

# 基于熵权-VIKOR 法的重构土壤配比筛选研究\*

徐万茹<sup>1,2</sup>, 汪天宇<sup>1,2</sup>, 刘衡秋<sup>1,2</sup>, 秦绪明<sup>1,2</sup>, 刘一帆<sup>1,2</sup>, 周继强<sup>2,3</sup>, 冯永林<sup>2,3</sup>

(1. 美丽华夏生态环境科技有限公司, 北京 100176;

2. 自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 甘肃 兰州 730030;

3. 甘肃有色工程勘察设计院有限公司, 甘肃 兰州 730031)

**摘要:**土地复垦对于矿区植被恢复至关重要, 重构土壤能够有效解决表土资源稀缺问题。针对某矿区排土场存在的土壤贫瘠及大量矸石难以实现资源化利用的难题, 通过将煤矸石生态骨料与表层土按照不同的比例进行混合, 制备5种重构土壤, 测定其pH及有机质、全氮、有效磷、速效钾含量, 分析煤矸石生态骨料占比对各指标的影响, 并基于熵权-  
VIKOR评价法筛选出最优配比。研究表明: 随着煤矸石生态骨料占比的提高, 不同配比的重构土壤pH逐渐降低并接近于中性; 煤矸石生态骨料占比对有机质、全氮、速效钾含量的影响显著, 对有效磷含量的影响不显著, 且随着煤矸石生态骨料占比的提高, 不同配比的重构土壤有机质、全氮、速效钾含量均呈下降趋势, 有效磷含量呈先上升后下降的趋势; 30%煤矸石生态骨料+70%表层土为最优配比。研究成果可为解决矿区排土场土壤贫瘠、表层土稀缺、土地复垦难开展等问题提供新思路。

**关键词:**煤矸石生态骨料; 表层土; 重构土壤; 熵权-  
VIKOR

**中图分类号:**TD88 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)03-0159-05

## 0 引言

西北矿区是我国重要的煤炭能源供给基地, 高强度的开采使得该区域的煤矸石大量堆积形成煤矸石山<sup>[1]</sup>。煤矸石山不仅占地面积大, 还会造成自燃、爆炸、土壤侵蚀、地下水污染等问题, 进一步加剧西北地区的水土流失和生态功能退化, 使得该地区生态系统变得愈发脆弱<sup>[2-5]</sup>。根据已有的研究, 植被恢复是矿区生态环境改善的重要措施, 然而采矿区周边土壤贫瘠, 缺乏适宜植物生长的土壤<sup>[6-7]</sup>。在矿区进行土地复垦能够创造出适合植物正常生长发育的土壤条件, 但采用客土覆盖会造成其他地区的植被

生长困难、水土流失严重等问题<sup>[8]</sup>。煤矸石作为一种岩石碎屑物, 其组成与土壤相似, 并含有植物生长所需要的营养元素, 是一种可进行转化利用的资源<sup>[4]</sup>, 同时也存在颗粒尺寸较大、毛细孔隙率极低、保水性较差等缺点, 难以直接种植植被<sup>[9]</sup>。但煤矸石的酸碱性及其含有的多种微量元素和养分, 具有调节土壤物理结构和化学性质的潜质, 可作为添加剂或基质组成物来栽培植物<sup>[10-11]</sup>。

现有的煤矸石与表层土混合基质的评价筛选方法主要采用主成分分析法(PCA)、模糊综合评价法和灰色关联度分析等。秦琪焜等<sup>[12]</sup>将煤矸石与城市污泥混合并应用于沙土, 模拟改良后的土壤, 采用主成分分析法评价植生基质的土壤质量, 为高效消纳煤矸石提供实践依据。王鹏建<sup>[13]</sup>以显德旺矿区常用的几种煤矸石作为研究对象, 根据模糊综合评价法计算出不同煤矸石方案的优先度并进行排序, 选出综合效益最优的煤矸石利用方案。张艳秋<sup>[14]</sup>在矿区土地复垦利用模式和生物改良的效果评价中, 采用灰色关联度分析, 对牧草的产量、品质及土壤养分进行综合评价, 筛选出优质牧草, 为采煤塌陷区土壤改良提供了理论依据。尹文影<sup>[15]</sup>采用混合VIKOR(多准则妥协解排序)评价指标体系中具有不同类型的指标数据, 由于土地复垦利用评价指标的选取具有复杂性和混合性等问题, 各准则的评价值不能完全用精确的数值表示。

基于以上研究, 针对某矿区排土场存在的土壤贫瘠及大量矸石难以实现资源化利用的难题, 以矿区煤矸石及表层土为研究对象, 将煤矸石进行预处

\* 收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心开放基金项目(HHGCKK2207)。

作者简介: 徐万茹(1996—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为水工环地质、矿山生态修复, E-mail: xuwanru0101@163.com。

通信作者: 刘衡秋(1975—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、矿山环境综合治理等研究, E-mail: liuhengqiu@bceet.com。

理后制成煤矸石生态骨料,与表层土按照一定的比例进行混合,制成具有煤矸石生态骨料与表层土不同配比的重构土壤。通过测定各重构土壤的 pH 及能够反映土壤肥力的土壤养分指标,讨论并分析各指标的变化趋势及煤矸石生态骨料占比是否对重构土壤的 pH、土壤肥力产生影响。同时基于熵权-VIKOR 评价模型对不同配比的重构土壤处理进行折中排序,通过筛选评价指标,形成重构土壤的土壤质量评价体系,筛选出最优的煤矸石生态骨料与表层土的混合比例,以期解决矿区表层土稀缺、排土场土壤贫瘠、煤矸石固废大宗利用的难题,以及为矿区排土场土壤修复、矸石山治理提供理论参考。

1 试验材料与方法

研究区位于山西省吕梁市,该地区属于暖温带大陆性季风气候,具有四季分明、雨热同步、光照充足等特点。年平均降雨量约为 470 mm,季节分配不均,主要集中于 7~9 月,年际变化较大。土壤以灰褐土为主,河谷地带为灰褐土,西部山区为山地灰褐土及棕壤。实地调查表明:降雨量较少、土壤贫瘠、表层土过薄是该地区开展矿区土地复垦等生态修复工作的主要限制因素。

1.1 试验材料

试验材料采自研究矿区,包括表层土(Top Soil, TS)和煤矸石生态骨料(Coal Gangue Ecological Aggregate, CGEA)。表层土取样厚度为 0~20 cm。

煤矸石经过破碎、分选后,将粒径(热值不超过 1000 kcal/kg)、成分符合要求的煤矸石直接放入自蔓延低温脱碳设备(表观炉温不超过 870 ℃)。通过调配风量、风压和温度,将煤矸石中的碳和硫缓慢排除,制得孔隙率、烧失量和物相合适的粗品。粗品物料经过冷却后进入破碎研磨设备,通过粒级控制制得适用于土地复垦的无机煤矸石生态骨料。煤矸石生态骨料处理的工艺流程如图 1 所示。

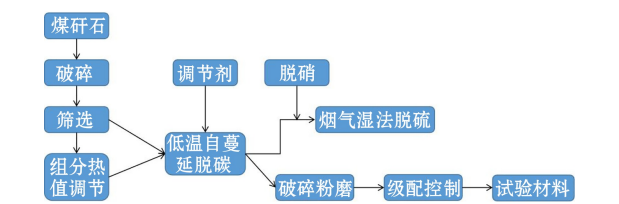


图 1 煤矸石生态骨料处理工艺流程

1.2 试验设计

本试验共设计 5 种处理方案,通过将煤矸石生态骨料与表层土按照一定的比例进行混合,形成具有煤矸石生态骨料与表层土不同配比的重构土壤,具体处理方案见表 1。将煤矸石生态骨料与表层土按照对应的比例混合均匀后,5 个处理方案中分别取等量的样品测定其理化性质,包括 pH、有机质含量、全氮含量、有效磷含量、速效钾含量 5 个指标。

| 表 1 不同配比的重构土壤处理方案 |         |       | % |
|-------------------|---------|-------|---|
| 方案                | CGEA 含量 | TS 含量 |   |
| X1                | 0       | 100   |   |
| X2                | 30      | 70    |   |
| X3                | 50      | 50    |   |
| X4                | 70      | 30    |   |
| X5                | 100     | 0     |   |

1.3 评价方法

土壤质量是指土壤的多种性质(物理性质、化学性质和生物学性质等)的综合反映,而土壤肥力是土壤质量的本质属性,是土壤质量的核心基础,是评价土壤好坏的最重要指标之一<sup>[16-17]</sup>。土壤肥力包括全效成分和速效成分,全效成分能够大致反映出土壤的肥力特征,速效养分能够对植物的短期生长产生更大的影响。研究表明,在进行煤矸石基质优化配比方案选择时,速效成分指标与全效指标反映的趋势大致是一致的<sup>[2,4]</sup>。基于此,选取了 4 个直接反映土壤肥力的土壤养分指标,即有机质、总氮、有效磷和速效钾来进行土壤质量的评价。采用熵权法(Entropy Weight Method, EWM)计算土壤养分指标的权重,确保结果的客观性和准确性,运用多准则妥协解排序(Vlsekrijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR)对选取的 4 个养分指标进行综合评价,实现不同配比的重构土壤质量的折中排序,以最终的 Q 值来比较不同处理方案的土壤质量,进而筛选出能够用于矿区排土场修复的煤矸石生态骨料与表层土的最优配比。

VIKOR 评价法是一种多属性决策方法,同时考虑了最大化群体效益和最小化个体遗憾,使得到的最优方案最接近理想方案<sup>[15]</sup>,步骤如下。

(1) 根据属性将指标分为正向型指标和逆向型指标,对原始数据进行标准化处理,采用熵权法计算各指标的权重。

(2) 计算正负理想解。正负理想解分别是标准化矩阵中每列的最大值和最小值。

(3) 计算群体效益值和个体遗憾值。

$$S = \sum_{j=1}^m w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \tag{1}$$

$$R = \max_{1 \leq j \leq m} w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \tag{2}$$

式中, $S$  和  $R$  分别为群体效益值和个体遗憾值; $f_{ij}$  为第  $i$  个备选方案的第  $j$  个决策指标值; $f_j^+$  和  $f_j^-$  分别为正理想解和负理想解; $w_j$  为熵权法计算的指标权重。

(4) 计算  $Q$  值。

$$Q = v \left( \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right) + (1 - v) \left( \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right) \tag{3}$$

式中, $Q$  为利益比率值; $S^+$ 、 $S^-$  分别为方案的群体最大、最小效益值; $R^+$ 、 $R^-$  分别为方案的个体最大、最小遗憾值; $v$  为决策机制系数。当  $v > 0.5$  时,采用最大化群体效益决策机制,即根据全部养分指标的情况进行评价;当  $v < 0.5$  时,采用最小化个体遗憾值决策机制,即根据某一养分指标的情况进行评价;当  $v = 0.5$  时,采用最大化群体效益和最小化个体遗憾的折中决策,既注重方案的全体养分指标,又考虑某一养分指标。

1.4 数据处理

采用方差分析以及 Duncan 组间多重比较进行显著性分析( $P < 0.05$  时显著; $P < 0.01$  时极显著),使用 SPSS27、Origin 软件进行数据统计和绘图。

2 结果与分析

2.1 理化性质

煤矸石生态骨料与表层土的基本性质见表 2。由表 2 可知,煤矸石生态骨料的有机质含量、含氮含量、速效磷含量和速效钾含量等养分指标均低于表层土,只有 pH 优于表层土,属于弱碱性。

表 2 煤矸石生态骨料与表层土的基本理化性质

| 类型      | pH        | 有机质/<br>(g/kg) | 全氮/<br>(g/kg) | 有效磷/<br>(mg/kg) | 速效钾/<br>(mg/kg) |
|---------|-----------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 煤矸石生态骨料 | 7.78±0.04 | 0.89±0.27      | 0.05±0.02     | 15.93±0.73      | 84.20±0.57      |
| 表层土     | 8.29±0.08 | 6.21±0.32      | 0.41±0.02     | 17.00±0.43      | 120.67±4.92     |

2.2 pH 变化

煤矸石生态骨料与表层土不同配比处理的 pH 变化如图 2 所示。由图 2 可知,随着煤矸石生态骨

料占比的增高,不同配比处理下土壤的 pH 逐渐下降并接近于中性。X2、X3 与 X4 处理方案的土壤 pH 无显著差异,X1 处理方案的土壤 pH 最高,为 8.29,X5 处理方案的土壤 pH 最低,为 7.78。

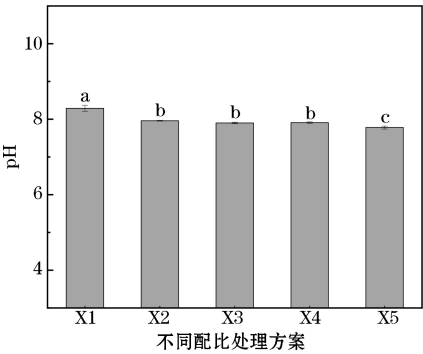


图 2 不同配比处理方案下重构土壤的 pH

2.3 土壤肥力分析

煤矸石生态骨料与表层土不同配比处理的土壤养分含量变化如图 3 所示。将煤矸石生态骨料与表层土按照不同的比例混合,形成重构土壤。通过测定各处理方案下土壤的养分含量,分析在不同的配比处理下,各养分指标的变化趋势及煤矸石生态骨料占比对养分指标的影响。由图 3(a)可知,随着煤矸石生态骨料占比的提高,重构土壤的有机质含量整体呈下降趋势,X5 处理方案的土壤有机质含量最低,为 0.89 g/kg;X2、X3 与 X4 处理方案的土壤有机质含量无显著差异,有机质含量在 0.8~6.5 g/kg 之间。由图 3(b)可知,随着煤矸石生态骨料占比的增加,不同配比处理下的土壤全氮含量呈下降趋势,X5 处理方案的土壤全氮含量最低,为 0.05 g/kg,X1 处理方案的土壤全氮含量是 X5 处理方案的 7.63 倍,各处理方案下土壤的全氮含量在 0.05~0.5 g/kg 之间。由图 3(c)可知,随着煤矸石生态骨料占比的增加,不同配比处理的重构土壤有效磷含量呈先上升后下降的趋势,X2 处理方案的土壤有效磷含量最高,为 18.37 mg/kg;各处理的土壤有效磷含量在 15~19 mg/kg 之间,不同配比处理方案下土壤的有效磷含量无显著差异。由图 3(d)可知,随着煤矸石生态骨料占比的增加,不同配比处理的土壤速效钾含量呈逐渐下降的趋势,X1 处理方案的土壤速效钾含量约为 X5 处理方案的 1.43 倍,各处理方案下土壤速效钾含量在 84~121 mg/kg 之间,且具有显著差异。

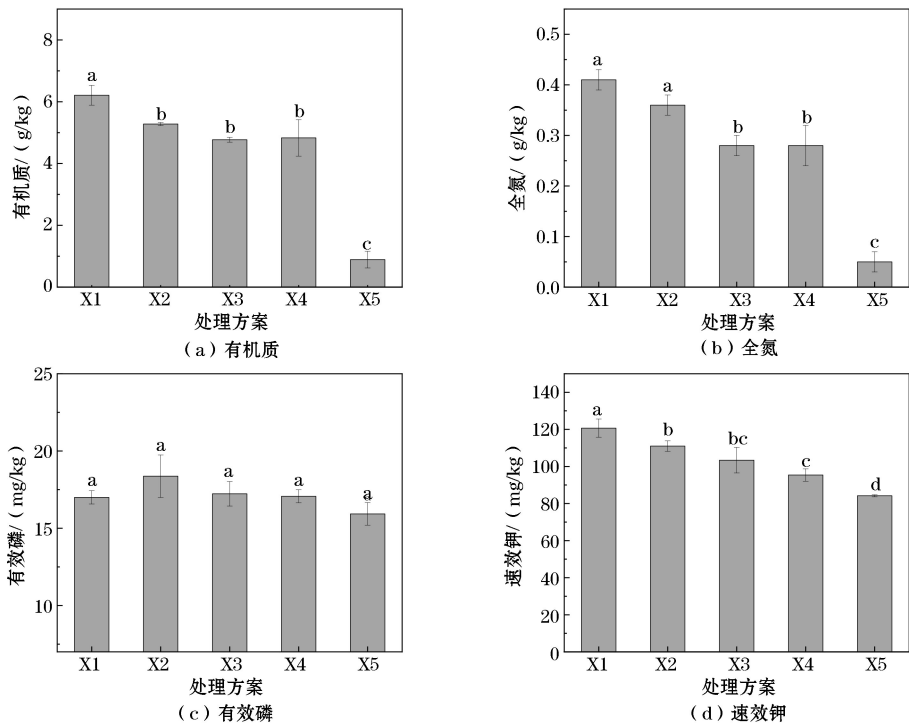


图3 各处理方案的土壤养分含量变化

2.4 熵权-VIKOR 评价及分析

根据 VIKOR 的指标选取规则,共选取有机质、全氮、有效磷、速效钾 4 个正向指标进行评价。采用熵权法计算各项指标的权重,结果见表 3。由表 3 可知,有机质的权重为 21.8%、全氮的权重为 22.6%、有效磷的权重为 26.9%、速效钾的权重为 28.7%,其中速效钾权重最大,有机质权重最小。

表 3 各项指标权重计算

| 指标  | 信息熵值  | 信息效用值 | 权重 $w/\%$ |
|-----|-------|-------|-----------|
| 有机质 | 0.856 | 0.144 | 21.8      |
| 全氮  | 0.85  | 0.15  | 22.6      |
| 有效磷 | 0.822 | 0.178 | 26.9      |
| 速效钾 | 0.81  | 0.19  | 28.7      |

根据式(1)和式(2)计算群体效益值  $S$  和个体遗憾值  $R$ ,其中群体最大效益值  $S^+$  为 0.146、群体最小效益值  $S^-$  为 1,个体最大遗憾值  $R^+$  为 0.076、个体最小遗憾值  $R^-$  为 0.287。

在得到  $S$  与  $R$  的计算结果后,根据式(3)计算决策指标  $Q$ ,其中  $v$  取 0.5,即同时考虑最大化群体效益和最小化个体遗憾,计算结果及方案排序见表 4。按照 VIKOR 评价方法的准则, $Q$  值越小代表对应的方案越优。因此,煤矸石生态骨料与表层土不同配比处理下,X2 处理方案的利益比率

值  $Q$  为 0,为最优处理,即 30%CGEA+70%TS 为最优配比。

表 4 VIKOR 计算结果

| 方案 | 群体效益值<br>$S$ | 个体遗憾值<br>$R$ | 利益比率值<br>$Q$ | 排序 |
|----|--------------|--------------|--------------|----|
| X1 | 0.151        | 0.151        | 0.181        | 2  |
| X2 | 0.146        | 0.076        | 0            | 1  |
| X3 | 0.399        | 0.136        | 0.290        | 3  |
| X4 | 0.480        | 0.199        | 0.487        | 4  |
| X5 | 1            | 0.287        | 1            | 5  |

3 结论

通过对煤矸石生态骨料与表层土不同配比处理的重构土壤进行 pH、土壤养分指标的测定,并基于熵权-VIKOR 开展配比筛选评价,得出以下结论。

(1) 通过测量煤矸石生态骨料与表层土不同配比处理下重构土壤的 pH 变化得出,随着煤矸石生态骨料占比的提高,pH 逐渐降低并接近于中性。因此,将煤矸石生态骨料与表层土混合后,能够适当缓解当地土壤的碱质地。

(2) 通过测定各处理方案下重构土壤的有机质、全氮、有效磷、速效钾等土壤养分指标,得出煤矸石生态骨料的占比对有机质、全氮、速效钾含量的影响显著,对有效磷含量的影响不明显。并且随着煤

矸石生态骨料占比的提高,重构土壤的有机质含量、全氮含量、速效钾含量整体呈下降趋势,有效磷含量呈先上升后下降的趋势。

(3) 通过熵权-VIKOR 评价法计算得出,有机质权重为 21.8%、全氮的权重为 22.6%、有效磷的权重为 26.9%、速效钾的权重为 28.7%。通过对 4 个土壤养分指标进行综合评价,得到不同配比处理重构土壤的土壤质量综合排序,其中,X2 处理方案的 Q 值最小,即筛选出 30%煤矸石生态骨料+70%表层土为最优配比。

(4) 筛选出的最优重构土壤可以为煤矸石等大宗固废资源化利用提供新的利用途径,也可以一定程度上解决矿区排土场土壤贫瘠、植被难以生长等土地复垦难题。

参考文献(References):

[1] 赵廷宁,张玉秀,曹兵,等.西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术[J].水土保持学报,2018,32(1):1-5.

[2] 武海霞,郭爱科,陶涛,等.煤矸石栽培基质在农业中资源化利用研究现状[J].北方园艺,2021(23):134-141.

[3] 李振,雪佳,朱张磊,等.煤矸石综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(6):165-178.

[4] 柯凯恩,董晓芸,周金星,等.煤矸石生态基质的制备配方及其肥力特征研究[J].中国土壤与肥料,2021(4):308-317.

[5] 李建明,王文龙,王贞,等.神府煤田废弃堆积体新增水土流失研究[J].自然灾害学报,2014,23(2):239-249.

[6] ZHANG L, WANG J M, BAI Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area[J].Catena,2015,128:44-53.

[7] 范秋运,张超英,耿玉清,等.添加粉煤灰对煤矸石基质性质和植物生长的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(5):85-92.

[8] 杨鑫光,李希来,王克宙,等.煤矸石山生态恢复的主要路径[J].生态学报,2022,42(19):7740-7751.

[9] JABŮŇSKA B, KITYK A V, BUSCH M, et al. The structural and surface properties of natural and modified coal gangue[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 190:80-90.

[10] 赵昱,刘喆,刘佳欣,等.煤矸石制备环境功能材料的研究进展[J].化学通报,2022,85(9):1090-1095.

[11] 武琳,郑永红,张治国,等.粉煤灰用作土壤改良剂的养分和污染风险评价[J].环境科学与技术,2020,43(9):219-227.

[12] 秦琪焜,方健梅,王根柱,等.煤矸石与城市污泥混合制备植生基质的试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):304-314.

[13] 王鹏建.基于模糊综合评价法的显德旺矿区煤矸石利用方案的研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.

[14] 张艳秋.采煤塌陷区优质牧草筛选及土壤改良效果[D].晋中:山西农业大学,2019.

[15] 尹文影.基于混合 VIKOR 方法的露天矿土地复垦利用方向评价[D].徐州:中国矿业大学,2017.

[16] 陈欢,曹承富,张存岭,等.基于主成分-聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J].土壤学报,2014,51(3):609-617.

[17] 张长森.煤矸石资源化综合利用新技术[M].北京:化学工业出版社,2008.

Study on the Screening of Reconstructed Soil Ratio Based on Entropy Weight-VIKOR Method

XU Wanru<sup>1,2</sup>, WANG Tianyu<sup>1,2</sup>, LIU Hengqiu<sup>1,2</sup>, QIN Xuming<sup>1,2</sup>, LIU Yifan<sup>1,2</sup>, ZHOU Jiqiang<sup>2,3</sup>, FENG Yonglin<sup>2,3</sup>

(1.Beautiful China Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2.Technology Innovation Center for Mine Geological Environment Restoration  
in the Alpine and Arid Regions, MNR, Lanzhou, Gansu 730030, China;

3.Gansu Nonferrous Engineering Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730031, China)

**Abstract:**Land reclamation is very important for vegetation restoration in mining areas. Reconstructed soil can effectively solve the problem of scarcity of topsoil resources. In response to the problem of poor soil and difficulty in achieving resource utilization of a large amount of gangue in a certain mining area's dumping site, by mixing coal gangue ecological aggregate with surface soil in different proportions, five kinds of reconstructed soil were prepared. The pH, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium content of reconstructed soil under different treatment schemes were measured. And the influence of coal gangue ecological aggregate ratio on each index was analyzed. Based on the entropy weight-VIKOR evaluation method, the optimal ratio of coal gangue ecological aggregate to surface soil was selected. The results show that with the increase of the proportion of coal gangue ecological aggregate, the pH of reconstructed soil gradually decreases and approaches to neutral. The proportion of coal gangue ecological aggregate has a significant effect on the content of organic matter, total nitrogen and available potassium, but has no significant effect on the content of available phosphorus. With the increase of the proportion of coal gangue ecological aggregate, the contents of organic matter, total nitrogen and available potassium in different reconstructed soil show a downward trend, and the content of available phosphorus increases first and then decreases. The scheme with 30% coal gangue ecological aggregate and 70% surface soil is the optimal ratio. The research results can provide new ideas for solving the problems of poor soil, scarce surface soil and difficult land reclamation in mining dumps.

**Key words:**Coal gangue ecological aggregate, Surface soil, Reconstructed soil, Entropy weight-VIKOR evaluation method