

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i04.34-41

亮点:

- 揭示沉陷稳定后耕层响应的分区差异: 压缩区显著紧实, 拉伸区变化不显著。
- 压缩区容重较对照区增加 27%, 稳定入渗率、蒸发速率分别降低 43%、37%。
- 识别容重为分区水分运移差异的主要物理指标, 提出压缩区优先深松改良建议。

*通讯作者邮箱:

zhajianfeng@cumt.edu.cn

英文引用: Sheng Yu et al., 2026. Effects of Mining-Induced Deformation Zones on Bulk Density and Water-Holding Performance of Cultivated Soil. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 34-41.

中文引用: 盛誉等., 2026. 采动变形分区对耕层土壤容重及持水性能的影响. 工程科学与实践, 2 (04), 34-41.

稿件处理节点:

接收	2026 年 10 月 19 日
修订	2026 年 10 月 24 日
接受	2026 年 10 月 25 日
发表	2026 年 10 月 27 日

基金资助:

国家自然科学基金联合基金重点项目 (U21A20109)

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

采动变形分区对耕层土壤容重及持水性能的影响

盛誉¹, 杨熙聪², 陈娜¹, 陈凯乐¹, 关杰¹, 蔡英涛², 查剑锋^{2,*}

¹ 恒源煤电股份有限公司五沟煤矿, 安徽 淮北 235131

² 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116

摘要 采煤沉陷稳定后, 地表变形仍可能改变耕层结构并影响水分运移。现有研究多关注沉陷区与未沉陷区的整体差别, 对同一工作面内部压缩区与拉伸区的并列比较相对不足。为明确采煤沉陷稳定后不同地表变形区耕层土壤物理性质的差异, 以淮北五沟煤矿 1026 工作面为研究区, 在对照区、压缩区和拉伸区各布设 4 个样点, 测定 0~20 cm 土层容重、含水率和孔隙率, 并开展环刀入渗与自然蒸发试验。结果表明: 压缩区土壤容重为 1.50 g/cm³, 较对照区增加 27%, 差异显著; 其初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和平均蒸发速率分别较对照区降低 32%、43%、38%和 37%, 差异均显著。拉伸区上述指标与对照区接近, 差异均不显著。土壤容重与 3 项入渗指标及平均蒸发速率均呈显著负相关。沉陷稳定后压缩变形仍可通过提高耕层紧实度改变水分运移; 其较低的入渗和蒸发速率有利于减缓水分散失, 但过高容重可能限制土壤通气与作物根系生长。研究结果对采动区耕地保护、耕地生产力恢复具有指导意义。

关键词: 采煤沉陷; 耕地土壤; 变形分区; 土壤容重; 水分入渗; 土壤蒸发

Effects of Mining-Induced Deformation Zones on Bulk Density and Water-Holding Performance of Cultivated Soil

Sheng Yu¹, Yang Xicong², Chen Na¹, Chen Kaile¹, Guan Jie¹, Cai Yingtao², Zha Jianfeng^{2,*}

¹ Wugou Coal Mine, Anhui Hengyuan Coal Industry and Electricity Power Co., Ltd., Huaibei 235131, Anhui, China

² School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China

Abstract Surface deformation that persists after mining subsidence has stabilized can still alter topsoil structure and water movement. Most existing studies have compared subsided and non-subsided areas as a whole, whereas a side-by-side comparison of compression and tension zones within a single working face has received less attention. To identify differences in cultivated-soil properties among surface deformation zones after mining subsidence had stabilized, four sampling points were arranged in each of a control, compression and tension zone above the 1026 working face of Wugou Coal Mine in Huaibei, China. Bulk density, moisture content and porosity in the 0–20 cm layer were measured, followed by ring infiltration and outdoor evaporation tests. Bulk density in the compression zone was 1.50 g/cm³, 27% higher than that in the control. Initial, stable and mean infiltration rates and mean evaporation rate decreased by 32%, 43%, 38% and 37%, respectively. The corresponding values in the tension zone were close to the control. Bulk density was negatively correlated with all infiltration indices and evaporation rate. Compression deformation therefore continued to affect soil-water movement by increasing topsoil compaction after subsidence stabilization. The lower infiltration and evaporation rates tended to slow water loss, but excessive bulk density may restrict soil aeration and

crop root growth. Targeted subsoiling and fertility improvement are recommended for compressed farmland.

Keywords: coal-mining subsidence; cultivated soil; deformation zone; bulk density; infiltration; evaporation

1. 引言

地下开采引起的地表沉陷使上方耕地产生沉降与变形,耕层结构随之改变,进而影响土壤水分入渗、储存与蒸发。土壤容重反映土粒排列与孔隙状况,是评价矿区耕地物理质量的基础指标^[1-3]。因此,识别沉陷稳定后限制耕层水分运移的变形区,是采动区耕地保护需要解决的基础问题。

采动地表变形具有分区特征。按概率积分法预计的地表移动变形场,以水平变形的正负为判据:水平变形为正的区域为拉伸变形区,为负的区域为压缩变形区,二者之间为水平变形接近0的相对稳定区^[4]。实测结果表明,同一工作面地表可同时出现拉伸、压缩、台阶和塌陷等不同性质的变形分区^[5]。已有研究表明,采动沉陷对土壤容重、含水率和入渗能力的影响具有区域差异,且受土壤质地、沉陷阶段及恢复年限共同控制^[6]。邹慧等^[7]采用环刀入渗试验发现,沉陷区土壤容重增大后水分入渗能力下降;毕银丽等^[8]针对陕北沉陷区,对比分析了土壤水分入渗与蒸发特征;YANG等^[9]以中国西部矿区为例,评价了煤炭开采沉陷对土壤物理质量的影响。近期研究将土壤优先流^[10]、浅层物理性质响应^[11]等过程纳入矿区水土效应评价,并关注西部矿区采动水文生态效应与修复途径^[12];陈龙乾等^[13]通过沉陷耕地实测,给出了土壤物理特性随采动变形的空间变化规律。上述工作表明,采动变形对耕层物理性质的作用存在区域差异,沉陷区与未沉陷区之间的差别已得到较多验证。

然而,上述研究多以沉陷区与未沉陷区的整体对比为出发点,未按水平变形的性质区分同一工作面内部的压缩区与拉伸区。压缩与拉伸对土体的力学作用相反:压缩使土粒趋于致密、孔隙缩减,拉伸使土体张拉松弛并易形成裂缝,二者对耕层容重和水分运移的作用方向可能相反,在整体对比中会相互抵消。此外,沉陷稳定并不意味着变形结束,采动覆岩的残余移动变形与耕层结构的滞后响应仍会持续一定时间^[4]。采煤沉陷造成的耕地损毁直接关系到耕地保护与粮食安全^[14-15],若不能在沉陷稳定后识别限制水分运移的具体变形区,深松、灌溉和培肥措施只能按统一强度实施,治理成本随之增加。

鉴于此,以沉陷稳定后的五沟煤矿1026工作面为对象,在对照区、压缩区和拉伸区各布设4个样点,测定0~20 cm耕层的容重、含水率和孔隙率,并开展环刀入渗与自然蒸发试验,比较不同变形区土壤

物理性质与水分运移的差异,分析土壤物理性质与采动变形的关系,为沉陷耕地分区管理提供依据。

2. 研究区域试验方法

2.1. 研究区概况

研究区位于安徽省淮北市濉溪县五沟煤矿。1026工作面走向长1088 m、倾向长177 m,面积约19.7万m²,平均采深391 m,平均采厚5.4 m,地表以耕地和沟渠为主,主要土壤类型为砂姜黑土。

本区已建立地表移动观测站。依据地表移动观测结果,2022年8月野外采样时地表移动已基本稳定。变形区按水平变形的性质划分:水平变形为负的区域为压缩变形区,为正的区域的区域为拉伸变形区,水平移动变形值为零的区域为中性区。以概率积分法预计的下沉10 mm等值线为实验区S(含压缩区与拉伸区)边界(图1),在边界外未受采动影响处选择土壤类型、植被覆盖类型和地形起伏相近的地块,划定20 m×20 m方形区作为对照区;实验区内压缩区与拉伸区各设20 m×20 m样区,各样点的下沉、倾斜与水平变形由地表移动观测结果获得(见表1)。

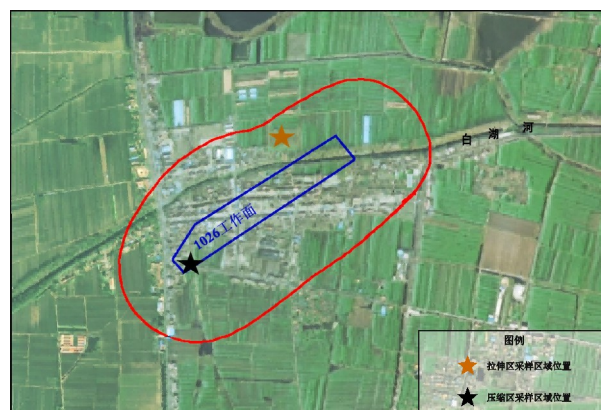


图1 工作面与不同变形区采样位置

Fig. 1 Working face and sampling locations in different deformation zones

2.2. 样点布设与指标测定

在对照区、压缩区和拉伸区分别布设4个样点,样品分别编号为对照区S1—S4、拉伸区L1—L4、压缩区Y1—Y4。每个样点采用500 cm³、环高10 cm的环刀,在0~10 cm和10~20 cm各采集1个原状土样,共获得24个样品。样品于105 °C烘干12 h至恒重,重复称量3次,计算土壤容重和质量含水率(图2);孔隙率依据环刀体积与含水变化计算。土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪测定。各区样品均为壤质黏土,砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为29.0%~48.5%、22.0%~40.5%和26.0%~34.0%,

盛誉等, 2026

表明样区间质地类型一致,可降低质地差异对分区比较的干扰。

蒸发和入渗试验均采用 10~20 cm 环刀样。野外取样后先用滤纸封住环刀底部并称重,再将环刀放回土中,使上表面与地面齐平;每隔 3 h 称量 1 次,直至质量不再变化,据此计算蒸发速率。蒸发测定结束后去除滤纸,再进行室内指标测定。入渗试验使用 105 °C 烘干 12 h 后的环刀样,将样品放入较大容器中,加水至与土样表面平齐并浸润 5 h;取出后在土样环刀上方叠放 1 个空环刀,用胶布密封连接处,并置于漏斗上,漏斗下接 500 mL 量筒。向上部空环

刀加水至与环刀表面平齐,漏斗开始滴水时计时,前 10 min 每 1 min 记录 1 次,之后每 5 min 记录 1 次,直至渗水量稳定。

土壤容重和含水率采用环刀烘干法测定。现场称量环刀和新鲜土样质量后,于 105 °C 烘干 12 h 至质量不再变化,再次称量;每次称重平行测量 3 次。孔隙率依据环刀、湿土和烘干土质量计算,土壤颗粒组成采用 Rise-2006 型激光粒度分析仪测定。容重、含水率和孔隙率的测定参照 NY/T 1121 系列标准及 GB/T 50123—2019,容重测定方法的选取参考文献 [16]。

(a) 环刀取样



(b) 入渗试验



(c) 蒸发称量



图 2 环刀取样及入渗和蒸发试验过程

Fig. 2 Ring sampling, infiltration test and evaporation measurement

样点坐标采用 RTK 接收机定位,并与地表移动变形监测成果对应。原状样现场称量和密封后运回实验室;完成容重、入渗与蒸发测定后,将同一样点土样研磨、去除根系和砾石,

采用四分法缩分至约 1 kg,再进行激光粒度分析(图 3)。上述流程使每个样点的土壤物理性质、水分运移指标和地表变形信息能够一一对应。

(a) RTK定位



(b) 原状样称量



(c) 四分法取样



(d) 粒度分析

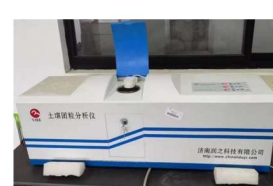


图 3 样点定位、称量及粒度分析前处理

Fig. 3 Positioning, weighing and preparation for particle-size analysis

2.3. 数据处理

采用单因素方差分析比较各变形区指标,事后比较使用 LSD 法,显著性水平取 0.05;采用

Pearson 相关系数分析容重、含水率、孔隙率与入渗和蒸发指标之间的关系。

表 1 变形区布设与地表变形特征

Table 1 Layout of deformation zones and surface deformation characteristics

变形区	样点数/个	沉降值/mm	倾斜/(mm·m ⁻¹)	水平变形/(mm·m ⁻¹)
对照区	4	10 mm 等值线外	—	—
压缩区	4	2226~2774	16.6~19.8	-14.4~-4.5
拉伸区	4	444~593	10.1~10.4	+9.4~+11.1

3. 结果与分析

3.1. 不同变形区土壤物理性质

不同变形区耕层物理性质见表 2。压缩区平均容重为 1.50 g/cm³，较对照区的 1.18 g/cm³增加 27%，差异显著；拉伸区容重为 1.19 g/cm³，与对照区基本一致。分层结果显示，各区 10~20 cm 土层容重均高

于 0~10 cm，其中压缩区 10~20 cm 容重达到 1.56 g/cm³，说明压缩效应在亚表层表现更为突出。

压缩区和拉伸区含水率分别为 20.90 %和 20.66 %，均略高于对照区，但差异不显著。压缩区孔隙率较对照区降低约 10 %，拉伸区基本不变。综合容重、含水率和孔隙率的变化及显著性检验结果，压缩区土壤基本物理性质对开采沉陷的响应程度大于拉伸区。

表 2 不同变形区耕层土壤物理性质

Table 2 Physical properties of cultivated soil in different deformation zones

变形区	容重/(g·cm ⁻³)	与对照区比较的 P 值	含水率/%	与对照区比较的 P 值	孔隙率/%	与对照区比较的 P 值
对照区	1.18±0.01	—	18.66±1.00	—	17.16±1.00	—
压缩区	1.50±0.01	0.001	20.90±1.00	0.417	15.40±1.00	0.382
拉伸区	1.19±0.01	0.782	20.66±1.00	0.366	17.10±1.00	0.962

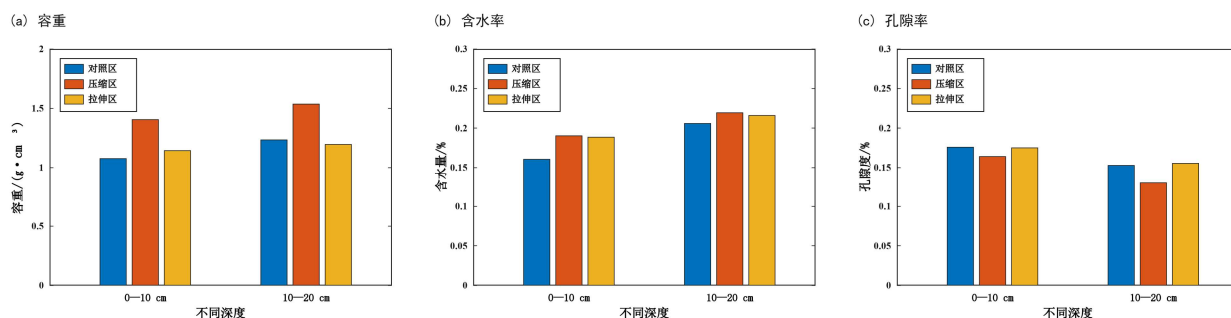


图 4 不同变形区和土层深度的土壤物理性质

Fig. 4 Soil physical properties at different depths in the deformation zones

从分层变化看，对照区、压缩区和拉伸区 10~20 cm 土层容重较 0~10 cm 分别增加 15 %、9 %和 4 %，含水率分别增加 28 %、14 %和 14 %，孔隙率分别降低 11 %、20 %和 11 %（图 4）。0~10 cm 土层更接

近地表，受到自然因素和开采沉陷扰动的程度较大。压缩区 10~20 cm 土层容重达到 1.56 g/cm³，已接近相关规范中土壤紧实度较高的 1.60 g/cm³判别值。

3.2. 不同变形区土壤入渗与蒸发

压缩区 3 项入渗指标均低于对照区（表 3、图 5）。其初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率分别为 2.43、0.40 和 0.83 mm/min，较对照区降低 32 %、43 %和 38 %；平均蒸发速率为 2.02 g/h，降低 37 %，上述差异均达到显著水平。这一变化与土壤容重增大、孔隙率减小有关。

拉伸区初始、稳定和平均入渗率较对照区分别增加 2 %、6 %和 4 %，平均蒸发速率增加 6 %，但差异

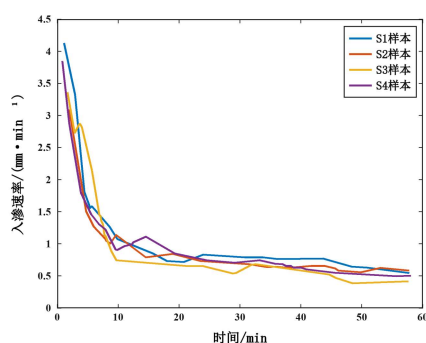
均不显著。该结果表明，拉伸区土壤入渗和蒸发速率变化幅度较小，其持水性能与对照区接近。

各样点入渗曲线在试验初期下降较快，随后逐渐趋稳；蒸发速率也随时间延长持续降低（图 5）。压缩区 4 个样品的整条入渗与蒸发曲线整体位于对照区和拉伸区下方，表明分区差异并非由单一样点造成。对照区和拉伸区样品之间虽有波动，但曲线范围大体重叠，与组间平均值检验结果一致。

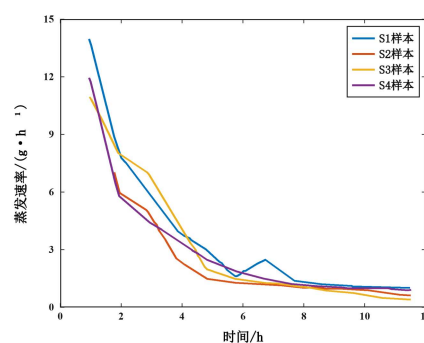
表 3 不同变形区土壤水分运移指标

Table 3 Soil-water transport indices in different deformation zones

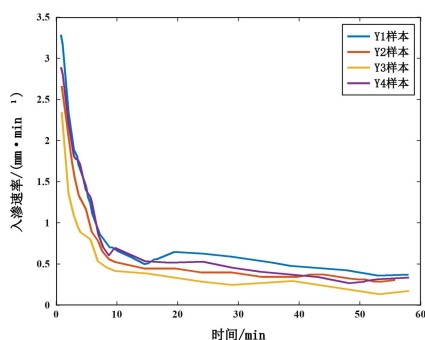
变形区	初始入渗率/(mm/min)	稳定入渗率/(mm/min)	平均入渗率/(mm/min)	平均蒸发速率/(g/h)
对照区	3.58	0.70	1.34	3.22
压缩区	2.43 (P=0.003)	0.40 (P=0.003)	0.83 (P=0.002)	2.02 (P=0.003)
拉伸区	3.65 (P=0.674)	0.76 (P=0.382)	1.39 (P=0.510)	3.40 (P=0.494)



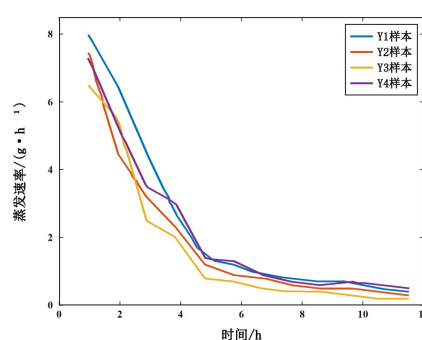
(a)对照区土壤样本入渗速率曲线



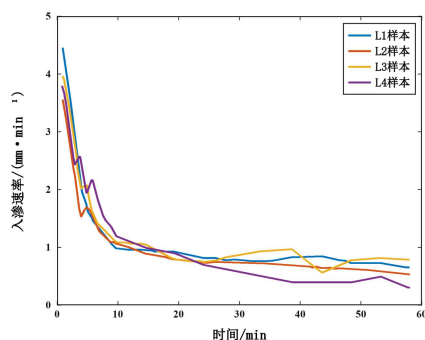
(b)对照区土壤样本蒸发速率曲线



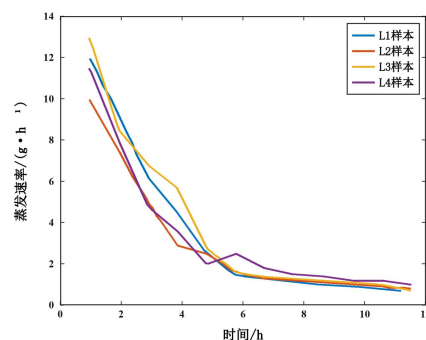
(c)压缩区土壤样本入渗速率曲线



(d)压缩区土壤样本蒸发速率曲线



(c)拉伸区土壤样本入渗速率曲线



(f)拉伸区土壤样本蒸发速率曲线

图 5 对照区和变形区土壤样本入渗和蒸发速率曲线

Fig. 5 Infiltration and evaporation rate of soil samples in CK and deformation area

3.3. 土壤物理性质与水分运移的关系

土壤物理性质与水分运移指标的相关系数见表 4。相关分析表明,土壤容重与初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和平均蒸发速率的相关系数分别为-0.932、-0.846、-0.936 和-0.953 ($n=12$),均达到显著水平。含水率与各水分运移指标的相关程度较

低;孔隙率仅与平均蒸发速率呈显著正相关。由此可见,在本试验范围内,容重是解释各变形区入渗与蒸发差异的主要物理指标。压缩区水平变形与容重的相关系数为 0.824,高于沉陷值和倾斜值与容重的相关系数,提示水平压缩对耕层紧实化具有较直接的作用。

表 4 土壤物理性质与水分运移指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil properties and water-transport indices

水分运移指标	容重	含水率	孔隙率
初始入渗率	-0.932	-0.144	0.406
稳定入渗率	-0.846	-0.042	0.370
平均入渗率	-0.936	-0.167	0.401
平均蒸发速率	-0.953	-0.217	0.490

4. 讨论

4.1. 压缩变形影响水分运移的机制

采动压缩使土粒排列趋于紧密,降低结构性大孔隙的数量和连通性,因而同时减缓入渗和蒸发。该结果与矿区土壤容重增加后入渗能力下降的研究结论一致^[7-9]。需要指出的是,蒸发速率降低并不等同于土壤质量提高。较高容重虽然能够延缓无效蒸发,但也可能削弱降雨或灌溉水进入根区的速度,并限制通气和根系伸展。因此,持水性能评价应同时考虑减少散失与保障补给两个方面。

4.2. 分区分护建议

对压缩区可优先实施深松、秸秆还田或有机肥改良,破除 10~20 cm 紧实层,并结合小水量、分次灌溉降低地表径流风险;拉伸区在沉陷稳定后可按常规耕作管理,但仍需巡查残余裂缝。治理效果宜以容重、入渗率和作物根系分布的联合变化进行评价。

5. 结论

(1) 沉陷稳定后,压缩区 0~20 cm 土壤容重达到 1.50 g/cm³,较对照区增加 27%,差异显著;拉伸区容重与对照区无显著差异。

(2) 压缩区初始、稳定和平均入渗率分别较对照区降低 32%、43%和 38%,平均蒸发速率降低 37%,差异均显著。表明沉陷稳定后水平压缩变形仍可改

变耕层水分运移过程；拉伸区各水分运移指标与对照区接近。

(3) 土壤容重与 3 项入渗指标及平均蒸发速率均呈显著负相关，是解释各变形区差异的主要物理指标；含水率与孔隙率的作用有限。

本研究仅调查 1 个稳定工作面，每类变形区设置 4 个样点，且未连续记录不同季节的土壤水分，现场容重差异还可能受机械碾压、耕作历史和微地形影响。后续应增加不同采深、采厚和恢复年限的工作面，设置耕作措施对照，并开展降雨—入渗—蒸发连续监测，以检验分区规律的适用范围。

参考文献

- [1] 杨德军, 雷少刚, 卞正富, 等. 土壤物理质量指标研究进展及在矿区环境中的应用展望[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1961- 1968.
- [2] REYNOLDS W D, DRURY C F, YANG X M, et al. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions[J]. Geoderma, 2008, 146(3/4): 466- 474.
- [3] LOGSDON S D, KARLEN D L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(2): 143- 149.
- [4] 孙庆先, 张勇, 陈清通, 等. 我国开采沉陷学 70 年研究综述及技术展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(3): 86- 99.
- [5] 戴华阳, 罗景程, 郭俊廷, 等. 上湾矿高强度开采地表裂缝发育规律实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 124- 129.
- [6] 郑慧慧, 秦佳星, 桑之婷, 等. 基于区域特征的煤炭开采沉陷对土壤特性影响研究进展[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1481- 1491.
- [7] 邹慧, 毕银丽, 金晶晶, 等. 采煤沉陷对植被土壤容重和水分入渗规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 125- 128.
- [8] 毕银丽, 刘京, 尚建选, 等. 陕北采煤沉陷区土壤水分入渗和蒸发的特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 839- 849.
- [9] YANG D, BIAN Z, LEI S. Impact on soil physical qualities by the subsidence of coal mining: a case study in western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 1- 14.
- [10] 郭巧玲, 胡骞, 代彬, 等. 不同降雨历时下采煤塌陷区土壤优先流特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 130- 140.
- [11] 华照来, 王路, 李锦明. 沙漠区超大采高工作面采煤沉降特征及其浅层土壤物理特性响应[J]. 绿色矿山, 2026, 4(1): 129- 140.
- [12] 王皓, 王强民, 董书宁, 等. 西部典型煤矿区采动水文生态效应及修复途径[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 610- 622.
- [13] 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.
- [14] 郭文兵, 赵高博, 白二虎, 等. 中部矿粮复合区采煤沉陷及耕地损毁研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 388- 401.
- [15] 郭广礼, 李怀展, 查剑锋, 等. 平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 416- 426.
- [16] 江胜国. 国内土壤容重测定方法综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(S2): 82- 86, 91.