

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 Xiao-xiao, MI Chang-hong, WU Hao, 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.

镉污染稻田修复效果评估指标体系的构建

吴霄霄¹, 米长虹¹, 吴昊², 胡均铭³, 林大松^{1*}, 郑宏杰¹, 焦位雄¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022; 3. 广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007)

摘要: 为科学评估镉污染稻田修复效果, 运用理论分析、文献分析、德尔菲法与层次分析方法开展了评估指标筛选与权重确定研究, 建立了镉污染稻田修复效果评估指标体系。基于修复效果评估目标, 指标体系包括土壤肥力、重金属污染、水稻生长安全、修复经济安全等4个准则层下共15个评估指标。指标体系的准则层中水稻生长安全权重(0.430)和重金属污染权重(0.340)最大, 指标层中土壤有效镉消减量权重(0.219)和糙米含镉量权重(0.259)最大, 本指标体系权重分配体现了粮食安全和土壤环境安全是镉污染稻田土壤修复的主要关注点。

关键词: 修复材料; 镉污染; 稻田; 效果评估; 指标体系

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)07-1498-08 doi:10.11654/jaes.2018-1604

Construction of an evaluation index system to evaluate the remediation effect of cadmium pollution in paddy soils

WU Xiao-xiao¹, MI Chang-hong¹, WU Hao², HU Jun-ming³, LIN Da-song^{1*}, ZHENG Hong-jie¹, JIAO Wei-xiong¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning 530022, China; 3. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: To evaluate the remediation effect of cadmium-contaminated paddy fields, theoretical and literature analyses, the Delphi method, and the analytical hierarchy process were used to study the screening of evaluation indexes and weight determination to establish an evaluation index system. Based on the evaluation objective of the remediation effect, the indicator system included 15 indexes in 4 criteria layers that included soil fertility, heavy metal pollution, rice growth safety, and economic security for remediation. For the criterion layer of the indicator system, the weight of the growth safety of rice (0.430) and of heavy metal pollution (0.340) were the largest, whereas the weight for the reduction of available cadmium (0.219) and cadmium content in brown rice (0.259) were the largest among the 15 indexes. The weight distribution of the indicator system shows that food security and soil environmental safety are the main concerns for soil restoration of cadmium-contaminated paddy fields. This study provides a research framework for establishing an evaluation system for the remediation effect of cadmium-contaminated paddy fields.

Keywords: amendments; cadmium contamination; paddy fields; effect evaluation; index system

2014年我国公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示:我国土壤污染总超标率为16.1%,从污染分

布情况看,南方土壤污染重于北方,耕地点位超标率达19.4%,污染类型以无机型为主,其中重金属镉点

收稿日期:2018-12-20 录用日期:2019-03-19

作者简介:吴霄霄(1992—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事农业环境数据挖掘与环境影响评价研究。E-mail:18338767179@163.com

*通信作者:林大松 E-mail:lindasong608@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41877403,31200397)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41877403,31200397)

位超标率高达7.0%^[1]。经调查研究,我国土壤镉污染范围广、来源多,镉在环境中具有化学活性强、毒性持久、移动性大等特点,易通过食物链富集危及人类健康^[2]。湖南、湖北、广西、江西、四川等地都出现了镉污染农田。由于镉处于水溶态时活性大且易被作物吸收,因此污染农田多以水稻田为主。近几年,在各个镉污染区陆续开展了相应小区、大田修复试验,旨在筛选出适合当地土壤镉污染条件和农业种植习惯的土壤修复材料,为镉污染耕地安全利用、保障农产品质量安全提供技术支撑^[3]。

钝化材料修复镉污染稻田后,缺乏一套修复效果评估体系来评价修复是否达到了预期效果,而建立评估体系目前存在着评估指标选取、评估指标重要性程度分配等问题,因此建立一套评估指标体系来解决以上问题就显得尤为重要。从我国已颁布的相关标准和规范来看,《污染场地土壤修复技术导则》(HJ 25.4—2014)^[4]、《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[5]与《污染场地修复验收技术规范》(DB11/T 783—2011)(北京市)^[6]等行业与地方标准仅适用于场地污染修复,并不适用于农田修复效果评估。从陆续开展的评价工作来看,主要分为以下几类:一是修复后对几项指标前后对比评价,如修复前后土壤中有效态重金属变化和作物中重金属含量变化研究^[7];二是针对污染修复评价方法与评价指标选取研究,如植物毒性评价、土壤微生物评价等常用污染土壤修复效果评定方法与植物吸收毒理指标、污染物迁移指标、土壤酶指标、土壤微生物指标等常用修复后观察指标研究^[8-9];三是建立不完善的指标体系研究,如王涛、袁鑫推荐的缺乏各指标权重赋值的评价指标体系研究^[10-11];四是不针对修复效果评估而是针对一个修复项目或工程的评估,如在农田土壤、重金属污染、经济效益、生态效益、社会影响等范围广且针对性弱的评估研究^[12]。以上的评价研究尚缺乏对土壤-作物-修复剂材料整体系统的评估,这就很大程度限制了污染农田修复相关工作的进行与修复材料研发的开展,因此,探索建立镉污染稻田修复效果评估指标体系已迫在眉睫。

1 研究方法

构建指标体系的方法有理论分析、统计分析、文献分析、实例研究、层次分析、比较分析等,本研究采用理论分析、文献分析、德尔菲法和层次分析法^[13]构建修复效果评估指标体系。

1.1 理论分析法

理论分析是评价研究中常用的方法之一,主要是指用现代科学理论进行实际问题分析的方法,在不同领域有不同的理念范式。

1.2 文献分析法

文献分析法是指搜集、鉴别、整理某一研究主题的相关文献,并对其进行系统性地分析来获取信息,进而形成对事实科学认识的一种研究方法^[14]。

1.3 德尔菲法

德尔菲法又称专家调查法,是依据系统的程序,采用匿名发表意见的方式,即专家之间不得互相讨论,不发生横向联系,只能与调查人员发生联系,以调查问卷形式,集结专家共识及搜集不同领域各专家意见,解决复杂难题的管理技术。这种方法具有广泛的代表性,有匿名性^[15-16]、反复性特点,因所请专家领域不同,得到的信息广泛而较为可靠。

1.4 层次分析法

层次分析法(AHP)是在对复杂决策问题的内在关系、影响因素等进行深入分析的基础上,将人们的经验思维数量化,并检验决策者判断一致性的一种常用评价方法。其方法运用过程是:将决策的目标、考虑的因素(决策准则)和决策对象按它们之间的相互关系分为目标层、准则层和指标层做递阶层次模型^[17];用T.L.Satty 1-9比例标度比较各指标重要性并构造两两比较判断矩阵^[18];计算矩阵并经一致性检验。

本文通过理论分析初步考虑将体系分为土壤、重金属、种植作物、修复剂4个方面,重点运用文献分析进行指标筛选,在此基础上结合德尔菲、层次分析法建立指标体系构架,并确定指标权重,最终构建带有权重赋值的修复效果评估指标体系。

2 评估体系指标的确定

2.1 指标筛选原则

农田重金属污染修复与一般污染场地修复有很大的不同,一般场地污染修复关注的是修复后的地块是否可以供工、商、建筑业开发利用,而农田重金属污染修复关注的是修复后的土壤是否可以实现复垦,生产出的农产品是否符合食品安全标准^[10]。

正确进行指标筛选是科学评估修复效果的前提,直接关系到评估结果的正确性和科学性。选取的指标之间应该相互补充,上下层次分明^[17]。因此,在选取修复效果评估指标时应遵循以下几点原则:一是科

学性原则,指标体系能够客观地反映修复效果的本质及其复杂性和系统性;二是全面性原则,体系中包含的指标应从土壤肥力、重金属污染、作物安全经济与钝化材料4个方面选取,能形成综合性的评估指标体系,反映农田-作物系统各方面指标修复前后变化;三是可操作性原则,指标数据(从采样到样品处理检测)能用现有方法和手段获得,易于调查、查找或统计,有利于高效准确完成整个评估工作;四是可比性原则,指标具有很强的时空差异,数据采样分析应是在同一修复周期里进行(修复前后采样同时进行);五是可评性原则,选取的指标应有相对应标准或参考值来评估修复效果^[10]。

2.2 指标筛选方法

评估指标是进行评估的基础,是反映评估客体的基本要素,制定有效的评估指标体系是修复效果评估的核心环节和重要步骤,更是评估成功的保证^[19-20]。评估指标体系的初步确定是通过查阅相关文献、摘录指标并统计分析各项指标的相关数据并经课题组讨论后确定。查阅修复材料对镉污染稻田土壤修复的文献,摘录文献中试验指标数据,查询有效文献共497组数据(按添加修复剂计算),摘录试验指标在Excel表中,摘录指标名称见表1。

因 Tessier 逐级提取镉的5种形态在文献中出现较BCR提取法少,因此本研究仅对BCR提取法的4种形态镉进行了统计。在文献检索过程中还摘录了水稻类型、土壤质地、修复场地、小区面积、土壤处理、土壤采样深度、修复前土壤pH、修复前土壤有效镉等指标,但基于指标对“土壤污染修复效果评估体系研究”的重要性比较,最终选取了表1中所列的指标进行统计分析。

本文立足于指标频度与密度分析、理论分析基础上,结合实例验证时测样可获得性,从表1中选取了全N、有效P等11个指标,同时考虑到修复剂对水稻生长性状和修复实施过程的可接受性,又增加了修复剂成本、株高等9个指标,从而建立了初步指标体系,详见表2。

2.3 指标确定

综上设计问卷进行专家咨询,本研究对土壤学、重金属污染修复、环境影响评价、环境规划等不同专业领域共25名专家进行问卷调查。在咨询结果基础上,根据评估指标体系构建的总体思路、基本原则和构建方法,再综合研究指标数据可评性、评价标准可确定性等因素,本研究构建了由1个目标层指标、4个

表1 文献指标相对频度与密度分析表
Table 1 Relative frequency and density analysis of literature indicators

指标名称 Indicator type	文献数 Number of documents	组数 Number of groups	相对频度 Relative frequency	相对密度 Density analysis
pH	82	231	0.087	0.121
土壤有效镉	51	163	0.054	0.085
土壤全镉量	96	164	0.102	0.086
根含镉量	38	123	0.040	0.064
茎秆含镉量	51	156	0.054	0.082
叶含镉量	4	4	0.004	0.002
稻壳含镉量	27	44	0.029	0.023
糙米含镉量	69	200	0.073	0.105
籽粒含镉量	4	9	0.004	0.005
植株含镉量	9	14	0.010	0.007
土壤镉酸可提取态	12	14	0.013	0.007
土壤镉可还原态	12	14	0.013	0.007
土壤镉可氧化态	14	15	0.015	0.008
土壤镉残渣态	33	67	0.035	0.035
修复剂含镉量	46	80	0.049	0.042
土壤全N	41	57	0.043	0.030
土壤全P	23	42	0.024	0.022
土壤全K	23	42	0.024	0.022
土壤碱解N	30	39	0.032	0.020
土壤有效P	49	52	0.052	0.027
土壤速效K	45	47	0.048	0.025
土壤有机质	79	103	0.084	0.054
土壤容重	1	1	0.001	0.001
土壤阳离子交换量(CEC)	36	59	0.038	0.031
根系镉呼吸系数	1	1	0.001	0.001
镉初级转运系数	1	1	0.001	0.001
镉次级转运系数	1	1	0.001	0.001
水稻叶绿素相对含量	2	3	0.002	0.002
水稻叶净光合速率	4	3	0.004	0.002
水稻叶蒸腾速率	4	3	0.004	0.002
稻谷产量	55	155	0.058	0.081

注:相对密度指某一指标在所有文献中的密度之和与所有指标在所有文献中的密度之和之比;相对频度指某一指标出现的文献数占全部文献数的比例与所有指标的这个比例之和之比。

Note: Relative density means the ratio of the sum of the densities of an indicator in all literature to the sum of the densities of all indicators in all literature; Relative frequency means the ratio of the number of documents in a certain indicator to the sum of the total number of documents and the ratio of all the indicators.

准则层指标、15个指标层指标构成的修复效果评估指标体系,详见表3。

3 评估指标体系权重计算

指标权重确定的合理与否,将直接影响到整个评

表2 初步修复效果评估指标体系
Table 2 Preliminary repair effect evaluation index system

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer
修复效果评估 指标体系	土壤肥力指标	全 N ¹
		有效 P ¹
		速效 K ¹
		有机质 ¹
		pH ¹
		CEC ¹
	土壤镉污染指标	土壤全镉量 ¹
		有效态镉 ¹
	修复指标	修复剂成本 ²
		修复工程可操作性 ²
		修复剂含镉量 ¹
	粮食安全指标	糙米含镉量 ¹
		糙米中镉含量降低率/% ²
	水稻生长指标	株高 ²
		叶面积 ²
		穗长 ²
		地上部分干质量 ²
		地下部分干质量 ²
		病虫害发生情况 ²
		稻谷产量 ¹

注:1指文献摘录指标;2指增加指标。

Note: 1 refers to the index of document excerpts; 2 refers to the index of increase.

表3 镉污染稻田修复效果评估指标体系

Table 3 Evaluation index system for repair effect of cadmium contaminated paddy field

目标层 Target layer	准则层 Criteria layer	指标层 Index layer	指标说明 Index meaning
钝化修复效果评估 指标体系 S	土壤肥力指标 A1	碱解 N	表征修复前后土壤各方面质量的变化情况
		有效 P	
		速效 K	
		有机质	
		pH	
		CEC	
		脲酶活性	
		土壤次生污染问题	
	重金属污染指标 A2	土壤全镉量	表征修复前后土壤中重金属的变化及变化程度
		有效镉消减量/%	
	水稻生长安全指标 A3	糙米含镉量	表征修复前后种植水稻安全性与经济型的变化及变化程度
		糙米镉消减量/%	
		稻米产量	
	修复经济安全指标 A4	修复性价比	表征修复过程中修复的经济投入与产出及对土壤镉污染变化的影响
		修复剂含镉量	

注:土壤次生污染问题指施用修复材料后,修复材料的添加是否会给土壤带来次生污染,如含钙修复材料可能会给土壤带来土壤板结问题,含磷材料过量可能会带来土壤富营养化等问题。

Note: Secondary pollution problem: After repair material is applied, Whether the addition of repair materials will cause secondary pollution to the soil. For example, calcium-containing repair materials may bring soil compaction problems to the soil. Excessive phosphorus-containing materials may cause problems such as soil eutrophication.

估结果的科学性^[20]。确定指标权重方法有两类:一类是主观法,评价者根据经验判断而得到权重,如德尔菲法、循环评分法、二项系数法、特征向量^[21]等;另一类是客观法,评价者按一定方法对指标自身数值的判断得到权重,如熵值法、因子分析法、层次分析法^[22-23]等。两种方法各有利弊,主观法赋值客观性较差但确定的权重与实际相符;客观法确定权重精度较高但与指标实际重要性相悖^[24]。本研究借鉴各研究领域学者研究经验^[11,25-26]以及本研究评价指标体系的通用性和稳定性,采用层次分析法与专家咨询法相结合的方法确定指标权重,既克服了主观赋值缺陷,又确保指标权重的客观性。

3.1 层次分析法基本步骤

(1)对体系各层次指标进行重要性比较

分析表3体系中各因素间的关系,对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,构造两两比较的判断矩阵,判断重要性方法采用T.L.Satty1-9比例标度,表4为判断矩阵标度及含义。

(2)构造比较判断矩阵

本指标体系共建立7个比较矩阵,分为两类:一类是准则层对目标层重要性比较矩阵,如对目标层S来说准则层(A1、A2、A3、A4)之间重要性比较矩阵见

表4 判断矩阵标度及含义

Table 4 Judgment matrix scale and meaning

b_j 值(标度) b_j (Scaling)	重要程度含义 Importance meaning
1	表示 b_i 与 b_j 同样重要
3	表示 b_i 比 b_j 稍微重要
5	表示 b_i 比 b_j 明显重要
7	表示 b_i 比 b_j 强烈重要
9	表示 b_i 比 b_j 极端重要

2,4,6,8取上述两相邻判断的中间值,1~9各数字的倒数与上述意义相反,如1/5表示 b_j 比 b_i 明显重要

表5;另一类是指标层对准则层重要性比较矩阵,如对重金属污染指标来说所属指标(B9、B10)之间重要性比较矩阵见表6。由于土壤肥力指标(A1)下所属指标有8项,重要性判断矩阵为8×8阶,重要性比较较复杂,为了便于专家判断,将指标层(8项指标)按指标理化性质分为两类进行比较,分类见表7。增加

表5 准则层各指标之间重要程度判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of all sorts of indicators in the criterion layer

S (体系)	A1 土壤肥力	A2 重金属污染	A3 水稻生长安全	A4 修复经济安全
A1 土壤肥力	1	()	()	()
A2 重金属污染		1	()	()
A3 水稻生长安全			1	()
A4 修复经济安全				1

注:按表4中的判断矩阵标度填写“()”。下同。
Note: Fill in“()” according to the scale in table 4. The same below.

表6 重金属污染指标重要性判断矩阵

Table 6 Heavy metal pollution indicator importance judgment matrix

A2 重金属污染	B9 土壤全镉量	B10 有效镉消减量/%
B9 土壤全镉量	1	()
B10 有效镉消减量/%		1

表8 随机一致性指标RI值

Table 8 The value of the random consistency indicator RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

表7 土壤肥力分类

Table 7 Classification of soil fertility

准则层 Criteria layer	子准则层 A1'	指标层 Index layer
土壤肥力指标 A1	土壤养分指标 A11'	碱解 N B1
		有效 P B2
		速效 K B3
		有机质 B4
	土壤理化性状指标 A12'	pH B5
		CEC B6
		脲酶活性 B7
		次生污染 B8

对土壤肥力(A1)来说所属指标(A₁₁'、A₁₂')之间重要性比较矩阵、对土壤养分来说所属指标(B1、B2、B3、B4)之间重要性比较矩阵、对土壤理化性状来说所属指标(B5、B6、B7、B8)之间重要性比较矩阵(矩阵格式同表5、表6),请各位专家对矩阵指标重要性按表4做出判断并填在“()”内。

3.2 计算矩阵权重

层次分析法计算权重常用到的有方根法与和积法^[27-28],本研究用和积法计算各问卷中矩阵。在Excel中按和积法步骤计算权重与一致性,一致性取值见表8,若一致性通过,表示矩阵中重要性比较无逻辑错误;若一致性不通过,则需要按经验法或其他调节一致性方法^[29-31]重新调整矩阵直至一致性通过。一致性通过后,对25份问卷中计算的权重结果做加权平均^[15,32]得到体系中指标最终权重。和积法步骤如下:

(1)按式(1)将比较矩阵A每一列正规化(其中n为比较矩阵阶数,也是指标个数,下同)。

$$\hat{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \tag{1}$$

(2)按式(2)将每一列正规化后的比较矩阵按行相加。

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

(3)按式(3)对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]$ 按式(4)正规化。

$$\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n] \tag{3}$$

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

所得到的 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 即为所求特征向量,也就是各个指标对应的权重值。

(4)按式(5)计算比较矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。

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

式中 $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个元素。

(5)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8查找随机一致性指标 RI ,由式(7)计算一致性比率 CR 。

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

当 $CR < 0.1$ 时认为比较矩阵不一致程度在容许范围内,即指标比较无逻辑错误;否则重新调整矩阵至一致性比率通过。

4 修复效果评估指标体系建立

本研究经过指标筛选、指标确定、权重计算一系列步骤,最终构建了权重分配完整的修复效果评估指

标体系(表9)。

就准则层权重分布来看,具有一定的偏向性,权重比较大的指标集中在水稻生长安全和重金属污染两个方面,分别为0.43与0.34;就指标层来看,有效镉消减量指标与糙米含镉量指标权重最大,分别为0.219与0.253。一方面说明专家们更侧重于关注重金属镉在土壤中有效部分与水稻可食用部分含量变化,另一方面这也符合当今土壤重金属修复是以降低土壤中有效态含量与作物可食用部分重金属含量为主的现状。

5 展望

本文研究的重金属镉污染修复效果评估指标体系是修复效果评估体系的核心,评估体系的另一个重点是评估标准。本研究初步从3个方面确定指标标准:一是现有标准,如《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[33]中糙米含镉量限量值与《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[34]中土壤镉指标及污染风险筛选值及管制值标准;二是文献数据分析,如有效镉消减量指标标准可根据相关文献中消减量数据,制定该指标消减区间;三是专家咨询,如糙米含镉消减量

表9 修复效果评估指标体系

Table 9 Evaluation index system for repair effect

目标层及权重 Target layer and weights	准则层 Criteria layer	权重 Weights	指标层 Index layer	相对权重 Relative weight	组合权重 Combination weight
钝化修复效果评估 指标体系1	土壤肥力指标	0.12	碱解N	0.06	0.008
			有效P	0.08	0.009
			速效K	0.05	0.006
			有机质	0.16	0.019
			pH	0.27	0.032
			CEC	0.13	0.016
			脲酶活性	0.12	0.015
			次生污染问题	0.13	0.015
	重金属污染指标	0.34	土壤全镉量	0.36	0.121
			有效镉消减量/%	0.64	0.219
	水稻生长安全指标	0.43	糙米含镉量	0.59	0.253
			糙米镉消减量/%	0.26	0.111
			稻米产量	0.15	0.067
	修复经济安全指标	0.11	修复性价比	0.46	0.051
			修复剂含镉量	0.54	0.059

注:表9中三级指标相对二级指标得到的权重为相对权重,相对权重乘以二级指标的权重为组合权重即指标层各指标相对于体系S的最终权重。

Note: The weights of the three-level indicators in Table 9 relative to the second-level indicators are relative weights, and the weights of the relative weights multiplied by the second-level indicators are the combined weights, which is the final weight of each indicator of the indicator layer relative to the system S.

指标标准制定可咨询相关领域专家,制定合适的消减区间作为标准。

本指标体系需要在实践过程中不断完善,且体系并不是固定不变的,如不同修复材料可能会对土壤产生不同的次生环境问题等。修复效果评估指标体系研究工作仍有大量需要做的工作:一是继续研究修复效果评估指标体系,在试验与测样条件允许的情况下,尽量增加代表性的指标评估;二是研究其他重金属污染类型修复效果评估指标体系,如对重金属复合污染土壤,可能会增加相互协同或拮抗重金属类型指标。

参考文献:

- [1] 生态环境部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2014-04-17]. <https://baike.so.com/doc/9795224-10141981.html>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. [2014-04-17]. <https://baike.so.com/doc/9795224-10141981.html>.
- [2] 张敏.湖南攸县水稻田土壤镉污染评估与控制[D].太原:山西大学,2015.
ZHANG Min. Assessment and control of Cd pollution paddy soils in Youxian Hunan Province[D]. Taiyuan: Shanxi University,2015.
- [3] 李心,林大松,刘岩,等.不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1511-1520.
LI Xin, LIN Da-song, LIU Yan, et al. Effects of different soil conditioners on cadmium control in cadmium-contaminated paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1511-1520.
- [4] 中华人民共和国环境保护部.污染场地土壤修复技术导则 HJ 25.4—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014
Ministry of Environmental Protection of PRC. Technical guidelines for site soil remediation HJ 25.4—2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [5] 中华人民共和国环境保护部.污染场地风险评估技术导则 HJ 25.3—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2011.
Ministry of Environmental Protection of PRC. Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites HJ 25.3—2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [6] 马妍.规范污染场地地下水修复效果评估[N].中国环境报,2017-10-30(第006版).
MA Yan. Standardization the assessment of the remediation effect of contaminated ground water[N]. China Environmental News, 2017-10-30(6th Edition).
- [7] 张青,徐明岗,罗涛,等.3种不同性质改良剂对镉锌污染水稻土的修复效果及评价[J].热带作物学报,2010,31(4):541-546.
ZHANG Qing, XU Ming-gang, LUO Tao, et al. Effects and remediation evaluation of amendments in Cd-Zn contaminated paddy (*Oryza sativa*) soil[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(4):541-546.
- [8] 崔芳,袁博.污染土壤修复标准及修复效果评定方法的探讨[J].中国农学通报,2010,26(21):341-345.
CUI Fang, YUAN Bo. The remediation standards and evaluation methods for remediation effectiveness of contaminated soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(21): 341-345.
- [9] 晁雷,周启星,陈苏.污染土壤修复效果评定方法的研究[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(4):7-11.
CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su. Research on evaluation methods for effectiveness of contaminated soil remediation[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(4):7-11.
- [10] 王涛,李惠民,史晓燕.重金属污染农田土壤修复效果评价指标体系分析[J].土壤通报,2016,47(3):725-729.
WANG Tao, LI Hui-min, SHI Xiao-yan. Analysis on evaluation system of remediation effectiveness in farmland soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3): 725-729
- [11] 袁鑫,雷鸣.重金属污染土壤化学修复后的农业安全利用的评估体系[J].广东化工,2017,44(7):138-140.
YUAN Cui, LEI Ming. Assessment on remediation-heavy metal-contaminated-soil for agricultural security utilization[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(7):138-140.
- [12] 吴建.湘潭市耕地重金属污染修复治理实施过程及实施效果评价[D].长沙:湖南师范大学,2017.
WU Jian. Evaluation of the effect and the implementation process of restoration in heavy metal pollution farmland in Xiangtan City[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2017.
- [13] Mei G. Eco-tourism education effectiveness indicator system research for Macau SAR in practice[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018,108(3): 032013.
- [14] 黄李辉,阮永平.文献分析法在我国管理会计研究中的应用:基于33篇样本文献的分析[J].财会通讯,2017(4):39-43.
HUANG Li-hui, RUAN Yong-ping. Application of document analysis in management accounting research in China: Based on analysis of 33 sample literatures[J]. *Communication of Finance and Accounting*, 2017(4):39-43.
- [15] Addy M N, Adinyira E, Ayarkwa J. Identifying and weighting indicators of building energy efficiency assessment in Ghana[J]. *Energy Procedia*, 2017, 134: 161-170.
- [16] Haghhighathoseini A, Bobarshad H, Saghaei F, et al. Hospital enterprise architecture framework (Study of Iranian university hospital organization) [J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2018, 114: 88-100.
- [17] 全国农业技术推广服务中心.长江中游耕地质量评价[M].北京:中国农业出版社,2017:97-110.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Evaluation of cultivated land quality of Yangtze River central district[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017: 97-110.
- [18] Tong O, Shao S, Zhang Y, et al. An AHP-based water-conservation and waste-reduction indicator system for cleaner production of textile-printing industry in China and technique integration[J]. *Clean Techn Environ Policy*, 2012,14: 857-868
- [19] 雷华平.两型农业生产体系评价研究[D].长沙:长沙理工大学,

- 2011.
- LEI Hua-ping. The research evaluation of two-oriented agricultural production system[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2011.
- [20] 程亚飞. 普通高校体育工作综合评价指标体系研究[J/OL]. 体育科技, 2018(4):112-114.
- CHENG Ya-fei. The research on comprehensive evaluation of physical education work in universities[J/OL]. *Sport Science and Technology*, 2018(4):112-114.
- [21] 张 帅. 云南省可持续发展指标体系研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2016.
- ZHANG Shuai. Research on the sustainable development index system of Yunnan Province[D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2016.
- [22] 吴 坚, 梁昌勇, 李文年. 基于主观与客观集成的属性权重求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 383-387.
- WU Jian, LIANG Chang-yong, LI Wen-nian. Method to determine attribute weights based on subjective and objective integrated[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(3):383-387.
- [23] 牛敏杰. 基于生态文明视角的我国农业空间格局评价与优化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- NIU Min-jie. Research on evaluation and optimization of agricultural spatial pattern based on the perspective of eco-civilization in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [24] 周栋良. 环洞庭湖区两型农业生产体系研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- ZHOU Dong-liang. Study on two-oriented agricultural production system around Dongting Lake district[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- [25] 杜占江, 王金娜, 肖 丹. 构建基于德尔菲法与层次分析法的文献信息资源评价指标体系[J]. 现代情报, 2011, 31(10):9-14.
- DU Zhan-jiang, WANG Jin-na, XIAO Dan. Based on delphi method and AHP constructing evaluation target system of document information resources[J]. *Modern Information*, 2011, 31(10):9-14.
- [26] 王泽颖, 赵启斯. 基于德尔菲法和层次分析法的微课评价指标体系的构建[J]. 软件导刊(教育技术), 2016, 15(7):65-67.
- WANG Ze-ying, ZHAO Qi-si. Construction of micro-course evaluation index system based on delphi method and analytic hierarchy process[J]. *Software Guide*, 2016, 15(7):65-67.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 耕地质量等级: GB/T 33469—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC, Standardization Administration of China. Cultivated land quality grade: GB/T 33469—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [28] 中华人民共和国农业部. 耕地地力调查与质量评价技术规范: NY/T 1634—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- Ministry of Agriculture of PRC. Rules for soil quality survey and assessment: NY/T 1634—2008[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [29] 肖海燕. 调整判断矩阵不一致性的一种新方法[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(增刊1):5-7.
- XIAO Hai-yan. A new method of adjusting inconsistency of a judgment matrix[J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2008, 36(Suppl 1):5-7.
- [30] 郭竹梅. AHP中判断矩阵一致性改进的一种新方法[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 84-86.
- GUO Zhu-mei. A new method for consistency correction of judgment matrix in AHP[J]. *Journal of Qiqihar University(Natural Science Edition)*, 2010, 26(6): 84-86.
- [31] 吕跃进, 徐改丽. 模糊互补判断矩阵一致性调整的一种新方法[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2007, 21(2):35-38.
- LÜ Yue-jin, XU Gai-li. A new method correcting the consistency of Fuzzy complementary judgment matrices[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 21(2):35-38.
- [32] 宋 铁, 代吉亚, 吴发好, 等. 基于德尔菲法和层次分析法的疾控机构应急能力评估[J]. 华南预防医学, 2014, 40(1):1-6.
- SONG Tie, DAI Ji-ya, WU Fa-hao, et al. Assessment of CDC's emergency capability with Delphi method and analytic hierarchy process [J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 2014, 40(1):1-6.
- [33] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of PRC, China Food and Drug Administration. National standard of food safety contaminant limit in food: GB 2762—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [34] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Press, 2018.