

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.037; CSTR: 32311.14.rswc.2025.03.037.

贾玉良, 陈苏社, 邓强, 等. 多煤层重复采动下地表裂缝对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 98-107.

Jia Yuliang, Chen Sushe, Deng Qiang, et al. Effects of subsidence fissures on soil physicochemical properties under multi-coal seam repeated mining [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 98-107.

# 多煤层重复采动下地表裂缝对土壤理化性质的影响

贾玉良<sup>1</sup>, 陈苏社<sup>1</sup>, 邓强<sup>2</sup>, 周海丰<sup>3</sup>, 王巍<sup>1</sup>, 邹友峰<sup>2</sup>, 聂小军<sup>2</sup>, 陈志超<sup>2</sup>

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司技术研究院, 陕西 神木 719315;

2. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 国能神东煤炭集团大柳塔煤矿, 陕西 神木 719315)

**摘要:** [目的] 探明生态脆弱矿区多煤层重复采动下地表裂缝对土壤理化性质的影响, 为该地区土地复垦与生态修复提供科学依据。[方法] 以神东矿区活鸡兔矿井为研究区, 遴选一次、二次、三次采动裂缝区与未扰动区, 通过土壤样品采集和分析, 揭示不同采动裂缝区土壤理化性质的变化及它们的相关性。[结果] (1) 土层深度、重复采动均显著影响裂缝区土壤容重、含水量、总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量和毛管持水量 ( $p < 0.05$ ), 且存在显著的交互作用 ( $p < 0.05$ ); 一次、二次采动裂缝区土壤孔隙度下降、容重增加, 土壤持水能力下降; 三次采动裂缝区土壤孔隙度与持水能力增加, 土壤含水量显著高于未扰动区同一土层 ( $p < 0.05$ ), 最大值为 15.01% (50—70 cm 土层)。(2) 重复采动显著影响裂缝区土壤全氮、碱解氮、全磷、有机质含量 ( $p < 0.05$ ); 一次、二次采动裂缝区土壤全氮、全磷含量显著低于未扰动区 ( $p < 0.05$ ); 三次采动裂缝区土壤全氮、碱解氮、全磷含量与未扰动区差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 0—10 cm 土层土壤有效磷、有机质含量分别为 9.97 mg/kg, 13.18 g/kg, 显著高于其他区域 ( $p < 0.05$ )。(3) 三次重复采动显著增强了裂缝区土壤物理性质、土壤养分含量与土壤含水量之间的负相关性 ( $p < 0.05$ )。[结论] 多煤层重复采动下地表裂缝导致土壤理化性质空间异质性增强, 但作用方向、作用程度与采动次数之间无相关性。

**关键词:** 地表裂缝; 土壤理化性质; 多煤层; 重复采动; 生态脆弱矿区

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0098-10

## Effects of subsidence fissures on soil physicochemical properties under multi-coal seam repeated mining

Jia Yuliang<sup>1</sup>, Chen Sushe<sup>1</sup>, Deng Qiang<sup>2</sup>, Zhou Haifeng<sup>3</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>,  
Zou Youfeng<sup>2</sup>, Nie Xiaojun<sup>2</sup>, Chen Zhichao<sup>2</sup>

(1. CHN Energy Shendong Coal Technology Research Institute, Shenmu, Shaanxi 719315, China;

2. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. Daliuta Coal mine, China Energy Shengdong Coal Group Co.Ltd., Shenmu, Shaanxi 719315, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the impact of ground fissures on soil physical and chemical properties under multi-coal seam repeated mining in the ecological fragile area, and to provide scientific support for land reclamation and ecological restoration. [Methods] Subsidence fissure zones caused by primary, secondary and tertiary mining were selected as the research objects in Huojitu mine of Shendong mining area. Through soil sampling and testing, soil physicochemical properties were analyzed, and their responses to mining frequency were revealed. [Results] (1) The soil layer, repeated mining and their interactions significantly affected the soil bulk density, moisture content, total porosity, capillary porosity, maximum water holding capacity, and capillary water holding capacity in the fissured area. The soil porosity decreased, bulk density increased, and soil

收稿日期: 2024-08-20

修回日期: 2024-11-19

接受日期: 2024-11-19

资助项目: 河南理工大学人文社科基金资助 (SKND2023-04); 自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室开放基金资助项目 (KLM202308); 河南省科技攻关项目 (232102320324); 河南省高等学校重点科研项目 (24B180007); 中国神华能源股份有限公司神东煤炭分公司委托项目 (技术研究院 HT(2023)16 号)

第一作者: 贾玉良 (1989—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 硕士, 研究方向为煤矿开采沉陷与生态修复。E-mail: 20022949@chnenergy.com.cn

通信作者: 邓强 (1989—), 男, 山东日照人, 讲师, 博士, 研究方向为土地复垦与生态修复。E-mail: dengq@hpu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

water holding capacity decreased in primary and secondary mining-induced fissure zones. Soil porosity and water holding capacity increased in the tertiary mining-induced fissure zone, and soil water content was significantly higher than that in the same soil layer in the undisturbed zone ( $p < 0.05$ ), with a maximum value of 15.01% (50—70 cm soil layer). (2) Repeated mining significantly affected the contents of soil total nitrogen, alkaline nitrogen, total phosphorus and organic matter in fissure areas ( $p < 0.05$ ). Soil total nitrogen and total phosphorus contents in primary and secondary mining-induced fissure zones were significantly lower than those in the undisturbed zone ( $p < 0.05$ ). There was no significant difference ( $p > 0.05$ ) in the contents of total nitrogen, alkaline nitrogen, and total phosphorus between the tertiary mining-induced fissure zone and the undisturbed zone ( $p > 0.05$ ). The contents of available phosphorus and organic matter in the 0—10 cm soil layer were 9.97 mg/kg and 13.18 g/kg, respectively, which were significantly higher than those in other areas ( $p < 0.05$ ). (3) Repeated mining significantly enhanced the negative correlation between different soil physical properties, soil nutrient content and soil water content in fissure zones ( $p < 0.05$ ). [Conclusion] It can be seen that the spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties is enhanced by multi-coal seam repeated mining in fissure zones, but the exact direction and degree of variations has no correlation with mining frequency.

**Keywords:** subsidence fissures; soil physicochemical properties; multi-coal seam; repeated mining; ecologically fragile mining area

根据对我国能源结构趋势的预测,2025年我国煤炭消费量将占能源消费总量的50%~52%,且在较长一段时间内其主导地位不会发生改变<sup>[1]</sup>。近年来,随着我国煤炭生产重心的西移,开采扰动使得原本就非常脆弱的干旱半干旱区生态环境日益恶化,成为黄河流域中游煤炭基地生态保护与高质量发展的主要制约因素<sup>[2]</sup>。煤矿区大规模、长时间、高强度的地下开采,使原本的地表形态发生变形和破坏,造成严重的采动损害。煤层重复采动容易引起岩层破断及地表沉降,导致塌陷形成不同类型的地表裂缝并不断发展<sup>[3]</sup>。裂缝增加了土壤水分的蒸发面积和渗透通道,破坏了煤层之上含水层的补、径、排系统,使地下水垂直下渗到采煤底板,引起地下水位下降和地下水资源渗漏损失<sup>[4]</sup>,直接或间接地导致地表水流量减少或断流<sup>[5]</sup>,严重破坏矿区的上覆岩层、地表生态环境和地貌景观。采煤塌陷区的地表裂缝是重复采动损害的一种重要灾害类型,增加了矿井漏风、溃水的危险,严重影响矿区安全生产和居民生活。地表裂缝的形成和发展与采矿地质条件、土壤特性和土地类型等因素相关,反映了地表在不同采动阶段的应力变化和地质响应<sup>[6-7]</sup>。一次采动裂缝是指在煤矿开采初期,由于上覆岩层受力变化破坏了岩土体的天然应力平衡,而导致初始地表裂缝。一般出现在煤壁前方,与工作面方向平行。二次采动裂缝是由于重复应力作用导致的裂缝,是在一次开采后形成的新的或原有裂缝的扩展。覆岩破坏特征明显,裂缝带高度不断增加,最终导致上部煤层覆岩垮落带和裂缝带的二次下沉破坏<sup>[8]</sup>。三次采动裂缝是在重复采动过程中进一步发展的裂缝。

采煤塌陷形成的地表裂缝使松散层土体结构受损,影响土壤生态系统物质循环,生物所需元素随着裂缝产生和地表径流而流入较深区域。裂缝加剧了水、气侵蚀效应和土壤颗粒的聚沉效应,导致土壤团聚体崩解。赵国平等<sup>[9]</sup>通过对年限不同的塌陷区域土壤粒径组成变化研究发现,采煤塌陷对裂缝土壤发生了扰动,使地表区域的土壤颗粒结构性性质发生变化,土壤容重增加,孔隙度降低,从而使土壤颗粒变得粗粒化,细粒物质减少,物理性黏粒含量显著减少,土壤含水量下降。周瑞平<sup>[10]</sup>研究表明在矿区不同采煤塌陷程度下,随着矿区塌陷程度的加深,土壤容重变小,在相同的坡位上,对照区的土壤容重普遍高于塌陷区;随着塌陷年限增长,土壤容重和沉陷的稳定性与对照区之间的差异慢慢减小。陈龙乾等<sup>[11]</sup>研究发现兖州矿区采煤沉陷区表层土壤的物理特性受到了显著影响。郟晨龙等<sup>[12]</sup>运用地统计学原理,得出采煤活动会使土壤之间的内摩擦角增大,同时降低土壤的容重。何金军等<sup>[13]</sup>指出,塌陷会导致黄土丘陵区的土壤内部总孔隙度明显变小,而毛管孔隙度却有变大的趋势,且土壤呈现沙化趋势;采煤沉陷对黄土丘陵区土壤影响作用大小依次为土壤含水量、物理性砂粒含量、土壤密度和孔隙度。土壤物理性质的改变对土壤养分积聚与贮存造成不利营养,导致氮、磷、钾及有机质的含量下降或空间变异性增大。研究表明,呼伦贝尔草原采煤沉陷区土壤全氮、全磷含量显著降低,而有机质和全钾含量变化不明显<sup>[14]</sup>。神东矿区沉陷裂缝边缘土壤含水量显著降低,土壤pH、有机质、有效磷、速效钾含量等也发生相应改变,但并不显著<sup>[15]</sup>。Tripathi等<sup>[16]</sup>的研究探讨了印度南部采煤沉陷后地表裂缝对土壤养分迁移的影

响,结果表明这些裂缝对土壤总氮和总磷产生了不利影响。Luo等<sup>[17]</sup>的研究表明,采煤沉陷导致土壤pH值和含水量降低,裂缝区不同土层的土壤养分含量也会发生改变。

神东矿区是国家规划的13个大型煤炭基地之一,是我国首个建成的2亿t级煤炭基地。由于其地处毛乌素沙地边缘,气候干旱,水资源短缺,大规模、高强度的煤炭资源开发,使部分区域产生了地面塌陷、地表裂缝、水资源破坏、土壤沙化、水肥流失严重和植被退化等一系列矿山生态环境问题<sup>[2,18]</sup>。目前,已有众多学者针对神东矿区采煤沉陷、地表裂缝对土壤理化性质的影响开展了探索性的调查研究,但多数研究主要集中在单一煤层开采后地表损伤特征和土壤理化性质变化等方面,而对于多煤层重复采动下地表裂缝对土壤理化性质的影响研究相对较少。鉴于此,本文以神东矿区活鸡兔矿井重复采动裂缝区土壤为研究对象,分析一次、二次和三次采动裂缝区土壤理化性质及其相关性,揭示多次重复采动对土壤理化性质的影响规律,以为该区煤炭资源绿色开发、矿区土地复垦和植被生态修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市大柳塔镇活鸡兔井田22206,22208,22210工作面。活鸡兔井隶属于大柳塔煤矿,是神东煤炭集团大柳塔煤矿所属的两座特大型现代化矿井之一,年产量达1200万t。井田位于黄土高原丘陵沟壑区与毛乌素沙漠的过渡地带,地理坐标为39°9′32″—39°16′51″N,110°8′11″—110°16′32″E。该区属于干旱半干旱高原大陆性气候,平均气温6.0~8.5℃,年降水量250~440mm,降水主要集中在7—9月,年平均潜在蒸发量1800~2500mm,无霜期约156d。

研究区属沙盖黄土丘陵地貌,地表为流动沙及半固定沙所覆盖。其中,北部和东部为黄土丘陵沟壑区,形成梁峁、沟壑和黄土塬3种地貌;中部及西南部属于波状高原台地,地形平缓开阔,以风沙地貌为主。区内土壤以风沙土为主,结构疏松,抗蚀性差,极易遭受侵蚀。该区典型植被为丛生矮禾草半灌木荒漠草原植被,主要物种有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、本氏针茅(*Stipa bungeana*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、米蒿(*Artemisia dalai-lamae*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等。

矿井可采煤层由上而下分别为1<sup>-2±</sup>、1<sup>-2</sup>、2<sup>-2±</sup>、

2<sup>-2</sup>、3<sup>-1</sup>、4<sup>-3</sup>、5<sup>-1</sup>煤层,目前主采1<sup>-2</sup>、2<sup>-2</sup>、5<sup>-1</sup>煤层。工作面采用走向长壁采煤法,综合机械化采煤工艺,一次采全高,全部垮落法管理顶板,以致地表沉陷明显,并表现为非连续的下沉移动形态,下沉系数在0.75左右。

### 1.2 试验设计

本研究采样时间为2024年5月。根据开采历史(表1),将研究区划分一次采动区(22206工作面)、二次采动区(22208与12上208工作面重合区)、三次采动区(22210与12上312,12314工作面重合区),选取裂缝分布密集区为采样区,位置如图1所示。由于研究区大多数裂缝在煤炭开采后的6~12个月内出现自然弥合,因此研究对象主要是弥合性裂缝。裂缝宽10~33cm、长3~12m、深0.5~1.5m,呈交错式分布。采样区平均坡度为15°~20°,坡型为均匀坡,坡向为东北方向;土壤成分主要为砂粒,质量分数为89%~94%,粉粒和黏粒占比较少;植被为沙蒿灌丛,株高25.4~36.2cm、冠幅37.5~46.7cm、盖度27.8%~39.0%。在采样工作面500m以外的未扰动区选择坡度、坡形、坡向、土壤及植被类型相似的坡面作为对照。

表1 工作面基本信息

Table 1 Basic information of coalfaces

煤层	工作面	回采结束 时间	平均 采厚/m	平均 采深/m
1 <sup>-2±</sup>	12上208,12上312	2013年9月	3.46	50
1 <sup>-2</sup>	12314	2015年6月	5.58	80
2 <sup>-2</sup>	22206,22208,22210	2024年2月	3.96	100

### 1.3 样品采集和分析

在3个采动裂缝区距离裂缝20cm处分别挖取3个1m深的土壤剖面,分为6层采集土壤样本,每层3个重复,具体的土壤剖面分层为0—10cm,10—20cm,20—30cm,30—50cm,50—70cm,70—100cm。利用环刀取各土层的原状土,用于测定土壤物理性质;在同一取样点另取土壤样品1kg混合均匀,剔除石块、植物残根等杂物,经室内自然风干,研磨后过2.0,0.25mm筛用于测定土壤化学性质。

土壤物理性质中,土壤容重、含水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量,均采用环刀法测定,计算方法参考行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定(LY/T1215-1999)》<sup>[19]</sup>。土壤化学性质检测方法参照相关文献<sup>[20]</sup>,其中土壤pH采用电位法测定,土壤全氮采用半微量凯式法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散中和滴定法测定,土壤全磷、有效磷采用钼锑抗比色法测定,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定。

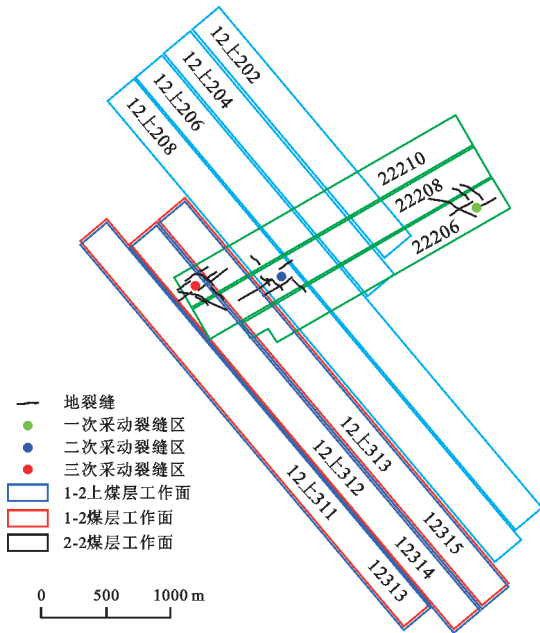


图 1 试验布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test plot layout

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据的整理与分析,采用 SPSS 26.0 进行单因素(One-way ANOVA)、双因素方差分析(Two-way ANOVA)和多重比较,分析重复采动、土层深度的影响,利用 Pearson 相关性系数法分析土壤理化性质间的相关性。相关图件采用 ArcMap 10.2, CorelDRAW 2020, Origin 2021 软件绘制。

表 2 重复采动与土层对土壤物理性质影响的方差分析结果

Table 2 Results of variance analysis on effects of repeated mining and soil layers on soil physical properties

影响因素	p 值							
	土壤容重	土壤含水量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	最大持水量	毛管持水量	非毛管持水量
土层深度	0.024*	0.030*	0.030*	0.010*	0.270	0.009**	0.024*	0.333
重复采动	0.031*	0.001**	0.001**	0.028*	0.302	0.032*	0.047*	0.292
土层×重复采动	0.025*	0.019*	0.043*	0.041*	0.179	0.018*	0.040*	0.206

注: \*表示影响显著( $p < 0.05$ ), \*\*表示影响极显著( $p < 0.01$ ), 下同。

2.1.2 土壤孔隙度和持水量 土层深度、重复采动均显著影响土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度( $p < 0.05$ ), 且存在显著的交互作用( $p < 0.05$ )(表 2)。由图 3 可知, 在一次、三次采动裂缝区, 随着土层深度的增加, 土壤总孔隙度呈下降趋势; 未扰动区、二次采动裂缝区 0—10 cm 土层与 70—100 cm 土层土壤总孔隙度差异不显著( $p > 0.05$ ); 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层土壤总孔隙度最大值出现在三次采动裂缝区(44.59%, 46.19%, 44.83%), 且显著高于其他区域( $p < 0.05$ )。在一次、三次采动裂缝区, 随着土层深度的增加, 土壤毛管孔隙度呈下降趋势; 未扰动区、二次采动裂缝区土壤毛管孔隙度在不同土层间差

2 结果与分析

2.1 不同采动裂缝区土壤物理性质特征

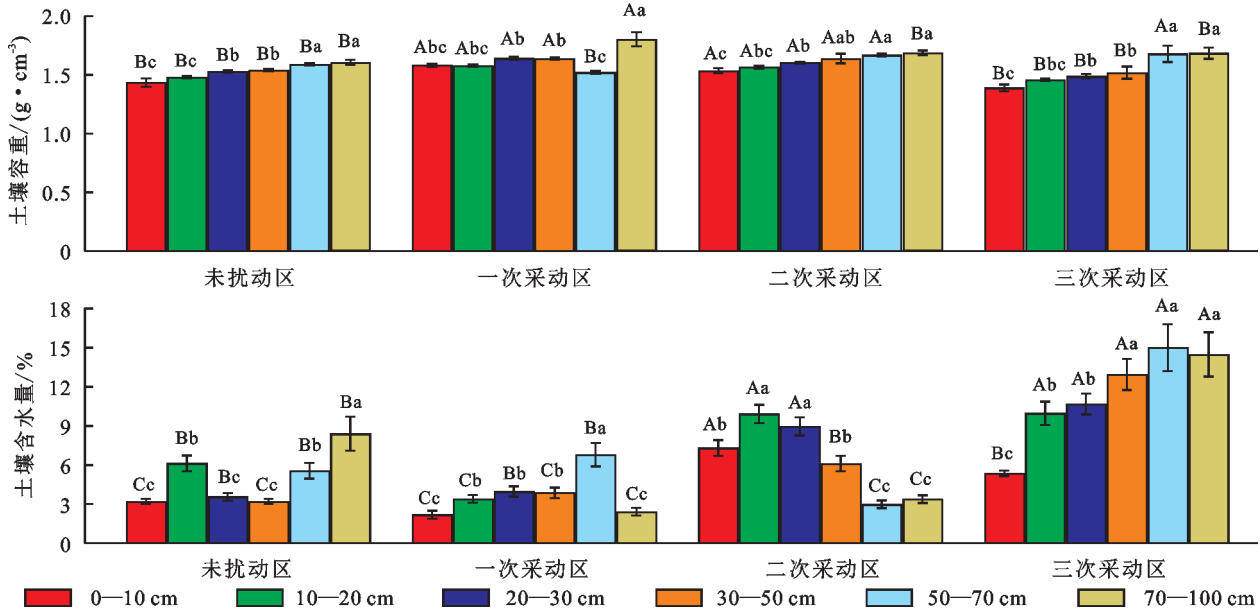
2.1.1 土壤容重和含水量 方差分析结果显示, 土层深度、重复采动均显著影响土壤容重和土壤含水量( $p < 0.05$ ), 且存在显著的交互作用( $p < 0.05$ )(表 2)。由图 2 可知, 对于同一区域, 随着土层深度的增加, 土壤容重呈增加趋势。一次、二次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm 土层土壤容重显著高于未扰动区和三次采动裂缝区( $p < 0.05$ )。除 50—70 cm 土层外, 三次采动裂缝区土壤容重与未扰动区差异不显著( $p > 0.05$ )。土壤含水量在不同区域与土层之间差异较大。除二次采动裂缝区外, 土壤含水量随着土层深度的增加呈增加趋势, 最大值分别为 8.41% (未扰动区, 70—100 cm 土层), 6.79% (一次采动区, 50—70 cm 土层), 15.01% (三次采动区, 50—70 cm 土层)。二次采动裂缝区土壤含水量最大值(9.93%)出现在 10—20 cm 土层, 并随着深度增加呈减少趋势。二次、三次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm 土层土壤含水量显著高于未扰动区和一次采动裂缝区( $p < 0.05$ ); 三次采动裂缝区 50—70 cm, 70—100 cm 土层土壤含水量显著高于未扰动区和一次、二次采动裂缝区( $p < 0.05$ ); 未扰动区 10—20 cm, 70—100 cm 土层土壤含水量显著高于一次采动裂缝区( $p < 0.05$ ), 其他土层二者间差异不显著( $p > 0.05$ )。

异不显著( $p > 0.05$ ); 三次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层土壤毛管孔隙度显著高于其他区域( $p < 0.05$ ); 30—50 cm, 50—70 cm, 70—100 cm 土层土壤毛管孔隙度在不同区域间差异不显著( $p > 0.05$ )。总体上看, 同一区域不同土层或不同区域同一土层的土壤非毛管孔隙度无明显的变化规律。

土层深度、重复采动均显著影响土壤最大持水量和土壤毛管持水量( $p < 0.05$ ), 且存在显著的交互作用( $p < 0.05$ )(表 2)。如图 4 所示, 除二次采动裂缝区外, 其他区域的土壤最大持水量随土层深度的增加而减少; 三次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm 土层土壤最大持水量分别为 32.14%,

31.57%, 30.05%, 26.13%, 显著高于其他区域 ( $p < 0.05$ ); 三次采动裂缝区 50—70 cm, 70—100 cm 土层土

壤最大持水量与未扰动区差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 但显著高于一次采动裂缝区。



注: 图中数据均为平均值±标准误。大写字母表示同一土层不同区域之间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 小写字母表示同一区域不同土层之间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同。

图 2 不同采动裂缝区土壤容重和含水量

Fig. 2 Soil bulk densities and water contents in different mining fissure zones

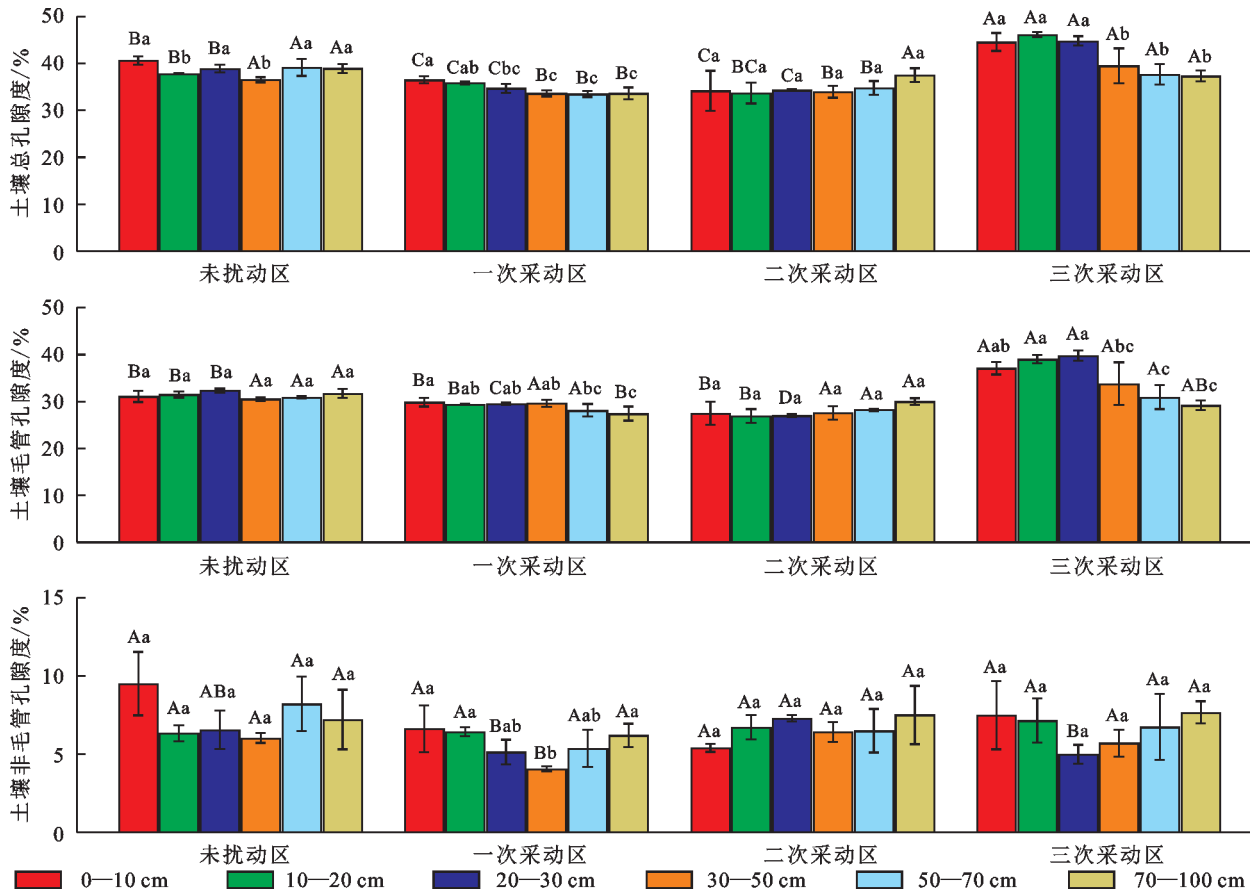


图 3 不同采动裂缝区土壤孔隙度

Fig. 3 Soil porosity in different mining fissure zones

土壤毛管持水量的变化规律与土壤最大持水量相似, 除二次采动裂缝区外, 土壤毛管持水量随土层

深度的增加而减少; 三次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 土层土壤毛管持水量分别为

26.72%, 26.68%, 26.69%, 显著高于其他区域 ( $p < 0.05$ ); 未扰动区和一次、三次采动裂缝区 30—50 cm, 50—70 cm 土层土壤毛管持水量差异不显著 ( $p >$

0.05), 但显著高于二次采动裂缝区 ( $p < 0.05$ )。总体上看, 同一区域不同土层或不同区域同一土层的土壤非毛管持水量无明显的变化规律。

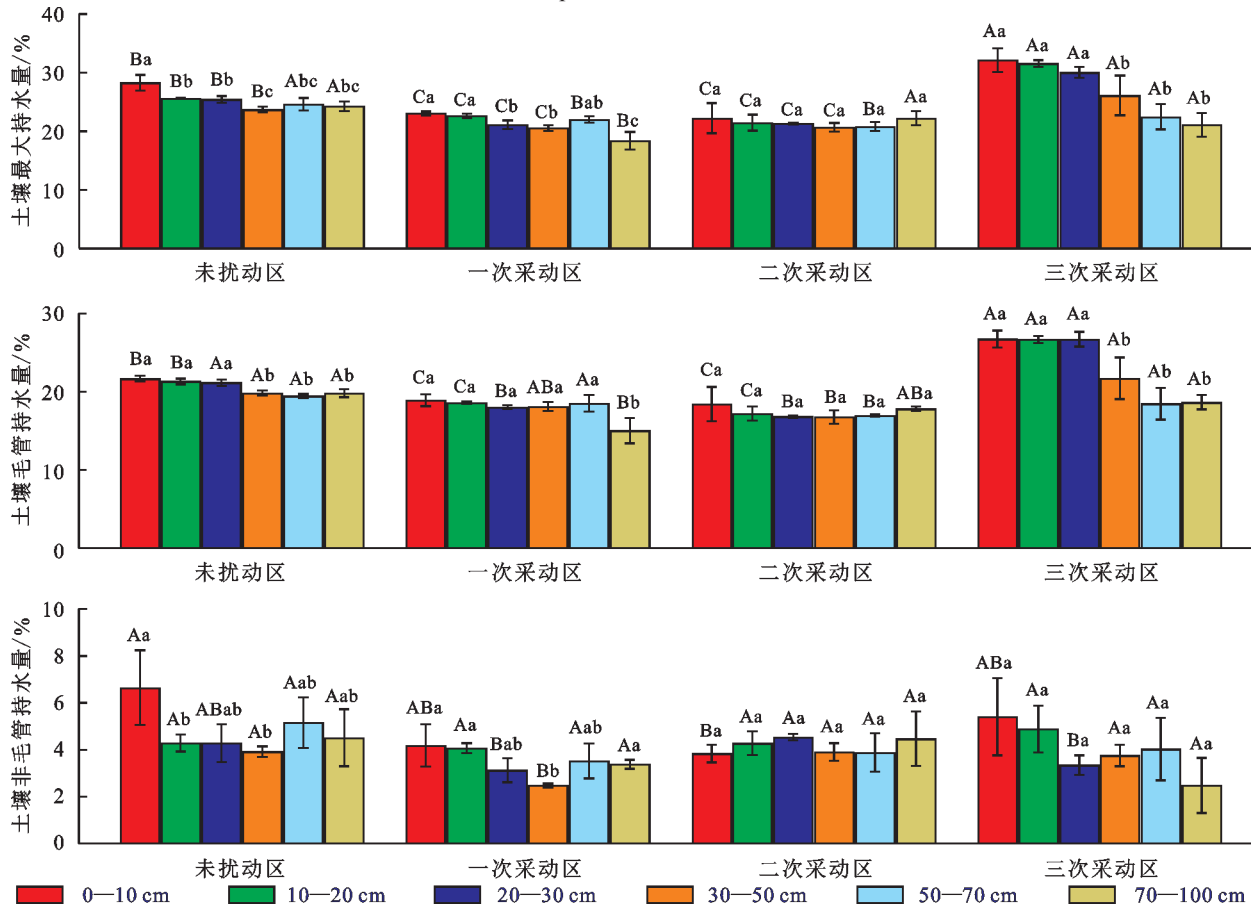


图4 不同采动裂缝区土壤持水量

Fig. 4 Soil water storage capacities in different mining fissure zones

## 2.2 不同采动裂缝区土壤化学性质特征

由表3可知, 研究区土壤呈碱性, 土层深度、重复采动对土壤pH的影响均不显著 ( $p > 0.05$ ); 同一区域不同土层间土壤pH差异较小; 三次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 70—100 cm 土层土壤pH分别为7.78, 7.00, 7.08, 7.22, 显著低于其他区域 ( $p < 0.05$ )。土层深度、重复采动均显著影响土壤全氮含量 ( $p < 0.05$ ), 且存在显著的交互作用 ( $p < 0.05$ ); 随着土层深度的增加, 土壤全氮含量呈下降趋势; 从浅至深, 各土层全氮含量最大值分别为 369.00 mg/kg (三次采动裂缝区), 245.00 mg/kg (未扰动区), 287.67 mg/kg (三次采动裂缝区), 182.33 mg/kg (未扰动区), 201.33 mg/kg (未扰动区), 193.33 mg/kg (未扰动区), 且显著高于一次、二次采动裂缝区 ( $p < 0.05$ )。重复采动显著影响土壤全氮含量 ( $p < 0.05$ ); 未扰动区、二次采动裂缝区土壤碱解氮含量随土层深度的增加而减少; 同一土层三次采动裂缝区土壤碱解氮含量与未扰动区差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 但均显著高于一次采动裂缝区 ( $p < 0.05$ )。

重复采动对土壤全磷含量具有极显著影响 ( $p < 0.01$ ); 除二次采动裂缝区外, 其他区域土壤全磷均出现表层富集特征; 各土层全磷含量最大值均出现在未扰动区, 变化范围为 218.33~319.33 mg/kg, 最小值均出现在一次采动裂缝区, 变化范围为 142.33~183.33 mg/kg, 且显著低于未扰动区 ( $p < 0.05$ )。土层深度显著影响土壤有效磷含量 ( $p < 0.05$ ), 重复采动对土壤有效磷含量影响不显著 ( $p > 0.05$ ), 但二者存在显著的交互作用 ( $p < 0.05$ ); 二次、三次采动裂缝区土壤有效磷呈现表层富集特征; 三次采动裂缝区 0—10 cm, 10—20 cm 土层有效磷含量显著高于其他区域 ( $p < 0.05$ ), 二次、三次采动裂缝区 50—70 cm, 70—100 cm 土层有效磷含量显著低于其他区域 ( $p < 0.05$ )。土层深度、重复采动均显著影响土层有机质含量 ( $p < 0.05$ ), 且存在显著的交互作用 ( $p < 0.05$ ); 不同区域土壤有机质含量均随土层深度的增加而减少; 各土层有机质含量最大值均出现在三次采动裂缝区, 变化范围为 13.18~4.62 g/kg, 且显著高于一次、二次采动裂缝区 ( $p < 0.05$ ); 一次、二次采动裂缝区各土层有机质含量与未扰动区差异不显著 ( $p > 0.05$ )。

表 3 不同采动裂缝区土壤 pH、养分含量和方差分析结果  
Table 3 Soil pH, nutrient contents and variance analysis in different mining fissure zones

采动区	土层深度/cm	pH	全氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )
未扰动区	0—10	8.20±0.34Aa	353.33±19.14Aa	31.57±15.34Aa	319.33±19.76Aa	2.77±0.61Ba	6.04±0.59Ba
	10—20	8.54±0.19Aa	245.00±22.11Ab	26.50±3.96Aa	308.33±19.01Aa	1.93±0.25Bab	4.50±1.21Bab
	20—30	8.23±0.09Aa	245.00±8.54Bb	20.83±6.51Aab	227.00±16.00Ab	1.67±0.49Ab	3.59±0.89Bb
	30—50	7.86±0.09Ab	182.33±20.84Ac	18.88±3.10Aab	218.33±20.26Ab	1.63±0.31Ab	3.80±0.77ABb
	50—70	8.20±0.09Aa	201.33±14.01Abc	14.11±3.03Ab	225.00±12.53Ab	1.57±0.06Ab	3.55±0.64Bb
	70—100	7.91±0.09Bb	193.33±22.37Ac	15.30±0.57Ab	260.67±11.93Aab	2.77±0.55Aa	3.98±0.60ABb
一次采动区	0—10	8.30±0.34Aa	208.33±35.50Ca	6.64±4.03Ba	183.33±7.51Ca	3.13±0.46Ba	7.18±1.66Ba
	10—20	8.44±0.19Aa	77.00±21.70Cb	8.01±1.77Ba	145.67±2.52Cb	1.27±0.21Bb	3.93±1.17Bb
	20—30	8.23±0.09Aa	55.33±16.29Db	7.49±2.30Ba	142.33±2.08Bb	1.27±1.50Ab	3.02±1.32Bb
	30—50	8.14±0.06Aa	21.67±2.52Dc	7.50±2.89Ba	154.00±9.17Bb	1.77±0.06Aa	2.47±0.89Bb
	50—70	7.77±0.02Bb	30.33±3.51Bc	5.85±1.47Ba	158.67±3.51Bb	1.90±1.04Aa	2.64±0.38Bb
	70—100	8.49±0.15Aa	4.00±4.36Cd	6.00±1.64Ba	149.33±16.26Cb	2.23±1.01Aa	3.10±0.31Bb
二次采动区	0—10	8.19±0.29Aa	275.00±47.09Ba	27.10±10.34Aa	239.67±16.77Ba	2.43±0.49Ba	5.34±0.41Ba
	10—20	8.76±0.29Aa	199.67±12.52Bb	22.77±9.74Aa	248.33±11.02Ba	1.67±0.12Bb	3.72±0.29Bb
	20—30	8.54±0.06Aa	175.33±13.61Cb	27.66±15.09Aa	248.33±65.73Aa	1.60±0.17Ab	3.66±0.12Bb
	30—50	8.50±0.60Aa	81.67±20.53Cc	15.37±0.38Ab	213.33±31.02Aa	1.43±0.51Abc	2.77±0.65Bbc
	50—70	8.36±0.03Aa	24.33±27.74Bd	6.72±0.24Bc	185.67±45.62Aa	0.97±0.15Bc	2.92±0.41Bbc
	70—100	8.49±0.21Aa	15.00±15.87Cd	6.61±0.28Bc	204.00±19.70Ba	1.10±0.10Bc	2.53±0.31Bc
三次采动区	0—10	7.78±0.25Ba	369.00±56.56Aa	23.63±14.95Aa	278.67±31.79Aa	9.97±1.70Aa	13.18±1.45Aa
	10—20	7.00±0.02Bb	209.67±63.11ABb	29.70±14.89Aa	249.33±15.28Ba	4.93±1.07Ab	10.41±1.56Aa
	20—30	7.08±0.30Bb	287.67±22.94Aab	21.77±17.97Aa	189.67±44.75Ab	1.37±0.29Ac	5.17±0.23Ab
	30—50	7.84±0.13Aa	136.00±24.25Bd	16.07±4.52Aa	199.67±24.11Ab	0.73±0.12Bc	5.57±1.27Ab
	50—70	7.34±0.19Bab	194.67±15.01Ac	11.97±3.30Aa	202.33±7.23Ab	0.80±0.17Bc	5.15±0.40Ab
	70—100	7.22±0.09Cab	120.48±12.13Bd	12.34±4.16Aa	189.40±12.40Bb	0.92±0.28Bc	4.62±0.99Ab
p 值	土层	0.125	0.024*	0.058	0.067	0.035*	0.001**
	重复采动	0.073	0.019*	0.020*	0.007**	0.066	0.046*
	土层×重复采动	0.533	0.001**	0.092	0.910	0.033*	0.016*

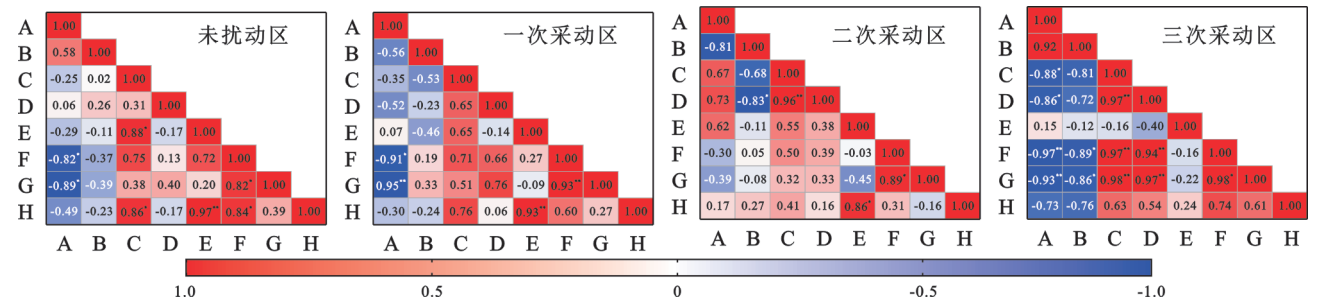
注:图中数据均为平均值±标准误。大写字母表示同一土层不同区域之间差异显著( $p < 0.05$ ),小写字母表示同一区域不同土层之间差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.3 不同采动裂缝区土壤理化性质间的相关性

不同区域土壤物理性质间的相关性分析结果如图 5 所示。未扰动区土壤容重与最大持水量、毛管持水量呈显著负相关( $p < 0.05$ ),土壤总孔隙度与非毛管孔隙度、非毛管持水量呈显著正相关( $p < 0.05$ ),土壤非毛管孔隙度与非毛管持水量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),土壤最大持水量与毛管持水量、非毛管持水量呈显著正相关( $p < 0.05$ ),土壤含水量与其他因子相关性均不显著( $p > 0.05$ )。一次采动裂缝区土壤物理性质相关性分析结果与未扰动区相似。二次采动裂缝区土壤含水量与毛管孔隙度呈显著负相关( $p < 0.05$ ),土壤总孔隙度与毛管孔隙度呈极显著正相关( $p < 0.01$ )。三次采动裂缝区土壤物理性质间的相关性有所增强,土壤容重与总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管

持水量呈显著负相关( $p < 0.05$ ),土壤含水量与最大持水量、毛管持水量呈显著负相关( $p < 0.05$ )。

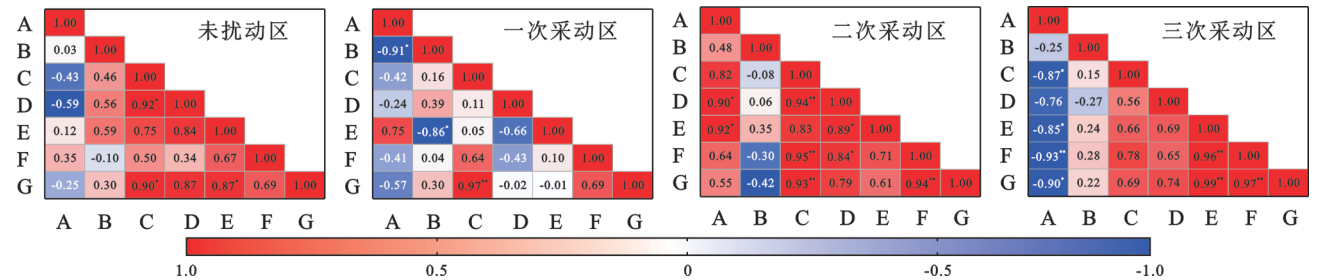
不同区域土壤含水量与化学性质间的相关性分析结果如图 6 所示。未扰动区土壤全氮与碱解氮、有机质呈显著正相关( $p < 0.05$ ),土壤全磷与有机质呈显著正相关( $p < 0.05$ )。一次采动裂缝区相关性分析结果与未扰动区差异较大。二次采动裂缝区各因子间的相关性有所增强,土壤含水量与碱解氮、全磷呈显著正相关( $p < 0.05$ ),土壤全氮与碱解氮、全磷、有效磷、有机质呈显著正相关( $p < 0.05$ ),土壤碱解氮与全磷、有效磷呈显著正相关( $p < 0.05$ )。三次采动裂缝区各因子间的相关性分析结果与其他区域差异较大,尤其是土壤含水量与全氮、全磷、有效磷、有机质呈显著负相关( $p < 0.05$ )。



注:A表示土壤容重;B表示含水量;C表示总孔隙度;D表示毛管孔隙度;E非毛管孔隙度;F最大持水量;G毛管持水量;H非毛管持水量。

图 5 不同采动裂缝区土壤物理性质的相关关系

Fig. 5 Correlation between soil physical properties in different mining fissure zones



注:A表示土壤含水量;B表示土壤pH;C表示全氮;D表示碱解氮;E表示全磷;F表示有效磷;G表示有机质。

图 6 不同采动裂缝区土壤含水量与化学性质的相关关系

Fig. 6 Correlation between soil water content and chemical properties in different mining fissure zones

### 3 讨论

#### 3.1 多煤层重复采动下地表裂缝对土壤物理性质的影响

土壤水分是驱动干旱半干旱矿区植被恢复的主要因素<sup>[21]</sup>。多煤层重复采动裂缝区土壤含水率空间分布研究表明,土壤含水量垂直分布规律受沉陷裂缝的干扰而发生改变。一次采动裂缝区土壤含水量垂直分布规律与未扰动区基本一致,而二次采动裂缝区土壤含水量随着土层深度增加呈现下降趋势。原因可能二次采动诱发裂缝深度与宽度增加,土壤与空气的接触面积增大,导致蒸发量增加<sup>[22]</sup>。三次采动裂缝区土壤含水量随土层深度增加呈增加趋势,且显著高于未扰动区同一土层,说明重复采动对土壤含水量的影响与采动次数并不存在正相关关系。研究表明,浅埋深、多煤层开采上覆岩层不易产生较大的应力集中,工作面区段煤柱不易破坏,易在地表形成波浪状下沉盆地<sup>[23]</sup>,而沉陷盆地中心有利于降水集中,导致土壤水分含量增加<sup>[24]</sup>。土壤容重、土壤总孔隙度、非毛管孔隙度是影响土壤水分入渗和蒸发能力的主要影响因子。一次、二次采动裂缝区土体下沉,对坡底和沉陷中心的土壤形成挤压,显著提高了土壤容重,降低了土壤总孔隙度,最终导致土壤持水能力下降<sup>[25]</sup>。三次采动显著提高了土壤孔隙度和持水能力,一方面是裂缝重复产生与闭合破坏土壤结构,使通气、透水的大孔隙数量增多;另一方面是细粒物质随水分入渗与径流而损失<sup>[26]</sup>。此

外,三次采动裂缝区土壤物理性质间的相关性有所增强,表明土壤结构破坏重组,水分运移变化剧烈。

#### 3.2 多煤层重复采动下地表裂缝对土壤化学性质的影响

采煤沉陷裂缝改变土壤的原有物理结构,影响有机物和矿物质的分解、淋溶和沉积,可对土壤养分构成极大威胁<sup>[27]</sup>。本研究中重复采动没有改变土壤养分垂直分布规律,对土壤pH的影响也有限,但一次、二次采动显著降低裂缝区土壤全氮、全磷含量,与前人研究结论一致<sup>[28]</sup>。三次采动对土壤全氮、碱解氮、全磷含量的影响不显著,甚至部分土层的有效磷、有机质含量高于未扰动区。可能的原因是三次采动裂缝区土壤养分随径流冲刷与水分入渗在低洼处沉积,形成土壤“肥力岛”<sup>[29]</sup>。一次重复采动裂缝区土壤养分含量间的相关性改变;二次重复采动裂缝区土壤全氮、碱解氮、全氮、有效磷、有机质含量之间表现为强空间自相关性;三次重复采动裂缝区土壤养分含量与土壤含水量呈显著负相关性,说明重复采动导致地表土壤受到严重的扰动,土壤养分空间异质性增强,土壤养分与土壤水分原有的空间关联性遭到破坏<sup>[30]</sup>。

### 4 结论

多煤层重复采动下地表裂缝改变土壤容重、孔隙度与持水能力,增强土壤水分空间异质性,但影响方向、影响程度与采动次数之间没有关联性。重复采动没有改变土壤养分垂直分布规律,对土壤pH的

影响较弱。一次、二次采动裂缝区土壤养分含量降低,三次采动裂缝区土壤养分含量增加,同时不同采动裂缝区土壤养分含量相关性改变。以上结论说明,多煤层重复采动诱发的地表裂缝对土壤组分、结构与物质循环过程造成严重干扰,叠加复杂的地理环境,使得土壤理化性质改变具有“随机性”。未来应采取多种手段,加强重复采动条件下地表损伤—土壤破坏—水分养分空间变异增强传导过程以及地表动态裂缝自修复规律等的研究,为干旱半干旱煤矿区沉陷治理、土壤改良与植被恢复提供科学支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平,吴立新,郑德志.2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J].煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.  
Xie H P, Wu L X, Zheng D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(7):1949-1960.
- [2] 申艳军,杨博涵,王双明,等.黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J].煤田地质与勘探,2022,50(6):104-117.  
Shen Y J, Yang B H, WANG S M, et al. Typical characteristics of geological hazards and ecological environment of coal base in the bends area of the Yellow River [J]. Coal Geology & Exploration, 2022,50(6):104-117.
- [3] 刘一龙,杨天鸿,叶强,等.山区多煤层重复采动下地表变形特征[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3):507-516.  
Liu Y L, Yang T H, Ye Q, et al. Characteristics of surface deformation under repeated mining in mountainous area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3):507-516.
- [4] 许峰,靳德武,高振宇,等.煤炭高强度重复采动下地下水资源漏失规律研究[J].煤炭科学技术,2022,50(11):131-139.  
Xu F, Jin D W, Gao Z Y, et al. Study on law of groundwater resources leakage under high intensity repeated mining[J]. Coal Science and Technology, 2022,50(11):131-139.
- [5] 周书东,王小霞,李廷芥.煤田开采诱发环境地质问题及防治对策[J].水土保持研究,2007,14(3):351-354.  
Zhou S D, Wang X X, Li T G. Geological environmental problems induced by coalfield exploitation and control countermeasures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(3):351-354.
- [6] 苏宇,汤伏全,李景祥,等.矿山采动地表裂缝智能识别的YOLOv7模型改进研究[J].煤矿安全,2024,55(4):169-176.  
Su Y, Tang F Q, Li J X, et al. Improvement of YOLOv7 model for intelligent recognition of mining surface cracks [J]. Safety in Coal Mines,2024,55(4):169-176.
- [7] 苗彦平,谢晓深,陈小绳,等.浅埋煤层开采地表裂缝发育规律及机理研究[J].煤矿安全,2022,53(4):209-215.  
Miao Y P, Xie X S, Chen X S, et al. Development law and mechanism of surface cracks caused by shallow coal seam mining [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(4):209-215.
- [8] 李友伟,张玉军,肖杰.多煤层重复采动覆岩破坏高度发育规律研究[J].煤炭工程,2022,54(7):97-103.  
Li Y W, Zhang Y J, Xiao J. Development law of overburden failure height under repeated mining in multiple coal seams[J]. Coal Engineering, 2022,54(7):97-103.
- [9] 赵国平,毕银丽,杨伟,等.神府煤田风沙区采煤塌陷对粒度成分特征的影响[J].中国沙漠,2015,35(6):1461-1466.  
Zhao G P, Bi Y L, Yang W, et al. The impact of coal mining subsiding on particle size composition in Shenfu Coalfield [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6):1461-1466.
- [10] 周瑞平.采煤塌陷对风沙土容重影响的试验研究[J].内蒙古林业科技,2010,36(3):10-13.  
Zhou R P. Influence of coal mining subsidence on bulk density of sandy soil [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2010,36(3):10-13.
- [11] 陈龙乾,邓喀中,赵志海,等.开采沉陷对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J].煤炭学报,1999,24(6):586-590.  
Chen L Q, Deng K Z, Zhao Z H, et al. Space variation law of physical characteristics about farmland soil due to mining subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 1999,24(6):586-590.
- [12] 郟晨龙,卞正富,杨德军,等.鄂尔多斯煤田高强度井工煤矿开采对土壤物理性质的扰动[J].煤炭学报,2015,40(6):1448-1456.  
Qie C L, Bian Z F, Yang D J, et al. Effect of high-intensity underground coal mining disturbance on soil physical properties [J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(6):1448-1456.
- [13] 何金军,魏江生,贺晓,等.采煤塌陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响[J].煤炭科学技术,2007,35(12):92-96.  
He J J, Wei J S, He X, et al. Ground subsidence caused by mining affected to soil physics features in loess hills [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(12):92-96.
- [14] 韩煜,肖能文,赵伟,等.呼伦贝尔草原采煤沉陷对土壤—植物系统的影响及评价[J].环境科学研究,2021,34(3):687-697.  
Han Y, Xiao N W, Zhao W, et al. Evaluation of effects of coal mining subsidence on soil-plant system in Hulunbuir Prairie [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(3):687-697.

- [15] 刘刚,张伟龙,宋子恒.采煤沉陷区裂缝边缘带土壤、作物、微生物响应[J].水土保持研究,2023,30(3):127-134,145.  
Liu G, Zhang W L, Song Z H. Response Characteristics of soil, crops and microorganisms at the fracture edge of the coal mining subsidence area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 127-134, 145.
- [16] Tripathi N, Singh R S, Singh J S. Impact of post-mining subsidence on nitrogen transformation in southern tropical dry deciduous forest, India[J]. Environmental Research, 2009, 109(3): 258-266.
- [17] Luo Z B, Ma J, Chen F, et al. Adaptive development of soil bacterial communities to ecological processes caused by mining activities in the Loess Plateau, China[J]. Microorganisms, 2020, 8(4): 477.
- [18] 徐佳,王略,王义,等.2000—2017年神东矿区植被NDVI时空动态[J].水土保持研究,2021,28(1):153-158.  
Xu J, Wang L, Wang Y. Spatiotemporal dynamic variation of vegetation NDVI in Shengdong mining areas from 2000 to 2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 153-158.
- [19] 国家林业局.森林土壤水分-物理性质的测定:LY/T 1215—1999[S].北京:中国标准出版社,1999.  
National Forest Management Bureau. Determination of Forest Soil Water: Physical Properties: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.  
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 李禹凝,王金满,张雅馥,等.干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展[J].土壤,2023,55(3):494-502.  
Li Y N, Wang J M, Zhang Y F, et al. Soil water in arid and semi-arid mining areas: a review [J]. Soils, 2023, 55(3): 494-502.
- [22] 郭巧玲,马志华,苏宁,等.神府-东胜采煤塌陷区裂缝对土壤含水量的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):109-116.  
Guo Q L, Ma Z H, Su N, et al. Effects of cracks in coal mining subsidence area on soil moisture content in Shenfu-Dongsheng Coalfield [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(1): 109-116.
- [23] 王卫东,郭先顺,王明立,等.浅埋深多煤层开采地表移动规律实测与分析[J].煤炭工程,2023,55(11):136-141.  
Wang W D, Guo X S, Wang M L, et al. Surface movement law in shallow multi-seam coal mining [J]. Coal Engineering, 2023, 55(11): 136-141.
- [24] 吴志远,彭苏萍,杜文凤,等.干旱地区煤层开采对地表土壤理化性质的影响[J].水土保持研究,2019,26(5): 75-80.  
Wu Z Y, Peng S P, Du W F, et al. Effect of coal mining on surface soil physicochemical properties of sandy land in the arid region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 75-80.
- [25] 张旭阳,刘英,龙林丽,等.干旱半干旱区采煤沉陷引起的土壤水分变化及其对植物生理生态潜在影响分析综述[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2022,48(4):415-425.  
Zhang X Y, Liu Y, Long L L, et al. Review on analysis of soil moisture changes caused by coal mining subsidence in arid and semi-arid areas and their potential effects on plant physiology and ecology [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2022, 48(4): 415-425.
- [26] 王健,高永,魏江生,等.采煤塌陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J].水土保持学报,2006,20(5):52-55.  
Wang J, Gao Y, Wei J S, et al. Influence of mining subsidence on physical and chemical properties of soil in windy desert area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 52-55.
- [27] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].煤炭学报,2017,42(1): 17-26.  
Wang S M, Du H D, Wang S Q. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17-26.
- [28] 杜华栋,赵晓光,张勇,等.榆神府覆沙矿区采煤塌陷地表层土壤理化性质演变[J].土壤,2017,49(4): 770-775.  
Du H D, Zhao X G, Zhang Y, et al. Evolution of topsoil physical-chemical properties after coal mining subsidence in yu-Shen-fu sand covered mining area [J]. Soils, 2017, 49(4): 770-775.
- [29] Navarro-Cano J A, Verdú M, Goberna M. Trait-based selection of nurse plants to restore ecosystem functions in mine tailings [J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 55(3): 1195-1206.  
Navarro-Cano J A, Verdú M, Goberna M. Trait-based selection of nurse plants to restore ecosystem functions in mine tailings [J]. Journal of Applied Ecology, 2018, 55(3): 1195-1206.
- [30] 毕银丽,胡晶晶,刘京.煤矿微生物复垦区灌木林下土壤养分的空间异质性[J].煤炭学报,2020,45(8):2908-2917.  
Bi Y L, Hu J J, Liu J. Spatial heterogeneity of soil nutrients under shrubbery in micro-reclamation demonstration base in coal mine areas of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2908-2917.