

王颖,王月,吴昌永,等.西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术综合评价[J].环境工程技术学报,2023,13(2):654-662.

WANG Y,WANG Y,WU C Y,et al.Comprehensive evaluation research of livestock and poultry waste treatment technologies in the ecological fragile areas of Northwest China[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(2):654-662.

西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术综合评价

王颖,王月*,吴昌永,范帅,王浩

环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

摘要 畜禽粪污处理技术在不同地区适用性有较大差异。为全面、客观、科学地筛选出适宜西北地区的畜禽粪污处理技术,将生命周期评价、费用效益评价与层次分析法耦合,从技术、经济、气候、直接环境影响与间接环境影响5个方面,建立了包含18项指标的西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术评价体系;以兰州市畜禽粪污处理技术为例,分析好氧堆肥、厌氧发酵、垫料利用3种处理技术的适用性。结果表明:兰州市畜禽粪污处理技术适用性综合排序为垫料利用(72.21分)>好氧堆肥(71.55分)>厌氧发酵(68.79分),垫料利用技术更适宜在西北地区推广;垫料利用技术环境友好性明显优于厌氧发酵和好氧堆肥技术;使用好氧堆肥和厌氧发酵技术处理畜禽粪污可为养殖场增加额外收益。该研究可为西北地区畜禽粪污处理技术模式构建和优化提供指导。

关键词 生态脆弱区;畜禽粪污处理技术;层次分析法;生命周期评价;费用效益分析;技术评价

中图分类号:X713 **文章编号**:1674-991X(2023)02-0654-09 **doi**:10.12153/j.issn.1674-991X.20220080

Comprehensive evaluation research of livestock and poultry waste treatment technologies in the ecological fragile areas of Northwest China

WANG Ying, WANG Yue*, WU Changyong, FAN Shuai, WANG Hao

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract The applicability of livestock and poultry waste treatment technology is quite different in different regions. In order to comprehensively, objectively and scientifically screen out suitable livestock and poultry waste treatment technologies in Northwest China, the life cycle assessment, cost benefit analysis (CBA) and analytic hierarchy process (AHP) methods were coupled to establish a screening system for livestock and poultry waste treatment technologies in Northwest China. The system included five factors of technology, economy, climate, direct and indirect environmental impacts, with a total of 18 indicators. Taking the livestock and poultry waste treatment technologies in Lanzhou as an example, the applicability of the technologies of aerobic composting, anaerobic fermentation, and litter utilization were analyzed. The results showed that the comprehensive ranking of the applicability of livestock and poultry waste treatment technologies in Lanzhou City was litter utilization technology (72.21 points)>aerobic composting technology (71.55 points) > anaerobic fermentation technology (68.79 points). It was more suitable to use litter utilization technology in Northwest China. The environmental friendliness of litter utilization technology is obviously better than that of anaerobic fermentation and aerobic composting technologies. The use of aerobic composting and anaerobic fermentation technologies could generate additional profits for the breeding farm. This research could provide guidance for the construction and optimization of livestock and poultry waste treatment technology models in Northwest China.

Key words ecological fragile area; livestock and poultry waste treatment technology; analytic hierarchy process; life cycle assessment; cost benefit analysis; technology assessment

西北地区地处我国西北内陆,包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆5省(自治区),是黄河中上游和黄

土高原、青藏高原北部生态屏障的重要支撑,生态系统功能重要,但生态环境本底脆弱、土地承载力有

收稿日期:2022-01-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC19037000)

作者简介:王颖(1995—),女,硕士研究生,主要从事固体废物污染控制研究,wangy818@126.com

* 责任作者:王月(1982—),女,高级工程师,主要从事固体废物污染控制研究,yuewangg@126.com

限^[1]。近年来,随着西北地区畜禽养殖业的专业化、规模化、集约化发展,畜禽粪污产生量日益增加。畜禽粪污中富含有机质、氮、磷、钾、重金属、致病菌等污染物,超标排放会造成水体富营养化、土壤养分过剩及重金属超标、空气恶臭弥漫等环境问题^[2-3]。《第二次全国污染源普查公报》^[4]显示,2017年我国畜禽养殖业水污染物中化学需氧量(COD)、氨氮、总氮、总磷的排放量分别占农业面源总排放量的93.76%、51.30%、42.14%、56.46%,畜禽养殖粪污排放已成为农业面源主要污染源之一。

畜禽养殖粪污主要通过资源化利用和工业化处理2种途径进行处理,从目前国内外研究和应用情况看,资源化利用是解决畜禽粪污污染的最佳方式^[5-6]。常用的资源化利用方式可分为肥料化、能源化、饲料化3种类型,受地区经济发展水平、自然条件、资源环境承载力和农业生产方式等因素的影响,不同地区适用的处理方式存在一定的差别^[7]。国内外学者也从经济效益、环境影响、环境承载力等方面对畜禽粪污处理技术展开诸多评价研究,常用的评价方法包括层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、生命周期评价(life cycle assessment, LCA)和费用效益分析(cost benefit analysis, CBA)等。罗娟等^[7]针对规模化畜禽养殖场,运用层次分析法构建了涵盖技术、经济、环境3个方面15项指标的畜禽粪污处理综合评价指标体系;向欣等^[8]通过层次分析法和模糊综合评价,从技术、经济、社会环境、适应性4个方面对武汉地区沼气工程进行综合评价;Garbs等^[9]从经济 and 环境影响2个方面分析了畜禽粪污的运输距离对沼气厂选址的影响;Ruiz等^[10]运用生命周期法、生命周期成本法和费用效益评价对沼气发电技术的环境效益进行了研究。然而,现有的评价多集中在单一技术或单一因素评价,尚不能综合考虑特定气候、经济效益、环境污染及温室气体排放等多方面影响因素。因此,针对某地区的畜禽粪污处理技术进行综合筛选,成为粪污处理项目建设过程中的难题。

基于此,笔者将AHP与LCA和CBA联用,从技术、经济、气候、直接与间接环境影响5个方面,建立西北地区畜禽粪污处理技术综合评价体系,通过与LCA、CBA相结合建立指标体系的方式,对评价指标进行定量化分析,使评价更加科学、合理;并以兰州市为例开展畜禽粪污处理技术综合评价,分析技术适用性并根据评价结果提出技术优化改进建议,以期对西北地区畜禽粪污处置管理提供方法体系和理论依据。

1 研究方法

畜禽粪污处理技术评价是一个较复杂的决策过程,既要考虑技术自身特性及参数,还要考虑地区的经济、气候及技术应用过程产生的环境影响等多方面的因素和制约条件,其所涉及的领域宽泛且指标多样。通过LCA和CBA与AHP耦合,将工程运行过程中的间接环境影响和废物利用收益等因素引入指标体系中,并利用分析结果为指标评价提供数据支撑,充分利用层次结构与LCA及CBA定量分析的优势,以期系统、科学地对西北地区畜禽粪污处理技术进行评价。技术筛选流程如图1所示。

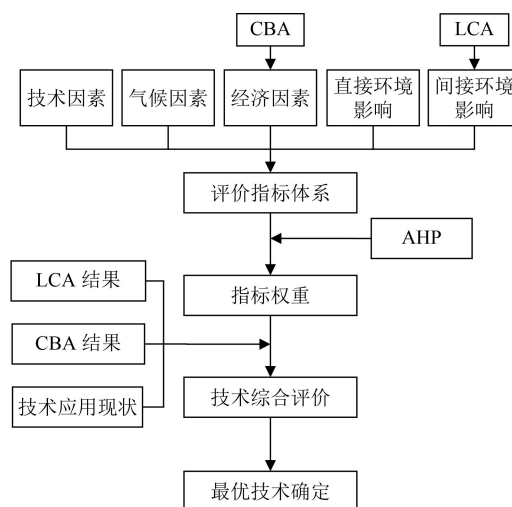


图1 畜禽粪污处理技术筛选基本流程

Fig.1 Flow diagram of livestock and poultry waste treatment technology screening

1.1 生命周期评价分析

根据ISO 14040—2006《生命周期评价原则与框架》,将LCA过程分为目标定义与范围确定、清单分析和影响评价3个部分。

1.1.1 目标定义与范围确定

好氧堆肥、厌氧发酵和垫料利用是当前西北地区常用的畜禽粪污处理技术^[11],以处理1 t粪污为评价功能单位(functional unit, FU),对3种畜禽粪污处理技术的全生命周期过程进行综合评价。根据研究目的,确定系统边界范围主要是粪污收集、处理以及资源利用过程中的能源投入及污染物排放。3种畜禽粪污处理技术的工作流程如图2所示。好氧堆肥LCA过程分为堆肥、翻堆、废水处理3个阶段^[12-13][(图2(a))];厌氧发酵LCA过程分为厌氧发酵、沼气发电和沼液沼渣处理3个阶段[(图2(b))];垫料利用LCA过程分为固液分离、高温发酵、垫料利用、废液处理3个阶段[(图2(c))].

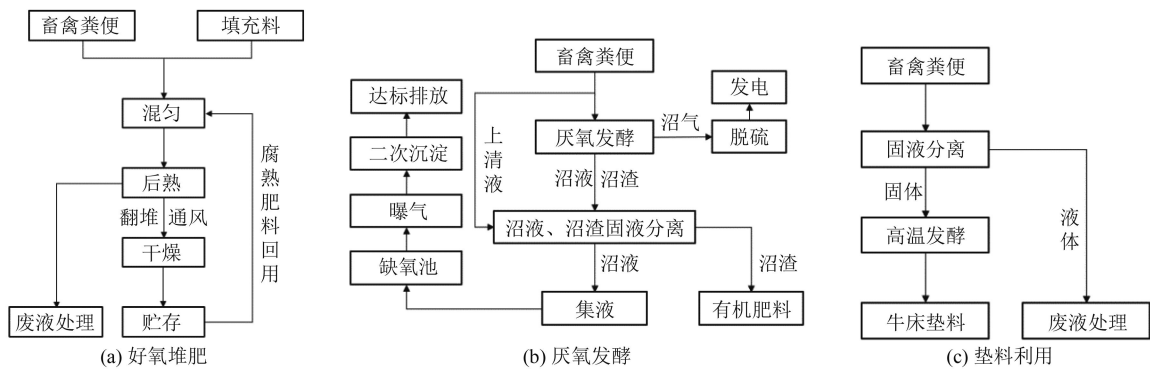


图 2 3 种畜禽粪污处理技术的工作流程

Fig.2 Workflow of three livestock and poultry waste treatment technologies

1.1.2 清单分析

畜禽粪污处理过程中产生的环境污染物分为直接排放和间接排放 2 种方式。直接排放污染来源包括^[13,14-19]: 1)堆肥阶段,来自堆肥过程中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和 NH_3 的释放;2)废水处理阶段,来自活性污泥与废水反应过程中释放的 CH_4 和 CO_2 ,以及废水达标处理后排放的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP^[20];3)厌氧发酵阶段,主要为沼气运送过程中 1% 的沼气损失释放的 CH_4 和 CO_2 ;4)沼气发电阶段,主要为沼气燃烧产生的 CO_2 ;5)沼液、沼渣处理阶段,主要为沼液处理过程中释放的 CO_2 ,沼液达标处理后排放的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP,沼渣还田产生的 CO_2 、 CH_4 、 NO_x 、CO、 SO_2 以及氮和磷淋失^[21-22];6)高温发酵阶段,来自于好氧发酵过程中发酵仓内 CO_2 和 CH_4 的流出;7)垫料储存阶段,来自于垫料储存过程中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的释放。

间接排放主要为施工设备(如拖拉机、翻抛机、铲车、包装机等)和处理设施运行过程中电、柴油消耗^[23]产生的污染排放,其中,堆肥阶段设备运行总能耗折合成电能消耗为 $3.13 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{FU}$,翻堆阶段设备运行总能耗折合成电能消耗为 $3.00 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{FU}$,厌氧发酵阶段处理设施运行电力消耗为 $22.06 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{FU}$,沼液、沼渣处理阶段设施运行电力消耗为 $99.88 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{FU}$,垫料利用阶段设备运行电力消耗为 $6.46 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{FU}$ 。每消耗 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 电能的污染物排放量如表 1 所示。3 种技术各阶段污染物排放清单如表 2 所示。

表 1 单位耗电量污染物排放量
Table 1 Electric pollutant emissions
per $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ consumed $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$

CO_2	CH_4	NO_x	CO	SO_2
1.07	2.60×10^{-3}	6.46×10^{-3}	1.55×10^{-3}	9.93×10^{-3}

1.1.3 影响评价

畜禽粪污处理过程的环境影响类型为全球变

暖、环境酸化、富营养化、光化学臭氧合成污染 4 个方面^[13]。根据清单分析结果,按不同环境影响类型进行特征化^[24-25]、标准化^[26]及环境影响加权计算,结果如表 3 所示。4 类环境问题的综合影响排序为垫料利用技术(0.010)<厌氧发酵技术(0.149)<好氧堆肥技术(0.189)。好氧堆肥技术在畜禽粪污处理过程中产生的环境污染最大,主要是由于好氧堆肥技术在环境酸化和富营养化 2 个方面的环境影响远远高于其他 2 种技术。好氧堆肥技术的生命周期影响主要来自于环境酸化和全球变暖,二者合计占环境影响潜值的比例分别为 68.78% 和 13.76% 。

1.2 费用效益分析

CBA 是一种通过权衡不同方案实施过程中全部费用成本和预期效益的评价方法,被广泛应用于方案合理性的经济评价^[27]。目前针对畜禽粪污处理技术的经济评价,多集中在养殖场的经济效益,而忽略了种植业使用化肥、沼液、沼渣和沼气发电产生的经济、环境和社会外部效益。根据文献^[9,28-30]及现场调研情况,确定西北地区畜禽粪污处理体系中的成本主要包括项目建设、人员、水、电、物料购买及粪污运输投入的费用,效益主要包括沼渣、沼液等废物利用以及沼气、有机肥、垫料产物利用产生的效益。

1.3 评价指标体系的构建

1.3.1 指标体系构建

结合 LCA 和 CBA,从技术、经济、气候、直接环境影响和间接环境影响 5 个方面,建立西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术评价体系,结果如图 3 所示。

1.3.2 指标权重确定

根据已建立的评价指标体系,通过文献调研^[31-33]和专家咨询等方式,采用 1~9 标度法^[34-35]对同层次指标组中各元素进行重要性比较,构建的目标层(A)与准则层(B)的判断矩阵如表 4 所示,准则层(B)与指标层(C)的判断矩阵如表 5~表 9 所示。表中 W_i 为指标权重, $l_{\max}$ 为判断矩阵最大特征根,CR 为

表 2 3 种畜禽粪污处理技术生命周期清单分析结果

Table 2 Analysis results of life cycle inventory of three livestock and poultry waste treatment technologies												kg/FU
技术	处理环节	排放方式	CO ₂	CH ₄	NO _x	CO	SO ₂	N ₂ O	NH ₃	COD	NH ₃ -N	TP
好氧堆肥	堆肥阶段	直接排放	78.100	3.800				0.147	3.260			
		间接排放	3.349	0.008	0.020	0.005	0.031					
	翻堆阶段	直接排放										
		间接排放	3.210	0.008	0.019	0.005	0.030					
	废水处理阶段	直接排放	45.200	0.013						0.240	0.130	0.013
		间接排放										
合计			129.859	3.829	0.039	0.010	0.061	0.147	3.260	0.240	0.130	0.013
厌氧发酵	厌氧发酵阶段	直接排放	5.231	3.509								
		间接排放	23.604	0.057	0.143	0.034	0.219					
	沼气发电阶段	直接排放	96.498									
		间接排放										
	沼液、沼渣处理阶段	直接排放	148.986	0.003	0.009	0.002	0.012		0.001	1.247	0.409	0.061
		间接排放	106.872	0.260	0.645	0.155	0.992					
合计			381.191	3.829	0.797	0.191	1.223		0.001	1.247	0.409	0.061
垫料利用	垫料利用设备运行	直接排放										
		间接排放	6.912	0.017	0.042	0.010	0.064					
	高温发酵阶段	直接排放	3.480	0.004								
		间接排放										
	垫料储存阶段	直接排放	11.410	0.101				0.005				
		间接排放										
废水处理阶段	直接排放	19.396							0.201	0.109	0.011	
	间接排放											
合计			41.198	0.122	0.042	0.01	0.064	0.005		0.201	0.109	0.011

表 3 3 种畜禽粪污处理技术生命周期过程的标准化数值及加权评估值

Table 3 Standardized value and weighted evaluation value of life cycle process of three livestock and poultry waste treatment technologies

技术	环境影响类型	标准化数值	加权评估值	环境总影响
好氧堆肥	全球变暖	0.031	0.026	0.189
	环境酸化	0.178	0.130	
	富营养化	0.021	0.015	
	光化学臭氧合成	0.034	0.018	
厌氧发酵	全球变暖	0.055	0.045	0.149
	环境酸化	0.051	0.037	
	富营养化	8.29×10 ⁻³	6.05×10 ⁻³	
	光化学臭氧合成	0.114	0.061	
垫料利用	全球变暖	3.03×10 ⁻³	4.36×10 ⁻³	0.010
	环境酸化	2.66×10 ⁻³	1.94×10 ⁻³	
	富营养化	4.92×10 ⁻⁴	1.10×10 ⁻³	
	光化学臭氧合成	5.26×10 ⁻³	2.79×10 ⁻³	

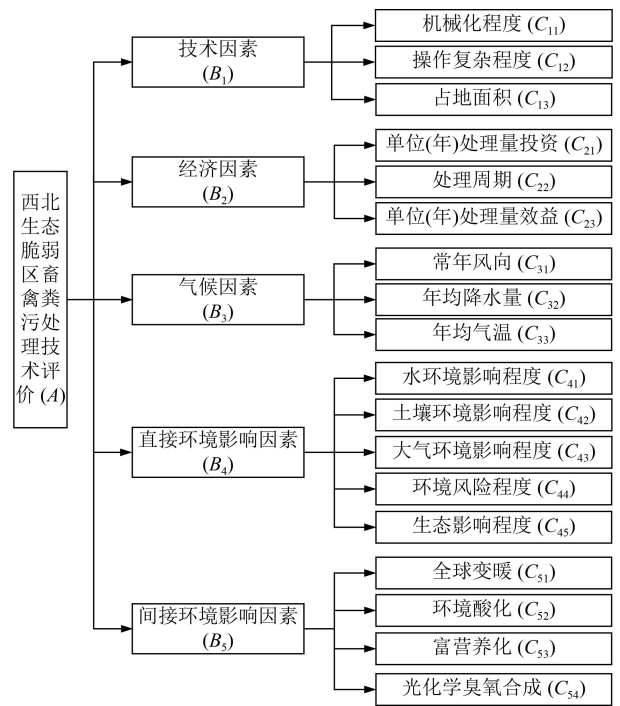


图 3 畜禽粪污处理技术评价指标体系

Fig.3 Index evaluation system of livestock and poultry waste treatment technology

表 4 目标层(A)与准则层($B_1 \sim B_5$)判断矩阵

Table 4 Judgment matrix about target layer (A) and criterion layer ($B_1 \sim B_5$)

A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	W_i	$I_{\max}$	CR
B_1	1	1/2	5	1/2	2	0.203		
B_2	2	1	4	1/2	2	0.252		
B_3	1/5	1/4	1	1/5	1/4	0.051	5.178	0.032
B_4	2	2	5	1	2	0.346		
B_5	1/2	1/2	4	1/2	1	0.148		

表 5 准则层(B_1)与指标层($C_{11} \sim C_{13}$)判断矩阵

Table 5 Judgment matrix about criterion layer (B_1) and index layer ($C_{11} \sim C_{13}$)

B_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	W_i	$I_{\max}$	CR
C_{11}	1	2	4	0.532		
C_{12}	1/2	1	5	0.366	3.095	0.054
C_{13}	1/4	1/5	1	0.102		

表 6 准则层(B_2)与指标层($C_{21} \sim C_{23}$)判断矩阵

Table 6 Judgment matrix about criterion layer (B_2) and index layer ($C_{21} \sim C_{23}$)

B_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	W_i	$I_{\max}$	CR
C_{21}	1	4	2	0.522		
C_{22}	1/4	1	1/6	0.095	3.137	0.079
C_{23}	1/2	6	1	0.382		

层次总排序一致性比率。

依据上述计算结果,整理计算指标层(C)总排序结果,如表 10 所示,层次总排序一致性比率(CR)=

表 7 准则层(B_3)与指标层($C_{31} \sim C_{33}$)判断矩阵

Table 7 Judgment matrix about criterion layer (B_3) and index layer ($C_{31} \sim C_{33}$)

B_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	W_i	$I_{\max}$	CR
C_{31}	1	2	2	0.478		
C_{32}	1/2	1	1/3	0.172	3.136	0.078
C_{33}	1/2	3	1	0.350		

表 8 准则层(B_4)与指标层($C_{41} \sim C_{45}$)判断矩阵

Table 8 Judgment matrix about criterion layer (B_4) and index layer ($C_{41} \sim C_{45}$)

B_4	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}	W_i	$I_{\max}$	CR
C_{41}	1	3	2	3	7	0.382		
C_{42}	1/3	1	3	3	6	0.265		
C_{43}	1/2	1/3	1	3	8	0.204	5.478	0.085
C_{44}	1/3	1/3	1/3	1	6	0.116		
C_{45}	1/7	1/6	1/8	1/6	1	0.034		

表 9 准则层(B_5)与指标层($C_{51} \sim C_{54}$)判断矩阵

Table 9 Judgment matrix about criterion layer (B_5) and index layer ($C_{51} \sim C_{54}$)

B_5	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	W_i	$I_{\max}$	CR
C_{51}	1	1/5	2	1/3	0.112		
C_{52}	5	1	6	3	0.558		
C_{53}	1/2	1/6	1	1/4	0.071	4.079	0.022
C_{54}	3	1/3	4	1	0.259		

0.054 9<0.10,表明矩阵具有良好的一致性。其中水环境影响程度(C_{41})的权重最大,为 0.132;其次分别

表 10 指标层(C)总排序结果

Table 10 Total ranking result of index layer (C)

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	综合权重	综合排序
西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术评价(A)	技术因素(B_1)	0.203	机械化程度(C_{11})	0.532	0.108	3
			操作复杂程度(C_{12})	0.366	0.074	7
			占地面积(C_{13})	0.102	0.021	13
	经济因素(B_2)	0.252	单位(年)处理量投资(C_{21})	0.522	0.131	2
			处理周期(C_{22})	0.095	0.024	12
			单位(年)处理量效益(C_{23})	0.382	0.096	4
	气候因素(B_3)	0.051	常年风向(C_{31})	0.478	0.024	11
			年均降水量(C_{32})	0.172	0.009	18
			年均气温(C_{33})	0.350	0.018	14
	直接环境影响因素(B_4)	0.346	水环境影响程度(C_{41})	0.382	0.132	1
			土壤环境影响程度(C_{42})	0.265	0.092	5
			大气环境影响程度(C_{43})	0.204	0.071	8
			环境风险程度(C_{44})	0.116	0.040	9
			生态影响程度(C_{45})	0.034	0.013	16
	间接环境影响因素(B_5)	0.148	全球变暖(C_{51})	0.112	0.017	15
			环境酸化(C_{52})	0.558	0.083	6
			富营养化(C_{53})	0.071	0.011	17
			光化学臭氧合成(C_{54})	0.259	0.038	10

为单位(年)处理量投资(C_{21})、机械化程度(C_{11})、运行效益(C_{23})和土壤环境影响程度(C_{42}), 权重分别为 0.131、0.108、0.096 和 0.092。

1.3.3 畜禽粪污处理技术综合评价

首先, 根据已建立的评价指标体系, 专家依据评价赋值表^[36-37](表 11)结合技术实际应用情况对评价指标进行打分。然后, 采用加权求和法计算 3 种处理技术的综合得分, 公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^3 \alpha_i M_i + \sum_{j=1}^3 \beta_j N_j + \sum_{k=1}^3 \gamma_k O_k + \sum_{l=1}^5 \delta_l P_l + \sum_{m=1}^4 \mu_m Q_m \tag{1}$$

式中: R 为西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术评价综合得分; α_i 、 β_j 、 γ_k 、 δ_l 、 μ_m 为评价指标体系中各准则层的权重; M_i 、 N_j 、 O_k 、 P_l 、 Q_m 为对应指标的评分值。

表 11 西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术适用性评价赋值

Table 11 Assignment of applicability evaluation of livestock and poultry waste treatment technologies in ecological fragile areas of Northwest China

指标层	20分	40分	60分	80分	100分
机械化程度(C_{11})	人工	以人工为主	半自动	以机械化设备为主	全自动
操作复杂程度(C_{12})	复杂	较复杂	一般	较简单	简单
占地面积(C_{13})/ hm^2	>3	1.5~3	1~1.5	0.5~1	<0.5
单位(年)处理量投资(C_{21})/(元/ m^3)	>40	30~40	20~30	10~20	<10
处理周期(C_{22})/d	>20	15~20	10~15	5~10	<5
单位(年)处理量效益(C_{23})/(元/ m^3)	<15	15~20	20~25	25~30	>30
常年风向(C_{31})	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1 m/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%
年均降水量(C_{32})/mm	>1 600	1 200~1 600	800~1 200	400~800	<400
年平均气温(C_{33})/ $^{\circ}\text{C}$	<0	0~5	5~10	10~15	>15
水环境影响程度(C_{41})		一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
土壤环境影响程度(C_{42})		一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
大气环境敏感程度(C_{43})		一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
环境风险(C_{44})		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_{45})		一级评价	二级评价	三级评价	仅做简要说明
全球变暖(C_{51})	环境影响潜值高于0.09	环境影响潜值为0.06~0.09	环境影响潜值为0.03~0.06	环境影响潜值为0.01~0.03	环境影响潜值低于0.01
环境酸化(C_{52})	环境影响潜值高于0.09	环境影响潜值为0.06~0.09	环境影响潜值为0.03~0.06	环境影响潜值为0.01~0.03	环境影响潜值低于0.01
富营养化(C_{53})	环境影响潜值高于0.09	环境影响潜值为0.06~0.09	环境影响潜值为0.03~0.06	环境影响潜值为0.01~0.03	环境影响潜值低于0.01
光化学臭氧合成(C_{54})	环境影响潜值高于0.09	环境影响潜值为0.06~0.09	环境影响潜值为0.03~0.06	环境影响潜值为0.01~0.03	环境影响潜值低于0.01

2 案例研究

2.1 研究区概况

兰州市位于甘肃省中部、黄河上游, 处于黄土高原、青藏高原、内蒙古高原交接地带, 是我国西北第二大城市。市区南北皆为高山, 黄河横贯市区中心, 总体呈现“两山夹一河”的地理形态。平均海拔为 1 500~3 000 m, 属温带大陆性气候, 全年平均气温为 10.3 $^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量为 327 mm。受地理环境和人为因素影响, 兰州市植被覆盖率低、地质灾害频发、水土流失严重, 总体生态环境较为脆弱。据统计, 2020 年全市畜禽饲养量为 809.39 万头(只), 畜禽粪污资源总量为 306.12 万 t, 资源化利用量为 244.13

万 t, 利用率达到 79.75% 以上。其中, 直接还田 39.25 万 t, 占比 16.11%; 肥料化利用 190.51 万 t, 占比 78.18%; 能源化利用 6.81 万 t, 占比 2.79%; 垫料化利用 7.11 万 t, 占比 2.92%。

2.2 技术费用效益评价

兰州市已有的好氧堆肥、厌氧发酵、垫料利用技术应用过程中的项目建设、人员、水、电、物料购买费用^[38]如表 12 所示。效益部分折合为市场对应物料购买费用, 其中有机肥按照市场售价 700 元/t 计算; 沼气按 1.8 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 折合为电能后, 根据兰州市的一般工商用电价格 1.026 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$) 计算; 沼液、沼渣折合为 4 500 t 有机肥计算; 垫料按照 35 元/ m^3

表 12 3 种畜禽粪污处理技术成本及效益分析

Table 12 Cost and benefit analysis of three livestock and poultry waste treatment technologies

技术	养殖场规模/头(猪)	粪污处	主要产物				成本/(万元/a)				效益/(万元/a)				
		理量/ (万 m³/a)	有机 肥/(t/a)	沼气/ (万m³/a)	沼液、沼 渣/(t/a)	垫料/ (万m³/a)	建设 投资	人员 工费	水、电及 物料费	合计	有机肥	沼气 发电	沼液、 沼渣 还田	垫料 利用	合计
好氧堆肥	15 000	0.58	180.29				2	4.8	4.48	11.28	12.6				12.6
厌氧发酵	100 000	18.25		103.58	4 500		83.8	72	277.61	433.41		191.29	315		506.29
垫料利用	100 000	11.75				7.51	37.98	48	253.34	339.32				262.89	262.89

计算,技术应用过程中效益如表 12 所示。由表 12 可见,厌氧发酵技术成本和效益均为 3 种技术中最高,与另外 2 种技术相比,厌氧发酵技术的运营管理相对复杂,成本投入也相对较高,但效益来源也更加多样化,包括沼气发电、沼液和沼渣还田利用等。3 种技术粪污处理量与单位(年)处理量成本及效益的关系如图 4 所示,好氧堆肥、厌氧发酵、垫料利用单位(年)处理量成本分别为 19.44、23.75、28.88 元/m³,单位(年)处理量效益分别为 21.72、27.74、22.37 元/m³,好氧堆肥和厌氧发酵技术的使用均可产生利润,分别为 2.28、3.99 元/m³,为养殖场增加额外收益,垫料利用技术虽未产生利润,但垫料的使用可降低养殖场运营成本。

2.3 技术比选

根据兰州市好氧堆肥、厌氧发酵、垫料利用 3 种技术应用现状及 LCA 结果(表 3)和 CBA 结果(表 12),结合西北生态脆弱区畜禽粪污处理技术适用性评价标准(表 11),对技术指标进行参数赋值,结果如表 13 所示。

根据式(1)计算 3 种处理技术的适用性评价得分(图 5),排序为垫料利用技术(72.21 分)>好氧堆肥技术(71.55 分)>厌氧发酵技术(68.79 分)。从综合得分情况看,3 种技术得分较为接近,垫料利用技术较为理想,评价结果与相关文献^[7]研究结果一致。根据 LCA 结果,垫料利用技术环境友好性明显优于好氧堆肥技术和厌氧发酵技术,但在技术和经济指

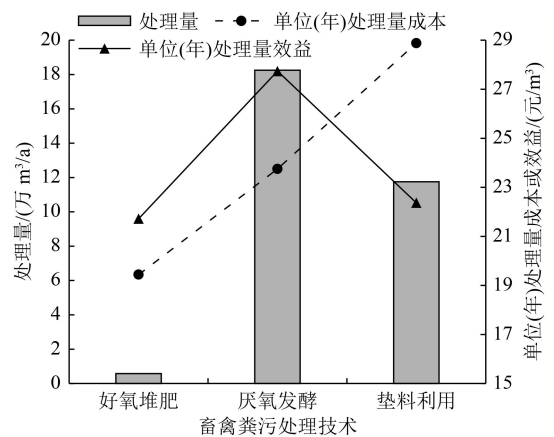


图 4 3 种技术粪污处理量与单位(年)处理量成本及效益关系

Fig.4 Relationship between the amount of waste treatment and annual cost and benefit per unit treatment amount of 3 technologies

标方面得分较低,应进一步优化设备、工艺流程,提高机械自动化程度,缩短处理周期,提高处理效率。好氧堆肥技术虽然投入成本低、操作简单、机械化程度较高,但该技术对环境间接影响较大,应针对性地改进处理设施和完善处理工艺,减少温室气体排放和养分损失,以降低对环境的二次影响;厌氧发酵技术机械化程度高、投资回收期较短,且可以产生持续的经济效益,但操作复杂、投资成本和运行维护费用高,应在政府给予补贴的基础上,强化技术指导、改进治理工艺,进而提高处理效率,降低工程建设和运行成本。

表 13 3 种畜禽粪污处理技术的指标参数得分

Table 13 Index parameter score of three livestock and poultry waste treatment technologies

技术	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄
好氧堆肥	80	80	60	80	60	60	80	100	60	80	80	60	100	80	80	20	80	80
厌氧发酵	100	40	80	60	80	80	40	80	60	80	60	60	80	80	60	60	100	40
垫料利用	80	60	20	60	40	60	80	100	60	80	60	60	100	80	100	100	100	100

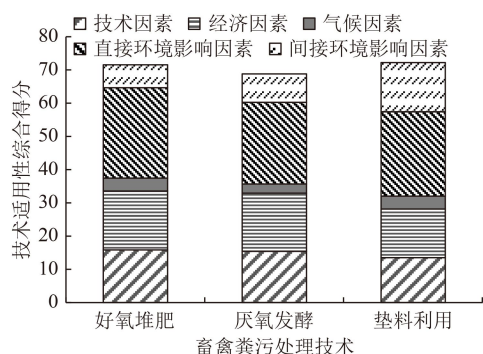


图5 畜禽粪污处理技术适用性综合得分

Fig.5 Comprehensive score of applicability of livestock and poultry waste treatment technologies

3 结论

(1)针对西北地区生态脆弱的特点,结合 LCA 和 CBA,通过 AHP 建立包含技术、经济、气候、直接环境影响、间接环境影响 5 个方面共 18 项指标的畜禽粪污处理技术筛选体系。依据专家咨询结果,确定评价体系权重,进一步建立综合评价模型,为西北地区畜禽粪污管理工作提供技术支撑。

(2)生命周期评价结果显示,3 种处理技术环境影响值排序为垫料利用(0.010)<厌氧发酵(0.149)<好氧堆肥(0.189),垫料利用技术环境友好性明显优于厌氧发酵和好氧堆肥技术;费用效益评价结果显示,好氧堆肥和厌氧发酵技术处理粪便均可产生利润,分别为 2.28、3.99 元/m³。

(3)以兰州市好氧堆肥、厌氧发酵、垫料利用 3 种畜禽粪污处理技术为例,运用建立的指标体系开展分析研究,结果表明,垫料利用技术的适用性评价得分最高,为 72.21 分,该技术在环境影响方面较其他 2 种技术具有明显优势,更适宜在西北地区推广。

参考文献

- [1] 程东林,陈英,乔蕻强,等.西北生态脆弱区城市土地生态安全时序性评价:以兰州市为例[J].中国国土资源经济,2020,33(7):83-89.
CHENG D L, CHEN Y, QIAO H Q, et al. Time series evaluation of urban land eco-security in eco-vulnerable areas of northwest China: a case study of Lanzhou[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(7): 83-89.
- [2] LI F, CHENG S K, YU H L, et al. Waste from livestock and poultry breeding and its potential assessment of biogas energy in rural China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 451-460.
- [3] WANG M L, LIU R H, LU X Y, et al. Heavy metal contamination and ecological risk assessment of swine manure irrigated vegetable soils in Jiangxi Province, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 100(5): 634-640.
- [4] 生态环境部,国家统计局,农业农村部.第二次全国污染源普查公报[A/OL].(2020-06-08)[2021-08-08].https://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.
- [5] ALI RAJAEIFAR M, GHANAVATI H, DASHTI B B, et al. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: a comparative review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 414-439.
- [6] 李红娜,吴华山,耿兵,等.我国畜禽养殖污染防治瓶颈问题及对策建议[J].环境工程技术学报,2020,10(2):167-172.
LI H N, WU H S, GENG B, et al. The bottleneck and countermeasures in the pollution control of livestock and poultry breeding in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 167-172.
- [7] 罗娟,赵立欣,姚宗路,等.规模化养殖场畜禽粪污处理综合评价指标体系构建与应用[J].农业工程学报,2020,36(17):182-189.
LUO J, ZHAO L X, YAO Z L, et al. Construction and application of comprehensive evaluation index system for waste treatment on intensive livestock farms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(17): 182-189.
- [8] 向欣,罗煜,程红胜,等.基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J].农业工程学报,2014,30(18):205-212.
XIANG X, LUO Y, CHENG H S, et al. Biogas engineering technology screening based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 205-212.
- [9] GARBS M, GELDERMANN J. Analysis of selected economic and environmental impacts of long distance manure transports to biogas plants[J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 109: 71-84.
- [10] RUIZ D, SAN MIGUEL G, CORONA B, et al. Environmental and economic analysis of power generation in a thermophilic biogas plant[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1418-1428.
- [11] 陈励芳,赵希智,朱旭鑫.金昌市、武威市和兰州市畜禽养殖粪污资源化利用现状调研报告[J].甘肃畜牧兽医,2017,47(11):48-50.
CHEN L F, ZHAO X Z, ZHU X X. Investigation report on the present situation of resource utilization of livestock and poultry manure in Jinchang, Wuwei and Lanzhou[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary, 2017, 47(11): 48-50.
- [12] 罗长健.畜禽粪便好氧堆肥处理技术探讨[J].河南农业,2019(18):46-47.
LUO C J. Discussion on aerobic composting treatment technology of livestock manure[J]. Agriculture of Henan, 2019(18): 46-47.
- [13] 裴忠良.集约化猪场粪便处理的生命周期评价[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [14] 曾雅琼,施正香,王盼柳.牛粪垫料再生系统温室气体排放及其对环境的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(7):66-74.
ZENG Y Q, SHI Z X, WANG P L. Research on greenhouse gas emissions of bedding recovery unit system and its impact on environment[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 66-74.
- [15] MAEDA K, HANAJIMA D, MORIOKA R, et al. Mitigation of

- greenhouse gas emission from the cattle manure composting process by use of a bulking agent[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(1): 96-106.
- [16] LIU J S, XIE Z B, LIU G, et al. A holistic evaluation of CO₂ equivalent greenhouse gas emissions from compost reactors with aeration and calcium superphosphate addition[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 25: 177-185.
- [17] van der WERF H M G, PETIT J, SANDERS J. The environmental impacts of the production of concentrated feed: the case of pig feed in Bretagne[J]. *Agricultural Systems*, 2005, 83(2): 153-177.
- [18] 代小蓉. 集约化猪场NH₃的排放系数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [19] 夏湘勤, 席北斗, 黄彩红, 等. 畜禽粪便堆肥臭气控制研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(6): 649-657.
- XIA X Q, XI B D, HUANG C H, et al. Review on odor control of livestock and poultry manure composting[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 649-657.
- [20] 张颖, 夏训峰, 李中和, 等. 规模化养牛场粪便处理生命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1423-1427.
- ZHANG Y, XIA X F, LI Z H, et al. Life cycle assessment of manure treatment in scaled cattle farms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1423-1427.
- [21] 张颖, 夏训峰, 周素霞, 等. 规模化养猪场生命周期环境影响评价[J]. *环境工程技术学报*, 2012, 2(5): 428-432.
- ZHANG Y, XIA X F, ZHOU S X, et al. Life cycle assessment of large-scale piggyery for environmental assessment[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(5): 428-432.
- [22] 梁勤爽. 模拟畜禽粪便直接还田对氮磷的释放[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [23] 段雪琴. 集约化奶牛养殖场粪污管理系统的环境影响生命周期评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [24] 梁龙, 陈源泉, 高旺盛. 我国农业生命周期评价框架探索及其应用: 以河北栾城冬小麦为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(5): 154-160.
- LIANG L, CHEN Y Q, GAO W S. Framework study and application of agricultural life cycle assessment in China: a case study of winter wheat production in Luancheng of Hebei[J]. *China Population Resources and Environment*, 2009, 19(5): 154-160.
- [25] CASTANHEIRA É G, DIAS A C, ARROJA L, et al. The environmental performance of milk production on a typical Portuguese dairy farm[J]. *Agricultural Systems*, 2010, 103(7): 498-507.
- [26] HUIJBREGTS M A J, THISSEN U, GUINÉE J B, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(4): 541-573.
- [27] 李云燕, 葛畅. 环境费用效益分析: 理论、应用与展望[J]. *环境保护与循环经济*, 2016, 36(9): 29-34.
- LI Y Y, GE C. Analysis of environmental cost and benefit: theory, application and prospect[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2016, 36(9): 29-34.
- [28] 连海明. 规模化养猪场粪污处理的成本与效益分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [29] MARTINEZ-SANCHEZ V, KROMANN M A, ASTRUP T F. Life cycle costing of waste management systems: overview, calculation principles and case studies[J]. *Waste Management*, 2015, 36: 343-355.
- [30] YANG L L, XIAO X, GU K. Agricultural waste recycling optimization of family farms based on environmental management accounting in rural China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(10): 5515.
- [31] 李艳苓, 朱昌雄, 李红娜, 等. 基于层次分析法的农业面源污染防治技术评价[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(4): 355-361.
- LI Y L, ZHU C X, LI H N, et al. Evaluation of agricultural non-point source pollution control technologies based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 355-361.
- [32] 李梁, 曹欣然, 庞燕, 等. 洱海流域农村生活污水治理技术评价[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(4): 349-354.
- LI L, CAO X R, PANG Y, et al. Evaluation of rural domestic wastewater treatment technologies in Lake Erhai Basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 349-354.
- [33] 韩旭, 生贺, 夏甫, 等. 危险废物填埋场地下水污染风险评价中指标权重计算方法优化比选[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(6): 1378-1386.
- HAN X, SHENG H, XIA F, et al. Optimized comparison and selection of index weight calculation methods in hazardous waste landfill site groundwater pollution risk assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(6): 1378-1386.
- [34] 李艳萍, 乔琦, 柴发合, 等. 基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(3): 334-340.
- LI Y P, QIAO Q, CHAI F H, et al. Study on environmental risk assessment index weight of industrial park based on the analytic hierarchy process[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(3): 334-340.
- [35] 田羽, 方刚, 周长波, 等. 我国橡胶制品行业VOCs末端减排技术评估[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(4): 797-806.
- TIAN Y, FANG G, ZHOU C B, et al. Evaluation on VOCs terminal emission reduction technologies in rubber products industry in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(4): 797-806.
- [36] 王月, 王励博, 杨悦, 等. 西北生态脆弱区城市生活垃圾处理厂适用性评价[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5933-5942.
- WANG Y, WANG M B, YANG Y, et al. The optimization of municipal solid waste treatment technology in the ecological fragile areas of northwest China[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(12): 5933-5942.
- [37] PUBULE J, BLUMBERGA D. Impact assessment of biogas projects in Latvia[J]. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 2014, 9(2): 251-262.
- [38] 问鑫. 规模化猪场不同粪污处理的机理及经济分析[J]. *湖南饲料*, 2017(6): 33-38.
- WEN X. Mechanism and economic analysis of different manure treatment in large-scale pig farms[J]. *Hunan Feed*, 2017(6): 33-38. ◇