



移动扫码阅读

詹梨苹, 赵锐, 蒲灵, 等. 多源数据融合的废有机溶剂贮存中心选址适宜性分析 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(6): 166-175.

ZHAN Liping, ZHAO Rui, PU Ling, et al. Site Suitability Analysis for Organic Solvent Waste Storage Centers Based on Multi-Source Data Fusion [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(6): 166-175.

多源数据融合的废有机溶剂贮存中心 选址适宜性分析

詹梨苹^{1,2}, 赵锐^{2,*}, 蒲灵³, 邓力刚², 李思锐³

(1. 四川城市职业学院 城市建设与设计学院, 四川 成都 610110; 2. 西南交通大学 环境科学与工程学院, 四川 成都 611756; 3. 四川省工业环境监测研究院, 四川 成都 610061)

摘要: 废有机溶剂具有高资源化价值与环境风险双重特性, 加强对其全生命周期精准管控至关重要。通过融合统计数据和网络数据, 梳理了废有机溶剂的全生命周期代谢路径, 识别了当前存在的管理瓶颈。在此基础上, 结合地理信息系统和多准则决策分析, 建立了涵盖环境、经济和社会3方面9项指标评价体系, 确定了新建废有机溶剂集中收集贮存中心的潜在位置。代谢路径分析结果显示, 废有机溶剂产量大, 本地化消纳设施无法满足处置需求, 其中超过35%被转移至都市圈外处置。研究区内超过95%的产生源为年产量不足100t的小微企业, 普遍存在废物出路难的问题。具体而言, 54.98%的产废企业未能与下游接收企业建立委托关系, 16.91%的废物被贮存在产生源内部。由适宜性分析结果可知, 在整个研究区内, 非常适宜、比较适宜、一般适宜、不适宜作为集中收集贮存中心选址的区域占比分别为11.76%、42.23%、41.22%和4.79%。在充分考虑废物产量变化趋势的基础上, 研究发现简阳市和龙泉驿区是新建集中收集贮存中心优先考虑的区域。

关键词: 废有机溶剂; 代谢路径; 选址; 适宜性分析; 多源数据

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)06-0166-10

Site Suitability Analysis for Organic Solvent Waste Storage Centers Based on Multi-Source Data Fusion

ZHAN Liping^{1,2}, ZHAO Rui^{2,*}, PU Ling³, DENG Ligang², LI Sirui³

(1. School of Urban Construction and Design, Urban Vocational College of Sichuan, Chengdu 610110, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. Sichuan Province Academy of Industrial Environmental Monitoring, Chengdu 610061, China)

Abstract: Organic solvent waste, a common by-product of industrial production processes, exhibits dual characteristics of high resource value and significant environmental risk, making it a priority in urban solid waste management. To enhance precise control over the full life cycle of organic solvent waste, this study focuses on Chengdu in Sichuan Province as a case study. By integrating statistical data with web-based data, it systematically maps the metabolic pathways throughout the entire life cycle and identifies key challenges in the current management practices. Building upon these findings and in response to practical management needs, this study integrates Geographic Information System (GIS)

收稿日期: 2025-08-27

修回日期: 2025-09-19

接受日期: 2025-09-23

DOI: 10.20078/j.eep.20251001

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1905600); 四川省青年科技创新团队资助项目(2022JDTD0005)

第一作者: 詹梨苹(1995—), 女, 四川宜宾人, 讲师, 主要研究方向为环境大数据与固废资源管理。E-mail: zlp7963@163.com

*通讯作者: 赵锐(1983—), 男, 四川南充人, 教授, 主要研究方向为环境大数据与固废资源管理。E-mail: ruizhao@swjtu.edu.cn

with Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) to develop a comprehensive evaluation framework comprising nine indicators across environmental, economic, and social dimensions. This framework enables the scientific identification of potential sites for new centralized collection and storage facilities. The metabolic path analysis reveals that the volume of organic solvent waste generated is substantial, while local treatment capacity remains limited, resulting in a substantial gap between supply and demand for disposal services. In particular, the inter-provincial and inter-municipal transfer network is complex, involving Shaanxi Province, Chongqing Municipality, and Anhui Province. Transferred organic solvent waste accounts for over 35% of the total volume generated. The study area contains numerous organic solvent waste sources that are highly dispersed spatially, with over 95% being small and micro enterprises producing less than 100 tons annually. Although their combined output accounts for only 11.78% of the total volume, the absence of a unified and standardized collection and transportation system leads to widespread difficulties in securing reliable disposal pathways. Specifically, 54.98% of the waste-generating enterprises have not established consignment treatment relationships with downstream receiving enterprises, and 16.91% of waste is temporarily stored onsite, posing significant risks of environmental hazard accumulation. These findings suggest that enhancing centralized collection and storage capacity is essential for improving the overall management system for organic solvent waste and mitigating associated environmental risks. Suitability analysis results indicate that, across the study area, 11.76%, 42.23%, 41.22%, and 4.79% of the regions are classified as highly suitable, moderately suitable, generally suitable, and unsuitable, respectively, for siting centralized collection and storage facilities. The highly suitable areas are primarily located in Jianyang City, Jintang County, Pengzhou City, and Shuangliu District. Based on a comprehensive analysis of waste generation trends, Jianyang City and Longquanyi District have been identified as priority areas for constructing new centralized collection and storage centers. Overall, the findings provide a scientific basis for urban hazardous waste management and support the advancement of waste-free city initiatives.

Keywords: Organic solvent waste; Metabolic pathways; Site selection; Suitability analysis; Multi-source data

0 引 言

废有机溶剂是典型的工业有机废物,主要源于化工、制药、电子和汽车等行业^[1]。因其含有醛类、醇类、酯类、酮类和苯类等多种有机物,废有机溶剂的资源化利用价值较高^[2]。然而,废有机溶剂具有毒性、腐蚀性、易燃性和反应性等特性,若处理不当,可能会对人体健康与生态环境产生危害^[3]。

为实现废有机溶剂的高效资源化利用和安全管控,学者围绕其源头减量、综合利用及安全处置等方面开展了大量研究^[4]。其中,源头减量主要关注如何降低生产过程中的废物产生量及其对环境的影响^[5]。对于已经产生的废有机溶剂,应优先考虑资源化利用的处理方式,降低其潜在环境影响的同时,实现经济效益^[6]。废有机溶剂资源化过程还会产生大量的处置残渣,亟须进一步无害化处

置。然而,当现有设施消纳能力不足,无法满足废有机溶剂安全处置需求时,将导致残留物积累,形成长时间的贮存或长距离异地转移的被动局面。鉴于废有机溶剂的特殊性质,产生源自行贮存和异地转移均存在较大的环境风险^[7]。同时,小规模独立委托模式推高经济成本,进一步阻滞了废有机溶剂的资源利用和终端处置^[8]。因此,提升集中收集贮存中心的消纳能力,是强化废有机溶剂管理、减少环境风险隐患的关键。

集中收集贮存中心作为城市危废利用处置体系的关键环节,其合理布局是提升贮存能力、扩大覆盖范围、优化收运流程的基础与前提。目前,学者针对城市危废关键处理处置设施选址开展了多项研究,主要分为多目标规划模型和 GIS 空间分析 2 种情况^[9-10]。前者主要研究多变量函数在约束条件下的极值问题^[11]。例如,ALUMUR 和 KARA^[12]以总成本和运输风险最小化为目标,构

建了危废选址-路径模型,用以确定危废处置设施位置和路径策略。赵佳虹等^[13]提出了一个以应急成本最小化和多源风险控制最大化为目标函数的多目标模型,旨在寻找危废应急中心的最佳位置。ABOUTAHOUN^[14]则在构建危废处理处置设施选址多目标规划模型中,增加了运输事故概率最小化和废物收集便捷程度最大化优化目标。基于模型输入变量的不确定性,RAEISI 等^[15]构建了模糊多目标模型,确定了城市危废贮存、回收和焚烧等设施的位置。基于多目标规划模型的选址方法,虽然可以针对具体规划问题从众多候选点中识别出最优结果,但难以完成大区域的废物处理处置设施选址规划任务。

基于 GIS 的选址适宜性分析可同时考虑属性和空间信息,常与多准则决策分析(Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) 结合使用^[16]。其中,MCDA 确定选址准则及其对应的权重,而 GIS 主要利用缓冲区分析和叠加分析的方法,对拟定的选址影响因素进行空间分析,进而识别合适的废物处理处置设施选址区域^[17-18]。值得注意的是,在层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)、简单加权法(Simple Additive Weighting, SAW)、有序加权平均法(Ordered Weighted Average, OWA)等诸多 MCDA 方法中,AHP 是选择废物处理地点最常用的方法之一^[19-20]。基于 GIS 的空间选址分析方法,能够在较大城市范围内识别出适合建设废物处理处置设施的潜在区域。然而,较少研究从废物完整物质流的角度出发,系统分析其代谢过程中存在的实际问题,并据此制定更具针对性和可行性的选址方案。

针对上述问题,本研究选取四川省成都市作为案例区域,旨在通过废有机溶剂统计数据和网络数据的挖掘和融合,构建废有机溶剂从产生到最终处置的完整代谢路径,并识别废物消纳代谢过程中存在的主要问题。在此基础上,结合 GIS 与 MCDA 方法,考虑环境、经济和社会因素,构建综合指标体系,开展集中收集贮存中心选址的适宜性评估,为提升本地化废有机溶剂消纳能力提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 多源数据获取

本文以成都市为研究区域,通过查询统计年鉴、统计公报、固体废物污染环境防治信息等统

计资料,获取废有机溶剂的相关记录。每条记录均包含产废企业和接收企业的名称、废物名称、废物类别、废物年产生量(t/a)、废物上年度结存量(t/a)、废物处理处置量(t/a)以及废物贮存量(t/a)等信息。其中,废物产生源主要为工业企业、机动车维修行业、学校及检测单位等,废物接收企业为对废有机溶剂具有收集、综合利用和处理处置经营许可的单位。

在此基础上,利用 Python 从全国企业信息查询系统(企查查数据库, <https://www.qcc.com/>)中,获取企业名称、通信地址、经营范围(主要产品和辅助产品)等信息。基于上一步骤获取的通信地址,使用 HBuilder 工具批量识别企业的经纬度信息,以提高后续可视化分析的效率与准确性。

1.2 研究方法

本文设计的技术路线如图 1 所示,主要包含 3 个步骤:首先,通过筛选和融合废有机溶剂统计数据和网络数据,厘清其从产生到最终处置的流向和流量信息,构建废物空间化循环代谢路径,识别管控难点;其次,确定评价指标并进行分级评分,采用 AHP 对已确定的评价指标赋予权重;最后,借助 GIS 技术对集中收集贮存中心选址的适宜性进行可视化分析。

1.2.1 构建废有机溶剂空间化代谢路径

通过梳理废有机溶剂产生和接收企业名称、产生量、利用量、处置量和贮存量等统计信息,梳理废有机溶剂逻辑代谢路径。此外,借助获取的废有机溶剂产生和处置企业的经纬度信息,在逻辑路径基础上融入地理空间属性,构建其空间化循环代谢路径。本文将所有代谢类别划分为无代谢路径、不完全代谢路径和完全代谢路径(图 2)。其中,无代谢路径是指产生源下游不存在与之匹配的消纳单位(图 2(a));不完全代谢路径和完全代谢路径是指产生源下游具有相关联的处置单位,但是前者产生源产生的废物未全部委托处置,被产废企业自行利用或就地贮存在厂区内(图 2(b)),后者产生源产生的废物被全部外运处置(图 2(c))。

1.2.2 确定评价指标及分级评分

前人研究表明,用地性质、交通可达性和周边环境等是废物处理处置设施选址的关键影响因素^[21]。因此,本文结合研究区域的社会经济发展水平与生态环境保护现状,从环境、经济和社会 3 个方面选择评价指标,详见表 1。为保证不

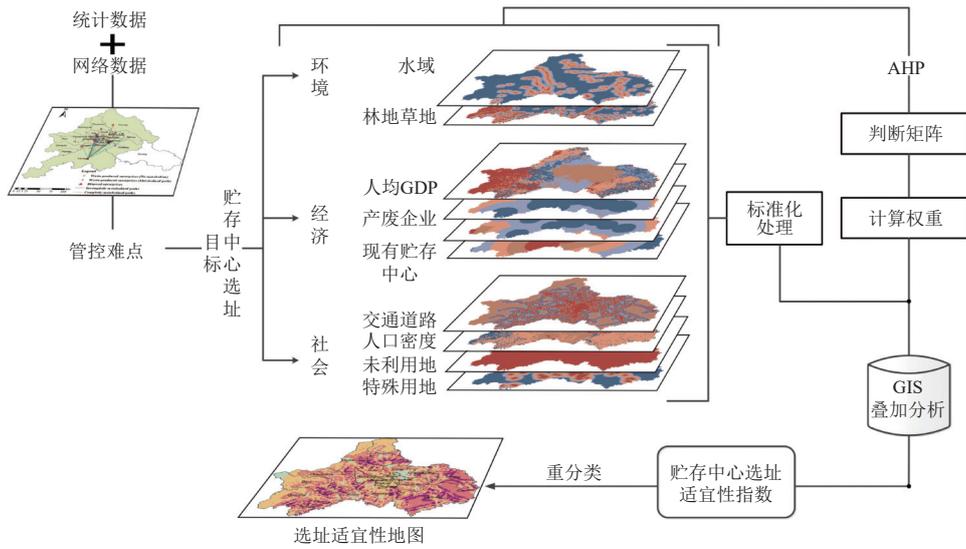


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technical flowchart

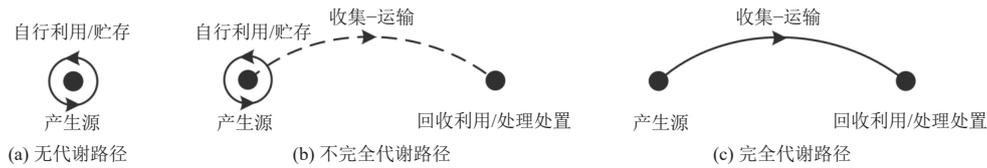


图 2 逻辑代谢路径

Fig. 2 Logical metabolic pathways

同指标具有可比性, 本文根据 ASEFI 等^[22]的研究和专家意见, 对 9 项指标采用 1~10 分的评分方式进行标准化处理, 其评分等级越高代表该指标越

重要, 最后根据各指标的总评分确定候选的选址区域。

表 1 评价指标及评分等级

Table 1 Evaluation indicators and scoring criteria

目标层	中间层	指标层	评分等级
环境	水域/m	<500, 1; 500~1 000, 4; 1 000~3 000, 6; 3 000~5 000, 8; >5 000, 10	
		林地草地/m	<500, 1; 500~1 000, 4; 1 000~1 500, 6; 1 500~3 000, 8; >3 000, 10
经济	现有贮存中心/m	<17 000, 10; 17 000~34 000, 8; 34 000~51 000, 6; 51 000~68 000, 4; >68 000, 2	
	产废企业/m	<17 000, 10; 17 000~34 000, 8; 34 000~51 000, 6; 51 000~68 000, 4; >68 000, 2	
选址适宜性评估	人均GDP/元	<1 500, 1; 1 500~2 000, 7; 2 000~2 500, 10; 2 500~7 000, 9; >7 000, 4	
	未利用地/m	未利用地, 10; 非未利用地, 1	
	特殊用地/m	<2 000, 2; 2 000~4 000, 4; 4 000~6 000, 6; 6 000~8 000, 8; >8 000, 10	
	人口密度/(人·km ⁻²)	<300, 1; 300~400, 4; 400~600, 7; 600~1 200, 10; >1 200, 1	
社会	交通道路/m	<500, 1; 500~1 000, 7; 1 000~2 000, 10; 2 000~3 000, 9; >3 000, 4	

1.2.3 确定指标权重

本文采用 AHP 对各指标权重进行分配, 具体步骤如下。

① 根据前人研究获取 3 类中间层指标的权重值^[23-24]。在此基础上, 通过指标间两两比较, 构造判断矩阵如式(1)所示^[25];

$$M = (a_{ij})_{n \times n} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示 i 与 j 之间的相对重要性, $a_{ii} = 1$ ($i =$

$1, \dots, n$), $a_{ij} > 0$, $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。

②“1~9 标度方法”用于实现各指标之间的相互比较, 各级标度具体含义见表 2。通过计算判断矩阵的归一化特征向量, 获得各个指标的相对权重, 详见表 3。

表 2 “1~9 标度方法”各级标度的含义

Table 2 Explanation of each level in the "1-9 scale method"

标度	定义	含义
1	同等重要	一个因素和另一个因素同等重要
3	稍微重要	一个因素比另一个因素稍微重要
5	明显重要	一个因素比另一个因素明显重要
7	强烈重要	一个因素比另一个因素强烈重要
9	极端重要	一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	相邻标度的中间值	表示相邻两个标度之间折中时的标度

表 3 评价指标赋权结果

Table 3 Weight allocation for evaluation indicators

目标层	中间层	中间层权重	指标层	指标层权重	最终权重
选址适宜性评估	环境	0.309 8	水域	0.667 0	0.206 5
			林地草地	0.333 0	0.103 3
	经济	0.264 2	现有贮存中心	0.117 2	0.031 0
			产废企业	0.614 4	0.162 3
			人均GDP	0.268 4	0.070 9
	社会	0.426 0	未利用地	0.069 2	0.029 5
			特殊用地	0.129 0	0.055 0
			人口密度	0.268 8	0.114 5
			交通道路	0.532 9	0.227 0

③通过一致性检验确保计算结果有效, 一般使用一致性比率(Consistency Ratio, CR, R_C)评估一致性水平, 其计算过程如下^[26]:

$$R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (2)$$

式中: I_C 为单排序一致性指标, 计算公式为 $I_C = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, 其中 λ_{\max} 是判断矩阵的最大特征根, n 为矩阵大小; I_R 为随机一致性指标, 其值根据前人研究进行确定^[27]。若 $R_C < 0.1$, 则认为结果可接受。

本文环境指标判断矩阵为二阶矩阵, 具有完全一致性, 经济和社会指标的 CR 分别为 0.07 和 0.05, 均小于 0.1, 表明赋权结果通过一致性检验,

可以接受。

1.2.4 计算选址适宜性指数

在上述分级评分和权重赋值的基础上, 利用 ArcGIS 的空间分析模块计算选址适宜性指数。将各个评价指标在 ArcGIS 软件中以栅格专题图的形式显示, 通过软件中栅格运算功能进行叠加计算, 确定区域内废有机溶剂集中收集贮存中心选址适宜度及其分布格局。适宜性指数(Suitability Index, SI, I_s)利用下式计算^[28]:

$$I_s = \sum C_i \times W_i \quad (3)$$

式中: C_i 为第 i 个评价指标的分级评分, W_i 为各指标的权重。

2 结果分析

2.1 固废代谢路径解析

根据成都市发布的《成德眉资同城化发展暨成都东部新区发展规划》，本文将废有机溶剂处理处置设施所在位置分为成都同城都市圈内和同城都市圈外，以便对比废物本地化消纳和跨省市转移消纳的情况。表4是废有机溶剂代谢路径量化结果，可以发现废有机溶剂产生企业的空间分布较为分散，几乎覆盖成都市下辖的所有区县。在所有代谢情景中，无下游代谢路径的产生源占比达54.98%，主要分布在中心城区（金牛区、锦江区、青羊区和武侯区）、青白江区、郫都区和龙泉驿区，这部分废有机溶剂被企业自行利用或贮存

在厂区内部，在总产量中占比为16.91%。不完全代谢路径数量为179，对应的废物贮存量和处置量分别为1668.82 t和16047.40 t，分别占总产量6.68%和64.21%。完全代谢路径数量为97，路径中废物外运处置量为3051.89 t，占总产量的12.21%。废有机溶剂的处理处置过程主要集中在都市圈内，但值得注意的是，跨省市转移的情况也比较复杂，涉及陕西省、重庆市、安徽省以及四川省内多个城市，路径数量仅为22，但这部分路径中所涵盖的废物处置量为8764.87 t，在产生总量中占比高达35.07%。

上述结果表明废有机溶剂产生源数量多，在空间上呈现分散化分布，且超过95%是中、小微企业（废有机溶剂年产量≤100 t），涉及的废物量仅占废物总产量的11.78%。年产量较小的产废

表4 废有机溶剂代谢路径量化结果

Table 4 Quantitative results of waste organic solvent metabolic pathways

区县	无代谢路径		不完全代谢路径		完全代谢路径		都市圈内		都市圈外	
	废物数量/t	路径数量	废物数量/t	路径数量	废物数量/t	路径数量	废物数量/t	路径数量	废物数量/t	路径数量
成华区	4.99	5	2.03	4	13.56	7	20.48	15	0.10	1
崇州市	0.02	1	116.74	1	0.16	1	116.93	3	0	0
大邑县	12.23	10	548.64	5	98.69	7	659.57	22	0	0
都江堰市	3.46	1	3.24	4	0.20	1	6.90	6	0	0
简阳市	34.38	3	229.23	3	0	0	263.61	6	0	0
金牛区	20.19	24	5.19	8	3.00	5	27.92	36	0.46	1
金堂县	12.22	6	0.53	1	0.06	1	12.27	7	0.53	1
锦江区	29.74	21	5.88	4	1.84	1	37.46	26	0	0
龙泉驿区	1566.38	31	1258.96	25	1783.90	15	4609.24	71	0	0
彭州市	42.49	10	27.41	4	47.78	4	73.39	16	44.29	2
郫都区	1637.21	55	3951.32	37	530.03	19	6023.10	107	95.46	4
蒲江县	47.69	14	6.66	3	0	0	54.36	17	0	0
青白江区	4.90	33	0.88	2	2.85	1	8.63	36	0	0
青羊区	12.76	22	79.12	8	148.46	4	237.70	33	2.64	1
邛崃市	564.55	6	535.22	10	3.46	1	1103.23	17	0	0
双流区	21.22	26	8712.62	22	135.10	9	363.50	52	8505.44	5
温江区	22.97	14	1188.68	14	203.69	5	1301.29	29	114.05	4
武侯区	27.20	30	230.31	12	30.25	8	286.67	48	1.10	2
新都区	5.67	16	49.36	8	48.82	7	103.05	30	0.80	1
新津区	155.33	9	764.20	4	0.05	1	919.57	14	0	0
合计	4225.61	337	17716.22	179	3051.89	97	16228.85	591	8764.87	22

企业难以与下游接收企业建立长期稳定的委托关系, 废物长期贮存在企业内部或被非法私自处置^[29]。此外, 废有机溶剂总产量大, 但本地化处置能力还存在较大缺口, 导致跨省市转移处置的废物比例较高。远距离异地转运面临较高的运输成本和较大的突发性环境污染风险^[30]。布局区域化的贮存中心, 对提升废物管理系统综合效能有重要意义。一方面, 可建立小微产废企业与接收企业之间的桥梁, 解决小微企业废物出路难的问题。另一方面, 增加贮存中心作为缓冲, 可以在一定程度上对接收企业实现调峰, 避免下游企业超负荷运转时引发风险外溢。

2.2 贮存中心选址适宜性分析

3类9项指标经过加权叠加后生成的适宜性分析结果显示, 整体区域的选址适宜性分值从3.52~9.33连续分布。为了更直观了解评估结果, 采用等间距重分类方法将适宜性分值划分为非常适宜、比较适宜、一般适宜、不适宜4个等级, 并在选址适宜性地图上对各评估等级所占面积进行了量化统计。

选址适宜性评估结果详细分类过程及各等级的面积和占比见表5。可以发现, 在整个研究区域内, 67 511.62 hm²(4.79%)的区域不适合作为贮存中心的选址点位, 581 300.71 hm²(41.22%)的区域适宜性较低, 595 594.73 hm²(42.23%)的土地适宜性中等, 而研究区域内剩余的165 805.81 hm²(11.76%)区域非常适合作为贮存中心的候选点位。结合“非常适宜”区域的空间分布结果(表6)可以看出, 最适宜的区域主要分布在简阳市(51 523.01 hm²)、金堂县(23 852.15 hm²)、彭州市(19 024.40 hm²)和双流区(15 008.29 hm²)。

表5 选址适宜性评估结果

Table 5 Site suitability evaluation results

适宜性等级	适宜性分值	面积/hm ²	占比/%
不适宜	3.52~4.97	67 511.62	4.79
一般适宜	4.97~6.42	581 300.71	41.22
比较适宜	6.42~7.88	595 594.73	42.23
非常适宜	7.88~9.33	165 805.81	11.76
总计	3.52~9.33	1 410 212.87	100.00

表6 “非常适宜”区域空间分布

Table 6 Spatial distribution of "high suitable" areas

区县	面积/hm ²	占比/%	区县	面积/hm ²	占比/%
简阳市	51 523.01	31.08	青白江区	2 675.72	1.61
金堂县	23 852.15	14.39	郫都区	2 652.51	1.60
彭州市	19 024.40	11.47	新津县	1 254.97	0.76
双流区	15 008.29	9.06	龙泉驿区	782.30	0.47
蒲江县	13 161.35	7.94	温江区	253.74	0.15
大邑县	11 014.33	6.64	新都区	201.38	0.12
都江堰市	10 621.04	6.41	锦江区	84.05	0.05
崇州市	6 986.78	4.21	武侯区	16.09	0.01
邛崃市	6 692.67	4.03	青羊区	1.03	0

3 讨论

上述废物集中收集贮存中心选址适宜性分析结果仅基于处理现状得出, 未考虑研究区废物产量的动态变化趋势, 可能导致理论分析结果与实际情况契合度不高。为解决该问题, 本文借助灰色预测GM(1, 1)模型对上述适宜性较高的4个区域(简阳市、金堂县、彭州市、双流区), 以及废物量较大的其余3个区域(龙泉驿区、郫都区、温江

区)的废有机溶剂产量进行了预测, 并使用方差比C检验、小误差概率P检验和相对误差对模型精度进行检验。其中, 相对误差值小于0.2说明模型精度满足基本要求, 小于0.1说明精度达到较高水平^[31]。根据方差比C值和小误差概率P值, 可将模型精度划分为4个等级(表7)^[32]。根据模型评估结果(表8)可知, 各区(县)模型拟合结果较好, 可用于外推预测。

图3是7个区(县)废有机溶剂产量预测结

表 7 模型精度等级划分

Table 7 Classification of model accuracy levels

精度等级	方差比	小误差概率
I (好)	$0.35 \geq C$	$P \geq 0.95$
II (良好)	$0.50 \geq C > 0.35$	$0.95 > P \geq 0.80$
III (一般)	$0.65 \geq C > 0.50$	$0.80 > P \geq 0.70$
IV (差)	$C > 0.65$	$0.70 > P$

表 8 GM(1, 1) 模型预测精度评估

Table 8 Accuracy evaluation of GM(1, 1) model

区县	方差比C值	小误差概率P值	平均相对误差/%
简阳市	0.001	1.00	0.92
金堂县	0.149	1.00	1.37
彭州市	0.014	1.00	3.31
双流区	0.014	1.00	7.02
龙泉驿区	0.011	1.00	3.71
郫都区	0.010	1.00	1.79
温江区	0.003	1.00	2.92

果,对比分析发现,简阳市作为“非常适宜”面积最大的区域,其废物产量平稳增长,与其相邻的双流区表现出更为明显的增长趋势。然而,适宜性评估结果较优的金堂县和彭州市的废物产量则呈现下降的趋势。郫都区与温江区作为废有机溶剂产

量位居前列的区域,其废物产量均呈现快速增长趋势。尽管龙泉驿区的废物产量总体呈下降趋

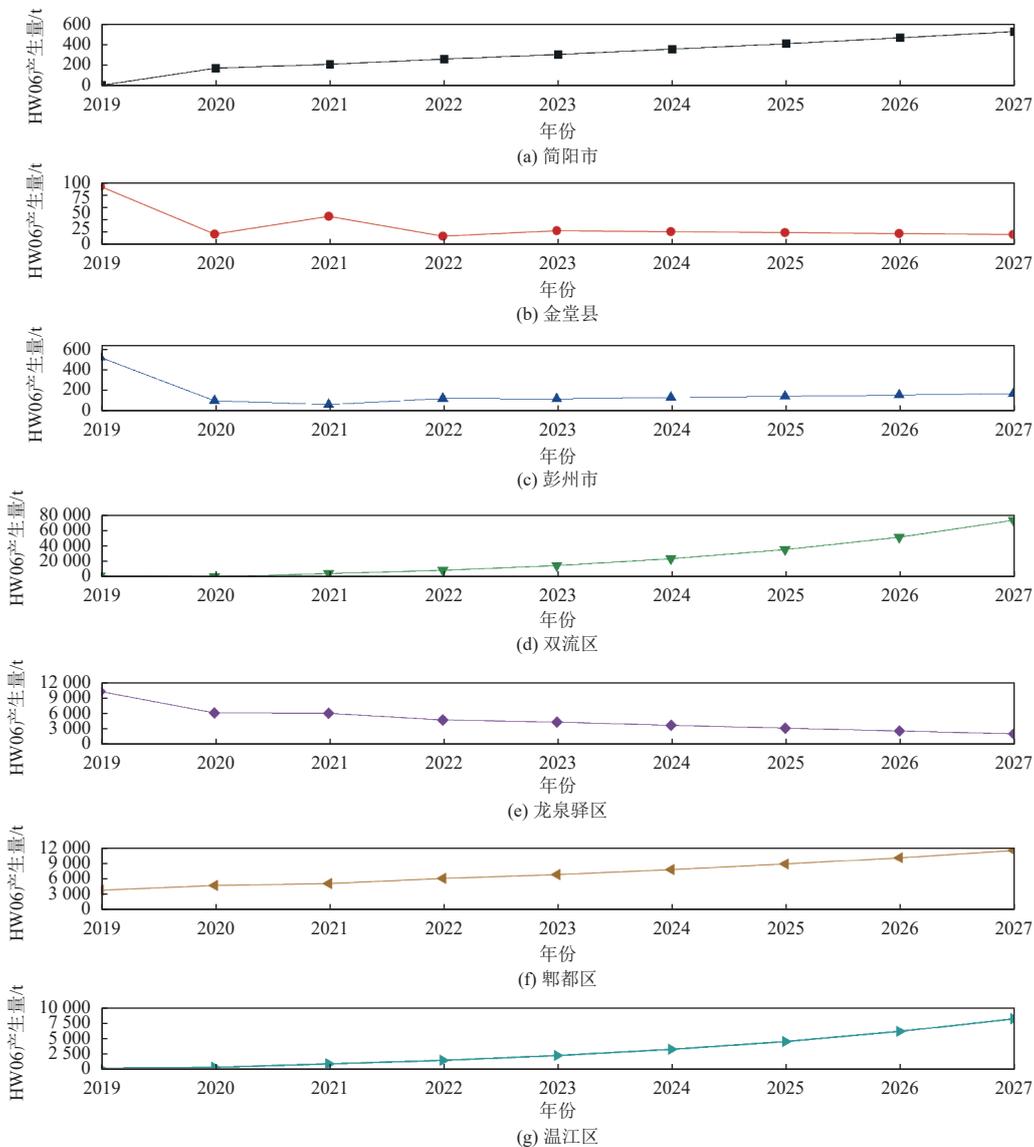


图 3 部分区域废有机溶剂产量预测

Fig. 3 Predicted waste organic solvent production in selected regions

势,但其年产量仍高于简阳市、金堂县和彭州市。此外,该区域的废物产生源数量较多,约占总量的 15%,其中近一半的企业尚未与下游接收企业建立稳定的代谢路径。结合选址适宜性地图,研究区的废有机溶剂集中收集贮存中心新建项目应向东部转移,并优先考虑简阳市和龙泉驿区等地。该选址建议结合了空间适宜性分析和时间维度的产量预测,分析结果更具可靠性。

4 结 论

本文通过耦合废有机溶剂统计数据和网络数据,实现了代谢路径的空间化表达,并识别了现阶段的管理问题。在此基础上,结合 GIS 和 MCDA 方法对研究区内废有机溶剂集中收集贮存中心的选址适宜性展开了分析,得出的主要结论如下。

研究区内的处置设施尚不能满足废有机溶剂的消纳需求,都市圈外跨省市远距离转移处置的情况复杂,处置量占比为 35.07%。研究区内“无代谢路径”和“不完全代谢路径”中分别有 16.91% 和 6.68% 的废有机溶剂未被及时处置,堆存于产废企业厂区内。

集中收集贮存中心选址适宜性分析结果表明,适宜性较高的区域主要分布在简阳市、金堂县、彭州市和双流区。然而,在充分考虑废有机溶剂产生量变化趋势后,发现适合新建贮存中心的区域进一步集中在简阳市和龙泉驿区的东部区域。

此外,本研究还存在诸多不足。例如,废有机溶剂相关数据时效性弱,未能获取最近年限的数据。后续的研究应重点关注如何拓展城市固废统计大数据获取渠道,以及从设施建设的实际要求角度出发,对适宜性分析评价指标进行完善。

参考文献 (References):

- [1] 赵曦,尹娟娟,刘子厚,等.深圳市工业液态危险废物来源特征、环境危害特性及资源化潜力[J].环境工程,2019,37(11):155-159.
ZHAO Xi, YIN Juanjuan, LIU Zihou, et al. Source properties, environmental damage characteristics, and resource recycling potentials of industrial liquid hazardous wastes in Shenzhen[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 155-159.
- [2] 牛茹轩,高明,蔡洪英,等.重庆市废有机溶剂产生特性[J].中国环境科学,2019,39(3):1101-1108.
NIU Ruxuan, GAO Ming, CAI Hongying, et al. Characteristics of the waste organic solvents in Chongqing[J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1101-1108.
- [3] ZHAN Liping, ZHAO Rui, WU Yufeng, et al. Construction of a spatial-temporal metabolic path for hazardous waste management based on the fusion of reported data and web text data[J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 28: 102541.
- [4] 郑守昌,赵辉,田浩,等.废有机溶剂资源化利用现状分析[J].再生资源与循环经济,2024,17(11):30-33.
ZHENG Shouchang, ZHAO Hui, TIAN Hao, et al. Current status of resource utilization of waste organic solvents[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2024, 17(11): 30-33.
- [5] QIAO Yunfei, CHEN Yimin, XIONG Xuming, et al. Scale up of coated conductor substrate process by reel-to-reel planarization of amorphous oxide layers[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 3055-3058.
- [6] 周倩,王兰,王甜甜,等.危险废物资源化技术四维综合评价:以废有机溶剂及含重金属废物为例[J].环境工程学报,2025,19(3):539-547.
ZHOU Qian, WANG Lan, WANG Tiantian, et al. Four-dimensional comprehensive evaluation of hazardous waste resource utilization technologies: A case study on waste organic solvent and heavy metal contained waste[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025, 19(3): 539-547.
- [7] 牛茹轩,吴川福,杨玉飞,等.废有机溶剂再生利用企业输转过程 VOCs 排放模型的建立[J].环境工程学报,2020,14(12):3495-3504.
NIU Ruxuan, WU Chuanfu, YANG Yufei, et al. Establishment of VOCs emission model during the transfer process of waste organic solvent recycling enterprise[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(12): 3495-3504.
- [8] 谭爽.浅谈小微企业的危废管理及处置困境[J].广东化工,2020,47(14):137+136.
TAN Shuang. On the management and disposal of dangerous waste in small and micro enterprises[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(14): 137+136.
- [9] DANESH G, MONAVARI S M, ALI OMRANI G, et al. Compilation of a model for hazardous waste disposal site selection using GIS-based multi-purpose decision-making models[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(2): 122.
- [10] RABBANI M, SHAHRAKI S D, FARROKHI ASL H, et al. A new multi-objective mathematical model for hazardous waste management considering social and environmental issues[J]. Iranian Journal of Management Studies, 2021, 11: 831-865.
- [11] 黄丽霞,赵军.危险货物铁公联运办理站选址问题多目标优化[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):235-246.
HUANG Lixia, ZHAO Jun. Multi-objective optimization for

- transfer station location problem in rail-road intermodal transportation of hazardous materials[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 235–246.
- [12] ALUMUR S, KARA B Y. A new model for the hazardous waste location-routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(5): 1406–1423.
- [13] 赵佳虹, 王丽, 黄宇富. 多源风险防控下危险废物物流的应急选址模型 [J]. *交通科技与经济*, 2021, 23(1): 1–6.
- ZHAO Jiahong, WANG Li, HUANG Yufu. An emergency facility location model for hazardous waste logistics under multi-source risk control[J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2021, 23(1): 1–6.
- [14] ABOUTAHOUN A W. Combined distance-reliability model for hazardous waste transportation and disposal[J]. *Life Sciences Journal*, 2012, 9(2): 1286–1295.
- [15] RAEISI D, JAFARZADEH GHOSHCHI S. A robust fuzzy multi-objective location-routing problem for hazardous waste under uncertain conditions[J]. *Applied Intelligence*, 2022, 52(12): 13435–13455.
- [16] ÖZKAN B, ÖZCEYLAN E, SARIÇIÇEK İ. GIS-based MCDM modeling for landfill site suitability analysis: A comprehensive review of the literature[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(30): 30711–30730.
- [17] DANESH G, MONAVARI S M, OMRANI G A, et al. Detection of suitable areas for waste disposal of petrochemical industries using integrated methods based on geographic information system[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 1–12.
- [18] KAZUVA E, ZHANG Jiquan, TONG Zhijun, et al. GIS and MCD-based suitability assessment for optimized location of solid waste landfills in Dar es Salaam, Tanzania[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(9): 11259–11278.
- [19] 郭任宏, 徐长勇, 蒲东栋. 基于层次分析法固废园区规划用地适宜性评价研究 [J]. *再生资源与循环经济*, 2023, 16(12): 21–25.
- GUO Renhong, XU Changyong, PU Dongdong. Study on land suitability evaluation of solid waste park planning based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2023, 16(12): 21–25.
- [20] FENG Jianghong. An integrated multi-criteria decision-making method for hazardous waste disposal site selection[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2022, 24(6): 8039–8070.
- [21] DING Zhikun, ZHU Menglian, WU Huanyu, et al. Information system with multiple data layer approach to select the C&D waste landfilling infrastructure[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(31): 38788–38804.
- [22] ASEFI H, ZHANG Yang, LIM S, et al. A multi-criteria decision support framework for municipal solid waste landfill siting: A case study of New South Wales (Australia)[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(11): 682.
- [23] 陈敏, 陈洋, 谢成名, 等. 基于空间分析的最佳选址问题综述 [J]. *长江技术经济*, 2019, 3(S1): 16–20+26.
- CHEN Min, CHEN Yang, XIE Chengming, et al. A survey of optimal location problems based on spatial analysis[J]. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, 3(S1): 16–20+26.
- [24] HAZARIKA R, SAIKIA A. Landfill site suitability analysis using AHP for solid waste management in the Guwahati Metropolitan Area, India[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(21): 1148.
- [25] KAMDAR I, ALI S, BENNUI A, et al. Municipal solid waste landfill siting using an integrated GIS-AHP approach: A case study from Songkhla, Thailand[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 220–235.
- [26] KHAN M M, VAEZI M, KUMAR A. Optimal siting of solid waste-to-value-added facilities through a GIS-based assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610-611: 1065–1075.
- [27] DONEGAN H A, DODD F J. A note on saaty's random indexes[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991, 15(10): 135–137.
- [28] BILGILIOGLU S S, GEZGIN C, ORHAN O, et al. A GIS-based multi-criteria decision-making method for the selection of potential municipal solid waste disposal sites in Mersin, Turkey[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(4): 5313–5329.
- [29] ZHAN Liping, ZHAO Rui, XIONG Xin, et al. Metabolic network evolution of hazardous waste by material flow analysis integrated with complex network analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 390: 126291.
- [30] ZHAO Rui, ZHAN Liping, XIONG Xin, et al. Metabolic network optimization for surface treatment waste based on the fusion of administrative data and web textual data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 432: 139788.
- [31] 孙倩, 胡军国, 刘玉琴, 等. 基于灰色预测模型 GM(1, 1) 的 2010—2025 年甘肃省肿瘤登记地区胰腺癌发病率预测 [J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2025, 32(6): 323–328.
- SUN Qian, HU Junguo, LIU Yuqin, et al. Prediction of pancreatic cancer incidence in Gansu Province from 2010 to 2025 based on grey prediction model GM(1, 1)[J]. *Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment*, 2025, 32(6): 323–328.
- [32] YOUSUF M U, AL BAHADLY I, AVCI E. A modified GM(1, 1) model to accurately predict wind speed[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 43: 100905.