

西北生态脆弱区城市生活垃圾处理厂适用性评价

王月¹,王劭博²,杨悦¹,吴昌永^{1*},席北斗¹,王颖¹,李东阳¹ (1.中国环境科学研究院环境污染控制工程技术研究中心,北京 100012; 2.沈阳航空航天大学能源与环境学院,辽宁 沈阳 110126)

摘要: 针对西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术选择、处理厂选址和工程设计中存在的主观性较强、科学性和客观性不足的问题,将生命周期评价法与层次分析法相耦合,综合考虑环境影响、处置技术、地理气候与实际工程 4 个方面因素建立综合评价体系,并以兰州市城市生活垃圾处理现状为例,分别对 9 个生活垃圾处理厂进行技术适用性综合评价.结果表明:①兰州市城市生活垃圾处理厂适用性综合得分前 3 名分别为餐厨垃圾资源化堆肥厂(73.91 分)、韩家咀村生活垃圾填埋场(72.93 分)、中铺子垃圾焚烧厂(72.44 分);②城市生活垃圾处理技术评价体系中,各影响因素权重排序为环境影响因素(0.347)>实际工程因素(0.309)>处置技术因素(0.228)>地理气候因素(0.116);③ 3 种处理技术的环境影响潜值比较结果为:垃圾卫生填埋(0.3872)>垃圾焚烧(0.0330)>垃圾堆肥(0.0242).

关键词: 西北生态脆弱区; 生活垃圾处理技术; 生命周期评价法; 层次分析法

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2021)12-5933-10

The optimization of municipal solid waste treatment technology in the ecological fragile areas of northwest China. WANG Yue¹, WANG Mai-bo², YANG Yue¹, WU Chang-yong^{1*}, XI Bei-dou¹, WANG Ying¹, LI Dong-yang¹ (1.Environmental Pollution Control Engineering Technology Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100021, China; 2.College of Energy and Environment, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110126, China). *China Environmental Science*, 2021,41(12): 5933~5942

Abstract: In order to solve the problems of strong subjectivity, less scientificity and objectivity in the selection process of municipal solid waste treatment technologies, municipal solid waste treatment plants, and engineering design in the ecologically fragile northwestern area, the life cycle assessment method has been combined with the analytic hierarchy process, and the factors of four aspects including the environmental impact, treatment technology, geographic climate and actual engineering are considered to establish a comprehensive evaluation system. Taking the status of municipal solid waste treatment in Lanzhou as an example, a comprehensive evaluation of the applicability of nine municipal solid waste treatment facilities was carried out. The results showed that: (1)The comprehensive scores for the applicability of the top three treatment facilities in the descending order were the kitchen waste resource composting plant (73.91 points), the Hanjiazui village municipal solid waste landfill plant (72.93 points), and the Zhongpuzi waste incineration plant (72.44 points); (2)In the evaluation system of municipal solid waste treatment technology, the ranking of the weights of the influencing factors from the most important to the least was environmental impact (0.347), actual engineering (0.309), disposal technology (0.228), and geographic climate (0.116); (3) The comparison results of the potential environmental impact values of these three treatment technologies were sanitary landfill (0.3872), waste incineration (0.0330), and waste composting (0.0242), respectively.

Key words: ecologically fragile area in Northwest; municipal solid waste treatment technology; life cycle assessment method; analytic hierarchy process

随着我国城市化进程的不断加快,城市生活垃圾的数量与种类呈现迅猛式增长,城市生活垃圾组分也更加复杂化、多元化^[1-4].面对城市生活垃圾产量不断增长的现状,如何采取科学有效的管理措施,已成为当下我国固废处理领域的突出问题之一^[5-6].目前,卫生填埋、垃圾焚烧、堆肥技术是我国处理生活垃圾最主要的方式,占据我国垃圾处理技术的90%以上,此外还有厌氧消化、水泥窑协同处置、热解气化等新型垃圾处理方式.

我国西北地区属于北方重要的生态脆弱区,高海拔、低温、寒冷、干旱的特点决定了其自身的不稳定性与易损性.西北地区经济发展相对滞后,城市生活垃圾处理技术存在不够成熟、基础设施数量少、资源化利用率低等一系列问题^[7-9],使本来就脆弱的区域生态环境风险进一步加剧.目前,西北地区

收稿日期: 2021-06-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC19037000)

* 责任作者, 研究员, wucy@craes.org.cn

垃圾处理技术选择、处理厂选址和工程设计主要依靠人为主观判断,虽然也考虑了周边环境状况、技术成熟度和工程投资等因素,但缺少科学性、客观性和有效性.如何从众多的处理技术中快速、有效地筛选出适合西北生态脆弱区城市垃圾处理技术,并对处理厂选址和工程设计等内容开展适用性评价,对于实现西北地区生活垃圾科学化、精准化管理具有重要意义.

国内外对城市生活垃圾处理技术的评价方法开展了诸多的应用研究,如生命周期评价(LCA)^[10-13]法与层次分析法(AHP)^[14-15].Hunt^[16]通过生命周期法分析了卫生填埋、焚烧与堆肥 3 种生活垃圾处理方式对气候变暖的影响;杨帆^[17]利用生命周期法对不同生活垃圾管理情景进行了综合评价,结果表明采用堆肥污染气体减排措施,可以降低生活垃圾管理中造成的温室效应.王志强等^[18]利用层次分析方法对生活垃圾填埋、焚烧和堆肥技术的应用进行了评估,解决了生活垃圾综合处理厂分选的问题.然而,以上研究成果都没能系统地、全面地解决生活垃圾处理所面临的技术筛选、处理厂选址和工程设计问题.本研究针对兰州市现有的 9 个城市生活垃圾处

理厂开展适用性评价,综合考虑环境影响、处置技术、地理气候和实际工程 4 方面因素,将生命周期法和层次分析法相耦合,使定性问题量化,复杂问题简单化,建立一套综合决策分析评价体系,为西北生态脆弱区的城市生活垃圾处置管理提供技术支持.

1 研究方法

1.1 研究对象概况

兰州位于我国西北部、甘肃省中部,属温带大陆性气候.全市位于西北东南向的河谷中,多面环山,地势西部和南部高、东北低,总面积 13192km²,包括 5 区 3 县.昼夜温差大、降水量少、沙尘多发,生态环境敏感、脆弱.兰州市 2019 年共生产清运 87.050 万 t 生活垃圾,通过对兰州市多座生活垃圾填埋场现场取样调查发现,兰州市生活垃圾组分季节变化大,冬季无机物含量高,主要为灰土等成分;夏季有机物含量较冬季增大,有机物以瓜果皮、菜根等厨余垃圾为主.通过现场调研、取样分析,估算出兰州市城市生活垃圾人均产量 229.600kg/(人·a),含水率为 11.26%~15.00%,灰分均值为 30.420%,低位热值为 8125.600kJ/kg.

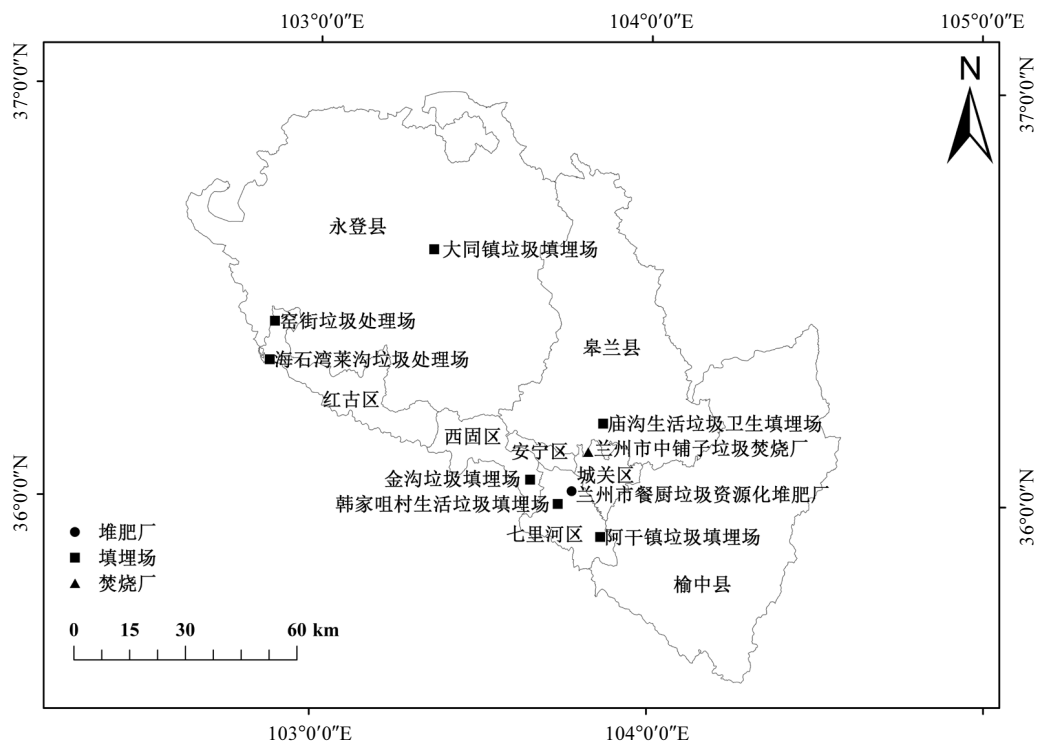


图 1 厂址分布

Fig.1 Site distribution of municipal solid waste treatment facilities in Lanzhou

1.2 数据来源

通过调研与资料收集,兰州市现有垃圾填埋场几十座,目前正在运行的仅 7 座,垃圾焚烧厂和垃圾堆肥厂各 1 座.兰州市生活垃圾处理厂主要指标(来自垃圾处理设施的环评报告)如表 1 所示.

表 1 兰州市生活垃圾处理厂统计
Table 1 Statistics of municipal solid waste treatment facilities in Lanzhou

填埋场名称	位置	建场年份	收运方式	收运距离(km)	占地(hm ²)	处理量(t/d)	填埋场总库容 (万 m ³)	使用年限	工程总投资(万元)
海石湾菜沟垃圾处理场	红古区海石湾菜沟	2011	分类收运	13.300	5.200	68	55	计划使用年限 10a	1389
窑街垃圾处理场	红古区窑街镇	2012	分类收运	15	6.300	70	70	计划使用年限 15a	2397
大同镇垃圾填埋场	永登县大同镇	2020	分类收运	28	2.600	15.700	8.500	计划使用年限 10a	1207.700
阿干镇垃圾填埋场	七里河区阿干镇	2019	分类收运	23	3.600	3	18	设计使用年限 10a	3191.610
韩家咀村生活垃圾填埋场	七里河区黄峪镇	2019	分类填埋	75	4.2	75	40	设计使用年限 10a	2595.920
金沟垃圾填埋场	西固区孟家湾金沟乡	2010	分类收运	35	14.200	330	200	设计使用年限 15a	4618
庙沟生活垃圾卫生填埋场	皋兰县忠和镇	2016	分类回收	72.100	15.100	300	100	设计使用年限 7a	4935.750
中铺子垃圾焚烧厂	皋兰县忠合镇	2015	分类收运	41	13.3	2000	2.700	设计使用年限 30a	13800
餐厨垃圾资源化堆肥厂	七里河区西果园镇	2009	分类收运	10	2.300	500	12.300	设计使用年限 40a	4900

1.3 研究方法

运用生命周期评价法与层次分析法耦合的方式建立一套综合评价体系.生命周期评价^[19-20]是一种对产品、生产工艺及活动的环境压力进行评价的客观过程,重点关注对环境产生的次生影响.本研究运用生命周期评价法对卫生填埋、焚烧、堆肥这 3 种生活垃圾处理技术产生的次生环境影响,包括全球变暖、环境酸化、富营养化、光化学污染和生态毒性 5 个方面进行了综合分析.层次分析法^[21]是一种多目标决策分析方法,通过将决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,进行定量与定性分析,最终确定决策方案.本研究将生命周期评价结果作为环境影响因素的目标之一,从处置技术因素、地理气候因素、环境影响因素和实际工程因素等 4 个方面构建评价体系.

2 结果与讨论

2.1 生命周期评价分析

将兰州市城市生活垃圾卫生填埋、焚烧、堆肥处理技术作为研究对象,根据 2019 年兰州市卫生填埋、焚烧、堆肥处理技术的占比 26.720%、61.070%、

12.210%分别进行生命周期影响评价,过程如下.

2.1.1 目标和范围定义 对卫生填埋、焚烧、堆肥这 3 种生活垃圾处理技术的全生命周期过程进行综合评价,包含物质与能量的输入与输出、废气废液等物质的输出等方面,将人均年排放生活垃圾重量作为功能单位,其值为 229.600kg/(人·a),混合收运.根据评价结果选择适合当地实际发展情况的最优生活垃圾处理技术.生命周期系统边界如图 2 所示.

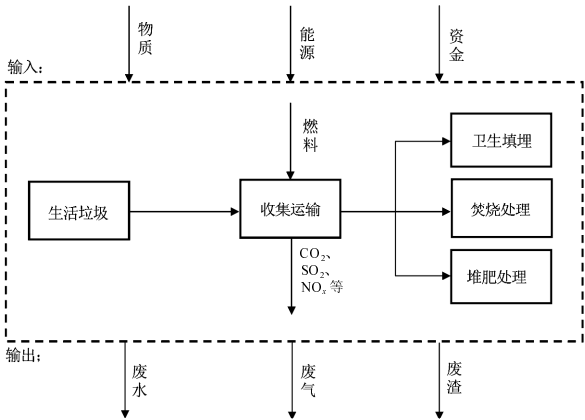


图 2 生命周期系统边界
Fig.2 Life cycle system boundary

2.1.2 清单分析

(1) 卫生填埋排放清单

生活垃圾在进入卫生填埋场后,经过微生物的一系列复杂的反应,最终被降解,其主要污染物为渗滤液和填埋气.在标准状况下,1t 有机碳完全气化后产气量为 1.868m³,卫生填埋产生的填埋气产量 G 为:

$$G=1.868\times\text{TOC}\times(0.0147+0.280)\times26.720\% \quad (1)$$

式中:TOC 为总有机碳含量,kg/t,根据计算兰州市生活垃圾总有机碳含量为 158.200kg/t; T 为温度,℃,平均温度取 15℃.计算得兰州市生活垃圾的产气量为 38.690m³/t(生活垃圾).卫生填埋处理环境排放清单计算结果见表 2.

表 2 兰州市生活垃圾处理技术生命周期清单分析结果[kg/(人·a)]
Table 2 Analysis results of different municipal solid waste treatment technologies in Lanzhou[kg/(person·year)]

参数	卫生填埋处理		垃圾焚烧处理		垃圾堆肥处理	
	收集运输	填埋	收集运输	焚烧	收集运输	堆肥
CO ₂	1.840×10 ⁻¹	7.853	9.883	81.345	2.940	10.843
CO	2.258×10 ⁻¹	1.111×10 ⁻⁴	1.231×10 ⁻¹	5.958×10 ⁻³	9.914×10 ⁻³	/
SO ₂	2.436×10 ⁻³	/	1.309×10 ⁻³	8.338×10 ⁻³	3.608×10 ⁻²	6.399×10 ⁻³
NO _x	4.025×10 ⁻²	/	2.162×10 ⁻²	9.305×10 ⁻²	3.892×10 ⁻⁴	1.840×10 ⁻²
NH ₃	/	6.743×10 ⁻³	/	/	/	4.937×10 ⁻²
H ₂ S	/	1.777×10 ⁻³	/	/	/	6.006×10 ⁻⁵
HCl	/	5.775×10 ⁻⁴	/	2.254×10 ⁻³	/	/
HF	/	1.155×10 ⁻⁴	/	1.228×10 ⁻⁴	/	/
HC(烃类)	1.369×10 ⁻¹	1.777×10 ⁻²	7.353×10 ⁻²	1.228×10 ⁻⁴	2.187×10 ⁻²	/
CH ₄	2.900×10 ⁻³	3.490	1.558×10 ⁻³	/	4.634×10 ⁻⁴	/
VOCs	4.842×10 ⁻²	/	2.601×10 ⁻²	/	7.738×10 ⁻³	/
HCHO	3.886×10 ⁻³	/	2.087×10 ⁻³	/	6.209×10 ⁻⁴	/
N ₂ O	3.306×10 ⁻³	/	1.776×10 ⁻³	/	5.282×10 ⁻⁴	/
Chl.HC(含氯烃类)	/	/	/	1.228×10 ⁻⁴	/	/
PCDDs	/	/	/	3.071×10 ⁻¹²	/	/
As	/	/	/	1.535×10 ⁻⁷	/	9.514×10 ⁻⁶
Pb	/	4.531×10 ⁻⁸	/	3.808×10 ⁻⁷	/	4.324×10 ⁻⁴
Cd	/	4.975×10 ⁻⁸	/	1.996×10 ⁻⁷	/	1.643×10 ⁻⁵
Cr	/	5.864×10 ⁻⁹	/	5.835×10 ⁻⁷	/	1.375×10 ⁻⁴
Cu	/	/	/	6.142×10 ⁻⁶	/	8.822×10 ⁻⁴
Ni	/	/	/	5.988×10 ⁻⁷	/	1.842×10 ⁻⁴
Hg	/	3.643×10 ⁻¹⁰	/	6.142×10 ⁻⁶	/	3.459×10 ⁻⁶
Zn	/	6.664×10 ⁻⁷	/	6.142×10 ⁻⁶	/	4.437×10 ⁻³
COD	/	8.885×10 ⁻¹	/	/	/	6.280×10 ⁻²

注:/表示收集运输阶段无该种污染物的排放数据.

(2) 垃圾焚烧排放清单

生活垃圾经过预处理进入焚烧炉,最终被降解,其主要产物有烟气,炉渣,飞灰等.理论烟气的量 V_0 :

$$V_0=0.089(C_{\text{ar}}+0.375S_{\text{ar}})+0.265H_{\text{ar}}-0.033O_{\text{ar}} \quad (2)$$

式中: C_{ar} 为应用基碳的质量分数,%; S_{ar} 为应用基硫的质量分数,%; H_{ar} 为应用基氢的质量分数,%; O_{ar} 为应用基氧的质量分数,%.

计算得垃圾的理论烟气的量 $V_0=2320.490\text{m}^3/\text{t}$ (焚烧垃圾).而在实际应用过程中生活垃圾在预处理中将脱除 50%的水分.则兰州市生活垃圾产生的烟气的量 $V_1=1\text{t}\times61.070\%\times(1-5.630\%)\times V_0=1337.340\text{m}^3/\text{t}$ (生活垃圾).CO₂ 排放量: $Q_{\text{CO}_2}=1\text{t}\times61.070\%\times(C\%-C_{\text{固定}}\%)$

$\times44/12$,计算得 $Q_{\text{CO}_2}=354.254\text{kg}/\text{t}$ (生活垃圾).其中, $C\%$ 为碳含量百分比, $C_{\text{固定}}\%$ 为固定碳含量百分比,下同.

炉渣产生量为焚烧量的 15%~25%,平均以 20%计, $Q_{\text{炉渣}}=200\text{kg}(\text{炉渣})/\text{t}(\text{生活垃圾})$,功能单位为 45.920kg(炉渣)/(人·a),焚烧处理环境排放清单计算结果见表 2.

(3) 垃圾堆肥排放清单

选择好氧堆肥工艺进行比选,参考国内其他的生活垃圾好氧堆肥系统,对兰州市的生活垃圾堆肥处理进行探讨.在好氧堆肥过程中,碳的转化率取 $\alpha=66.700\%$,CO₂ 排放量:

$$Q_{CO_2}=1t\times 12.210\% \times (C\%-C_{\text{固定}\%}) \times \alpha \times 44/12 \quad (3)$$
计算得 $Q_{CO_2}=47.220\text{kg/t}$ (生活垃圾).

在好氧堆肥过程中,氮的转化率取 $\beta =13.160\%$, NH_3 排放量:

$$Q_{\text{NH}_3}=1t\times 12.210\% \times N\% \times \beta \times 17/14 \quad (4)$$
计算得 $Q_{\text{NH}_3}=0.215\text{kg/t}$ (生活垃圾).其中, $N\%$ 为氮含量百分比.

依据环境影响报告书及相关数据计算可得, $Q_{SO_2}=2.787\times 10^{-2}\text{kg/t}$ (生活垃圾), $Q_{NO_x}=8.014\times 10^{-2}\text{kg/t}$ (生活垃圾), $Q_{H_2S}=2.616\times 10^{-4}\text{kg/t}$ (生活垃圾), $Q_{CH_4}=1.721\text{kg/t}$ (生活垃圾).

生活垃圾进行堆肥处理时,堆肥产品产率约为 36.290%,含水率为 15%,堆肥产品中干燥成分为:

$$Q_{\text{堆肥}}=1t\times 12.210\% \times 36.290\% \times (1-15\%) \quad (5)$$
计算得 $Q_{\text{堆肥}}=37.664\text{kg}$ (干燥物)/t(生活垃圾),堆肥处理环境排放清单见表 2.

(4) 收集运输阶段排放清单

由于 9 个垃圾处理厂运输距离从 10~75km 不等,各类处理厂取平均运输距离进行处理技术生命周期清单分析,排放清单见表 2.在进行单个垃圾处理厂技术适用性分析时,采用各处理厂实际平均运输距离进行分析.

表 3 不同处理技术的环境影响类型潜值

Table 3 The environmental impact potential of different treatment technologies

环境影响类型	卫生填埋	焚烧处理	堆肥处理
全球变暖	8.881×10^{-3}	9.213×10^{-3}	3.669×10^{-3}
环境酸化	2.577×10^{-1}	1.920×10^{-3}	2.374×10^{-3}
富营养化	3.335×10^{-3}	1.823×10^{-3}	2.681×10^{-3}
光化学污染	1.174×10^{-1}	2.000×10^{-3}	1.551×10^{-2}
生态毒性	5.302×10^{-10}	1.840×10^{-7}	5.703×10^{-7}
环境总影响	0.387	0.033	0.024

2.1.3 影响评价和结果解释 根据生命周期清单分析的各污染物排放结果,按照不同环境影响类型的影响参数,计算各环境影响类型的潜值,进而得出总环境影响负荷.查阅文献确定 5 种环境影响类型^[22]:全球变暖、环境酸化、富营养化、光化学污染和生态毒性.并采用适合中国实际的标准化基准和权重因子^[23],计算 3 种生活垃圾处理技术的环境影响潜值,结果如表 3 和图 2 所示.结果表明,兰州市生活垃圾卫生填埋、焚烧处理和堆肥处理技术总的环

境影响潜值分别为 0.387, 0.033 和 0.024,这是由于卫生填埋技术在环境酸化、光化学污染、富营养化 3 个方面的环境影响潜值均高于焚烧处理和堆肥处理技术.卫生填埋技术的生命周期环境影响主要来自于环境酸化与光化学污染,占环境影响潜值的比例分别为 66.600%和 30.300%.

2.2 构建评价指标体系

依据 2.1 对不同生活垃圾处理技术环境影响潜值计算结果,生态毒性对环境影响潜值远远小于其他几种类型,因此在构建评价指标体系中将其剔除.根据西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术优化各因素之间的层次关系,构建层次结构分析模型,如图 3 所示.

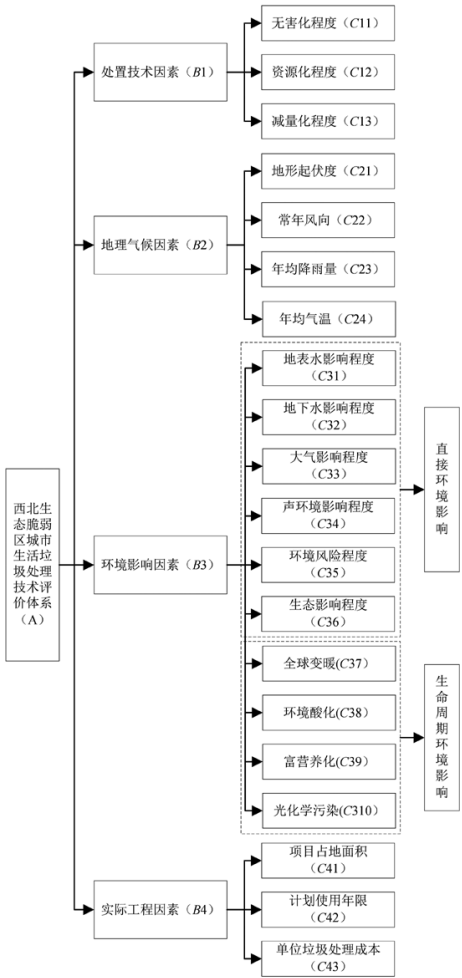


图 3 城市生活垃圾处理优化层次分析结构模型

Fig.3 Hierarchical analysis structure model for the optimization of municipal solid waste treatment

2.2.1 构建判断矩阵 通过文献调研、专家咨询等方式,按照两两比较法分别对卫生填埋(P_1)、垃圾焚

烧(P₂)、垃圾堆肥(P₃)3种处理技术所在的同一层次影响因素进行重要性比较。

首先,对目标层(A)与准则层(B)构建判断矩阵(即 A-B 层矩阵),如表 4 所示。

表 4 目标层(A)与准则层(B1~B4)判断矩阵
Table 4 Judgement matrix for criteria (B₁~B₄) with respect to the target (A)

目标层 A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W_i	$\lambda_{\max}$	CR
B ₁	1	3	1/4	1/3	0.228	4.079	0.029<0.100
B ₂	1/3	1	1/6	1/5	0.116		
B ₃	4	6	1	2	0.347		
B ₄	3	5	1/2	1	0.309		

由表 4 的排序结果可知,环境影响因素(B₃)>实际工程因素(B₄)>处置技术因素(B₁)>气候地理因素(B₂)。

其次,对准则层(B)与指标层(C)分别构建判断矩阵(即 B-C 层判断矩阵),其中对于环境敏感程度(B₃)指标,依据生命周期评价计算结果对专家打分赋值进行修正,各层判断矩阵如表 5~8 所示。

表 7 准则层(B₃)与指标层(C₃₁~C₃₇)判断矩阵
Table 7 Judgment matrix for indicators (C₃₁~C₃₇) with respect to the criterion (B₃)

环境影响因素 B ₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆	C ₃₇	C ₃₈	C ₃₉	C ₃₁₀	W_i	$\lambda_{\max}$	CR
C ₃₁	1	3	1/2	5	2	7	8	4	8	5	0.206	10.336	0.025<0.100
C ₃₂	1/3	1	1/4	3	1/2	5	6	2	6	3	0.132		
C ₃₃	2	4	1	7	3	8	9	6	9	7	0.247		
C ₃₄	1/5	1/3	1/7	1	1/4	2	3	1/2	3	1	0.058		
C ₃₅	1/2	2	1/3	4	1	6	7	3	7	4	0.152		
C ₃₆	1/7	1/5	1/8	1/2	1/6	1	2	1/3	2	1/2	0.025		
C ₃₇	1/8	1/6	1/9	1/3	1/7	1/2	1	1/5	1	1/3	0.009		
C ₃₈	1/4	1/2	1/6	2	1/3	3	5	1	5	2	0.106		
C ₃₉	1/8	1/6	1/9	1/3	1/7	1/2	1	1/5	1	1/3	0.003		
C ₃₁₀	1/5	1/3	1/7	1	1/4	2	3	1/2	3	1	0.062		

表 8 准则层(B₄)与指标层(C₄₁~C₄₃)判断矩阵
Table 8 Judgment matrix for indicators (C₄₁~C₄₃) with respect to the criterion (B₄)

实际工程因素 B ₄	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	W_i	$\lambda_{\max}$	CR
C ₄₁	1	1/2	1/5	0.128	3.025	0.021<0.100
C ₄₂	2	1	1/4	0.264		
C ₄₃	5	4	1	0.628		

2.2.2 处理技术综合排序 根据上述计算结果,整理计算指标层(C)总排序结果,结果如表 9 所示。

根据准则层(B)与指标层(C)判断矩阵的一致性比率 CR 的结果,计算结果均小于 0.100,表示准则层(B)与指标层(C)的排序有效,具有较好的一致性,判断矩阵皆满足要求。

表 5 准则层(B₁)与指标层(C₁₁~C₁₃)判断矩阵
Table 5 Judgment matrix for indicators (C₁₁~C₁₃) with respect to the criterion (B₁)

处置技术因素 B ₁	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	W_i	$\lambda_{\max}$	CR
C ₁₁	1	1/7	1/2	0.145	3.015	0.013<0.100
C ₁₂	7	1	5	0.689		
C ₁₃	2	1/5	1	0.176		

表 6 准则层(B₂)与指标层(C₂₁~C₂₄)判断矩阵
Table 6 Judgment matrix for indicators (C₂₁~C₂₄) with respect to the criterion (B₂)

地理气候因素 B ₂	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	W_i	$\lambda_{\max}$	CR
C ₂₁	1	1/4	1/3	1/2	0.174	4.031	0.011<0.100
C ₂₂	4	1	2	3	0.347		
C ₂₃	3	1/2	1	2	0.268		
C ₂₄	2	1/3	1/2	1	0.211		

表 9 指标层(C)总排序结果
Table 9 The overall ranking results of the criteria (C)

准则层指标	准则层权重	指标层指标	指标层权重	综合权重	排序
处置技术因素 B ₁	0.228	资源化利用 C ₁₁	0.145	0.033	12
		无害化程度 C ₁₂	0.679	0.155	2
		减量化程度 C ₁₃	0.176	0.040	9
地理气候因素 B ₂	0.116	地形起伏度 C ₂₁	0.174	0.020	16
		常年风向 C ₂₂	0.347	0.040	8
		年均降雨量 C ₂₃	0.268	0.031	13
		年均气温 C ₂₄	0.211	0.024	14

续表 9					
准则层 指标	准则层 权重	指标层指标	指标层 权重	综合权重	排序
环境影响 因素 B ₃	0.347	地表水影响程度 C ₃₁	0.206	0.071	5
		地下水影响程度 C ₃₂	0.132	0.046	7
		大气环境影响程度 C ₃₃	0.247	0.086	3
		声环境影响程度 C ₃₄	0.058	0.020	17
		环境风险程度 C ₃₅	0.152	0.053	6
		生态影响程度 C ₃₆	0.025	0.009	18
		全球变暖 C ₃₇	0.009	0.003	19
		环境酸化 C ₃₈	0.106	0.037	11
		富营养化 C ₃₉	0.003	0.001	20
		光化学污染 C ₄₀	0.062	0.021	15
实际工程 因素 B ₄	0.309	项目占地面积 C ₄₁	0.128	0.040	10
		计划使用年限 C ₄₂	0.244	0.075	4
		单位垃圾处理成本 C ₄₃	0.628	0.194	1

依据公式计算层次总排序一致性比率 CR=0.022<0.100,表明矩阵具有良好的一致性.通过比较发现,城市生活垃圾处理技术评价体系中环境影响

因素(0.347)>实际工程因素(0.309)>处置技术因素(0.228)>地理气候因素(0.116).其中权重最大的为单位垃圾处理成本 C₄₃,权重为 0.194,其次分别为无害化程度 C₁₂、大气环境影响程度 C₃₃,权重分别为 0.155、0.086.

2.2.3 评价指标分级 依据层次分析法计算结果,确定西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术优化评价的 16 个指标权重指数,并且依据有关规范、标准,结合实际生产情况,对各指标进行打分,采用加权求和法计算各生活垃圾处理技术的综合得分 R,公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^3 \alpha_i M_i + \sum_{j=1}^4 \beta_j N_j + \sum_{k=1}^6 \gamma_k O_k + \sum_{l=1}^3 \delta_l P_l \quad (6)$$

式中: R 为西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术评价综合指数; α_i 、 β_j 、 γ_k 、 δ_l 为评价指标体系中各准则层的权重值; M_i 、 N_j 、 O_k 、 P_l 为对应指标的评分值.

对每个指标的等级划分如表 10 所示.

2.2.4 评价指标赋值 依据《环境影响评价技术导则》^[24-29]及相关文献资料,设置西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术适用性评价赋值,如表 11 所示.

表 10 西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术适用性评价综合指数

Table 10 Comprehensive index for the applicability of different municipal solid waste treatment technologies in the Northwest Ecologically Fragile Area

等级划分	适用性极低	适用性较低	适用性中等	适用性较高	适用性极高
适用性评价综合指数(R)	R<55	55≤R<65	65≤R<75	75≤R<85	85≤R

表 11 西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术适用性评价赋值

Table 11 Evaluation standards for the applicability of municipal solid waste treatment technologies in the Northwest Ecological Fragile Area

指标层 C	20 分	40 分	60 分	80 分	100 分
资源化利用 C ₁₁ (%)	<5	5~20	20~35	35~50	≥50
无害化程度 C ₁₂ (%)	<85	85~89	89~93	93~97	≥97
减量化程度 C ₁₃ (%)	<20	20~40	40~60	60~80	≥80
地形起伏度 C ₂₁ (m)	>35	25~35	15~25	5~15	<5
常年风向 C ₂₂	位于主导风向上风向且 风频高于 10%	位于主导风向上风向且 风频低于 10%	全年平均风速低于 1m/s	位于主导风向下风向且 风频低于 10%	位于主导风向下风向且 风频高于 10%
年均降雨量 C ₂₃ (mm)	>1600	1200~1600	800~1200	400~800	<400
年平均气温 C ₂₄ (℃)	低于 0	0~5	5~10	10~15	>15
地表水影响程度 C ₃₁	/	一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
地下水影响程度 C ₃₂	/	一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
大气环境影响程度 C ₃₃	/	一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
声环境影响程度 C ₃₄	/	一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
环境风险 C ₃₅	/	一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
生态影响程度 C ₃₆	/	一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
全球变暖 C ₃₇	环境影响潜值高于 0.008	环境影响潜值 0.004~0.008	环境影响潜值 0.002~0.004	环境影响潜值 0.001~0.002	环境影响潜值低于 0.001

续表 11

指标层 C	20 分	40 分	60 分	80 分	100 分
环境酸化 C ₃₈	环境影响潜值高于 0.008	环境影响潜值 0.004~0.008	环境影响潜值 0.002~0.004	环境影响潜值 0.001~0.002	环境影响潜值低于 0.001
富营养化 C ₃₉	环境影响潜值高于 0.008	环境影响潜值 0.004~0.008	环境影响潜值 0.002~0.004	环境影响潜值 0.001~0.002	环境影响潜值低于 0.001
光化学污染 C ₃₁₀	环境影响潜值高于 0.008	环境影响潜值 0.004~0.008	环境影响潜值 0.002~0.004	环境影响潜值 0.001~0.002	环境影响潜值低于 0.001
项目占地面积 C ₄₁ (hm ²)	大于 35	25~35	15~25	5~15	低于 5
计划使用年限 C ₄₂ (a)	大于 25	20~25	15~20	10~15	低于 10
单位垃圾处理成本 C ₄₃ (元)	250~300	150~250	100~150	50~100	0~50

根据兰州市卫生填埋、焚烧、堆肥 3 种技术运行现状,结合西北生态脆弱区城市生活垃圾处理技术适用性综合评价标准,对案例指标进行参数赋值,参数得分如表 12 所示。

表 12 案例指标参数得分

Table 12 The parameter scores with respect to the indicators for different treatment facilities

序号	指标	海石湾菜沟	窑街垃圾	大同镇垃圾	阿干镇垃圾	韩家咀村生活	金沟垃圾	庙沟生活垃圾	中铺子垃圾	餐厨垃圾资
		垃圾处理场	处理场	圾填埋场	填埋场	垃圾填埋场	填埋场	卫生填埋场	圾焚烧厂	源化堆肥厂
1	资源化利用 C ₁₁	20	20	20	20	20	20	20	80	40
2	无害化程度 C ₁₂	60	60	60	60	80	60	60	100	80
3	减量化程度 C ₁₃	40	40	40	40	40	40	20	100	60
4	地形起伏度 C ₂₁	80	60	60	80	60	40	40	100	80
5	常年风向 C ₂₂	80	80	80	80	80	80	80	80	80
6	年均降雨量 C ₂₃	100	100	100	100	100	100	100	100	100
7	年均气温 C ₂₄	100	100	100	100	100	100	100	100	60
8	地表水影响程度 C ₃₁	100	100	80	100	100	80	100	100	80
9	地下水影响程度 C ₃₂	60	60	60	60	60	60	60	80	80
10	大气环境影响程度 C ₃₃	60	60	60	80	80	80	80	40	60
11	声环境影响程度 C ₃₄	60	60	60	60	60	60	60	80	80
12	环境风险 C ₃₅	60	60	100	60	60	60	80	40	80
13	生态影响程度 C ₃₆	80	80	60	80	80	80	60	80	80
14	全球变暖 C ₃₇	80	80	100	100	80	40	40	60	80
15	环境酸化 C ₃₈	100	100	100	100	100	80	80	100	100
16	富营养化 C ₃₉	100	100	100	100	100	80	80	40	100
17	光化学污染 C ₃₁₀	40	40	80	60	40	20	20	20	40
18	项目占地面积 C ₄₁	80	80	100	100	100	80	60	80	100
19	计划使用年限 C ₄₂	80	60	80	80	80	60	100	20	40
20	单位垃圾处理成本 C ₄₃	80	80	40	20	80	100	80	80	100

对兰州市各个生活垃圾处理厂适用性进行综合评价,综合得分如图 4 所示。

结果表明:(1)兰州市生活垃圾处理厂适用性综合得分最高的前 3 名分别为餐厨垃圾资源化堆肥厂、韩家咀村生活垃圾填埋场、中铺子垃圾焚烧厂,得分均在 70 以上,而大同镇垃圾填埋场和阿干镇垃圾填埋场得分较低,说明兰州地区的各个垃圾处理厂因情况不同而适用性差别较大。

(2)将餐厨垃圾资源化堆肥厂、韩家咀村生活垃圾填埋场和中铺子垃圾焚烧厂进行适用性综合得

分比较发现,餐厨垃圾资源化堆肥厂在大气环境影响程度、环境风险、全球变暖、富营养化、光化学污染等 5 项指标上均得分较高,并在实际工程因素中的计划使用年限和单位垃圾处理成本两项指标均占优势。

(3)兰州市垃圾填埋场中适用性得分最高的是韩家咀村生活垃圾填埋场 72.93 分,最低得分的是阿干镇垃圾填埋场 58.71 分,将 2 个填埋场进行比较发现,韩家咀村生活垃圾填埋场在无害化程度指标上得分较高,并在实际工程因素中的单位

垃圾处理成本指标上较阿干镇垃圾填埋场占明显优势.

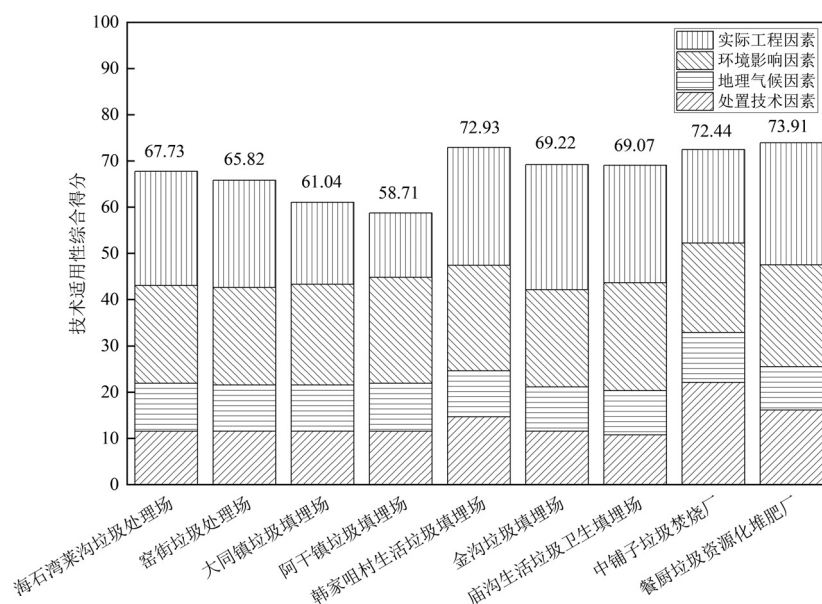


图 4 兰州市生活垃圾处理厂适用性综合得分

Fig.4 Comprehensive score for the applicability of different municipal solid waste treatment facilities in Lanzhou

3 结论

3.1 兰州市生活垃圾处理厂适用性综合得分为餐厨垃圾资源化堆肥厂(73.91 分)、韩家咀村生活垃圾填埋场(72.93 分)、中铺子垃圾焚烧厂(72.44 分)、金沟垃圾填埋场(69.22 分)、庙沟生活垃圾卫生填埋场(69.07 分)、海石湾垃圾填埋场(67.73 分)、窑街垃圾处理场(65.82 分)、大同镇垃圾填埋场(61.04 分)、阿干镇垃圾填埋场(58.71 分)。

3.2 城市生活垃圾处理技术评价指标体系中:环境影响因素(0.347)>实际工程因素(0.309)>处置技术因素(0.228)>地理气候因素(0.116),其中各指标权重最大的为工程投资,权重为 0.194,其次分别为无害化程度、大气环境影响程度,权重分别为 0.155、0.086。

3.3 兰州市生活垃圾卫生填埋、焚烧处理和堆肥处理技术总的环境影响潜值分别为 0.387、0.033 和 0.024,表明卫生填埋处理技术的环境影响潜值高于焚烧处理和堆肥处理技术,具体表现为卫生填埋技术的环境酸化、光化学污染、富营养化 3 个方面的环境影响潜值均高于焚烧处理和堆肥处理技术。卫生填埋技术的生命周期环境影响主要来自于环境酸化与光化学污染,占环境影响潜值的比例分别为 66.600%和 30.300%。

参考文献:

- [1] 蔡敏生.协同治理视角下广州市生活垃圾分类处理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
Cai M S. Research on classification of municipal solid waste in Guangzhou from the perspective of cooperative governance [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [2] 刘璟煊.城市居民垃圾分类行为的影响因素研究 [D]. 西安:西北大学, 2018.
Liu J X. Study on the influence factors of the solid waste classification behavior of urban residents [D]. Xian: Northwest University, 2018.
- [3] 陈文龙,董振武.上海市垃圾产量影响因素分析及规模预测—基于灰色系统理论的研究 [J]. 再生资源与循环经济, 2020,13(5):13-19.
Chen W L, Dong Z W. Analysis of influencing factors and scale prediction of solid waste production in Shanghai—Research based on grey system theory [J]. Renewable Resources and Recycling Economy, 2020,13(5):13-19.
- [4] Chen S, Huang J, Xiao T, et al. Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2020,717(C):137193.
- [5] 2019 年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报 [R]. 北京:中华人民共和国生态环境部, 2020.
2019Annual Report on prevention and control of environmental pollution by solid waste in large and medium cities of China [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2020.
- [6] 魏潇潇,王小铭,李 蕾,等.1979~2016 年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征 [J]. 中国环境科学, 2018,38(10):3833-3843.
Wei X X, Wang X M, Li L, et al. Temporal and spatial characteristics

- of municipal solid waste generation and treatment in China from 1979 to 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(10):3833-3843.
- [7] 李育冬,原 新.生态城市建设与中国西北地区的可持续发展 [J]. *北京师范大学学报(社会科学版)*, 2007,(5):138-144.
- Li Y D, Yuan X. Ecological city construction and sustainable development of northwest China [J]. *Journal of Beijing Normal University (Social Science)*, 2007,(5):138-144.
- [8] Fan X, Yu B, Chu Z, et al. A stochastic frontier analysis of the efficiency of municipal solid waste collection services in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,743(1):140707.
- [9] 李 梅.西部地区中小城市生活垃圾污染治理模式研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- Li M. Study on Dispose model for municipal solid waste in medium and small cities of western region [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [10] Liikanen M, Havukainen J, Hupponen M, et al. Influence of different factors in the life cycle assessment of mixed municipal solid waste management systems: A comparison of case studies in Finland and China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,154:389-400.
- [11] 雷永佳,姚 景,赵 飞,等.成都市生活垃圾两种处理方式的生命周期环境影响评价 [J]. *安全与环境工程*, 2014,21(4):75-79.
- Lei Y J, Yao J, Zhao F, et al. LCA environmental impact assessment of two treatment methods of municipal solid waste in Chengdu city [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014,21(4):75-79.
- [12] Liamsanguan C, Gheewala S H. LCA: A decision support tool for environmental assessment of MSW management systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008,87:132-138.
- [13] Bueno G, Latasa I, Lozano P J. Comparative LCA of two approaches with different emphasis on energy or material recovery for a municipal solid waste management system in Gipuzkoa [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015,51:449-459.
- [14] 朱 俊,李牧欣.层次分析法在城市生活垃圾填埋场选址中的应用——以皖南某市北部研究区为例 [J]. *资源信息与工程*, 2019,34(6):119-121,124.
- Zhu J, Li M X. Application of hierarchical analysis in the siting of municipal domestic waste landfills – a case from the northern study area of a city in southern Anhui [J]. *Resource Information and Engineering*, 2019,34(6):119-121,124.
- [15] Demesouka O E, Vavatsikos A P, Anagnostopoulos K. P. Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system: Method, implementation and case study [J]. *Waste Management*, 2013,33:1190-1206.
- [16] Hunt R G. LCA considerations of solid waste management alternatives for paper and plastics [J]. *Resources Conservation And Recycling*, 1995,14(3/4):225-231.
- [17] 杨 帆.生活垃圾堆肥过程污染气体减排与管理的生命周期评价研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2014.
- Yang F. Reduction Technologies of typical pollutional gaseous emissions during kitchen waste composting and Life Cycle Assessment of management [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [18] 王志强,李 黎,罗海霞,等.层次分析法在四川省城市生活垃圾处理技术方案选择中的应用 [J]. *宁夏农林科技*, 2012,53(3):104-107.
- Wang Z Q, Li L, Luo H X, et al. Application of analytic hierarchy process in municipal solid waste disposal method selection in Sichuan Province [J]. *Ningxia Agriculture and Forestry Technology*, 2015,53(3):104-107.
- [19] 杨建新,王如松.生命周期评价的回顾与展望 [J]. *环境科学进展*, 1998,(2):3-5.
- Yang J X, Wang R S. Retrospect and prospect of Life Cycle Assessment [J]. *Advances in Environmental Science*, 1998,(2):3-5.
- [20] 杨建新,王如松,刘晶茹.中国产品生命周期影响评价方法研究 [J]. *环境科学学报*, 2001,(2):234-237.
- Yang J X, Wang R S, Liu J R. Study on product Life Cycle Impact Assessment methodology in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001,(2):234-237.
- [21] 周 菲.杭州城市生活垃圾处理体系综合评价方法研究 [D]. 长沙:中南大学, 2010.
- Zhou F. Study on the comprehensive evaluation method of Hangzhou municipal waste disposal system [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [22] 胡志锋,马晓茜,梁增英.广州市生活垃圾处理工艺的生命周期评价 [J]. *可再生能源*, 2012,30(1):106-112.
- Hu Z F, Ma X Q, Liang Z Y. Life Cycle Assessment of municipal solid waste treatment technique in Guangzhou [J]. *Renewable Resources*, 2012,30(1):106-112.
- [23] 李 昊.基于生命周期评价的农村生活垃圾处理方式研究 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- Li H. Rural domestic waste processing method study based on Life Cycle Assessment [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [24] HJ 2.2-2008 环境影响评价技术导则—大气环境 [S].
- HJ 2.2-2008 Technical guidelines for environmental impact assessment—atmospheric environment [S].
- [25] HJ/T 2.3-2018 环境影响评价技术导则—地表水环境 [S].
- HJ/T 2.3-2018 Technical guidelines for environmental impact assessment—surface water environment [S].
- [26] HJ 610-2016 环境影响评价技术导则—地下水环境 [S].
- HJ 610-2016 Technical guidelines for environmental impact assessment—groundwater environment [S].
- [27] HJ 2.4-2009 环境影响评价技术导则—声环境 [S].
- HJ 2.4-2009 Technical guidelines for environmental impact assessment—sound environment [S].
- [28] HJ 19-2011 环境影响评价技术导则—生态影响 [S].
- HJ 19-2011 Technical guidelines for environmental impact assessment—ecological Impact [S].
- [29] HJ/T 169-2018 建设项目环境风险评价技术导则 [S].
- HJ/T 169-2018 Technical guidelines for environmental risk assessment of construction projects [S].

作者简介: 王 月(1982-),女,辽宁沈阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为污染场地风险评估.发表论文 20 余篇。