

采动地裂缝填埋修复对植物群落与土壤理化性质的影响

黄佳慧¹, 李鹏^{1,2}, 张正³, 于卫洁³, 韩建纯¹

(1. 西安理工大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 西安 710048;

2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048;

3. 榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的] 探究采动地裂缝填埋修复对植物群落与土壤理化性质的影响, 为陕北采煤沉陷区的进一步生态恢复提供科学依据。[方法] 以填埋后的地裂缝(拉伸型裂缝和塌陷型裂缝)为研究对象, 选择未受地裂缝扰动的自然草地为对照, 进行野外植物群落调查和土壤样品采集, 研究了植物群落的物种组成、植被密度、盖度和群落多样性; 测定0—10, 10—20, 20—40 cm 土层土壤的团聚体粒径、颗粒组成和速效养分等指标, 用曼特尔检验对各指标进行了相关性分析。[结果] (1) 采动地裂缝填埋修复后物种数量、盖度和丰富度等均显著小于未受地裂缝扰动的自然草地, 塌陷型裂缝表现更为突出。(2) 与自然草地相比, 采动地裂缝填埋后, 土壤破坏率均显著增加, 平均重量直径和中值粒径减小, 土壤稳定性较差。(3) 地裂缝填埋修复后, 土壤速效磷含量显著降低。[结论] 采动地裂缝填埋修复后, 短期内植物群落和土壤理化性质均很难达到未受采动地裂缝扰动的自然草地状态, 后期可通过适当补施磷肥实现生态修复。

关键词: 黄土区; 采动地裂缝; 土壤理化性质; 植物群落特征

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0132-09

Effects of backfilling restoration of mining ground fissures on plant communities and soil physicochemical properties

Huang Jiahui¹, Li Peng^{1,2}, Zhang Zheng³, Yu Weijie³, Han Jianchun¹

(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China; 3. Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanxi North Mining Area, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of backfilling restoration of mining ground fissures on plant communities and soil physicochemical properties, so as to provide a scientific basis for further ecological restoration in the coal mining subsidence areas of northern Shaanxi. [Methods] In this study, the ground fissures (tensile fissures and collapse fissures) after backfilling were taken as the research objects, and the natural grassland undisturbed by the ground fissures was selected as the control. Field investigation of plant communities and soil sampling were carried out. The species composition, vegetation density, coverage, and community diversity of plant communities were analyzed. The aggregate particle size, particle composition, and available nutrients of 0—10, 10—20 and 20—40 cm soil layers were measured, and the correlation analysis among

收稿日期: 2025-05-07

修回日期: 2025-05-20

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 2023年中央财政林草科技推广示范项目(SLTG[2023]02号); 国家自然科学基金地区项目(42067018); 国家自然科学基金面上项目(42473069); 陕西省青年科技新星项目(2024ZC-KJXX-046); 陕西省2023年重点研发计划项目(2023-ZDLSF-65)

第一作者: 黄佳慧(2000—), 女, 陕西西安人, 在读硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1354333953@qq.com

通信作者: 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 主要从事旱区水文过程与生态响应关系研究。E-mail: lipeng74@163.com

张正(1989—), 男, 陕西榆林人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀。E-mail: zhangz@yulinu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

indicators was carried out using the Mantel test. [Results] (1) After the backfilling restoration of mining ground fissures, the number of species, coverage, and richness were significantly lower than those of the natural grassland undisturbed by ground fissures, with the effects being more pronounced in collapse fissures. (2) Compared with the natural grassland, the soil damage rate significantly increased after the backfilling and restoration of mining fissures, while the mean weight diameter and median particle size decreased, indicating poorer soil stability. (3) After the backfilling restoration of ground fissures, the soil available phosphorus content significantly decreased. [Conclusion] After the backfilling restoration of mining ground fissures, the plant communities and soil physicochemical properties would be difficult to recover to the condition of natural grasslands undisturbed by fissures in the short term. Ecological restoration in the later stage can be achieved through appropriate supplementation of phosphorus fertilizer.

Keywords: loess region; mining ground fissures; soil physicochemical properties; plant community characteristics

煤炭资源开采是国民经济发展的关键支柱,其在推动经济增长的同时,也对生态环境造成了严重破坏,威胁着人类赖以生存的自然环境^[1]。高强度的地下开采势必引起地表沉陷,进而导致地裂缝、塌陷坑等地质灾害的发生^[2]。采动地裂缝作为黄土高原最典型的采煤损害类型,使土壤结构遭到破坏,影响植被生长^[3],对区域生态环境造成严重影响^[4]。根据形成机理,采动地裂缝可分为多种类型,通常以拉伸型和塌陷型为主,这两类地裂缝对生态环境的破坏尤为显著^[5]。拉伸型裂缝是由于地表拉伸变形超过表层土壤的抗拉强度而产生的永久性裂缝,其特点是宽度小、发育浅、无台阶。塌陷型裂缝则是由采动引起的覆岩破断并最终导致地表塌陷形成,随着工作面的推进逐渐愈合,其特点是宽度大、深度大、落差大,且地表呈现台阶。二者填埋修复后的地表形态存在较大差异,填埋修复后两种地裂缝的植物恢复效果如何,植物群落特征和土壤理化性质产生了什么变化,还需要进一步探索。地裂缝进行覆土回填后,如何提高植被的恢复情况、改善土壤结构和养分储量对指导采煤沉陷区的生态恢复具有重要意义^[6]。侯恩科等^[7]结合黄土区地形地貌,全面分析了采动地裂缝的发育规律,提出了剥离表土、填埋裂缝、表土回覆的综合治理措施。首先,对调查的地裂缝进行表土剥离,剥离宽度为地裂缝两侧0.5~1 m范围内,剥离厚度为0.2~0.3 m,并将剥离的表土就近堆放;其次,利用沉陷区周边取土场的土壤对地裂缝进行填补,并进行压实处理;最后,将剥离后就近堆放的表土回覆到填补后的地裂缝上,表土回覆厚度为0.3~0.4 m。地裂缝填埋后,周围植被遭到破坏,使得地裂缝表面缺乏植被覆盖。填埋后的土壤并非未经扰动的原状土,而是重构土壤。由于土壤受到扰动,其结构发生变化^[8]。综上所述,采动地裂缝作

为黄河流域中游陕北煤矿区最突出的采煤损害问题,现有研究多集中于地裂缝对周边生态环境的影响^[9]。其修复过程漫长且复杂,而关于采动地裂缝填埋后在自然演替过程中植物群落特征及土壤理化性质变化的研究尚不充分。

针对上述研究中的不足,本文以采煤沉陷区填埋后的典型地裂缝(拉伸型裂缝、塌陷型裂缝)为研究对象,以未受采动地裂缝扰动的自然草地为对照,进行了野外植物群落调查和土壤样品采集,分析采动地裂缝填埋修复后植物群落和土壤理化性质的恢复特征,并探讨植物群落特征与土壤理化性质之间的相关关系,以期为陕北矿山采动损害区的进一步生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市榆阳区麻黄梁镇(38°24'34"—38°26'50"N,109°57'6"—109°58'56"E),地处毛乌素沙漠南缘和陕北黄土高原的交接处,地势北高南低,海拔高度为1 064~1 402 m。该地区气候属于温带暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温约10℃,年均降水量约400 mm。地貌为梁状丘陵,以黄土梁岗为主,植被类型以草本和灌木为主。该区拥有丰富的麻黄梁煤矿等矿产资源,高强度的开采活动易引发地裂缝塌陷等地质灾害,加剧地表植被破坏与土壤侵蚀,发生水土流失。

1.2 样地设置

采动地裂缝自2013年大量出现,主要类型有拉伸型和塌陷型裂缝(图1)。其中,塌陷型裂缝错位高度为1.5~3 m,裂缝宽0.4~1.5 m,填埋后坡度约30°,填埋后扰动区域宽度2~4 m;拉伸型裂缝错位高度0~0.3 m,裂缝宽0.3~0.5 m,填埋后扰动区域宽度

1~1.5 m。2021年6月,采用填埋的方式进行了地裂缝治理。具体流程为通过对地裂缝两侧0.5~1 m范围内的0.2~0.3 m表土进行剥离,剥离表土就近堆放以备用。在沉陷区周边选取取土场,直接采用取土场土壤进行填补地裂缝,并压实。当回填至距离顶部0.3~0.4 m时,进行表土覆盖,表土压实后容重与周围自然草地保持一致。

地裂缝一般长度为200~400 m,受开采强度、黄土特性及地形影响,部分裂缝可达500 m以上。在沉陷区内选取填埋后的塌陷型裂缝、拉伸型裂缝各3条,在6条地裂缝上均匀地选择5个断面,进行植物群落调查和土壤样品采集。图1和图2为研究区内地裂缝样地图,分别是塌陷型和拉伸型裂缝填埋前(图1)和填埋后(图2)的对比状态。在地裂缝扰动范围外就近选择植物群落类型、撂荒年份、撂荒前耕作背景一致的自然草地作为对照。



图1 典型采动地裂缝

Fig. 1 Typical mining ground fissures



图2 填埋修复后的采动地裂缝

Fig. 2 Mining ground fissures after backfilling restoration

1.3 植被调查

2020年4月为进行生态环境治理,对地裂缝进行填埋处理。2022年7月,选取填埋后的塌陷型裂缝(XLF)、拉伸型裂缝(PLF)各3条进行野外植物群落调查。在6条地裂缝上,选择5个断面,每个断面均匀布设3个1 m×1 m的样方。对于自然草地,选择5个

样点,每个样点同样布设3个1 m×1 m的样方。所有样方调查指标有植物群落类型、物种组成、植株密度、盖度,并计算群落多样性(Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielous均匀度指数)。

1.4 土壤样品采集及测定

在每个植物调查样方旁边0—10, 10—20, 20—40 cm土层进行土壤样品的采集。测定容重、团聚体、颗粒组成、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾等指标。用环刀法测定容重;用干筛法测定力稳性团聚体比例并用湿筛法测定水稳性团聚体比例;用激光粒度仪测定颗粒组成;用重铬酸钾容量法测定有机质含量;用碱解扩散法测定碱解氮含量;用比色法检测速效磷;用火焰光度法测定速效钾含量。

1.5 数据处理与分析

(1) 植物群落特征值计算。本研究通过植被密度、植被盖度、Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielous均匀度指数来表征植物群落特征^[10]。

植被密度(D)表示单位面积上植被的数量,描述某一物种在一个生态系统中空间占用情况,是衡量一个地区植被覆盖程度的重要指标。采用如下公式进行计算:

$$D = X/A \quad (1)$$

植被盖度(VC)指植物地上部分的垂直投影面积占样地总面积的比例,通常选用目估法进行测量,用以划定群落优势种。按如下公式进行计算:

$$VC = (C_i/C_{total}) \times 100\% \quad (2)$$

Shannon-Wiener多样性指数(H)是衡量生物群落中物种丰度和个体数量比例的一种指标,用于描述生物群落内物种的数量及其相对丰度,是评估群落或生态系统稳定性的重要参考指标:

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (3)$$

丰富度指数(M)用于刻画群落中所含物种的多少,反映了一定空间内生物的丰富程度。丰富度指数通过以下公式进行计算:

$$M = (S - 1) \ln N \quad (4)$$

均匀度指数(J)衡量群落或生境中各物种个体数量的分布状态,反映了物种数量分布的均衡性。按如下公式进行计算:

$$J = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) / \ln S \quad (5)$$

式中: D 为植物密度; VC 为植物盖度; H 为多样性指数; M 为丰富度指数; J 为均匀度指数; X 为某一个物种的个数; A 为样地面积; C_i 为某一物种的分盖度;

C_{total} 为所有物种盖度; S 为样地内所有物种的种类数; N 为样方内所有物种的个体总数; P_i 为第 i 个物种在群落中个体总数中所占的重要值。

(2) 水稳性团聚体平均重量直径^[11]。

$$\text{MWD} = \sum x_i y_i \quad (6)$$

式中: MWD 为水稳性团聚体的平均重量直径; x_i 为第 i 级团聚体的平均粒径(mm); y_i 为第 i 级团聚体在总团聚体中所占的百分比(%)。

(3) 团聚体破坏率^[12]。

$$\text{PAD} = \frac{\text{DS}_{>0.25} - \text{WS}_{>0.25}}{\text{DS}_{>0.25}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: PAD 为土壤团聚体破坏率; $\text{DS}_{>0.25}$ 为干筛处理下 >0.25 mm 团聚体含量; $\text{WS}_{>0.25}$ 为 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量。

(3) 数据分析。采用 Excel 软件对数据进行统计整理, 用 SPSS 软件对不同样地之间植被群落特征进行单因素方差分析(One-way ANOVA); 对土壤理化数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA); 采用 LSD 法进行多重比较, 以判定不同处理间是否存在显著差异($p < 0.05$), 并利用 Origin 软件进行数据可视化。通过 R 语言进行曼特尔检验分析植物群落特征和土壤理化指标的相关性。

2 结果与分析

2.1 采动地裂缝填埋修复后的植物群落特征

由表 1 可知, 研究区植物群落以多年生草本为主, 一年生草本植物较少。优势物种包括达乌里胡枝子、草木樨状黄芪、长芒草等典型旱生植物, 这些物种在自然草地和两种地裂缝填埋后均能快速生长, 有利于植被恢复。填埋后地裂缝的植物群落处于恢复初期阶段, 植被类型以一年生草本植物(草木樨状黄芪、狗尾草等)和多年生草本植物为主(甘遂、长芒草、中华隐子草等)。地上植被共有 26 个物种, 隶属 10 科, 豆科、禾本科和菊科物种数量较多, 分别占总物种数的 27%, 23%, 23%。对比分析显示, 未受采动地裂缝扰动的自然草地物种总数为 20 种, 明显高于拉伸型裂缝(16 种)和塌陷型裂缝(10 种)。其中, 拉伸型裂缝与自然草地共有 10 个物种, 分别是细叶韭、甘遂、达乌里胡枝子、草木樨状黄芪、长芒草、狗尾草、中华隐子草、冰草、猪毛菜和远志; 塌陷型裂缝与自然草地共有 8 个物种, 为甘遂、达乌里胡枝子、草木樨状黄芪、长芒草、中华隐子草、阿尔泰狗娃花、猪毛菜和远志。综上, 达乌里胡枝子、长芒草和猪毛菜等本土物种在各类生境中都有一定的分布。

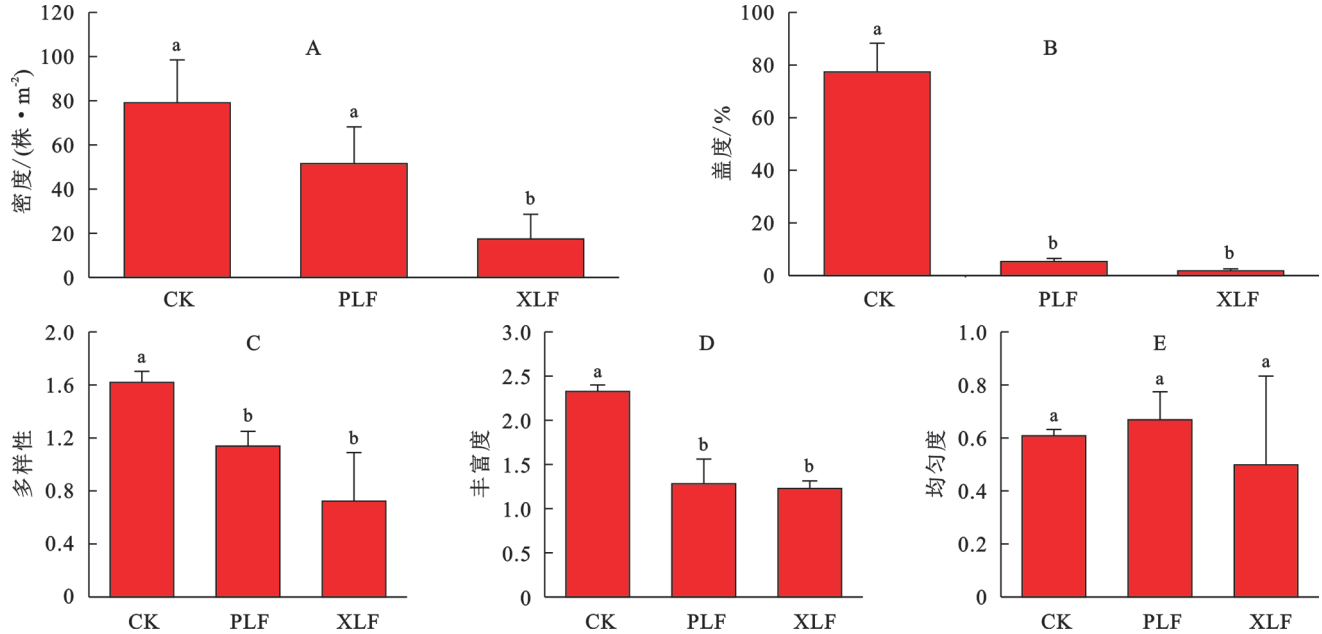
表 1 采动地裂缝填埋修复后的主要物种

Table 1 Main species after backfilling restoration of mining ground fissures

科	物种	学名	生活型	自然草地	拉伸型裂缝	塌陷型裂缝
百合科	细叶韭	<i>Allium tenuissimum</i>	多年生草本	√	√	
大戟科	甘遂	<i>Euphorbia kansui</i>	多年生草本	√	√	√
豆科	紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i>	多年生草本	√		
	达乌里胡枝子	<i>Lespedeza davurica</i>	多年生草本	√	√	√
	沙打旺	<i>Astragalus adsurgens</i>	多年生草本	√		
	砂珍棘豆	<i>Oxytropis racemosa</i>	多年生草本	√		
	草木樨状黄芪	<i>Astragalus melilotoides</i>	多年生草本	√	√	√
	糙叶黄耆	<i>Astragalus scaberrimus</i>	多年生草本	√		
	披针叶黄华	<i>Thermopsis lanceolata</i>	多年生草本		√	
禾本科	长芒草	<i>Stipa bungeana</i>	多年生草本	√	√	√
	糙隐子草	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	多年生草本	√		
	硬质早熟禾	<i>Poa sphondylodes</i>	多年生草本	√		
	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	一年生草本	√	√	√
	中华隐子草	<i>Cleistogenes chinensis</i>	多年生草本	√	√	√
	冰草	<i>Agropyron cristatum</i>	多年生草本	√	√	
蒺藜科	蒺藜	<i>Tribulus terrestris</i>	一年生草本	√		
菊科	阿尔泰狗娃花	<i>Aster altaicus</i>	多年生草本	√		√
	蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	多年生草本	√		
	铁杆蒿	<i>Artemisia gmelinii</i>	多年生草本	√		
	猪毛蒿	<i>Artemisia scoparia</i>	一年生草本		√	√
	抱茎苦蕒菜	<i>Ixeris sonchifolia</i>	一年生草本		√	
	猪毛菜	<i>Kali collina</i>	一年生草本	√	√	√
牻牛儿苗科	牻牛儿苗	<i>Erodium stephanianum</i>	多年生草本		√	
毛茛科	唐松草	<i>Thalictrum aquilegifolium</i>	多年生草本		√	
伞形科	硬阿魏	<i>Ferula bungeana</i>	多年生草本		√	
远志科	远志	<i>Polygala tenuifolia</i>	多年生草本	√	√	√

注: √表示样地出现的物种。

由图3可知,与自然草地相比,采动地裂缝填埋修复后,植被密度、盖度、物种多样性和丰富度指数均显著降低($p < 0.05$),排序为自然草地>拉伸型裂缝>塌陷型裂缝;而均匀度指数未呈现出明显趋势。对比两种地裂缝修复类型,拉伸型裂缝修复后植物



注:CK代表自然草地;PLF代表拉伸型裂缝;XLF代表塌陷型裂缝。图中不同字母表示指标在自然草地、拉伸型裂缝、塌陷型裂缝间差异显著($p < 0.05$)。

图3 采动地裂缝填埋修复后植物群落特征

Fig. 3 Characteristics of plant communities after backfilling restoration of mining ground fissures

2.2 采动地裂缝填埋修复后的土壤理化性质

由表2可知,采动地裂缝填埋修复后,团聚体粒径 ≤ 0.25 mm含量较高,占比42%~75%;团聚体粒径 > 0.25 mm含量较少,占比10%~36%,土壤团聚体粒径组成与自然草地基本一致。在3种样地中,0—10,10—20,20—40 cm土层的破坏率排序均为拉伸型裂缝>塌陷型裂缝>自然草地,且拉伸型裂缝的破坏率显著高于塌陷型裂缝和自然草地($p < 0.05$)。0—10 cm土层自然草地、拉伸型裂缝、塌陷型裂缝的平均重量直径分别为36.82,23.53,30.10 mm,相比自然草地,拉伸型裂缝平均重量直径显著减小($p < 0.05$);而10—20 cm和20—40 cm土层3种样地的平均重量直径无显著差异。

采动地裂缝填埋后土壤颗粒组成与自然草地相近(表3),均以粗粉砂(占比44%~50%)为主,其次为极细砂(占比18%~27%),粗砂含量最低(小于0.5%)。中值粒径的范围为26.96~46.29 μm ,在3个土层的排序均为自然草地>拉伸型裂缝>塌陷型裂缝。具体而言,0—10 cm土层拉伸型和塌陷型裂缝的中值粒径分别为34.99,34.97 μm ,均显著小于自然草地的中值粒径(46.29 μm);在10—20 cm土层,自然草地的中值粒径(45.53 μm)显著高于拉伸性裂缝(37.70

群落特征优于塌陷型裂缝。具体而言,拉伸型裂缝植被密度为52株/m²,显著高于塌陷型裂缝17株/m²($p < 0.05$);且物种多样性和均匀度指数亦是拉伸型裂缝(1.14,0.67)大于塌陷型裂缝(0.72,0.50);而盖度和丰富度指数相差不大。

μm)和塌陷型裂缝(26.96 μm);而在20—40 cm土层时,3种样地的中值粒径均无显著差异($p < 0.05$)。

图4显示了采动地裂缝填埋修复后不同土层的土壤理化性质变化。结果显示,与自然草地相比,填埋修复后土壤的容重、速效磷和速效钾含量发生了显著改变。在20—40 cm土层,拉伸型裂缝填埋后容重含量显著减小($p < 0.05$),从自然草地的1.50 g/cm³降至1.31 g/cm³。速效磷含量在所有土层,拉伸型和塌陷型裂缝均显著小于自然草地($p < 0.05$)。具体如下:0—10 cm土层速效磷分别为6.68,1.93,1.99 mg/kg;10—20 cm土层为4.96,0.69,2.34 mg/kg;20—40 cm土层为5.99,1.17,2.34 mg/kg。速效钾含量在0—10 cm土层显著增加($p < 0.05$),拉伸型和塌陷型裂缝分别为107.28,117.38 mg/kg,高于自然草地的77.01 mg/kg;在20—40 cm土层,拉伸型裂缝速效钾含量为112.35 mg/kg,显著高于自然草地97.35 mg/kg($p < 0.05$)。有机质和碱解氮含量在各土层差异均不显著。

2.3 采动地裂缝填埋修复后植物群落特征与土壤理化性质的相关性

如图5所示,拉伸型裂缝和塌陷型裂缝填埋修复后,密度、盖度、多样性、丰富度与速效磷、有机质、中值粒径、平均重量直径间均呈正相关;速效钾与密

度、盖度、多样性、丰富度、平均重量直径呈负相关。此外,拉伸型裂缝容重与有机质、中值粒径、碱解氮呈负相关,速效磷与中值粒径、平均重量直径间呈显著正相关($p < 0.05$)。塌陷型裂缝速效磷与碱解氮呈

负相关,与中值粒径、平均重量直径呈正相关;中值粒径与有机质、平均重量直径呈显著正相关($p < 0.05$)。其他植物群落特征值与土壤理化指标间无显著关系。

表2 采动地裂缝填埋修复后各土层团聚体粒径组成

Table 2 Aggregate particle size composition of each soil layer after backfilling restoration of mining ground fissures

土层深度	类型	处理	团聚体粒径组成/%						破坏率/ %	平均重量 直径/mm
			≥5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	≤0.25 mm		
0—10 cm	自然草地	干筛	19.51	5.89	3.15	3.29	4.18	61.61	13.02±0.09a	36.82±0.17a
		湿筛	15.95	3.72	2.64	2.69	5.21	69.79		
	拉伸型裂缝	干筛	35.86	8.44	4.76	4.30	3.10	43.54	55.88±0.15c	23.53±0.10b
		湿筛	9.65	4.14	2.71	3.23	5.19	75.09		
	塌陷型裂缝	干筛	22.53	7.79	4.48	4.36	3.50	57.34	28.97±0.10b	30.10±0.14a
		湿筛	13.28	4.53	2.44	3.64	5.33	70.77		
10—20 cm	自然草地	干筛	36.24	5.51	2.16	1.87	2.29	51.92	19.49±0.11a	30.57±0.27a
		湿筛	29.11	3.02	1.14	1.34	3.49	61.89		
	拉伸型裂缝	干筛	35.19	11.35	5.20	3.93	2.40	41.93	67.97±0.35c	25.39±0.22a
		湿筛	10.62	4.87	2.41	2.78	4.15	75.17		
	塌陷型裂缝	干筛	21.58	7.98	4.49	4.54	3.73	57.68	41.84±0.29b	30.31±0.2a
		湿筛	9.99	4.2	2.76	3.2	5.41	74.44		
20—40 cm	自然草地	干筛	41.93	5.34	1.48	1.65	1.79	47.79	17.37±0.11a	34.22±0.37a
		湿筛	40.16	2.63	1.06	1.42	1.50	53.23		
	拉伸型裂缝	干筛	34.82	12.78	5.61	3.42	2.14	41.22	57.03±0.29c	30.53±0.30a
		湿筛	12.08	3.78	2.10	2.89	3.84	75.31		
	塌陷型裂缝	干筛	20.43	8.14	4.52	4.86	4.12	57.93	38.89±0.21b	30.96±0.32a
		湿筛	8.18	3.87	3.13	2.83	5.53	76.45		

注:不同小写字母表示同一土层内不同样地的差异显著($p < 0.05$)。下同。

表3 采动地裂缝填埋修复后各土层土壤颗粒组成

Table 3 Composition of soil particles in each soil layer after backfilling restoration of mining ground fissures

土层 深度/cm	类型	土壤粒级/%							中值粒径 (D50)/μm
		粗砂 (1~0.5 mm)	中砂 (0.5~0.25 mm)	细砂 (0.25~0.1 mm)	极细砂 (0.1~0.05 mm)	粗粉砂 (0.05~0.005 mm)	细粉砂 (0.005~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	
0—10	自然草地	0.43	1.98	12.64	26.97	44.35	2.04	11.59	46.29±0.21a
	拉伸型裂缝	0.15	0.85	8.32	22.15	48.76	2.77	17.01	34.99±0.14b
	塌陷型裂缝	0.12	1.09	9.83	21.54	47.44	2.95	17.03	34.97±0.14b
10—20	自然草地	0.27	1.89	12.68	26.2	43.81	2.19	12.96	45.53±0.4a
	拉伸型裂缝	0.08	0.69	10.69	23.04	46.38	2.73	16.38	37.70±0.32b
	塌陷型裂缝	0.09	0.57	6.42	17.9	50.41	3.41	21.18	26.96±0.22c
20—40	自然草地	0.06	0.54	10.32	24.03	46.94	2.51	15.58	38.55±0.26a
	拉伸型裂缝	0.1	0.73	9.25	20.91	47.81	3.02	18.17	33.22±0.17a
	塌陷型裂缝	0.01	0.17	7.79	20.39	48.95	3.16	19.55	30.84±0.14a

3 讨论

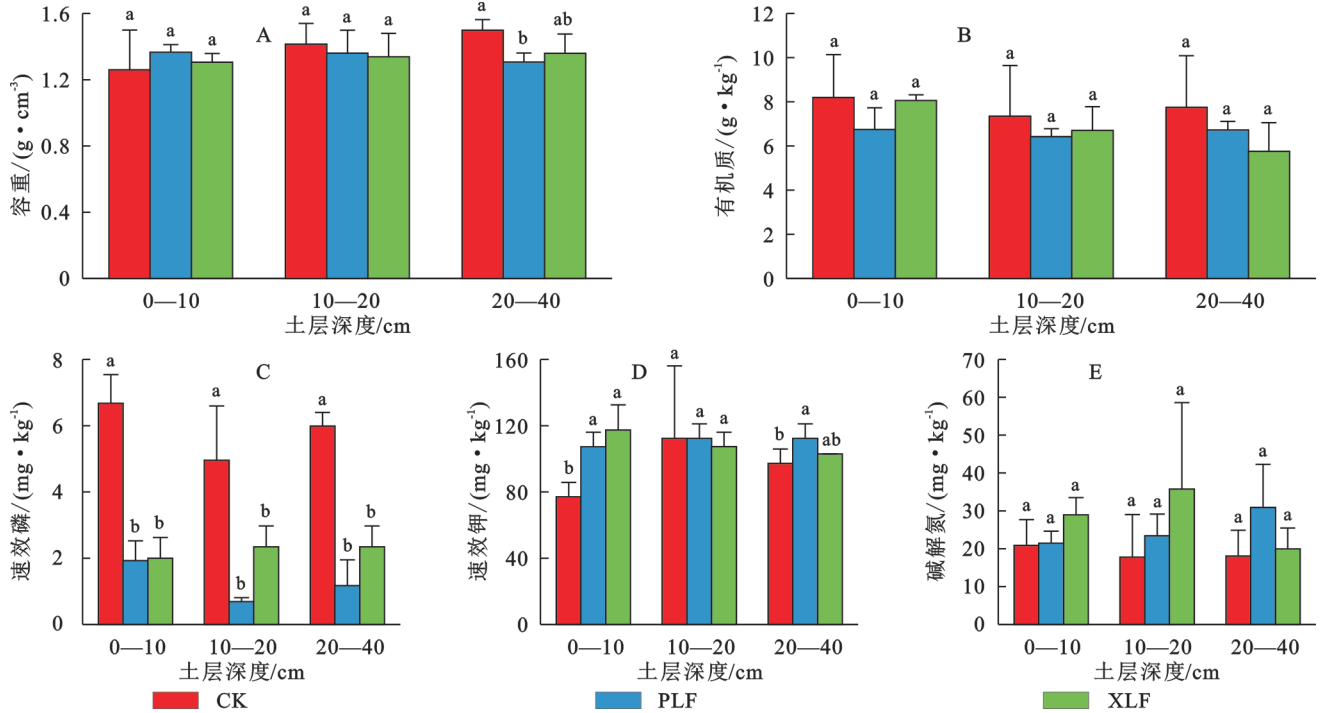
3.1 采动地裂缝填埋修复后对植物群落特征的影响

采动地裂缝的填埋修复显著影响了研究区的植物群落结构。植物群落是维持生态系统结构稳定的关键因素,也是生态恢复的基础^[13]。本研究发现,采

动地裂缝短期填埋修复后植物群落物种数量、盖度和丰富度均显著小于未受采动地裂缝扰动的自然草地,未达到未扰动状态;还需要进一步的恢复,特别是塌陷型裂缝,其植株密度显著小于拉伸型裂缝和自然草地。该结果可能与植物的生长周期、种源有关^[14]。首先,本研究区域植被以多年生草本为主,其

生长周期较长,在地裂缝填埋后植被遭到彻底破坏的情况下(图 2),难以在短时间内达到鼎盛状态。其次,植被恢复所需要的种子主要来源于土壤种子库和周围植被的种子扩散。地裂缝进行填埋修复后,在地上植被缺失、地表土壤种子库受到扰动以及地

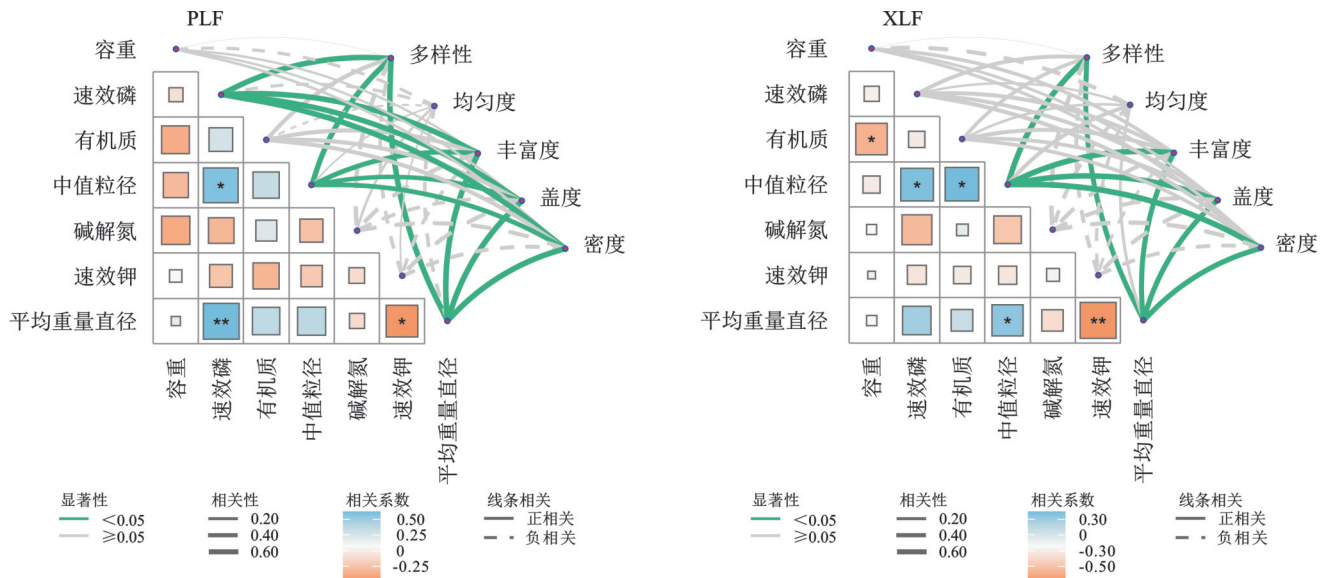
裂缝周围植被种子扩散距离有限的情况下,被填埋区域可能会存在种源不足的问题^[15-17]。因此,后期进行修复时,在自然恢复的基础上,需要以种源扩散为核心,人为引导为辅助,对填埋区域物种的植物群落结构进行调整,以便达到植物群落稳定这一目标。



注:CK代表自然草地;PLF代表拉伸型裂缝;XLF代表塌陷型裂缝;不同小写字母表示同一土层不同样地差异显著($p < 0.05$)。

图 4 采动地裂缝填埋修复后不同土层下土壤理化性质

Fig. 4 Soil physicochemical properties under different soil layers after backfilling restoration of mining ground fissures



注:PLF表示拉伸型裂缝;XLF表示塌陷型裂缝;*表示 $p < 0.05$;**表示 $p < 0.01$ 。

图 5 采动地裂缝填埋修复后植物群落特征与土壤理化性质的相关性

Fig. 5 Correlation between plant community characteristics and soil physicochemical properties after backfilling restoration of mining ground fissures

3.2 采动地裂缝填埋修复后对土壤理化性质的影响
良好的土壤理化性质能显著改善土壤肥力状况,在生态修复中至关重要^[18]。本研究中,与自然草地相

比,采动地裂缝填埋后土壤小团聚体含量较高,占比 42%~75%;其破坏率均显著增加;而平均重量直径和中值粒径减小。团聚体破坏率和平均重量直径是

衡量土壤团聚体稳定性的关键指标,破坏率越小,平均重量直径越大,团聚体的稳定性越强,土壤的抗侵蚀能力越强^[19]。而地裂缝进行填埋修复后土壤稳定性较低,其主要原因可以分为两个方面。一方面,覆土回填可能破坏了土壤结构的稳定性,限制了大团聚体的形成,导致小团聚体含量相对较多^[20];另一方面,土壤有机质是影响土壤团聚体形成和稳定的关键因素,地裂缝填埋后土壤有机质含量降低,缺乏有机质的胶结作用,使得土壤颗粒变得松散^[21]。此外,本研究区地处黄土区且气候干燥,受风力侵蚀的作用,表层土壤中细砂颗粒极易被风吹走^[22]。随着地裂缝的填埋修复,砂粒含量减少,粉砂和黏粒含量逐渐增加。这种现象可能与填埋修复过程中土壤结构和质地的变化有关。地裂缝的填埋可能会引入不同粒径的颗粒,改变土壤颗粒间的相互作用,导致土壤颗粒重新分布和排列,从而影响土壤的粒度组成。填埋修复过程中土壤受到的压实和扰动也可能导致颗粒间的接触和摩擦发生变化,进而影响土壤的粒度分布^[20,23-24]。

土壤速效磷、速效钾等养分含量是表征肥力的重要指标,主要来源于植物及其凋落物的分解^[25]。本研究中,随着生态修复的进行,速效磷含量在0—10,10—20,20—40 cm土层均显著减小。速效磷是植物生长所必需的营养物质,对于光合作用有着调控作用,并且能够促进根系的生长发育,从而增加植物对水分和养分的吸收能力^[26]。速效磷的长期缺乏可能会导致其他土壤养分指标的含量降低。且相关性分析表明,不同类型的地裂缝填埋后,影响植被特征的养分因子存在差异^[27]。拉伸型裂缝主要受容重、速效磷和速效钾影响;塌陷型裂缝主要受速效磷、速效钾和中值粒径影响。且速效磷与植被密度、盖度、群落多样性和中值粒径等指标呈显著正相关关系($p < 0.05$)。因此,在地裂缝填埋后可适当补施磷肥,有效改善植物的营养状况;同时增强土壤养分转化能力,以促进生态系统的稳定和恢复^[28]。

本研究虽然对地裂缝填埋修复后植物群落特征和土壤理化性质进行了详细讨论,但是仍存在一定的不足,由于时间的局限性,本研究仅针对填埋初期的地裂缝植被恢复情况进行了探讨,主要揭示的是在地裂缝填埋后,能够促进填埋区域快速恢复的植被特性,而对于长期恢复发展下(5 a以上)的恢复特征并未过多研究。研究所得到的结论适用于人为干预的短期恢复,对于地裂缝填埋后长期恢复的驱动机制还需深入研究。因此,未来的研究应扩大采样时间和范围,综合考虑多种影响因素(气候、土壤水分等),以便更深入地评估生态环境的恢复效果。

4 结论

本文以采煤沉陷区填埋后的典型地裂缝(拉伸型裂缝、塌陷型裂缝)为研究对象,选择未受地裂缝扰动的自然草地为对照。从植物群落和土壤理化性质的角度来看,地裂缝短期填埋修复后,相较于自然草地,植物群落特征和土壤稳定性明显降低,植被与土壤均未恢复到未受地裂缝扰动的自然草地状态。在后期,为了加快地裂缝填埋后生态环境的恢复,可适当补施磷肥。该研究结果可为陕北采煤沉陷区的进一步生态恢复提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 张可硕,项成,熊晶晶,等.中国西南典型页岩气开采场地周边土壤多环芳烃污染特征及潜在生态风险[J/OL].环境化学,(2025-01-10)[2025-01-23]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJHX20250121007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. Zhang K S, Xiang C, Xiong J J, et al. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and potential ecological risks of surrounding soil in typical shale gas extraction sites in southwest China[J/OL]. Environmental Chemistry,(2025-01-10)[2025-01-23]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJHX20250121007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [2] 蒋乾.济宁矿区厚松散层下开采地表沉陷规律研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2023. Jiang Q. Research on surface subsidence law of mining under thick unconsolidated layer in Jining mining area[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2023.
- [3] 刘英.半干旱煤矿区受损植被引导型恢复研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2020. Liu Y. Study on guided restoration of damaged vegetation in semi-arid coal mine area[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2020.
- [4] 朱文鑫.汾西矿区黄土丘陵条件下开采裂缝动态演化规律研究[D].太原:太原理工大学,2022. Zhu W X. Research on the dynamic evolution law of mining cracks under the condition of loess and hills in Fenxi mining area[D]. Taiyuan, Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [5] 张鹏.黄土风沙区浅埋煤层开采地裂缝发育致土壤损伤规律研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2022. Zhang P. Study on soil damage caused by crack development in shallow coal mining in loess sand-blown region[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2022.
- [6] 高凌峰.采煤沉陷区地质环境受损特征及修复措施探究:

- 以山西屯兰矿为例[J]. 中国矿业, 2022, 31(11): 46-51.
- Gao L F. Characteristics of geological environment damage and restoration measures in coal mining subsidence area: a case study of Tunlan Mine, Shanxi Province [J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(11): 46-51.
- [7] 侯恩科, 谢晓深, 冯栋, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 30-40.
- Hou E K, Xie X S, Feng D, et al. Laws and prevention methods of ground cracks in shallow coal seam mining [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 30-40.
- [8] 宋世杰, 彭芮思, 左靖, 等. 陕北煤矿区采动地裂缝对土壤抗蚀性的影响规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 378-393.
- Song S J, Peng R S, Zuo J, et al. Study on influence of mining ground fissures on soil anti-erodibility in northern Shaanxi coal mining area [J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 378-393.
- [9] 李晓斌, 李全生, 何富连, 等. 高强度采动地裂缝形成与演化规律及减损方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 518-529.
- Li X B, LI Q S, He F L, et al. Formation and evolution law of high-intensity mining ground fissures and damage reduction method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S2): 518-529.
- [10] 周楠, 王蕾, 毛旭锋, 等. 青海祁连山国家公园退化高寒沼泽湿地植物群落和土壤特征及其关系研究[J]. 草地学报, 2025, 33(4): 1114-1126.
- Zhou N, Wang L, Mao X F, et al. Characteristics of plant community and soil and their relationship research in degraded alpine marsh wetlands in Qinghai Qilian Mountain National Park [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(4): 1114-1126.
- [11] 秦崧悦, 吴新亮, 褚保森, 等. 贺兰山不同坡向和海拔梯度土壤团聚体组成和稳定性变化特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7770-7785.
- Qin S Y, Wu X L, Chu B S, et al. Characteristics and influencing factors of soil aggregate composition and stability under different slope orientation and elevation gradients in Helan Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7770-7785.
- [12] 白芹菲, 王艳琪, 鲍玉海, 等. 黑龙滩水库消落带植被恢复模式对土壤水稳性团聚体组成及其稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 168-176.
- Bai Q F, Wang Y Q, Bao Y H, et al. Effects of vegetation restoration patterns on soil water-stable aggregates composition and their stability in the water level fluctuation zone of the Heilongtan Reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 168-176.
- [13] 闫晓红. 退耕恢复草地群落结构与生态系统多功能性对物种添加的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- Yan X H. Responses of community structure and ecosystem multifunctionality to the addition of plant species during the restoration of abandoned cropland [D]. Hohhot, Inner Mongolia University, 2023.
- [14] 卫玺玺, 晁鑫艳, 郑景明, 等. 贺兰山东、西侧典型植物群落物种多样性差异及其影响因子[J]. 生态环境学报, 2024, 33(4): 520-530.
- Wei X X, Chao X Y, Zheng J M, et al. Study on species diversity of typical plant communities and their influencing factors in the eastern and western Helan Mountains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(4): 520-530.
- [15] 魏晶晶, 秦瑞敏, 张中华, 等. 不同退化程度高寒草地植物群落与土壤性质变化及相关性分析[J]. 草地学报, 2022, 30(11): 3035-3045.
- Wei J J, Qin R M, Zhang Z H, et al. Characteristics and interrelationship of plant community and soil properties in different degraded alpine grasslands [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3035-3045.
- [16] 王东丽, 王歆然, 张野, 等. 研石山不同侵蚀微地貌土壤种子库研究[J]. 生态学报, 2025, 45(8): 3898-3906.
- Wang D L, Wang X R, Zhang Y, et al. Study on soil seed bank of different micro-topographies in gangue dump [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(8): 3898-3906.
- [17] Yang F, Guo X P, Feng C D, et al. Using soil seed bank in summer and previous autumn to restore vegetation in arid mining area [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(5): 93-102.
- [18] 刘亚博, 冯天骄, 王平, 等. 黄土丘陵区典型小流域不同植被恢复方式土壤理化性质差异及其影响因素[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6652-6666.
- Liu Y B, Feng T J, Wang P, et al. Differences in soil physicochemical properties and influencing factors under different vegetation restoration methods in typical small watersheds in loess hilly areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6652-6666.
- [19] Dou Y X, Yang Y, An S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020, 185: 104294.
- [20] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643.
- [21] 张斌, 张福韬, 陈曦, 等. 土壤有机质周转过程及其矿物和团聚体物理调控机制[J]. 土壤与作物, 2022, 11(3): 235-247.
- Zhang B, Zhang F T, Chen X, et al. Soil organic matter turnover and controlling mechanisms of mineralogy and aggregation: new insights [J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(3): 235-247.
- [22] Ma W Z, Yang J, Ding S R, et al. Spatial and temporal variation characteristics of wind erosion climate erosivity in the arid desert region of Northwestern China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 14(4): 692-705.