

乌鲁木齐苏拉布拉克煤田火区生态修复技术应用与综合效益分析

豆龙辉^{1,2*} 姚遥³

1 新疆维吾尔自治区地质局煤田地质中心

2 新疆大学

3 新疆维泰开发建设（集团）股份有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i10.2928

[摘要] 乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区位于天山北坡生态敏感带,其煤层自燃所引发地表塌陷、土壤退化与植被消亡等问题,对生态安全构成严重威胁。本文以乌鲁木齐南山苏拉布拉克火区为典型案例,构建并实践了一套集“地形重塑—土壤快速改良—植被群落重建”于一体的生态修复技术体系。通过完整的适应性设计与工程实施,验证了该技术体系在高山技术可行性与应用效能,更进一步构建了涵盖生态、经济与社会维度的综合效益评价框架。本文研究为矿山生态修复提供了可量化的效益证据和“修复—增益—发展”的系统性解决方案,对推动生态产品价值实现与区域可持续发展具有重要的理论与实践意义。

[关键词] 煤田火区; 生态修复; 系统治理; 高海拔地区; 效益评价

中图分类号: P641.4+61 文献标识码: A

Application of Ecological Restoration Technology and Comprehensive Benefit Analysis of Fire Zone in Sulabak Coalfield in Urumqi

Longhui Dou^{1,2*} Yao Yao³

1 Xinjiang Coalfield Geological Survey Center

2 Xinjiang University

3 Xinjiang Weitai Development and Construction (Group) Co., Ltd.

[Abstract] The Sulabak coalfield fire zone in the Nanshan area of Urumqi is located in the ecologically sensitive zone of the Tianshan Mountains 'northern slope. The spontaneous combustion of coal seams has caused surface subsidence, soil degradation, and vegetation loss, posing a serious threat to ecological security. Taking the Sulabak fire zone in Nanshan as a typical case, this study establishes and implements an integrated ecological restoration technology system combining "terrain reshaping—rapid soil improvement—vegetation community reconstruction." Through comprehensive adaptive design and engineering implementation, the technical feasibility and application efficacy of this system in high-altitude environments were verified, further establishing a comprehensive benefit evaluation framework encompassing ecological, economic, and social dimensions. This study provides quantifiable evidence of benefits and a systematic "restoration-gain-development" solution for mine ecological restoration, offering important theoretical and practical significance for promoting the realization of ecological product value and regional sustainable development.

[Key words] coalfield fire zone; ecological restoration; systematic governance; high-altitude areas; benefit evaluation

引言

煤炭资源的开发为区域经济发展提供了重要动能,但其引发的次生环境灾害,尤其是煤层自燃形成的煤田火区,已成为严

峻的生态顽疾^[1]。乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤矿火区地处天山北坡中山带,是乌鲁木齐市重要的生态屏障和水源涵养区。由于粗放开采,该火区持续燃烧,不仅造成大量煤炭资源损毁,更导

致地表植被消亡、土壤结构彻底破坏,并形成一系列串珠状塌陷坑,严重加剧了水土流失与地质灾害风险^[2]。其释放的温室气体与粉尘污染物,对区域大气环境与居民健康构成直接威胁。当前,在我国深入推进生态文明建设与“碳中和”战略的宏观背景下,新疆维吾尔自治区对乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤矿火区开展系统治理与修复^[3]。开展乌鲁木齐南山煤田火区生态修复及研究,不仅可减少煤炭资源浪费、降低大气污染物排放、改善区域生态环境,还能为我国煤炭资源型地区生态修复与可持续发展提供理论依据和技术支撑,进而推动煤炭资源开发与生态环境保护的协同共进。

乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区地处天山北坡生态敏感带,其煤层自燃所引发的地表塌陷、土壤退化与植被消亡等一系列生态环境问题,已成为制约区域生态安全与可持续发展的重要因素^[2]。本研究以乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区为研究对象,在系统考察其气候、水文、地形地貌、土壤及植被等本底条件的基础上,集成并实践了“地形重塑—土壤改良—植被重建”一体化的生态修复技术体系。通过实施水平平整地、精准施肥、多物种混播及防晒网覆盖等关键技术,不仅构建了适于极端立地条件的植被快速恢复路径,并进一步从生态、经济与社会三个维度对修复效益进行了综合分析评价。

1 研究区概况

1.1 地理位置

乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区行政上隶属于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐县,距离省会乌鲁木齐市40~60公里,地处天山北坡中段、乌鲁木齐河上游流域。本研究选取乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区中的联丰源火区(东经: 87° 19' 21.20", 北纬: 43° 19' 05.80")与苏拉布拉克4号火区(东经: 87° 07' 44", 北纬: 43° 18' 49")为研究对象。

1.2 气象

乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区属典型的山地气候,受海拔梯度影响显著,呈现“高海拔降水中心、垂直梯度显著、极端事件频发”的特征。夏季凉爽多雨,冬季少雪,来自西北部的干燥风和寒流被北面高山所阻隔,从而使本区表现为明显的山间盆地气候。

1.3 水文

乌鲁木齐南山苏拉布拉克煤田火区周围分布两条常年性地表河流。联丰源火区东2km处马圈沟河自南向北流过,平均流量为8.73m³/s,最大流量可达290m³/s;乌鲁木齐河上游支流自西向东最终汇入大西沟水库,流量呈明显季节变化。

1.4 地形地貌

联丰源火区地处天山山系,地表高程一般在2236m~2364m之间,相对高差约128m,火区周边有三条宽沟呈135~150°方向延伸,北部为高山,南部为一宽缓沟谷,总体地势北高南低,由北

向南缓倾斜。沟谷两侧为漫坡高地势,坡度大于30°,属中低山地貌。目前在火区范围内沿煤层走向在地表形成了2~3行,呈串珠状的塌陷坑,塌陷坑呈圆形、椭圆形、长条形。

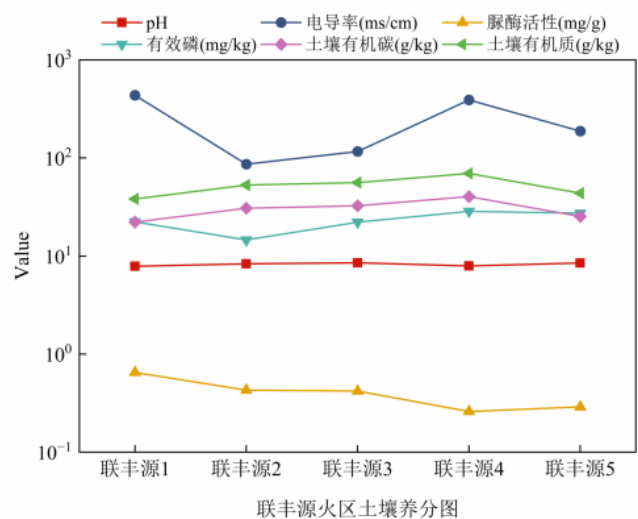
苏拉布拉克4号火区海拔在2250m~2400m之间,一般在2300m左右,最大高差100m,地形坡度一般在15°~25°,局部陡崖达60°~80°,属低山丘陵区,地形特征总体呈北高南低的斜坡地形,火区的西部为一露天采坑,采坑近似为圆形,直径约300m,深约50~100m,现露天采坑均已回填,火区周边表植被较发育。

1.5 土壤

项目区为第四纪黄土,岩性主要由洪积而成的亚砂土、亚粘土,土壤类型主要为暗栗钙土。成土母质为洪积冲积物及黄土状物质,土壤缺氮、少磷、富钾,呈微碱性反应,pH值7.8~8.7,微碱性,立地条件较好,适宜草种生长。为精准掌握联丰源与苏拉布拉克4号火区周边土壤的本底状况,进而为后续生态修复工作提供科学依据,针对这两个火区周边不同的自然区域开展土壤本底调查。在每个火区分别选取五个具有代表性的样点,采集各样点0~20cm深度的土样进行测试分析。

联丰源火区的土壤为典型的暗栗钙土,土壤厚度40cm左右,平均pH值8.23,平均电导率243.02us/cm,平均脲酶活性0.41mg/g,平均有效磷22.98mg/kg,平均土壤有机碳30.20g/kg,平均土壤有机质52.07g/kg。土壤养分状况良好,氮素转化功能未受严重损伤,土壤酸碱度符合地带性特征;但存在轻度盐化问题。整体而言,该土壤具备支撑耐盐碱草本植物定植的基础条件,属于中等偏优的矿区土壤。

苏拉布拉克4号火区为薄层黑毡土,表层有近10cm厚的草根黑土层,平均pH值8.048,平均电导率116.37us/cm,平均脲酶活性0.86mg/g,平均有效磷14.925mg/kg,平均土壤有机碳20.9874g/kg,平均土壤有机质36.1822776g/kg。土壤无盐分胁迫,脲酶活性较高,土壤氮素转化功能良好,有机质和有机碳含量符合土壤类型本底特征。



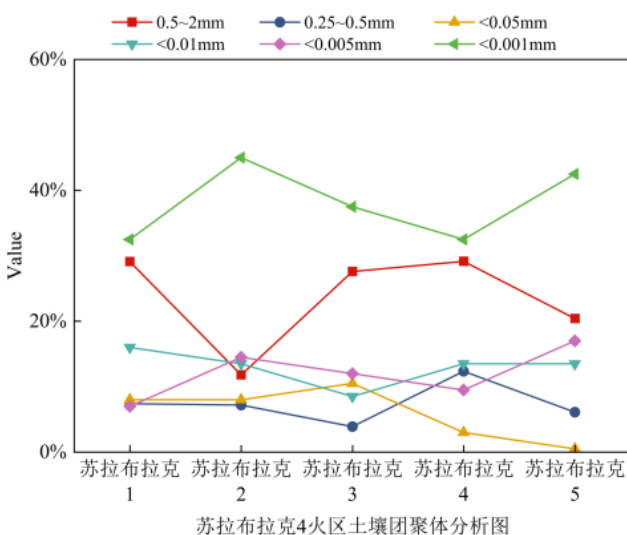
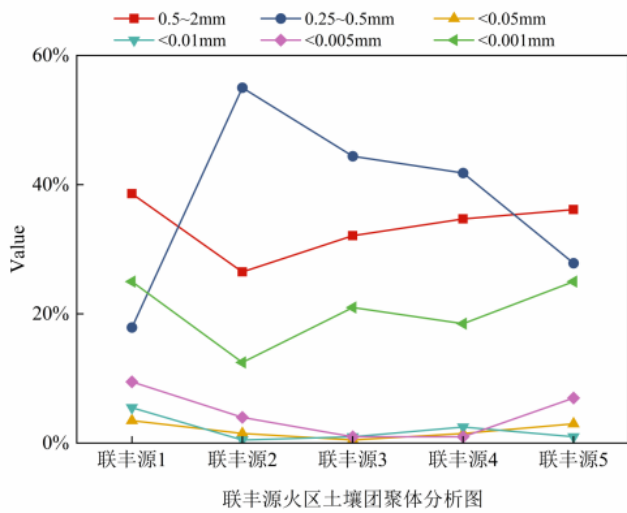
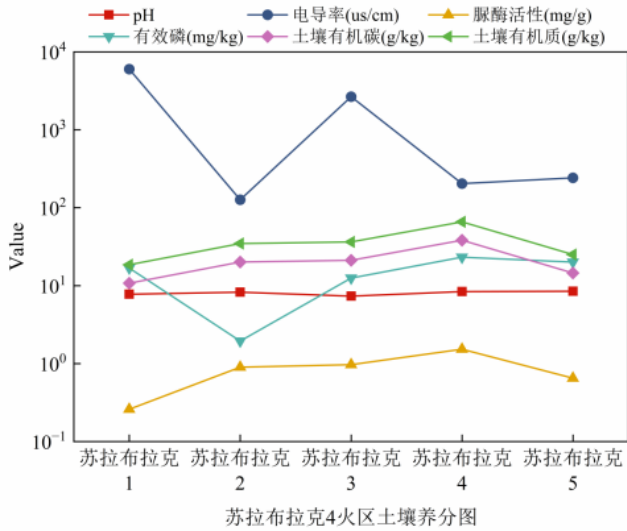


图1 土壤理化性质

1.6 植被

开展植被本底调查, 在对应火区周边分别设置5个(1m×1m)

样方点, 调查植被样方。结果显示联丰源火区地表以低矮的牧草为主, 主要为针茅草原, 植被平均盖度为7.6%, 主要物种有针茅草、芨芨草、黄芪、早熟禾、绢蒿、蒺藜, 辛普森多样性指数为0.6021。苏拉布拉克4火区地表植被较发育, 主要为针茅草群落, 植被平均盖度为18.8%, 主要植物包括针茅草、绢蒿、蒺藜、黄芪、沙草、蒲公英、地黄、早熟禾、天山点地梅、火绒草等, 辛普森多样性指数为0.757。

表1 植被数据

调查点	种类	数目	植被平均盖度
联丰源火区	针茅草	751	7.60%
	绢蒿	191	
	早熟禾	165	
	天山点地梅	152	
	黄芪	116	
	芨芨草	63	
	蒺藜	60	
	蒲公英	4	
苏拉布拉克4火区	针茅草	847	18.80%
	早熟禾	528	
	沙草	266	
	火绒草	243	
	黄芪	227	
	天山点地梅	205	
	蒺藜	164	
	蒲公英	37	
	绢蒿	34	
	地黄	7	
	扁蓄	7	
	芥菜	1	

2 火区生态修复技术应用

2.1 地形重塑

2.1.1 人工开水平沟

火区修复过程中为有效截留坡面径流、增加土壤水分入渗、创造适宜植物生长微环境,针对坡度大于 25° 的陡坡区域实施水平沟整地技术,该技术以沿等高线构建沟-垄系统为核心,采用水准仪沿等高线布点测量放线,每5m标记水平沟中心线,控制相邻桩点高差 $\leq 5\text{cm}$,沟体走向与等高线平行误差 $\leq 3^{\circ}$ 。在坡度 $>30^{\circ}$ 的陡坡段,按“之”字形分段布设沟体,转弯处设置半径 $\geq 2\text{m}$ 的圆弧过渡,避免直角急弯引发径流冲刷。人工沿标记线开挖,沟体规格为宽 $40\text{cm} \pm 5\text{cm}$ 、深 $40\text{cm} \pm 5\text{cm}$,沟壁垂直(坡度 $85^{\circ} \sim 90^{\circ}$),沟底平整且坡度 $\leq 5^{\circ}$ 。开挖土方堆置于沟体下侧,修筑高 $20 \sim 30\text{cm}$ 、顶宽 30cm 的土埂,分层夯实至压实度 $\geq 90\%$,以阻截雨水漫流。沿沟每间隔 3m 堆砌土隔,土隔尺寸为高 30cm 、顶宽 20cm 、底宽 50cm ,采用“品”字形错位砌筑,确保与沟壁紧密贴合,缝隙以细土填实,防止径流渗漏。遇岩石层时,先破除表层硬岩至设计深度,清除粒径 $>5\text{cm}$ 的碎渣;通过塌陷裂隙区时,在沟底铺设 10cm 厚碎石垫层(粒径 $5 \sim 15\text{mm}$),以增强透水与结构稳定性。

2.2 人工整地

清障阶段人工清除沟内直径 $>5\text{cm}$ 的石块、树根等杂物,并将其集中运至指定弃渣场,确保沟内无障碍物。对粒径 $>3\text{cm}$ 的土块进行破碎,使土壤颗粒均不大于 3cm ,随后翻耕 $15 \sim 20\text{cm}$ 深度,疏松土层以利于种子着床。使用铁锹或耙子进一步碎土平整,控制沟底表面平整度误差 $\leq 2\text{cm}$ 。同时对沟壁进行修整,拍实松散土块,维持 $85^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的坡度,防止边坡坍塌堵塞沟槽。整套工序旨在将不稳定陡峭坡面改造成具备蓄水保肥能力的阶梯式微型植物生长平台,为生态恢复奠定立地基础。

2.3 土壤快速改良技术

乌鲁木齐南山煤田火区在整地完成,进行土壤改良,采用人工播撒复合肥料的方式。底肥选用适合当地土壤和植物生长需求的复合肥料,要求氮、磷、钾总含量不低于 45% ,其中氮元素有助于植物茎叶生长,磷元素可促进根系发育,钾元素能增强植物抗逆性。在撒肥前,确保肥料无结块现象,如有结块需进行破碎处理,以保证施肥均匀度。

根据土壤检测结果和目标植物生长需求,确定每亩地的施肥量为 50kg 。对于土壤肥力较低的区域,可适当增加 $5 \sim 10\text{kg}$ 施肥量;肥力较高的区域,可减少 5kg 左右施肥量。人工沿水平沟均匀撒播复合肥料,采用横向与纵向交叉撒施的方式,确保肥料覆盖整个种植区域。撒肥时,施肥人员应保持一定的行走速度和撒肥力度,避免局部肥料过多或过少。施肥后,用锄头或耙子将肥料与表层土壤轻轻混合,深度约为 $5 \sim 8\text{cm}$,使肥料与土壤充分接触,提高肥料利用率,同时防止肥料被雨水冲刷流失,以全面补充土

壤基础养分。在幼苗生长至 $5 \sim 8\text{cm}$ 高时进行第一次尿素追肥,促进幼苗快速生长。之后,根据植物生长情况,每隔 $20 \sim 30$ 天追肥一次,追施尿素 $50\text{kg}/\text{亩}$,以促进地上部生物量积累,所有施肥作业均选择在降雨前或结合灌溉进行,以提高肥效。

2.4 植被群落重建技术

乌鲁木齐南山煤田火区采用多物种混播模式以增强群落的稳定性、抗逆性和生态功能。依据本地实践与种子生物学特性,结合乌鲁木齐地区的气候、土壤条件及植被恢复目标,科学选用适宜草种。以本地耐旱禾本科植物为主构建恢复群落,搭配固氮豆科物种,形成抗逆性强、结构稳定的植被体系。具体选用早熟禾、高羊茅、冰草等冷季型草种,其具有萌发温度低($0 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 即可启动)、根系发达(入土深度 $30 \sim 100\text{cm}$)的特点,能快速覆盖地表并有效固持土壤;同时配合红豆草、苜蓿等豆科植物,通过根瘤固氮作用改善土壤肥力,增强群落持久性。播种前对草种进行筛选,去除杂质与破损籽粒,保证种子纯度与发芽率;对苜蓿等豆科草种实施根瘤菌拌种处理,以提升其固氮能力与早期生长势。

施工流程严格遵循“先整地开沟、后施肥播种”的次序:先清除沟内直径 $>5\text{cm}$ 的石块、破碎土块至粒径 $\leq 3\text{cm}$,并整平沟底(坡度 $\leq 5^{\circ}$);随后均匀撒施复合肥料(氮、磷、钾有效性均 $>5\%$),确保基肥分布均匀度达 90% 以上;再按设计播种量进行草种撒播。各草种亩播种量分别为:早熟禾 4kg 、高羊茅 3kg 、披碱草 4kg 、冰草 4kg 、红豆草 1kg 、苜蓿 1kg 。播种选择无风或微风天气,采用分两次沿不同方向交叉撒播的方式,以保证落籽均匀。撒播后覆盖 $0.5 \sim 1\text{cm}$ 细土并轻压,使种子与土壤紧密接触,之后覆盖防晒网以保墒。待幼苗出土后揭网,并视缺苗情况(缺苗率 $>10\%$ 区域)及时补播,构建形成“工程保水-一植被固土-生态改良”一体化的立体修复体系。

2.5 节水养护与综合管理

为确保修复初期植被的成功定植与长期群落稳定,本研究实施了一套集微环境调控、动态监测与人工干预于一体的精细化节水养护与综合管理策略。在播种后,立即铺设遮光率为 $50\% \sim 70\%$ 的高强度聚乙烯防晒网,通过架设支撑使其与地表保持 $30 \sim 50\text{cm}$ 的通风空间。此举旨在有效削弱太阳辐射、降低地表温度、显著抑制土壤水分蒸发,从而为种子萌发与幼苗生长创造湿润凉爽的微环境,同时防止降雨冲刷导致的土壤板结与种子流失,并抵御鸟类啄食,综合提升出苗率与成苗均匀度。基于植物物候的动态管理是策略的关键环节:当幼苗出土率达 70% 以上且生长出 $2 \sim 3$ 片真叶,表明其已初步适应环境时,选择阴天或傍晚谨慎拆除防晒网,以避免环境剧变对幼苗造成胁迫。随后展开全覆盖巡查,对缺苗率超过 10% 的区域选用相同草种进行靶向补播,以确保植被盖度的空间均匀性。在植被建成期内,实施围栏封育以杜绝放牧等人为干扰,并建立持续的综合管护机制。该机制贯

彻“预防为主, 综合防治”原则, 通过种子包衣、布设物理捕鼠器械及科学施用生物/化学制剂等多种手段, 系统防控鼠、虫、病害; 在植被生长关键期, 及时人工清除恶性杂草, 减少其对光、水、养分的竞争, 保障建群种的生长优势; 同时建立定期巡查制度, 系统监测植被长势、土壤墒情及工程设施状况, 及时发现并处置问题, 克服修复初期的环境胁迫, 成功引导生态系统向稳定、自维持的方向演替。

3 生态恢复综合效益的分析

项目实施后, 南山火区生态修复区快速构建起优势种群, 区域植被覆盖率大幅提升。优势种群快速积累有机质、固定氮素, 改善土壤养分状况, 提升土壤保水保肥能力, 新增植被的根系能够固结土体、削弱雨水冲刷, 有效防控水土流失, 其蒸腾作用还可调节局地气候, 增湿促降, 缓解区域干旱问题。

基于联丰源火区植被恢复重构后的样方数据分析, 从植被生长状况层面来看, 该区域平均样方平均生物量达69.94g、平均盖度为38.15%, 辛普森指数为0.23, 表明联丰源火区的植被恢复重构工作已初见成效。植被成功定植于该区域, 形成了一定程度的地表覆盖, 初步具备了水土保持等基础生态功能, 成功打破了火区地表“寸草不生”的生态退化局面。但从生物量与物种多样性指标综合分析, 该区域群落仍处于恢复演替的初级阶段, 存在生物量较低、物种组成单一、群落结构简单等诸多问题, 与自然稳定群落所具备的生态特征相比, 仍存在较大差距。鉴于此, 后续需持续深入推进修复工作, 通过改良土壤理化性质等措施, 提升群落的物种丰富度与稳定性, 推动植被群落向更高层次的演替阶段稳步发展。

基于苏布拉拉克四号火区植被恢复重构后的样方数据展开分析, 从植被生长状况层面来看, 该区域样方平均生物量达110.41g、平均盖度为38.15%、辛普森指数为0.579。结果表明, 所实施的修复措施有效改善了立地条件, 为植被生长营造了适宜环境, 使得植被不仅能够正常生长, 还初步发挥了水土保持等生态功能。从群落结构稳定性角度评估, 物种多样性指数处于合理范围之内, 这意味着该群落已具备初步的抗干扰能力、自我调节能力以及演替能力。综合多方面因素考量, 苏布拉拉克四号火区的植被修复工作取得了阶段性成效。然而, 为进一步验证修复效果的可持续性, 仍需结合未修复对照区的数据进行对比分析, 并补充开展长期定位监测工作。

4 结论

本研究在乌鲁木齐南山煤田火区的生态环境恢复工作中, 牢记“因地制宜”思想, 根据对煤矿火灾现场的地理位置、地形地貌、气象水文、植被特征、土壤性质等火区生态环境现状的研究与调查分析, 对其科学选用生态修复关键技术。通过对乌鲁木齐南山煤田火区的系统修复实践与综合评估, 成功验证了针对极端环境约束的“工程-生物-管理”协同技术体系的有效性。

该体系不仅实现了生态基底的快速重建, 更产生了生态恢复、经济发展与社会进步相统一的综合效益, 完成了从单一环境治理向系统性区域增益的模式转变, 从而为我国西北高寒生态脆弱区的类似矿山修复提供了可复制、可评估的完整实践范式。为巩固与拓展修复成果, 建议推动技术成果的制度化与标准化, 建立长效管护与社区利益联结机制, 并积极探索生态产品价值实现的多元路径。展望未来, 仍需开展长期生态演替监测, 深化生态系统服务价值的精准量化与权衡分析, 并推动修复技术向智能化、低碳化方向升级, 以持续完善极端环境生态修复的理论体系与实践方案, 助力区域生态环境与经济社会的高质量协同发展。

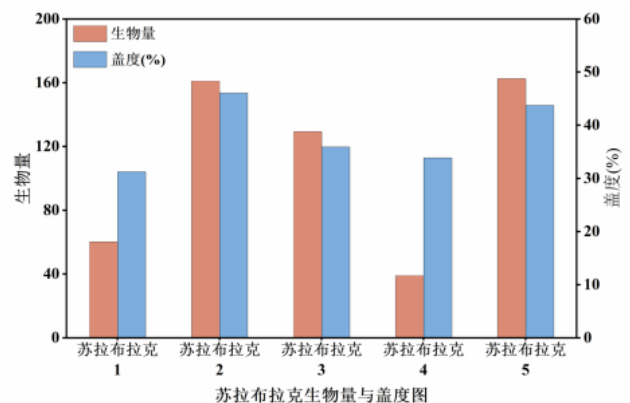
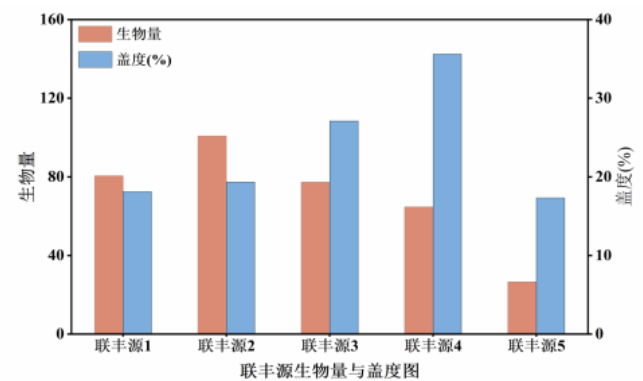


图2 生态恢复效果

[基金项目]

本研究受到新疆重点研发项目(2022B03025-6)资助。

[参考文献]

- [1]景普秋,王清亮.煤炭资源开发与区域经济发展中的“福”与“祸”:基于山西的实证分析[J].中国工业经济,2008,(7):80-90.
- [2]黄蕊蕊.生态安全体系构建的基本认识、内在逻辑与路径选择[J].东南学术,2025,(06):202-212.
- [3]罗淑政,玉米提·哈力克,JoergSchulz,等.新疆煤田火灾的成因、危害及综合治理[J].灾害学,2008,(03):62-65+70.

作者简介:

豆龙辉(1986--),男,陕西扶风县人,博士研究生在读,高级工程师,从事煤田地质勘查工作与研究。