

“西部煤矿区生态修复的微生物技术”科研成果

转化《矿山生态环境修复》教学案例

(入选 2025 年陕西省本科教学案例)

《矿山生态环境修复》教学案例

一、基本情况

1. 基本信息			
案例名称	西部煤矿区生态修复的微生物技术		
依托课程	矿山生态环境修复		
适用课程	环境学、生态学、微生物学、土地复垦学、国土资源学等相关课程		
教学案例使用成效情况			
<p>本教学案例以矿区生态修复为背景，系统整合植物-微生物修复技术与生态治理和评价实践。案例设计逻辑清晰，从耐盐植被筛选、微生物菌根共生机制到耐盐 DSE 鉴定纯化，固废资源化利用，生态服务功能评价层层递进，构建了“野外问题分析-室内技术创新-野外效果验证”的教学链条。教学内容紧扣学科前沿，突出 AMF、DSE 菌株筛选、煤矸石解磷菌协同利用、生态服务功能评价等关键技术，有效提升了学生对微生物修复原理与工程应用的理解深度。案例通过真实科研场景模拟，强化了学生解决复杂生态问题的能力。例如，碱蓬根系真菌定殖分析、耐盐菌剂研发等环节，培养了学生的实验设计、数据分析及跨学科综合素养。同时，碳汇效应评估与生态系统服务价值分析模块，引导学生关注生态修复的长效性与可持续性。教学过程中，案例的多尺度研究（从微生物-植物互作到区域生态效应）激发了学生的创新思维，小组讨论环节促进了团队协作能力。学生反馈显示，案例内容贴近实际，技术路线可操作性强，显著提升了学习兴趣与科研代入感。总体而言，本案例实现了知识传授、能力培养与价值引领的统一，为绿色矿山建设人才培养提供了高效教学范式。建议结合现场实训进一步强化工程与实验室实践体验和操作，以深化教学效果。</p>			
2. 负责人情况			
姓名	性别	职称	邮箱
毕银丽	女	教授	ylbi88@126.com
研究方向	矿山生态修复与土地复垦、微生物修复与碳中和、煤基固废资源化、矿区水资源高效循环利用		
主要成就	教育部“长江学者”特聘教授，博导，中国矿业大学（北京）煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室执行主任、西安科技大学西部富油煤绿色低碳开发国家重点实验室常务副主任、西部矿山生态环境修复研究院院长。获得中国青年科技奖、全国三八红旗奖等荣誉 20 余项。长期从事煤矿区地质环境治理与生态修复等方面的研究，研究成果获国家科技进步二等奖 2 项，省部级科技奖 10 项。获专利知识产权 44 项，软著 12 项，团标 14 项，专著 5 部，发表论文 200 余篇。		

3. 团队成员情况				
姓名	职称	工作单位	研究方向	近三年主讲的课程
肖礼	副教授	西安科技大学	土地复垦	环境科学与工程前沿
柯增鸣	副教授	西安科技大学	水土保持	矿山生态环境修复
王坤	副教授	西安科技大学	生态修复	环境保护与职业健康 概论
解琳琳	副教授	西安科技大学	微生物修复	地下水生态环境修复
白雪蕊	讲师	西安科技大学	固废资源化	地球科学概论
4. 依托项目				
序号	项目名称	项目类型	项目负责人	
1	西部干旱区煤能源基地地貌-土壤-植物立体引导修复技术	重点研发计划课题	毕银丽	
2	煤炭井工开采生态环境修复机理与方法	国自然重大	毕银丽	
3	干旱生态脆弱区煤炭基地生态修复与保护研究	企业重大	毕银丽	
4	神府采煤沉陷区菌根复垦下枯落物输入对土壤有机碳的贡献及稳定机制	国自然青年	肖礼	
5	西部煤矿微生物复垦区植物-土壤-微生物生态化学计量学及其内稳性机制	陕西省科技厅项目	肖礼	
6	西部露天排土场菌根修复后土壤微生物演替及养分周转机理	国自然青年	王坤	
7	西部干旱区露天煤矿排土场菌根复垦下重构土层水盐驱运机制	国自然青年	柯增鸣	
8	西部干旱煤矿区深色有隔内生真菌耐盐解磷协同修复机理	国自然青年	解琳琳	
9	神府矿区多孔多链煤基固废养分的微生物活化改土机制	陕西省科技厅项目	白雪蕊	

二、案例详情

西部煤矿区生态修复的微生物技术¹

摘要：针对西部煤矿区生态修复难题，本案例以聚焦盐碱地治理、沉陷区复垦及煤基固废资源化，系统探索微生物修复技术。通过筛选碱蓬等耐盐优势植物并分析其根系真菌定殖特征，结合生物结皮与丛枝菌根真菌（AMF）多样性研究，揭示植被恢复与微生物互作机制。从盐碱土壤中分离耐盐深色有隔内生真菌（DSE）菌株，解析其胞外代谢物促生效应，研发 DSE 菌剂并应用于矿区修复，显著提升植物存活率与土壤改良效率。同时，从煤矸石中筛选解磷微生物，通过微生物-植物协同作用强化固废资源化利用，降低修复成本改良矿区土壤。研究整合 AMF、DSE 及解磷菌技术，结合碳汇效应分析与生态系统服务价值评估，构建“耐盐植被筛选-微生物菌剂研发-固废资源化-碳汇增效”技术链条，实现矿区土壤改良、植被快速恢复及碳中和目标，以其为干旱区矿山生态修复提供低成本、可持续的微生物解决方案。

关键词：丛枝菌根真菌；深色有隔内生真菌；解磷菌；煤基固废；生态系统服务价值

背景信息：

随着煤炭资源的开采，矿区生态环境受到严重破坏，平均每万吨煤开采会引起 0.2 hm² 地表沉陷，而生态脆弱且受采煤扰动的沉陷复垦区承担着服务生态、储碳减排的重任。采煤沉陷所造成的地裂缝、地下水流失问题日益凸显，新疆地区盐碱地严重影响了当地的矿山生态环境，并且煤基固废作为煤炭开采和加工过程中产生的废弃物，其大量堆存不仅占用土地资源，还可能对周边环境造成污染。但是大面积的复垦及生态恢复面临着重构土壤的工程成本高，重建植被存活率低、恢复周期长的障碍，而且传统的复垦及生态恢复、煤基固废处理方式往往成本高、效率低，因此矿区难以实现生态低成本、长时效、可持续的恢复和废弃物有效资源化利用。

在复垦过程中，植被恢复与土壤改良，固废的资源化利用是矿山绿色发展核心难题。近年来，微生物修复技术因其经济高效、低能耗、不产生二次污染等特点，在矿区生态修复领域展现出巨大的应用潜力。丛枝菌根真菌（AMF）是重要土壤微生物组成部分并且与植物互利共生，深色有隔内生真菌（DSE）作为一种广泛存在于植物根系中的微生物，其耐盐特性使其成为盐碱地土壤微生物修复的理想候选材料，以 AMF、DSE、煤矸石解磷菌为亮点的微生物复垦则被证明是沉陷地退化系统高效率、低成本恢复及煤基固废资源化利用的关键技术。生态工程进行后探索矿区生态修复中的碳汇效应与贡献，提出有效的生态修复策略，以实现矿区的碳中和目标以及评估生态修复措施的效果是绿色矿山建设的必要环节。

负责人简介：毕银丽、西安科技大学地质与环境学院、矿山生态修复与土地复垦

编制说明：本案例为陕西省本科教学项目制教学示范成果，以西部煤矿区生态修复为工程背景，系统整合微生物修复技术教学链条。技术性处理包括：1) 简化科研数据模型，突出 AMF/DSE 菌株筛选、固废资源化等核心工艺流程；2) 优化案例结构为“问题导入-技术解析-实践验证”三段式，强化教学逻辑；3) 增设碳汇效应评估等思政元素，融入生态文明价值观教育；4) 配套开发虚拟仿真实验模块，突破现场实训限制。案例通过产学研深度融合，构建了可复制的矿山生态修复技术教学范式。

本案例从 1.盐碱地优势植物筛选及根系真菌定殖（1 小节），2.植物与土壤界面-生物结皮生态效应（2 小节），3.DSE 耐盐菌株的筛选、胞外代谢物性质，菌剂研发及修复应用（3，4，5 小节），4.煤矸石解磷菌分离及微生物-植物协同资源化利用（案例 6，7 小节），5.微生物修复碳汇效应、土壤改良与植物促生及生态修复效果评估（案例 8，9，10 小节）5 个方面，10 个小节探讨西部煤矿区生态修复的微生物技术。

为了寻找有效的生态修复方法，科研人员对矿区周边的植被群落进行了深入调查。在新疆矿区，碱蓬被确认为该区域的优势植物。鉴于此，小节 1 选取碱蓬为目标植物，旨在通过分析其根系真菌定殖情况并探讨采矿活动对植物根际真菌定殖的影响。小节 2 研究不同植被类型下生物结皮与共生微生物丛枝菌根真菌的多样性及其对矿区复垦生态的影响，指导矿区复垦实践、优化植被恢复策略。小节 3 从新疆红沙泉地区不同盐厚度的结皮下含有碱蓬植物根系的土壤中筛选分离出耐盐性 DSE 菌株，并进行鉴定。进一步小节 4 探讨 DSE 胞外代谢物对植物生长的影响，以期能为土壤改良和植物生长促进提供新的思路和方法。小节 5 在分离鉴定基础上通过研发 DSE 微生物菌剂，并探索其在矿区生态修复中的应用。小节 6 从矿区煤矸石中筛选出具有优良解磷效果的微生物，通过生物方法强化煤矸石的基础肥力，小节 7 继而通过利用特定微生物的适应性和转化能力，以及微生物与植物的协同作用，实现煤基固废的高效利用和环境保护。小节 8 结合了丛枝菌根（AMF）等微生物的作用、植被恢复以及土壤碳库的管理等多个方面，以期能为矿区生态环境的恢复做出贡献。小节 9 通过土层重构、接种有益微生物等手段，旨在改善土壤结构、提高土壤肥力、优化植物水分利用策略，从而实现土壤改良和植物促生。小节 10 通过分析不同年份下矿区不同区域生态系统服务价值的变化趋势，探讨生态修复措施对矿区生态系统健康的影响。最终从耐盐植被与结皮调查-DSE 分离菌剂研发-煤基固废资源化利用-生态修复碳汇、生态系统服务价值链条阐释西部煤矿区生态修复的微生物技术。

案例正文：

一、矿区优势植物碱蓬根系真菌结构特征及其在生态修复中的应用

对新疆矿区周边植被群落本地调查发现，碱蓬为该区域优势植物，因此，选取碱蓬为目标植物进行研究，并对碱蓬根际真菌定殖情况进行分析，了解真菌在植物根系的侵染情况及分布特征，通过矿区不同距离真菌以阐明采矿对植物根际真菌定殖的影响，并为利用微生物进行矿区生态修复提供依据。显微观察结果发现，碱蓬根系的真菌以 DSE 为主，具有明显的深色有隔菌丝及微菌核结构（图 1）。

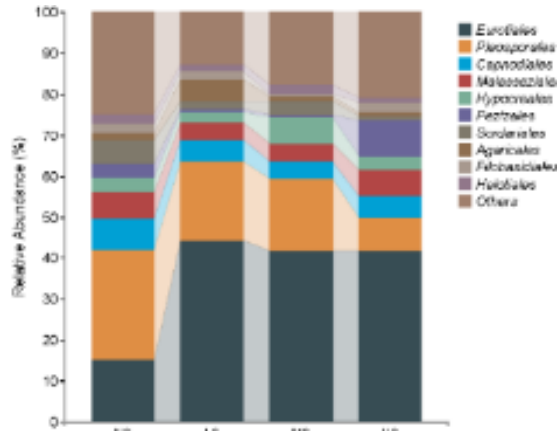


图2 土壤真菌群落组成

二、不同植被类型下生物结皮与共生微生物多样性及其对矿区复垦生态的影响

正常情况下结皮将按“浅藻结皮→深藻结皮→地衣结皮→苔藓结皮”的顺序演替。丛枝菌根真菌接种区的苔藓结皮盖度大于未接种区，但从丛枝菌根真菌未接种区的藻结皮大于接种区，说明接种丛枝菌根真菌在一定程度上促进了生物结皮的演替。就不同植被类型而言，紫穗槐，樟子松和沙棘种植区的苔藓结皮盖度大于欧李，野樱桃和文冠果种植区，而紫穗槐，樟子松和沙棘种植区的藻结皮盖度小于欧李，野樱桃和文冠果种植区（图3）。丛枝菌根真菌接种区的生物结皮厚度大于未接种区（图3）。就不同植被类型而言，紫穗槐，樟子松和沙棘种植区的生物结皮厚度大于欧李，野樱桃和文冠果种植区。

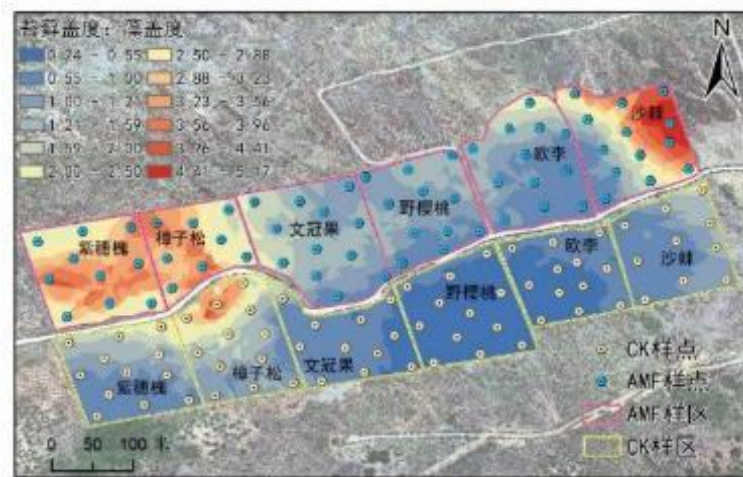


图3 大柳塔采煤沉陷区土地复垦后生物结皮盖度空间异质性分布图

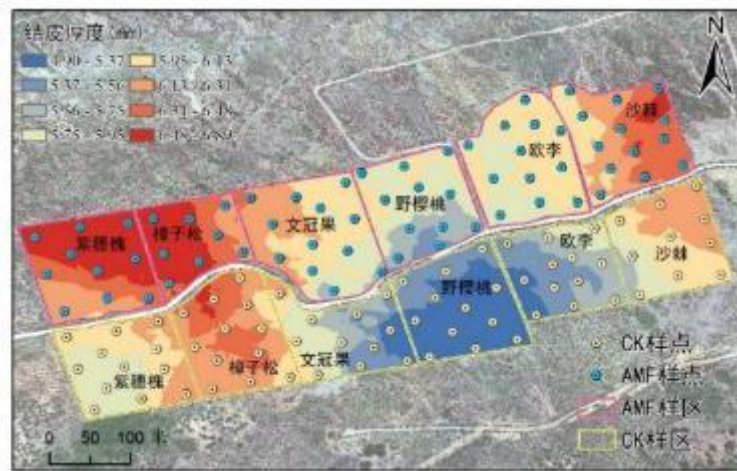


图 4 大柳塔采煤沉陷区土地复垦后结皮厚度空间异质性分

群落组成分析结果表明（图 5），检测到的 OTUs 隶属于球囊菌门 4 纲 6 目 6 科 6 属。5 种植被类型下生物结皮间的丛枝菌根真菌属水平的群落组成存在差异(图 5)，其中 *Glomus* 属最多，相对丰度分别为欧李区 71.7%、野樱桃区 66.5%、文冠果区 73.5%、紫穗槐区 91.3% 和沙棘区 90.1%。相对丰度其次为 *Glomeromycetes* 属，含量为 14.0 ~ 0.95%，序列由高到低依次为文冠果区；欧李区；紫穗槐区；沙棘区和野樱桃区。*Glomerales* 属在文冠果区下的相对丰度显著高于沙棘区，*Paraglomus* 属在沙棘下的相对丰度显著高于紫穗槐区和文冠果区。

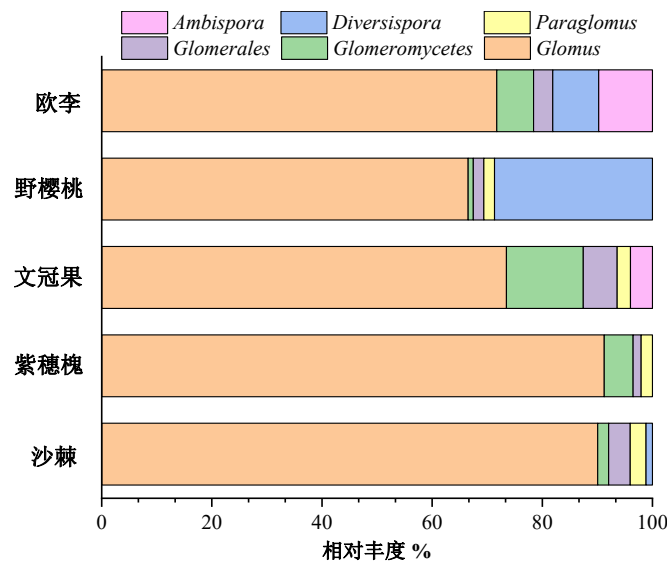


图 5 不同植被类型下生物结皮土壤共生微生物丛枝菌根真菌属水平相对丰度

三、耐盐 DSE 菌株的筛选、鉴定及其在盐碱地土壤微生物修复中的应用

从不同厚度盐结皮下的碱蓬根中分离耐盐内生真菌，从 3 cm 厚度的盐结皮下碱蓬根系中分离出 3 株菌种，分别命名为 SC11、SC12 和 SC71。分离后的菌种在 PDA 培养基中纯化培养并进行多次传代使其稳定，并将纯化后的菌株进行 4°C 保藏（图 6C）和安瓿管（图 6D）

保藏备用。纯化的菌落形态特征如图 6A 所示，菌株 SC11 菌落呈现规则的圆形，颜色为黄绿色，菌落表面粗糙，中间厚边缘薄，培养 5 天后中间开始出现白色菌丝，菌丝为丝状且有隔膜。ITS 分子鉴定与 *Alternaria chlamydospora* 的相似度最高（图 6B），因此该菌株鉴定为 *Alternaria chlamydospora*。而菌株 SC12 菌落边缘则是呈现不规则形状，且颜色亦是黄绿色，粗糙干燥，菌丝有类子囊结构。菌株 SC71 菌落呈现规则的圆形，颜色为深黄绿色，前者颜色较浅，菌落表面粗糙，培养 5 天后中间开始出现白色菌丝，且菌丝亦是有类子囊结构。

为探究不同菌株的代谢产物特性，选用商业通用的 MMN 培养基进行发酵并检测器发酵特性，如图 7 所示。结果显示，菌株 *Alternaria sp.* 生物量显著高于分离菌株（SC11、SC12 和 SC71），分别高了 41.38、39.23 和 40.65%，由此，该培养基并不是分离菌株的最适生长培养基。同时，菌株 SC11、SC12 和 SC71 的发酵液的 pH 亦是同样显著低于 *Alternaria sp.*，分别低了 3.99、9.91 和 9.63%（图 7B）。pH 变化反映了发酵的程度，进入发酵后期，一些菌株会发生细胞裂解，使其细胞内蛋白酶泄漏到发酵液中进而导致 pH 显著增加。该结果从另一方面证明了我们的结论。另外，由于菌株 *Alternaria sp.* 会产生胞外多糖聚合物，使发酵液的粘度增加，进而可应用于矿山生态修复。我们对分离菌株的粘度进行探究，发现分离菌株的粘度相较于 *Alternaria sp.* 几乎没有，因此，基于 MMN 培养基，SC11、SC12 和 SC71 并不会产生增加发酵液粘度的大分子胞外多糖聚合物。

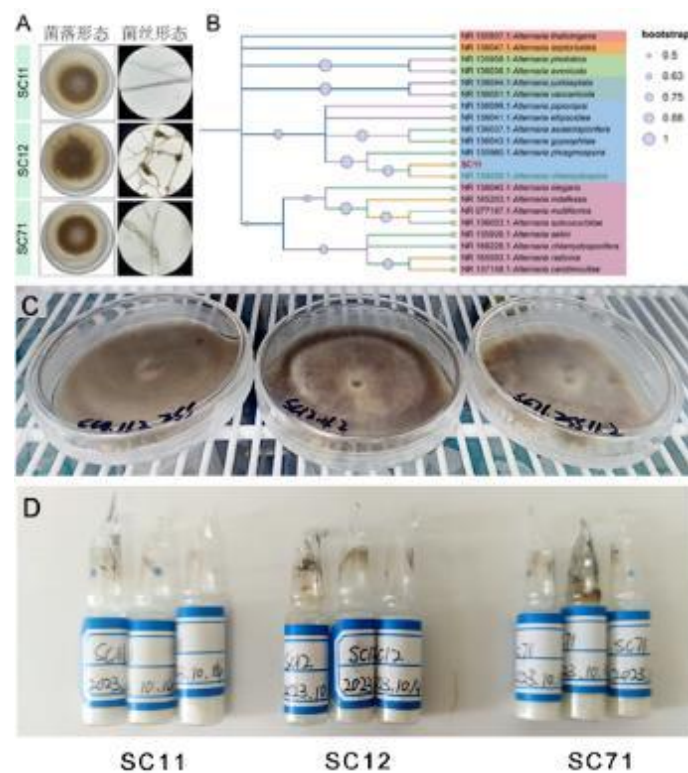


图 6 耐盐菌株的形态学与分子学鉴定

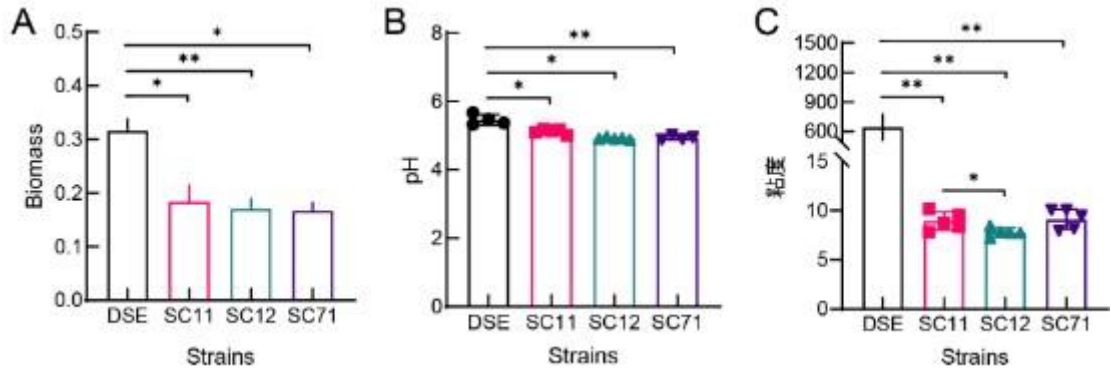


图7 不同耐盐菌株的发酵特性。*代表 $P < 0.05$ ；**代表 $P < 0.01$ 。

四、DSE 胞外代谢物对植物生长影响的研究及其潜在应用

胞外代谢物包括氨基酸、肽和类似物、有机氧化合物、脂质和类脂质分子、有机杂环化合物、苯丙烷和聚酮化合物、核苷、核苷酸和类似物、苯甲酸化合物、有机硫化合物、生物碱及其衍生物、有机氮化合物和有机酸及其衍生物 11 种化合物。不同培养时间的 DSE 胞外代谢物种类占比相似（图 7）。其中，氨基酸、肽和类似物、有机氧化合物、脂质和类脂质分子、有机杂环化合物和苯丙烷和聚酮化合物占总化合物的 90 %左右。基于网络分析用于评估不同培养时间之间的 DSE 胞外代谢物相关性和相互作用，并揭示潜在的调控元件（图 8）。从模块性上看，8 d 和 12 d 的网络结构相似，网络平均聚类系数相同。8 d 是最复杂的网络，其平均度和密度均最高。

虽然不同培养时间的 DSE 胞外代谢物化合物类型占比变化不太明显，但不同培养时间 DSE 胞外代谢物组成存在很大差异，我们采用聚类分析比较了 137 种代谢物的变化情况（图 9）。当数据的分散性以层次聚类分析的形式呈现时，依赖时间变化的重要性得到了进一步的强调；这种方法特别突出显示了具有类似时间行为的特性（图 9）。这导致了 5 种不同的特征行为对应：（a）化合物主要在 DSE 培养 20 d（Phase III）累积，DSE 生长阶段含量较低，包括 L-苯丙氨酸，吲哚丙烯酸，3-甲基二氧吲哚，多巴胺，香豆酸等；（b）化合物在 DSE 培养 4 d（Phase I）时含量较高，在 8-20 d（Phase II 和 Phase III）含量较低。

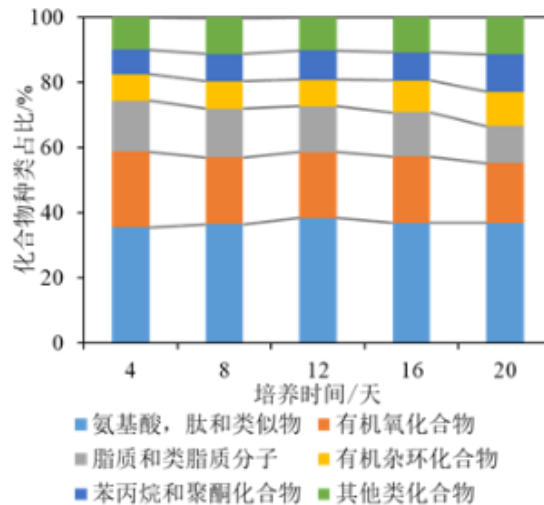


图7 DSE 胞外代谢物化合物占比

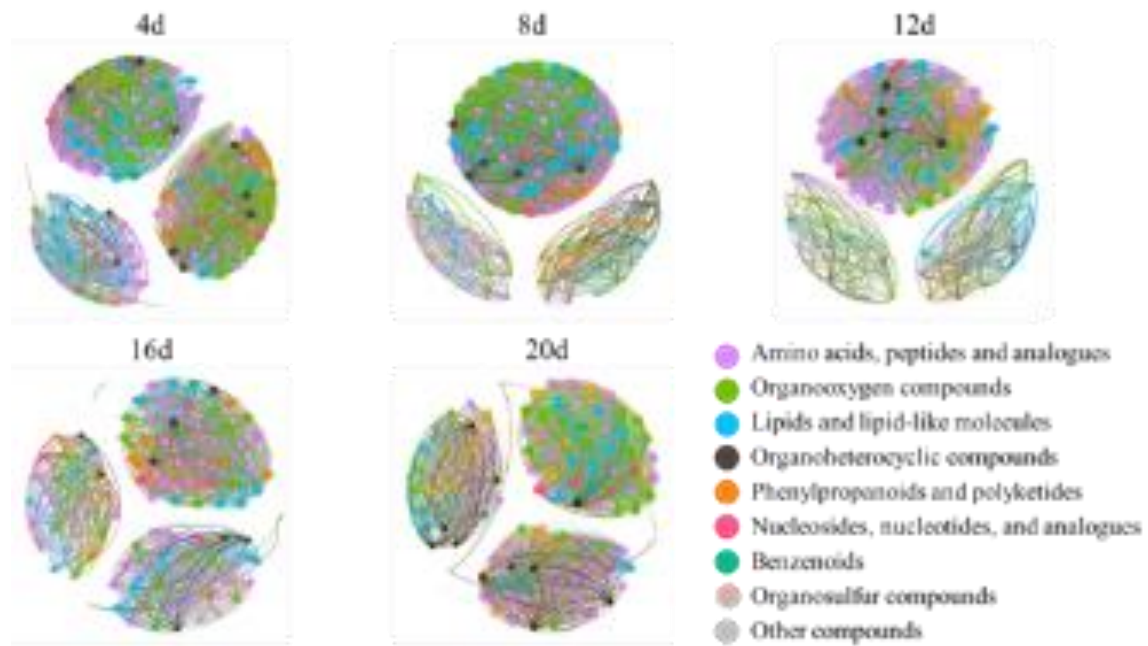


图 8 DSE 胞外代谢物网络图

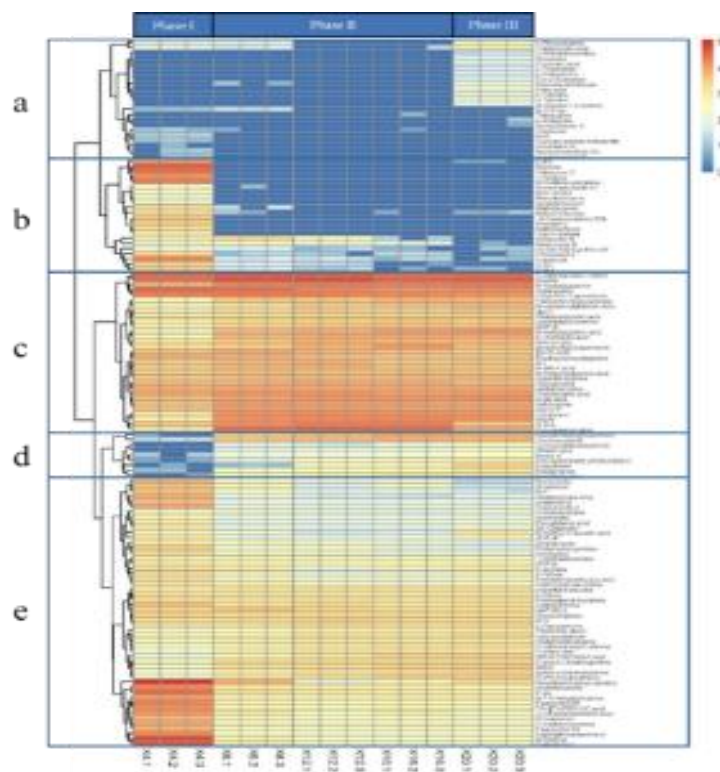


图 10 不同 DSE 胞外代谢物热图分析

五、微生物菌剂研发及其在矿区生态修复中的应用

常规液体菌剂野外规模化应用是将液体发酵菌液直接施用于根际土壤，菌剂的需求量大，且液体储存、运输成本高，大面积矿区复垦实践很难推广。考虑矿区生态修复普遍采用大面积撒播灌草种子，且地形复杂多变，采用低成本高效的菌液浸种搭载无人机飞播技术可实现多物种组合的立体快速生态修复效果。微生物菌液浸种可以促进植物健康生长，提高植物抗逆性。采用菌液浸种可以促进种子快速萌发（图 11），并显著促进植物生长，对于在

西部煤矿区植被重建具有重大的应用推广价值。



图 11 种子菌液浸种

生长活跃的 DSE 菌丝体相比微菌核在土壤中生长更快、更活跃。DSE 菌液及代谢物可以浓缩菌丝体和代谢物干燥后制成 DSE 固体菌剂胶囊（图 12），也可采用矿区本地采矿伴生黏土制丸粒，具有广阔的应用前景。胶囊和丸粒固体菌剂可常温保存，解决液体菌剂不宜长期储存且运输不便等问题。DSE 在 60°C 下干燥，常温保存 20d 仍可保持 DSE 生物活性，固体菌剂研发可延长 DSE 菌存活时间，更大程度发挥其促进矿区生态恢复的价值。菌剂接种到根际土壤后繁殖迅速，侵染率高。培养 10d 的 DSE 固体菌剂对紫花苜蓿的促生作用显著，能够提高紫花苜蓿的营养吸收能力。EPS 可以像胶水一样，附着在粘土和离子上，将固体颗粒保持在一起，促进土壤团聚体的形成和稳定。同时 EPS 还可以提高土壤的持水能力，减少土壤的水土流失，增强土壤的孔隙度。EPS 制成新的土壤胶结剂材料，为在矿山生态修复中的应用奠定基础。

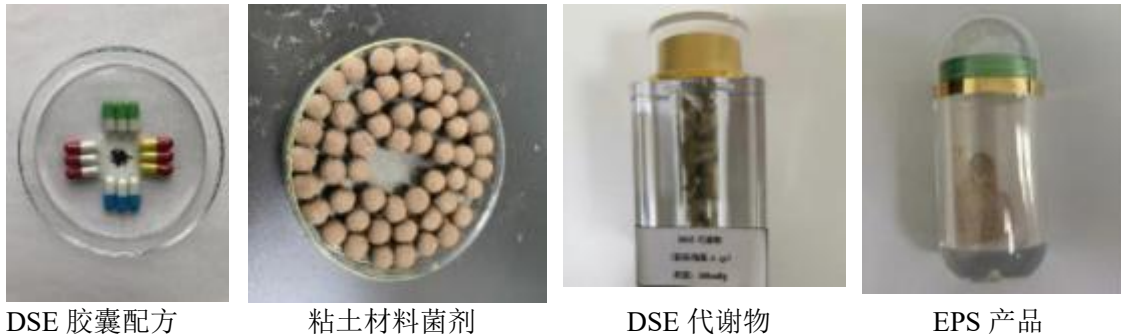


图 12 固体菌剂研发

六、煤矸石解磷菌株筛选分离、保育研究及其生态修复应用

从煤矸石表面经过初筛得到的多株菌株经过分离纯化，最终筛选四株效果较好的菌株，分别命名为 BBS-A、BBS-B、BBS-C、BBS-D，在固体培养基上培养 48h 观察菌落形态，见图 13。

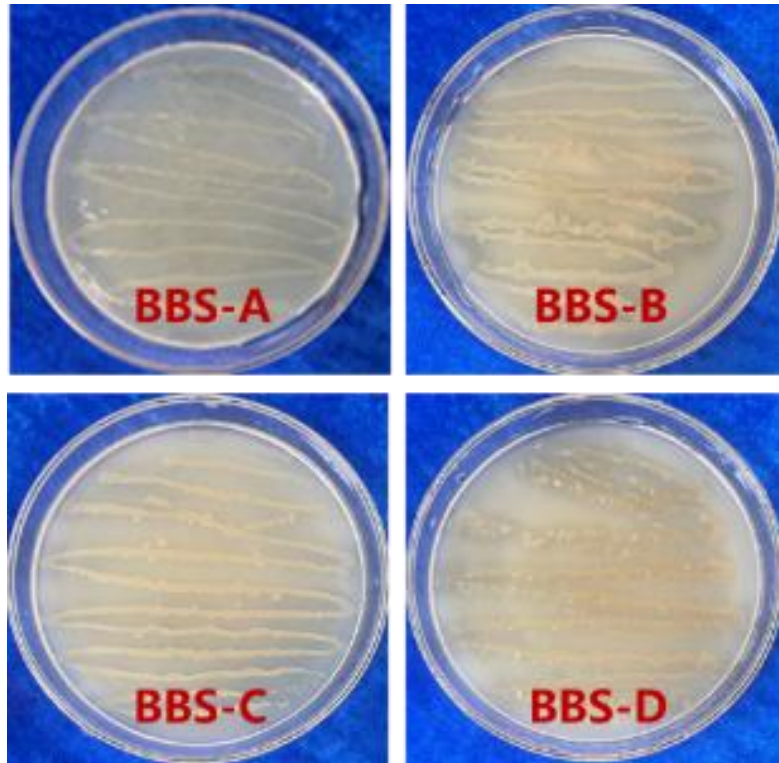


图 13 菌株 BBS-A、BBS-B、BBS-C、BBS-D 的菌落形态

表 1 菌株大小及形态特征描述

菌株编号	菌株大小 (mm)	革兰氏染色	菌落形态特征
BBS-A	2-4	G^-	菌株形状为圆形, 菌株颜色为乳白色, 表面略干燥, 扁平, 不透明
BBS-B	5-6	G^-	菌株为圆形, 颜色浅黄色, 表面湿润, 中间凸起不透明
BBS-C	4-6	G^-	菌株形状为不规则形状, 菌株颜色白色, 表面湿润有光泽, 不透明, 边缘有齿状
BBS-D	9-10	G^-	菌株菌株颜色为浅棕色, 表面有光泽, 中间凸起, 略微透明, 边缘不规则

对长势良好的菌株进行形态描述, 见表 1, 在同种培养条件下 BBS-A 菌株相比于其余三种细菌生长的菌落小, 革兰氏染色均呈阴性, 形态为不规则或圆形生长, 颜色浅, 扁平或略有光泽。在培养 24 后分别记录四种解磷菌培养液的 pH 和 $[\text{OD}]_{600}$ 值 (图 13), 结果表明, 不同细菌培养液的 pH 在 7.5-8.2 之间, 其中 BBS-D 细菌培养相同时间的 pH 最低, 其次是 BBS-A 和 BBS-C, 在 8.0 左右, BBS-B 培养液的 pH 最高, 与 BBS-D 相差 0.7。600nm 处测量细菌培养液的吸光度值记为 $[\text{OD}]_{600}$, 对比不同细菌的 $[\text{OD}]_{600}$, 可以看出 BBS-A 的细菌培养液浓度最大, 生长速度快, BBS-D $[\text{OD}]_{600}$ 为 0.8, 生长缓慢, BBS-A 和 BBS-C 在 37°C 环境下能够快速生长, 更有利于培养繁殖。

七、煤基固废微生物-植物协同资源化利用技术探索与实践

四种菌株浸泡处理后煤矸石速效磷含量显著高于对照组，分别是对照组处理的 1.54 倍、1.35 倍、1.11 倍、1.50 倍；不同解磷菌对煤矸石活化效果依次是 BBS-A>BBS-D>BBS-B>BBS-C，其中解磷菌 BBS-A 的活化能力最强，活化后煤矸石速效磷含量高达 22.39 mg/kg。

煤矸石与解磷菌菌液混合培养 3 d，间隔 1 d 测定反应液的 pH，实验结果如图 14B，四种菌株的反应液 pH 呈现增长趋势，煤矸石呈碱性，实验开始时不同解磷菌培养液液 pH 在 7.56~8.22 之间，随着反应时间增加，解磷菌与煤矸石反应液 pH 均呈现先降低后增加的趋势，解磷菌 BBS-A 反应液 pH 由初始值 7.95 反应 1d 降低至 7.10。煤矸石呈碱性，pH 值为 8.63，随着浸泡时间延长，解磷菌活化作用煤矸石，四种菌株与煤矸石混合培养 3d 后反应液 pH 增加至 8.70 左右。

不同解磷菌菌液添加量对煤矸石养分含量的影响如图 15 所示，添加不同量菌液活化处理的煤矸石样品养分含量与对照组相比均有提高，随着接菌量的增加，煤矸石样品的速效磷、速效钾、有机质、全氮含量呈现先增加后降低的趋势。煤矸石的速效磷、速效钾、全氮含量均表现为接种 70 mL 解磷菌菌液时最高，速效磷含量较其余接菌量分别增加了 89.94%、58.94%、9.70%、5.41%，较 CK 相比提高了 53.18%；速效钾含量分别是其余接菌量的 1.79 倍、1.74 倍、1.47 倍、1.01 倍，较 CK 相比提高了 16.05 %。煤矸石有机质含量在接菌量 50 mL 时最大，是接菌量 70 mL 的 1.74 倍。接菌量由 10 mL 增加至 70 mL，相同煤矸石添加量的条件下，与煤矸石相互作用的菌体量适当增加，进而活化煤矸石养分效果增强，随着接菌量增加至 90mL，活化后煤矸石速效钾和有机质含量与接菌量 70 mL 之间差异不显著，接菌量过高或过低均影响解磷菌对煤矸石活化作用，综上，添加菌液量 70 mL (煤矸石:接菌量固液比=1:7)解磷菌对煤矸石的养分活化效果最好。

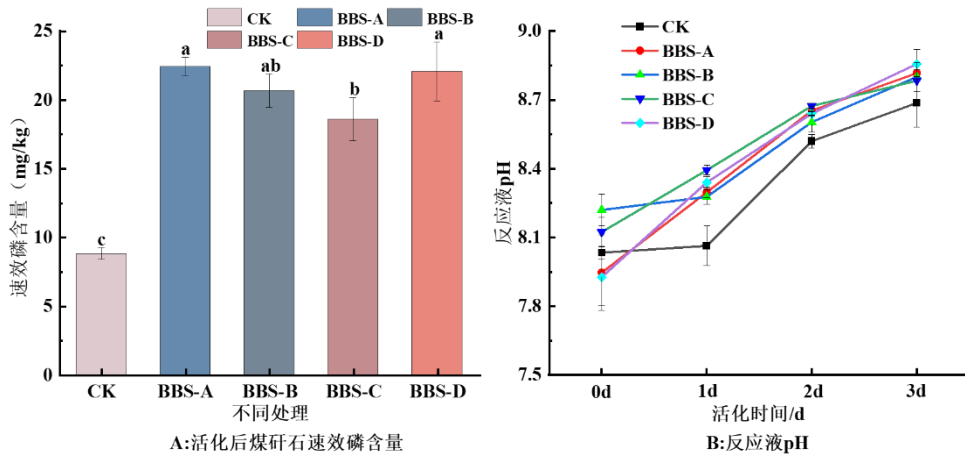


图 14 不同解磷菌活化对煤矸石速效磷及反应液 pH 变化的影响

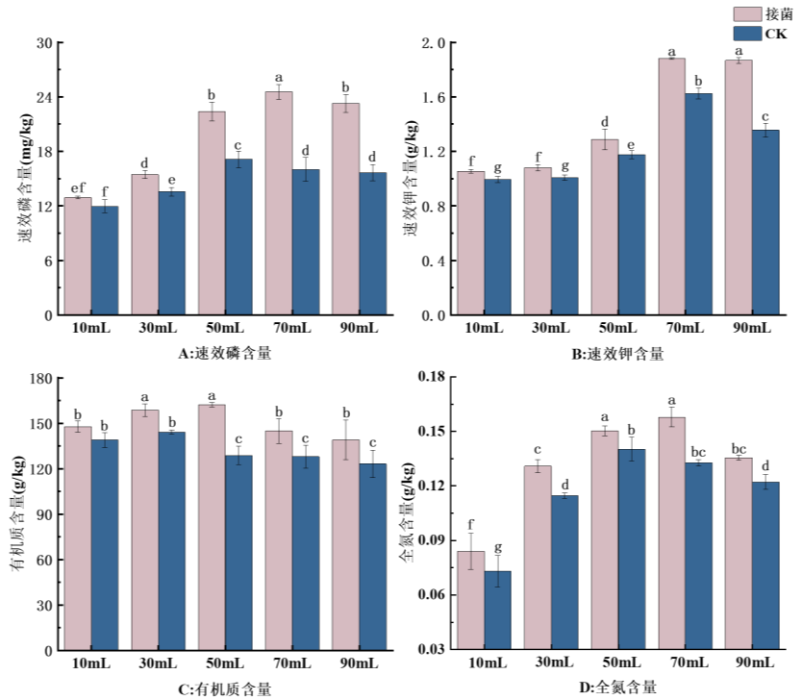


图 15 接种量对活化处理后煤矸石养分含量影响

八、矿区生态修复中的碳汇效应与贡献研究

叶片分解后期，HD 及 GRSP 含量均与矿物结合碳组分的有机碳含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度值存在显著正相关（图 14），但仅 GRSP 与矿物结合碳组分 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度值的相关性不存在植被差异性且具备持久性，这或许代表着相较于菌丝，GRSP 参与矿物结合碳形成的作用更直接。偏最小二乘路径模型（PLS-PM）的结果也表明在叶片化学及环境因子差异较小的条件下，GRSP 含量对团聚体碳组分动态的正向影响最大，其次是 AMF 菌丝密度(包括通过球囊霉素的间接影响)(图 16)。因此，我们有理由猜测 GRSP 是采煤恢复区鲜叶输入后菌根处理对土壤碳动态的调节作用的主要控制因素，且随机森林结果进一步证实了我们的假设。正如我们在沙棘样地中所发现的，最大的 GRSP 增量对应着最大的 MAOM- $\delta^{13}\text{C}$ 富集（图 16）。总之，我们的结果从稳定同位素的角度进一步强调了 GRSP 参与矿区复垦地团聚体碳动态的重要性

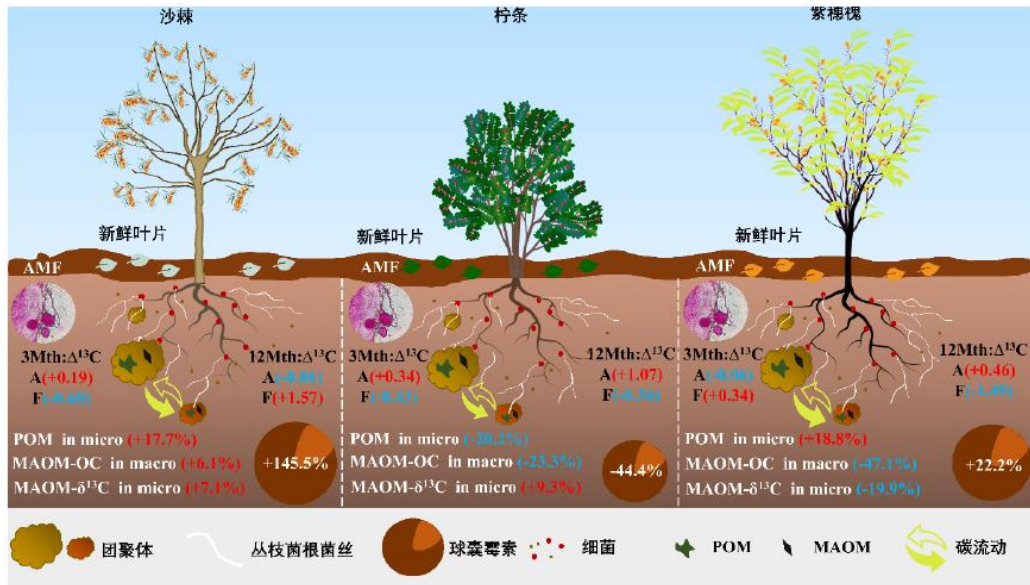


图 16 丛枝菌根真菌对煤矿复垦区土壤碳组成动态的调控作用示意图。概念图显示 1 年孵育处理下土壤碳组成动态的差异

在人工林和草地中，碳由小团聚体向粉砂+粘土流动，在灌丛中则由微团聚体向粉砂+粘土流动， $\delta^{13}\text{C}$ 趋于富集，不同植被恢复模式下团聚体 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异很大程度上受有机质输入的影响（图 17）。不同植被恢复样地凋落物和根系中 $\delta^{13}\text{C}$ 含量差异显著。凋落物和根系对分解的抗拒程度不同，导致凋落物进入土壤的初始状态不同。与草原和杨树区相比，紫穗槐和沙地柏区的叶片呈针状，更难以分解。因此，草地凋落物的 $\delta^{13}\text{C}$ 最接近表层土壤小团聚体的 $\delta^{13}\text{C}$ ，而紫穗槐和沙地柏地区凋落物的 $\delta^{13}\text{C}$ 最接近根系。随着土层深度的增加，各类型土壤根系与团聚体之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异显著减小，这更有可能是团聚体中碳流的起点。因此，不同植被类型在外源有机质输入后的命运是不同的。乔草区地上部和根部生物量显著高于灌丛区。大团聚体通常在大碎块附近形成。此外，草原区土壤微生物的分解代谢率高于人工林，导致矿物质成分富集，代谢物更多。灌丛区植被多样性较低，碳源主要为根系凋落物和渗出物，进入土壤后首先在土壤颗粒和较小粒径的矿物附近积累。

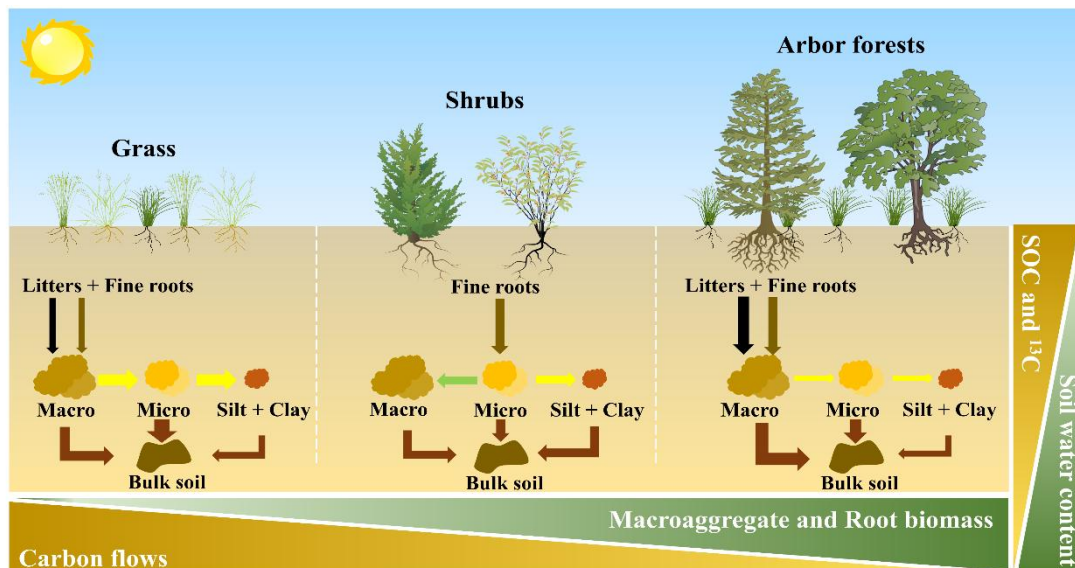


图 17 不同植被类型碳流路径

九、土壤重构与微生物联合调控技术在土壤改良与植物促生中的应用

不同处理土柱在 10 cm 与 50 cm 剖面的土壤水分运移特征如图 18 所示，在 10 cm 土层剖面，无隔层 CK 处理 SWC 变化剧烈，波动幅度达到 5.7%，AL、AM 处理则相对稳定(波动幅度 2.8%)；随着试验的进行 4、7 cm 隔层中 AM 处理 SWC 较 CK、AL 处理开始显著降低 ($p<0.05$)，10 cm 隔层处理间无显著差异。在 50 cm 土层剖面，无隔层 CK、AL、AM 处理在 7.19 灌溉后产生显著差异，AM 处理 SWC 显著升高，其次为 AL 处理，CK 处理变化最慢，4、7cm 隔层 AM 处理 SWC 较 CK、AL 处理开始呈现变低的趋势，表明接种 AM 增加了苜蓿对水分的吸收利用，10cm 隔层下，三组处理之间的 SWC 之间并无明显差异。

土壤中的水分主要来源于底部的涵水层，10~50 cm 生态层土壤中的水分由上至下呈升高趋势(图 19)，在 50 cm 土层剖面中，不同隔层之间的 SWC 的差异最明显，CK 处理无隔层与 4 cm 隔层之间并无太大差异，而 7、10cm 隔层 SWC 相较无隔层(9.8%)则分别减少了 16%，26%，AL 处理的平均 SWC 随着隔层厚度增加呈减少趋势，4、7、10 cm 隔层相较无隔层(10.9%)分别降低了 16%、33%、40%，AM 处理在 4、7 cm 隔层的平均 SWC 表现最低，相较于无隔层(10.9%)均降低了 51%，10 cm 隔层则降低了 33%。

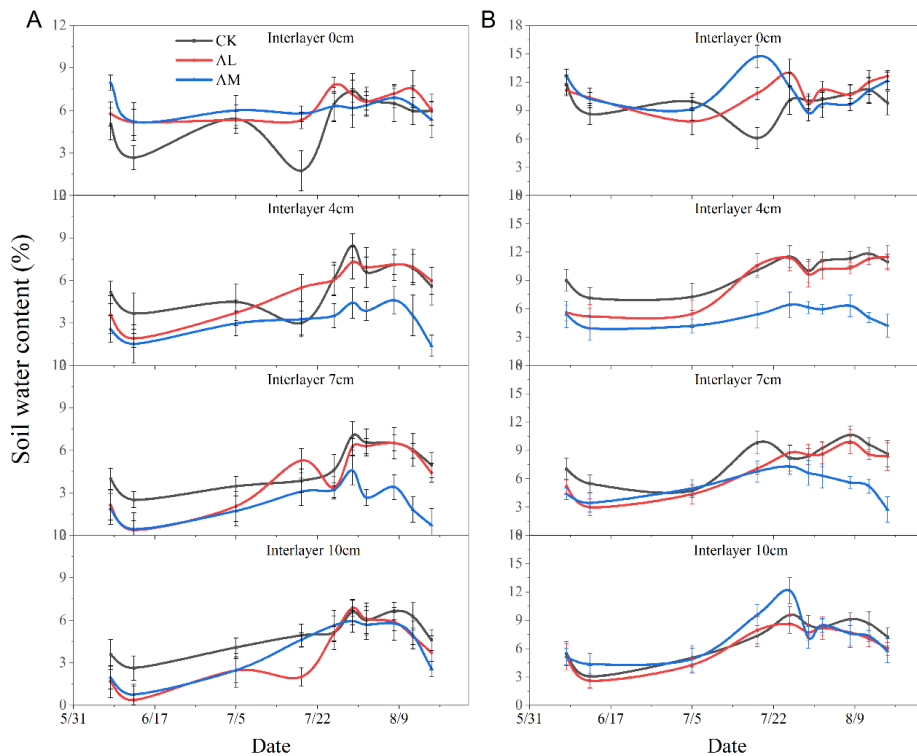


图 18 深度为(A) 10 cm 与(B) 50 cm 土层剖面位置处的 CK、MX、AM 的 SWC 在不同厚度隔层中随时间序列的变化

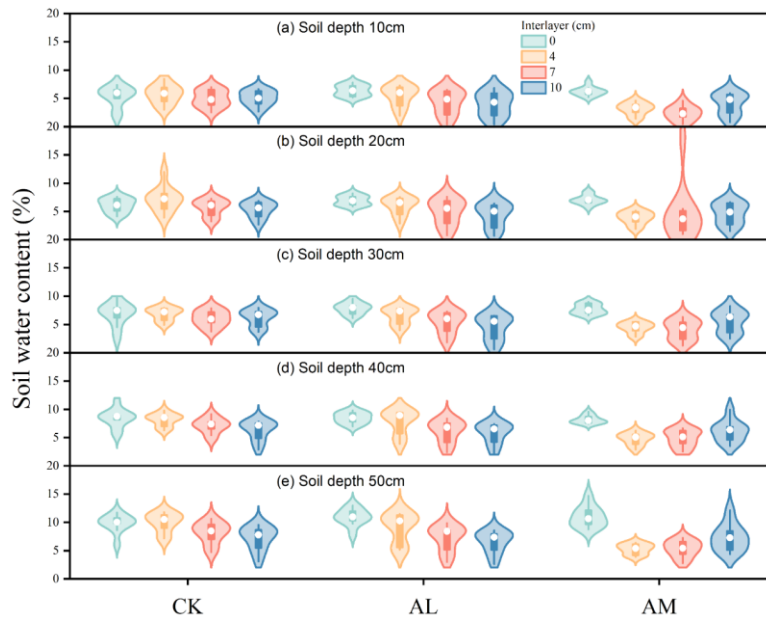


图 19 不同处理的土壤含水率 (SWC) 分布特征

十、矿区生态系统服务价值变化与生态修复效果评估

由图 20a 和图 20b 可知，自 1988 年以来，准格尔矿区的年降水量和年平均温度均存在多次波动，就年均降水量而言，该区域历年年均降水量维持 379~420 mm 之间，而在对气象台站获取的年均降水量统计发现，多数时间内，该区域的降水量处在较低水平，在近年来，在全球气候变暖的背景下，准格尔旗年平均气温连续七年高于历年平均气温（年平均气温 7.8℃）。33 a 间平均相对湿度呈明显逐渐降低趋势（图 20c）。另外，在对极端天气情况进行统计时（图 20d），发现自 1988 年以来，年内气温高于 35 °C 的天数在进入 2005 年之后明显增多，但是在 2011 年之后明显开始减少。

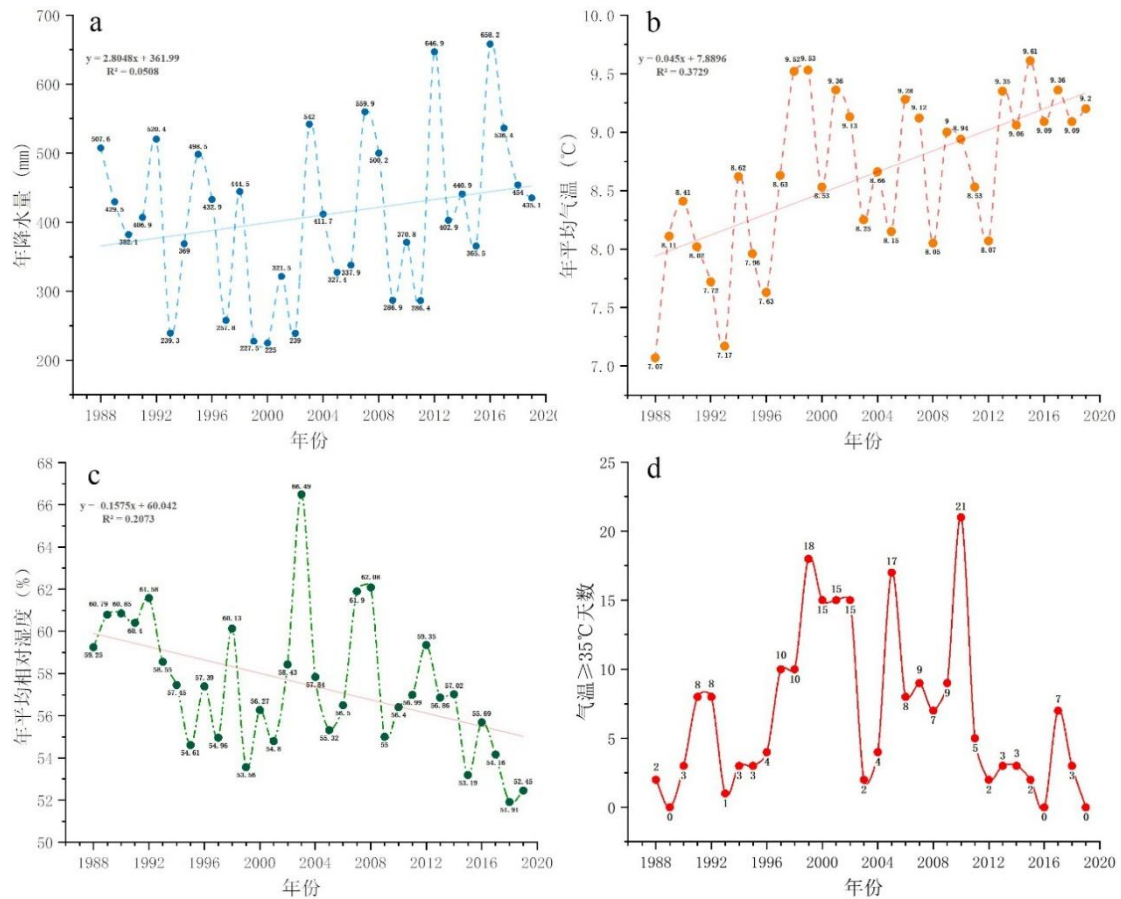


图 20 准格尔矿区气象状况时序变化

准格尔矿区的遥感图像及植被覆盖度如图 21。1988 年准格尔矿区遥感图显示矿区未开始建设，周边植被状况整体较差；矿区建设初期即 1990 年，开始出现大面积的裸土地，植被整体状况仍处于较低水平；而到 1994 年矿区投产初期，矿区开展了排土场复垦，排土场首次出现人工植被；1998 年左右，矿区排土场复垦力度不断加大，矿区周边的未扰动植被状况也得到明显改善；进入 21 世纪后，2003 年矿区向西南方向推进，产能不断扩大，矿区东北部排土场人工植被的面积明显增加，矿区外围未扰动植被盖度不断增加；2007 年矿区范围持续向西南方推进，东北部人工植被面积不断增长，矿区裸土地大面积增加，而在这一时期，矿区外围未扰动植被的状况得到明显提升，包括周边沟壑内的植被也保持一个良好的生长态势；2013 年矿区西南部排土场开始复垦，部分裸土地上出现植被覆盖，矿区外围未扰动植被盖度大幅提升；到 2016 年和 2019 年，随着矿区复垦面积不断增加，矿区外围未扰动植被仍保持着良好的生长状况。

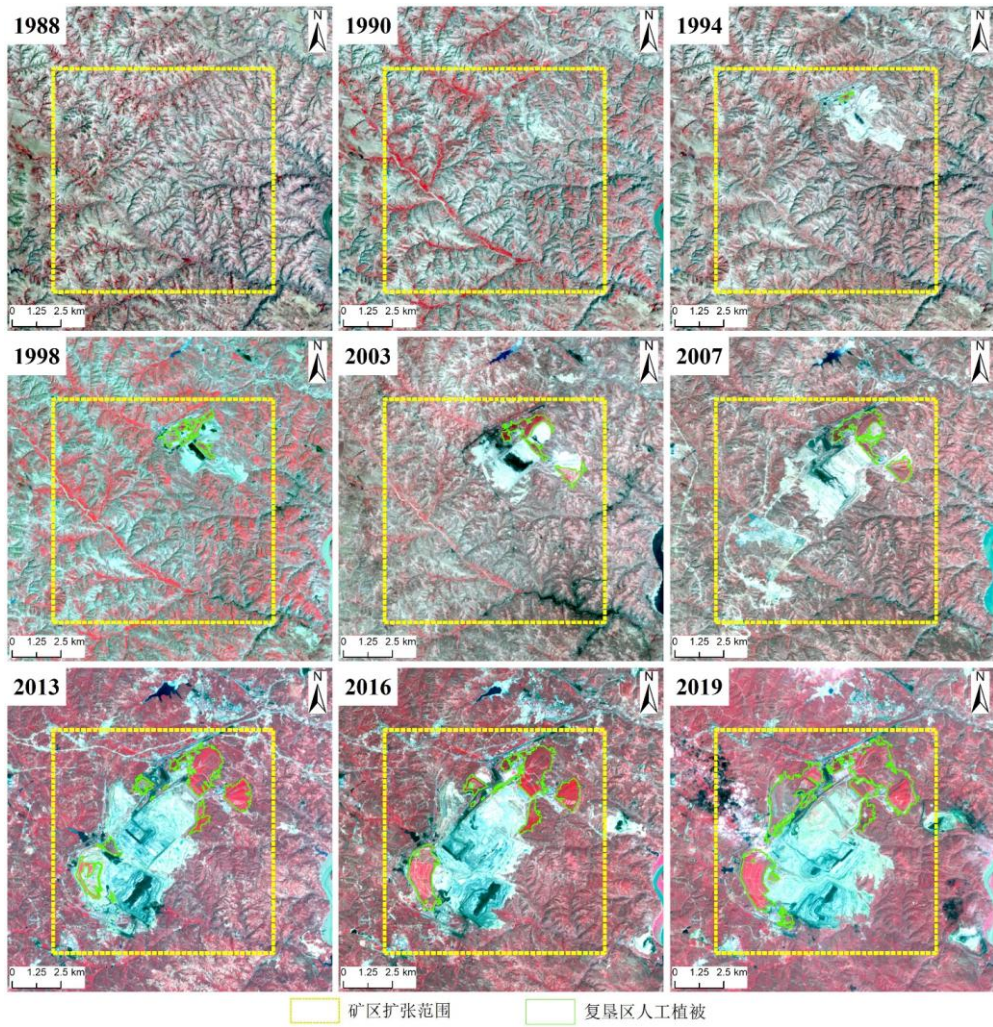


图 21 准格尔矿区遥感图像（1988 年~2019 年）



图 22 典型矿区修复前后效果图

结语

煤炭开采引发的地表沉陷、盐碱化及煤基固废污染等问题严重威胁矿区生态环境，传统修复方法因成本高、效率低而难以满足可持续治理需求。本案例以提出以微生物技术为核心的生态修复策略，通过筛选耐盐植物碱蓬、解析根系真菌定殖特征，结合丛枝菌根真菌（AMF）、深色有隔内生真菌（DSE）及煤矸石解磷菌等关键微生物资源，构建了“植被筛选-微生物修复-固废资源化-碳汇增效”技术体系。DSE 菌株耐盐特性可有效改良盐碱土壤，其胞外代谢物显著促进植物生长；AMF 与植物互利共生机制提升了复垦区植被存活率；煤矸石解磷菌的筛选与应用实现了固废资源化及土壤肥力提升。通过整合微生物修复与生态工程措施，矿区复垦成本降低，修复周期缩短，且碳汇效应与生态系统服务价值显著提升。未来需进一步优化微生物菌剂性能，探索多菌株协同增效机制，并加强长期定位观测以验证技术稳定性。针对不同矿区环境差异，应推动菌株适应性改造与技术标准化，结合智能监测技术提升修复精准性。此外，需深化生态修复经济效益分析，探索“生态-经济”协同模式，为绿色矿山建设提供可复制的技术范式。最终目标是实现矿区生态低成本、长时效恢复与碳中和目标的统一，助力矿业绿色转型与可持续发展。

案例思考题：

1. 碱蓬作为矿区优势植物，其根系真菌结构特征有哪些独特之处，采矿活动对植物根际真菌定殖有哪些具体影响？
2. 矿区复垦过程中，生物结皮和丛枝菌根真菌共生机制是什么。如何优化植被类型与生物结皮、丛枝菌根真菌的组合，以提高土壤质量和植被恢复效果？
3. 在筛选耐盐 DSE 菌株的过程中，如何确保筛选结果的准确性和可靠性？ DSE 胞外代谢物对植物生长的具体作用机制是什么？ 在土壤改良和植物生长促进方面，DSE 胞外代谢物与其他传统方法相比具有哪些优势和不足？
4. 如何优化微生物-植物协同作用以提高煤基固废的利用率？
5. 土壤重构与微生物联合调控技术是如何改善土壤质量的？请详细解释其作用机理。
6. 生态修复措施对矿区生态系统服务价值的影响有哪些？矿区生态系统恢复力的提升与哪些因素有关？

案例使用说明：

1. **适用范围：**本案例适用于生态学、环境科学与工程、微生物学、土壤学、生态修复学、地理学相关专业的本科生教学。
2. **配套教材：**《生态学》《环境微生物》《土壤学》《地理学》。
3. **教学目地：**培养学生的科研素养和实践，理论联系实际和批判性思维和解决问题的能力。
4. **关键点：****相关理论：**AMF 丛枝菌根真菌形态与生理，DSE 深色有隔内生真菌形态与生理，植物耐盐生理，土壤养分循环与碳固存，生态系统服务功能。**关键知识点：**植物-微生物互作，功能微生物筛选，生态系统服务价值评价。**关键能力点：**根际微生物分离与镜检，微生物纯化与接种，植物耐盐生理指标测定，土壤养分指标测定。案

例分析思路：先介绍矿区生态环境问题的背景、盐碱地土壤微生物修复和当前的研究进展。了解耐盐 DSE 菌株的筛选、鉴定及其应用的基本原理和方法。引导学生分析耐盐 DSE 菌株在盐碱地土壤微生物修复中优势。探究煤基固废微生物-植物协同资源化利用技术应用和实践。系统分析矿区生态系统服务价值评价方法。

5. **教学建议：** **时间安排：** 32 课时。 **环节安排：** 理论课讲解、实验课操作、小组讨论。 **人数要求：** 60 人。 **教学方法：** 理论讲解+实验教学+合作讨论。 **活动建议：** 以学生动手和讨论为主，强化实验操作与解决问题能力。
6. **推荐阅读：** 《Plant-Microbe Interactions: Ecology and Genomics》 《Environmental Microbiology: Molecules to Communities》 《土壤生物化学》。

参考文献：

- [1]解琳琳,毕银丽,刘涛.东部草原露天矿区接种 AMF 对植物-土壤养分积累及本土 DSE 定殖的影响[J/OL].煤炭学报,1-15.
- [2]薛子可,毕银丽,王义.不同浓度深色有隔内生真菌浸种对玉米幼苗生长的影响[J].种子,2022,41(06):23-26.
- [3]毕银丽,李璞宁,郭芸.半干旱区丛枝菌根真菌复垦地生物结皮胞外酶活性及化学计量特征[J].煤炭学报,2024,49(08):3593-3604.
- [4]毕银丽,郭芸,刘峰,等.西部煤矿区生物土壤结皮的生态修复作用及其碳中和贡献[J].煤炭学报,2022,47(08):2883-2895.
- [5]毕银丽,谭海,张士双,等.深色有隔内生真菌不同培养时间对胞外聚合物合成的影响[J].微生物学报,2024,64(04):1175-1186.
- [6] Tan Hai, Bi Yinli, Zhang Shishuang, et al., Growth of alfalfa in the presence of metabolites from a dark septate endophyte strain *Alternaria* sp. 17463 cultured with a nonionic surfactant and emulsifier[J]. JOURNAL OF APPLIED MICROBIOLOGY,2023,134(10): 1xad226
- [7]毕银丽,宋雅宁,白雪蕊,等.DSE 及其代谢物对紫花苜蓿促生作用及其矿区生态修复潜力[J].煤炭科学技术,2023,51(12):90-99.
- [8]毕银丽,彭苏萍,王淑惠.西部煤矿区深色有隔内生真菌修复机理与生态应用模式[J].煤炭学报,2022,47(01):460-469.
- [9]王淑惠,毕银丽,李梦琪.不同培养期深色有隔内生真菌链格孢菌对紫花苜蓿生长的影响[J].菌物学报,2021,40(10):2863-2873.
- [10]毕银丽,宋雅宁,白雪蕊,等.AMF 和 DSE 对紫花苜蓿生长发育及叶片代谢组分的影响[J].菌物学报,2024,43(05):83-97.
- [11]彭苏萍,毕银丽.钱鸣高院士指导西部干旱半干旱煤矿区生态修复研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(05):857-860..
- [12]毕银丽,王苗优,柯增鸣.叶面涂抹 DSE 菌液对蛋白桑生长发育影响及其生态修复前景[J].煤田地质与勘探,2023,51(02):187-194.
- [13]毕银丽,陈书琳,孔维平,等.接种微生物对大豆生长及其根际土壤的影响[J].生态科学,2014,33(01):121-126.
- [14]裘浪,全文智,毕银丽,等.覆膜与接种微生物对半干旱区玉米生长特性和水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(10):7-13.

- [15]于淼,毕银丽,张翠青.菌根与根瘤菌联合应用对复垦矿区根际土壤环境的改良后效[J].农业工程学报,2013,29(08):242-248.
- [16]刘英,魏嘉莉,毕银丽,等.红沙泉露天煤矿碳储量时空动态变化分析[J].煤炭学报,2022,47(S1):214-224..
- [17]刘英,林家权,岳辉,等.荒漠化矿区不同土地利用类型土壤呼吸及其影响因子[J].煤炭学报,2023,48(07):2893-2905.
- [18]张小平,李明超,毕银丽,等.露天煤矿排土场长期混交林种植后土壤团聚体有机碳累积效应[J/OL].煤炭科学技术,1-15.
- [19]王桂林,李明超,毕银丽,等.排土场不同培肥模式团聚体有机碳的累积效应[J].水土保持通报,2024,44(03):307-316.
- [20]毕银丽,郭晨,肖礼,等.微生物复垦后土壤有机碳组分及其高光谱敏感性识别效应[J].煤炭学报,2020,45(12):4170-4177.
- [21]毕银丽,李晗,柯增鸣,等.接种 AMF 对海绵结构重构土层的玉米根系分布及水分利用特征的影响[J].水土保持通报,2024,44(01):1-8+19.
- [22]毕银丽,柯增鸣,高学江.西部露天排土场有机生物改土对紫穗槐水分利用效率影响[J].绿色矿山,2023,1(01):119-127.
- [23]毕银丽,杨伟,柯增鸣,等.接种 AMF 对西部煤矿区紫穗槐根系分布和水分利用效率的影响[J].煤炭科学技术,2024,52(03):311-322.
- [24]毕银丽,杨伟,柯增鸣,等.AMF-玉米联合对“表土层-含水层-隔水层”排土场重构模式土壤水盐分布的影响[J].煤田地质与勘探,2023,51(04):68-75.
- [25]毕银丽,刘涛.露天矿区植被协同演变多源数据时序分析——以准格尔矿区为例[J].煤炭科学技术,2022,50(01):293-302.
- [26]毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(05):1355-1364.
- [27]毕银丽,刘涛.露天矿区植被协同演变多源数据时序分析——以准格尔矿区为例[J].煤炭科学技术,2022,50(01):293-302.