

基于熵权-TOPSIS模型的京冀灰岩矿区土壤质量评价

姚瑶, 李玉倩, 唐诗琪, 张文超, 李金波, 李周园, 宋桂龙

Entropy weight-TOPSIS model in soil quality evaluation of Beijing-Hebei limestone mining area

YAO Yao, LI Yuqian, TANG Shiqi, ZHANG Wenchao, LI Jinbo, LI Zhouyuan, and SONG Guilong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价

Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area

崔潇, 周妍如, 刘孝阳, 白中科 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 164-173

长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究

Distribution and ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of the Yangtze River Economic Belt

李丽, 杨金中, 陈栋, 于航, 邢宇, 汪洁 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 183-190

矿山水土污染与防治对策研究

A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China

张进德, 田磊, 裴圣良 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 157-163

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones

张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167-174

不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究

A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees

邓涛, 廖军, 王陈宾, 唐刚, 钱小龙, 龚洪苇 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 71-80

区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究

Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China

刘琼, 李瑞敏, 王轶, 高萌萌, 李小磊, 孙超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 173-183



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502042

姚瑶, 李玉倩, 唐诗琪, 等. 基于熵权-TOPSIS 模型的京冀灰岩矿区土壤质量评价 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 87-97.
YAO Yao, LI Yuqian, TANG Shiqi, et al. Entropy weight-TOPSIS model in soil quality evaluation of Beijing-Hebei limestone mining area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 87-97.

基于熵权-TOPSIS 模型的京冀灰岩矿区 土壤质量评价

姚瑶¹, 李玉倩², 唐诗琪¹, 张文超^{1,3}, 李金波^{1,3}, 李周园^{1,3,4}, 宋桂龙^{1,3}

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 北京市地质矿产勘查开发集团有限公司, 北京 100032; 3. 国家林业草原运动场与护坡草坪工程技术研究中心, 北京 100083; 4. 自然资源部矿山生态效应与生态修复重点实验室, 北京 100081)

摘要: 进行京冀灰岩矿区生态修复是缓解区域生态环境压力、保障生态安全、促进可持续发展的迫切需求。土壤质量是灰岩矿区生态修复的关键, 但目前对于灰岩矿区土壤质量及关键影响指标的认识仍存在不足, 亟需建立科学客观的评价体系来指导生态修复工作。研究选取北京下庄、北京文殊峪、河北玉田、河北满城 4 个典型灰岩矿区, 采集矿区平台场地未修复和修复的土壤样品, 检测了 pH、电导率、土壤养分、土壤酶活性、阳离子交换量等 11 个指标, 采用熵权-TOPSIS 模型评价京冀周边灰岩矿区土壤质量。结果表明: (1) 在未修复矿区土壤质量评价中, 碱性磷酸酶所占权重最大, 其次是阳离子交换量、脲酶、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、电导率、蔗糖酶、过氧化氢酶和 pH; 在修复矿区, 碱性磷酸酶影响最大, 其次是脲酶和蔗糖酶。(2) 矿区未修复平台场地土壤质量相对贴度为 0.123 ~ 0.644, 土壤质量总体水平相对较低; 已修复平台场地土壤质量相对贴度为 0.145 ~ 0.873, 土壤质量相较于未修复土壤有所提高, 酶活性、有效磷和速效钾含量丰富, 有机质和碱解氮总体水平偏低。(3) 4 个矿区土壤质量总体水平差异较大, 下庄矿区修复效果最好, 满城、文殊峪、玉田矿区相对较差, 土壤质量水平还需提高。针对未来灰岩矿区平台场地修复, 应该更加重视土壤酶活性相关指标, 注意施肥比例等。研究成果可为灰岩矿区生态修复实践提供指导作用。

关键词: 灰岩矿山; 矿山修复; 土壤质量评价; 熵权-TOPSIS 模型

中图分类号: TD167

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0087-11

Entropy weight-TOPSIS model in soil quality evaluation of Beijing-Hebei limestone mining area

YAO Yao¹, LI Yuqian², TANG Shiqi¹, ZHANG Wenchao^{1,3}, LI Jinbo^{1,3},
LI Zhouyuan^{1,3,4}, SONG Guilong^{1,3}

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Geo-Mineral Exploration & Development Group, Beijing 100032, China; 3. National Forestry and Grassland Administration, Engineering and Technology Research Center for Sports Field and Slope Protection Turf, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Ecological Effects and Ecological Restoration of Mines, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2025-02-15; 修订日期: 2025-03-11

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 北京市地质矿产勘查开发集团有限公司委托项目(2023HXFWCXY005)

第一作者: 姚瑶(1998—), 女, 硕士, 主要从事生态修复研究。E-mail: yaoyao98@bjfu.edu.cn

通讯作者: 宋桂龙(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事裸露坡面植被恢复、草坪科学与技术研究。E-mail: syihan@163.com

Abstract: Ecological restoration of the limestone mining areas in Beijing-Hebei is crucial for alleviating regional ecological stress, safeguarding ecological security, and promoting sustainable development. Soil quality is the key to ecological restoration in limestone mining areas. However, current understanding of soil conditions and the dominant influencing factors in these areas remains limited. This study investigated soil quality in four representative limestone mining sites: Mancheng in Hebei Province, Xiazhuang in Beijing, Wenshuyu in Beijing, and Yutian in Hebei Province. Soil samples from the platform sites of the mining areas, both un-rehabilitated and rehabilitated, were collected. Eleven indicators, including pH, electrical conductivity (EC), soil nutrients, soil enzyme activities, and cation exchange capacity, were detected. The entropy weight-TOPSIS model was adopted to evaluate the soil quality of the limestone mining areas around Beijing-Hebei. The results show that in the un-rehabilitated mining area, alkaline phosphatase has the largest weight, followed by cation exchange capacity (CEC), urease, hydrolysable nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter, EC, sucrase, catalase, and pH. In the rehabilitated mining area, alkaline phosphatase has the greatest impact, followed by urease and sucrase. The relative closeness of soil quality (C_i) in the un-rehabilitated platform site of the limestone mining area is from 0.123 to 0.644, and the overall level is relatively low. The C_i of the rehabilitated platform site was within the range of 0.145 – 0.873. Compared with the un-rehabilitated soil, the soil quality was improved. The enzyme activity, available phosphorus, and available potassium contents were abundant, while the overall levels of organic matter and hydrolysable nitrogen were relatively low, with large variation. Xiazhuang demonstrates the best restoration outcomes, whereas Mancheng, Wenshuyu, and Yutian exhibited relatively weak recovery. For the future restoration of the platform site in the limestone mining area, more attention should be paid to the relevant indicators of soil enzyme activity and the proportion of fertilization, etc. This study can provide guidance for the ecological restoration practice of limestone mining areas.

Keywords: limestone mines; mine rehabilitation; soil quality evaluation; entropy weight-TOPSIS modeling

截至 2022 年底,北京市周边各种用途的灰岩储量总计为 3.25 亿 $t^{[1]}$ 。灰岩矿产资源的开采促进了北京市周边经济发展,但是也带来了环境和土地等方面的问题,因此加强灰岩矿区的生态修复势在必行。目前,京津冀废弃矿山的生态修复工作正在加快推进。在 2022—2025 年,需完成剩余 939 hm^2 矿山生态修复治理工作^[2]。矿山生态系统是世界生态修复领域的重要对象之一,国内外都进行了大量的研究,与发达国家相比,我国在该领域研究起步较晚^[3]。张进德等^[4]依据前人研究并多方面综合考虑,将我国废弃矿山区域划分为 14 个矿山生态修复区域;彭东海^[5]的研究结果表明,适宜的修复措施可以使矿山生态在短时间内得到恢复;王晶晶^[6]研究从水源、水土保持、水质、环境 4 个方面评价了矿山生态修复效果,研究结果表明矿山生态修复任务艰巨,仍需进一步加强。目前,矿山生态修复主要聚焦生态修复理论、技术、效益、效果评价 4 个方面,我国在矿山生态修复研究中取得了很大进步,但在矿山生态修复效益方面仍然存在不足^[3]。

土壤质量是矿山生态修复的根本^[3],与植物生长息息相关,研究土壤质量对矿区生态修复有重要指导

意义^[7]。毛旭芮等^[8]的研究结果表明,矿区活动对矿区土壤质量有显著影响,进而使土壤可蚀性降低;张雅馥等^[9]的研究结果表明,矿区塌陷会增加养分在水平方向上的变异程度,而土壤修复可降低养分在水平方向上的变异程度;闫美芳等^[10]的研究结果表明,矿区植被修复会使土壤有机碳显著增加。土壤质量方面已有大量研究,但是针对不同矿区下的土壤质量改良研究仍有待深入。鉴于土壤质量是矿区生态修复的基础和关键因素^[11],准确把握灰岩矿区土壤质量水平对于实施灰岩矿区生态修复至关重要^[12],但目前对灰岩矿区土壤质量及关键限制因子的认识不足,亟需建立科学客观的评价体系。

相比前人研究中各种评价土壤质量的指标和方法,灰岩矿区特定地质条件下的土壤质量综合评价有很大差异,关键影响因素仍然知之甚少,土壤改良和土壤重构方法有待明确。多位学者在土壤质量评价方面进行研究,引入层次分析模型、熵权法、TOPSIS 法和土壤质量指数法^[13]。然而土壤质量是各种土壤因素组合的反映,不能单独用单个指标来衡量,应根据物理、化学和生物特性指标整体评价^[14]。为此,本研

究采用了熵权-TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)模型建立灰岩矿区土壤质量评价体系。

熵权法是一种由评价指标的客观数据确定指标权重的方法,能综合反映评价对象的各方面信息^[15-16]。TOPSIS 模型的主要优势在于它有效地利用了函数的上升和下降趋势^[17],直观地表达了研究对象与正、负理想解的距离。此外,模型对实验过程中的样本量、样本分布特征或指标数量没有具体要求^[18],方便使用,且功能灵活实用。采用熵权-TOPSIS 综合评价方法,对多个评价指标进行客观加权,生成综合指标,从而将多维问题转化为一维问题。这种方法允许灵活有效地构建多指标评估,产生更清晰、直接的结果,减少了评价过程中多因素的干扰,减轻了主观偏见,增强了评价客观性,提高了基于多指标决策的科学合理性^[19]。以往研究中,An 等^[20]基于 TOPSIS 法对黄土高原丘陵沙地不同土地利用类型土壤质量进行评价,刘钊等^[7]对陕北黄土高原煤矿区土壤质量进行综合评价,研究结果均证实,熵权-TOPSIS 模型可以精确地评估不同环境的土壤质量水平。

京津冀地区灰岩矿产资源丰富,但对灰岩矿区土壤质量评价的研究相对有限。以往研究强调了土壤养分在土壤质量评估中的重要性^[21],但在选择土壤质量评价指标时,作为对土壤环境变化高度敏感的指标,土壤酶活性常常被忽视。这一问题凸显了京津冀地区灰岩矿区土壤质量评价有待进一步深入研究的必要性。因此在前人研究基础上,结合《矿山植被生态修复技术规范》(DB11/T 1690—2019)^[22]、《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)^[23]、《矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范》(GB/T 43935—2024)^[24]、《土地复垦质量控制标准》(TD/T 1036—2013)^[25]、全国第二次土壤普查养分分级标准^[26],本研究选取适当指标,通过熵权-TOPSIS 模型综合客观评价方法,计算修复前后灰岩矿区平台场地评价指标的客观综合权重,确定了影响灰岩矿区平台场地土壤质量的关键指标,计算修复前后灰岩矿区平台场地土壤质量相对贴适度,精准掌握灰岩矿区平台场地土壤质量修复水平,明确了灰岩矿区平台场地未来修复方向,以期对灰岩矿区平台场地生态修复提供理论基础和实践指导。

1 研究区概况

选取京津冀周边满城、文殊峪、下庄、玉田 4 个典型露天灰岩矿区平台场地作为研究对象(图 1)。4

个矿区经多年开采,采面岩石裸露,采场周边堆积大量废渣,压覆了天然植被,造成了水土流失和地形地貌景观破坏,形成平台、渣坡、渣堆、采坑、遗留采面。针对研究区域平台场地开展了治理,4 个矿区均采用回填整平、植物配置养护技术,以覆土回填,乔灌木互植,控制区内水土流失,改善矿区受损的生态环境。

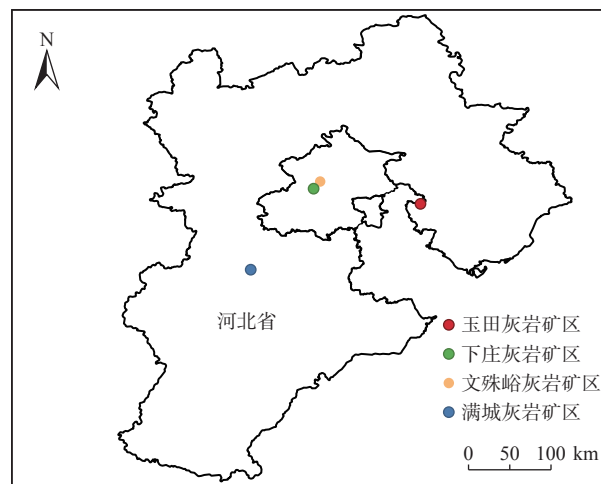


图 1 研究区分布

Fig. 1 Distribution of the study sites

研究区域属于温带大陆性季风气候,日照良好,年日照时数 2 303 h,年均气温 10~12℃,年无霜期 81~204 d,年均降水量 484.5 mm。

2 研究方法

2.1 土壤质量指标选取

灰岩矿区土壤质量评价最关键的步骤是选择适当的指标,本研究综合土壤物理、化学、生物因素,矿山生态修复标准以及土壤质量指标选取原则确定适用于灰岩矿区土壤质量评价的指标。土壤质量评价指标选取遵循以下原则^[27]: (1)科学性和整体性,指标应具有代表性,能够系统、完整地反映矿区土壤质量; (2)可行性和可操作性,考虑指标获取的可行性与可比性,易于量化。因此,本研究选取 pH、电导率 (electrical conductivity, EC)、有机质、速效钾、有效磷、碱解氮、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、阳离子交换量 (cation exchange capacity, CEC) 等指标作为灰岩矿区土壤质量评价的指标。矿山生态修复标准参考《矿山植被生态修复技术规范》(DB11/T 1690—2019)^[22]、《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)^[23]、《矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范》(GB/T 43935—2024)^[24]、《土地复垦质量控制标准》(TD/T 1036—

2013)^[25]、全国第二次土壤普查养分分级标准^[26]。

2.2 土壤采样及指标测定

于 2023 年 7 月 5—7 日,采集灰岩矿区平台场地已修复土壤样本 22 份,未修复土壤样本 30 份。每个取样点使用 5 点采样法混合采样,在采样点四角及中心用土钻在 0~30 cm 表层土壤剖面采集样品,将土样用自封袋密封混匀后带回实验室。土壤样品在室温下自然风干,剔除石块和根系等杂质,分别过 0.15, 0.25, 2.00 mm 筛后备测。风干土样利用电位法 pH 计(梅特勒 FE28-Standard)测定 pH 值(土水质量比 1.0:2.5),用电极法电导率仪(DDSJ-318)测定 EC(土水质量比 1.0:5.0),用重铬酸钾滴定法测定有机质,用微量法酶试剂盒(苏州科物技术有限公司)测定过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶,用碱解扩散法测定碱解氮,用 Olsen 法测定有效磷,用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度计(AA-6880F)测定速效钾,用分光光度计(岛津 UV2600)测定 CEC^[28]。

2.3 熵权法评价指标的熵值与权重

熵权法是一种客观赋权方法,是用于多目标决策和评价的理想尺度^[29],相应权重的指标对评价体系影响的大小,通过熵值来确定,所提供的信息量大小与指标熵的大小呈反比,与权重呈正比^[30]。熵权法计算评价指标权重具体步骤如下:

步骤一,构建原始矩阵:

假设评价指标体系包括 n 个评价对象, m 项评价指标,各项指标初始评估值为 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$),则形成原始数据决策矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} ——第 i 个样本第 j 项评价指标的值。

步骤二,原始矩阵标准化:

为了消除指标间的差异对最终评价结果产生的影响,将原始矩阵 X 做数据标准化处理,得到标准矩阵 Z :

① 正向指标

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

式中: z_{ij} ——第 i 个样本第 j 项评价指标的标准化值。

$x_j^{\min}$ ——第 j 项评价指标在所有样本中的最小值;

$x_j^{\max}$ ——第 j 项评价指标在所有样本中的最大值;

② 适度指标

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{a - x_{ij}}{\max(a - x_j^{\min}, x_j^{\max} - b)}, & x_{ij} < a \\ 1 - \frac{x_{ij} - b}{\max(a - x_j^{\min}, x_j^{\max} - b)}, & x_{ij} > b \end{cases} \quad (3)$$

式中: a, b ——最优区间。

则标准化矩阵 Z 为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

步骤三,计算第 j 项指标下第 i 个对象的值占该指标的比重 (P_{ij}):

$$P_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}, \quad (5)$$

步骤四,计算第 j 项指标熵值 (E_j):

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (6)$$

步骤五,计算第 j 项指标的差异系数 (G_j):

$$G_j = 1 - E_j \quad (7)$$

步骤六,计算第 j 项指标的权重 W_j :

$$W_j = G_j / \sum_{j=1}^m G_j \quad (8)$$

2.4 TOPSIS 法确立土壤质量评价综合指数

TOPSIS 法适用于多目标决策分析,充分发挥数据信息的客观性,避免评价数据的主观性^[31]。TOPSIS 法通过研究样本中的评价对象与正理想解、负理想解的相对距离,对评价结果进行排序^[32]。如果评价对象距离正理想解越大、负理想解越小,则评价对象排名越高,排名最高的就是最好的^[33]。具体计算步骤如下:

步骤一,计算各评价指标的权重(见 2.3 节);

步骤二,构建加权决策矩阵:

将标准化决策矩阵 $Z = \{z_{ij}\}_{n \times m}$ 与经熵权法计算后的指标权重 $W = (W_1, W_2, \dots, W_j)$ 相乘,则加权后的标准化决策矩阵 (B) 为:

$$B = W_j \cdot z_{ij}, (1 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m) \quad (9)$$

步骤三,计算各评价指标正理想解 (R_j^+) 和负理想解 (R_j^-):

$$R_j^+ = \max \{z_{ij}\} \quad (10)$$

$$R_j^- = \min\{z_{ij}\}$$

(11)

步骤四, 使用欧式距离计算评价对象与正理想解和负理想解的距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (R_j^+ - B_{ij})^2}$$

(12)

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (R_j^- - B_{ij})^2}$$

(13)

式中: D_i^+ 、 D_i^- ——与正理想解、与负理想解的距离。

步骤五, 计算土壤质量综合评价指数即相对贴近度(C_i), C_i 的值在 0~1, C_i 值越接近于 1 则表明该样本越接近最优水平, 土壤质量水平越高, 反之则样本质量越接近最劣水平:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

(14)

2.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理和统计, 运用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行数据描述性统计分析, 使用 Origin 2024 软件绘制图形。

3 结果与分析

3.1 灰岩矿区土壤养分诊断

3.1.1 灰岩矿区未修复平台场地土壤养分诊断

如表 1 所示, 未修复土壤平台场地的 pH 值整体呈弱碱性, 各矿区间 pH 值变异不大。EC 值各矿区间差距较大, 呈现中等变异性。土壤养分各指标的变异系数在 0.48~0.83, 4 项养分指标变异系数由小到大排序为有机质<碱解氮<速效钾<有效磷, 总体呈现中、高

表 1 灰岩矿区未修复平台场地土壤质量评价指标描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil quality evaluation index of un-rehabilitated platform site in the limestone mining area

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
pH	7.35	8.62	8.07	0.28	0.03
EC/(mS·cm ⁻¹)	0.06	0.40	0.10	0.06	0.59
有机质/(g·kg ⁻¹)	1.17	10.00	4.71	2.25	0.48
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	9.76	146.20	46.54	31.93	0.69
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.20	6.20	1.97	1.63	0.83
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	4.73	44.38	15.00	9.96	0.66
CEC/(mol·kg ⁻¹)	0.50	20.70	4.45	4.99	1.12
过氧化氢酶/(μmol·g ⁻¹)	121.53	499.15	310.57	97.22	0.31
碱性磷酸酶/(nmol·g ⁻¹)	0.52	967.41	167.72	226.36	1.35
脲酶/(μg·g ⁻¹)	12.45	326.71	78.83	80.56	1.02
蔗糖酶/(mg·g ⁻¹)	0.36	12.02	4.78	2.85	0.60

注: 变异系数无单位, 表2同。

变异性。根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[26], 各矿区间未修复平台场地土壤有机质、碱解氮和有效磷平均含量处于第六级水平, 速效钾处于第五级水平, 表明研究区域养分水平总体较低, 仍有很大提升空间。CEC 值各矿区间差异较大, 呈现高变异性。

酶活性方面, 4 项酶活性指标变异系数由小到大排序为过氧化氢酶<蔗糖酶<脲酶<碱性磷酸酶。过氧化氢酶、蔗糖酶表现出低、中变异性, 脲酶、碱性磷酸酶变异性较高, 变异系数分别为 1.02, 1.35。

3.1.2 已修复平台场地土壤养分诊断

如表 2 所示, 已修复平台场地土壤 pH 值整体呈弱碱性, 各矿区间土壤 pH 值变异不大。各矿区间 EC 值差距较大, 呈现中等变异性。土壤养分各指标的变异系数在 0.32~1.23, 4 项养分指标变异系数由小到大排序为速效钾<有效磷<碱解氮<有机质, 速效钾呈现低变异性, 有效磷、碱解氮、有机质呈现高变异性。根据全国第二次土壤普查养分分级标准, 各矿区间已修复平台场地土壤有机质、碱解氮平均含量处于第五级水平, 速效钾、有效磷平均含量处于第三级水平, 表明研究区有机质和碱解氮总体水平偏低, 土壤施肥结构和比例需调整。CEC 各矿区间差异较大, 呈现中等变异性。

表 2 灰岩矿区已修复平台场地土壤质量评价指标描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of soil quality evaluation index of rehabilitated platform site in the limestone mining area

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
pH	7.56	8.46	7.96	0.22	0.03
EC/(mS·cm ⁻¹)	0.07	0.21	0.12	0.03	0.29
有机质/(g·kg ⁻¹)	2.22	54.01	9.18	11.29	1.23
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	73.96	229.63	119.87	37.91	0.32
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	2.80	49.00	11.26	10.31	0.92
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	9.09	214.66	45.86	55.60	1.21
CEC/(mol·kg ⁻¹)	5.90	24.00	13.12	5.71	0.44
过氧化氢酶/(μmol·g ⁻¹)	211.41	468.24	347.70	58.86	0.17
碱性磷酸酶/(nmol·g ⁻¹)	1.47	7 509.89	1 227.83	1 847.54	1.50
脲酶/(μg·g ⁻¹)	15.76	2 156.94	264.16	436.25	1.65
蔗糖酶/(mg·g ⁻¹)	0.47	51.34	15.46	16.02	1.04

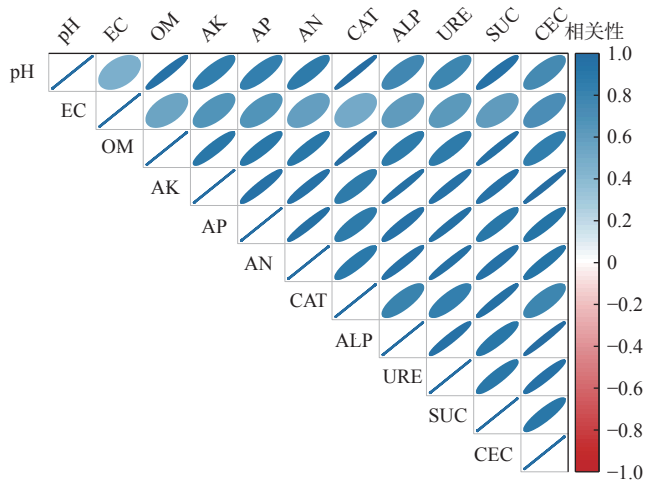
酶活性方面, 4 项酶活性指标变异系数由小到大排序为过氧化氢酶<蔗糖酶<碱性磷酸酶<脲酶(表 2)。过氧化氢酶表现出低变异性, 蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶变异性较高, 变异系数分别为 1.04, 1.15, 1.50。

3.2 土壤变量间的相关性

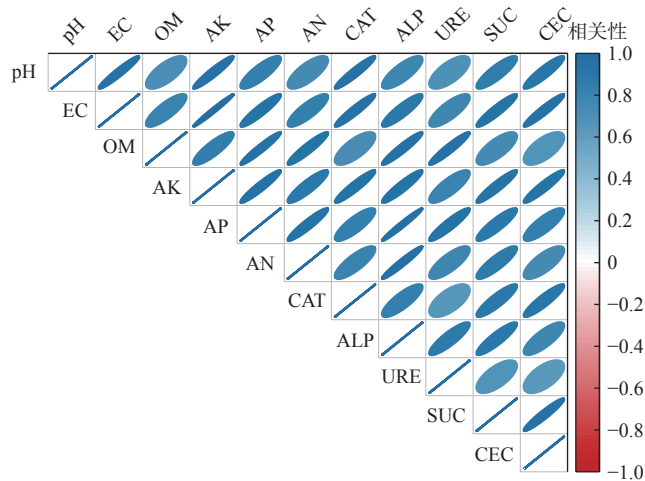
所有土壤质量评价指标之间均呈正相关, 未修复矿区土壤质量评价指标中 EC 与其他评价指标相关性

高于其他各指标间相关性, 见图 2(a)。相比之下, 如图 2(b) 所示, 已修复矿区土壤质量评价指标间的相关

性则呈现出不同的特征, 部分指标间的正相关关系得到加强, 表明修复措施有助于改善土壤组分间的协调性。



(a) 未修复土壤质量评价指标间的相关性



(b) 已修复土壤质量评价指标间的相关性

图 2 评价指标相关性矩阵

Fig. 2 Correlation matrix of indicators

注: 有机质 (organic matter, OM); 速效钾 (available potassium, AK); 有效磷 (available phosphorus, AP); 碱解氮 (hydrolysable nitrogen, AN); 过氧化氢酶 (catalase, CAT); 碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase, ALP); 脲酶 (urease, URE); 蔗糖酶 (sucrase, SUC)。下同。

3.3 土壤质量评价指标权重

3.3.1 未修复土壤评价指标权重

经熵权法计算, 灰岩矿区未修复平台场地土壤质量评价指标权重如图 3 所示。其中, 未修复平台场地土壤评价指标中碱性磷酸酶的权重最大, 说明其反映信息量最多, 其次是 CEC 和脲酶, 而 pH 权重最低, 说明其能反映的信息很有限。

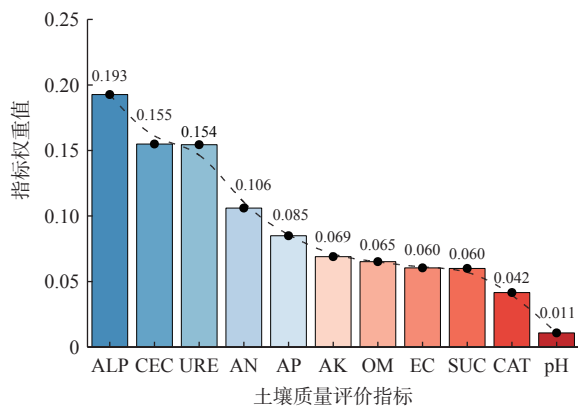


图 3 灰岩矿区未修复平台场地土壤质量评价指标权重

Fig. 3 Weight value of soil quality evaluation index of un-rehabilitated platform site in limestone mining area

3.3.2 已修复土壤评价指标权重

经熵权法计算, 灰岩矿区已修复平台场地土壤质量评价指标权重如图 4 所示。在灰岩矿区已修复平

台场地土壤评价指标中碱性磷酸酶的权重最大, 脲酶、蔗糖酶次之, 说明土壤酶活性反映的信息量最多, 而 pH 权重最低, 说明其能反映的信息很有限。

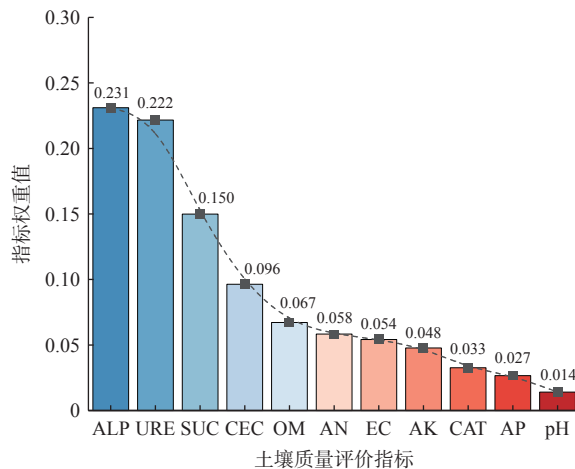


图 4 灰岩矿区已修复平台场地土壤质量评价指标权重

Fig. 4 Weight value of soil quality evaluation index of rehabilitated platform site in limestone mining area

3.4 TOPSIS 法灰岩矿区土壤质量评价

3.4.1 未修复平台场地土壤质量评价结果

如表 3、表 4 所示, 文殊峪 C_i 最高, 满城 C_i 最低。满城 C_i 分布在 0.123 ~ 0.432, 文殊峪 C_i 分布在 0.205 ~ 0.644, 下庄 C_i 分布在 0.207 ~ 0.409, 玉田 C_i 分布在 0.141 ~ 0.453。

表 3 灰岩矿区未修复平台场地土壤质量评价表
Table 3 Soil quality evaluation of un-rehabilitated platform site in the limestone mining area

取样点	D^+	D^-	C_i	排名
WSY-18	0.132	0.239	0.644	1
YT-24	0.248	0.206	0.453	2
MC-2	0.255	0.194	0.432	3
MC-1	0.263	0.196	0.427	4
XZ-11	0.258	0.179	0.409	5
WSY-17	0.243	0.142	0.369	6
YT-26	0.254	0.140	0.356	7
XZ-9	0.255	0.129	0.337	8
MC-3	0.288	0.135	0.318	9
YT-30	0.273	0.115	0.296	10
WSY-15	0.260	0.107	0.292	11
XZ-8	0.267	0.097	0.266	12
YT-22	0.293	0.106	0.266	13
YT-29	0.274	0.097	0.262	14
XZ-7	0.271	0.096	0.261	15
WSY-13	0.291	0.101	0.259	16
MC-6	0.315	0.109	0.258	17
MC-4	0.309	0.106	0.255	18
WSY-16	0.268	0.091	0.254	19
YT-19	0.287	0.095	0.249	20
XZ-10	0.295	0.097	0.247	21
YT-27	0.277	0.090	0.245	22
YT-28	0.295	0.086	0.225	23
XZ-12	0.297	0.078	0.207	24
WSY-14	0.289	0.074	0.205	25
YT-25	0.297	0.068	0.186	26
YT-23	0.315	0.057	0.153	27
YT-21	0.309	0.052	0.144	28
YT-20	0.316	0.052	0.141	29
MC-5	0.324	0.046	0.123	30

表 4 灰岩矿区未修复平台场地土壤质量综合评价指数分级区间
Table 4 Soil quality grading interval of un-rehabilitated platform site in the limestone mining area

指标	矿区			
	满城	文殊峪	下庄	玉田
C_i	0.123 ~ 0.432	0.205 ~ 0.644	0.207 ~ 0.409	0.141 ~ 0.453

3.4.2 已修复平台场地土壤质量评价结果

如表 5、表 6 所示, 下庄灰岩矿区已修复平台场地效果最好, C_i 分布在 0.198 ~ 0.873, 其他 3 个灰岩矿区修复效果相对较差。满城 C_i 分布在 0.145 ~ 0.241, 文殊峪 C_i 分布在 0.182 ~ 0.421, 玉田 C_i 分布在 0.158 ~ 0.376。

4 讨论

4.1 灰岩矿区平台场地土壤质量的影响指标分析

土壤质量是矿山生态修复的核心重点, 是植被恢

表 5 灰岩矿区已修复平台场地土壤质量评价表
Table 5 Soil quality evaluation table of rehabilitated platform site in limestone mining area

取样点	D^+	D^-	C_i	排名
XZ-9	0.054	0.369	0.873	1
WSY-13	0.273	0.198	0.421	3
YT-22	0.281	0.169	0.376	4
WSY-16	0.289	0.171	0.372	5
WSY-14	0.300	0.134	0.309	6
YT-20	0.318	0.135	0.297	7
XZ-7	0.316	0.121	0.277	8
WSY-12	0.305	0.111	0.267	9
YT-18	0.352	0.118	0.252	10
YT-21	0.343	0.114	0.249	11
MC-6	0.326	0.103	0.241	12
WSY-11	0.327	0.091	0.218	13
XZ-8	0.340	0.084	0.198	14
YT-17	0.357	0.088	0.198	15
MC-2	0.362	0.084	0.189	16
WSY-15	0.348	0.077	0.182	17
MC-4	0.336	0.073	0.179	18
MC-5	0.348	0.074	0.176	19
YT-19	0.355	0.067	0.158	20
MC-1	0.367	0.066	0.152	21
MC-3	0.368	0.062	0.145	22

表 6 灰岩矿区已修复平台场地土壤质量综合评价指数分级区间
Table 6 Soil quality grading interval of rehabilitated platform site in the limestone mining area

指标	矿区			
	满城	文殊峪	下庄	玉田
C_i	0.145 ~ 0.241	0.182 ~ 0.421	0.198 ~ 0.873	0.158 ~ 0.376

复的基础^[34]。对于灰岩矿区已修复的平台场地土壤, 碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性在评价指标中权重最高(图 4)。在灰岩矿区未修复的平台场地土壤质量评价指标中, 碱性磷酸酶的权重最高, 其次是 CEC, 脲酶(图 3)。很明显, 土壤酶活性是评价灰岩矿区平台场地土壤质量的关键指标。

灰岩土壤通常呈碱性, 这种环境有利于碱性磷酸酶等土壤酶活性的表现^[35]。碱性磷酸酶能够加速有机磷的脱磷速率, 提高土壤磷的有效性, 从而促进植被的生长和恢复^[36]。在灰岩环境中, 碱性磷酸酶等土壤酶的活性较高, 这可能与灰岩土壤的碱性特性有关^[37]。李媛媛等^[38]发现碱性磷酸酶在有机磷矿化和植物磷营养中起重要作用, 可提高土壤磷的转化, 尤其是在磷含量有限的石灰质土壤中。王跃军等^[39]发现碱性磷酸酶与植物生长呈现正相关, 可以促进植物生长, 研究结果进一步证明了碱性磷酸酶在灰岩地区植被

恢复过程中的重要作用。碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶与有机质含量高度相关,碱性磷酸酶参与土壤磷的转化,而脲酶参与氮素在尿素中的转化。贡路等^[40]在土壤质量评价研究中发现,土壤酶活性是影响土壤质量的敏感性指标。因此,在对灰岩矿区平台场地改良措施中应该注意土壤酶活性相关指标。

与土壤酶活性指标相比,除了未修复平台场地的CEC在指标权重中排名第2,其他评价指标均未排在前列(图3)。这可能是由于石灰石主要由碳酸钙组成,在这种碱性环境中,钙离子通常与土壤颗粒带负电的表面相互作用,从而影响阳离子交换^[41]。养分相关的指标权重相对较低,这可能是由于石灰岩土壤中的养分含量较低^[42],从而影响了这些指标的权重。此外,养分相关指标对土壤条件的敏感性低于土壤酶活性指标,而pH指标的权重最小。

在灰岩矿区平台场地修复的当前阶段,已往的研究主要集中在土壤养分的改善上,土壤酶活性经常被忽视,而土壤酶活性对土壤环境的变化更敏感。土壤养分含量的增加可以通过施肥来实现,但酶活性是多重因素影响的产物,可以通过调节土壤微生物和利用植物根系提高土壤酶活性。因此,灰岩矿区平台场地的恢复方法不应依赖于单一方法,而应采用综合技术,例如使用微生物制剂、植物配比等其他方法。本研究表明,土壤酶活性在灰岩矿区平台场地的恢复中起着至关重要的作用,灰岩矿区平台场地未来的恢复工作应该更加重视土壤酶活性的改善。

4.2 灰岩矿区平台场地土壤质量的影响因素

灰岩矿区未修复平台场地 C_i 的总体分布范围为0.123~0.644,各矿区土壤质量水平相对较低(表4)。原因可能是由于灰岩矿区平台场地土壤层较浅、表层土壤稀缺、含水率和养分保留能力低^[42]、酶活性差以及受到采矿活动的长期影响等。长期密集的采矿活动导致灰岩矿区平台场地的表层土壤受到严重侵蚀,使有效表土厚度降低。由于土壤深度与灰岩矿区的土壤肥力密切相关,因此采矿作业的集约化进一步导致了这些地区土壤质量的下降^[43-44]。随着采矿过程的进行,土壤中的养分和酶可能会流失,而养分和酶的流失会影响土壤的有机质、总氮和其他养分含量,导致土壤质量进一步下降。因此,应尽快通过土壤改良、土壤重建等措施对未修复矿区土壤进行修复,以提高土壤质量。

灰岩矿区已修复平台场地 C_i 在0.145~0.873,各矿区土壤质量水平差异较大(表6)。 C_i 相对较高的地

区主要集中在下庄矿区,而玉田、文殊峪和满城矿区土壤质量改善程度相对较低(表6)。下庄矿区恢复效果最好,说明该矿区土壤改良措施具有积极作用,土壤质量逐渐稳定。下庄矿区由于植物覆盖面积大,植被对土壤质量提升的效果较为显著^[45],相对于未修复矿区平台场地,土壤质量有明显的改善。文殊峪、满城和玉田矿区土壤的修复效果相对较差,可能是由于不适合的土壤改良措施或者修复后期的不同管理模式以及矿山日常活动导致土壤理化性质不稳定。在文殊峪、满城和玉田灰岩矿区平台场地应该选择适宜的土壤改良技术,或者加强修复后期平台场地的日常养护与管理,避免土壤中酶和养分流失使土壤质量水平下降。研究结果(表1、表2)表明,4个灰岩矿区的已修复土壤质量都得到了提升,酶活性及有效磷和速效钾含量提高,但是有机质和碱解氮总体水平偏低,建议未来应该对土壤施肥结构和比例进行调整。灰岩矿区平台的治理修复不应局限于单一土壤改良方法,可以综合考虑物理、化学、生物等方法,提高灰岩矿区平台场地土壤质量水平,促进植被迅速复绿。

5 结论

(1)在灰岩矿区平台场地土壤质量评价指标中,土壤酶活性权重在已修复矿区和未修复矿区均最大,表明在灰岩矿区修复中应更加重视土壤酶活性的改善。

(2)灰岩矿区未修复平台场地 C_i 为0.123~0.644,各矿区土壤质量水平相对较低,应尽快通过土壤改良、土壤重建等措施对矿区进行土壤修复,以提高土壤质量。灰岩矿区已修复平台场地 C_i 为0.145~0.873,各矿区土壤质量相较于未修复土壤有所提高,土壤酶活性提高,有效磷和速效钾含量丰富,但是有机质和碱解氮总体水平偏低。各矿区间土壤质量水平差异较大,下庄矿区的修复最为成功,而文殊峪、玉田和满城矿区的修复效果相对较差。未来应该对土壤施肥结构和比例进行调整。

(3)针对未来灰岩矿区平台场地的修复措施不应依赖于单一方法,而应采用综合技术提升土壤质量、促进植被复绿。

参考文献 (References) :

- [1] 北京市规划和自然资源委员会.截至2022年底北京市固体矿产资源储量统计表[R].北京:北京市规划和自然资源委员会,2024. [Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources. Statistics

- table of solid mineral resources reserves in Beijing as of the end of 2022[R]. Beijing: Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, 2024. (in Chinese)]
- [2] 北京市规划和自然资源委员会. 北京市规划和自然资源委员会 2023 年中央生态环境保护督察整改落实总体情况 [EB/OL]. (2024-07-30)[2025-05-04]. [Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources. The overall situation of the implementation of the 2023 central ecological and environmental protection inspection rectification by the Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources[EB/OL]. (2024-07-30)[2025-05-04]. https://ghzrzyw.beijing.gov.cn/zhengwuxinxi/gzdt/sj/202407/t20240730_3762476.html. (in Chinese)]
- [3] 蒋文翠, 杨继清, 彭尔瑞, 等. 矿山生态修复研究进展 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(4): 127 – 132. [JIANG Wencui, YANG Jiqing, PENG Errui, et al. Research progress of mine ecological restoration[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(4): 127 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张进德, 郗富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7921 – 7930. [ZHANG Jinde, XI Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7921 – 7930. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 彭东海. 紫金山金矿废弃地植被恢复过程中群落及土壤特征研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016. [PENG Donghai. Community and soil characteristic during the process of vegetation restoration in Zijinshan Gold tailing wasteland[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王晶晶. 磷矿山废弃地生态修复的生态效益评价 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014. [WANG Jingjing. The ecological benefits evaluation of ecological restoration on phosphate mine wasteland[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘钊, 韩磊, 王丹月, 等. 陕北黄土高原煤矿区土壤理化性质及质量评价 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1555 – 1564. [LIU Zhao, HAN Lei, WANG Danyue, et al. Soil physicochemical properties and quality assessment in the coal mining area of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1555 – 1564. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 毛旭芮, 王明力, 杨建军, 等. 采煤对露天煤矿土壤理化性质及可蚀性影响 [J]. 西南农业学报, 2020, 33(11): 2537 – 2544. [MAO Xurui, WANG Mingli, YANG Jianjun, et al. Effect of coal mining activities on soil properties and erodibility[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(11): 2537 – 2544. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张雅馥, 王金满, 祝宇成. 黄土区采煤塌陷对土壤全氮和有机质含量空间变异性的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1676 – 1684. [ZHANG Yafu, WANG Jinman, ZHU Yucheng. Effects of land subsidence caused by coal mining on the spatial variation of soil total nitrogen and organic matter concentrations in loess area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1676 – 1684. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 闫美芳, 王璐, 郝存忠, 等. 煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应 [J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1838 – 1845. [YAN Meifang, WANG Lu, HAO Cunzhong, et al. Effects of ecological restoration on soil organic carbon in post-mining lands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1838 – 1845. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张绍良, 米家鑫, 侯湖平, 等. 矿山生态恢复研究进展——基于连续三届的世界生态恢复大会报告 [J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5611 – 5619. [ZHANG Shaoliang, MI Jiaxin, HOU Huping, et al. Progress in mine ecological restoration research-report based on three consecutive world congresses on ecological restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5611 – 5619. (in Chinese with English abstract)]
- [12] LIU Xiaoyang, BAI Zhongke, ZHOU Wei, et al. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 228 – 239.
- [13] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043 – 3056. [LI Xin, ZHANG WenJu, WU Lei, et al. Advance in Indicator Screening and Methodologies of Soil Quality Evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043 – 3056. (in Chinese with English abstract)]
- [14] MUÑOZ-ROJAS M. Soil quality indicators: Critical tools in ecosystem restoration[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5: 47 – 52.

- [15] DING Xiaowen, CHONG Xiao, BAO Zhengfeng, et al. Fuzzy comprehensive assessment method based on the entropy weight method and its application in the water environmental safety evaluation of the Heshangshan drinking water source area, three gorges reservoir area, China[J]. *Water*, 2017, 9(5): 329.
- [16] TAHERIYOUN M, KARAMOUZ M, BAGHVAND A. Development of an entropy-based fuzzy eutrophication index for reservoir water quality evaluation[J]. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2010, 7: 1 – 14.
- [17] BEHZADIAN M, KHANMOHAMMADI OTAGHSARA S, YAZDANI M, et al. A state-of the-art survey of TOPSIS applications[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(17): 13051 – 13069.
- [18] 杜挺, 谢贤健, 梁海艳, 等. 基于熵权 TOPSIS 和 GIS 的重庆市县域经济综合评价及空间分析 [J]. *经济地理*, 2014, 34(6): 40 – 47. [DU Ting, XIE Xianjian, LIANG Haiyan, et al. County economy comprehensive evaluation and spatial analysis in Chongqing city based on entropy Weight-TOPSIS and GIS[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(6): 40 – 47. (in Chinese with English abstract)]
- [19] HUANG Jingwen. Combining entropy weight and TOPSIS method for information system selection[C]//2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems. Piscataway: IEEE, 2008: 1965 – 1968.
- [20] AN Yida, ZHANG Lei, WANG Qing, et al. Soil quality assessment of different land use types based on TOPSIS method in hilly sandy area of loess plateau, northern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(24): 17059.
- [21] MAURYA S, ABRAHAM J S, SOMASUNDARAM S, et al. Indicators for assessment of soil quality: A mini-review[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(9): 604.
- [22] 北京市市场监督管理局. 矿山植被生态修复技术规范: DB11/T 1690—2019[S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2019. [Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Technical regulations for revegetation of mines: DB11/T 1690—2019[S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration, 2019. (in Chinese)]
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤: CJ/T 340—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Planting soil for greening: CJ/T 340—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)]
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范: GB/T 43935—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. [State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Technical specification for monitoring and evaluation of land reclamation and ecological restoration in mines: GB/T 43935—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024. (in Chinese)]
- [25] 中华人民共和国国土资源部. 土地复垦质量控制标准: TD/T 1036—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Completion standards on land reclamation quality: TD/T 1036—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)]
- [26] 杨建宇, 欧聪, 李琪, 等. 基于云模型的耕地土壤养分模糊综合评价 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 251 – 257. [YANG Jianyu, OU Cong, LI Qi, et al. Fuzzy synthetic evaluation of soil nutrients in cultivated land based on cloud model in Da'an City, Jilin Province[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 251 – 257. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 吴玉红, 李云, 郝兴顺, 等. 土壤质量评价国内外研究进展 [J]. *安徽农学通报*, 2012, 18(16): 24 – 25. [WU Yuhong, LI Yun, HAO Xingshun, et al. Research progress of soil quality evaluation[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2012, 18(16): 24 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1-30. [LU Rukun. Methods for agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 1 – 30. (in Chinese)]
- [29] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等. 水资源承载力理论基础探析: 定义内涵与科学问题 [J]. *水利学报*, 2017, 48(12): 1399 – 1409. [WANG Jianhua, JIANG Dachuan, XIAO Weihua, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(12): 1399 – 1409. (in Chinese with English abstract)]
- [30] KYUNG D, KIM D, KIM G, et al. Vertical load-carrying behavior and design models for micropiles considering

- foundation configuration conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(2): 234 – 247.
- [31] KUO Ting. A modified TOPSIS with a different ranking index[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 260(1): 152 – 160.
- [32] BAUWE A, TIEDEMANN S, KAHLE P, et al. Does the temporal resolution of precipitation input influence the simulated hydrological components employing the SWAT model?[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(5): 997 – 1007.
- [33] WANG Lihong, DONG Manpei. An entropy Weight-TOPSIS based method for e-commerce logistics service quality evaluation[J]. *Tehnicki Vjesnik*, 2023, 30(4): 1253 – 1256.
- [34] BRUNO ROCHA MARTINS W, DOUGLAS ROQUE LIMA M, DE OLIVEIRA BARROS JUNIOR U, et al. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 145: 105707.
- [35] LU Peng, ZHANG Yamei, JI Bingjie, et al. PhoD harboring microbial community and alkaline phosphatase as affected by long term fertilization regimes on a calcareous soil[J]. *Agronomy*, 2023, 13(2): 363.
- [36] KHADEM A, RAIESI F. Response of soil alkaline phosphatase to biochar amendments: Changes in kinetic and thermodynamic characteristics[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 44 – 54.
- [37] ERKOÇAK A, DENGİZ O. Phosphatase enzyme activity in different soils formed on bazaltic parent material under semi humid climate conditions[J]. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 2019, 3(1): 22 – 28.
- [38] 李媛媛,周运超,邹军. 黔中石灰岩地区灌木林土壤酶活性及其与植物多样性间相关性的研究 [J]. 江苏林业科技, 2014, 41(2): 11 – 15. [LI Yuanyuan, ZHOU Yunchao, ZOU Jun. Activities of soil enzyme and their correlation with plant species diversity in typical shrubbery in the limestone area of Central Guizhou[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2014, 41(2): 11 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 何跃军,刘锦春,钟章成,等. 重庆石灰岩地区植被恢复过程土壤酶活性与植物多样性的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 139 – 143. [HE Yuejun, LIU Jinchun, ZHONG Zhangcheng, et al. Correlation between soil enzyme activities and biodiversity during the recovery process of vegetation in a limestone area[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, 30(4): 139 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 贡璐,张雪妮,冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价 [J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 682 – 689. [GONG Lu, ZHANG Xueni, RAN Qiyang. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim river based on minimum data set[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 682 – 689. (in Chinese with English abstract)]
- [41] NORTON L D, ZHANG X J. Liming to improve chemical and physical properties of soil[M]//WALLACE A, Terry R E. Handbook of Soil Conditioners: Substances that enhance the physical properties of soil. Boca Raton: CRC Press, 1998: 309 – 331.
- [42] COHEN-FERNÁNDEZ A C, ANNE N M, WILKINSON S R. Anthroposol development from limestone quarry substrates[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(5): 555 – 566.
- [43] HINDERSAH R, MAULUDY N M, SUMBADA R A R, et al. Soil properties of overburden and topsoil in limestone mining area: A preliminary study[J]. *Journal of Degraded & Mining Lands Management*, 2024, 12(1): 6705 – 6713.
- [44] CHENOT J, JAUNATRE R, BUISSON E, et al. Impact of quarry exploitation and disuse on pedogenesis[J]. *Catena*, 2018, 160: 354 – 365.
- [45] WAN Renping, LUO Deyi, LIU Jianyi, et al. Superior improvement on soil quality by Pennisetum sinense vegetation restoration in the dry-hot valley region, SW China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 878: 163185.

编辑: 宗 爽