升级，实施“地变绿”，营造开窗见景、出门见绿的环境，推动城市绿色发展。优良的生态环境具有高质量的固碳能力。④生活“绿色优先”，践行低碳环保理念。从 2015 年开始，乌鲁木齐市经济技术开发区在小绿谷水景公园、高铁片区等地区建设了 38 km 的健身步道，形成安全、便捷的慢行交通系统；设置共享单车，推动绿色环保出行。2013 年开始，乌鲁木齐市大力推动生活垃圾分类回收，打造垃圾分类试点小区。在整个研究期内，随着各项生态环境保护政策措施的陆续颁布和落地实施，多项举措促进乌鲁木齐市绿色发展水平逐步提升，生态环境压力有所降低。2013 年，乌鲁木齐市成功创建国家园林城市；2014 年，乌鲁木齐市荣膺全国“首批创建生态文明典范城市”称号，并成功入选国家第三批节能减排财政政策综合示范城市。

3.2 绿色发展的驱动力、压力、状态、影响和响应
社会经济发展、快速城镇化发展、人民生活水平

提高、人口增长率提高等因素是推进城市绿色发展的长期驱动力^[27],也刺激人口聚集,增加能源消耗,生产生活污染排放和土地占用,对城市绿色发展产生直接压力影响。在驱动力和压力的共同作用下,系统会呈现出绿色发展的状态和趋势,而这种状态并不稳定,往往因阶段性影响的反馈而失衡。反馈到城市经济社会中的影响因素促使社会经济系统做出响应,需要制定改善自然环境、弥补生态损失的相关政策,促使城市生态系统与自然环境、人类社会的良性互动耦合。具体分析结果见表 2。

表 2 2007~2021 年乌鲁木齐市城市绿色发展
各子系统指数

Table 2 Indexes of Each Subsystem of Urban Green Development of Urumqi from 2007 to 2021					
年份	子系统指数				
	驱动力	压力	状态	影响	响应
2007	0.235	0.363	0.243	0.260	0.189
2008	0.227	0.402	0.287	0.206	0.281
2009	0.196	0.457	0.287	0.231	0.267
2010	0.273	0.461	0.261	0.259	0.336
2011	0.285	0.377	0.271	0.310	0.397
2012	0.337	0.384	0.319	0.401	0.534
2013	0.349	0.438	0.398	0.473	0.558
2014	0.471	0.510	0.399	0.559	0.572
2015	0.544	0.605	0.443	0.540	0.552
2016	0.535	0.497	0.468	0.608	0.492
2017	0.641	0.438	0.361	0.502	0.427
2018	0.740	0.453	0.513	0.566	0.501
2019	0.688	0.520	0.699	0.671	0.504
2020	0.663	0.563	0.594	0.631	0.600
2021	0.756	0.548	0.571	0.683	0.658

(1)绿色发展的驱动力。研究期内,乌鲁木齐市驱动力指标层的指数总体呈曲折上升的态势。这反映近年来乌鲁木齐市经济发展方式实现转变,经济社会发展取得长足进步,人均 GDP 呈现出逐年上升的态势,尽管近 15 年来物价指数上升,但城镇居民人均可支配收入增加了 4.06 倍,居民家庭恩格尔系数不断降低,城市居民生活也得到持续改善。随着人民对物质文化生活水平要求的不断提高,环境保护问题逐渐成为关注的焦点。总体而言,乌鲁木齐市社会经济处于健康良性发展阶段;驱动力系统评价呈波动趋势,但从整体上来看,经济社会发展对绿色发展水平的正向驱动作用增大。

(2)绿色发展的压力。研究期内,乌鲁木齐市压力指标层的指数呈现先上升后下降再上升的态势,总体从 2007 年的 0.363 小幅上升到 2021 年的

0.548。2012 年压力大幅提升,得益于 2012 年初乌鲁木齐市大力调整供热能源结构,全面实施“煤改气”工程。2010 年之前,作为全国人均耗煤量最高的城市,煤炭是乌鲁木齐市主要的供暖燃料来源,约占全年耗煤总量的 2/3 以上;加之市区三面环山,供暖长达半年,风速小,烟尘和 SO₂ 等污染物不易扩散,一度造成城市大气污染严重。2013 年,乌鲁木齐市投入 500 多亿元实施以“煤改气”为核心的大气污染综合治理工程,天然气成为供暖燃料的来源,使乌鲁木齐市成为全国首个气化城市,有效推进了城市能源消费结构的优化和绿化。综上所述,人口密度、供水压力、工业“三废”和 GDP 能/电耗标准等因素都会影响城市生态环境绿色可持续发展的压力系统。随着城市人口密度持续增加,工业产业布局呈现规模化聚集,资源环境现实压力依旧制约着区域绿色发展水平的提升。

(3)绿色发展的状态。研究期内,乌鲁木齐市绿色发展状态指标层的指数历年有升有降,呈波动变化趋势,说明其绿色发展状态极不稳定,发展动力与承受压力受到状态、政策、治理响应等的影响。近年来,乌鲁木齐市城镇化率不断提升,建成区面积大幅增加,从 2007 年的 261.88 km² 扩展到 2021 年的 536.20 km²,增加了 2.048 倍。乌鲁木齐市作为“一带一路”倡议重要节点城市,是面向中亚地区人员、经贸往来的重要交通枢纽,通过建立公路、铁路、航空等立体大交通网,形成了“东联西出”“西引东来”的国际大通道,有利地推动了地区国际商贸、物流与科技、文化交流,区域整体环境状况发展相对较好,但随着城市功能的拓展与社会经济活动的活跃,城市生态环境承载力存在较大压力,水资源状况、人均耕地面积等指标压力较大,有待进一步提升。

(4)绿色发展的影响。研究期内,乌鲁木齐市影响指标层的指数整体呈现上升波动态势。随着经济高质量发展和人民对美好生活的追求,环境保护问题也越来越引起社会各界的广泛关注,绿色生态环保的观念深入人心。同时,随着产业结构转型,第三产业占比也呈现出上升态势,由 2007 年的 59.42% 增长到 2021 年的 71.07%。2011 年以来,乌鲁木齐市持续实施“民生改善年”活动,更高的教育水平、更满意的收入、更完善的社会保障制度、更优质高效的医疗卫生服务体系等举措显著改善了民生。“十二五”时期,乌鲁木齐市用于民生领域支出达 1 236 亿元,占一般公共预算支出的 71.4%,较“十一五”时期增长 3.2 倍。2015 年,乌鲁木齐市首次跻身“中

国十大幸福城市”，因此，影响指标层的贴近度指数也呈现上升趋势，对该区域绿色发展水平的不断提高起到了正向促进作用。

(5)绿色发展的响应。研究期内，乌鲁木齐市绿色发展响应指标层的指数整体呈上升趋势。响应系统评价基数最小，从 2007 年的 0.189 增加到 2021 年的 0.658，增幅最大，达到 168%。这是因为近年来随着生态环境保护政策的落地实施，乌鲁木齐市污水处理率和生活垃圾无害化处理率等提升明显，分别从 2007 年的 54.21%、65.41% 增加到 2021 年的 99.30%、100%。建成区绿化覆盖率不断增加，全市大力推进荒山生态修复、水系绿化、环城生态圈建设、老城区改造提升等生态修复和城市修补工程，逐步打造错落有致、绿树成荫的城市绿色空间体系。另外，作为新疆创新创业的主阵地，2017 年乌鲁木齐市启动国家“双创”示范城市建设，大力推进国家创新型城市和各类“双创”基地建设，激发全社会创新创业活力。2015 年后，受到政策指标的影响，响应指数明显下降后又略微回升。乌鲁木齐市需继续采取积极的绿色低碳政策与推进措施，加大社会公共财政支出，侧重公共交通、节能环保、科教文卫及科技创新等方面的投入力度。

3.3 绿色发展的障碍因子识别

在上述整体评价的基础上，按照准则层和指标层指标厘定影响乌鲁木齐市绿色发展水平的主要障碍因子，选择比重位于前 5 位的指标为主要障碍因子，并对其进行排序分析(表 3)。由表 3 可知，主要障碍因子大致可以分为两个阶段：①2007~2013 年，主要障碍因子为人均城市道路面积(X_{21})、恩格尔系数(X_6)、城镇居民可支配收入(X_3)；其次，出现次数较多的是第三产业占 GDP 的比重(X_{23})、工业废水排放量(X_{14})、工业 SO_2 排放量(X_{15})。这表明该阶段乌鲁木齐市经济发展水平相对较弱，人民生活水平有待提升，在制定出台相关政策加强生态环境保护、推动产业结构优化调整等方面存在不足。此外，城市基础设施相对滞后，如 2007 年全国城市人均道路面积为 11 m^2 ，而乌鲁木齐市人均城市道路面积仅为 7.5 m^2 ，中心城区交通拥堵状况十分突出。②2014~2021 年，乌鲁木齐市在提升经济水平的同时兼顾基础设施建设并优化产业结构，因此，恩格尔系数(X_6)、城镇居民可支配收入(X_3)、人均城市道路面积(X_{21})、第三产业占 GDP 的比重(X_{23})已不再是制约乌鲁木齐市绿色发展的关键因素；随着城镇化发展和人口规模增加，GDP 增长率(X_2)成为

表 3 2007~2021 年乌鲁木齐市绿色发展水平评价指标层主要障碍因子及障碍度
Table 3 Main Obstacle Factors and Degree of Obstacle in the Evaluation Indicator Layer of Green Development Level of Urumqi from 2007 to 2021

年份	项目	指标排序				
		第一	第二	第三	第四	第五
2007	障碍因子	X_{21}	X_6	X_3	X_{17}	X_{22}
	障碍度	7.89%	5.32%	5.20%	5.07%	4.93%
2008	障碍因子	X_{21}	X_{22}	X_6	X_3	X_{14}
	障碍度	8.62%	5.65%	5.50%	5.25%	5.24%
2009	障碍因子	X_{21}	X_6	X_{14}	X_3	X_{33}
	障碍度	9.11%	5.90%	5.85%	5.46%	5.15%
2010	障碍因子	X_{21}	X_{14}	X_6	X_{23}	X_3
	障碍度	9.23%	5.95%	5.85%	5.38%	5.42%
2011	障碍因子	X_{21}	X_6	X_{22}	X_{23}	X_{15}
	障碍度	9.12%	6.71%	5.70%	5.38%	5.35%
2012	障碍因子	X_{21}	X_6	X_{23}	X_3	X_{15}
	障碍度	10.21%	6.82%	5.89%	5.35%	5.04%
2013	障碍因子	X_{21}	X_6	X_{14}	X_4	X_{23}
	障碍度	9.42%	7.41%	5.63%	5.29%	4.78%
2014	障碍因子	X_{21}	X_{17}	X_4	X_{14}	X_{33}
	障碍度	9.89%	6.65%	6.50%	6.13%	5.10%
2015	障碍因子	X_{21}	X_{17}	X_{25}	X_4	X_{35}
	障碍度	10.53%	7.35%	6.40%	5.52%	4.23%
2016	障碍因子	X_2	X_{17}	X_4	X_{14}	X_{25}
	障碍度	8.04%	7.48%	6.95%	5.81%	5.61%
2017	障碍因子	X_2	X_{12}	X_{17}	X_{25}	X_4
	障碍度	8.37%	7.15%	5.47%	5.24%	4.23%
2018	障碍因子	X_2	X_{12}	X_{13}	X_{35}	X_{36}
	障碍度	9.13%	8.48%	6.84%	5.72%	5.43%
2019	障碍因子	X_{12}	X_{35}	X_2	X_4	X_{22}
	障碍度	9.20%	7.73%	6.80%	6.44%	6.24%
2020	障碍因子	X_2	X_{12}	X_{35}	X_{13}	X_8
	障碍度	8.90%	8.26%	7.69%	4.93%	6.88%
2021	障碍因子	X_{12}	X_2	X_{17}	X_{13}	X_8
	障碍度	10.97%	6.88%	6.38%	5.69%	5.05%

主要障碍因子。这表明城市社会经济发展进入缓慢变革期，单纯追求地区生产总值的增长已不是唯一重要的目标，而追求生态经济协同高质量发展、促进产业经济升级与转型成为区域发展主旨。另外，单位 GDP 电耗(X_{12})、全年供水总量(X_{17})、人口自然增长率(X_4)、节能环保支出占一般公共预算支出比重(X_{35})等因子也产生一定作用。乌鲁木齐市地处干旱地区，生态系统较为脆弱，降水量少，科学合理地利用水资源对于生产生活供水和城市生态良性发展至关重要，同时还需提高能源使用效率，节约能源

资源,加快构建资源节约型社会。

根据各项指标障碍度的分析结果可以得到各子系统的障碍度变化(图 4)。从图 4 可以看出:准则层 5 个子系统对乌鲁木齐市绿色发展水平的障碍度变化差异显著。整体上,驱动力、影响和响应的障碍度呈下降趋势,而压力和状态的障碍度在波动中呈上升态势。乌鲁木齐市 2021 年绿色发展水平各子系统障碍因素从大到小依次为压力、状态、影响、驱动力,即驱动力的障碍程度不断趋缓,但随着社会经济的快速发展,区域系统承受着较大的环境压力、水资源压力、资源消耗压力及社会压力,导致诸如资源消耗、生态系统退化的环境状态及社会状态障碍程度的加深,制约(阻碍)区域的绿色可持续发展。因此,推进城市绿色发展需更加关注压力和状态的优化和调整,同时兼顾驱动力、影响和响应。

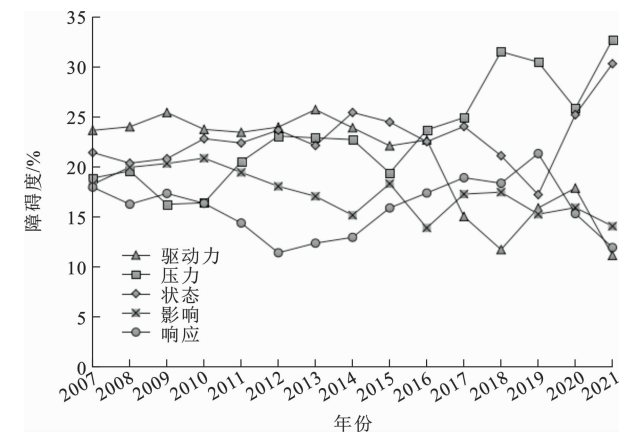


图 4 乌鲁木齐市绿色发展水平准则层子系统障碍因子诊断

Fig. 4 Diagnosis of Obstacle Factors of Green Development Level Criteria Subsystem of Urumqi

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)从整体来看,乌鲁木齐市绿色发展水平在 2007~2021 年波动较大,其绿色发展综合评价指数从 0.265 上升至 0.625。其数值越接近 1,绿色发展水平越高,因此,乌鲁木齐市绿色发展水平还有较大的提升空间。

(2)从各子系统来看,驱动力、压力、状态、影响、响应都有不同程度的提高。驱动力增幅最大,压力增幅最小。

(3)从障碍因素来看,乌鲁木齐市绿色发展的主要障碍因素为压力,其次是状态。从单个因子来看,目前制约乌鲁木齐市绿色发展水平的主要障碍因子

为 GDP 增长率、单位 GDP 电耗、全年供水总量、人口自然增长率、节能环保支出占一般公共预算支出比重等。

4.2 讨论

绿色发展理论在实践中不断丰富和深化,呈现出生态经济学、政策管理学、环境发展学等学科交叉趋势。学者们结合河流流域、城市群、主体功能区等不同区域特点有针对性地开展实证研究,得到相对一致性的绿色发展水平理论评价依据^[23,36-38]。本文在充分借鉴前人研究基础上,综合考量干旱区绿洲城市绿色发展中资源、环境、经济、社会等多维因素的博弈关系,将其绿色发展综合评价水平测度置于 DPSIR 模型框架下,从“经济-社会-生态环境”三维视角全面透视乌鲁木齐市绿色发展的机理、规律、生态效应、影响因素的现实与理论问题。此外,高质量发展要求正确把握生态环境保护和经济发展的关系,研究区正处于城市发展转型关键时期,面临经济增长与生态环境保护双重巨大压力,产业、社会、环境政策对区域绿色发展的目标导向、社会价值、成效应用等具有深刻影响,一定程度上制约或促进城市绿色发展水平、效率及发展阶段。本文在建立障碍度模型时引入自然影响因子,综合识别不同时段城市绿色发展的主要障碍因子变化及其原因,在研究思路和研究方法上具有一定创新性。

2015 年以来,乌鲁木齐市 GDP 增速开始放缓,经济发展面临转型升级,城市发展方向与思路亟需调整优化。高质量绿色发展是西部地区城市可持续发展的必由之路。坚持生态优先,推进环境规制,对城市高质量发展具有重要意义^[39]。“一带一路”倡议、生态文明建设及“双碳”目标的推进,为乌鲁木齐市城市绿色发展注入生机动力;干旱区特殊的生态环境形成一定的压力与阻碍,在城市不断更新发展的社会经济环境状态下必然产生多维多变的深刻影响,并需要来自制度、政策与理念层面的积极响应。本文通过分析测度乌鲁木齐市绿色发展水平动态变化,识别阻碍城市绿色发展的阶段性影响因子,进一步厘清城市绿色发展机理,总结城市绿色发展存在的问题,并据此提出以下点对策建议,以期为实现干旱区绿洲城市绿色高质量可持续发展提供借鉴。

(1)发挥资源禀赋优势,加快绿色低碳转型。贯彻落实《绿色产业指导目录(2019 年版)》,严格环境准入要求,从源头上防止环境污染,加强能耗“双控”管理,推进工业结构调整和产业升级;大力发展绿色

经济,合理限制发展高耗能、高耗水产业。

(2)推动绿色技术创新,完善环境治理立法。建立并完善绿色技术标准体系、产品全生命周期管理、绿色金融等制度,塑造绿色技术创新环境;构建生态文明要求的考核评价体系,将环境污染、资源消耗、生态效益纳入城市经济社会发展评价体系中。

(3)倡导绿色消费,构建资源节约型社会。积极引导社会参与,实现经济社会向绿色发展方式和生活方式的转变;扎实推进落后产能淘汰,着力培育节能型、环保型的产业集群,倡导城市低碳生活等。

(4)综合权衡绿色发展指标,实时调整绿色发展思路。根据本文得到的障碍度结果,人口指标(人口自然增长率、人口密度)是影响绿色发展水平的主要因素,既可以看作城市绿色发展的压力,也可作为城市发展的驱动力。人口聚集会形成资源吸引力,但人口过于聚集又会导致资源分配不均与承载压力,因此,城市绿色发展需综合权衡指标,合理控制调整各类影响因子。

参考文献:

References:

- [1] 王晓红,张少鹏,李宣廷.创新型城市建设对城市绿色发展的影响研究[J]. 科研管理,2022,43(8):1-9.
WANG Xiao-hong, ZHANG Shao-peng, LI Xuan-ting. Research on the Impact of Innovative City Construction on the Green Development of Cities[J]. Science Research Management,2022,43(8):1-9.
- [2] 窦睿音,焦贝贝,张文洁,等.西部资源型城市绿色发展效率时空分异与驱动力[J]. 自然资源学报,2023,38(1):238-254.
DOU Rui-yin, JIAO Bei-bei, ZHANG Wen-jie, et al. Research on Spatiotemporal Heterogeneity and Driving Forces of Green Development Efficiency in Resource-based Cities of Western China[J]. Journal of Natural Resources,2023,38(1):238-254.
- [3] 陈飞,李永贺,于艺婷,等.资源消耗对城市绿色发展水平的影响机制分析:以上海为例[J]. 软科学,2023,37(4):136-144.
CHEN Fei, LI Yong-he, YU Yi-ting, et al. The Effects and Mechanism of Resource Consumption on the Level of Urban Green Development: A Case Study of Shanghai[J]. Soft Science,2023,37(4):136-144.
- [4] NOROUZI N, FANI M, TALEBI S. Green Tax as a Path to Greener Economy: A Game Theory Approach on Energy and Final Goods in Iran[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2022,156:111968.
- [5] REN S M, LI L Q, HAN Y Q, et al. The Emerging

Driving Force of Inclusive Green Growth: Does Digital Economy Agglomeration Work? [J]. Business Strategy and the Environment,2022,31(4):1656-1678.

- [6] 赵莹,魏晓博.数字经济赋能区域绿色发展的效应与机制研究:基于技术创新和产业升级的中介效应[J]. 西南大学学报(自然科学版),2023,45(8):21-30.
ZHAO Xuan, WEI Xiao-bo. Effect and Mechanism of Digital Economy Empowering Regional Green Development: Based on the Mesomeric Effect of Technological Innovation and Industrial Upgrading[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2023,45(8):21-30.
- [7] PEARCE D W, MARKANDYA A, BARBIER E B. Blueprint for a Green Economy[M]. London: Earthscan Publications Ltd.,1989.
- [8] 胡鞍钢,周绍杰.绿色发展:功能界定、机制分析与发展战略[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(1):14-20.
HU An-gang, ZHOU Shao-jie. Green Development: Functional Definition, Mechanism Analysis and Development Strategy[J]. China Population, Resources and Environment,2014,24(1):14-20.
- [9] MIKETA A, MULDER P. Energy Productivity Across Developed and Developing Countries in 10 Manufacturing Sectors: Patterns of Growth and Convergence[J]. Energy Economics,2005,27(3):429-453.
- [10] LIU X Q, WANG X, LU F Y, et al. Evaluation of the Governance Efficiency of Water Environmental Governance Efficiency in Yangtze River Delta from the Perspective of Multivariate Synergies[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(4):2347.
- [11] SUEYOSHI T. Damages to Return with a Possible Occurrence of Eco-technology Innovation Measured by DEA Environmental Assessment[J]. Journal of Economic Structures,2017,6(1):7.
- [12] SUN Y H, DING W W, YANG Z Y, et al. Measuring China's Regional Inclusive Green Growth[J]. Science of the Total Environment,2020,713:136367.
- [13] DING Y H, HAN Y. Low Carbon Economy Assessment in China Using the Super-SBM Model[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society,2022,2022:4690140.
- [14] ZHAO X, MAHENDRU M, MA X W, et al. Impacts of Environmental Regulations on Green Economic Growth in China: New Guidelines Regarding Renewable Energy and Energy Efficiency[J]. Renewable En-

- ergy, 2022, 187: 728-742.
- [15] ZHANG J X, CHANG Y, ZHANG L X, et al. Do Technological Innovations Promote Urban Green Development? —A Spatial Econometric Analysis of 105 Cities in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182: 395-403.
- [16] 翁异静, 卓莹莹, 黄扬飞. 长江经济带城市群绿色发展空间分布及障碍因子分析[J]. 林业经济, 2022, 44(3): 37-49.
- WENG Yi-jing, ZHUO Ying-ying, HUANG Yang-fei. Spatial Distribution and Obstacle Factor Analysis of Green Development of Urban Agglomeration in the Yangtze River Economic Belt[J]. Forestry Economics, 2022, 44(3): 37-49.
- [17] 刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 等. 陕西省城市绿色增长水平时空演变特征及影响因素解析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 200-220.
- LIU Yu-feng, YUAN Zhi-hua, GUO Ling-xia, et al. Spatio-temporal Characteristics of Urban Green Growth Level and Its Influencing Factors in Shaanxi Province[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 200-220.
- [18] 秦炳涛, 柳佳男. 长三角绿色发展效率时空演变及空间溢出分析: 基于 Super-SBM 模型和 Tobit 回归[J]. 生态经济, 2022, 38(11): 64-71.
- QIN Bing-tao, LIU Jia-nan. Analysis on Spatial and Temporal Evolution and Spatial Spillover of Green Development Efficiency in the Yangtze River Delta: Based on Super-SBM Model and Tobit Regression[J]. Ecological Economy, 2022, 38(11): 64-71.
- [19] 鹿晨昱, 黄萍, 张彤, 等. 甘肃省绿色发展效率时空演化与驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 305-315.
- LU Chen-yu, HUANG Ping, ZHANG Tong, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of the Green Development Efficiency in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 305-315.
- [20] 刘浩然. 京津冀地区绿色经济效率测度及影响因素研究: 基于超效率 SBM 和 Tobit 模型的分析[J]. 生态经济, 2023, 39(4): 67-73.
- LIU Hao-ran. Study on the Measurement and Influencing Factors of Green Economic Efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei Region: An Analysis Based on Ultra-efficient SBM and Tobit Models[J]. Ecological Economy, 2023, 39(4): 67-73.
- [21] 邹磊, 刘慧媛, 王飞宇, 等. 长江中游城市群绿色发展水平的地区差异及其影响因素[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(8): 1462-1475.
- ZOU Lei, LIU Hui-yuan, WANG Fei-yu, et al. Regional Difference and Influencing Factors of the Green Development Level in the Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River[J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(8): 1462-1475.
- [22] 王钰, 王小梅. 兰西城市群开发区的绿色发展水平及限制因素分析[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(4): 32-38.
- WANG Yu, WANG Xiao-mei. Analysis on Green Development Level and Restricting Factors of Lanzhou-Xining Urban Agglomeration Development Zone[J]. Areal Research and Development, 2021, 40(4): 32-38.
- [23] 翁异静, 汪夏彤, 陈思静. 浙江三大城市群绿色发展效率时空分异及影响机理[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 509-516.
- WENG Yi-jing, WANG Xia-tong, CHEN Si-jing. Spatial-temporal Differentiation and Influencing Mechanism of Green Development Efficiency in Three Major Urban Agglomerations in Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 509-516.
- [24] 任嘉敏, 马延吉. 地理学视角下绿色发展研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1196-1209.
- REN Jia-min, MA Yan-ji. Research Progress and Prospects of Green Development from the Perspective of Geography[J]. Progress in Geography, 2020, 39(7): 1196-1209.
- [25] 盛方富, 李志萌. 绿色长江经济带生态环保协同合作研究进展与展望[J]. 生态经济, 2021, 37(8): 182-187.
- SHENG Fang-fu, LI Zhi-meng. Research Progress and Prospect of Ecological and Environmental Cooperation in the Green Yangtze River Economic Zone[J]. Ecological Economy, 2021, 37(8): 182-187.
- [26] 郭嘉嘉, 李占斌, 李鹏, 等. 基于 DPSIR 模型的陕西省水安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 149-155.
- GUO Jia-jia, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Evaluation of Water Security and Obstacle Factor Diagnosis of Shaanxi Province Based on DPSIR Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 149-155.
- [27] 金丹, 董晓. 基于 DPSIR 模型的城市绿色交通发展评价研究[J]. 生态经济, 2018, 34(5): 79-85.
- JIN Dan, DONG Xiao. Research on Evaluation of Urban Green Transportation Development Based on DPSIR Model[J]. Ecological Economy, 2018, 34(5): 79-85.

- [28] 李 帆,贾 夏,赵永华,等.基于 DPSIR 模型的黄土高原生态敏感性演变格局及驱动力分析[J].农业工程学报,2023,39(9):241-251,303.
- LI Fan, JIA Xia, ZHAO Yong-hua, et al. Evolutionary Pattern and Driving Forces of Ecological Sensitivity in the Loess Plateau Using DPSIR Model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(9): 241-251, 303.
- [29] 蒋忙舟,杨 志,张晓明,等.基于 DPSIR 模型的西北五省区水安全评价[J].地球科学与环境学报,2022,44(3):535-544.
- JIANG Mang-zhou, YANG Zhi, ZHANG Xiao-ming, et al. Assessment of Water Security in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai and Xinjiang, Northwest China Based on DPSIR Model[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 535-544.
- [30] 解 蕾,姚 扬,但智钢,等.基于 DPSIR 模型的省域绿色发展绩效评价[J].环境工程技术学报,2022,12(5):1681-1686.
- XIE Lei, YAO Yang, DAN Zhi-gang, et al. Evaluation of Provincial Green Development Performance Based on DPSIR Model[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1681-1686.
- [31] 戴铁军,李 蕊.北京市绿色发展要素协同效应研究[J].安全与环境学报,2023,23(4):1305-1316.
- DAI Tie-jun, LI Rui. Research on Synergistic Effects of Green Development Elements in Beijing[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 1305-1316.
- [32] 李 婷.京津冀城市群生态环境可持续发展的政策评价:基于 DPSIR-TOPSIS 模型[J].生态经济,2022,38(5):107-113.
- LI Ting. Policy Evaluation of Sustainable Development of Eco-environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration: Based on DPSIR-TOPSIS Model [J]. Ecological Economy, 2022, 38(5): 107-113.
- [33] 冷 仙,曾 源,周 键,等.基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价[J].生态学报,2023,43(3):1040-1053.
- LENG Xian, ZENG Yuan, ZHOU Jian, et al. Landscape Conservation Effectiveness Assessment of Nature Reserves Based on Entropy Weight-TOPSIS in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1040-1053.
- [34] 邓全成,平建华,梅雪梅,等.基于组合权重 TOPSIS 模型的新乡市水资源承载力评价[J].水资源与水利工程学报,2022,33(5):81-87.
- DENG Quan-cheng, PING Jian-hua, MEI Xue-mei, et al. Evaluation of Water Resources Carrying Capacity of Xinxiang City Based on Combined Weight TOPSIS Model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(5): 81-87.
- [35] 傅聪颖,赖昭豪,郭 熙.基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价及障碍因素诊断[J].生态经济,2020,36(1):198-204.
- FU Cong-ying, LAI Zhao-hao, GUO Xi. Evaluation of Regional Resource and Environment Carrying Capacity Based on the Entropy-weight TOPSIS Model and the Obstacle Factors Diagnosis[J]. Ecological Economy, 2020, 36(1): 198-204.
- [36] 李志忠,孙萍萍,陈霄燕,等.基于卫星遥感技术的绿色发展指标:以中国西部地区为例[J].地球科学与环境学报,2022,44(2):143-155.
- LI Zhi-zhong, SUN Ping-ping, CHEN Xiao-yan, et al. Green Development Index Based on Satellite Remote Sensing Technology: A Case Study in the Western China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(2): 143-155.
- [37] 郭 宇,姚亦锋,王振波,等.基于主体功能区的长江经济带绿色发展评价与问题区域识别[J].生态学报,2023,43(7):2569-2582.
- GUO Yu, YAO Yi-feng, WANG Zhen-bo, et al. Green Development Evaluation and Problem Areas Identification of the Yangtze River Economic Belt from the Perspective of Major Function Oriented Zones[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2569-2582.
- [38] 徐小鹰,田焮焮.长三角城市群绿色发展水平的时空演变及趋势预测[J].长江流域资源与环境,2022,31(12):2568-2581.
- XU Xiao-ying, TIAN Xin-xin. Spatial-temporal Evolution and Trend Prediction of Green Development Level of Yangtze River Delta Urban Agglomerations [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(12): 2568-2581.
- [39] 郭建峰,欧筱彤.高质量发展视角下碳排放权交易政策对城市生态福利绩效的影响[J].地球科学与环境学报,2023,45(2):373-384.
- GUO Jian-feng, OU Xiao-tong. Impact of Carbon Emission Trading Policy on Urban Ecological Well-being Performance from the Perspective of High-quality Development[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 373-384.