Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京城区PM2.5各组分污染特征及来源分析

安欣欣，曹阳，王琴，富佳明，王陈婧，景宽，刘保献

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年5月
第43卷 第5期
Vol.43 No.5

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第5期
2022年5月15日

目 次

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第5期 2022年5月
Vol.43, No.5 May, 2022

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析

李笑诺[1]，易诗懿[1,2]，陈卫平[1*]
(1. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境科学与技术实验室，北京 100085；2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049)

摘要：以可持续发展理论和风险管理理念为基本原则的污染场地可持续风险管控已成为当前国际社会场地管理的重要决策问题和研究前沿热点，为明确影响污染场地风险管控可持续发展能力的决定性因素，基于国内外污染场地可持续风险管控相关文献的系统调研，构建契合我国场地管理背景的区域污染场地风险管控可持续评价体系，通过指标综合权重计算判定影响风险管控可持续发展能力的关键因子. 结果表明，区域尺度上可能影响我国污染场地风险管控可持续性的指标多达 44 个，涵盖环境、社会、经济和技术这 4 个维度，单指标影响程度为 0.26% ~ 5.01%（平均值 2.27%）. 潜在风险和温室气体排放（环境指标）、健康与安全和公众参与（社会指标）、管控成本和环保投资（经济指标）、修复周期和修复效果（技术指标）是影响我国污染场地风险管控可持续发展的重要因子，影响程度为 1.89% ~ 5.01%（平均值 3.58%）. 具有较强政策敏感性的指标，包括考核指标、投融资创新、名录管理、能力建设、安全利用和制度建设等，对风险管控可持续性已经产生 1.18% ~ 3.48% 的正向影响，随着政策制度的深入落实与全面地域推广，其对风险管控可持续发展的助力效应将更加明显.

关键词：污染场地；风险管控；可持续评价；综合权重耦合模型；驱动机制
中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2022)05-2699-10 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202109211

Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors

LI Xiao-nuo[1], YI Shi-yi[1,2], CHEN Wei-ping[1*]
(1. Laboratory of Soil Environmental Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the tenets of sustainability development and risk management, sustainable risk management and control for contaminated sites has gradually become one of the most important decision issues and research frontier topics in global land management. To identify the determining factors that might affect the sustainability of contaminated site risk management and control, a systematic analysis of relevant literature focusing on sustainable risk management and control for contaminated sites was conducted. Then, a sustainability evaluation index system was first established at a regional perspective, which further considered site management practices in China. Second, weight coefficients of all indicators were calculated to identify key factors that could largely affect the sustainability of risk management and control. The results showed that 44 indicators covering environment, society, economy, and technology aspects could potentially influence the sustainability of contaminated site risk management and control ranging between 0.26% and 5.01% (average 2.27%). In total, eight indicators were shown to be the most influencing factors in the sustainability of risk management and control, namely potential risks and GHG emissions in the environmental dimension, health and safety and public engagement in the social dimension, management cost and environmental investment in the economic dimension, and remediation time and effect in the technical dimension. Their contributions to sustainability ranged from 1.89%-5.01% (average 3.58%). Indicators with strong policy sensitivity, including performance assessment, investment and financing innovation, directory management, capacity-building, safe utilization, and system construction, tended to produce positive effects on the sustainability of risk management and control by approximately 1.18%-3.48%. However, the contributing effects are expected to be further improved with the in-depth implementation and regional promotion of policies.

Key words: contaminated sites; risk management and control; sustainability evaluation; overall weight coupling model; driving mechanism

近年来，在产业结构升级调整和城市发展转型的过程中，工矿企业搬迁遗留了大量存在潜在污染隐患的场地，环境风险和土地再利用安全矛盾突出[1,2]. 从国内外历年场地修复工程实践看，包括工程控制、监控自然衰减和制度控制在内的风险管控技术具有更好的地质适应性、更强的复合污染处理能力和更广的场地适用范围，这一认识逐渐推动了污染场地管理思想从以工程技术彻底清除污染物向以管控风险为目标的转变[3~5]. 同时，“治理行为在消除场地本身污染的同时也会产生新的环境足迹”这一现实问题也引起了社会各界的广泛关注，直接推动了场地风险管理向绿色可持续管理思想的进阶. 在此背景下，美国、英国、荷兰和加拿大等国相继制定发布了一系列可持续修复相关的标准指南和评估导则等，系统阐述了可持续修复的衡量指标、评估方法、决策工具和实施框架[6~11]. 我国开展污染场地可持续修复的系统研究已十年有余，目前仍

收稿日期：2021-09-24；**修订日期**：2021-10-11
基金项目：国家自然科学基金项目(72104231)；国家重点研发计划项目(2020YFC1807500)
作者简介：李笑诺(1988～)，女，博士研究生，助理研究员，主要研究方向为污染场地可持续管理，E-mail:xnli@rcees.ac.cn
* 通信作者，E-mail:wpchen@rcees.ac.cn

未形成系统、规范和普适的可持续评估指标体系和方法工具[12~14]. 已有研究中,虽然学者们都强调了环境、社会和经济这 3 个方面的综合考量,但可持续思想也仅在技术筛选评估层面有所体现[15~29]. 测度指标或完全照搬现存指标或根据评估者偏好选取,忽视区域背景强异质性的同时又存在主观和片面的可能,直接影响了管控决策的整体效益.

为克服传统评估可持续思想割裂和可持续影响机制考虑不足的局限性,为我国污染场地风险管控可持续评价提供系统和精细的体系支撑,本研究立足于我国“十四五”土壤环境管理和生态文明建设的战略愿景,紧密结合国际上污染场地风险管控的可持续发展趋势,全面衡量我国特定区域背景下污染场地可持续风险管控所关注的环境行为的各个要素、社会人文的各个层次、经济活动的各个领域和技术措施的各个方面,建立我国区域尺度上多层次、多维度和全过程的污染场地可持续风险管控指标体系,并耦合社会网络分析法(SNA)、决策与实验室法(DEMATEL)和网络分析法(ANP)研究污染场地风险管控可持续发展的关键影响因子及效益驱动机制,以期抓住统筹协调着力点来全面促进我国污染场地风险管控的持续发展.

1 材料与方法

1.1 数据来源

针对截至 2021 年发表的国内外污染场地治理修复或风险管控决策相关文献,以“污染场地可持续修复”为关键词,或以“污染场地(或污染土壤)”并含“修复技术(或决策系统、修复方案)”为关键词对知网和万方等中文数据库进行检索查阅; 以“contaminated/polluted site/land”或“brownfield”并含“green/sustainability remediation”或“remediation alternatives/technology”或“decision making”等为关键词,对 Springer、ScienceDirect 和 Wiley Online 等外文数据库进行检索查阅,共收集期刊文献 282 篇(包括中文学位论文). 进一步对原始文献进行剔重(移除61 篇重复)、摘要概览(移除无关文献 33 篇)和全文详读(移除不符文献 95 篇)后,纳入符合研究要求的文献共 93 篇. 文献检索流程如图 1 所示.

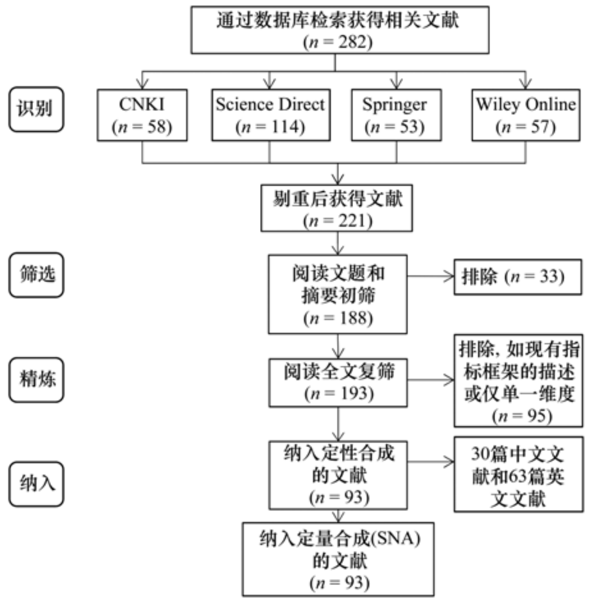


图 1 文献筛选 PRISMA 流程

Fig. 1 PRISMA flow diagram for literature screening

1.2 数据分析与方法

采用社会网络分析法计算指标客观权重,对已有研究中的关键指标进行筛选提取,进一步结合 DEMATEL-ANP 主观权重确定各个指标的综合权重系数,系数越大表示对风险管控可持续能力影响越大,对应指标即为污染场地可持续风险管控的关键影响因素. 基于 SNA-DEMATEL-ANP 的主客观熵权分配方法,既考虑了专家的主观思想,又在一定程度上体现了指标本身的特点,避免了单一赋权法的偏颇,评价结果更为准确和合理. SNA-DEMATEL-ANP 方法实现路径如图 2 所示.

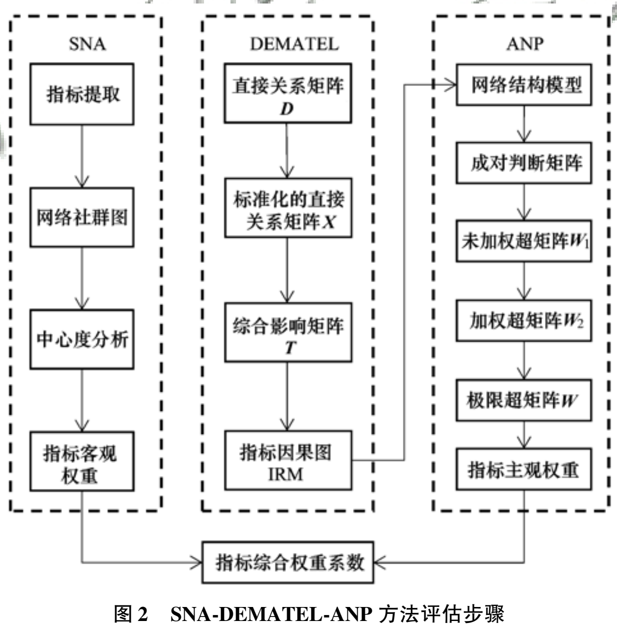


图 2 SNA-DEMATEL-ANP 方法评估步骤

Fig. 2 Evaluation procedure for SNA-DEMATEL-ANP approach

1.2.1 社会网络分析方法(SNA)

SNA 通过中心度计算指标客观权重,识别各网络中处于核心位置的重要节点,即社会、环境、经济和技术各维度下影响管理决策的重要指标[30]. 利用 Ucinet 6.365 软件构建各个维度社会网络分析社群图,中心度通过中介中心性计算,公式见式(1):

$$C_{\mathrm{B}}(n_i) = \sum_{j<k} g_{jk}(n_i) \Big/ g_{jk} \tag{1}$$

式中, $C_{\mathrm{B}}(n_i)$为中介中心性; g_{jk}为节点 n_j 与 n_k 之

间存在的捷径的数目; $g_{jk}(n_i)$ 为节点 n_j 与 n_k 之间存在的经过节点 n_i 的捷径的数目; i、j 和 k 特指某个节点.

1.2.2　基于 DEMATEL 的指标网络结构模型

DEMATEL 方法的具体实施包括构建直接关系矩阵、直接关系矩阵标准化、构建综合影响矩阵和绘制指标因果图这 4 个步骤. 首先,通过专家咨询获取指标影响关系,指标间的关系采用 5 分点评分量表按 0(无影响)、1(低度影响)、2(中度影响)、3(高度影响)和 4(极高度影响)这 5 种影响程度表示,综合每位专家的评分结果进行算术平均得到直接关系矩阵 $\boldsymbol{D}$,矩阵对角元素设定为 0. 其次,将直接关系矩阵 $\boldsymbol{D}$ 乘以 λ 得到标准化直接关系矩阵 $\boldsymbol{X}$. 第三,对标准化直接关系矩阵进行求极限处理,得到综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$. 最后,根据综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 分析每个指标的影响度(r_i)、被影响度(c_j)、中心度(r_i+c_i)和原因度(r_i-c_i). λ 和 $\boldsymbol{T}$ 计算公式见式(2)和式(3), r_i 和 c_j 计算公式见式(4)和式(5):

$$\lambda = \min\left[\frac{1}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant 4}\left(\sum\limits_{j=1}^{4} d_{ij}\right)}, \frac{1}{\max\limits_{1\leqslant j\leqslant 4}\left(\sum\limits_{i=1}^{4} d_{ij}\right)}\right] \tag{2}$$

式中, d_{ij}为指标 i 对指标 j 的影响程度.

$$\boldsymbol{T} = \sum_{k=1}^{\infty} \boldsymbol{X}^k = \boldsymbol{X}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{X})^{-1} \tag{3}$$

式中, $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵; $\boldsymbol{X}$ 为标准化直接关系矩阵.

$$r_i = \sum_{j=1}^{4} t_{ij} \tag{4}$$

$$c_j = \sum_{i=1}^{4} t_{ij} \tag{5}$$

式中, t_{ij}为综合影响矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的元素.

1.2.3　基于 ANP 的指标主观权重

根据(r_i+c_i)和(r_i-c_i)构建网络结构模型,模型中的箭头方向表示指标间的相互作用关系,通过构建成对判断矩阵和计算超矩阵(未加权超矩阵、加权超矩阵和极限超矩阵)等步骤开展 ANP 指标主观权重研究. 首先,对控制层各准则(一级指标)和网络层各元素(二级指标)所有关联的指标进行重要性的两两比较,形成各准则下各指标之间的成对判断矩阵. 比较优势度根据 Saaty[31] 提出的 1 ~9 标度表进行量化. 计算每一组判断矩阵的随机一致性比率 CR,当 CR <0.1 时认为判断矩阵具有可以接受的一致性,说明权数分配合理. 然后,对每组通过一致性检验的判断矩阵进行特征向量归一化,得到某次准则下某维度内各指标所占的权重(排序向量),将所有网络层内各指标间相互影响的排序向量汇总得到未加权超矩阵,与归一化矩阵相乘后即为加权超矩阵. 为了反映指标之间的依存关系,需对加权超矩阵做一个稳定处理,通过计算每个超矩阵的极限相对排序向量,得到极限超矩阵,矩阵中的各元素就是各指标所占的权重. 极限相对排序向量计算公式见式(6):

$$\lim_{k\to\infty}(1/n)\sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{W}^k \tag{6}$$

式中, n 为指标个数; $\boldsymbol{W}$ 为极限超矩阵.

ANP 借助超级决策软件 SD(Super Decision)实现,应用版本为 SD 3.2.0.

1.2.4　基于 SNA-DEMATEL-ANP 的指标综合权重系数

以指标 SNA 中心度和 ANP 矩阵元素分别作为指标客观权重和主观权重,计算各指标综合权重,反映各指标对风险管控可持续水平的影响程度,综合权重系数越大表示该指标对污染场地风险管控可持续发展水平的影响越明显,为决策核心指标. 综合权重系数计算公式见式(7)和式(8):

$$\omega_i = \frac{\alpha_i\omega_{si}+\beta_i\omega_{oi}}{\sum\limits_{i=1}^{n}\alpha_i\omega_{si}+\beta_i\omega_{oi}}, \quad 1\leqslant i\leqslant n \tag{7}$$

$$\begin{cases}\alpha_i = \omega_{si}/(\omega_{si}+\omega_{oi}), \\ \beta_i = \omega_{oi}/(\omega_{si}+\omega_{oi}).\end{cases} \quad 1\leqslant i\leqslant n \tag{8}$$

式中, ω_{si}和 ω_{oi}分别为主观权重和客观权重; α_i 和 β_i 分别表示主观权重和客观权重的相对重要程度系数; n 为指标个数.

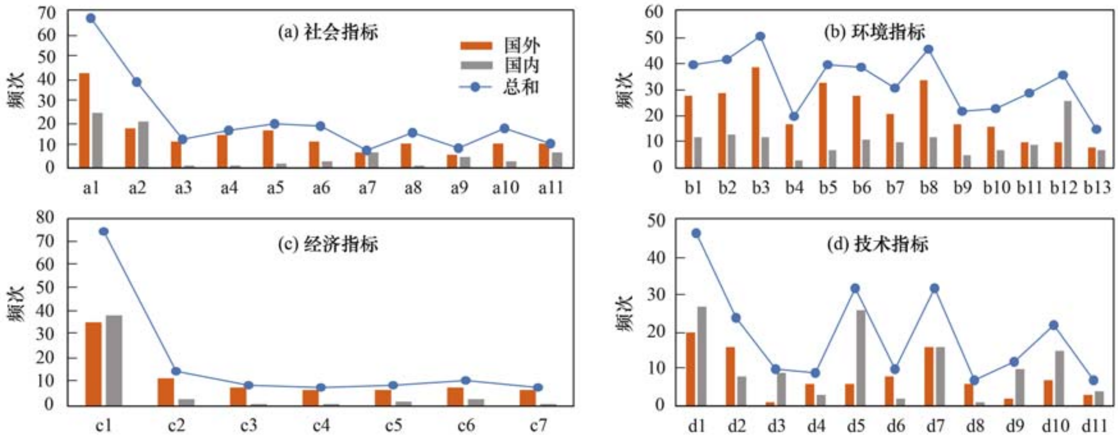
2　结果与讨论

2.1　可持续风险管控指标体系

2.1.1　高频指标统计

本文根据已有研究将可持续性指标划分为社会指标、环境指标、经济指标和技术指标这 4 个类别,通过文献原始指标提取、重复指标删除和相似指标合并,最终获得 29 个社会指标、29 个环境指标、15 个经济指标和 26 个技术指标. 分析各社会、环境、经济和技术指标的应用频次,如图 3 所示,得到高频次指标分别为 11 个社会指标(频次≥8)、13 个环境指标(频次≥15)、7 个经济指标(频次≥8)和 11 个技术指标(频次≥7).

如图 3(a)所示,社会指标中使用频次超过 8 的指标共 11 个,占指标总频次的 82.07%. 除社会关注度指标外,其他指标都呈现出国外较国内研究应用频率高的趋势. 特别是,休闲娱乐价值、教育功能和社区活力等指标由于难以表征量化,还未被国内学者纳入量化范畴,在国外研究中的应用频次也较低. 其他指标如社会公平、公众参与、政策相符性、



a1. 健康与安全,a2. 社会舆情,a3. 社会公平,a4. 综合影响,a5. 公众参与,a6. 政策相符性,a7. 不确定性,a8. 就业机会,a9. 社会繁荣,a10. 社区扰动,a11. 文化遗产; b1. 地表水影响,b2. 地下水影响,b3. 温室气体排放,b4. 土地再利用,b5. 资源消耗,b6. 空气污染,b7. 土壤变化,b8. 生态影响,b9. 废物产生,b10. 能源消耗,b11. 环境风险,b12. 二次污染,b13. 潜在风险; c1. 管控成本,c2. 经济效益,c3. 岗位创收,c4. 投资吸引力,c5. 效益持久性,c6. 土地增值,c7. 成本有效性; d1. 修复周期,d2. 土地再利用,d3. 场地适用性,d4. 管理需求,d5. 技术成熟度,d6. 管控位置,d7. 修复效果,d8. 技术简易性,d9. 技术可获性,d10. 技术可操作性,d11. 可持续性

图 3 指标频次统计

Fig. 3 Frequency of sustainability indicators

就业机会和社区扰动等在国外研究中的应用频率远高于国内研究. 综合来看,频次最高的前 5 个指标从高到低依次为:健康与安全(68)、社会舆情(39)、公众参与(20)、政策相符性(19)和社区扰动(18)等.

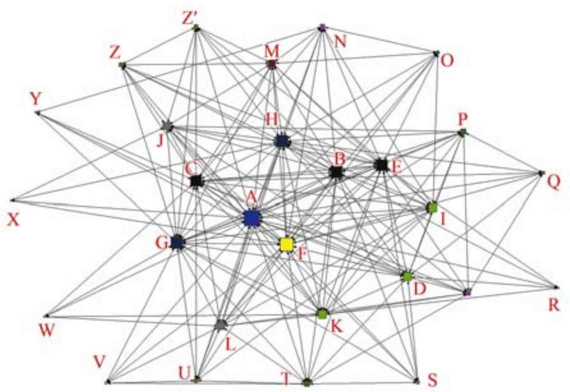
如图 3(b)所示,环境指标中使用频次超过 15 的指标共 13 个,占指标总频次的 88.75%. 超过 80% 的指标呈现出国外较国内研究应用频率高的趋势,尤其是土地再利用、温室气体排放、废物产生、物种入侵和废物产生等指标的使用频次都低于国外研究 70% 以上. 综合来看,频次最高的前 6 个指标从高到低依次为:温室气体排放(51)、生态影响(46)、地下水影响(42)、地表水影响/资源消耗(40)、空气污染(39)和二次污染(36)等.

如图 3(c)所示,经济指标使用频次超过 8 的指标共 7 个,占指标总频次的 92.86%. 除管控成本指标外,其他指标在国内研究中的应用频次均远低于国外研究. 不论是国内研究还是国外研究,成本(75)和收益(15)都是衡量修复技术经济可持续性的两个最主要指标,而就业岗位增加(9)和土地增值(11)是对总收益影响最大的两个指标.

如图 3(d)所示,技术指标使用频次超过 7 的指标共 11 个,占指标总频次的 83.14%. 国内研究使用技术指标的频次高于国外研究约 25%,特别是对修复周期、修复效果和技术性能指标(包括技术适用性、技术可获性、技术成熟度、技术可操作性和效果可持续等)表现出较高关注度.

2.1.2 优势指标分析

计算社会、环境、经济和技术各指标中心度,进行共词矩阵社会网络分析(图 4 ~ 7),取中心度大且靠近网络中心的指标,结合图 3 中各指标应用频次,确定关注度高、影响程度大、使用频次多的各维度指标共 37 个,包括 10 个社会指标:健康与安全、公众参与、社会舆情、政策相符性、社会公平、就业机会、社区扰动、文化遗产、社会繁荣和区域适宜性; 11 个环境指标:温室气体排放、地下水影响、生态影响、地表水影响、资源消耗、空气污染、土壤变化、废物产生、能源消耗、二次污染和潜在风险; 6 个经济指标:管控成本、经济效益、效益持久性、岗位创收、投资吸引力和土地价值; 10 个技术指标:修复周期、修复效果、技术成熟度、技术可

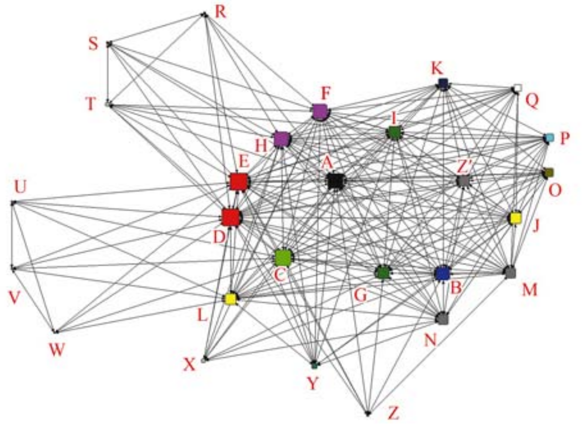


A. 健康与安全,B. 公众参与,C. 社会舆情,D. 政策相符性,E. 社会公平,F. 就业机会,G. 社区扰动,H. 文化遗产,I. 社会繁荣,J. 区域适宜性,K. 综合影响,L. 生态文化,M. 土地价值,N. 信息公开,O. 抱怨投诉,P. 土地利用,Q. 声誉形象,R. 不确定性,S. 管理完善,T. 商业环境,U. 休闲娱乐,V. 旅游功能,W. 利益方偏好,X. 教育价值,Y. 影响区域,Z. 食物供应,Z′. 社区活力

图 4 社会指标网络社群

Fig. 4 Network community diagram for social indicators

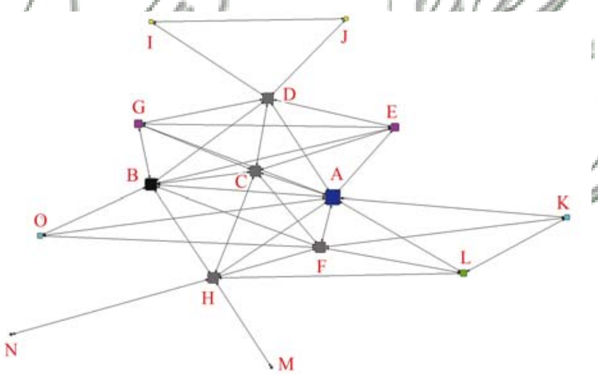
操作性、土地再利用、技术可获性、管控位置、场地适用性、管理需求和可持续性.



A. 温室气体排放，B. 地下水影响，C. 生态影响，D. 地表水影响，E. 资源消耗，F. 空气污染，G. 土壤变化，H. 废物产生，I. 能源消耗，J. 二次污染，K. 潜在风险，L. 生物多样性，M. 土地再利用，N. 土地占用面积，O. 环境风险，P. 景观影响，Q. 环境友好材料，R. 清洁土需求，S. 土壤修复量，T. 运输距离，U. 遗产影响程度，V. 遗产修复数量，W. 遗产影响数量，X. 健康风险，Y. 灾害事故，Z. 物种入侵，Z′. 再生资源消耗

图 5　环境指标网络社群

Fig. 5　Network community diagram for environmental indicators



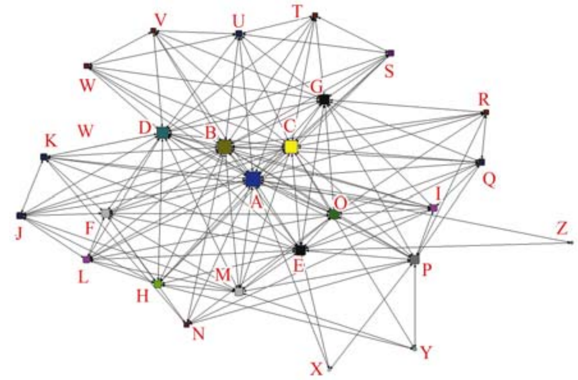
A. 管控成本，B. 经济效益，C. 效益持久性，D. 岗位创收，E. 投资吸引力，F. 土地价值，G. 修复弹性，H. 成本有效性，I. 收入损失，J. 经济负担，K. 经济补贴，L. 支付意愿，M. 经济活力，N. 形象提升，O. 间接损失

图 6　经济指标网络社群

Fig. 6　Network community diagram for economic indicators

2.1.3　指标体系构建

基于各维度下热点指标识别结果，进一步考虑：①典型场地可持续管理指标体系与框架、决策支持系统与工具（如 SuRF-UK、REC、SCORE 和 T/CAEPI 26-2020）；②2015～2030 年联合国 17 个可持续发展目标；③我国频发的污染场地社会公共事件和决策管理的社会高关注度，将社会稳定风险评估指标这一具有中国特色的风险管理概念纳入污染场地可持续风险管控指标的中国化过程；④增加生态文明建设指标实现可持续发展理论在场地风险管控的中国化延伸拓展；⑤我国现行风险管控制度与“土十条”和



A. 修复周期，B. 修复效果，C. 技术成熟度，D. 技术可操作性，E. 土地再利用，F. 技术可获性，G. 管控位置，H. 场地适用性，I. 管理需求，J. 可持续性，K. 技术简易性，L. 技术认知度，M. 技术稳定性，N. 保护措施，O. 技术支持，P. 技术可靠性，Q. 绿色材料，R. 废物产生，S. 技术安全性，T. 技术天然性，U. 技术可控性，V. 残余污染物，W. 技术经济性，X. 政策支持，Y. 运输距离，Z. 周边土地利用

图 7　技术指标网络社群

Fig. 7　Network community diagram for technical indicators

风险管控成效评估指南等政策所明确的区域指标. 综合指标易表征和量化程度的考量，以科学性与可比性、系统性与针对性、代表性与简明性和先进性与特色性这“四个统一”为指标选取原则，从环境、社会、经济和技术这 4 个方面构建既与国际水平接轨又具有鲜明中国特色的我国区域尺度场地可持续风险管控指标体系，为污染场地风险管控有效决策提供理论支撑. 如表 1 所示，共包括 4 个维度 44 个指标.

2.2　可持续风险管控指标权重

2.2.1　指标客观权重系数

根据公式（1）计算 44 个指标的中介中心性，归一化后得到各指标客观权重如表 2 所示.

2.2.2　指标主观权重系数

选取 5 名具有丰富工程项目管理经验或专业研究基础的专家发放指标影响关系调查问卷获取一级指标直接关系矩阵，取平均值并标准化后建立各影响矩阵，绘制指标因果关系，如图 8 所示. 其中，环境维度和经济维度下各指标间存在相互影响关系，社会维度及所属指标未对技术可持续性产生影响，其他各维度间均存在双向相互影响.

根据 ANP 指标网络结构模型中各维度与指标间关系，形成分别以环境指标、社会指标、经济指标和技术指标为准则的成对判断矩阵各 44、20、44 和 30 个，共计 138 个成对判断矩阵. 经验证，所有判断矩阵随机一致性比率 CR < 0.1，因此所构建判断矩阵一致性可接受，权数分配合理. 基于 DEMATEL-ANP 的污染场地风险管控可持续评价指标主观权重如表 3 所示.

表 1　污染场地可持续风险管控指标

Table 1　Sustainability indicators for contaminated site risk management and control

一级指标	二级指标	一级指标	二级指标	一级指标	二级指标	一级指标	二级指标
1　环境维度	1.1:生态恢复 1.2:空气污染 1.3:温室气体排放 1.4:土壤变化 1.5:生态影响 1.6:水体污染 1.7:资源消耗 1.8:废物产生 1.9:绿色行为 1.10:潜在风险	2　社会维度	2.1:健康与安全 2.2:社区扰动 2.3:社会舆情 2.4:公众参与 2.5:信息公开 2.6:社会公平 2.7:政策相符性 2.8:区域适宜性 2.9:就业机会 2.10:生态文化 2.11:考核指标 2.12:宣传教育	3　经济维度	3.1:管控成本 3.2:隐藏成本 3.3:土地价值 3.4:经济效益 3.5:隐藏效益 3.6:环保投资 3.7:投融资创新 3.8:不确定性	4　技术维度	4.1:修复周期 4.2:修复效果 4.3:可持续性 4.4:管控位置 4.5:技术创新 4.6:技术可获性 4.7:技术成熟度 4.8:技术可行性 4.9:技术可操作性 4.10:应急管理 4.11:名录管理 4.12:安全利用 4.13:制度建设 4.14:能力建设

表 2　可持续指标客观权重[1)]

Table 2　Objective weights of sustainability indicators

环境指标权重		社会指标权重		经济指标权重		技术指标权重	
环境维度 0.474 3	1.1:0.017 1 1.2:0.055 3 1.3:0.073 1 1.4:0.051 7 1.5:0.066 1 1.6:0.066 1 1.7:0.059 6 1.8:0.035 1 1.9:0.032 5 1.10:0.017 6	社会维度 0.215 2	2.1:0.045 7 2.2:0.016 1 2.3:0.020 7 2.4:0.025 7 2.5:0.002 6 2.6:0.017 6 2.7:0.018 5 2.8:0.007 2 2.9:0.017 1 2.10:0.007 9 2.11:0.018 0 2.12:0.018 0	经济维度 0.082 5	3.1:0.014 7 3.2:0.014 7 3.3:0.004 6 3.4:0.004 6 3.5:0.010 1 3.6:0.010 3 3.7:0.009 6 3.8:0.009 6	技术维度 0.228 0	4.1:0.036 1 4.2:0.028 6 4.3:0.005 5 4.4:0.010 1 4.5:0.016 4 4.6:0.011 8 4.7:0.027 4 4.8:0.009 9 4.9:0.021 4 4.10:0.006 3 4.11:0.006 3 4.12:0.015 6 4.13:0.016 4 4.14:0.016 4

1)指标编号与表 1 一致

表 3　可持续指标主观权重[1)]

Table 3　Subjective weights of sustainability indicators

环境指标权重		社会指标权重		经济指标权重		技术指标权重	
环境维度 0.375 5	1.1:0.032 8 1.2:0.033 6 1.3:0.033 8 1.4:0.035 1 1.5:0.034 0 1.6:0.034 0 1.7:0.031 2 1.8:0.033 0 1.9:0.039 9 1.10:0.071 9	社会维度 0.046 0	2.1:0.003 1 2.2:0.004 1 2.3:0.003 6 2.4:0.003 4 2.5:0.003 5 2.6:0.003 1 2.7:0.005 9 2.8:0.004 4 2.9:0.002 2 2.10:0.005 2 2.11:0.004 0 2.12:0.003 4	经济维度 0.345 1	3.1:0.065 5 3.2:0.028 1 3.3:0.039 4 3.4:0.036 0 3.5:0.034 7 3.6:0.051 8 3.7:0.049 0 3.8:0.040 6	技术维度 0.233 4	4.1:0.007 0 4.2:0.030 8 4.3:0.021 8 4.4:0.007 5 4.5:0.019 2 4.6:0.019 2 4.7:0.015 2 4.8:0.010 7 4.9:0.014 5 4.10:0.015 4 4.11:0.017 4 4.12:0.024 0 4.13:0.024 2 4.14:0.018 5

1)指标编号与表 1 一致

2.2.3　指标综合权重系数

结合表 2 和表 3 中主客观权重系数计算可持续风险管控一级和二级指标综合权重,以权重分支的宽度表示指标权重的大小,绘制各指标的可持续贡献率桑基图,结果如图 9 所示.

2.3　可持续风险管控关键影响因素分析

图 9 结果表明,污染场地风险管控过程中对环境、经济、技术和社会这 4 个方面的重视程度依次降低.其中,受管控过程二次污染防治政策要求的影响,各利益相关方对工程施工本身产生的环境污染问题尤为关注,因此,环境维度对污染场地风险管控可持续水平影响最大,贡献率达 38.67%.此外,经济效益和技术支持也是当前风险管控决策过程中的重点考量方面,经济因素在很大程度上决定了可行

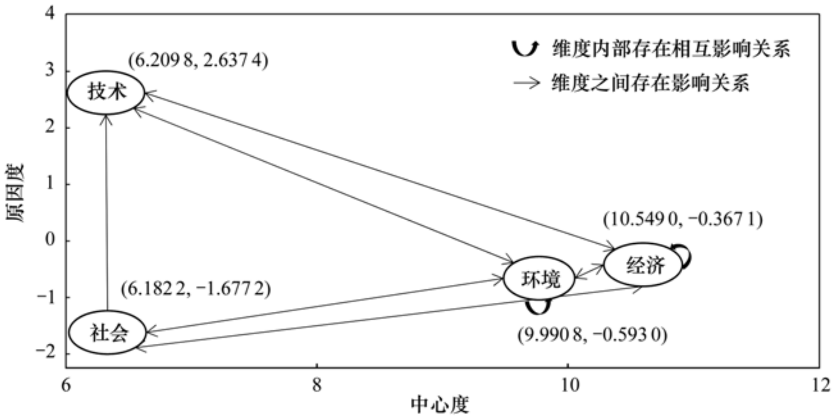


图 8　基于 DEMATEL 的指标因果关系

Fig. 8　Indicator causal diagram based on DEMATEL

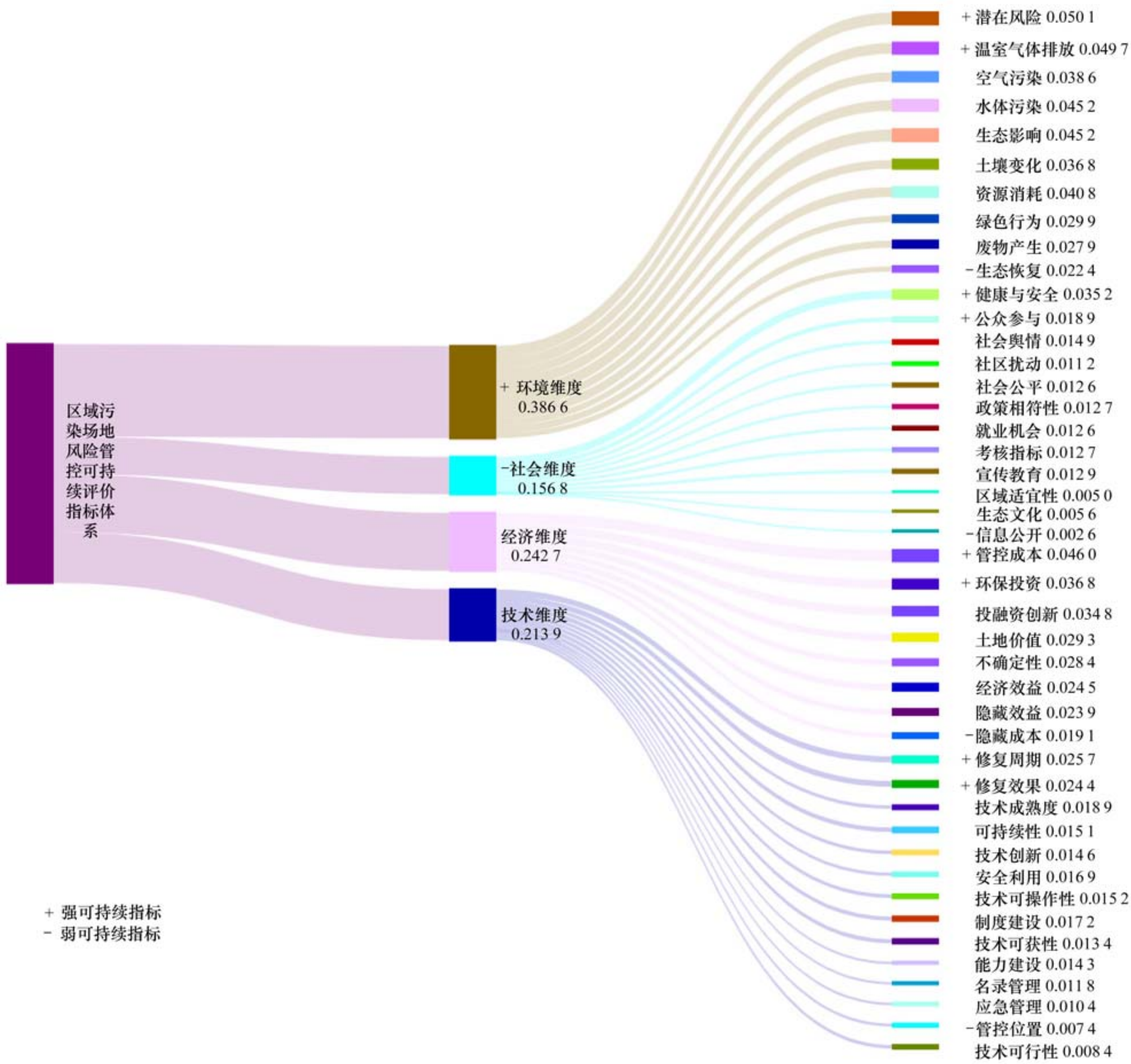


图 9　可持续评价指标综合权重

Fig. 9　Sankey diagram for overall weights of sustainability indicators

性的管控技术，而技术落实情况将直接影响管控工程的环境表征，二者对场地风险管控可持续水平的综合影响约 45.66%．与预期一致，风险管控过程中的社会影响依然没有引起管理者的足够重视，权重

较其它维度较小仅为0.156 8,包括社会舆情与公平在内的社会稳定风险管理理念被严重弱化.

(1)环境维度下,潜在风险、温室气体排放、生态影响、水体污染和资源消耗是影响污染场地风险管控可持续性的5个关键指标,对环境可持续性的影响幅度均为10.55%以上.其中潜在风险指标权重最大(0.050 1),表明污染场地风险管控的重点首先在于现存污染物的清除效果,而管控过程造成的大气、生态环境、水体和资源等负面影响对环境可持续性的驱动作用相对较弱.需要指出的是,土壤变化指标的权重系数(0.036 8)表明风险管控完成后土壤物理、化学和生物性质的改变(如土壤质量、结构、功能和渗透性等方面)已经得到重视,现有管控技术不再盲目追求污染物的彻底清除而忽视了土壤的可持续再利用功能.

(2)社会维度下,健康与安全指标以22.45%的贡献率在社会可持续中占据绝对优势(权重为0.035 2),表明风险管控期间由于实施管控措施和污染物直接暴露对场地作业人员所产生的施工安全隐患与健康风险是衡量场地风险管控社会可持续水平的核心要素.与其它指标相比,公众参与和社会舆情两个指标也表现出较强的可持续影响表征,综合权重系数分别为0.018 9和0.014 9,通过提高公众在全过程风险管控决策中的参与度,及各利益方对风险管控的接受程度和满意度等措施都能有效提高污染场地风险管控的可持续发展能力.此外,本研究进一步结合生态文明建设要求增设了考核指标,目前其在社会可持续发展中的重要性处于中上水平,考虑到北京、浙江和河北等各省市已明确提出将土壤污染防治完成情况纳入地方政府党政干部综合考评,预测该指标将持续对社会可持续水平产生明显的改善效应.而信息公开指标的影响程度最小仅为1.64%,今后场地管理工作中必须重视污染场地多元信息的多途径全面公开.

(3)经济维度下,与预期相符,管控成本是风险管控经济可持续评价的优先纳入指标,其次为环保投资、投融资创新、土地价值和不确定性指标,上述5个指标对经济可持续性的贡献率高达72.22%.其中,鼓励增加土壤污染防治建设项目投资并采用PPP模式、绿色金融、企业股票、债券发行和环境污染强制责任保险等投融资方式获取管控资金正在越来越多的场地管控实践中得到探索应用,为保障资金的充足和稳定提供了创新发展思路.经济可持续性的另一个重要方面表现在管控后场地及周边土地的增值潜力,应尽可能解除对土地再利用方式的限制.隐藏成本指标由于难以直接量化为货币形式,在实际管控过程中通常容易被忽略,如由于污染暴露导致的健康损伤和由于管控行为本身导致的生态系统服务功能下降等,因此其对经济可持续性的影响(权重为0.019 1)极其有限.

(4)技术维度下,修复周期和修复效果指标对技术可持续性的贡献率最大,均超过11.40%,这是因为管控所持续的时间及管控后风险的消除是风险管控决策的决定性因素之一.除技术可行性外,技术成熟度、技术可操作性、技术创新和技术可获性等技术性能相关指标都表现出较强的可持续影响,综合影响指数为29.09%.值得一提的是,根据区域风险管控成效评估要求所设置的名录管理、能力建设、安全利用和制度建设这4个指标的可持续影响水平位于区间5.53%~8.05%,与社会维度中的考核指标类似,其受政策驱动将具有显著改善技术可持续水平的潜力.与原位修复与管控相比,异位处置存在相对较高的二次污染风险,且治理费用高、治理周期长,因此污染土壤的原位或原位异地处置技术越来越受到关注.但管控位置较其它指标对技术可持续性的影响仍然较弱,权重为0.007 4,远低于平均水平0.015 3.

3 结论

(1)就各个维度而言,侧重二次污染的环境维度对污染场地风险管控可持续水平影响最大,而反映社会舆情与公平的社会维度在实际管控过程中还需加强认知与重视.

(2)就具体指标而言,潜在风险和温室气体排放、健康与安全和公众参与、管控成本和环保投资以及修复周期和修复效果分别是环境、社会、经济和技术这4个维度下对风险管控可持续发展具有显著驱动作用的主导要素,很大程度上决定了风险管控工程的可持续与否;而生态恢复、信息公开、隐藏成本和管控位置则是对应维度下对风险管控可持续发展影响最弱的4个指标,也是实际管控过程中需要重点改善的方面.

(3)就增设指标而言,考核指标、投融资创新、名录管理、能力建设、安全利用和制度建设等指标由于具备较强的政策敏感性,有望在今后较长一段时间内持续助力于风险管控的可持续发展.

参考文献:

[1] 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 等. 基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1123-1130.
Li P Z, Wu N J, Wang H J, *et al*. Application case of accurate site investigation with life-cycle conceptual site model development[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1123-

1130.
[2] 廖晓勇，崇忠义，阎秀兰，等. 城市工业污染场地：中国环境修复领域的新课题[J]. 环境科学，2011，**32**(3)：784-794.
Liao X Y, Chong Z Y, Yan X L, *et al*. Urban industrial contaminated sites: a new issue in the field of environmental remediation in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(3): 784-794.
[3] 谢云峰，曹云者，张大定，等. 污染场地环境风险的工程控制技术及其应用[J]. 环境工程技术学报，2012，**2**(1)：51-59.
Xie Y F, Cao Y Z, Zhang D D, *et al*. Engineering control technologies and its application in the risk management for contaminated sites[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, **2**(1): 51-59.
[4] Pizzol L, Zabeo A, Critto A, *et al*. Risk-based prioritization methodology for the classification of groundwater pollution sources[J]. Science of the Total Environment, 2015, **506-507**: 505-517.
[5] 李笑诺，陈卫平，吕斯丹. 国内外污染场地风险管控技术体系与模式研究进展[J]. 土壤学报，2022，**59**(1)：38-53.
Li X N, Chen W P, Lyu S D. Advancement in researches on technical systems and modes for risk management and control of contaminated sites at home and abroad[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, **59**(1): 38-53.
[6] ASTM. ASTM standard guide for greener cleanups[R]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2014.
[7] CL: AIRE. A framework for assessing the sustainability of soil and groundwater remediation[R]. London: Contaminated Land: Applications in Real Environments, 2010.
[8] Bardos R, Bone B, Boyle R, *et al*. The SuRF-UK indicator set for sustainable remediation assessment[R]. London: Contaminated Land: Applications in Real Environments, 2011.
[9] BS ISO 18504: 2017, Soil quality-sustainable remediation[S].
[10] ITRC. Green and sustainable remediation: a practical framework[R]. Washington: Interstate Technology & Regulatory Council, 2011.
[11] 容跃. 美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定[J]. 环境科学，2017，**38**(4)：1726-1732.
Rong Y. Brief introduction of pollution sites remediation and risk assessment and its policy making in United States[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1726-1732.
[12] 李笑诺. 利益相关者视角的污染地块管理研究：认知剖释、政策分析与可持续评价[D]. 北京：中国科学院大学，2017.
Li X N. Study on contaminated site management in the perspective of stakeholders: perception recognition, policy analysis and sustainability assessment[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
[13] 常春英，董敏刚，邓一荣，等. 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考[J]. 环境科学，2019，**40**(12)：5570-5580.
Chang C Y, Dong M G, Deng Y R, *et al*. Thoughts on and construction of a risk management and control system for contaminated sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5570-5580.
[14] 丁远昭，沈欣，曾辉，等. Triad，污染场地管理的新模式[J]. 环境科学，2011，**32**(3)：803-808.
Ding Y Z, Shen X, Zeng H, *et al*. Triad, a new approach for contaminated site management[J]. Environmental Science, 2011, **32**(3): 803-808.
[15] Anderson R, Norrman J, Back P E, *et al*. *What's the point*? The contribution of a sustainability view in contaminated site remediation[J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 103-116.
[16] Bardos R P, Thomas H F, Smith J W N, *et al*. The development and use of sustainability criteria in SuRF-UK's sustainable remediation framework[J]. Sustainability, 2018, **10**(6), doi: 10.3390/su10061781.
[17] Bardos R P, Bone B D, Boyle R, *et al*. The rationale for simple approaches for sustainability assessment and management in contaminated land practice[J]. Science of the Total Environment, 2016, **563-564**: 755-768.
[18] Burger J. A framework for increasing sustainability and reducing risk to ecological resources through integration of remediation planning and implementation[J]. Environmental Research, 2019, **172**: 586-595.
[19] Chen S S, Taylor J S, Baek K, *et al*. Sustainability likelihood of remediation options for metal-contaminated soil/sediment[J]. Chemosphere, 2017, **174**: 421-427.
[20] Hou D Y, Li G H. Green and sustainable remediation of contaminated soil in China: core elements and development direction[J]. Environmental Protection, 2016, **44**(20): 16-19.
[21] O'Connor D, Müller-Grabherr D, Hou D Y. Strengthening social-environmental management at contaminated sites to bolster green and sustainable remediation *via* a survey[J]. Chemosphere, 2019, **225**: 295-303.
[22] Da S Trentin A W, Reddy K R, Kumar G, *et al*. Quantitative assessment of life cycle sustainability (QUALICS): framework and its application to assess electrokinetic remediation[J]. Chemosphere, 2019, **230**: 92-106.
[23] Huysegoms L, Rousseau S, Cappuyns V. Friends or foes? Monetized life cycle assessment and cost-benefit analysis of the site remediation of a former gas plant[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**: 258-271.
[24] Reddy K R, Chetri J K, Kiser K. Quantitative sustainability assessment of various remediation alternatives for contaminated lake sediments: case study[J]. Sustainability: The Journal of Record, 2018, **11**(6): 307-321.
[25] Søndergaard G L, Binning P J, Bondgaard M, *et al*. Multi-criteria assessment tool for sustainability appraisal of remediation alternatives for a contaminated site[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, **18**(11): 3334-3348.
[26] Song Y N, Hou D Y, Zhang J L, *et al*. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: a case study at a mega-site in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**: 391-401.
[27] 陶欢，廖晓勇，阎秀兰，等. 应用多属性决策分析法筛选污染场地土壤修复技术[J]. 环境工程学报，2017，**11**(8)：4850-4860.
Tao H, Liao X Y, Yan X L, *et al*. Application of multiple attributes decision analysis to selection of soil remediation technologies for contaminated sites[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(8): 4850-4860.
[28] 吴敏. 工业污染场地修复技术的筛选——以福建省泉州市某工业污染场地为例[J]. 水土保持通报，2018，**38**(6)：195-199.
Wu M. Remediation technique screening on industrial soil-polluted site——a case study of industrial soil-polluted site in Quanzhou City of Fujian Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(6): 195-199.

[29] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(6): 1088-1094.
Zhang Q, Jiang D, Gu Q B, *et al*. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(6): 1088-1094.

[30] Bindu P V, Thilagam P S. Mining social networks for anomalies: methods and challenges[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, **68**: 213-229.

[31] Saaty T L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process [M]. Pittsburgh: RWS Publications, 1996.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2021 年 12 月 27 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续 20 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 5

May 15, 2022

CONTENTS