

# 基于双重熵值修正法的小清河底泥修复方案比选

孙 叶<sup>1,2</sup>, 黄 乾<sup>2,3</sup>, 王 薇<sup>2,3</sup>

(1. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022; 2. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014;

3. 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250014)

**【摘 要】**弃土场污染底泥修复是河道防洪综合治理工程生态体系的主要改造内容之一。小清河防洪综合治理工程干流扩挖段弃土区出现的底泥污染物主要为六价铬和砷等重金属, 需要优选底泥污染物修复方案。本研究选取 5 个评价指标构建了污染底泥修复评价指标体系, 在相对熵的专家打分修正的基础上, 通过熵值 G1 法计算了指标权重, 根据权重优选小清河污染底泥修复方案。结果表明: 重金属六价铬单一污染底泥适宜采用“异位化学还原+排入排渣场或资源利用”方案, 重金属砷单一污染底泥宜采用水泥窑协同处置修复技术, 六价铬—砷复合污染底泥适宜采用水泥窑协同处置修复技术。基于双重熵值修正法的方案比选法可以客观快速进行污染底泥处理方案优选。

**【关键词】**污染底泥; 修复技术; 双重熵值修正; 小清河

**【中图分类号】**X703

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1009-6159(2025)-01-0012-03

## Comparison and Selection of Remediation Scheme of Xiaoqing River Sediment Based on Double Entropy Correction Method

SUN Ye<sup>1,2</sup>, HUANG Qian<sup>2,3</sup>, WANG Wei<sup>2,3</sup>

(1. School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China;

2. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China;

3. Shandong Key Laboratory of Water Resources and Water Environment, Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract:** The restoration of polluted sediment from the dumping site is one of the main contents of the ecological system transformation of river flood control comprehensive management project. In Xiaoqing River flood control project, the pollutants in the bottom mud are mainly heavy metals such as hexavalent chromium and arsenic. In this study, five evaluation indexes were selected to construct an evaluation index system for the remediation of contaminated sediment. Based on the expert scoring and correction of relative entropy, the index weights were calculated by the entropy G1 method, and the remediation scheme of Xiaoqing River contaminated sediment was selected according to the weights. The results show that the solution of "ectopic chemical reduction + discharge into slag field or resource utilization" is suitable for the heavy metal hexavalent chromium single contaminated sediment, the cement kiln coordinated disposal and restoration technology is suitable for the heavy metal arsenic single contaminated sediment, and the cement kiln coordinated disposal and restoration technology is suitable for the hexavalent chromium - arsenic complex contaminated sediment. The scheme selection method based on the double entropy correction method can be used to optimize the treatment scheme of contaminated sediment objectively and quickly.

**Key words:** Contaminated sediment; Restoration technique; Double entropy correction; Xiaoqing River

小清河属于山东半岛诸河流域水系, 支流众多, 一级支流共 46 条, 几乎全部由南岸注入干流, 呈典型的单侧梳齿状分布, 而又多系山洪河道, 上陡下缓, 作为济南市唯一的排洪通道, 各支流泥沙最终全部流入小清河, 且小清河干流河道

比降较缓, 随着河道多年行洪、排涝沉积物的影响以及部分污水排放的影响, 目前城区段河道淤积严重。小清河干流扩挖段是小清河防洪综合治

收稿日期: 2024-07-23

作者简介: 孙叶(2000—), 女, 研究生在读

理工程的一部分,主要对济青高速公路桥至新柴庄闸段河槽进行扩挖,产生弃土 719.64 万  $\text{m}^3$ ,分别运至黄河大堤淤背区、马家渣土场等 17 个弃土场。

根据小清河底泥污染状况专项调查,小清河干流扩挖段部分底泥存在不同程度的重金属超标现象,需修复的弃土场区块共有 15 个,小清河污染底泥包括重金属六价铬单一污染底泥、重金属砷单一污染底泥、六价铬—砷复合污染底泥,3 种底泥修复目标污染物为重金属六价铬和砷。为减少污染底泥对环境的影响或规避污染风险,应采取措施进行底泥修复。污染底泥修复技术中常用的有底泥淋洗、异位化学还原等组合工艺,不同技术的投资规模、运行成本不同,为保证小清河治理成效,考虑到小清河底泥污染问题影响面较广,工艺较为复杂,需进行处理方案分析论证、优化选择。本研究构建污染底泥修复评价指标体系,先基于相对熵的专家打分修正,再通过熵值 G1 法计算权重,最后优选推荐合适的污染底泥修复方案。

## 1 基于双重熵值的多因素综合评估方法

模型首先利用熵值修正的 G1 方法<sup>[1]</sup>进行主观赋权,G1 方法是根据专家在特定领域的知识背景、实践经验和声誉等因素进行排序,确定相邻权重比,从而获取专家的主观权重的方法。采用熵值对 G1 指标赋权进行进一步修正,旨在降低主观随意性,同时考虑到指标的经验重要性。双重熵值修正的指标赋权方法,克服了专家打分法的主观随意性,能更有效地优化污染底泥修复方案。

### 1.1 基于相对熵的专家打分修正

假设有  $n$  位专家( $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ ),  $n$  位专家依次对  $m$  个评价指标( $I_1, I_2, I_3, \dots, I_m$ ),利用 1~9 的标度值来衡量评估指标的重要性。后基于判断矩阵行向量单位化,得到第  $i$  位专家对第  $j$  个指标的偏好效用值  $\bar{X}_{ij}$ ,假设整个专家组的偏好效用值为  $X_G = (X_{G1}, X_{G2}, X_{G3}, \dots, X_{Gm})$ ,进而得到专家  $A_i$  相对于整个专家组的所给评分相对熵值  $h(X_G, \bar{X}_i)$ 。专家重要性评分矩阵  $X$  及评分过程按下式计算。

$$X = [X_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{X}_{ij} = X_{ij} / \sum_{j=1}^m X_{ij} \quad (2)$$

$$h(X_G, \bar{X}_i) = \sum_{j=1}^m X_{Gj} \ln(X_{Gj} / \bar{X}_{ij}) \quad (3)$$

式中: $X_{ij}$  表示  $i$  专家  $A_i$  对第  $j$  个指标的重要性评分。

依据相对熵理论,如果专家  $A_i$  的评分相对熵值  $h(X_G, \bar{X}_i)$  较低,那么他们的评分结果与专家群体的评分结果更为一致,评分的合理性也更高。这就意味着,在约束条件下专家  $A_i$  的偏好效用向量与专家群体的偏好效用向量之间的距离达到最小<sup>[2]</sup>。本文选择最小化约束相对熵的非线性规划,选定  $1/n$  为初始迭代值,通过构建拉格朗日函数,解得指标重要性专家群组偏好效用向量的局部最优解  $\bar{X}_{Gi}$ 。

$$\min KL(X_G) = \sum_{i=1}^n W_i \sum_{j=1}^m X_{Gj} \ln(X_{Gj} / \bar{X}_{ij}) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (5)$$

式中: $W_i$  表示专家  $A_i$  组内所占权重,令其等于  $1/n$ 。

通过原始目标函数与约束条件构建 Lagrange 函数,求解函数驻点。解得非线性目标函数最优解为  $X_G^* = (X_{G1}^*, X_{G2}^*, X_{G3}^*, \dots, X_{Gm}^*)$ ,进一步根据专家  $A_i$  的差异性熵值,最后得到专家  $A_i$  对所有指标的评分熵值  $H_i$ 。

$$\begin{cases} e_{ij} = 1 - |X_{Gj}^* - X_{ij}| \\ h_{ij} = \begin{cases} -e_{ij} \ln e_{ij} & 1/e \leq -e_{ij} \leq 1 \\ 2/e - e_{ij} \ln e_{ij} & 2/e \leq -e_{ij} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$H_i = \sum_{j=1}^m h_{ij} \quad (7)$$

根据相对熵理论<sup>[4]</sup>,若专家  $A_i$  的评分结果显示较大的差异性熵值  $H_i$ ,则其评分的不确定性增加,合理性相应减少。若某位专家的评分合理性偏低,应从结果中移除其评分,以防其对整个专家团队评分合理性的负面影响。

### 1.2 熵值修正后 G1 法指标赋权

熵值可以度量系统包含的不确定性。通过度量某一指标的数值变异程度,变异程度越大代表其对综合评价的作用越大,即该指标的权重越大,指标对应的信息熵值就越小。反之,指标的数值变异度越小时,代表其熵值就越大,指标权重越小。计算指标熵值的公式如下:

$$P_j = -\frac{1}{\ln(q)} \sum_{i=1}^1 \ln(X_{ij} / \sum_{i=1}^1 X_{ij})$$

$$j=1,2,\cdots,m \quad (8)$$

式中: $P_j$ 代表指标 $I_j$ 的熵值, $q$ 代表了从1到 $n$ 指标数目的个数。

基于相对熵的指标打分进行合理性分析并进行修正后,根据重要程度对评价指标进行排序。基本概念如下:如果评价指标 $V_i$ 的重要性相对于某一评价标准的重要性大于评价指标 $V_j$ ,则记录为 $V_i > V_j$ 。用 $r'_j$ 来描述 $V_i$ 与 $V_j$ 的相对差异性。

$$r'_j = \begin{cases} \min \left\{ 2, \sqrt{\frac{X_{j-1}(1-p_{j-1})}{X_j(1-p_j)}} \right\} \\ \min \left\{ 2, \frac{X_{j-1}}{X_j} \sqrt{\frac{(1-p_{j-1})}{(1-p_j)}} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

式中:评价指标 $V_1, V_2, \cdots, V_m$ 是关于某一评价标准的关系表达式。

指标修正后权重:

$$\begin{cases} W'_m = (1 + \sum_{j=2}^m \prod_{v=j}^m r'_v)^{-1} \\ W'_{j-1} = r'_j W'_m \quad j=2,3,4,\cdots,m \end{cases} \quad (10)$$

## 2 底泥修复指标体系构建

小清河污染底泥修复评价指标体系包括目标层、准则层、指标层。目标层为小清河污染底泥修复方案,探索弃土资源化利用途径,科学妥善处置弃土,需将污染底泥进行修复。综合考虑污染物分布特点、场地施工限制以及社会经济实际情况,最终目的是探索弃土资源化利用途径,科学妥善处置弃土。为更好地资源化利用弃土,需将目前小清河重金属六价铬单一污染底泥、重金属砷单一污染底泥、六价铬—砷复合污染底泥3种类型修复,为此选取最优处理方法。

### 2.1 底泥处理技术备选方案

目前,国内外应用较为成熟或具有应用前景的重金属修复或处置技术主要包括:水泥窑协同处置、阻隔覆盖、固化/稳定化、异味化学还原、化学淋洗、生物还原、电动修复等。综合几种主要的修复技术的工艺流程、技术原理、适用性、限制性,结合研究区污染土壤的具体污染特征、地块未来开发计划、治理周期、修复成本等因素,本研究选取水泥窑协同处置、异位化学还原、底泥淋洗、固化/稳定化等4种技术进行比选分析。

### 2.2 评价指标体系

场地土壤修复技术和过程涉及生态环境、施工工期、技术成本、可靠性等几方面因素。为建立小清河污染底泥修复技术综合评价体系,所选取的评价指标应尽可能全面,同时又要遵循科学性、可操作性、完备性、相对独立性原则。本研究从相关指标中遴选后,选取“技术成熟可靠性”“修复成本”“安全健康环境”“环境可接受性”“修复周期”5个指标进行评价。

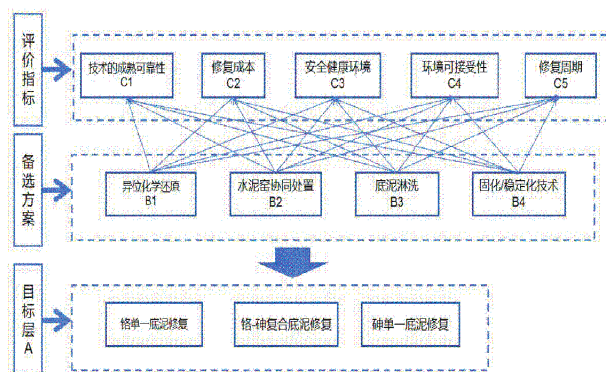


图1 污染底泥修复评价指标体系

## 3 综合评价

由10位该领域专家,按照1~9标度法,对污染土壤修复指标进行两轮打分,直到整个专家组的评分熵小于0.1,整个专家组的评分合理性较高时停止。为检验结果的合理性,通过层次分析法确定的指标层权重与本研究中的双重熵值修正法进行对比分析。在准则层方面,双层熵值指标修正法结果表明:各方案层对目标层权重分别为36%,33%,16%,15%,均值为25%。准则层中,固化稳定技术的权重值最小,比均值偏低10%;水泥窑协同处置方案权重值最大,占比36%,是4个备选方案中最合适的。

指标层河流健康评价指标权重结果见表1,层次分析法与双重熵值修正评价结果整体接近,证明了文中所提方案的有效性。基于相对熵的专家意见修正后,主导指标权重增强,一致性和准确性得到了显著提高,更符合客观现实。

通过详细分析水泥窑协同处置、化学还原、底泥淋洗、固化/稳定化等修复技术的经济合理性、技术可行性,由专家根据1~9标度值给出指标分值,经过两次熵值修正后,最终确定项目针对重金属六价铬单一污染底泥推荐采(下转第24页)



性。在《沿河环湖综合效益核算指南》基本框架基础上,开展沿河环湖生态产品调查,建立产品目录,制定出台符合地方实际情况的《沿河环湖综合效益核算地方标准》,进一步明确核算区域单元的划定方法、项目实施主体与权责划分原则、最优发展模式的决定要素、核算办法及成果应用领域等。

2)完善金融支持体系,提升生态价值核算结果的认可度。对接银行等金融保险机构,在充分开展沿河环湖生态产品调查、完善产品目录清单的基础上,探索建立河湖生态产品价值核算结果登记备案制度,进一步推动核算结果作为贷款抵押、市场化交易等环境的依据。

3)搭建市场交易平台,提升河湖生态产品市场交易的可操作性。强化政府引领作用,依托国有企业等,搭建市场化交易平台,通过规模化、区域性系统整合,打造优势资源包,提升供给产品的整体优势。

4.2 操作路径及长效管理措施

1)开展河湖生态产品价值核算。开展沿河环湖区域生态产品价值核算,对河湖水资源、砂资源、湿地资源、土地资源等自然资源和历史文化、人文情怀等社会资源进行经济价值量化核算。

2)创新金融产品工具。积极对接银行、保险等金融机构,创新推出针对河湖生态产品价值转化的金融信贷和保险产品,提升河湖生态价值转化的可操作性。

3)延展项目产业链。在梳理完善效益河湖项目库基础上,谋划沿河环湖渔业生态放养、抽水蓄能发电、河谷漂流、生态农业、文化旅游等项目,做好融合文章,进一步延展河湖产业线。

4)梳理总结经验成果。按照“一县一特色、一河一案例”梳理总结县(市、区)典型发展模式,着力形成一批可复制、可推广的效益河湖先行先试典型案例。

(责任编辑 崔春梅)

(上接第 14 页)

表 1 指标权重对比

| 污染物        | 指标 | 权重       |         | 模拟方案 | 现行方案 |
|------------|----|----------|---------|------|------|
|            |    | 层次分析法    | 双重熵值修正法 |      |      |
| 重金属六价铬     | B1 | 0.338 2  | 0.425 7 |      |      |
|            | B2 | 0.292 9  | 0.319 3 | 异位化  | 异位化  |
|            | B3 | 0.199 82 | 0.148 6 | 学还原  | 学还原  |
|            | B4 | 0.169 1  | 0.106 4 |      |      |
| 重金属砷       | B1 | 0.291 2  | 0.326 5 |      |      |
|            | B2 | 0.306 8  | 0.362 4 | 水泥窑  | 水泥窑  |
|            | B3 | 0.209 6  | 0.147 8 | 协同处置 | 协同处置 |
|            | B4 | 0.206 0  | 0.163 3 |      |      |
| 重金属六价铬-砷复合 | B1 | 0.234 6  | 0.208 9 |      |      |
|            | B2 | 0.302 2  | 0.346 7 | 水泥窑  | 水泥窑  |
|            | B3 | 0.161 4  | 0.098 9 | 协同处置 | 协同处置 |
|            | B4 | 0.301 7  | 0.345 5 |      |      |

用“异位化学还原+排入排渣场或资源利用”的模式进行修复,针对重金属砷单一污染底泥和六价铬-砷复合污染底泥推荐采用水泥窑协同处置修复技术。评价结果与行业现状吻合、结果可靠。

4 结 论

1) 基于双重熵值修正的评价技术相对层次层次分析法,专家意见一致性与准确性强,方案

评价快速合理等优点,非常适合河道底泥污染技术的评价与遴选。

2) 该方法在小清河底泥修复中进行了评价应用,评价选择合理,与实际应用技术选择一致,说明其具有较好的实践性。

3) 基于双重熵值修正的小清河污染底泥修复措施评价结果,重金属六价铬单一污染底泥推荐采用“异位化学还原+排入排渣场或资源利用”的模式进行修复,重金属砷单一污染底泥和六价铬-砷复合污染底泥推荐采用水泥窑协同处置修复技术,与现场选择应用的技术方案吻合,结果可靠,可以在其他评价中广泛应用。

参考文献

[1] 韩伟,赵瑞锋,石一辰,等.铬污染场地原位修复技术应用现状与展望[J].环境工程技术学报,2023,13(4):1486-1496.  
[2] 黄天富,李建新,吴志武,等.基于双重熵值修正指标权重的电能表状态评价研究[J].电测与仪表,2024,61(3):199-205.  
[3] 范鲁晔,顾文权,邵东国,等.江汉平原河湖水系连通性评价研究[J].中国农村水利水电,2023(8):111-119.  
[4] 张富康,冯民权.基于熵权综合污染指数法的汾河中游水质分析[J].人民黄河,2022,44(5):109-114.

(责任编辑 崔春梅)