

酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系的构建及验证

李青容, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 湛方栋, 李博, 李元

引用本文:

李青容, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 湛方栋, 李博, 李元. 酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系的构建及验证[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 547–558.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1266>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Cd污染农田的炭基修复方案设计和效果评价

魏岚, 黄连喜, 刘晓文, 李翔, 张建文, 涂新红, 黄庆, 吴颖欣, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2277–2287 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0739>

不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响

冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 郭康莉, 刘晓, 姜慧敏, 杨俊诚, 李桂花, 张建峰

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1759–1767 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0426>

基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合效果评价

李义纯, 王艳红, 陈勇, 唐明灯, 李奇, 李林峰, 林晓扬, 尹贻龙, 艾绍英

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1219–1228 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1397>

镉污染稻田修复效果评估指标体系的构建

吴霄霄, 米长虹, 吴昊, 胡均铭, 林大松, 郑宏杰, 焦位雄

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1498–1505 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1604>

碱活化载镁橘皮生物炭除磷后对土壤的改良作用

王波, 罗婷, 勾曦, 唐勇, 姜飞, 吴桐, 谢燕华

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 155–162 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0627>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李青容, 陈建军, 祖艳群, 等. 酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系的构建及验证[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 547–558.

LI Q R, CHEN J J, ZU Y Q, et al. Construction and verification of a comprehensive evaluation index system for soil improvement in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 547–558.



开放科学 OSID

酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系的构建及验证

李青容, 陈建军, 祖艳群, 何永美, 湛方栋, 李博, 李元*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 建立科学、合理、实用的酸性农田土壤改良效果综合评价体系, 为酸性农田改良效果评价工作提供依据。利用文献分析法筛选酸性农田土壤改良效果的评价指标, 采用层次分析法确定指标权重, 构建酸性农田土壤改良效果综合评价体系, 并以云南省梁河县的酸性农田实验进行验证。本文以酸性土壤改良为关键词查阅文献, 根据各指标出现频率筛选出土壤肥力、作物生长与安全、经济效益3个中间层指标, 土壤有机质、土壤pH、交换性酸等24个最低层指标, 确定了各指标权重系数, 建立了酸性农田土壤改良效果的综合评价指标体系, 利用逼近理想解排序(TOPSIS)加权法对大田实验改良效果进行排序为复合定性纤维素204(SQC204)>复合定性一纤维素201(SQC201)>复合定性铁铈纤维素(SQFC-00S)。

关键词: 酸性; 土壤改良; 综合评价; 层次分析法(AHP)

中图分类号: S156.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)03-0547-12 doi:10.11654/jaes.2021-1266

Construction and verification of a comprehensive evaluation index system for soil improvement in farmland

LI Qingrong, CHEN Jianjun, ZU Yanqun, HE Yongmei, ZHAN Fangdong, LI Bo, LI Yuan*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: This study aimed to establish a scientific, reasonable, and practical evaluation system for soil improvement in acidic farmland, and to provide a basis for evaluating this improvement. The relevant evaluation indexes were selected based on a literature review. The analytic hierarchy process was used to determine the index weights, and a comprehensive evaluation system was constructed to determine the soil improvement effect in acidic farmland. The results were verified through an experiment on acidic farmland in Lianghe County, Yunnan Province. Based on a keyword search in the literature, we screened for the occurrence of all indexes related to soil fertility, crop growth, and safety and economic benefits to determine the middle level indicators; soil organic matter, soil pH, exchangeable acidity, and 24 other parameters were evaluated to determine the lowest level indexes. Subsequently, the coefficient of each index weight was determined and a comprehensive evaluation index system was established to evaluate the acidic soil improvement effect. Based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) weighting method, the improvement effect obtained in the field experiment was ranked in the order of synthesize qualitative cellulose 204 (SQC204) > synthesize qualitative cellulose 201 (SQC201) > synthesize qualitative Fe-Ce cellulose (SQFC-00S). The evaluation system constructed in this study can provide a reference and basis for the evaluation of the improvement effect of acidic farmland soil.

Keywords: acidity; soil improvement; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process (AHP)

收稿日期: 2021-10-27 录用日期: 2022-01-24

作者简介: 李青容(1997—), 女, 四川巴中人, 硕士研究生, 从事土壤生态修复研究。E-mail: 2514997078@qq.com

*通信作者: 李元 E-mail: liyuan@ynau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802603)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFC1802603)

由于各种化学和生物化学反应,土壤特征表现出不同的酸性或碱性。我国是继欧洲、北美之后的第三大酸雨区^[1],其中南方地区的酸性红壤面积约占全国土地总面积的22.7%^[2]。农田土壤酸化会使土壤板结、土壤孔隙减少^[3]、土壤中重金属有效性提高、作物对养分的吸收减少,影响作物的生长发育和品质^[4]。随着“绿水青山就是金山银山”的环保理念越来越深入人心,土壤污染问题愈发受到重视,如何降低土壤酸度,提高土壤肥力,利用有效的改良手段创造良好的土壤生态环境是众多学者关注的焦点^[5]。

研究发现,石灰类、工业废弃物、农业废弃物、高分子材料和硅钙镁磷肥类等均对改良酸性土壤有一定效果^[5-6],其判断依据通常是酸性土壤的某项指标^[7-8]或作物的单一特征^[9-10]。通过对一种指标进行实验前后数据对比分析,得出改良措施具体效果的实验结论。然而不同的改良剂对土壤性质和作物的影响各有不同。施加石灰可以有效降低土壤酸度,但对土壤养分无显著影响^[11];施加矿物类改良剂可以提高土壤中钙、镁、钾含量,但缺乏有机质的补充;施加钢渣、粉煤灰等工业废弃物既可以降低土壤酸度,也能提高土壤中钙、镁等营养成分,但是有重金属污染的风险^[12]。油菜秸秆处理不能明显降低土壤酸度,却可以促进大麦幼苗生长^[13]。由此可见,这种方法并不能反映酸性土壤改良剂的整体效果。为了更加直观地对不同改良剂效果进行比较,需要全面客观地对土壤改良作用进行评价^[14],对与改良效果相关的多个因子进行分析,将错综复杂的多个因子简化成几个相互独立的综合因子,然后利用综合因子评价改良剂对土壤的改良作用^[15]。

当前的酸性土壤改良技术与政策中并没有系统规范的技术选择和综合评价方法,不同学者提出的评价标准和方法也参差不齐,其结果存在较大的不确定性,甄选经济、合理、适用的酸性土壤改良方法是一个比较复杂的问题,故当前急需形成酸性土壤改良技术选择的综合评价体系,采用科学的综合评价方法,提高技术选择过程的透明性,降低主观性。现代综合评价方法有很多,如主成分分析法^[16]、灰色关联度法^[17-18]、层次分析法^[19]、模糊综合评价法^[20-21]等。由于评价对象的所属目标范围不同,现代综合评价方法在选用与实际技术应用时存在一定的差异^[22]。刘桂民等^[23]运用因子分析法基于土壤质量、土壤容重、土壤养分对不同人工林的土壤改良效果进行综合评价。吴瑞华等^[24]在研究改良剂对土壤及稻米重金属含量、

水稻及其秸秆产量的影响中,开展了地积累指数法和Hakanson潜在生态风险指数法评价。周昊等^[14]利用层次分析法在复合基质的pH值、营养成分以及植物生长状况的基础上构建了复合基质方案选取的综合评价指标体系。

层次分析法(Analytic hierarchy process, AHP)应用于环境^[25-26]、经济^[27]和社会^[28]等方面的行业中已有相当广泛的文献基础^[29]。本研究选用层次分析法建立全面可行的农田酸性土壤改良效果综合评价体系,为酸性农田土壤改良技术的遴选和评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田实验地点选在云南省梁河县河西乡(24°53′02.79″N, 98°18′44.41″E),由于当地锡矿的开采,该地区农田土壤平均pH值为4.58,属于严重酸性土壤,且全镉(Cd)平均含量为0.33 mg·kg⁻¹、全铜(Cu)平均含量为58.39 mg·kg⁻¹,依照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),该地区重金属Cd、Cu轻微超标。

实验共设置18个处理小区,标号1~18,每个小区面积为6.5 m×2.6 m。2020年3月施改良剂(表1),稳定60 d后种植玉米和皇竹草,待作物成熟后采集土样和植物样。改良剂由云南省圣清环保股份有限公司提供,施加量为其推荐添加量。

1.2 研究方法

1.2.1 基于AHP的酸性农田土壤改良效果综合评价体系的构建

20世纪70年代,萨蒂(Saaty)提出了一种通过计算决策权重将定性分析与定量分析相结合的多目标决策分析方法——层次分析法(AHP)^[30],该方法可将主观判断进行量化^[31]。AHP能够通过对专家打分进行一致性验证,剔除明显存在逻辑错误的的数据,从而提高

表1 大田实验处理
Table 1 Field experimental treatments

作物 Crop	小区 Plot	纤维素改良剂 Cellulose ameliorator
玉米 (<i>Zea mays</i> L.)	1、4、7	CK1
	2、5、8	SQC201(复合定性纤维素201), 11 130 kg·hm ⁻²
	3、6、9	SQC204(复合定性纤维素204), 11 130 kg·hm ⁻²
皇竹草 (<i>Pennisetum</i> <i>sinese</i> Roxb)	10、13、16	CK2
	11、14、17	SQFC-00S(复合定性铁钾纤维素), 4 995 kg·hm ⁻²
	12、15、18	SQC201, 11 130 kg·hm ⁻²

决定性数据的准确性,为最终结果的计算提供更好的依据^[32]。文献分析法是指通过数据库搜集、鉴别、整理某一研究主题的相关文献^[33],并对其进行系统性分析来获取信息,进而形成对事实科学认识的一种研究方法^[34]。

(1) 评价指标筛选

评价指标是进行评价的基础,是反映评价客体的基本要素,制定有效的评价指标体系是改良效果评价

的核心环节和重要步骤,更是评价成功的保证。评价指标应满足科学性、代表性和可操作性3个原则^[35]。评价指标体系的初步确定是通过文献分析法,在查阅相关文献、摘录指标并统计分析各项指标的相关数据后确定。本研究查阅与酸性土壤改良相关的有效文献共125篇,摘录文献中的实验指标102个,共755组(按添加改良剂处理计算),摘录指标名称见表2。

本文立足于指标频度分析和理论分析,结合实例

表2 文献摘录指标及出现频度

Table 2 Index and frequency of literature extract

指标 Index	文献数 Document number	组数 Group number	频度 The frequency	指标 Index	文献数 Document number	组数 Group number	频度 The frequency
pH	115	710	0.920	镉形态	4	18	0.032
有机质	74	288	0.592	铅形态	4	24	0.032
有效磷	68	407	0.544	有效锰	4	26	0.032
速效钾	60	335	0.480	微生物生物量碳	4	18	0.032
碱解氮	52	321	0.416	百粒质量	4	17	0.032
玉米产量	40	209	0.320	土壤总钙	3	11	0.024
交换性钙	33	190	0.264	土壤总镁	3	11	0.024
交换性铝	30	216	0.240	酸碱缓冲容量	3	14	0.024
交换性镁	30	180	0.240	土壤碳氮比	3	21	0.024
阳离子交换量	29	220	0.232	有效砷	3	15	0.024
土壤全氮	24	121	0.192	土壤总砷	3	12	0.024
交换性酸总量	23	157	0.184	脱氢酶	3	22	0.024
土壤容重	22	128	0.176	有效硼	3	17	0.024
籽粒品质	21	100	0.168	有效硫	3	22	0.024
交换性氢离子	17	126	0.136	微生物多样性	3	31	0.024
有效镉	15	95	0.120	玉米含水率	3	18	0.024
脲酶	15	85	0.120	土壤质地	2	8	0.016
有机碳	14	115	0.112	土壤抗剪强度	2	16	0.016
土壤孔隙度	13	77	0.104	铝形态	2	14	0.016
有效锌	12	79	0.096	有效铬	2	10	0.016
土壤总磷	11	43	0.088	有效汞	2	10	0.016
有效铅	11	80	0.088	土壤总铬	2	4	0.016
过氧化氢酶	11	60	0.088	中性磷酸酶	2	9	0.016
玉米株高	11	39	0.088	细菌群落丰富度和均匀度	2	9	0.016
土壤总钾	10	43	0.080	叶面积	2	10	0.016
玉米总氮	10	72	0.080	光合速率	2	11	0.016
玉米总磷	10	70	0.080	土壤粒径分布	1	7	0.008
土壤电导率	9	42	0.072	土壤紧实度	1	4	0.008
有效硅	9	47	0.072	土壤贯入阻力	1	4	0.008
交换性钠离子	8	61	0.064	土壤三相容积率	1	4	0.008
有效铜	8	58	0.064	活性铝形态	1	8	0.008
交换性盐基总量	7	55	0.056	微生物碳	1	9	0.008
土壤含水量	7	45	0.056	微生物氮	1	9	0.008
交换性钾	7	61	0.056	硅铁率	1	6	0.008
酸性磷酸酶	7	61	0.056	硅铝铁率	1	4	0.008

续表2 文献摘录指标及出现频度
Continued table 2 Index and frequency of literature extract

指标 Index	文献数 Document number	组数 Group number	频度 The frequency	指标 Index	文献数 Document number	组数 Group number	频度 The frequency
微生物群落	7	50	0.056	土壤总锌	1	4	0.008
玉米总钾	7	51	0.056	β -葡萄糖苷酶	1	9	0.008
玉米生物量干质量	7	44	0.056	多酚氧化酶	1	5	0.008
蔗糖酶	6	31	0.048	有效铝	1	4	0.008
有效铁	6	32	0.048	铁形态	1	4	0.008
根系形态	6	32	0.048	微生物生物量氮	1	5	0.008
盐基饱和度	5	26	0.040	微生物生物量磷	1	5	0.008
土壤总铅	5	17	0.040	微生物生物量钾	1	5	0.008
微生物数量	5	26	0.040	玉米总砷	1	3	0.008
成本	5	29	0.040	玉米总镉	1	3	0.008
产值	5	29	0.040	玉米总铬	1	3	0.008
土壤团聚体	4	22	0.032	玉米总铅	1	3	0.008
硅铝率	4	21	0.032	千粒质量	1	7	0.008
水解性酸	4	20	0.032	蛋白质	1	2	0.008
活性铝含量	4	35	0.032	叶片数	1	5	0.008
土壤总镉	4	13	0.032	叶绿素	1	6	0.008

注:表中的频度指该指标出现次数与总文献数的比值。
Note: Frequency in the table refers to the ratio of the frequency of occurrence of this indicator to the total number of references.

验证时测样可获得性,从表2中选取土壤pH、有机质等31个指标,初步确定了酸性农田土壤改良效果综合评价指标,见表3。土壤容重通过影响土壤孔隙状况来调节土壤水分入渗情况及土壤持水能力^[36],用以反映土壤的物理性质;土壤酶活性作为表征土壤微生物性质的重要指标被广泛使用^[37]。故以土壤容重和孔隙度代表土壤物理因素的变化,以脲酶和过氧化氢酶活性表示土壤生物因素的变化,以此体现本体系指标的独立性和综合性^[14],同时为减轻工作量,根据专家咨询结果,将土壤含水率等7个指标删除,再综合研究指标数据的可评性、评价标准的可确定性等因素,构建了1个最高层指标、3个中间层指标和24个最低层指标的酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系,详见表4。

(2)构造判断矩阵

对表4中的各指标组数频率和文献频度归一化至1~9区间,并通过专家问卷调查对各指标重要性进行打分,计算3种得分的平均值,依照Satty的1~9比例标度(表5),两两比较最低层所有评价指标对中间层某一指标和中间层所有评价指标对最高层指标相对的重要性来构建判断矩阵^[19],判断矩阵见表6~表9。

(3)权重系数的计算和检验

对各个判断矩阵进行AHP研究(计算方法为和积法),得到特征向量和权重值^[38]。根据特征向量计算出最大特征根,然后利用最大特征根值计算得到CI值,CI值用于一致性检验使用。研究评价权重计算结果的一致性检验结果,即计算一致性指标CR值。通常情况下CR值越小,说明判断矩阵一致性越好。

表3 初步酸性农田土壤改良效果综合评价指标
Table 3 Preliminary comprehensive evaluation index of acid farmland soil improvement effect

最高层 The top layer	中间层 The middle layer	最低层 The lowest layer
酸性土壤改良效果评价体系	土壤肥力	有机质,全氮,碱解氮,有效磷,速效钾,土壤容重,孔隙度,电导率,含水率,团聚体,土壤质地,pH,阳离子交换量,交换性酸(H^+ 、 Al^{3+}),交换性盐基离子(钾、钙、钠、镁),有效镉、铅、砷,有效铜、锌、铁、硅、锰、硼,脲酶,过氧化氢酶,酸性磷酸酶,蔗糖酶,微生物数量
	玉米生长与安全	株高,生物量,光合速率,玉米地上部氮、磷、钾,籽粒品质(可溶性糖、蛋白质、Vc),籽粒镉、铅、砷含量
	经济效益	产量,产值,成本

一般情况下 CR 值小于 0.1, 则判断矩阵满足一致性检验; 如果 CR 值大于 0.1, 则说明不具有-致性, 应该对判断矩阵进行适当调整后再次分析^[39]。具体步骤如下:

(1) 按式(1)将判断矩阵每一列正规化。

$$b_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \quad (1)$$

式中: n 为比较矩阵阶数, 也表示指标个数, 下同。

(2) 按式(2)将每一列正规化后的判断矩阵按行相加, 得到向量矩阵——式(3)。按式(4)正规化。

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \hat{b}_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n] \quad (3)$$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (4)$$

所得到的 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 即为所求特征向量。

(3) 按式(5)计算判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (5)$$

式中: $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个元素。

(4) 一致性检验: 按式(6)计算一致性指标 CI 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

由表 10 查找随机一致性指标 RI , 由式(7)计算一致性比率 CR 。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

1.2.2 评价结果计算

逼近理想解排序法 (Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 在数学上是一种趋于理想解的排序, 可以较为客观地在多指标条件下对各方案进行排序^[40]。通过判断评价对象与正、负理想解的距离来对方案做出评价。若方案最靠近正理想解和最远离负理想解, 则为最佳方案^[41]。

为了消除不同数据指标量纲的影响, 有必要对各指标数据进行正向标准化, 得到标准化矩阵 $Z_{ij} = (z_{ij})_{n \times m}$ (n 为不同处理, m 为评价指标)。定义正理想解 $z^+ = (\max\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}\}, \dots, \max\{z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm}\})$, 负理想解 $z^- = (\min\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{n1}\}, \dots, \min\{z_{1m}, z_{2m}, \dots, z_{nm}\})$ 。评价指标与 z^+ 的距离 (D^+) 和与 z^- 的距离 (D^-) 的计算公式为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (z_j^+ - z_{ij})^2} \quad (8)$$

表 4 酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系

Table 4 Comprehensive evaluation index of acid farmland soil improvement effect

最高层 The top layer	中间层 The middle layer	最低层 The lowest layer	
酸性土壤改良 效果评价体系 T	土壤肥力 M1	有机质	L1
		全氮	L2
		碱解氮	L3
		有效磷	L4
		速效钾	L5
	物理因素	土壤容重	L6
		孔隙度	L7
	化学因素	pH	L8
		阳离子交换量	L9
		交换性酸(H ⁺ 、Al ³⁺)	L10
		交换性盐基离子 (钾、钙、钠、镁)	L11
有效镉、铅、砷		L12	
玉米生长 与安全 M2	生物因素	有效铜、锌、铁、硅、锰、硼	L13
		脲酶	L14
		过氧化氢酶	L15
		株高	L16
		生物量	L17
	经济效益 M3	光合速率	L18
		玉米地上部氮、磷、钾	L19
		籽粒品质(可溶性糖、蛋白质、Vc)	L20
		籽粒镉、铅、砷含量	L21
		产量	L22
		产值	L23
	成本	L24	

表 5 判断矩阵标度及含义

Table 5 Scale and meaning of judgment matrix

标度 Scale	重要程度 Degree of importance
1	i 与 j 同等重要
3	i 比 j 稍微重要
5	i 比 j 明显重要
7	i 比 j 强烈重要
9	i 比 j 极端重要
2、4、6、8	取中间值, 重要性相反则取其倒数

注: i 与 j 表示两两比较的指标。

Note: i and j represent pair-to-pair comparison indicators.

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (z_j^- - z_{ij})^2} \quad (9)$$

式中: w_j 表示各指标权重; z_j^+ 和 z_j^- 分别表示各指标正理想解和负理想解; z_{ij} 为标准化数据。

表6 最高层对于中间层的判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of the top layer to the middle layer

评价体系 T	土壤肥力 M1	玉米生长与安全 M2	经济效益 M3
Evaluation system T	Soil fertility M1	The crops grow safety M2	Economic security M3
土壤肥力 M1	1	3	5
玉米生长与安全 M2	1/3	1	3
经济效益 M3	1/5	1/3	1

注:判断矩阵每一个数据 b_{ij} 表示与指标 i 相比 j 的重要程度。下同。
Note: Each data b_{ij} of the judgment matrix represents the importance of j compared with index i . The same below.

综合得分为:

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

对 S_i 进行归一化处理,得到相对接近度 $C, 0 \leq C \leq 1, C$ 越高即 D^+ 越小,该处理结果与正理想解距离越小时处理效果越好, C 越低代表处理效果越差。

2 结果与讨论

2.1 酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系权重系数

根据层次分析法得出各层指标的分析结果见表11。

本次分析的 CR 值均小于0.1,一致性检验均通过,说明AHP得出的权重系数具有合理性。最后得出酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系,如表12所示。该指标体系显示权重比较大的指标集中在土壤肥力和玉米生长与安全两个方面,分别为0.633与0.261;在最低指标层中,pH、生物量、有机质指标

表8 中间层 M2 对于最低层的判断矩阵

M2	L16	L17	L18	L19	L20	L21
L16	1	1/2	5	1	2	3
L17	2	1	5	2	4	3
L18	1/5	1/5	1	1/4	1/4	2
L19	1	1/2	4	1	1/2	4
L20	1/2	1/4	4	2	1	5
L21	1/3	1/3	1/2	1/4	1/5	1

表9 中间层 M3 对于最低层的判断矩阵

M3	L22	L23	L24
L22	1	2	3
L23	1/2	1	2
L24	1/3	1/2	1

权重最大,分别为0.149、0.086和0.086。

2.2 酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系的验证及应用

2.2.1 基于大田实验结果的评价指标体系验证

主成分分析(Principal component analysis, PCA)是建立最小数据集的主要方法,通过降维将多个指标转化为少数指标,消除众多指标间的相关性^[42],因此可以用作指标筛选和综合评价。根据大田实验数据,利

表7 中间层 M1 对于最低层的判断矩阵

Table 7 Judgment matrix of the middle layer M1 to the lowest layer

M1	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15
L1	1	6	2	1	1	6	7	1/2	5	5	5	7	7	7	8
L2	1/6	1	1/3	1/5	1/4	1	4	1/9	1	1	1	3	5	3	5
L3	1/2	3	1	1/2	1	5	7	1/5	3	3	4	6	7	6	7
L4	1	5	2	1	1	6	8	1/4	5	5	5	7	8	7	8
L5	1	4	1	1	1	6	7	1/5	4	4	4	7	7	7	8
L6	1/6	1	1/5	1/6	1/6	1	3	1/8	1/3	1/3	1/4	2	4	2	4
L7	1/7	1/4	1/7	1/8	1/7	1/3	1	1/8	1/8	1/8	1/8	1/6	1/2	1	1
L8	2	9	5	4	5	8	8	1	6	6	6	8	8	8	8
L9	1/5	1	1/3	1/5	1/4	3	8	1/6	1	1	1	4	5	4	5
L10	1/5	1	1/3	1/5	1/4	3	8	1/6	1	1	1	4	5	4	5
L11	1/5	1	1/4	1/5	1/4	4	8	1/6	1	1	1	4	5	4	5
L12	1/7	1/3	1/6	1/7	1/7	1/2	6	1/8	1/4	1/4	1/4	1	1	1	2
L13	1/7	1/5	1/7	1/8	1/7	1/4	2	1/8	1/5	1/5	1/5	1	1	1	1
L14	1/7	1/3	1/6	1/7	1/7	1/2	1	1/8	1/4	1/4	1/4	1	1	1	2
L15	1/8	1/5	1/7	1/8	1/8	1/4	1	1/8	1/5	1/5	1/5	1/2	1	1/2	1

表10 随机一致性RI表格

Table 10 Random consistency RI table

阶数 Order	RI 值 RI value	阶数 Order	RI 值 RI value
3	0.52	17	1.606 4
4	0.89	18	1.613 3
5	1.12	19	1.620 7
6	1.26	20	1.629 2
7	1.36	21	1.635 8
8	1.41	22	1.640 3
9	1.46	23	1.646 2
10	1.49	24	1.649 7
11	1.52	25	1.655 6
12	1.54	26	1.658 7
13	1.56	27	1.663 1
14	1.58	28	1.667 0
15	1.59	29	1.669 3
16	1.594 3	30	1.672 4

用主成分分析筛选出对实验结果影响较大的指标^[42], 以此验证评价体系指标权重的合理性。

利用 SPSS 20.0 软件对大田实验结果中的评价指标(未测数据不进入统计)进行主成分分析,得到主成分1和主成分2,计算出各主成分的表达式为:

主成分1: $Y_1 = -0.098 L_1 + 0.133 L_3 + 0.190 L_4 - 0.015 L_5 + 0.337 L_8 - 0.221 L_{10} - 0.101 L_{12} - 0.0337 L_{13} + 0.149 L_{14} - 0.239 L_{15} + 0.186 L_{16} + 0.239 L_{17} + 0.236 L_{18} - 0.162 L_{19} + 0.0213 L_{21} + 0.224 L_{22} + 0.224 L_{23} - 0.221 L_{24}$

主成分2: $Y_2 = 0.282 L_1 - 0.257 L_3 + 0.187 L_4 + 0.309 L_5 + 0.387 L_8 - 0.117 L_{10} + 0.157 L_{12} + 0.177 L_{13} - 0.241 L_{14} + 0.002 L_{15} + 0.194 L_{16} - 0.008 L_{17} + 0.047 L_{18} + 0.178 L_{19} - 0.006 L_{21} + 0.106 L_{22} + 0.106 L_{23} + 0.118 L_{24}$

由上述主成分的表达式可知:在第1主成分的表

表11 各指标层 AHP 层次分析结果

Table 11 AHP analysis results of each indicator level

指标层 Indicator level	评价指标 Evaluation index	特征向量 The feature vector	权重值 Weight value	最大特征值 Maximum eigenvalue	CI 值 CI value	RI 值 RI value	CR 值 CR value	一致性检验结果 Consistency test result
评价体系 T	土壤肥力 M1	1.900	0.633	3.039	0.019	0.520	0.037	通过
	玉米生长与安全 M2	0.781	0.261					
	经济效益 M3	0.318	0.106					
土壤肥力 M1	有机质 L1	2.032	0.135	16.378	0.098	1.590	0.062	通过
	全氮 L2	0.588	0.039					
	碱解氮 L3	1.409	0.094					
	有效磷 L4	1.959	0.131					
	速效钾 L5	1.707	0.114					
	土壤容重 L6	0.420	0.028					
	孔隙度 L7	0.177	0.012					
	pH L8	3.542	0.236					
	阳离子交换量 L9	0.739	0.049					
	交换性酸 L10	0.739	0.049					
	交换性盐基离子 L11	0.755	0.050					
	有效镉、铅、砷 L12	0.300	0.020					
	有效微量元素 L13	0.216	0.014					
	脲酶 L14	0.237	0.016					
	过氧化氢酶 L15	0.182	0.012					
玉米生长与安全 M2	株高 L16	1.207	0.201	6.501	0.100	1.260	0.080	通过
	生物量 L17	1.991	0.332					
	光合速率 L18	0.344	0.057					
	作物氮磷钾 L19	1.022	0.170					
	籽粒品质 L20	1.106	0.184					
	籽粒镉、铅、砷 L21	0.331	0.055					
经济效益 M3	产量 L22	1.617	0.539	3.009	0.005	0.520	0.009	通过
	产值 L23	0.892	0.297					
	成本 L24	0.491	0.164					

表 12 酸性农田土壤改良效果综合评价指标体系

Table 12 Comprehensive evaluation index system of soil improvement effect of acid farmland

最高层 The top layer	中间层 The middle layer	权重 Weight value	最低层 The lowest layer		相对权重 Relative weight	
酸性土壤改良效果 评价体系 T	土壤肥力 M1	0.633	营养因素	有机质 L1	0.086	
				全氮 L2	0.025	
				碱解氮 L3	0.059	
				有效磷 L4	0.083	
				速效钾 L5	0.072	
			物理因素	土壤容重 L6	0.018	
				孔隙度 L7	0.007	
			化学因素	pH L8	0.149	
				阳离子交换量 L9	0.031	
				交换性酸(H ⁺ 、Al ³⁺) L10	0.031	
				交换性盐基离子(钾、钙、钠、镁) L11	0.032	
				有效镉、铅、砷 L12	0.013	
				有效铜、锌、铁、锰 L13	0.009	
				生物因素	脲酶活性 L14	0.010
					过氧化氢酶 L15	0.008
	玉米生长与安全 M2	0.261	株高 L16	0.052		
			生物量 L17	0.086		
			光合速率 L18	0.015		
			地上部氮、磷、钾 L19	0.044		
			籽粒品质(可溶性糖、蛋白质、Vc) L20	0.048		
			籽粒含镉、铅、砷量 L21	0.014		
			经济效益 M3	0.106	产量 L22	0.057
					产值 L23	0.032
					成本 L24	0.017

达式中,土壤pH(L8)、生物量(L17)的系数较大;在第2主成分的表达式中,土壤pH(L8)、速效钾(L5)、有机质(L1)的系数较大。综合分析上述结果,土壤pH(L8)、生物量(L17)、速效钾(L5)、有机质(L1)对改良效果影响较大。这与本研究构建的指标体系中指标权重相符合,进一步证明了该评价体系的合理性。

2.2.2 大田实验改良效果评价

针对不同的作物(玉米、皇竹草),将改良剂处理得到的实验数据进行标准正向化处理(标准差法),得出各指标标准化值(表13),用于后续加权处理。

根据表12中的权重值,对处理过的实验指标数据进行加权运算并根据TOPSIS法进行排序,最终得到该实验中酸性农田土壤改良效果的综合评价排名。由表14可以看出,改良效果最好的是SQC204,其次是SQC201,这两种改良剂处理虽然降低了土壤中的有机质含量,但都提高了土壤pH,增加了玉米的生物量,对于土壤肥力、玉米生长与安全 and 经济效益都有重要意义,所以其综合改良效果仍比CK组好。而

SQFC-00S对土壤的改良效果较差,这可能与其处理下评价体系中权重较大的土壤pH降低和生物量减少有关。

在我国南方地区,酸性土壤改良已成为一个重要的研究课题,相关领域专家主导的大型或小型土壤环境保护项目也愈发增多,然而对于改良效果,仍缺乏分类别、分目标、系统化的客观评价体系,大多采用以往文献中提及过的个别的、离散化的指标,通过指标值的升高或降低片面地得出某些结论^[43],不利于从中寻求效果最优的模式进行凝练和推广。本研究利用层次分析法定量和定性相结合地分析问题的特点^[44],将人的主观判断和客观现象进行量化表达,提高了评价方法本身的客观性和有效性。评价指标的筛选以及判断矩阵的得分综合考虑了各个指标在文献中出现的频率和组数、专家评价以及实验过程的可获得性,且得出的权重系数均通过了一致性检验,具有较强的客观性和合理性。

研究表明,当今对于酸性农田土壤改良效果的评

表 13 大田实验结果标准化值
Table 13 Standardized values of field experiment results

最低层 The lowest layer	指标 Index	玉米 <i>Zea mays</i> L.			皇竹草 <i>Pennisetum sinense</i> Roxb		
		CK1	SQC201	SQC204	CK2	SQFC-00S	SQC201
L1	有机质	0.991 46	-1.409 01	-1.115 07	0.568 84	0.469 46	0.494 32
L2	全氮	—	—	—	—	—	—
L3	碱解氮	-0.220 98	-0.030 03	-1.557 69	0.169 39	1.578 44	0.060 87
L4	有效磷	-0.205 99	-0.225 06	2.007 64	-0.353 25	-0.571 61	-0.651 73
L5	速效钾	0.232 06	1.670 03	0.478 81	-0.761 61	-0.945 31	-0.673 98
L6	土壤容重	—	—	—	—	—	—
L7	孔隙度	—	—	—	—	—	—
L8	pH	-1.199 32	-0.078 59	1.541 49	-0.073 10	-0.855 43	0.664 95
L9	阳离子交换量	—	—	—	—	—	—
L10	交换性酸(H ⁺ 、Al ³⁺)	-1.250 93	-0.594 08	1.376 48	0.163 83	-0.594 08	0.898 77
L11	交换性盐基离子	—	—	—	—	—	—
L12	有效态 重金属	镉	1.100 74	1.312 69	0.028 70	-0.769 42	-1.027 93
		铅	0.306 32	-0.237 84	0.616 16	-1.910 19	0.800 06
		砷	1.077 41	0.518 34	1.071 95	-0.973 39	-0.708 21
		铜	-0.902 13	-0.922 52	-0.889 09	0.766 52	1.148 60
		锌	-0.834 32	-0.831 92	-0.832 05	0.396 24	0.525 10
		铁	0.728 28	0.516 10	-1.884 72	0.597 43	0.404 37
		锰	-0.196 58	0.419 28	0.960 70	1.087 08	-1.362 55
L14	脲酶	0.850 59	0.599 37	1.196 62	-1.187 46	-0.656 18	-0.802 94
L15	过氧化氢酶	-0.831 66	-0.588 58	-0.353 35	1.930 33	0.143 66	-0.300 40
L16	株高	-1.092 53	-0.817 67	-0.762 45	0.894 59	1.185 18	0.592 88
L17	生物量	-0.261 90	0.986 90	1.512 390	-0.763 25	-0.759 46	-0.714 69
L18	光合速率	-1.638 20	-0.843 65	0.694 21	0.760 40	0.421 92	0.605 32
L19	地上部 氮、磷、钾	氮	-0.659 25	0.185 41	0.097 16	1.784 12	-1.120 88
		磷	-1.655 39	-0.451 56	1.061 69	0.907 75	0.286 85
		钾	-0.164 55	0.124 65	-1.905 83	0.667 76	0.816 03
L20	籽粒品质	—	—	—	—	—	—
L21	地上部 镉、铅、砷	镉	1.598 32	0.642 46	0.202 30	-0.852 31	-0.795 49
		铅	0.275 41	0.134 79	1.797 2	-0.776 36	-0.558 44
		砷	0.793 47	1.108 13	0.720 98	-0.409 33	-1.052 5
L22	产量	-0.922 12	-0.912 47	-0.881 07	1.015 86	1.029 05	0.670 75
L23	产值	-1.142 85	-0.978 69	-0.444 20	1.081 23	1.108 18	0.376 33
L24	成本	1.889 72	-0.597 48	-0.597 48	0.364 82	-0.428 41	-0.631 17

注:“—”表示该指标未测。

Note: “—” indicates that this index is not measured.

价,土壤pH仍是最主要的核心因素,是影响土地环境质量、限制作物产量的重要指标之一^[45]。从评价体系指标权重来看,权重最高的也是土壤pH,但土壤有机质、碱解氮、有效磷、生物量等反映土壤养分和作物生长的因素也不能忽视^[46]。就中间层权重分布看,权重比较大的指标集中在土壤肥力(0.633),土壤肥力中权重较高的是营养和化学因素指标,物理和生物因素的指标权重较低,其原因可能是当前土壤物理和生物

因素对土壤改良效果的影响研究较少。就最低层指标来说,除土壤pH外,土壤有机质、玉米生物量权重最大,均为0.086。实验评价结果中由于SQC204的施加显著提高了土壤pH和有效磷含量以及玉米生物量,所以其改良效果最好,与之相反的SQFC-00S效果则最差。这与本文构建的综合评价体系中的最低层指标权重最大为土壤pH、有机质、生物量关系一致。评价体系中各个指标权重在一定程度上反映了各指标对

表 14 大田实验改良效果综合评价结果

Table 14 Comprehensive evaluation results of field experiment improvement effect

作物	处理	正理想解距离 D^+	负理想解距离 D^-	相对接近度	排名
Crop	Treatment	Positive ideal solution distance D^+	Negative ideal solution distance D^-	Relative proximity	Ranking
玉米	CK1	0.450	0.133	0.228	6
	SQC201	0.321	0.276	0.462	2
	SQC204	0.252	0.433	0.632	1
皇竹草	CK2	0.362	0.250	0.409	4
	SQFC-00S	0.421	0.257	0.379	5
	SQC201	0.340	0.280	0.452	3

总体评价结果的影响,说明本文构建的综合指标体系结合了土壤pH、营养成分、植物的生长状况及经济效益多方面因素,实现了对酸性农田土壤改良效果的整体性评价,符合酸性农田土壤改良效果综合评价要求。

3 结论

(1)通过文献分析法选取最能反映酸性农田土壤改良效果的指标,构建了酸性农田土壤改良效果综合评价体系,针对各个评价指标之间的关系,利用层次分析法确定权重系数,建立了一个酸性农田土壤改良效果综合评价体系。

(2)将本研究建立的评价体系应用于酸性农田土壤改良实验中,得出综合评价效果,纤维素改良剂效果最好的是SQC204,同时利用实验数据证明了其合理性。

参考文献:

[1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 5-11, 28. FENG Z W. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(9): 5-11, 28.

[2] 储成, 吴越, 黄欠如, 等. 有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2468-2475. CHU C, WU Z Y, HUANG Q R, et al. Effect of organic matter promotion on nitrogen-cycling genes and functional microorganisms in acidic red soils[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2468-2475.

[3] 廖伟, 吴忠东, 沈新磊. 土壤酸化治理研究进展[J]. 河南农业, 2019(25): 23. LIAO W, WU Z D, SHEN X L. Research progress of soil acidification treatment[J]. *Agriculture of Henan*, 2019(25): 23.

[4] 祁焕军, 雷晓婷, 雷金银, 等. 灌水量及灌水pH值对宁南山区土壤养分及芹菜产量品质的影响[J]. 节水灌溉, 2021(9): 29-34. QI H J, LEI X T, LEI J Y, et al. Effects of irrigation water quantity and pH value on soil nutrients and celery yield and quality in southern Ningxia mountain area[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(9): 29-34.

[5] 索琳娜, 马杰, 刘宝存, 等. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141-1149. SUO L N, MA J, LIU B C, et al. Soil conditioner application status and application of risk research[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1141-1149.

[6] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学报, 2019, 38(6): 1900-1908. ZHANG L Y, ZHAO X Q, SHEN R F. Soil acidification and its ecological effects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(6): 1900-1908.

[7] LAURICELLA D, WENG Z H, CLARK G J, et al. Biochars and their feedstocks differ in their short-term effects in ameliorating acid soils grown with aluminium-sensitive wheat[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(8): 2805-2816.

[8] SHI R, LI J, XU R, et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 162: 41-45.

[9] SOEPARJONO S, KADIYASARI I F. The effect of lime of dolomite and NPK fertilizers on the response of growth, yield and protein content on black soybean (*Glycine soja* L. Merr) in acid soils[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 759(1): 012022.

[10] 柴有忠, 张圆圆, 马军伟, 等. 不同酸性改良剂对葡萄园土壤及葡萄品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 102-107. CHAI Y Z, ZHANG Y Y, MA J W, et al. Effects of different acid conditioners on soil and grape quality[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 102-107.

[11] 罗玲, 潘宏兵, 钟奇, 等. 石灰和有机肥对芒果园酸性土壤的改良效果及对芒果品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 169-177. LUO L, PAN H B, ZHONG Q, et al. Effects of lime and organic fertilizer on acid soil of mango plantation and mango quality[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3): 169-177.

[12] 康飞, 杜学军, 胡树文, 等. 基于Web of Science和万方专利对土壤酸化和改良材料研究的计量分析[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1261-1270. KANG F, DU X J, HU S W, et al. Bibliometric analysis of soil acidification and improvement materials based on Web of Science and Wanfang patent database[J]. *Soils*, 2021, 53(6): 1261-1270.

[13] 胡敏, 向永生, 鲁剑巍. 不同调理剂对酸性土壤降酸效果及大麦幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 118-124. HU M, XIANG Y S, LU J W. Effects of soil conditioner on acid reduction and the seeding growth of barley[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(3): 118-124.

[14] 周昊, 郭姣姣, 王宇翔, 等. 基于层次分析法的山西典型矿区土壤改良效果评价[J]. 中国煤炭, 2018, 44(4): 138-143. ZHOU H, GUO J J, WANG Y X, et al. Assessment of soil improvement effects in typical mining areas in Shanxi basing upon analytic hierarchy process[J]. *China Coal*, 2018, 44(4): 138-143.

[15] 陈丽华. 湖北宜昌风化花岗岩区林草植被改良土壤作用的定量分析[J]. 中国水土保持, 1996(2): 3. CHEN L H. Quantitative analysis on soil amelioration of forest-grass vegetation in weathered granite area of Yichang City, Hubei Province[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1996(2): 3.

[16] 李霞, 朱万泽, 舒树森, 等. 基于主成分分析的大渡河中游干暖河

- 谷草地土壤质量评价[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3891-3900.
- LI X, ZHU W Z, SHU S M, et al. Soil quality assessment of grassland in dry and warm valley of Dadu River based on principal component analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3891-3900.
- [17] 潘肖燕, 崔江慧, 杨江燕, 等. 基于SDI校正指数的滨海平原盐渍化生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 709-718.
- PAN X Y, CUI J H, YANG J Y, et al. Ecological risk assessment of salinization in coastal plain based on SDI correction index[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 709-718.
- [18] 许瑶, 肖亨, 伍钧, 等. 基于灰色关联分析法的Cd污染土壤-植物系统安全生产评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1051-1059.
- XU Y, XIAO H, WU J, et al. Grey relational analysis for evaluating the safety of products from a plant-soil system contaminated with Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1051-1059.
- [19] 吴霄霄, 米长虹, 吴昊, 等. 镉污染稻田修复效果评估指标体系的构建[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1498-1505.
- WU X X, MI C H, WU H, et al. Construction of an evaluation index system to evaluate the remediation effect of cadmium pollution in paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1498-1505.
- [20] 元丽, 潘继花, 邹志飞, 等. 基于熵权的模糊评价法对日照市茶园土壤养分分析与质量评价[J]. 中国农学通报, 2019, 35(6): 54-61.
- QI L, PAN J H, XUN Z F, et al. Analysis and quality evaluation of soil nutrient status in tea garden of Rizhao City based on fuzzy evaluation method and entropy weight[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(6): 54-61.
- [21] 岳鹏, 平学惠, 李国锋, 等. 基于模糊层次分析法的铁路污水处理方案优选评价[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(8): 200-204.
- YUE P, PING X H, LI G F, et al. Optimization and evaluation of railway sewage treatment schemes based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(8): 200-204.
- [22] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J/OL]. 土壤学报: 1-17[2021-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210607.1601.002.html>.
- ZHANG J Z, LI Y Z, LI Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*: 1-17[2021-11-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210607.1601.002.html>.
- [23] 刘桂民, 陈苗苗, 李长贵, 等. 基于因子分析的盐碱地人工林土壤改良效应评价: 以黄河三角洲为例[J]. 中国农学通报, 2017, 33(28): 50-54.
- LIU G M, CHEN M M, LI C G, et al. Evaluation of soil improvement effect in different saline plantations based on factor analysis: A case study of the Yellow River Delta[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(28): 50-54.
- [24] 吴瑞华, 戴金鹏, 傅湘绮. 有机钙蛋白对土壤改良效果及其影响评价[J]. 湖南农业科学, 2017(8): 31-36.
- WU R H, DAI J P, FU X Q. Effects of organic calcium protein on soil improvement and its evaluation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(8): 31-36.
- [25] 李娟, 沈亮, 王良杰, 等. 基于AHP-FCE模型的制药行业清洁生产评估[J/OL]. 环境工程技术学报: 1-13[2021-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20210830.1621.008.html>.
- LI J, SHEN L, WANG L J, et al. Evaluation of cleaner production technology in pharmaceutical industry based on AHP-FCE model[J/OL]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 1-13[2021-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20210830.1621.008.html>.
- [26] 王兵, 谢红丽, 任宏洋, 等. 基于层次分析法的石油污染土壤修复植物评价[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 985-991.
- WANG B, XIE H L, REN H Y, et al. Assessment for phytoremediation plant growth in petroleum contaminated soil via analytic hierarchy process [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(3): 985-991.
- [27] 唐小虎, 王金威. 基于AHP的电子商务风险识别与评价[J]. 北方经贸, 2021(8): 61-63.
- TANG X H, WANG J W. E-commerce risk identification and evaluation based on AHP[J]. *Northern Economy and Trade*, 2021(8): 61-63.
- [28] 李江, 胡少伟, 杨辉琴, 等. 基于层次分析法的长距离输水工程管材适应性评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(6): 598-604.
- LI J, HU S W, YANG H Q, et al. Research on adaptability evaluation of long-distance water transmission project pipe based on AHP theory[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(6): 598-604.
- [29] KAYMAZ A K, BIRINCI S, KZLKAN Y. Sustainable development goals assessment of Erzurum province with SWOT_AHP analysis[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021(2).
- [30] 周应再, 余新林, 徐聪丽, 等. 基于AHP的高黎贡山国家级自然保护区保山片区生态质量评价[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(21): 145-148, 176.
- ZHOU Y Z, YU X L, XU C L, et al. Ecological quality assessment on AHP method in Gaoligongshan national nature reserve, Baoshan[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(21): 145-148, 176.
- [31] 覃泳智, 周海将, 刘思. 基于层次分析法的柳州杜鹃花引种价值综合评价[J]. 现代园艺, 2021, 44(21): 17-20.
- TAN Y Z, ZHOU H J, LIU S. Comprehensive evaluation of introduction value of Azalea in Liuzhou based on analytic hierarchy process[J]. *Contemporary Horticulture*, 2021, 44(21): 17-20.
- [32] 杨春晨, 戎瑞明, 李杨, 等. 基于Cov-AHP-模糊综合评价法构建输血病历质量评价模型[J]. 临床输血与检验, 2021, 23(2): 192-196.
- YANG C C, RONG R M, LI Y, et al. An evaluation model of clinical blood transfusion records based on Cov-AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Journal of Clinical Transfusion and Laboratory Medicine*, 2021, 23(2): 192-196.
- [33] 张茜, 胡伟, 余斌, 等. 基于文献分析法的药物临床试验信息化建设[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2021, 26(2): 182-189.
- ZHANG Q, HU W, YU B, et al. Information construction of drug clinical trials based on literature analysis[J]. *Chinese Journal of Clinical Pharmacology and Therapeutics*, 2021, 26(2): 182-189.
- [34] LUCARINI M, DURAZZO A, LOMBARDI-BOCCIA G, et al. Wine polyphenols and health: Quantitative research literature analysis[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4762.
- [35] 关迪, 陈楠. 基于AHP-FCE的家庭农场经营绩效综合评价研究[J/OL]. 中国农业资源与区划: 1-12[2021-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20210830.1621.008.html>.

- net/kcms/detail/11.3513.S.20210901.1052.010.html. GUAN D, CHEN N. Comprehensive evaluation of family farm operation performance based on the AHP-FCE[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*; 1-12[2021-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210901.1052.010.html>.
- [36] 秦娟, 许克福. 我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J]. *生态科学*, 2018, 37(1):200-210. QIN J, XU K F. Research summary and prospect of urban green space soil quality in China[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(1):200-210.
- [37] 王美琦, 刘银双, 黄亚丽, 等. 秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展[J/OL]. *微生物学通报*: 1-10[2021-12-27]. DOI: 10.13344/j. microbiol. china. 210390. WANG M Q, LIU Y S, HUANG Y L, et al. Research progress on effects of straw incorporation on soil micro-ecological environment[J/OL]. *Microbiology China*: 1-10 [2021-12-27]. DOI: 10.13344/j. microbiol. china. 210390.
- [38] 王小涵, 高魁. 基于AHP-模糊数学法的煤层深孔预裂爆破效果综合评价[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(4):126-130. WANG X H, GAO K. Comprehensive evaluation on the effects of deep-hole pre-splitting blasting in coal seam based on AHP-fuzzy mathematics method[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(4):126-130.
- [39] 辛丽萍, 王淑霞. 基于AHP-综合评价体系在健康体检中的应用研究[J]. *新疆医科大学学报*, 2020, 43(12):1630-1635. XIN L P, WANG S X. Application of AHP-comprehensive evaluation system in physical[J]. *Journal of Xinjiang Medical University*, 2020, 43(12):1630-1635.
- [40] SEMIH O, SELIN S. Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment[J]. *Waste Management*, 2008, 28(9):1552-1559.
- [41] 荆瑞勇, 王丽艳, 郑桂萍, 等. 水稻萌发期和幼苗期耐盐性鉴定指标筛选及综合评价[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2019, 31(6):1-6, 19. JING R Y, WANG L Y, ZHENG G P, et al. Comprehensive assessment and selection of identification index of rice salt tolerance at germination stage and seedling stage[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2019, 31(6):1-6, 19.
- [42] 王媚雪, 翟洪磊. 基于AHP与TOPSIS法的自闭症儿童康复训练产品设计评价方法及应用[J]. *图学学报*, 2020, 41(3):453-460. WANG M X, ZHAI H L. Evaluation method and application of rehabilitation training products for autistic children based on AHP and TOPSIS[J]. *Journal of Graphics*, 2020, 41(3):453-460.
- [43] 梁利妮. 施用碱性肥料对酸性土壤改良效果对比试验小结[J]. *农家参谋*, 2019(9):24. LIANG L N. Application of alkaline fertilizer to acid soil improvement effect comparative test summary[J]. *The Farmers Consultant*, 2019(9):24.
- [44] 段穗达, 马汉武. 基于层次分析法的风力发电企业供应商评价及选择体系研究[J]. *物流科技*, 2021, 44(11):22-26. DUAN R D, MA H W. Research on supplier evaluation and selection system of wind power enterprises based on ANALYTIC hierarchy process[J]. *Logistics Sci-Tech*, 2021, 44(11):22-26.
- [45] 刘娇娴, 崔骏, 刘洪宝, 等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1):173-184. LIU J X, CUI J, LIU H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil ameliorator[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1):173-184.
- [46] 黎庆芬, 程健超. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(15):140-142. LI Q F, CHENG J C. Effects of soil conditioners on acid soil improvement[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(15):140-142.