

DOI: 10.5846/stxb202212213637

张健, 周侃, 陈好凡. 青藏高原生态屏障区生活垃圾治理生态环境风险及应对路径——以青海省为例. 生态学报, 2023, 43(10): 4024-4038.

Zhang J, Zhou K, Chen Y F. Risk assessment and optimization of domestic waste treatment in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone: A case study of Qinghai Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4024-4038.

青藏高原生态屏障区生活垃圾治理生态环境风险及应对路径

——以青海省为例

张 健^{1,2}, 周 侃^{1,2,*}, 陈好凡^{1,2,3}

1 中国科学院地理科学与资源研究所区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211

摘要:生活垃圾治理失效导致的污染胁迫已成为青藏高原生态安全屏障建设面临的突出威胁, 精准评估城乡生活垃圾治理的生态环境风险并科学制定应对路径, 对改善人居环境品质、筑牢生态安全屏障具有重要意义。以青海省 4306 个居民点为研究对象, 在定量测度城乡各类生活垃圾的产生量及其治理水平基础上, 从生活垃圾治理体系的收集、转运与处理全过程视角, 综合考虑危险度、暴露度、脆弱度因子构建生态环境风险评价指标体系, 应用基于主客观综合赋权的 TOPSIS 方法和风险管控障碍度评价方法, 多尺度评价生活垃圾治理生态环境风险并识别管控阻滞因子。结果显示: 青海省城乡生活垃圾产生呈整体分散、局部组团式集中分布特征, 全省生活垃圾集中治理率仅 62.33%; 全省生活垃圾治理的生态环境风险总体处于中风险等级, 属于中高风险及高风险等级的居民点占 36.90%, 且河湟谷地区向柴达木盆地地区、环青海湖及祁连山地区和青南高原地区呈风险递增; 现行生活垃圾治理体系在镇级转运环节的生态环境风险最高, 在祁连山脉、昆仑山脉东段以及青南高原峡谷地带转运风险突出; 自然地理环境高寒性、分散式垃圾处理技术滞后性是风险管控的主要阻滞因子。建议以生活垃圾全处置和生态环境零胁迫为导向, 采取补齐生活垃圾治理的软硬件短板、建立高效收集与处理的奖补政策机制、强化城镇与农牧居民环境伦理教育等举措, 综合提升生态屏障区生活垃圾治理效能; 基于青藏高原城乡聚落与生活垃圾产污分散性, 充分顾及治理全过程的生态环境风险, 将生活垃圾治理体系配置的基本单元由县域下沉至镇域尺度, 因地制宜实施城乡一体化治理、乡镇集中治理、村分散治理等镇域片区治理模式。

关键词: 生活垃圾治理; 生态环境风险; 风险应对; 青藏高原; 生态屏障区

Risk assessment and optimization of domestic waste treatment in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone: A case study of Qinghai Province

ZHANG Jian^{1,2}, ZHOU Kan^{1,2,*}, CHEN Yufan^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: Qinghai-Tibet Plateau is a significantly ecological security barrier in China and even Asia. However, the improper treatment of domestic waste has become a prominent threat to the ecological security of Qinghai-Tibet Plateau

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0406); 国家自然科学基金项目(41971164)

收稿日期: 2022-12-21; **采用日期:** 2023-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoukan@igsrr.ac.cn

ecological barrier zone. Hence, the scientific risk assessment and management strategies for domestic waste treatment in urban and rural settlements are fundamental to improving the living environment and stability of the ecological barrier zone. Based on the quantitative measurement of the generation and treatment level of domestic waste in 4306 settlements of Qinghai Province, this study constructed a framework of eco-environmental risk assessment by considering the hazard, vulnerability, and exposure factors, from the perspective of the whole process of the collection, transportation, and disposal of domestic waste treatment system. The TOPSIS and obstacle degree model were applied to comprehensively assess the eco-environmental risk and control obstacles of waste treatment. The results show that the distribution of domestic waste was characterized by an overall pattern of “globally dispersed, locally agglomerated” in Qinghai Province, and the rate of the centralized domestic waste treatment was relatively low at 62.33%. The eco-environmental risk of domestic waste treatment in Qinghai Province was at a medium risk level in general, with 36.90% of the settlements at an upper medium or high level. Furthermore, the eco-environmental risk showed a pattern of increase from the valley of the Yellow River and Huangshui River to the Qaidam Basin, the Qinghai Lake region, the Qilian Mountains region, and the highland alpine in southern Qinghai. Moreover, the eco-environmental risk of waste transportation was the highest in the domestic waste treatment system, with the Qilian Mountains, the eastern section of the Kunlun Mountains, and the valley of the highland alpine in southern Qinghai being notable. The analysis of obstacle degrees indicated that the alpine natural environment and the lag in decentralized waste disposal technology were main obstacles to risk control in Qinghai Province. Aiming at the complete disposal of domestic waste and near-zero stress to the eco-environment in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone, greater efforts are needed to bridge the gap between hardware and software infrastructures for domestic waste management, carry out the policy of giving rewards and subsidies for effective waste treatment, and reinforce the environmental ethics education for urban residents, farmers, and herdsmen. Taking into account the eco-environmental risk of the whole process of the domestic waste treatment system, it is wise to adjust the basic unit of the domestic waste treatment system from the county scale to the town scale and implement three models of treatment: urban-rural integration treatment, centralized treatment in the town, and decentralized treatment in the villages based on the dispersion of urban and rural settlements and domestic waste generation on Qinghai-Tibet Plateau.

Key Words: domestic waste treatment; eco-environmental risk; risk management; Qinghai-Tibet Plateau; ecological barrier zone

随着工业化、新型城镇化和农牧业现代化不断推进,城乡聚落经济规模扩大、生活水平持续提高,城乡居民生活垃圾产生量和组分特征发生根本性变化^[1],由生活垃圾治理不当导致的面源污染问题日益突出^[2]。尤其在青藏高原生态屏障区,由于当地气候高寒性、城乡居民点分布零散性以及建设资金长期短缺,生活垃圾治理面临处理设施配置滞后、集中治理服务覆盖范围不足等失效挑战^[3],逐渐成为损害青藏高原生态系统服务功能的潜在风险。一方面,城乡居民点生活垃圾的无序堆放和随意处理,已造成局部地区水环境、土壤、大气环境污染^[4],破坏居民生活环境质量。另一方面,高原垃圾处理设施建设难度大、运维成本高^[5],现行垃圾治理体系难以在青藏高原长效运营。因此,探究生活垃圾治理失效背景下生态环境风险及应对路径,是提升青藏高原地区生活垃圾治理能力的关键环节,对改善人居环境、筑牢国家生态安全屏障具有重要意义。

目前,国内外学者主要从垃圾末端处理不当导致的地下水污染^[6]、土壤污染^[7]、空气污染^[8]等环境问题出发,研究生活垃圾治理污染风险,并从污染扩散^[9]、治理服务供给能力^[10]、设施选址^[11]等方面探讨潜在风险。研究涉及小城镇^[12]、城市^[13]、国家^[14]、洲际^[15]尺度等,并从设施布局调整、技术改进、体系建设等方面提出相应的优化措施^[16—18]。其中,国内多从社会学^[19]、管理学^[20]、农学^[12]、环境科学^[7]等学科视角,运用问卷调查^[14,21]、实地调研^[22]、样品测量^[23—24]等方式,从居民感受反馈^[2]、环境污染负荷现状^[6]、垃圾处理设施配置数量^[14]等主客观角度揭示不同地区城乡生活垃圾的治理效果及其生态环境影响,研究范围多集中在

中部、东部经济发达省份的平原区^[25]以及西部中心城市^[26]等。由于统计数据获取困难,针对青藏高原地区的相关研究较少,少数已有研究通过统计分析等方式揭示青藏高原垃圾收运处置设施建设落后^[3]、垃圾集中收集难度大^[23]、垃圾无害化处理程度低^[27]等实际问题,并初步提出增强居民环境保护意识、加大垃圾处理设施配套资金力度、完善生活垃圾分类回收制度等改进措施^[28-29]。然而,现有研究多以垃圾处理设施单要素配置为判断指标,间接评估由垃圾处理设施配置不足导致的生态环境风险,较少从体系视角结合垃圾治理实际过程系统评估,未考虑一般生活垃圾治理体系在青藏高原生态屏障区失效问题。因此,亟待综合收集、转运、处理三个垃圾治理关键环节,从微观尺度定量揭示垃圾治理失效引发的生态环境风险,为青藏高原生态屏障区因地制宜优化生活垃圾治理体系提供科学依据。

针对相关研究在生态屏障区的研究不足以及不同尺度风险定量分析的空缺,本研究以综合评估青藏高原生态屏障区生活垃圾治理的生态环境风险为科学问题,以青海省 4306 个城乡居民点为研究对象,选取垃圾集中治理率作为特征指标,在测度青海省城乡聚落生活垃圾产生及治理水平基础上,基于生活垃圾治理体系的收集、转运与处理全过程视角构建生态环境风险评价框架,采用主客观综合赋权的 TOPSIS 方法和障碍度模型,多尺度评估城乡生活垃圾治理生态环境风险并识别风险管控阻滞因子,探讨生活垃圾治理体系优化对策及差异化垃圾治理模式。

1 材料与方法

1.1 基本概念与评价指标体系构建

生活垃圾治理作为生态环境保护与治理的重要内容,是针对城乡居民日常生活消费中产生的固体废弃物管理活动的总和^[30-3],生活垃圾治理一般包括收集、转运与处理三个基本环节。生态环境风险则是在一定地域和时间范围内,由环境变化、自然灾害和人类活动等不确定性事件引发生态环境组分、结构及功能损失等不利影响的可能性^[32],指示生态环境安全与健康水平。基于此,生活垃圾治理的生态环境风险特指由生活垃圾治理体系失效导致生活垃圾未合理处置而使生态环境受损害概率,其本质是生活垃圾治理效能稳定性、生活垃圾污染危害性共同作用表征的当地生态环境胁迫程度。

生活垃圾治理通常以县域为基本单元,按“村收集、镇转运、县处理”的模式将城乡居民点产生的生活垃圾经由收集转运网络汇集至垃圾填埋场等末端处置设施集中处理。在青藏高原特殊自然与人文特性影响下,现有生活垃圾治理体系面临收集不便、转运困难、处理低效、设施滞后等现实问题,导致垃圾过度堆放、遗撒滴漏、不当填埋焚烧等污染胁迫,使大气、水、土壤、生物环境暴露于生活垃圾治理失效风险之中。据此,借鉴已有生态环境风险研究^[33-34],以生活垃圾治理失效原因和风险生成机制为评价基础,考虑评价尺度转换和风险叠加递进关系,构建垃圾治理生态环境风险评价概念框架(图 1),通过“村收集”“镇转运”“县处理”治理体系具体环节表征风险强度。进一步地,基于改进的灾害风险评价范式^[32,35],将治理环节与危险度、暴露度、脆弱度三类风险构成要素匹配融合,刻画村、镇(乡)、县(区)不同尺度风险过程。

在评价概念框架基础上,结合已有青藏高原生态风险评价研究和垃圾治理研究^[3,36-44],遴选适宜青藏高原生态屏障区自然环境与垃圾治理体系不同层级尺度的核心指标,构建综合评价指标体系(表 1),共包括 9 个评价要素和 12 个评价指标。其中,准则层中的垃圾收集、转运、处理环节分别从村域尺度、镇域尺度和县域尺度,以危险度、暴露度、脆弱度为基本要素评价生活垃圾治理失效风险。因而,该指标体系可对不同垃圾治理环节与不同行政层级进行分解评价,提升垃圾治理体系优化策略针对性与实操性。

1.2 研究区概况与数据来源

青海省位于北纬 31°39'—39°11',东经 89°25'—103°04',地处青藏高原东北部,土地总面积约为 72.23×10⁴km²。青海省地势高耸,地貌类型复杂多样,平均海拔约 4171.27m,属高原山地气候,其范围和高程分布如图 2 所示。青海省是长江、黄河、澜沧江三大江河发源地,是维系我国乃至亚洲水资源安全的战略要地和生

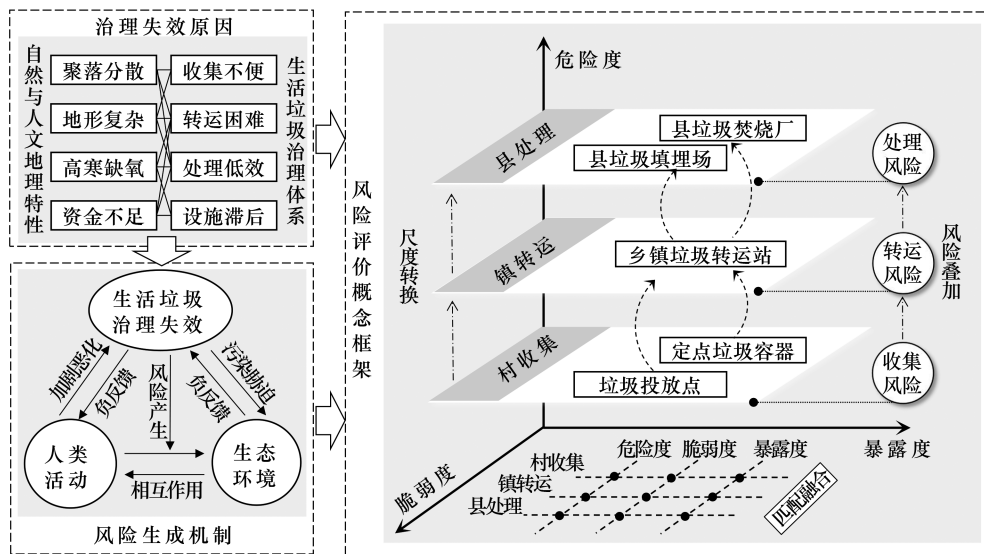


图1 青藏高原生态屏障区生活垃圾治理生态环境风险评价概念框架

Fig.1 Conceptual framework for eco-environmental risk assessment of domestic waste treatment in Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone

表1 青藏高原生态屏障区生活垃圾治理生态环境风险评价指标体系

Table 1 Eco-environmental risk assessment indicator system of domestic waste treatment in Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone

准则层 Criteria	要素层 Factors	指标层 Indicators	指标含义及选取依据 Connotation and sources	指标计算方法 Algorithm	类型 Attribute
垃圾收集环节 Collection	垃圾收集危险度	垃圾产生水平	反映生活垃圾未得到合理收集情况下构成的生态环境质量破坏危险 ^[36-37]	采用当地居民生活垃圾日产生量表示	正向
	垃圾收集脆弱度	垃圾收集点偏远度	表征居民点与垃圾收集点距离远近。一般而言,居民点距离垃圾收集点越远,垃圾收运效果越差 ^[37]	采用当地村委会到最近居民点或自然村距离表示	正向
		垃圾投放难度	表征垃圾收集设施配置及居民投放垃圾的难易程度。陡坡地带垃圾收集设施布局困难,居民垃圾投放不便利,垃圾丢弃可能性高 ^[38-39]	采用居民点范围内平均坡度表示	正向
	垃圾收集暴露度	垃圾收集生态环境胁迫	刻画垃圾收集点周边生态环境对垃圾丢弃堆放等污染事件的暴露程度 ^[40]	居民点是否在国家自然保护区内	正向
垃圾转运环节 Transportation	垃圾转运危险度	垃圾统一转运保障	反映生活垃圾未得到转运处置引发的垃圾堆放危险 ^[3, 36]	居民点垃圾是否统一清运	负向
		垃圾转运距离	反映垃圾转运失效导致污染扩散危险。转运距离同时表征成本负担下的转运失效可能性和转运过程潜在污染影响范围 ^[36, 41]	采用居民点生活垃圾经过乡镇转运至县城处理设施的距离表示	正向
	垃圾转运脆弱度	垃圾转运稳定性	表征垃圾转运途中由道路平整程度和转运工作量共同影响的运输稳定性 ^[38, 42]	采用乡镇范围内的地形起伏度与垃圾转运量的等权组合计算结果表示	正向
	垃圾转运暴露度	垃圾转运生态环境胁迫	刻画转运过程中沿途生态环境对垃圾遗撒滴漏等污染事件的暴露程度 ^[38, 42]	采用乡镇范围内的生态脆弱指数平均值表示	正向
垃圾处理环节 Disposal	垃圾处理危险度	垃圾处理设施饱和度	县城垃圾处理设施处理量饱和率。表征垃圾产量超出处理设施承载能力危险 ^[36]	采用县区范围内生活垃圾日产量占县城垃圾处理设施日处理能力比重表示	正向
		垃圾无害化处理水平	表征垃圾末端处理过程二次污染危险 ^[36-42]	县城垃圾处理设施是否达到无害化处理要求	负向
	垃圾处理脆弱度	垃圾处理技术适用性	表征一般垃圾处理技术在高寒缺氧地区适用性 ^[43]	采用县区范围内的平均高程表示	正向
	垃圾处理暴露度	垃圾处理生态环境胁迫	刻画垃圾处理环节服务范围内生态环境对垃圾不当填埋焚烧等污染事件的暴露程度 ^[44]	采用县区范围内生态环境保护重要性高等级指数占比表示	正向

态安全的重要屏障^[45],兼具生态脆弱性和敏感性强、生态保护重要性突出的特征。2021年,青海省常住人口达 592.4×10^4 人,人口密度仅为 $8.2 \text{ 人}/\text{km}^2$,城乡居民点分布具有“大分散、小集聚”特征。在我国现行“村收集、镇(乡)转运、县(区)处理”生活垃圾治理体系^[30]下,青海省是生活垃圾治理的弱势区域,以青海省为例探究青藏高原生态屏障区生活垃圾治理的生态环境风险和应对路径具有一定代表性,对维护青藏高原生态环境质量和生态安全屏障功能具有现实意义。

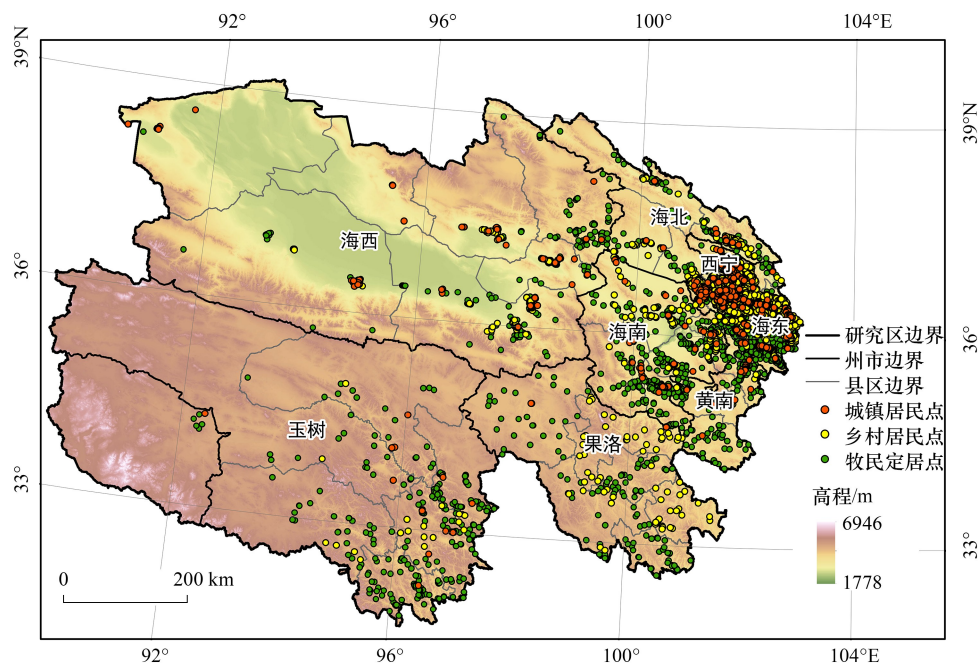


图2 青海省高程与各类居民点分布

Fig.2 Elevation and distribution of the settlements in Qinghai Province

本研究数据主要包括地理信息数据和社会经济与垃圾治理调查数据。①地理信息数据:行政区边界数据来自中国 1:400 万基础地理要素数据集;数字高程模型数据(Digital Elevation Model, DEM)来自资源环境科学与数据中心;生态脆弱性评价数据集等来自国家青藏高原科学数据中心。②社会经济与垃圾治理调查数据:以青海省第三次全国农业普查数据(2016年)为主,缺失的部分数据依据省级、州市级统计资料进行补充收集与校对。

1.3 研究方法

1.3.1 生活垃圾产生与治理水平测度

目前,青藏高原生活垃圾产生量的数据来源较少,且存在不完善、不准确等问题,需要以居民点为单元,估算青海省城乡生活垃圾产生量。针对生活垃圾产生量的估算,一般从人均生活垃圾日产生量入手,采用抽样实测、文献研究、问卷调查、数学预测模型等方法得到产量参数^[46](表2),但由于针对农牧区居民人均生活垃圾日产生量测算较少,且生活垃圾产生量具有地域差异特征,故需修正参数以满足青藏高原生态屏障区研究需要。基于青海省经济发展水平和能源结构特点^[27],本研究将人均生活垃圾日产量参数范围设置于 $0.16\text{--}0.80 \text{ kg 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 之间。

根据居民主要从业类型与居民点地理位置,将城乡居民点划分为牧民定居点、乡村居民点和城镇居民点 3 种类型^[50],并结合青海省第三次农业普查数据中“月均生活垃圾清运量”这一普查项进行判别^[51],在参数范围内将估算结果与普查数据进行比对,将总相对误差 $[(\text{普查数据} - \text{估算结果}) / \text{普查数据} \times 100\%]$ 控制在 5% 以内,最终设置各类居民点人均生活垃圾日产生量参数:牧民定居点 $0.25 \text{ kg 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$,乡村居民点 $0.40 \text{ kg 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$,城镇居民点 $0.60 \text{ kg 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。

表 2 生活垃圾人均日产生量研究结果

Table 2 Research on daily generation of domestic waste per capita

估算方法 Estimation methods	研究区类型 Types of study area	参数范围 Range of parameters	参数适用性 Applicability	参考文献 References
抽样实测 Sampling and weighing	高原牧区	0.167 kg 人 ⁻¹ d ⁻¹	高	[22]
	高原半农半牧区	0.079—0.085 kg 人 ⁻¹ d ⁻¹	高	[23,27]
	西部农区	0.160—0.320 kg 人 ⁻¹ d ⁻¹	中	[24,47]
文献研究 Literature research	全国农区	0.034—3.000 kg 人 ⁻¹ d ⁻¹	低	[1,48]
问卷调查 Questionnaire survey	全国农区	0.790—0.860 kg 人 ⁻¹ d ⁻¹	低	[14,21]
预测模型 Predictive model	全国农区	0.895—1.152 kg 人 ⁻¹ d ⁻¹	低	[49]

在估算生活垃圾产生量基础上,通过垃圾集中治理率指标刻画青藏高原生态屏障区内生活垃圾治理水平。垃圾集中治理率为实现垃圾集中治理居民点的生活垃圾产生量占垃圾总产生量的比重。居民点内生活垃圾是否集中治理根据青海省第三次农业普查数据“生活垃圾是否集中处理”这一普查项对居民点进行判别^[51]。通过测算辖区内居民点生活垃圾集中治理率向上汇总得到乡镇、县区、州市尺度垃圾集中治理率。

1.3.2 基于 TOPSIS 模型的生态环境风险评价方法

TOPSIS 模型是基于理想解排序的多指标决策方法,已广泛应用于生态风险评价领域^[52]。本研究进一步采用主客观综合赋权的方式改进 TOPSIS 模型中理想解的计算过程,避免单一赋权方法的偏差。主观赋权法使用层次分析法^[53] (Analytic Hierarchy Process, AHP),客观赋权法使用熵权法^[54] (Entropy Weight Method, EWM)。将两种赋权法得到的权重通过线性组合的方式进行叠合^[55] (式 1),得到层次分析法和熵权法的组合权重 W :

$$W = \alpha W_{\text{AHP}} + (1 - \alpha) W_{\text{EWM}} \quad (1)$$

式中, W_{AHP} 表示层次分析法计算出的权重, W_{EWM} 表示熵权法计算出的权重, α 为权重偏好系数,本研究中取 $\alpha = 0.5$ 。最终,分别应用层次分析法和熵权法计算得到的组合权重如表 3 所示,其中,层次分析法计算中各判断矩阵均通过一致性检验 ($\text{CR} \leq 0.1$)。

表 3 生活垃圾治理生态环境风险评价指标权重

Table 3 Weight value of the eco-environmental risk assessment indicators for domestic waste treatment

准则层 Criteria	权重 Weight value	要素层 Factors	权重 Weight value	指标层 Indicators	权重 Weight value
垃圾收集环节 Collection	0.326	垃圾收集危险度	0.109	垃圾产生水平	0.109
		垃圾收集脆弱度	0.124	垃圾收集点偏远度	0.074
				垃圾投放难度	0.050
垃圾转运环节 Transportation	0.321	垃圾收集暴露度	0.093	垃圾收集生态环境胁迫	0.093
		垃圾转运危险度	0.231	垃圾统一转运保障	0.178
				垃圾转运距离	0.053
		垃圾转运脆弱度	0.045	垃圾转运稳定性	0.045
垃圾处理环节 Disposal	0.353	垃圾转运暴露度	0.045	垃圾转运生态环境胁迫	0.045
		垃圾处理危险度	0.235	垃圾处理设施饱和度	0.107
				垃圾无害化处理水平	0.128
		垃圾处理脆弱度	0.043	垃圾处理技术适用性	0.043
		垃圾处理暴露度	0.075	垃圾处理生态环境胁迫	0.075

本研究将组合权重代入 TOPSIS 评价模型,计算得到 4306 个居民点的风险评价指数 R ,并将风险评价指数归一化至 $[0,5]$ 范围内。根据相关研究^[56],将青藏高原生态屏障区生活垃圾治理生态环境风险划分为 5 个等级,依次为低风险($0 \leq R < 1$)、中低风险($1 \leq R < 2$)、中风险($2 \leq R < 3$)、中高风险($3 \leq R < 4$)、高风险($4 \leq R \leq 5$)。在此基础上,通过各级行政区划范围内汇总统计,即可得到乡镇、区县、州市尺度的风险指数(辖区内所有居民点风险指数平均值)。

1.3.3 基于障碍度模型的生态环境风险管控阻滞因子识别方法

采用障碍度模型^[57]定量识别生活垃圾治理生态环境风险管控的各类阻滞因子及阻滞程度。评价方法如下:用因子贡献度表示单个评价指标对总目标贡献大小,一般用指标 i 的权重 W_i 表示;指标偏离度 I_i 为指标实际值与风险管控目标值的距离之差,在本研究中 I_i 等价于各指标经过标准化后的值;障碍度 O_i 表示各评价指标对风险管控的阻滞程度大小。具体计算公式如下(式 2):

$$O_i = \frac{W_i \times I_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times I_i} \quad (2)$$

式中, n 代表单项指标个数。在要素层内对障碍度 O_i 求和得到不同要素障碍度 T_j (式 3):

$$T_j = \sum_{i=1}^m O_i \quad (3)$$

式中, j 表示第 j 个评价要素, m 代表评价要素中的单项指标个数。

2 结果与分析

2.1 生活垃圾产生量与治理水平

2.1.1 生活垃圾产生量总体特征及空间分布

青海省城乡生活垃圾产生量总体较低。2016 年,城乡居民点生活垃圾年产生量约为 60.17 万吨,人均生活垃圾日产生量为 $392.12 \text{ g 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$,低于青藏高原城市居民平均水平 $1370.00 \text{ g 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ^[58],也低于全国农村居民平均水平 $790.00\text{—}860.00 \text{ g 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ^[14,21]。不同类型居民点产生量差异显著,城镇居民点、乡村居民点、牧民定居点生活垃圾年总产量分别为 24.82、19.26、16.08 万吨,城镇居民点产生量显著高于其他类型居民点。州市尺度青海省生活垃圾年产生量如图 3 所示,河湟谷地区的海东、西宁 2 地市内多城镇居民点和乡村居民点,垃圾产量最高,分别为 20.67 万吨和 18.48 万吨;青南高原地区玉树、海北、黄南、果洛 4 地州内以农牧民散居为主,垃圾产生量分别为 3.73、2.68、2.48、1.84 万吨。

青海省城乡生活垃圾产生呈整体分散、局部组团式集中空间分布(图 4)。以西宁、海东为主的河湟谷地区居民点分布密集,产生量呈组团分布并显著高于其他地区。以格尔木、大柴旦、德令哈、茫崖为主的柴达木盆地地区内垃圾产生量主要来自县级政府驻地镇及其周边地区城乡聚落。青南高原地区生活垃圾以分散分布为主,年产生量明显低于其他地区,尤其在三江源国家公园内,居民点年产生量基本在 300 吨以下。不难发现,不同区域内垃圾产生量和垃圾分布特征的异质性显著,导致不同地区生活垃圾治理体系配置成本差异。经济相对发达的人口密集区应是生活垃圾治理体系的配置主体;相反,由于地理环境原因,散居的牧民定居点经济条件相对落后,垃圾治理体系运维成本高、经济负担重。

2.1.2 生活垃圾治理水平及地域分异

青海省城乡居民点生活垃圾集中治理率为 62.33%,2016 年中约有 22.66 万吨生活垃圾未得到集中治理,

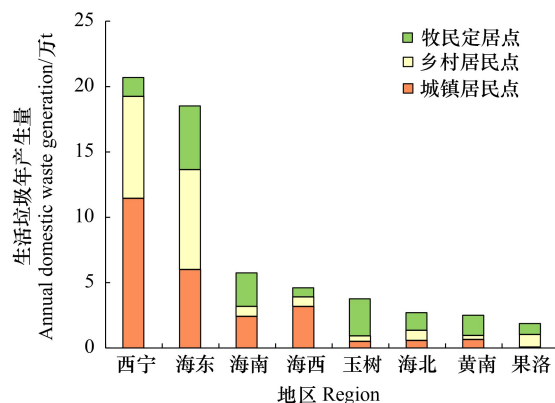


图3 青海省州市尺度生活垃圾年产生量对比

Fig. 3 Annual generation of domestic waste in Qinghai Province at the prefecture scale

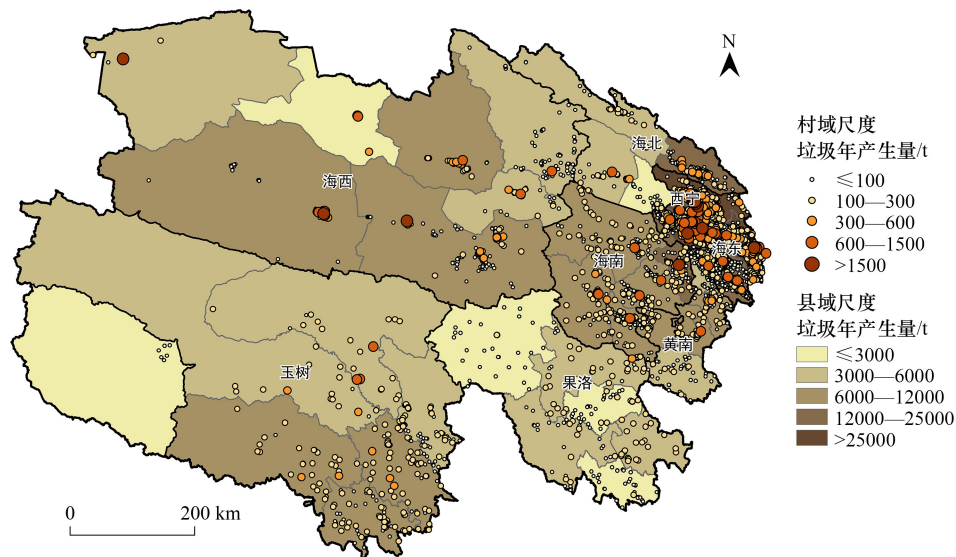


图4 青海省城乡居民点生活垃圾年产生量分布

Fig.4 Distribution of annual domestic waste generation of urban and rural settlements in Qinghai Province

尚有 183.36 万居民和 2246 个居民点未纳入生活垃圾集中治理服务范围。河湟谷地区的海东、西宁两地市生活垃圾治理水平较高,垃圾集中治理率均超过 60%(图 5)。但仍需关注的是,由于该地区人口规模基数大、居民点分布密集,两地市尚有 95.60 万居民未纳入生活垃圾集中治理服务,涉及未集中治理生活垃圾 12.87 万吨,分别占全省 27.39%和 29.42%,垃圾治理能力有待进一步提升。在青南高原地区内,垃圾产生量分散、垃

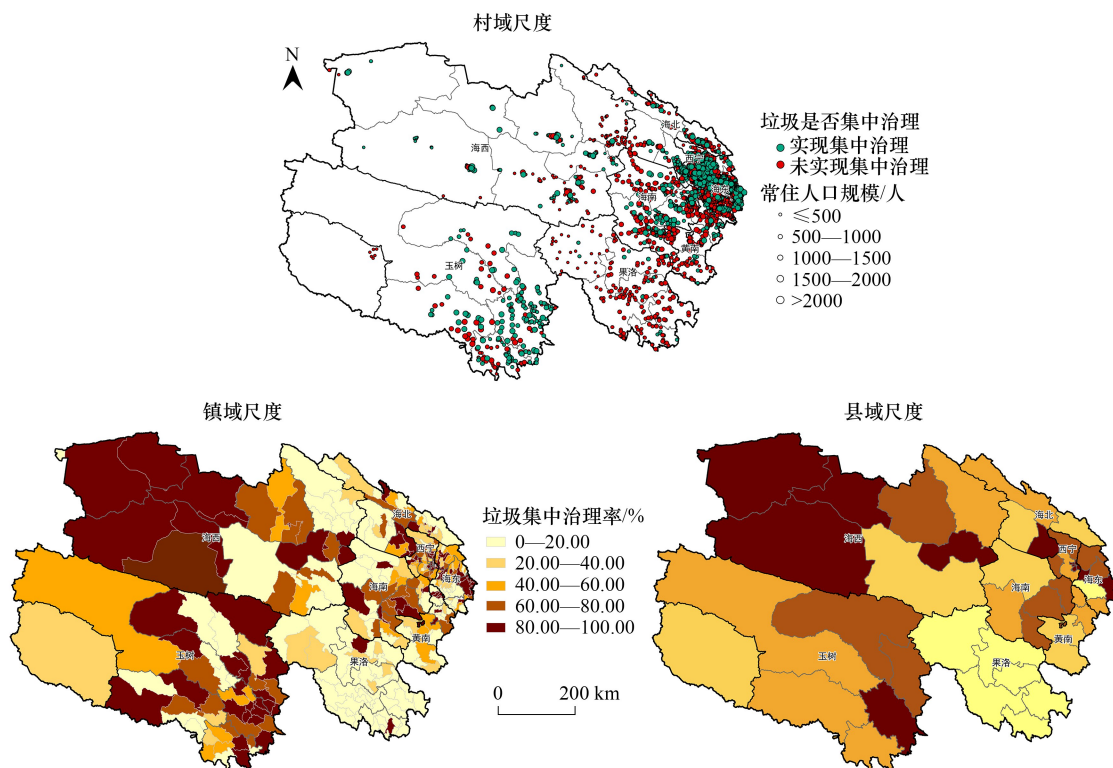


图5 青海省生活垃圾治理水平多尺度分布

Fig. 5 Distribution of the level of domestic waste treatment in Qinghai Province at multi-scale

圾处理设施配套滞后等问题严重制约垃圾处置效果。果洛州垃圾集中治理率仅为 6.79%,州内约有 14.66 万居民的生活垃圾未得到集中治理,尤其是大量未实现垃圾集中治理的居民点位于黄河源腹地,对生态屏障区生态安全格局构成直接威胁。

镇域尺度生活垃圾治理水平对比发现,生活垃圾治理服务未能有效覆盖城乡居民的基本盘。非县级政府驻地及其连片区域的一般乡镇平均垃圾集中治理率仅为 42.84%,覆盖全省人口 74.62%,集中治理率为 0 的乡镇占比更是高达 26.72%。作为“村收集、镇转运、县处理”生活垃圾治理体系中的关键节点,乡镇层面垃圾处置的失位将使得垃圾收运处理各环节难以发挥应有的治理效果。由于生活垃圾处理设施建设资金缺乏与地区间设施配置成本差异,青海省各县生活垃圾治理水平存在较大差距。西宁市各县平均垃圾集中治理率达 82.04%,其中,城三区所辖范围内居民点垃圾集中治理率达 100%,而果洛州各县平均集中治理率仅为 7.62%,远低于青海省各县平均水平 56.34%,达日县和久治县更是 2016 年全省仅有的垃圾集中治理率为 0 的县区。综合上述分析发现,目前生活垃圾治理在青海省同时面临人口密集区垃圾治理压力大、生态环境脆弱区垃圾处理设施供给不足等挑战,垃圾治理体系配置的非均衡性突出,生态屏障区面临生活垃圾治理失效的直接威胁。

2.2 生活垃圾治理生态环境风险等级

2.2.1 生态环境风险等级总体特征

整体上,青海省生活垃圾治理生态环境风险较高,各地市间生态环境风险差异显著(表 4)。从全省尺度看,青海省生活垃圾治理生态环境风险指数达 2.42,生态环境处于中风险等级水平,其中,中高风险及以上居民点占比达 36.90%,表明生态屏障区生态环境面临普遍垃圾治理压力。地市尺度上,除西宁市属于中低风险等级以外,所有地市均处于中风险或中高风险等级,进一步反映生活垃圾治理生态环境风险整体较高的现状,亟待强化垃圾治理生态环境风险防范意识,健全垃圾治理体系以降低风险等级。此外,三江源地区内的海南、黄南、玉树、果洛四地市低风险等级居民点仅分别占比 6.36%、11.65%、0.00%和 0.00%。其中,果洛州由于高寒性气候特征,供氧条件差、地形起伏大,垃圾收集转运困难,垃圾处理设施配置严重缺位,其生活垃圾治理生态环境风险最高,风险指数达 3.79,全州 92.59%居民点处于中高风险或高风险等级,降低三江源地区等重点生态功能区垃圾治理生态环境风险的必要性、紧迫性突出。

表 4 青海省及各地市居民点生活垃圾治理生态环境风险等级

Table 4 Eco-environmental risk level of domestic waste treatment of settlements in Qinghai Province

地区 Region	低风险 Low		中低风险 Lower medium		中风险 Medium		中高风险 Upper medium		高风险 High		风险指数均值 Average
	数量/个 Quantity	比重/% Proportion	数量/个 Quantity	比重/% Proportion	数量/个 Quantity	比重/% Proportion	数量/个 Quantity	比重/% Proportion	数量/个 Quantity	比重/% Proportion	
西宁	97	10.07	471	48.91	329	34.16	66	6.85	0	0.00	1.89
海东	213	13.35	541	33.92	247	15.49	540	33.86	54	3.39	2.34
海西	65	19.52	78	23.42	56	16.82	130	39.04	4	1.20	2.28
海北	19	8.48	78	34.82	11	4.91	91	40.63	25	11.16	2.63
海南	30	6.36	161	34.11	34	7.20	172	36.44	75	15.89	2.69
黄南	31	11.65	45	16.92	33	12.41	109	40.98	48	18.05	2.90
玉树	0	0.00	75	28.41	89	33.71	34	12.88	66	25.00	2.92
果洛	0	0.00	0	0.00	14	7.41	115	60.85	60	31.75	3.79
全省	455	10.57	1449	33.65	813	18.88	1257	29.19	332	7.71	2.42

2.2.2 生态环境风险等级地域分异

空间上,生活垃圾治理生态环境风险呈现“南高北低”的地域差异(图 6),并呈河湟谷地区向柴达木盆地区、环青海湖及祁连山地区和青南高原地区风险递增态势。位于河湟谷地区和柴达木盆地区的居民点,由于垃圾集中治理率相对较高,即使生活垃圾产量水平高,其生态环境风险等级也显著低于青南高原地区,强化青

南高原地区全域生活垃圾治理是生态屏障区生态环境风险防范的重中之重。但也要看到,河湟谷地区内部仍然有 892 个居民点处于中高风险或高风险等级,占同等级居民点的 56.14%。因此,在防范重点生态功能区垃圾治理风险同时,应当警惕居民点分布密集、人类开发活动强度较大的河湟谷地区居民点生活垃圾治理生态环境风险等级提升。

结合镇域尺度和县域尺度结果进一步发现,生活垃圾治理风险总体呈河湟谷地区“低值集聚”、青南高原地区“高值集聚”的空间格局。在地区内部,风险值表现为以县级政府驻地镇为中心向外围梯度递增的态势,县级政府驻地及其连片乡镇垃圾治理风险平均值为 1.84,而一般乡镇则高达 2.70,充分说明由垃圾治理服务供给不均导致的生态环境风险等级差异。此外,环青海湖与祁连山地区、三江源地区等重点生态功能区范围内乡镇生态环境风险等级以中风险和中高风险为主,进一步表明当地生活垃圾治理体系难以适配生态安全屏障建设要求,易对生态系统结构与功能构成威胁。

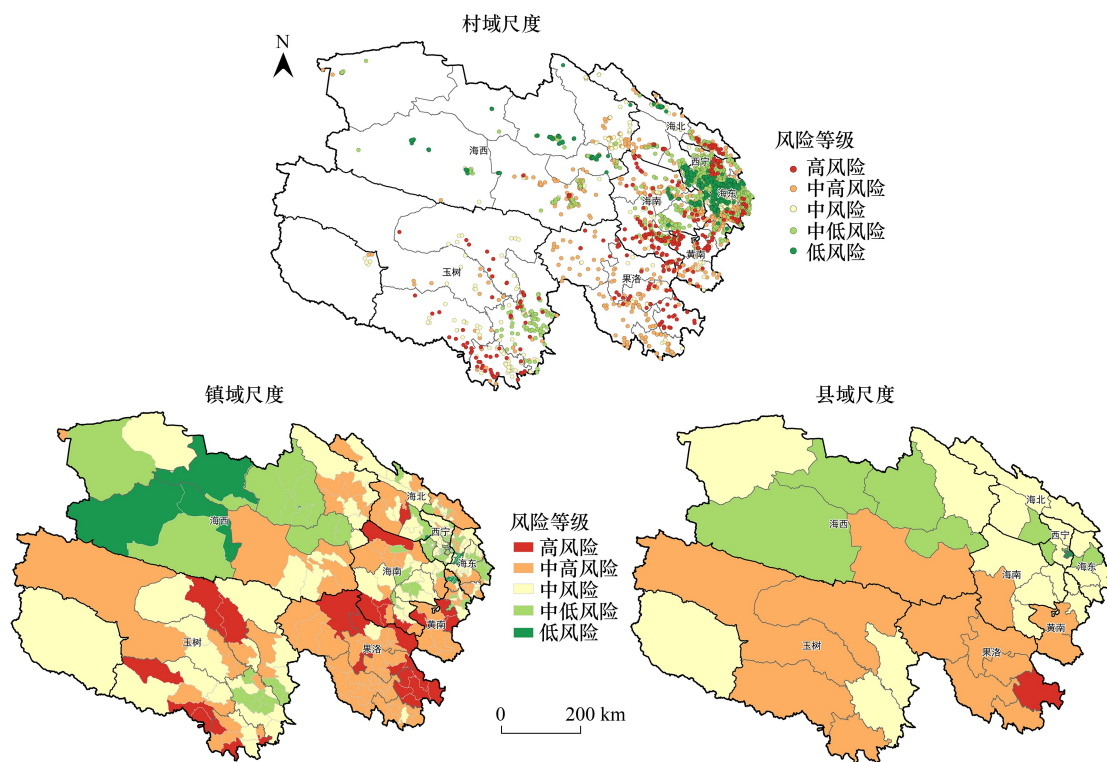


图 6 青海省生活垃圾治理生态环境风险多尺度分布

Fig.6 Eco-environmental risk of domestic waste treatment in Qinghai Province at multi-scale

2.2.3 生活垃圾治理环节生态环境风险等级差异

生活垃圾治理各环节风险差异显著(图 7),收集、转运、处理三个环节的风险评价价值分别为 2.24、2.43、2.33。“镇转运”环节在现行生活垃圾治理体系的生态环境风险最高,祁连山脉、昆仑山脉东段以及青南高原峡谷地带由于地形起伏大、地表生态环境脆弱敏感,转运环节风险突出。一方面,垃圾转运环节失效将直接扩大垃圾清运处理的暴露风险,破坏当地的生态屏障功能,另一方面,垃圾转运环节的缺位造成垃圾收集环节与处理环节难以有效衔接,不利于现行生活垃圾治理服务的长效运营。此外,垃圾“县处理”环节方面,26.09%的县区处于中高风险和高风险等级,生态环境风险仍相对较高。需注意的是,县城处理环节作为垃圾治理的末端环节,其垃圾处理水平高低基本塑造生活垃圾治理生态环境风险格局。因此,提升县城垃圾无害化处理技术和消纳能力仍是降低垃圾治理总体生态环境风险的根本基础。垃圾“村收集”环节方面,虽风险指数较低,但仅有 4.76%的村收集点处于低风险状态,体现出青海省山地地貌和垃圾产生量分散分布对村内垃圾收

集的普遍约束作用。

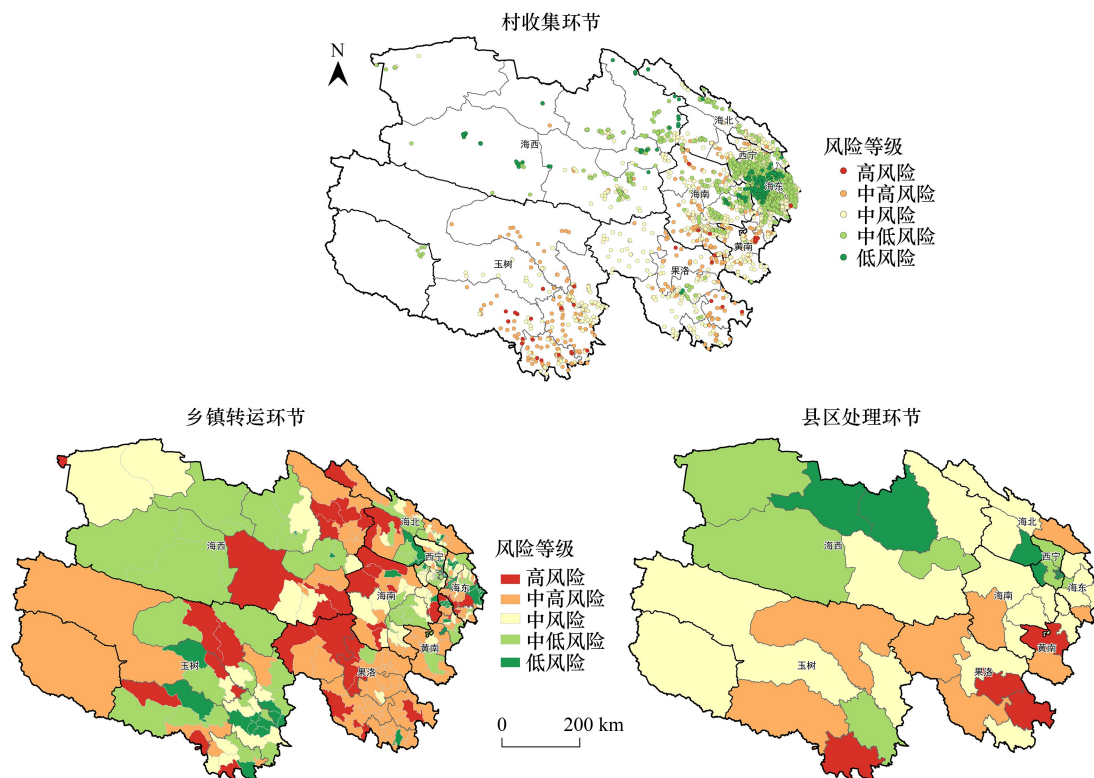


图 7 青海省生活垃圾治理各环节生态环境风险

Fig.7 Eco-environmental risk of each aspect of the domestic waste treatment in Qinghai Province

2.3 生活垃圾治理生态环境风险管控阻滞因子

垃圾转运危险度和垃圾处理危险度为青海省大部分县区风险管控主要阻滞因子(图 8),管控障碍度分别为 18.14%和 22.72%。在青藏高原,高寒气候和山地地貌是限制垃圾转运的根本原因,垃圾处理技术适用性低和资金投入不足导致垃圾处理技术滞后性突出,研究适用于青藏高原生态屏障区复杂地理环境的垃圾转运方式和分散式垃圾无害化处理技术对降低生活垃圾治理的生态环境风险至关重要。从所有县区障碍度来看,可根据不同阻滞因子的作用大小,将各州市内部县区划分成不同风险管控阻滞类型。西宁市各县区内居民点分布密集、人均垃圾产生量高,导致垃圾收集因子成为垃圾治理风险管控的单一阻滞因子。海西州各县区呈“转运—处理”因子的双重阻滞,该地区内生态环境脆弱恶劣、居民点分布分散,垃圾集中收运成本和垃圾处理设施的配置难度均较高。海东、海北、海南、玉树四地市各县区主要受“收集—处理”因子双重阻滞,这些地区山地峡谷地貌广布,居民生活垃圾投放较为困难,同时,高海拔造成的低氧条件也阻碍一般垃圾处理技术的有效应用。黄南、果洛两地市则属于“收集—转运—处理”因子的综合阻滞,当地高寒气候条件以及高生态保护重要性使垃圾收集脆弱度及暴露度、垃圾转运危险度和垃圾处理危险度等因子均构成显著的阻滞作用。生活垃圾治理风险的叠加效应,使管控阻滞因子作用随风险值上升而复杂化,存在多重短板的垃圾治理弱势地区是垃圾治理体系优化配置的关键地带。

3 讨论

3.1 生态屏障区生活垃圾治理体系优化建议

根据不同区域风险管控阻滞因子差异,从设施配套、政策支持、基层引导三个层面出发,结合垃圾治理体系中的收集、转运、处理环节针对施策,以生活垃圾全处置和生态环境零胁迫为导向,综合提升青藏高原生态

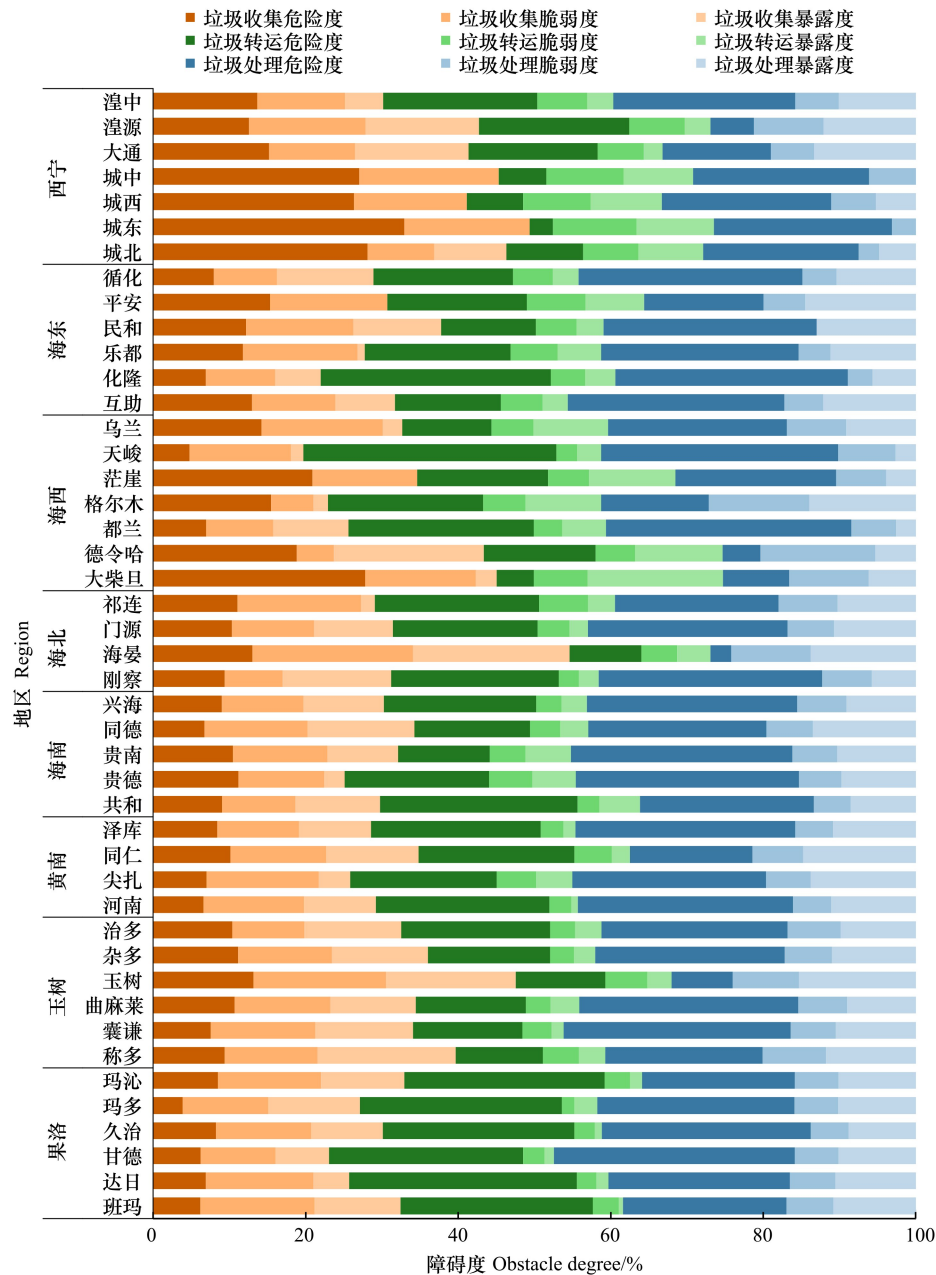


图8 青海省各县区生活垃圾治理生态环境风险管控障碍度

Fig.8 Proportion of obstacle to eco-environment risk control of domestic waste treatment in Qinghai Province at the county scale

屏障区生活垃圾治理效能:①设施配套层面,对照风险管控主导阻滞因子,补强生活垃圾治理的软硬件弱项。在有条件农牧区逐步推行简单易用的垃圾分类收集设施,推动居民点生活垃圾干湿分离和分类回收;在交通区位偏远的农牧民定居点,以固定和弹性转运相结合的方式灵活配置垃圾转运站点和转运车辆,形成垃圾跨区域转运与就地消纳并举的收转运体系;加快推进高温热解处理技术、闪蒸矿化垃圾处理技术等适用于青藏高原低温低氧条件的环境友好型垃圾处理技术装备配置。②政策支持层面,应完善高效收集与处理的奖补政策机制,强化生活垃圾多元共治。一方面,通过税收减免、资金补贴等方式鼓励社会资本参与农牧区生活垃圾治理体系,减轻政府垃圾收运与处置职能负担;另一方面,可根据农牧区实际需要设置专项清洁员、生态环境管护员等专职岗位,激发原住居民参与垃圾治理积极性,对表现突出的村集体及个人,给予治理工作补贴、农牧产品收购补贴、垃圾治理积分兑换等多项奖励措施;③基层引导层面,加强城镇与农牧居民环境伦理教育,规

范垃圾治理行为。以当地居委会、村委会、牧委会为组织单位,借助学校、寺庙、农牧民集市等场所,通过广播、公示栏公告、横幅标语、入户宣传等多元方式宣传垃圾治理成果与效益,营造全民参与垃圾治理良好氛围;在生态敏感区、牧民定居点、高山峡谷等生活垃圾治理薄弱区域,适度引导农牧民通过回肥、回填等方式就地消纳处置,推进生活垃圾源头减排。

3.2 生态屏障区生活垃圾治理模式空间配置

目前,“村收集、镇(乡)转运、县(区)处理”的生活垃圾治理体系已在平原地区村镇得到广泛应用^[30]。然而,上述实证分析表明,由于生态环境的敏感性和居民点“大分散、小集聚”的分布差异性,现行生活垃圾治理体系在青藏高原生态屏障区难以普适应用。因此,应基于城乡聚落与生活垃圾产污分散性,充分考虑垃圾治理全过程的生态环境风险,将生活垃圾治理体系配置的基本单元由县域下沉至镇域尺度,综合研判城乡居民点适宜的生活垃圾治理模式。

根据生态环境风险评价结果在收集风险、转运风险、处理风险不同维度上的耦合性,从居民点层级识别不同区域垃圾治理的薄弱环节与优势环节,从而针对性地提出垃圾治理模式优化方案:①在垃圾处理环节风险较低的县级政府驻地村、乡镇政府驻地村等人口相对密集的城镇居民点,应发挥垃圾收运优势区位条件,融入县城垃圾收运处置体系,实施“村收集、镇转运、县处理”的城乡一体化生活垃圾治理模式;②在生活垃圾转运环节风险相对较低、生活垃圾处理能力不足的农牧民居民点,可以借助垃圾转运便利条件,在村镇居民点聚集区域增设生活垃圾处理设施,吸纳周边居民点生活垃圾集中治理,实施“村收集、镇处理”的乡镇集中治理模式;③在生活垃圾收集风险较低,但是不具备生活垃圾转运条件、且人口规模相对较小的偏远农牧民定居点,宜通过小型、分散、环保的终端处理工艺,以无害化填埋、焚烧、堆肥、沼气池处理等方式实现垃圾在地化处理,实施“村收集、村处理”的村分散治理模式。根据城乡居民点垃圾治理模式空间配置特征,以乡镇为单元实施镇域片区治理如图9所示。其中,在以西宁、海东为主的河湟谷地区,以城乡一体化治理片区为主、乡镇集中治理片区为辅;在柴达木盆地、祁连山地区、环青海湖地区,以城乡一体化治理片区为主、村分散治理片区为辅;在青南高原地区,以村分散治理片区为主、乡镇集中治理片区为辅。

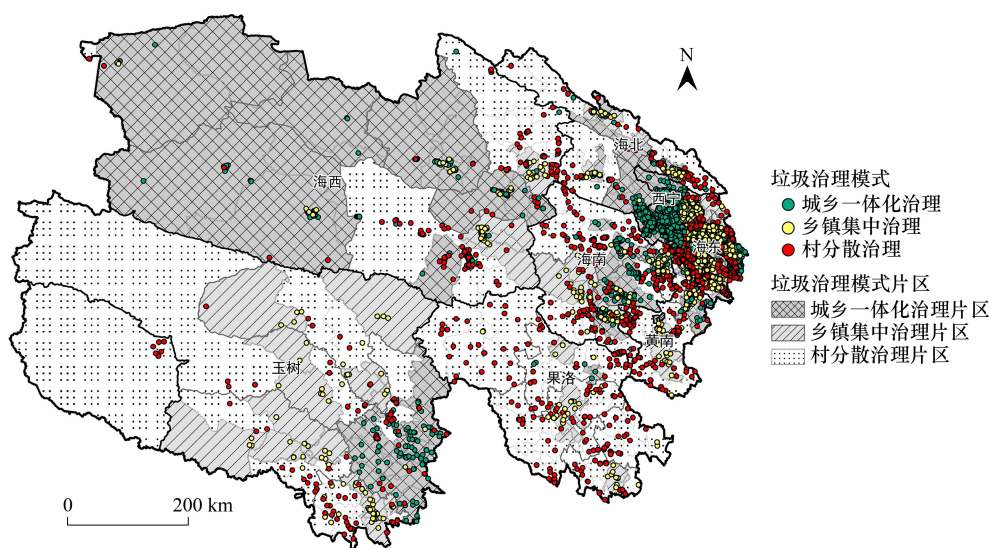


图9 青海省生活垃圾治理模式空间配置

Fig.9 Spatial configuration of domestic waste treatment model in Qinghai Province

4 结论

本研究以青海省4306个城乡居民点为例,多尺度评价青海省生活垃圾治理生态环境风险,为系统优化现

有生活垃圾治理体系及治理模式空间配置提供科学依据。主要研究结论如下:

(1) 青海省城乡生活垃圾产量及治理水平均较低。2016 年,生活垃圾年产生量约为 60.17 万吨,人均生活垃圾日产生量为 $392.12 \text{ g 人}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。城乡生活垃圾产生呈整体分散、局部组团式集中空间分布。全省垃圾集中治理率为 62.33%,尚有 183.36 万居民和 2246 个居民点未纳入生活垃圾集中治理体系。

(2) 青海省生活垃圾治理的生态环境风险指数达 2.42,总体处于中风险等级水平,中高风险以上居民点占比超过三成。生态环境风险呈现“南高北低”的地域差异,且河湟谷地区向柴达木盆地区、环青海湖及祁连山地区和青南高原地区呈风险递增。现行生活垃圾治理体系在镇级转运环节的生态环境风险最高,祁连山脉、昆仑山脉东段以及青南高原峡谷地带转运风险突出。

(3) 以生活垃圾全处置和生态环境零胁迫为导向,提出生活垃圾治理风险应对路径:补齐生活垃圾治理的软硬件短板;完善高效收集与处理的奖补政策机制;加强城镇与农牧居民环境伦理教育。同时,优化居民点生活垃圾治理模式空间配置,将生活垃圾治理体系配置的基本单元由县域下沉至镇域,因地制宜实施城乡一体化治理、乡镇集中治理、村分散治理三类镇域片区治理模式。

未来值得继续研究的方向:鉴于生态屏障区现有垃圾收运处理设施承载能力短板,应结合外来游憩活动、节日集会等垃圾产生峰值情景,探索生活垃圾弹性收转运周期和路径优化模拟方案;针对城乡一体化治理、乡镇集中治理、村分散治理等不同模式可行性实证不足,需从投入成本、处置效果、环境胁迫等维度构建多目标优化模型,探究经济成本与生态效益权衡的生活垃圾治理模式;考虑不同主体参与垃圾治理活动的利益冲突,后续研究应在演化博弈等视角下,深化讨论政府、居民、企业多元主体协同治理机制。

参考文献 (References):

- [1] 韩智勇, 费勇强, 刘丹, 旦增, 张崧, 施国中, 王加雷, 谢燕华. 中国农村生活垃圾的产生量与物理特性分析及处理建议. 农业工程学报, 2017, 33(15): 1-14.
- [2] 张敏, 韩智勇, 姜磊, 谢棹骏, 张国治, 贺莉, 程静思, 潘科, 陈柏桦, 施国中. 我国部分地区农村生活垃圾处理现状及模式. 中国沼气, 2016, 34(2): 89-95.
- [3] 周侃, 张健, 樊杰, 徐勇. 青藏高原农牧区生活垃圾治理水平的地域分异与影响因素研究——以青海省 4315 个行政村为例. 环境科学学报, 2022, 42(11): 482-492.
- [4] 旦增, 孟德安, 周文武, 汪晶, 周鹏, 穷达卓玛, 车悦驰, 韩智勇. 西藏班戈县垃圾填埋场环境影响综合分析与评价. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 202-208.
- [5] 仇保兴. 生态城规划原则在玉树灾后重建中的应用. 城市规划, 2010, 34(10): 9-16.
- [6] 韩智勇, 许模, 刘国, 程诚. 生活垃圾填埋场地下水污染物识别与质量评价. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2843-2852.
- [7] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振鸿, 薛昱, 高品. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价. 环境科学, 2017, 38(12): 5262-5271.
- [8] 赵岩, 陆文静, 王洪涛, 段振菡. 城市固体废物处理处置设施恶臭污染评估指标体系研究. 中国环境科学, 2014, 34(7): 1804-1810.
- [9] Ma J W, Chen Z X, Wang J, Wang Y, Li L. Diffusion simulation, health risks, ozone and secondary organic aerosol formation potential of gaseous pollutants from rural comprehensive waste treatment plant. Chemosphere, 2022, 286: 131857.
- [10] Tai J, Zhang W Q, Che Y, Feng D. Municipal solid waste source-separated collection in China: a comparative analysis. Waste Management, 2011, 31(8): 1673-1682.
- [11] 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 林必桂, 任明忠, 方建德. 生活垃圾焚烧处理设施周边环境重金属污染健康风险评价. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1670-1676.
- [12] 高意, 马俊杰. 黄土高原地区村镇生活垃圾处理研究——以陕西省隆坊镇为例. 安徽农业科学, 2011, 39(28): 17389-17391.
- [13] 魏潇潇, 王小铭, 李蕾, 刘聰, Nemanja Stanisavljevic, 彭绪亚. 1979—2016 年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3833-3843.
- [14] 靳琪, 岳波, 王琪, 王瑜堂, 吴小卉, 於俊颖, 高红. 我国不同区域农村生活垃圾的产生、管理现状——基于抽样的村镇调查研究. 环境工程, 2018, 36(10): 97-101, 107.
- [15] Pires A, Martinho G, Chang N B. Solid waste management in European countries: a review of systems analysis techniques. Journal of Environmental Management, 2011, 92(4): 1033-1050.
- [16] 赵薇, 杨雪秀, 满鑫香, 陈永梅, 冯翠洋, 梁赛. 基于混合生命周期评价的生活垃圾处理系统生态效率分析. 生态学报, 2020, 40(1): 77-88.
- [17] Iqbal M W, Kang Y. Waste-to-energy supply chain management with energy feasibility condition. Journal of Cleaner Production, 2021, 291: 125231.
- [18] 黄和平. 生命周期管理研究述评. 生态学报, 2017, 37(13): 4587-4598.

- [19] 魏佳容. 城乡一体化导向的生活垃圾统筹治理研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 171-176.
- [20] 申振东, 姚雪. 我国农村生活垃圾处理: 政策演变、实施现状及完善路径. 贵州社会科学, 2018(9): 85-91.
- [21] 姚伟, 曲晓光, 李洪兴, 付彦芬. 我国农村垃圾产生量及垃圾收集处理现状. 环境与健康杂志, 2009, 26(1): 10-12.
- [22] 孟根图娅, 尹雪峰. 放牧区生活垃圾特点与治理实践——以内蒙古自治区克什克腾旗西部区域为例. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 487-493.
- [23] 韩智勇, 施国中, 谢燕华, 魏路宇, 陈子爱, 张国志, 贺莉. 四川省农村固体废物的处理现状、特性与农民环保意识分析. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 96-102.
- [24] 韩智勇, 梅自力, 税云会, 陈细会, 白峰. 云贵高原农村地区生活垃圾特性与管理分析. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2495-2501.
- [25] 刘永德, 何晶晶, 邵立明, 陈活虎. 太湖地区农村生活垃圾管理模式与处理技术方式探讨. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1221-1225.
- [26] 张爱平, 李民, 陈炜鸣, 胡灵之, 施国中. 成都周边农村生活垃圾的特性、村民意识与处置模式研究. 环境污染与防治, 2017, 39(3): 307-313, 325.
- [27] 韩智勇, 旦增, 孔垂雪. 青藏高原农村固体废物处理现状与分析——以川藏 5 个村为例. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 451-457.
- [28] 吴春宝. 乡村振兴背景下青海农牧区人居环境整治: 成效、挑战及其对策——基于微观调查数据的实证分析. 青海社会科学, 2021(4): 77-85.
- [29] 党晓飞, 欧阳峰. 西藏城镇生活垃圾处理现状与对策——以山南扎囊县为例. 广东农业科学, 2009, 36(2): 88-89.
- [30] 何晶晶, 章骅, 吕凡, 邵立明. 村镇生活垃圾处理模式及技术路线探讨. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 409-414.
- [31] Al Sabbagh M K, Velis C A, Wilson D C, Cheeseman C R. Resource management performance in Bahrain: a systematic analysis of municipal waste management, secondary material flows and organizational aspects. Waste Management & Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 2012, 30(8): 813-824.
- [32] 张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. 生态学报, 2010, 30(10): 2735-2744.
- [33] 聂倩文, 何理, 殷闯, 唐孟, 田沛佩, 卢宏伟. 青藏高原农牧业生态风险时空变化特征与分区防控. 自然资源学报, 2022, 37(1): 250-262.
- [34] 王国萍, 闵庆文, 丁陆彬, 何思源, 李禾尧, 焦雯珺. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建. 生态学报, 2019, 39(22): 8232-8244.
- [35] IPCC. Climate Change 2014. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [36] Zaman A U. Identification of key assessment indicators of the zero waste management systems. Ecological Indicators, 2014, 36: 682-693.
- [37] 林丽梅, 刘振滨, 黄森慰, 郑逸芳. 农村生活垃圾集中处理的农户认知与行为响应: 以治理情境为调节变量. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 127-134.
- [38] 徐慧. 青藏高原生活垃圾填埋场环境风险评价体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [39] 崔亚飞, Bluemling B.. 农户生活垃圾处理行为的影响因素及其效应研究——基于拓展的计划行为理论框架. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 37-42.
- [40] 刘飞, 刘峰贵, 周强, 陈琼, 汪生珍, 郭蓉, 马伟东. 青藏高原生态风险及区域分异. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3232-3246.
- [41] Bovea M D, Powell J C, Gallardo A, Capuz-Rizo S F. The role played by environmental factors in the integration of a transfer station in a municipal solid waste management system. Waste Management, 2007, 27(4): 545-553.
- [42] 王月, 王励博, 杨悦, 吴昌永, 席北斗, 王颖, 李东阳. 西北生态脆弱区城市生活垃圾处理厂适用性评价. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5933-5942.
- [43] Ekmekcioglu M, Kaya T, Kahraman C. Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste. Waste Management, 2010, 30(8/9): 1729-1736.
- [44] 付梦娣, 唐文家, 刘伟玮, 何跃君, 朱彦鹏. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识——以长江源区为例. 生态学报, 2021, 41(10): 3846-3855.
- [45] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [46] 李丹, 陈冠益, 马文超, 段宁. 中国村镇生活垃圾特性及处理现状. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4187-4197.
- [47] 聂二旗, 郑国砥, 高定, 陈同斌. 中国西部农村生活垃圾处理现状及对策分析. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 882-889.
- [48] 岳波, 张志彬, 孙英杰, 李海玲. 我国农村生活垃圾的产生特征研究. 环境科学与技术, 2014, 37(6): 129-134.
- [49] 罗华伟, 谯小霞, 吴光卫. 几种灰色模型在农村生活垃圾产量预测中的应用. 中国农学通报, 2011, 27(32): 320-324.
- [50] 陈仪, 夏立江, 于晓勇, 陈梦慧, 杨宝刚, 赵志友. 不同类型农村住户生活垃圾特征识别. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 773-778.
- [51] 青海省统计局. 青海省第三次全国农业普查综合资料: 下册. 西宁: 青海省统计局, 2016.
- [52] 杨秀敏, 耿静, 徐游, 庄海燕, 陈文述. 基于 TOPSIS 模型的海南岛土地综合承载力时空变化及障碍度诊断. 生态学报, 2022, 42(22): 9324-9334.
- [53] 高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 顾蔚. 基于层次分析法和 GIS 的秦岭地区魔芋潜在分布研究. 生态学报, 2015, 35(21): 7108-7116.
- [54] 王晓君, 吴敬学, 蒋和平. 中国农村生态环境质量动态评价及未来发展趋势预测. 自然资源学报, 2017, 32(5): 864-876.
- [55] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价. 资源科学, 2020, 42(2): 358-371.
- [56] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [57] 雷勋平, Ronbin QIU. 基于熵权 TOPSIS 模型的中国粮食安全评价及障碍因子诊断. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 1-14.
- [58] 旦增, 韩智勇. 青藏高原地区旱季城市生活垃圾特性研究. 中国沼气, 2012, 30(6): 33-36.