◆健康保育与环境修复◆

榆林市大柳塔矿山生态修复区植被与土壤特征关联性研究

杜江丽[1,2]，李　成[1,2]，陈建平[1,2]，彭　捷[1,2]，孙　魁[1,2]

（1. 陕西省地质环境监测总站，陕西 西安　710054；
2. 自然资源部 矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室，陕西 西安　710054）

［摘　要］矿山开发会对地表生态造成极为严重的损害，开展矿山生态修复工作具有重要现实价值与研究意义。选取榆林市大柳塔矿山作为生态恢复区，采用生态袋、空心砖、土工格室、客土、遮阳网、三维网6种生态修复措施，系统研究不同修复措施下植物物种组成、群落特征及土壤物理特性，分析植被与土壤特征之间的关联性，揭示不同修复措施的生态效应。研究结果表明：客土修复区内各优势物种的重要值相对均匀，与自然区相比差距较小，表明植被修复已趋于平稳；各修复方式对大柳塔矿区的土壤力学性能影响较小；大柳塔地区的植物多样性与生态系统的功能指标之间存在显著相关性。

［关键词］大柳塔矿区；生态修复；土壤和植被特征；关联性

［中图分类号］X171.4　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）12-0068-07

Research on the correlation between vegetation and soil characteristics in the ecological restoration area of Daliuta mine in Yulin

DU Jiangli[1,2], LI Cheng[1,2], CHEN Jianping[1,2], PENG Jie[1,2], SUN Kui[1,2]

（1. *Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an* 710054, *China*; 2. *Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an* 710054, *China*）

Abstract: The development of mines can cause extremely serious damage to surface ecology, carrying out ecological restoration work in mines has important practical value and research significance. The Daliuta mine is selected as ecological restoration area, six ecological restoration measures including ecological bags, hollow bricks, geocell, guest soil, shading mesh and three-dimensional mesh are adopted to systematically study the plant species composition, community characteristics and soil physical properties under different restoration measures. The correlation between vegetation and soil characteristics is analyzed to reveal the ecological effects of different restoration measures. The research results indicate that the important values of various dominant species in the guest soil restoration area are relatively uniform, and the difference is relatively small compared to the natural area, indicating that vegetation restoration has tended to be stable; Each restoration method has a relatively small impact on the soil mechanical properties of the Daliuta mine; There is a significant correlation between plant diversity and ecosystem functional indicators in the Daliuta mine.

Key words: Daliuta mine; ecological restoration; characteristics of vegetation and soil; correlation

0　引言

矿产资源作为非可再生资源，是人类生存和社会发展的重要物质基础[1-3]。然而，矿产资源的开采往往会对地表生态系统造成严重破坏，特别是在大规模开采的矿区，植被景观和生态环境的破坏尤为显著[4-5]。这不仅导致水土流失和环境恶化，还易引发地质灾害，污染土壤、空气和水资源，极大地威胁了当地居民的身体健康，降低了其生活质量[6-8]。此外，矿区开发还导致生物多样性锐减，对生态系统平衡造成严重影响[9-12]。因此，矿山生态修复工作具有重要的现实意义和研究价值。

矿山生态修复是一个全球性的研究热点，许多学者在这一领域进行了广泛的研究和探索。在国

［收稿日期］2024-05-21

［作者简介］杜江丽（1985-），女，陕西渭南人，高级工程师，主要从事矿山地质环境调查评价、矿山生态修复研究。
E-mail：zeqian0387387@163.com

［基金项目］陕西省历史矿山生态修复试点（编号202179）

外，英国利物浦大学的BRADSHAW博士[13]研究指出，矿区的植被演替、植被动态和矿产储量的关系是影响矿区生态环境修复的重要因素。他提出，通过人工干预促进矿区植被快速演替，可以显著促进矿区实现其生态功能。此外，HOLMES[14]的研究表明，复垦地的土层厚度对植物生长的影响并没有想象中那么重要。在一些实验中，土层较薄（10 cm）时植物生长密度甚至超过了土层较厚（30 cm）时。在国内，范军富等[15]以阜新海州露天煤矿为研究对象，分析了种植豆科类植物对土壤肥力提升的作用，发现这类植物在提升土壤肥力方面具有显著效果，并且适用范围广泛。郝蓉等[16]以平朔安太堡露天煤矿为研究对象，提出人工植被的动态种植过程，认为需要根据不同生态修复时期采取不同的种植组合方案，以此提升植被的成活率和生长条件。她认为比较好的种植组合模式为：刺槐、油松、柠条，刺槐、油松，刺槐、沙棘，以及刺槐纯林。

目前，国内外在矿山生态修复方面取得了许多成果，但仍存在一些不足。首先，很多研究集中于单一恢复措施的效果，而忽视了综合措施的生态效应[17-19]；其次，对于不同恢复措施在不同生态环境中的适用性研究较少[20]；最后，现有研究多关注植被的恢复情况，但对植被与土壤特征之间的相互作用研究较少[21-22]。

笔者以陕西省榆林市神木市大柳塔矿区为例，选择生态袋、空间砖、土工格室、客土、遮阳网、三维网6种生态修复措施，系统研究不同修复措施下植物物种组成、群落特征及土壤物理特性，分析植被与土壤特征之间的关联性。通过对采集到的数据进行数理分析，揭示不同修复措施的生态效应。研究结果不仅可以丰富和完善植物修复机制，也为我国矿区的生态修复提供重要的科学指导，具有重要的理论和实践意义。

1　研究方法

1.1　植物群落调查

各样点按对角线等距离选择3个5 m × 5 m的四象限域，乔木、灌木各取1 m × 1 m的区域进行植被状况测量。对该区域植物的海拔高度、地理位置、地形地貌、植物名称、植被类型、覆盖度、高度及物种数量等进行调查。

1.2　土壤调查

土壤调查与植物群落调查同步进行，确保样品的空间一致性。对不同的坡位、坡向、海拔高度及修复方式对植被恢复效果的影响进行调查，并对各修复工程的标准样地进行采样。在每一样地的对角方向上分别布置3个等间距的土样，分别按0～10 cm、10～20 cm分层，“S”形分层，多层取样，每一层都取相同数量的试样。土壤样品采集时与植被群落样本采集同步进行，确保来自同一地点，以保证分析结果的可靠性和科学性。然后进行物理、化学方面的特性测试。

1.3　环境因子与植被分布关联性

模式相应性分析是基于相应的CA/RA修正而发展起来的一种新的算法。将各循环方差加权均值后，对各生态位要素的权重进行一次线性回归，得到各生态位要素间的一阶关系，即：环境制约关系对应分析（CCA）。该方法将CA/RA法与多变量线性回归相结合，通过对各因素的逐步回归，对植物–环境之间的相互影响进行了细致的研究。

1.4　植被丰富度

在每个样地内设立若干标准样方，其中灌木和草本植物使用1 m × 1 m的样方，乔木使用5 m × 5 m的样方。记录样方内所有物种的个体数，并使用目测法估算样方内植物的覆盖度和高度。数据采集完成后，计算每个样方的丰富度指数，使用Margalef指数来量化物种的丰富度。Margalef指数R的计算公式如下：

$$R=\frac{S-1}{\ln N}。\tag{1}$$

式中，S指物种总数；N指个体总数。

随后，将每个样地的植被高度和覆盖度数据录入统计软件，分别计算各组的均值和方差。使用ANOVA对不同修复措施下的植被高度和覆盖度进行分析，计算F值和P值。根据方差分析结果，比较各组之间的差异显著性。如果P值小于0.05，则认为各组之间的差异具有统计学显著性。

2　结果与讨论

2.1　矿区植被群落物种组成及结构特征

2.1.1　植被群落物种组成

通过调查，大柳塔矿区植物群落主要有禾本科、豆科以及菊科；主要的植物有歧茎蒿、狗尾草、滨草、苋草、五叶地锦等。图1为不同修复措施下植被物种分科特征情况。图中的A～F分别代表了不同的修复措施：A–客土（通过将外部土壤搬运至研究区，并铺设在原有土壤表面，以增加土壤有机质和养分含量）；B–空心砖（在土壤表面铺设空心砖，以改善土壤的物理结构，增加水分渗透

性）；C–生态袋（使用生态袋填充土壤和种子，放置在研究区，以防止水土流失并促进植物生长）；D–遮阳网（覆盖遮阳网以减少阳光直射，降低土壤温度，减少蒸发量）；E–三维网（铺设三维网格结构，增强土壤稳定性，防止侵蚀）；F–土工格室（安装土工格室来支撑土壤结构，减少滑坡风险并促进植物根系生长）；自然–未受人工干预情况，下同。

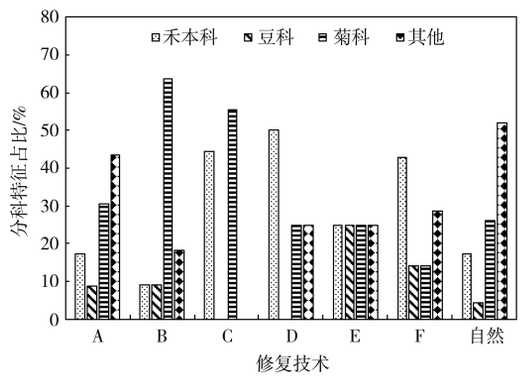


图 1　不同修复措施下植被物种分科特征情况

Fig. 1　Characteristics of vegetation species by classification under different restoration measures

由图 1 可知，因项目初期树种分配模式不同，植被恢复后的树种构成有很大差别。对以空心砖和生态袋法为修复措施区域的植物状况进行了研究，结果表明，以菊科为代表的植物种类较多，占比达到 63.78%、55.67%。在客土和自然区域，以其他科的数量最多，占比分别为 43.48%、52.17%；在遮阳网、生态袋和土工格室修复区的植被样本调查中，禾本科植物比例高达 50.02%、44.44%、42.86%。

图 2 是不同修复措施下植物种类生长形态特征。由图 2 可以看出，自然对照区域内多年生植物占比约为 55.63%。经客土修复改良后的区域植被覆盖率为 60.89%，植被覆盖面积为 57.23%，与自然植被的天然恢复率相近。空心砖和生态袋修复区一年生草本植物所占比例分别为 54.61% 和 55.24%，其比例要高于自然区内一年生植被群落。客土、土工格室修复区和自然区域的多年生植物数量要高于其他人工修复措施。

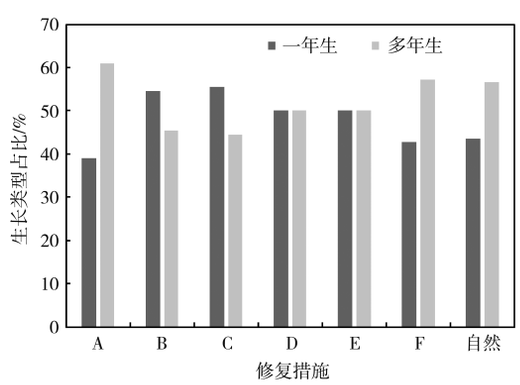
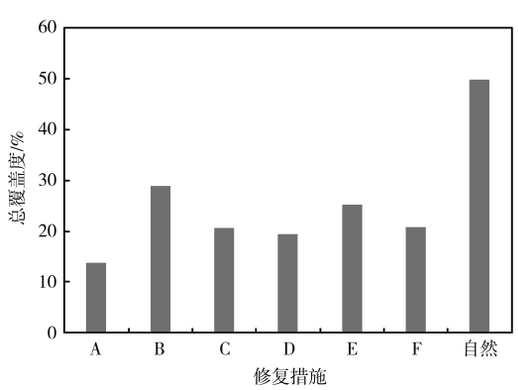


图 2　不同修复措施下植被物种生长形态特征

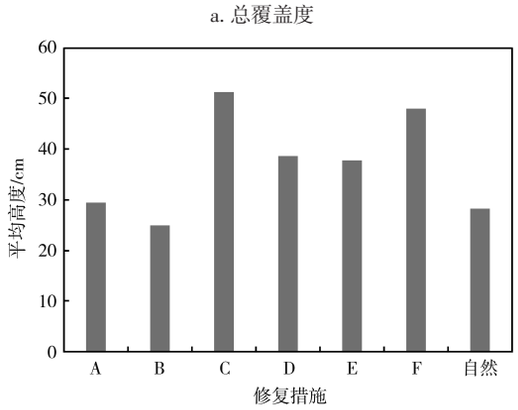
Fig. 2　Characteristics of vegetation species growth patterns under different restoration measures

2.1.2　植被高度与覆盖度

不同修复措施下总体植被覆盖度和平均高度分布如图 3 所示。从图 3a.可以看到，在矿区进行各种人工生态修复工程后，矿山的植被覆盖率都比自然对照区天然植被覆盖率低。天然植被覆盖度达到 49.58%，人工生态修复措施下采用空心砖修复的植被覆盖度最高，为 29.75%，其次为三维网修复，其植被覆盖度为 25.13%，客土修复措施下的植被覆盖度最低，为 13.75%。研究区的植被覆盖度维持在 13% ~ 29%，表明恢复到自然状态下植被覆盖度仍旧需要较长时间。通过图 3b.植被高度情况可知，采用生态工程恢复手段下的植被平均高度要大于自然群落下的植被平均高度，其中生态袋修复措施下的植被平均高度最大，为 51.31 cm，最小为空心砖修复措施，其植被平均高度为 24.99 cm。表明修复区的植被平均高度维持在 25 ~ 52 cm 范围内。方差分析（ANOVA）计算结果显示，不同恢复技



a. 总覆盖度



b. 平均高度

图 3　植被总覆盖度与平均高度情况

Fig. 3　Total vegetation coverage and average height

术下植被群落的覆盖度和平均高度之间存在显著差异（P<0.05），这表明不同恢复技术对植被生长有显著影响，为进一步优化生态修复措施提供了依据。

2.1.3　植被群落物种α多样性分析

植物的α多样性是指在同一生存环境中的物种数目。目前，利用丰富度指数（包括生物丰富度指数）、辛普逊（Simpson）指数（表示群落中物种的集中性）来描述生物种群的真实数目，而香农（Shannon）指数则更多地体现了生物多样性的不确定性。图4为大柳塔矿区植被的物种α多样性情况。

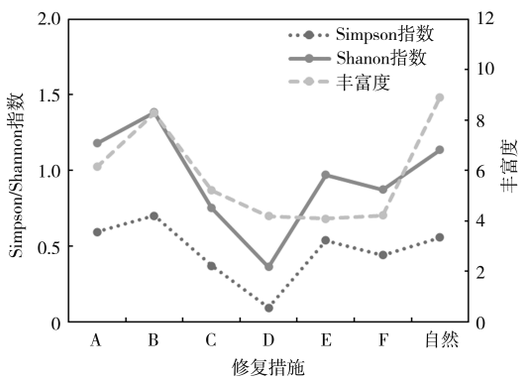


图4　不同修复措施下植被物种α多样性情况

Fig. 4　Vegetation species alpha diversity under different restoration measures

从图4可以看出，自然条件下植被物种的丰富度最高，为8.8，其次是空心砖和客土修复措施下植被物种丰富度，分别为8.0和6.0，遮阳网、三维网与土工格室修复措施下丰富度最低，均为4.0。空心砖修复措施下植被物种的Simpson指数最高，为0.671 2，遮阳网修复措施最低，为0.086 1。通过与天然植被的比较，发现在植被恢复过程中，植被的α多样性在不同修复方式下有很大差异。另外，从总体上看，矿区各种修复措施下植被的多样性总体上比自然条件下天然植被要低，而遮光网处理则是最低的，空心砖处理最高。

2.2　*研究矿区土壤特征*

2.2.1　土壤的物理性质

图5是大柳塔矿区生态修复区在各种修复措施下的土壤组成分布（不包括遮阳网处理）。由0～10 cm范围内的数据可以看出，客土、空心砖、生态袋、三维网、土工格室处理的土壤都是沙粒为主，且经三维网处理的土壤沙粒量最大，但与其他处理差异不大；粉粒和黏粒之间的差异很小。由10～20 cm土层的组成可知，空心砖处理的沙粒量最大，而生态袋处理的沙粒量最低。自然和生态袋处理土壤以沙质壤土为主，而客土、空心砖、三维网和土工格室处理则以沙土为主。

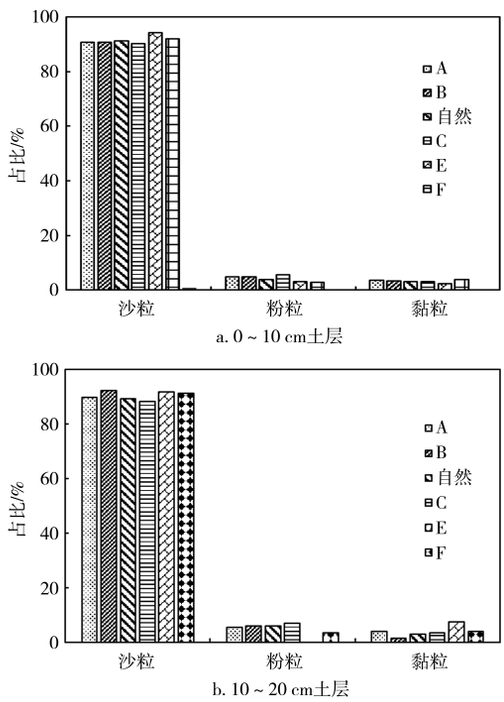
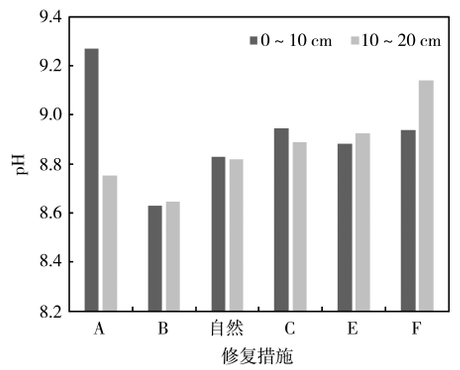


图5　不同修复措施下土壤机械组成分布

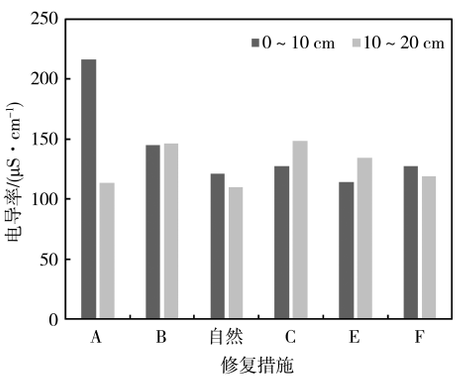
Fig. 5　Distribution of soil mechanical composition under different restoration measures

2.2.2　土壤的化学性质

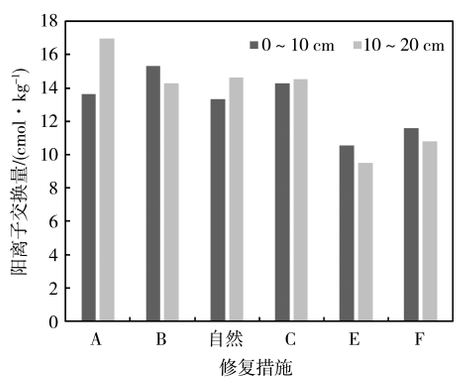
图6是大柳塔矿山生态修复区不同厚度土层的pH、电导率及阳离子交换性的变化情况（不包括遮阳网处理）。由图6可知，土壤pH整体偏碱性，范围在8.6～9.3，其中客土修复处理0～10 cm土层pH最高，达到9.27，而其他修复措施的pH值变化较小，均接近8.90，说明修复方式对土壤pH的影响较有限。土壤电导率在不同修复方式和土层深度下差异显著，0～10 cm土层中，客土修复处理的电导率最高，为216.12 μS/cm，自然区域土壤电导率最低，仅为121.50 μS/cm；而在10～20 cm土层中，生态袋和空心砖处理的电导率较高，分别为148.36 μS/cm和146.03 μS/cm，这表明客土和空心砖处理可能提高了土壤中盐分的含量。阳离子交换量是一种非常关键的理化性状，它可以直观地反映出土壤的保水、供肥特性及缓冲容量。由图6c.可知，0～10 cm土层，空心砖修复措施下土壤阳离子交换量最大，为15.33 cmol/kg，其次是生态袋和客土处理，其值分别为14.26、13.64 cmol/kg，三维网处理最小，为10.55 cmol/kg。说明空心砖和生态袋处理在改善0～10 cm土壤养分保持土壤性能方面



a. pH



b. 电导率



c. 阳离子交换量

图 6　不同修复措施下土壤上下层 pH、电导率、阳离子交换量分布

Fig. 6　Distribution of pH, conductivity and cation exchange capacity in the upper and lower layers of soil under different restoration measures

具有明显优势。对于 10 ~ 20 cm 土层，则是客土处理阳离子交换量最高，其次为自然和生态袋处理，三维网处理最低。由于土壤中的黏粒是土壤电荷的主要贡献者，因此在沙土中的阳离子交换量比在壤土和黏土中的阳离子交换量相对要小。除了三维网处理 10 ~ 20 cm 土层土壤阳离子交换量小于 10 cmol/kg 以外，其他处理都是中度保持养分（阳离子交换量为 10 ~ 20 cmol/kg）。

客土和空心砖修复措施在提升土壤化学性质方面表现突出。客土修复在 0 ~ 10 cm 土层中显著提高了土壤盐分含量（电导率为 216.12 μS/cm），而空心砖修复则在阳离子交换量（15.33 cmol/kg）上表现最佳，说明其具有较强的养分保持能力。生态袋处理在阳离子交换量（14.26 cmol/kg）和 pH 值稳定性方面表现良好，表明其有助于维持适宜的土壤化学环境。相较之下，三维网修复在阳离子交换量和电导率上的表现较弱，对土壤化学性质的改善较为有限。

通过对不同恢复措施下分析研究可知，土壤的机械组成变化很小，影响有限。从不同措施下土壤养分的评价结果来看，与未经人工扰动的天然土壤相比，客土和空心砖处理的土壤养分较好。因此，在不考虑经济成本的情况下，可因地制宜合理使用客土和空心砖两种生态修复措施。

2.3　矿区植被与土壤关联性分析

2.3.1　土壤与植被分布关联性分析

典范对应分析是基于 CA/RA 的一种新算法，该方法采用了 CA/RA 和多变量线性相关分析方法，每个步骤都与各因素相关，从而反映了植物–环境之间的相互影响。表 1 列出了 CCA 的环境因素和缩写。

表 1　CCA 环境因子及其缩写

Table 1　CCA environmental factors and their codes

缩写	环境因子	缩写	环境因子
AN	土壤碱解氮	CEC	土壤阳离子交换量
TN	土壤总氮	EC	土壤电导率
TP	土壤总磷	pH	土壤 pH 值
AP	土壤速效磷	SWC	土壤水含量
TK	土壤总钾	SBD	土壤容重
AK	土壤速效钾	ST	土壤质地
OM	土壤有机质		

各指标间的相关性如表 2 所示。第一个序列轴线与各土壤要素的关系不明显，但总磷与第 2 个序列轴线有极强的相关关系，r=0.693 7，P<0.01。

由表 2 中 CCA 分析结果可知，土壤总磷和土壤速效磷对植物群落特征具有显著影响。其中，土壤总磷与 CCA2 轴的相关系数为 0.693 7，表明其对植物群落高度和覆盖度有显著正向影响（P<0.01）。这意味着随着土壤总磷含量增加，植物群落的平均高度和覆盖度显著增加。另一方面，土壤电导率与 CCA2 轴的相关系数为–0.393 0，表明电导率对植物群落特征有负向影响，意味着电导率的增加可能抑制植物生长。此外，土壤 pH 值和阳离子交换量也对植物群落特征有一定的影响，但其显著性不如土

表2　土壤环境因子与CCA排序轴相关系数

Table 2　Correlation coefficient between soil environmental factors and CCA sorting axis

土壤因子	CCA1	CCA2
pH	0.091 8	−0.380 5
AN	−0.136 5	−0.307 5
AP	−0.075 6	0.256 7
AK	0.095 7	−0.337 3
OM	0.098 0	−0.162 1
TN	−0.027 6	−0.053 4
TP	0.059 1	0.693 7
TK	0.192 5	0.260 0
EC	0.014 5	−0.393 0
CEC	0.394 8	0.180 5
ST	−0.183 5	−0.053 1

注：CCA1表示环境变量对植物群落特征的主要影响方向，其高值表明环境因子的强影响；CCA2表示次要的环境变量影响方向，用于解释CCA1未能解释的变异。

壤总磷和速效磷显著。

综上所述，CCA分析清晰地揭示了大柳塔矿区土壤环境因子与植物群落特征之间的复杂关系。土壤总磷和速效磷是影响植物群落高度和覆盖度的关键因子，而土壤电导率对植物群落特征有负向影响。这一结果对于制定有效的生态恢复措施具有重要指导意义。

2.3.2　环境因子与植被群落特征值联系

通过对植被物种多样性指数、植被高度、植被覆盖度等因素的分析，建立了植被物种多样性指数的数学模型。通过对各因素间的相关性分析，得出各因素的影响程度及各因素间的关系。

在大柳塔矿区，各生态要素与生态系统之间的关系如表3所示。总体上，物种多样性、群落平均高度均与土壤因子呈显著的线性关系，且平均高度与土壤总磷含量呈显著正相关（P<0.01）。此外，土壤速效磷的浓度对植物群落结构的稳定性也有重要影响。在不同生境中，植物种类的分布存在明显差异。研究结果进一步显示，通过改良土壤结构和增加土壤速效磷含量，可以有效提高植被群落的物种多样性和整体高度。这一结论为大柳塔矿区的生态修复提供了科学依据，有助于制定更加有效的恢复策略。

表3　大柳塔植被群落与环境因子相关关系

Table 3　Correlation between vegetation communities and environmental factors in Daliuta

代码	项目	r^2	显著度	回归方程
R	丰富度	0.256	*	R=2.546ST+1.447
				$r(R,\mathrm{ST})$=0.549，P=0.022
H	高度	0.532	**	H=−4.475TP+2.786AP+5.905
				$r(H,\mathrm{TP})$=−0.767，$r(H,\mathrm{AP})$=−0.597
				P=0.002

注：*，P<0.05；**，P<0.01；样方数为18。

3　结论

（1）研究结果显示，大柳塔矿区在6种不同的修复措施下，客土修复区内各优势物种的重要值较为均匀，与自然对照区相比差距较小，表明植被恢复已趋于平稳。优势物种是指在群落中占据较高生物量或植被盖度，并在结构形成中起主导作用的物种，其重要值是通过相对密度、相对频度和相对优势度计算得出的综合指标，用以反映物种在群落中的生态地位。不同工程措施对群落复杂程度有显著影响，具体体现在植被覆盖度和高度的显著差异。这说明优势物种在生态系统的组成和环境调控中发挥了关键作用，而适宜的工程措施可以显著改变群落的复杂程度和结构，从而促进植被恢复。

（2）研究结果表明，大柳塔矿区的植物多样性与生态系统的功能指标之间存在显著相关性。相关性分析和回归分析均显示，群落平均高度与土壤总磷含量之间具有极显著的正相关关系（P<0.01）。这意味着随着土壤总磷含量增加，植物群落的平均高度显著增加。土壤总磷含量是影响植物群落高度的关键因子，增加土壤中的有效磷可以显著提高植被的平均高度，从而提升群落的整体生态功能。

［参考文献］

［1］ 赵雷，刘波.对我国矿产资源勘察的现状分析探讨[J].科技创新与应用，2013(1)：118.
ZHAO L，LIU B. Analysis and Discussion on the Current Situation of Mineral Resource Exploration in China [J]. Technological Innovation and Application，2013(1)：118.

［2］ 张文驹.矿产资源在实现可持续发展中的特殊性[J].中国国土资源经济，2006(3)：4-8，46.
ZHANG W J. The role of mineral resources in realizing economic sustainable development [J]. Natural Resource Economics of China，2006(3)：4-8，46.

［3］ 李宝霞，王振国.新形势下地质矿产勘查及找矿技术应用分析[J].世界有色金属，2023(2)：92-94.
LI B X，WANG Z G. Application analysis of geological and mineral exploration and prospecting technology under the new situation[J]. World Nonferrous Metals，2023(2)：92-94.

［4］ 曹盼宫.黄土丘陵沟壑区石油矿区景观生态修复试验分析[J].科技通报，2017，33(7)：240-243.
CAO P G. Research on Ecological Landscape Restoration in the

Loess Hilly and Gully Area of Petroleum Mining Area[J]. Bulletin of Science and Technology,2017,33(7):240-243.

[5] 合寿良,李鹏.云南镇沅金矿生态环境恢复实践及对策研究[J].云南冶金,2015,44(4):96-101.
HE S L, LI P. The Restoration Practices and the Countermeasure Study on Ecological Environment in Yunnan Zhenyuan Gold Mine, Yunnan Province[J]. Yunnan Metallurgy,2015,44(4):96-101.

[6] 吕海峰.矿山地质灾害生态环境恢复治理的难点及对策分析[J].世界有色金属,2023(22):217-219.
LYU H F. Analysis of Difficulties and Countermeasures for Ecological Environment Restoration and Management of Geological Hazards in Mines [J]. World Nonferrous Metals, 2023 (22): 217-219.

[7] 李毛毛.矿产资源开发与生态环境恢复治理探讨[J].世界有色金属,2023(22):211-213.
LI M M. Exploration of Mineral Resource Development and Ecological Environment Restoration Governance [J]. World Nonferrous Metals,2023(22):211-213.

[8] 吕春娟,白中科,赵景逵.矿区土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].水土保持学报,2003(6):85-88,91.
LV C J,BAI Z K,ZHAO J K. Advances in research of soil erosion and Soil and water conservation in mining area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003(6):85-88,91.

[9] 严丹霖,孟楠,杨树旺.矿产资源开发对生态环境影响的多维分析[J].中国国土资源经济,2015,28(5):39-42.
YAN D L, MENG N, YANG S W. Multidimensional analysis on the effects of mineral resources development on ecological environment [J]. Natural Resource Economics of China,2015,28(5):39-42.

[10] 王改玲,白中科,赵景逵,等.矿区生态重建中生物多样性与可持续发展[J].煤矿环境保护,2002,16(4):7-10.
WANG G L, BAI Z K, ZHAO J K, et al. The relations between biodiversity and sustainable development in ecological rehabilitation in mine area[J]. Coal Mine Environmental Protection, 2002,16(4):7-10.

[11] 王青.我国矿区土地复垦及生态环境重建问题探究[J].冶金与材料,2023,43(4):175-177.
WANG Q. Exploration of Land Reclamation and Ecological Environment Reconstruction in Mining Areas of China [J]. Metallurgy and Materials,2023,43(4):175-177.

[12] 关炳昌,刘家豪,朱宇恩,等.矿区恢复植被配置模式对土壤碳库与生物多样性的影响[J].山西大学学报(自然科学版),2020,43(1):196-205.
GUAN B C, LIU J H, ZHU Y E, et al. Effect of mining area vegetation restoration types on soil carbon fixation and biodiversity [J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition),2020,43(1):196-205.

[13] BRADSHAW A D. Ecological principles and land reclamation practice[J]. Landscape Planning,1984,11(1):35-48.

[14] HOLMES P M. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition[J]. Restoration Ecology,2001,9(1):71-84.

[15] 范军富,刘志斌.海州露天煤矿排土场土壤理化特性及改良措施的研究[J].露天采矿技术,2005(5):79-81.
FAN J F, LIU Z B. Research on Soil Physical and Chemical Characteristics and Improvement Measures of Haizhou Open pit Coal Mine Waste Disposal Site[J]. Opencast Mining Technology, 2005(5):79-81.

[16] 郝蓉,白中科,赵景逵,等.黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J].生态学报,2003(8):1470-1476.
HAO R, BAI Z K, ZHAO J K, et al. Vegetation dynamics during plant rehabilition in degraded mined land of large opencast coal mine within loess area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003 (8): 1470-1476.

[17] 董晓妮,初鹏.肃南县夹皮沟矿山地质环境特征与生态恢复治理措施[J].能源与环保,2023,45(6):158-162.
DONG X N, CHU P. Geological environment characteristics and ecological restoration measures of Jiapigou Mine in Sunan County [J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(6): 158-162.

[18] 郝文萍.浅谈矿山生态恢复措施[J].山西化工,2021,41(6):246-248.
HAO W P. Discussion on mine ecological restoration measures [J]. Shanxi Chemical Industry,2021,41(6):246-248.

[19] 丁冉伟.矿山生态环境恢复治理现状和应对措施探讨[J].世界有色金属,2022(19):193-195.
DING R W. Discussion on current situation and countermeasures of mine ecological environment restoration[J]. World Nonferrous Metals,2022(19):193-195.

[20] 刘晓雷,刘艳.试论矿山生态环境恢复治理现状和对策[J].资源节约与环保,2019(4):24-25.
LIU X L, LIU Y. Discussion on the Current Situation and Countermeasures of Ecological Environment Restoration and Management in Mines [J]. Resources Economization & Environmental Protection,2019(4):24-25.

[21] 杨贤房,郑林,万智巍,等.酸性矿山5种植被恢复措施下土壤碱性磷酸酶基因细菌群落特征及其与重金属关系[J].环境科学学报,2022,42(12):251-261.
YANG X F, ZHENG L, WAN Z W, et al. Characteristics of soil phoD bacterial community and their relationship with heavy metals under five vegetation restoration in acid mines [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2022,42(12):251-261.

[22] 杨鑫光,李希来,金立群,等.不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究[J].草业学报,2019,28(3):1-11.
YANG X G, LI X L, JIN L Q, et al. Effectiveness of different artificial restoration measures for soil and vegetation recovery on coal mine tailings in an alpine area [J]. Acta Prataculturae Sinica,2019,28(3):1-11.