

# 陕北黄土覆盖区煤层上覆岩系层状结构对开采区土壤损伤效应研究

王双明<sup>1,2,3</sup>, 宋世杰<sup>1,2,3</sup>, 魏江波<sup>1,2,3</sup>, 刘浪<sup>2,3,4</sup>, 牛瑞琳<sup>1,2,3</sup>, 李源红<sup>1,2,3</sup>, 谈庆钰<sup>1,2,3</sup>, 田雨<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 煤炭开采区生态保护是黄河流域高质量发展亟需破解的重大难题。科学认识煤层上覆岩层对煤炭开采采动损害向地表传递的响应规律是实现煤矿区生态环境全生命周期保护的重大需求。以陕北黄土覆盖区煤炭开采区为研究对象, 综合运用野外地质调查、采样测试、数值模拟、室内实验和理论计算方法, 针对覆岩层数、层厚、岩性、厚硬岩层与煤层的空间位置等层状结构对地下采煤的“响应-传递”特点, 研究了相同采矿条件下煤层覆岩层状结构对采动覆岩应力场的影响规律, 揭示了不同煤层覆岩层状结构下土壤物理、化学、微生物、侵蚀四大特性的损伤特征及煤炭开采区土壤物理、化学、微生物特性变化对侵蚀特性的作用机制。结果表明: ① 相同或相近的采矿条件下, 采煤沉陷区地表生态损害结果的迥异主要取决于煤层上覆岩(土)层对地下采煤活动的应力应变响应、由下向上的传递及土壤损害特点。在覆岩层状结构与采动应力传递的耦合下, 煤层覆岩自下而上形成了垂向强力链塑性变形区(VCP)、水平强力链弹塑性变形区(HCEP)、水平强力链弹性变形区(HCE)的采动损害特征。其中, 煤层覆岩下部的互层结构及特征对塑性变形区界面高度具有重要影响。煤层上覆岩(土)层和地表土层(壤)均是地下采煤活动及其损害作用的响应载体。岩层层数、层厚、岩性、厚硬岩层与煤层的空间位置及地表变形等是影响土壤损害类型及特点的重要地质因素。② 厚砂岩在覆岩中的位置是地下“VCP-HCEP”界面、“HCEP-HCE”界面发育高度和地表形变程度的第一主控因素, 决定了“两界面”的发育位置和地表变形的程度, 高位厚砂岩对“两界面”发育和地表形变具有较明显的抑制作用; 砂层系数作为第二主控因素, 在既定厚砂岩位置且砂层系数小于 73% 条件下与“两界面”发育和地表形变均呈正相关关系; ③ 基于两大主控因素划分了 4 个覆岩层状结构基本类型, 从“地下覆岩层状结构基本类型+地表形态变化程度+地表采动损害形式+土壤质量特性指标”耦合的角度, 发现“低位厚砂岩+砂层系数大于 73%”类型对地表土壤损害效应最为显著, 其中沉陷坡面土壤物理、化学、微生物特性指标的损伤均集中在坡顶、坡中部位, 降幅介于 11.81%~42.01%( $p < 0.05$ ); 采动地裂缝是沉陷坡面土壤损伤的主要原因; ④ “低位厚砂岩+砂层系数大于 73%”类型对坡面土壤可蚀性  $K$  值的放大效应最为明显, 平均增幅为 26.38%( $p < 0.05$ ), 其中坡顶部位土壤可蚀性  $K$  值平均增幅最大, 为 37.98%( $p < 0.05$ ); 沉陷坡面同一部位裂缝区土壤可蚀性  $K$  值平均增幅较非裂缝区高出 92.28%( $p < 0.05$ ); 黄土沉陷坡面可蚀性  $K$  值与土壤孔隙度呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ ), 与土壤含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效养分质量分数、土壤微生物数量及酶活性呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ )。因此, “低位厚砂岩+砂层系数大于 73%”的覆岩层状结构类型区是陕北黄土沟壑煤炭开采区生态损害的

收稿日期: 2024-11-30 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG24.1485

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402308); 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室开放课题资助项目(HNKY2024YB402); 咸阳市重点研发计划资助项目(L2024-ZDYF-ZDYF-SF-0069)

作者简介: 王双明(1955—), 男, 陕西岐山人, 中国工程院院士。E-mail: sxtwsm@163.com

通讯作者: 宋世杰(1983—), 男, 山东济南人, 副教授, 博士。E-mail: kkkbff@163.com

引用格式: 王双明, 宋世杰, 魏江波, 等. 陕北黄土覆盖区煤层上覆岩系层状结构对开采区土壤损伤效应研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 23~42.

WANG Shuangming, SONG Shijie, WEI Jiangbo, et al. Study on the effect of layered structure of overlying strata on soil damage in mining areas in the loess covered region of northern Shaanxi[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 23~42.



移动阅读

关键区域，应采取充填减沉、土壤改良等人工措施进行保护与修复，对于“低位厚砂岩+砂层系数小于73%”和“高位厚砂岩+砂层系数大于73%”的覆岩层状结构类型区可采取人工辅助的生态修复方式，对于“高位厚砂岩+砂层系数小于73%”的覆岩层状结构类型区则可采取自然恢复方式进行生态修复。

**关键词：**覆岩层状结构；响应传递；土壤；损伤效应；陕北矿区

中图分类号：TD88 文献标志码：A 文章编号：0253-9993(2025)01-0023-20

## Study on the effect of layered structure of overlying strata on soil damage in mining areas in the loess covered region of northern Shaanxi

WANG Shuangming<sup>1, 2, 3</sup>, SONG Shijie<sup>1, 2, 3</sup>, WEI Jiangbo<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Lang<sup>2, 3, 4</sup>, NIU Ruilin<sup>1, 2, 3</sup>, LI Yuanhong<sup>1, 2, 3</sup>, TAN Qingyu<sup>1, 2, 3</sup>, TIAN Yu<sup>1, 2, 3</sup>

(1. Xi'an University of Science and Technology, College of Geology and Environment, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Coal Green Mining Geological Research Institute, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Guarantee for Coal Green Development, Xi'an 710054, China; 4. Xi'an University of Science and Technology, College of Energy Engineering, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Ecological protection in coal mining areas is a major problem that needs to be solved urgently for high-quality development in the Yellow River Basin. Scientific understanding of the response law of the overlying strata of the coal seam to the surface transmission of coal mining damage is a major demand for realizing the full life cycle protection of the ecological environment in the coal mining area. Taking the coal mining area in the loess-covered area of northern Shaanxi as the research object, the field geological survey, sampling test, numerical simulation, laboratory experiment and theoretical calculation method are comprehensively used to study the ‘response-transmission’ characteristics of the layered structure such as the number of overburden layers, layer thickness, lithology, spatial position of thick and hard rock layers and coal seams on underground coal mining. The influence of coal seam overburden structure on the stress field of mining overburden under the same mining conditions is studied. The damage characteristics of soil physical, chemical, microbial and erosion characteristics under different coal seam overburden structure and the mechanism of soil physical, chemical and microbial characteristics change on erosion characteristics in coal mining area were revealed. The results show that: ① Under the same or similar mining conditions, the different results of surface ecological damage in coal mining subsidence areas mainly depend on the stress-strain response, bottom-up transmission and soil damage characteristics of the overlying rock (soil) layer of coal seam to underground coal mining activities. Under the coupling of overburden structure and mining stress transfer, the mining damage characteristics of vertical strong chain plastic deformation zone (VCP), horizontal strong chain elastic-plastic deformation zone (HCEP) and horizontal strong chain elastic deformation zone (HCE) are formed from bottom to top. Among them, the interbedded structure and characteristics of the lower part of the coal seam overburden have an important influence on the interface height of the plastic deformation zone. The overlying rock (soil) layer and the surface soil (soil) layer of the coal seam are the response carriers of underground coal mining activities and their damage. The number of strata, thickness, lithology, spatial position of thick and hard strata and coal seam and surface deformation are important geological factors affecting the types and characteristics of soil damage. ② The position of thick sandstone in the overlying strata is the first main controlling factor of the development height of the underground “VCP-HCEP” interface and the “HCEP-HCE” interface and the degree of surface deformation, which determines the development position of the “two interfaces” and the degree of surface deformation. High thick sandstone has a significant inhibitory effect on the development of the “two interfaces” and surface deformation. As the second main controlling factor, the sand layer coefficient is positively correlated with the development of “two interfaces” and surface deformation under the condition of established thick sandstone position and sand layer coefficient less than 73%. ③ Based on the two main controlling factors, four basic types of overburden structure were divided. From the perspective of the coupling of “basic type of underground overburden structure + degree of surface morphological change + surface mining damage form + soil quality characteristic index”, it was found that the type of “low thick sandstone + sand layer coeffi-

cient greater than 73%” had the most significant effect on surface soil damage. The damage of soil physical, chemical and microbial characteristic indexes on subsidence slope was concentrated on the top and middle of slope, with a decrease of 11.81%–42.01% ( $p < 0.05$ ). Mining ground fissures are the main cause of soil damage on subsidence slope. ④ The amplification effect of “low thick sandstone + sand layer coefficient greater than 73%” type on soil erodibility  $K$ -value on slope surface was the most obvious, with an average increase of 26.38% ( $p < 0.05$ ), and the average increase of soil erodibility  $K$ -value at the top of slope was the largest, which was 37.98% ( $p < 0.05$ ). The average increase of soil erodibility  $K$ -value in the fracture area of the same part of the subsidence slope was 92.28% higher than that in the non-fracture area ( $p < 0.05$ ). The erodibility  $K$ -value of loess subsidence slope was significantly positively correlated with soil porosity ( $p < 0.01$ ), and significantly negatively correlated with soil moisture content, clay mass fraction, organic matter mass fraction, available nutrient mass fraction, soil microbial quantity and enzyme activity ( $p < 0.01$ ). Therefore, the overburden structure type area of “low thick sandstone + sand layer coefficient greater than 73%” is the key area of ecological damage in the loess gully coal mining area of northern Shaanxi. Artificial measures such as filling and subsidence reduction and soil improvement should be taken to protect and repair. For the overburden structure type area of “low thick sandstone + sand layer coefficient less than 73%” and “high thick sandstone + sand layer coefficient greater than 73%”, artificial assisted ecological restoration can be adopted. For the overburden structure type area with “high thick sandstone + sand layer coefficient less than 73%”, the natural restoration method can be adopted for ecological restoration.

**Key words:** overburden rock structure; response transmission; soil; damage effect; northern Shaanxi mining area

## 0 引言

在“双碳”目标战略实施的进程中,我国煤炭的能源地位逐渐由主体能源转变为次要能源<sup>[1]</sup>。即使到2030年(碳达峰当年),煤炭在我国能源生产消费结构中的占比也不会低于40%<sup>[2-4]</sup>,继续为国家能源安全发挥着兜底保障作用。2024年9月11日,国家发改委等六部委联合印发了《关于加强煤炭清洁高效利用的意见》,再次强调“立足我国以煤为主的能源资源禀赋,坚持目标导向和问题导向相结合,全面加强煤炭全链条清洁高效利用”<sup>[5]</sup>。我国煤炭生产重心西移战略成就了黄河流域特别是中游的煤炭核心产区地位。统计数据显示,黄河流域煤炭资源量占全国总储量的70.9%<sup>[6]</sup>,黄河中游更是成为神东、陕北、黄陇、晋北、晋中、晋东等7个国家级大型煤炭基地的集中分布区。2023年,黄河中游煤炭总产量超过34亿t,占全国总产量的70%以上<sup>[7]</sup>,在支撑国民经济发展方面发挥着举足轻重的作用。然而,黄河中游生态本底脆弱,煤炭资源规模化开采导致的采煤沉陷及衍生生态损害问题日益凸显<sup>[8]</sup>,严重威胁着黄河中游乃至黄河流域的生态安全。受特殊煤炭地质赋存条件制约,陕北矿区的采煤沉陷发育异常显著,目前已知的沉陷面积超过392 km<sup>2</sup>,平均沉陷率达0.24 hm<sup>2</sup>/万t<sup>[9]</sup>,较全国平均水平高出20%。采煤沉陷衍生的生态损害问题在陕北矿区更是触目惊心,沉陷区土壤质量下降、植被退化等问题严重且持续,以致区域土壤侵蚀模数普遍达到4 000~5 000 t/(km<sup>2</sup>·a),是国家允许值的4~5

倍<sup>[10]</sup>。因此,2024年9月12日,习近平总书记在全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上明确指出了“采煤沉陷区综合治理是黄河流域亟需重点突破的难题”<sup>[11]</sup>。破解黄河中游采煤沉陷区综合治理难题的关键在于2个方面:一是要科学认识采煤沉陷的影响因素及其作用规律,二是要精准掌握采煤沉陷与衍生生态损害的逻辑联系及作用机制。

在科学认识采煤沉陷的影响因素及其作用规律方面:前人数十年的科学与工程实践充分证明了采煤沉陷是在采矿因素和地质因素共同影响下发生发展的。采矿因素作为采煤沉陷的直接动因首先受到国内外相关学者的关注,以致关于采矿因素影响采煤沉陷基本规律的研究成果非常丰富。崔希民等<sup>[12]</sup>系统总结了采厚、采空区尺寸、开采方法、工作面推进速度、重复开采等采矿因素对采煤沉陷的影响规律;滕永海等<sup>[13]</sup>研究了综采放顶煤条件下采煤沉陷的形成规律与机理;郭文兵等<sup>[14]</sup>综合采厚、工作面尺寸及推进速度等采矿因素对高强度开采进行了定义,并总结分析了高强度开采条件下覆岩及地表破坏的基本特征;戴华阳等<sup>[15]</sup>分析了厚煤层开采条件下采煤沉陷的控制难点,提出了协调式跳采全采方法,实现了采煤沉陷的精准控制;徐良骥等<sup>[16]</sup>研究了离层注浆开采条件下采煤沉陷的变化规律,建立了适用于离层注浆开采的采煤沉陷预计模型;李怀展等<sup>[17]</sup>分析了煤炭地下气化开采条件下采煤沉陷的诱因,基于等效下沉空间原理构建了热力耦合作用下煤炭地下气化地表沉陷精准预测模型。当前快速发展的监测技术方法不

仅大幅提升了采煤沉陷动态发育过程及程度的实测精度,而且持续深化了人们对地质因素影响采煤沉陷的科学认识,以致丰富和拓展地质因素影响采煤沉陷基本规律研究成为了热点问题。刘瑾等<sup>[18]</sup>以辛置煤矿2204工作面为研究对象,采用RFPA<sup>2D</sup>数值软件模拟研究了煤层埋深对采煤沉陷的影响规律;徐飞亚等<sup>[19]</sup>对大柳塔煤矿52307工作面地表移动变形的全过程进行了实时监测,揭示了埋深浅且开采强度大的条件下采煤沉陷的变化规律;夏玉成<sup>[20]</sup>系统研究了地质构造对采煤沉陷的影响规律与机理,提出了“构造控灾”的理论体系;陈绍杰等<sup>[21]</sup>通过数值模拟方法揭示了不同覆岩地层与正断层共同影响下采煤沉陷的规律与特征;孙学阳等<sup>[22]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>数值软件模拟研究了褶皱对采煤沉陷的控制作用;于广明等<sup>[23]</sup>研究了岩体中初始节理对岩体内部沉陷范围的影响规律;胡海峰等<sup>[24]</sup>系统研究了煤层覆岩的岩土比对采煤沉陷的影响规律,提出了基于岩土比的地表移动变形预计方法;钱鸣高院士等<sup>[25]</sup>从覆岩力学性质与岩层组合的角度系统研究了煤层覆岩移动变形的动态过程,认为地表下沉是关键层与地表耦合作用的结果;汤伏全等<sup>[26-27]</sup>、李春意等<sup>[28]</sup>、张志鹏等<sup>[29]</sup>针对地表黄土层这一西部特色的地质因素,分别从厚度占比、垂直节理、附加变形等角度探索了黄土层对采煤沉陷的影响规律。笔者认为,覆岩的层状结构既是煤炭地质赋存的重要特征,也是地下采煤活动效应向地表传播的载体,不仅控制着煤层覆岩移动变形的全过程,也决定着沉陷后地表最终形态。然而,针对煤层覆岩层状结构影响对采煤沉陷的相关研究还十分薄弱。为此,笔者团队开展了一些探索性工作,例如揭示了砂层系数<sup>[30]</sup>、砂泥比<sup>[31]</sup>、岩土比<sup>[32]</sup>、厚砂岩<sup>[33]</sup>等覆岩层状结构关键特征对采煤沉陷的影响规律,提出了基于覆岩层状结构特征的开采沉陷预计方法<sup>[31]</sup>。

在精准掌握采煤沉陷与衍生生态损害的逻辑联系及作用机制方面:目前已有成果主要是通过对比分析采煤沉陷区与自身或非沉陷区在不同时空尺度上的土壤质量<sup>[34-35]</sup>、植被群落差异<sup>[36]</sup>,揭示采煤沉陷区的生态损害特征与演化规律。王金满等<sup>[37]</sup>系统总结分析了采煤沉陷对土壤水分的影响特征,提出了煤矿区土壤水分运移规律及机理的研究方向;毕银丽等<sup>[38]</sup>研究了陕北采煤沉陷区土壤水分入渗和蒸发的影响规律,发现了土壤质地、总孔隙率、非毛管孔隙率、容重是影响土壤水分入渗和蒸发能力的主要影响因子;胡振琪等<sup>[39]</sup>研究了风沙区超大工作面开采的土地损伤特征,发现采煤沉陷对土壤容重、孔隙率均会产生负面影响,且非均匀沉陷区大于均匀沉陷区;陈孝杨

等<sup>[40]</sup>研究发现了淮北砂姜黑土区煤矿塌陷坡耕地表层土壤黏粒含量的随时间变化而缓慢下降的特征;严家平等<sup>[41]</sup>研究发现采煤沉陷区土壤养分流失在短时间内会发生显著的流失现象,其中氮、磷的流失量明显大于钾;MA等<sup>[42]</sup>研究了我国西部采煤沉陷区0~30 cm土壤养分和酶活性的变化特征,发现土壤黏粒和粉粒百分比、全氮、溶解有机碳、氨氮、硝态氮、有效磷、有效钾含量和蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性均显著低于未沉陷区;CHEN等<sup>[43]</sup>研究了煤-粮复合区采煤沉陷对土壤养分及微生物群落的影响,发现沉陷区土壤有机质、全氮、总磷、有效氮和有效磷含量均出现不同程度的降低,进而损害了土壤微生物群落;笔者等<sup>[44]</sup>研究了神木北部采煤塌陷区不同年限的土壤质量和植被群落之间的相互关系及其演变过程,发现采煤塌陷导致土壤质量与植被群落结构退化,随塌陷时间的推移呈自然恢复趋势,但10 a后植物群落结构和土壤因子仍不能恢复至塌陷前水平;叶瑶等<sup>[45]</sup>调查分析了补连塔煤矿采煤塌陷区植被状况,发现采煤塌陷对植被种类组成、物种分布有很大影响,导致植物种类显著减少31.03%~44.83%;杜华栋等<sup>[46]</sup>研究了彬长矿区不同地表沉陷类型下植物群落组成、生产力和多样性的变化规律及其机理,发现一年生、多年生草本和中旱生植物的比例在采煤沉陷区有所增加,而中生植物比例显著下降,不同类型的采煤沉陷区植物群落物种数、盖度、生物量、物种密度、物种多样性均显著下降;牛鸿波等<sup>[47]</sup>计算了1996—2022年神东矿区地表植被潜在净初级生产力,发现煤炭开采对植被退化的影响占主导作用。笔者认为,土壤不仅是地球各圈层物质交换、能量流动、信息传递的中心枢纽<sup>[48]</sup>,也是第一个响应地下采煤扰动的地表生态环境要素,更是地下采动效应衍生地表生态损害效应的关键环节<sup>[49]</sup>。因此,从“地下采煤活动-覆岩地质条件-地表土壤特性”联动的角度,研究采煤沉陷区生态损害的基本规律和作用机制十分必要。

鉴于此,笔者以黄河中游陕北黄土煤矿区为研究对象,揭示在既定采矿条件下,煤层覆岩不同层状结构对岩层移动和地表沉陷的影响规律以及衍生的地表土壤物理、化学、微生物、侵蚀4个特性的损害特征,丰富和深化煤炭减损开采和生态修复理论体系,保障和支撑西部煤炭资源的绿色开发与高质量发展。

## 1 覆岩层状结构对地下采煤的“响应-传递”特点

从地质的视角看,相同或相近的采矿条件下,采煤沉陷区地表生态损害结果的迥异主要取决于煤层

上覆岩(土)层对地下采煤活动的应力应变响应、由下向上的传递及地表土壤损害的特点(图1)。

1) 煤层上覆岩(土)层是地下采煤活动及其损害作用的响应载体。地下采煤活动产生的各种地下空间破坏了煤层及覆岩的原始结构,以致煤层及覆岩内部的应力在重新分布并达到新平衡的过程中产生了一系列能量和物质的转移,在效应上主要表现为各种井下动力灾害,例如围岩变形<sup>[50]</sup>、矿井突水<sup>[51]</sup>、煤与瓦斯突出<sup>[52]</sup>、冲击地压<sup>[53]</sup>、矿震等<sup>[54]</sup>。而这些井下动力灾害无一例外的依托煤层覆岩层状结构“宏-细-微”多维尺度的移动变形<sup>[55]</sup>及其蕴含的“水(地下水)-气(瓦斯)-固(岩石矿物)”多相物质的迁移转化<sup>[56-57]</sup>而显现破坏效应,并以采动覆岩层状结构重塑和内在物质及能量重配置的方式、类型、程度而表达破坏结果。因此,不同的岩层层数、层厚、岩性、坚硬岩层与煤层的空间位置等煤层覆岩层状结构在相同的采矿活动下必然表现出不同的覆岩采动损害形式和结果。

2) 覆岩层状结构与采动应力传递共同控制着煤

层覆岩采动损害的演化过程和发展阶段。地下煤层采动效应向地表传递过程中导致煤层覆岩自下而上表现出冒落碎胀、开裂破断、弯曲下沉的损害形式,采矿领域称为“上三带”,它们共同重构了整个覆岩的应力场、位移场、裂隙场、渗流场、化学场<sup>[58]</sup>。其实质是煤层采动效应在自身能量衰减叠加非均质岩层应力应变响应下的传递演化过程和结果。因此,不同的煤层覆岩层状结构在相同的采矿活动下必然导致覆岩采动损害过程和特征的差异。

3) 地表土层(壤)是地下采煤活动及其损害效应传递并转换为生态损害效应的关键界面。地表土层作为地下采动效应自下而上传播的最后承接者,通过下沉、倾斜、水平移动、开裂、错断等一系列变形拉伸或压缩土壤,进而显著破坏土壤的物理特性<sup>[59]</sup>,这标志着地下采动效应向地表生态损害效应转换的开始。土壤物理特性的变化甚至破坏不仅影响了土壤有机质、氮磷钾等养分的赋存状态和有效性<sup>[60]</sup>,也改变了土壤微生物及酶的生存场所和活性<sup>[61]</sup>,以致地下采动产生的地表生态损害效应向土壤化学特性和微生物

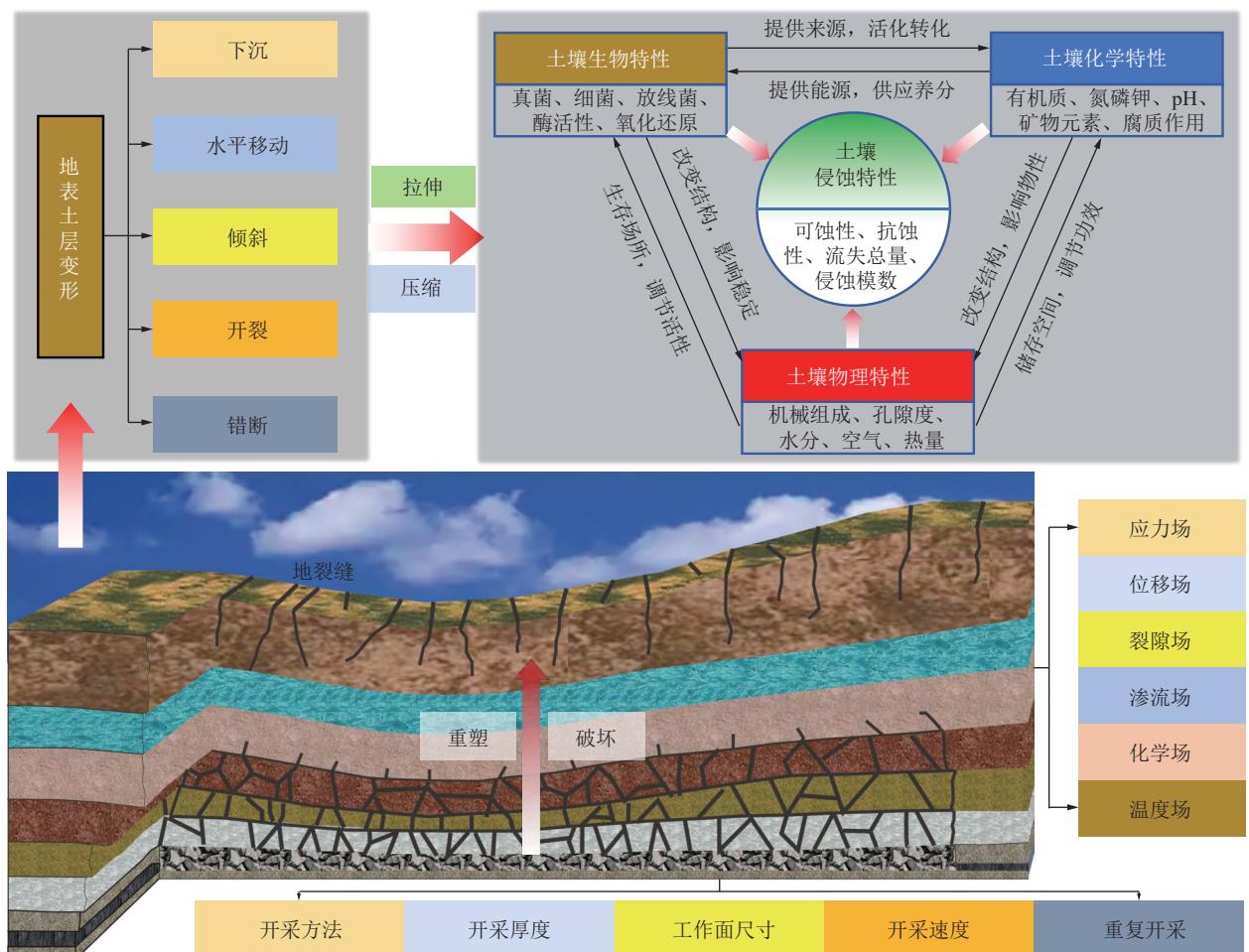


图1 覆岩层状结构对地下采煤的“响应-传递”机制

Fig.1 ‘Response-transmission’ mechanism of overlying strata-like structure to underground coal mining

特性延伸。土壤物理、化学、微生物3个特性之间螺旋式的相互作用在持续放大、深化地表生态损害效应的同时,也对土壤侵蚀特性产生了深刻影响<sup>[62]</sup>,为地表生态损害效应增添了新内容。而地表植被群落的变化是土壤采动损害的进一步延伸和演化。因此,不同的煤层覆岩层状结构及其关键特征在相同的采矿活动下必然导致土壤这一关键地表生态因素损害的差异。

## 2 覆岩层状结构对采动效应传递演化的影响

### 2.1 地质原型

陕北煤矿区位于鄂尔多斯盆地北部,地势整体呈西北高东南低,地貌以黄土丘陵和南部风积沙为主(图2)。笔者以黄土覆盖区为研究对象,区内主要含煤地层为侏罗系延安组,全域主采煤层为2<sup>-2</sup>煤层,埋深为60~360 m,平均约300 m,煤层倾角小于3°,煤层厚度为0.26~12.16 m,平均约为6.00 m<sup>[63]</sup>。2<sup>-2</sup>主采煤层覆岩层状结构以“黄土层-红土层-基岩层”为主要类型。其中,上覆基岩结构主要为砂岩和泥岩互层,且普遍存在下、上2个特征区段,即:下区段以“细砂岩-粉砂岩”互层结构为主,上区段以“细砂岩-泥岩”互层结构为主;砂岩层数一般为5~25层,砂层系数介于56%~86%(砂层系数指覆岩基岩中各类砂岩的总层数与基岩岩层总数的比值<sup>[9]</sup>),单层砂岩厚度为5.0~25 m<sup>[63]</sup>,其中通常发育1层厚度超过30 m(约为煤层厚度的5倍以上)的厚砂岩,其岩性以中砂岩最为多见,该层厚砂岩距煤层间距介于70~145 m,为煤层厚度的12~24倍;砂质泥岩层数一般出现4层,单层厚度一般介于10~20 m,对应砂泥比介于60%~

80%(砂泥比指煤层上覆基岩中砂岩总厚度与泥岩总厚度的比值<sup>[9]</sup>)。基岩上覆发育厚度为20~60 m的红土层,并被均厚30 m且质地均一、结构疏松、垂直节理发育的地表黄土层所覆盖。地表黄土层起伏多变、沟壑纵横,其实质是由形态各异、大小不一的黄土坡面构成,坡面坡度一般为5°~35°,其中25°的凹形坡对采煤沉陷最为敏感<sup>[64]</sup>。2<sup>-2</sup>主采煤层开采方法多为长壁综采法,平均采高为5 m,顶板采用全部垮落法进行管理,以致地表移动变形显著,下沉系数一般为0.50~0.70。

### 2.2 数值模型构建与试验

#### 2.2.1 数值模型构建

针对上述研究区地质原型,以“抓住关键、保留特色、合理简化、逼近原型”为基本原则,基于颗粒流离散元理论,采用PFC数值软件构建数值建模。具体而言:将“黄土层-红土层-基岩层”作为2<sup>-2</sup>主采煤层覆岩层状结构数值模型框架,模型几何尺寸为长700 m,宽450 m,高315 m;煤层厚5 m,基岩厚270 m,红土层厚40 m、黄土层30 m,如图3所示。以厚砂岩位置(距煤层距离L)、砂岩层数(i)、砂泥比(n)等3个关键特征为变量构建不同的覆岩层状结构模型类型。其中,厚砂岩位置分别设置:高位(距煤层间距为煤层厚度的24倍左右)和低位(距煤层间距为煤层厚度的12倍左右);砂岩层数分别取值:7层、11层和17层(分别对应砂层系数k为64%、73%和81%);砂泥比分别取值:6:4和8:2;地表坡度取值25°。对于不同砂层系数和砂泥比取值下的砂岩和泥岩厚度的变化设置,本次建模按照“岩性相同厚度相等”的原则进行计算获取。在设定模型前后左右水平约束、地面全约束和地表自由边界条件的基础上,通过文献[65]所述岩体宏观-微观参数标定方法所得的煤岩体微观物理力学参数见表1,并设置重力加速度运行至初始平衡状态,完成初始模型构建。根据上述设计方案共得到12个不同类型的模型(表2)。工作面推进过程中,

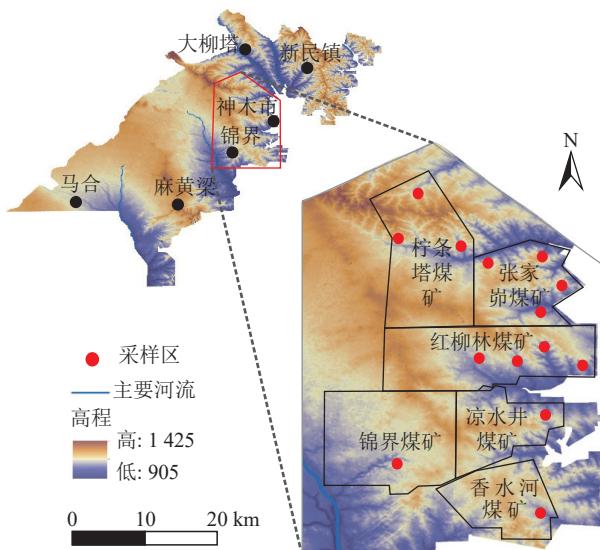


图2 研究区地形及采样区

Fig.2 Topography of the study area and sampling area

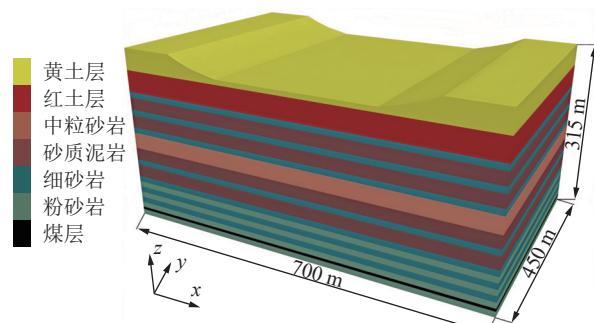


图3 三维地质模型

Fig.3 Three-dimensional geological model

表1 数值模型岩土体细观物理力学参数

Table 1 Micro-Physical and mechanical parameters of rock and soil mass of numerical model

岩性	$\gamma$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	$E^*$ /GPa	$c$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	$\beta$	$\mu$
黄土层	1 800	0.30	0.18	0.06	0.20	0.20
红土层	1 850	0.65	0.80	0.20	0.20	0.25
砂质泥岩	2 670	6.00	13.00	11.00	0.30	0.42
中砂岩	2 630	8.50	18.60	16.00	0.35	0.47
细砂岩	2 650	9.00	19.70	17.50	0.40	0.55
粉砂岩	2 680	8.00	18.50	14.50	0.50	0.52
煤层	1 420	1.00	7.80	2.60	0.30	0.43

注:  $\gamma$ 为密度,  $E^*$ 为有效弹性模量,  $k^*$ 为刚度比,  $c$ 为切向黏结强度,  $\sigma_t$ 为法向黏结强度,  $\beta$ 为力矩贡献系数,  $\mu$ 为摩擦因数。

采空区四周各留设 100 m 的煤柱, 煤层开采达到充分采动状态时停止开挖推进。

## 2.2.2 试验结果

基于数值模拟试验, 得到不同覆岩层状结构下的采动覆岩内部力学特征及地表下沉系数、坡面坡度增幅等覆岩采动效应特征, 见表2。

## 2.3 影响规律

### 2.3.1 采动覆岩力学特征

力链是非连续和散体介质传递载荷或应力的基本路径和方式<sup>[66]</sup>, 其反映了采场围岩细观尺度颗粒间的相互作用力, 其中, 细观尺度颗粒间作用力大于或等于覆岩系统中平均作用力的力链结构被称为强力链, 具有矢量特征<sup>[67]</sup>。煤层开采过程中覆岩强力链结构在垂向上表现出3个特征区段, 其中, 下分区内强力链以垂向密集分布为主, 强力链数量占该范围内力

链总数量的25%以上, 平均约30%, 强力链倾角主要介于65°~85°之间, 平均为75°, 对应岩层产生整体冒落、碎胀和压实; 中分区内强力链以近水平带状稀疏断续分布为主, 强力链数量占该范围力链总数的20%以下, 平均约15%, 强力链倾角主要介于0°~20°之间, 平均为10°, 对应岩层产生局部开裂、破断和铰接; 上分区内强力链以近水平带状密集连续分布为主, 强力链数量占该范围力链总数的60%以上, 强力链倾角主要介于0°~10°之间, 平均为5°, 对应岩层产生弯曲、下沉(表2)。因此, 采动覆岩强力链结构自下而上依次表现为垂向强力链塑性变形(Vertical Strong Chain Plastic Deformation, VCP)、水平强力链弹塑性变形(Horizontal Strong Chain Elastic Plastic Deformation, HCEP)和水平强力链弹性变形(Horizontal Strong Chain Elastic Deformation, HCP)(图4)。

在覆岩层状结构与采动应力传递的耦合下, 由于垂向强力链塑性变形区岩层发生以冒落和碎胀为主的塑性变形, 冒落岩块尺寸较小, 在上覆岩层荷载作用下岩块被垂向压实, 使得岩块间相互作用力增强, 造成区内强力链分布相对增多, 且以垂向密集分布为主。对于水平强力链弹塑性变形区, 由于其下垂向强力链塑性变形区岩块的支撑和其上水平强力链弹性变形区下沉岩层荷载的共同作用下, 使得水平强力链弹塑性变形区岩块尺寸相对较大, 且在岩体破断铰接处水平挤压作用增强, 进而造成水平强力链弹塑性变形区内岩体间及其内部强力链以近水平稀疏且断续分布为主, 其中, 岩体间塑性变形处水平铰接挤压作用产生近水平强力链, 岩体内部未发生破断开裂的弹

表2 数值模型类型及试验结果

Table 2 Numerical model types and test results

类型	砂泥比	厚砂岩位置及厚度	砂层系数/%	“HCEP-HCE”界面位置/m	“VCP-HCEP”界面位置/m	地表下沉系数	坡面坡度增幅/%	采动覆岩内部力学特征	地表坡面裂缝发育特征
A1	6 : 4	12倍煤层厚度/6倍煤层厚度	64	135.21	28.15	0.58	6.61	垂向强力链塑性变形区:强力链数量占比>25%, 倾角介于65°~85°, 垂向密集分布为主	坡顶: 拉张裂缝显著发育, 分布相对密集且均匀
A2			73	140.34	30.52	0.68	8.10		
A3			81	141.15	32.13	0.69	8.22		
A4	8 : 2	24倍煤层厚度/6倍煤层厚度	64	123.24	27.35	0.40	4.79	水平强力链弹塑性变形区:强力链数量占比<20%, 倾角介于0°~20°, 近水平断续分布为主	坡中: 剪切裂缝和拉张裂缝兼有发育, 分布相对稀疏且均匀
A5			73	130.32	29.74	0.50	5.98		
A6			81	131.14	30.25	0.51	6.01		
A7	8 : 2	12倍煤层厚度/6倍煤层厚度	64	134.54	27.20	0.45	5.92	坡脚: 剪切裂缝显著发育, 分布密集且不均匀	
A8			73	138.33	28.85	0.64	7.33		
A9			81	139.13	29.05	0.64	7.45		
A10	A11	24倍煤层厚度/6倍煤层厚度	64	122.26	22.35	0.34	4.15	强力链数量占比>60%, 倾角介于0°~10°, 近水平连续分布为主	
A12			73	127.18	25.76	0.45	5.61		
			81	127.73	26.23	0.46	5.75		

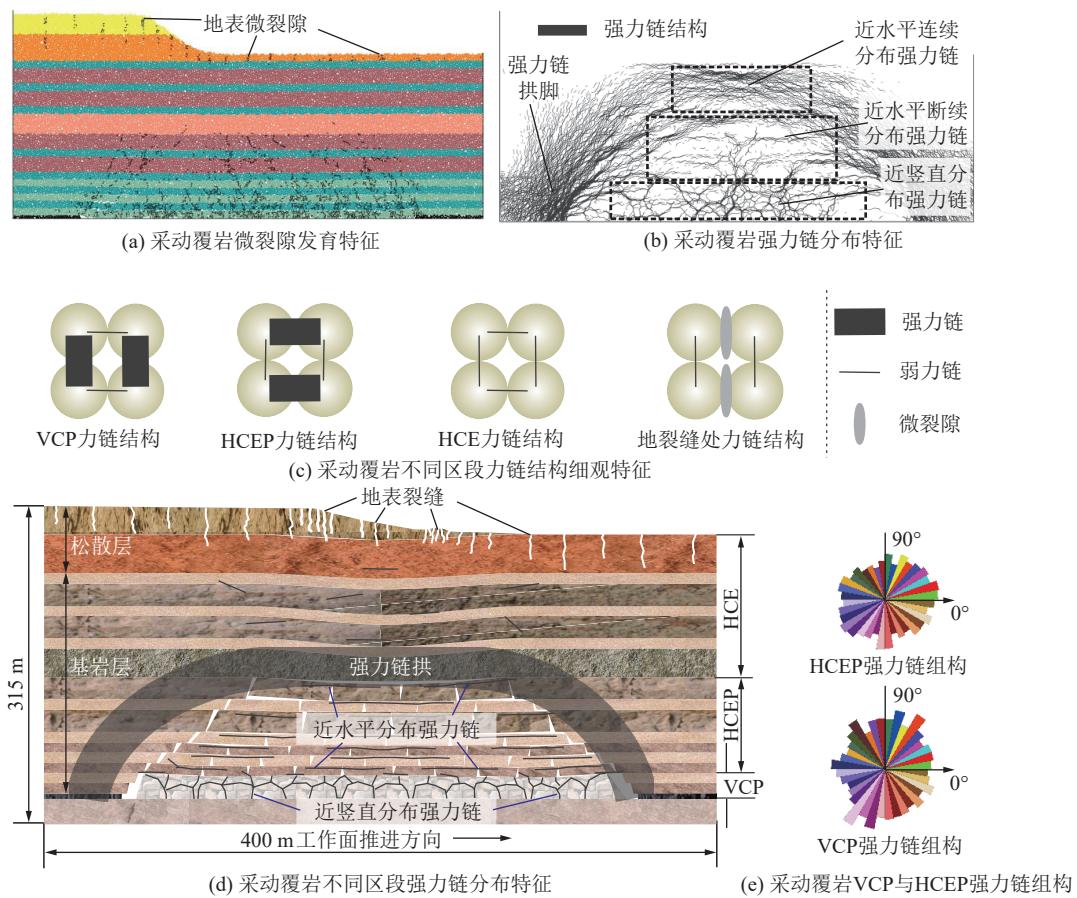


图 4 采动覆岩力链结构关键特征

Fig.4 Key characteristics of force chain structure in mining overburden rock

性变形区仍保持高应力状态而产生近水平状强力链。对于水平强力链弹性变形区,由于采动覆岩应力传递至采空区四周形成带状强力链拱结构,以此来支撑其上部发生弹性弯曲的基岩载荷层与基岩之上的松散载荷层<sup>[68]</sup>,由此造成水平强力链弹性变形区岩层内部强力链以近水平密集且连续分布为主。

### 2.3.2 覆岩层状结构对“两界面”空间位置的影响规律

基于数值模拟试验结果,绘制了不同覆岩层状结构关键特征与“VCP-HCEP”界面和“HCEP-HCE”界面位置之间的对应关系,如图5—图6所示。

由表2、图5、图6可知:

1) 在既定“厚砂岩位置+砂泥比”耦合条件下,“VCP-HCEP”和“HCEP-HCE”界面位置随砂层系数的增大而呈现逐渐增高的变化趋势,平均增幅分别为11.05%和4.64%。相当于覆岩砂层系数每增加10%,“VCP-HCEP”和“HCEP-HCE”界面位置分别提高2.63m和12.88m。由此可见,“两界面”发育高度与砂层系数呈正相关关系,即在埋深相等的条件下,覆岩砂岩层数越多,岩层界面越多,砂层厚度越薄,砂层系数越大,“两界面”发育位置越高,然而该影响在砂层系数大于73%之后逐渐减弱并最终消失。当砂岩

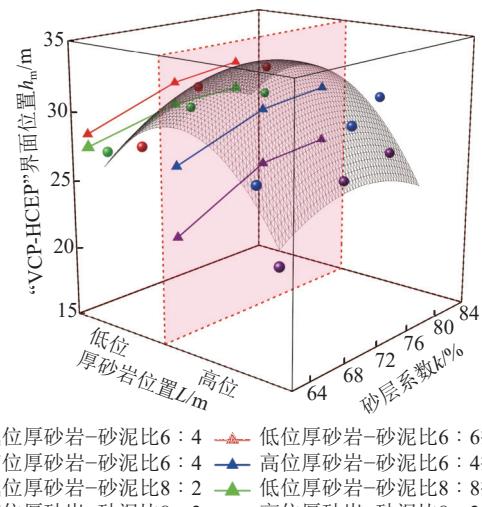


图 5 覆岩层状结构与“VCP-HCEP”界面位置的对应关系

Fig.5 Corresponding relationship between the overlying strata structure and the ‘caving-fracture’ interface position

中存在厚砂岩且处于低位时,砂层系数对“两界面”发育位置的影响更加显著。然而,砂泥比在其中虽然具有一定影响,但影响程度非常小。

2) 在既定砂层系数条件下,当厚砂岩处于高位时,“VCP-HCEP”界面位置基本稳定在22~31m,平均

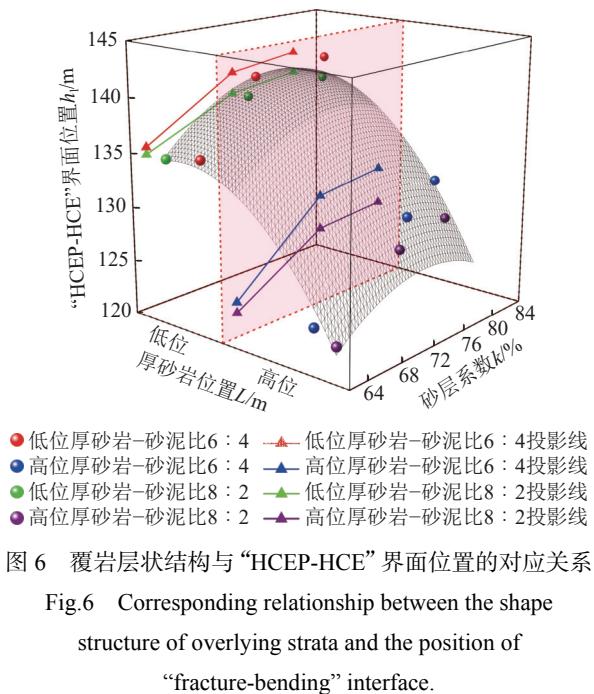


图6 覆岩层状结构与“HCEP-HCE”界面位置的对应关系

Fig.6 Corresponding relationship between the shape structure of overlying strata and the position of "fracture-bending" interface.

26.95 m, “HCEP-HCE”界面位置基本稳定在 122~132 m, 平均 126.98 m; 当厚砂岩处于低位, 覆岩“砂层系数+砂泥比”各种耦合类型的“VCP-HCEP”界面位置基本稳定在 27~32 m, 平均 29.15 m, “HCEP-HCE”界面位置基本稳定在 134~142 m, 平均 138.12 m。由此可见, 相较于低位厚砂岩, 高位厚砂岩使得“VCP-HCEP”界面、“HCEP-HCE”界面的位置平均降幅分别为 7.56% 和 8.06%。表明高位厚砂岩对“两界面”发育具有抑制作用。

3) 综合厚砂岩位置、砂层系数和砂泥比 3 个覆岩层状结构关键特征对“两界面”位置的影响规律可知:首先, 煤层覆岩下部的互层结构及特征对塑性变形区界面高度具有重要影响;其次, 厚砂岩在覆岩中的位置是“VCP-HCEP”和“HCEP-HCE”界面发育高度的第一主控因素, 决定了“两界面”发育的位置;最后, 砂层系数作为第二主控因素, 在厚砂岩位置已确定的条件下深刻影响着“两界面”发育的具体位置。

4) 究其原因:第一, 从覆岩采动损伤程度看, 相同的采煤活动作用在不同覆岩层状结构上会产生明显的损伤差异, 主要体现在岩层的厚度与其损伤程度呈显著的负相关关系。即在相同埋深条件下, 煤层覆岩的砂层系数越大, 意味着覆岩中的砂岩层数越多, 砂岩的单层厚度越小, 岩层强度越小, 则相同采煤活动对岩层的损伤程度越大, 覆岩中“两界面”的发育位置也就越高。值得注意的是, 如果覆岩中存在一层或多层厚度明显大于其他岩层的厚砂岩时, 采煤活动对岩层的损伤将会明显减弱。特别是在覆岩中处于高位的厚砂岩会显著减小覆岩的采动损伤程度, 抑制“两

界面”的发育。许家林等<sup>[69]</sup>在研究覆岩关键层下沉移动和裂隙张开特征及对导水裂隙带高度的影响的结论也提供了有效佐证。第二, 从采动能量在覆岩中的传递衰减看, 相同采煤活动产生的能量在不同覆岩层状结构中的传递过程和衰减程度存在显著差异, 主要体现在岩层的厚度与其消减采动能量的能力呈显著的正相关关系。即在相同埋深条件下, 煤层覆岩的砂层系数越小, 意味着覆岩中的砂岩层数越少, 砂岩的单层厚度越大, 岩层间的软弱界面越少, 则相同采煤活动产生的能量受到岩层、岩石、矿物颗粒间胶结作用力的分散、抵消程度越大, 覆岩中“两界面”的发育位置也就越低。而厚砂岩的发育能够放大覆岩层状结构对采动能量的传递衰减程度, 尤其是处于高位的厚砂岩可有效抑制“两界面”的发育。

### 2.3.3 覆岩层状结构对地表移动变形的影响规律

基于数值模拟试验结果, 绘制了不同覆岩层状结构与地表下沉系数、坡度增幅之间的对应关系, 如图 7 所示。

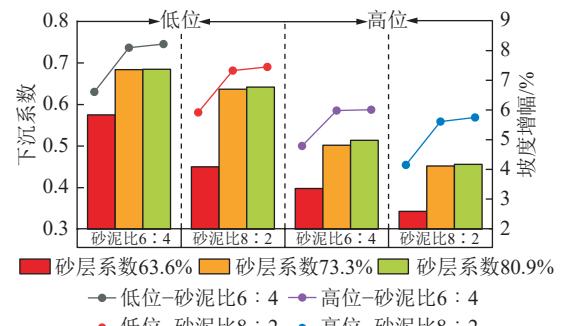


图7 不同覆岩层状结构对地表下沉系数和坡面坡度增幅的影响

Fig.7 Effects of different overburden structures on surface subsidence coefficient and slope gradient increase

由表 2、图 7 可知:

1) 高位厚砂岩条件下, 任意“砂层系数+砂泥比”耦合条件下, 地表下沉系数平均值和黄土坡面的坡度增幅平均值分别为 0.44 和 5.38%, 较低位厚砂岩条件下分别下降了 27.42% 和 26.00%, 表明高位的厚砂岩对地表下沉和坡面形变均产生明显的控制效应。

2) 在既定“厚砂岩位置+砂泥比”耦合条件下, 地表下沉系数和黄土坡面坡度增幅均会随砂层系数的增大而呈现出增大的变化趋势。当砂层系数小于 73% 时, 地表平均下沉系数与黄土坡面坡度的平均增幅分别为 29.20% 和 26.60%, 但当砂层系数超过 73% 时, 地表平均下沉系数与黄土坡面坡度的平均增幅分别为 1.5% 和 2.0%。表明覆岩中的砂岩层数对地表下沉程度和坡面形变程度的影响有作用边界, 主要

集中在砂层系数小于 73% 时。

3) 在既定“厚砂岩位置+砂层系数”耦合条件下, 地表下沉系数和黄土坡面坡度增幅均会随砂泥比的增大而呈现出减小的变化趋势。当砂层系数小于 73% 且砂泥比 8:2 时, 地表平均下沉系数与黄土坡面坡度平均增幅较砂泥比 6:4 时分别下降了 18.55%、11.75%, 但当砂层系数超过 73% 时, 该变化已不显著。表明覆岩砂泥比对地表下沉程度和坡面形变程度的影响会随着砂层系数的增大而减弱, 且主要集中在砂层系数小于 73% 时。

4) 综合厚砂岩位置、砂层系数和砂泥比 3 个覆岩层状结构关键特征对地表移动变形的影响规律可知: 首先, 厚砂岩在覆岩中的位置是地表下沉程度和坡面形变程度的第一主控因素, 决定了地表形变的基本水平; 其次, 砂层系数在厚砂岩位置已确定的条件下深刻影响着地表移动变形的具体程度, 但这种影响在砂层系数超过 73% 之后基本消失; 第三, 砂泥比对地表移动变形的影响受控于砂层系数的, 且作用最小。

5) 究其原因: 在相同采煤活动和埋深条件下, 煤层覆岩的砂层系数越大, 意味着覆岩中砂岩的单层厚度越小, 岩层损伤程度越大, 地表下沉移动越严重, 地表坡面形变也就随之加剧。而覆岩中的厚砂岩能够有效控制和降低地表下沉和坡面形变程度, 尤其是高位厚砂岩。在地表下沉移动的过程中, 地表坡面的不同部位会产生截然不同的变形特征(图 8)。具体而言, 坡顶部位不仅会发生垂向下沉和朝向采空区的水平移动, 而且还会沿着坡面倾向产生黄土层滑动等附加变形, 以致坡顶部位土壤的“拉张效应”非常明显, 强烈的拉伸作用会导致坡顶部位土壤疏松, 裂缝密集且均匀分布, 裂缝宽度相对较大<sup>[70]</sup>; 在沉陷过程中不仅发生显著的整体水平移动, 而且还会出现坡度增大的现象, 以致坡中部位形态的“变陡效应”比较明显, 进而导致坡中部位裂缝较密集且均匀分布, 裂缝宽度相对较小<sup>[71]</sup>; 坡脚部位由于受到沟谷土体与对面坡体下沉移动的双重挤压, 从而产生水平位移量减少甚至

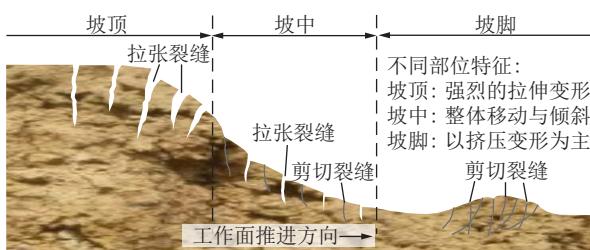


图 8 坡面地裂缝发育特征示意

Fig.8 Diagram of development characteristics of ground fissures on slope

地表抬升的现象, 以致坡脚部位土壤的“挤压效应”较为明显。明显的挤压作用使坡脚处的土壤受到强烈变形, 表现为裂缝分布不均, 甚至在局部区域出现土壤隆起或破裂的情况。不同坡面部位因这些裂缝的存在会进一步改变了土壤的物理结构、水分运移、养分循环以及微生物栖息环境等, 从而对土壤的物理、化学与微生物特性以及侵蚀特性产生了显著的影响。

### 3 采煤沉陷对土壤四大特性的损伤效应

针对研究区及主采煤层, 基于“厚砂岩在覆岩中的位置”和“覆岩砂层系数”两大主控因素划分出“低位厚砂岩+砂层系数大于 73%”“低位厚砂岩+砂层系数小于 73%”“高位厚砂岩+砂层系数大于 73%”“高位厚砂岩+砂层系数小于 73%”等 4 个覆岩层状结构基本类型。并从“地下覆岩层状结构基本类型+地表黄土沉陷坡面部位+地表采动损害形式+土壤质量特性指标”耦合的角度, 挑选了研究区内柠条塔、张家峁、红柳林、凉水井、锦界井田的黄土沟壑采煤沉陷区作为采样对象。具体采样方案如下: 针对研究区 2<sup>-2</sup> 主采煤层覆岩层状结构四大类型及其地表移动特征, 分别选择 5 个地表形态相似、地下采矿条件相同的黄土沉陷坡面, 坡面倾向与工作面推进方向相一致。采集坡顶(坡面上部 10 m 左右)、坡中(坡面中间 30 m 左右)、坡脚(坡面下部 10 m 左右)3 个不同部位的裂缝区和非裂缝区 0~20 cm 土壤; 同时采集相邻的未开采区内坡形、坡度、坡向相似的自然黄土坡面土壤作为对照(图 9)。共采集 2925 个土壤样品, 经室内预处理后测试土壤物理特性指标(包括机械组成、含水率、孔隙度)、化学特性指标(包括 pH、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数、速效钾质量分数)、微生物特性指标(包括细菌、真菌、放线菌数量和蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶活性), 每个样品的各项指标平均测定 3 次; 基于侵蚀-土地生产力影响评估模型(erosion-productivity impact calculator, EPIC)计算每个土壤样品的可蚀性 K 值。

#### 3.1 采煤沉陷对土壤物理、化学及微生物特性的损伤效应

根据测定结果(表 3、表 4), 绘制了相应的土壤理化及微生物特性指标值对比图, 如图 10—图 12 所示。

由图 10—图 12 可知, 相对于对照组(即 CK 值), 无论在何种覆岩层状结构类型下, 地表沉陷坡面 0~20 cm 土壤的物理、化学及微生物指标表现出显著变化。其中, 土壤孔隙度呈现出全坡面性的明显增大, 而其他指标, 包括含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数、速效钾质

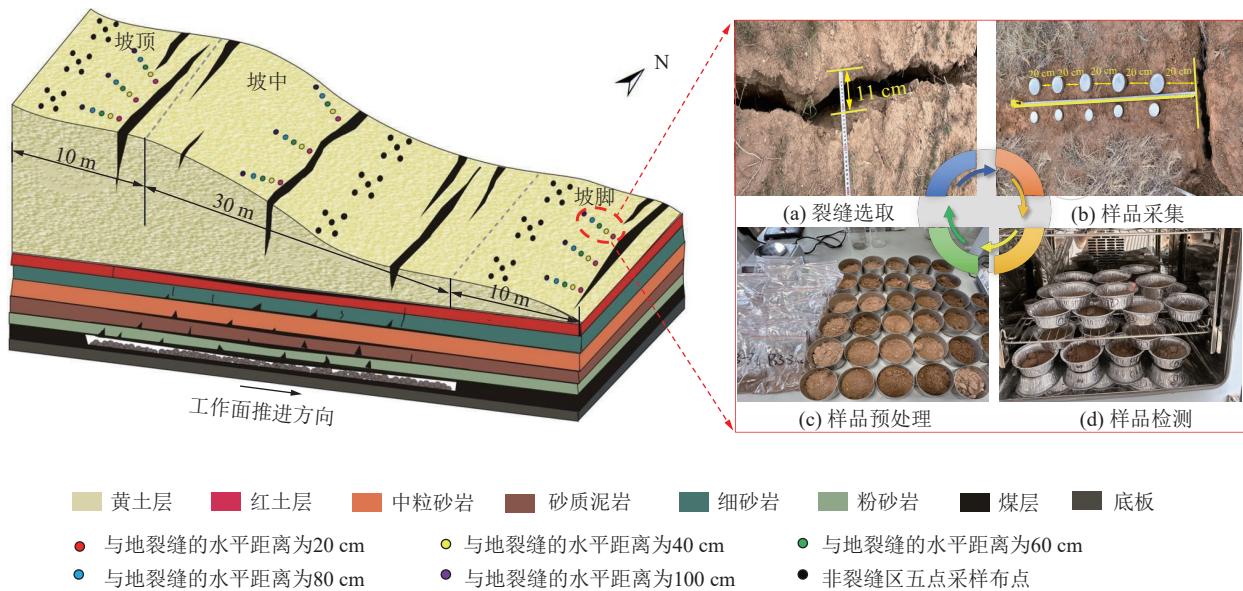


图 9 土壤样品采集示意

Fig.9 Schematic diagram of soil sample collection

量分数,以及细菌数量、放线菌数量、真菌数量,蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性和磷酸酶活性,则均呈现出全坡面性的显著减小的变化规律。这种变化在坡顶、坡中部位及裂缝区尤为突出。具体而言:

在“低位厚砂岩+砂层系数大于73%”条件下,沉陷全坡面的土壤孔隙度平均增幅为46.14%( $p < 0.05$ ),而含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数、速效钾质量分数、细菌数量、放线菌数量、真菌数量,以及蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性平均降幅依次为18.42%( $p < 0.05$ )、37.13%( $p < 0.05$ )、30.59%( $p < 0.05$ )、28.58%( $p < 0.05$ )、26.06%( $p < 0.05$ )、31.33%( $p < 0.05$ )、28.03%( $p < 0.05$ )、24.41%( $p < 0.05$ )、31.69%( $p < 0.05$ )、34.47%( $p < 0.05$ )、40.56%( $p < 0.05$ )、16.61%( $p < 0.05$ )、29.72%( $p < 0.05$ );在“低位厚砂岩+砂层系数小于73%”条件下,沉陷全坡面的土壤孔隙度平均增幅为21.46%( $p < 0.05$ ),而含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数、速效钾质量分数、细菌数量、放线菌数量、真菌数量,以及蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性平均降幅依次为10.60%( $p < 0.05$ )、29.92%( $p < 0.05$ )、21.83%( $p < 0.05$ )、23.67%( $p < 0.05$ )、21.03%( $p < 0.05$ )、26.33%( $p < 0.05$ )、24.30%( $p < 0.05$ )、20.66%( $p < 0.05$ )、27.48%( $p < 0.05$ )、30.17%( $p < 0.05$ )、36.64%( $p < 0.05$ )、13.71%( $p < 0.05$ )、26.00%( $p < 0.05$ );在“高位厚砂岩+砂层系数大于73%”条件下,沉陷全坡面的土壤孔隙度平均增幅为15.23%( $p < 0.05$ ),而含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质

量分数、速效钾质量分数、细菌数量、放线菌数量、真菌数量,以及蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性平均降幅依次为7.33%、19.54%( $p < 0.05$ )、18.95%( $p < 0.05$ )、19.67%( $p < 0.05$ )、17.06%( $p < 0.05$ )、22.33%( $p < 0.05$ )、22.05%( $p < 0.05$ )、18.32%( $p < 0.05$ )、24.46%( $p < 0.05$ )、27.83%( $p < 0.05$ )、34.05%( $p < 0.05$ )、11.69%( $p < 0.05$ )、23.70%( $p < 0.05$ );在“高位厚砂岩+砂层系数小于73%”条件下,沉陷全坡面的土壤孔隙度平均增幅为6.88%,而含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数、速效钾质量分数、细菌数量、放线菌数量、真菌数量,以及蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性平均降幅依次为4.56%、10.05%( $p < 0.05$ )、7.45%( $p < 0.05$ )、17.67%( $p < 0.05$ )、14.65%( $p < 0.05$ )、20.33%( $p < 0.05$ )、20.51%( $p < 0.05$ )、15.33%( $p < 0.05$ )、20.64%( $p < 0.05$ )、24.85%( $p < 0.05$ )、31.64%( $p < 0.05$ )、8.66%、18.51%( $p < 0.05$ )。土壤pH在各类覆岩层状结构类型下均无显著性差异。

由此可见,①从覆岩层状结构类型将地下采动效应转换为地表生态损害效应的效果来看,“低位厚砂岩+砂层系数大于73%”的类型下,地表坡面0~20 cm土壤的物理、化学和微生物特性受损均最为显著,这与该类型下地表沉陷坡面移动变形程度最大有直接关系。②从坡面部位的生态损害效应来看,沉陷坡面不同部位的0~20 cm土壤损害呈现显著空间分异特征。其中土壤孔隙度平均增幅、有机质质量分数平均降幅在坡顶部最大,依次为33.41%( $p < 0.05$ )、29.32%( $p < 0.05$ )。而土壤含水率、黏粒质量分数、速

表3 不同覆岩层状结构下黄土坡面表层土壤物理与化学特性指标检测结果  
Table 3 Detection results of physical and chemical properties of surface soil on loess slope under different overburden structures

覆岩层状结构特征	地表移动变形特征	坡面部位及损害形式	黏粒质量分数/%	孔隙度/%	含水率/%	pH	有机质质量分数	速效氮质量分数	速效磷质量分数	速效钾质量分数
地表下沉系数 0.64~0.69 低位厚砂岩+ 砂层系数大于73% 7.33%~8.22%	坡顶	裂缝区	6.66±0.860	56.32±5.98a	7.13±0.37nmk	8.24±0.14a	1.23±0.18m	37.12±8.12e	1.00±0.21g	95.67±13.51k
		非裂缝区	7.59±0.53m	50.25±5.12ab	7.71±0.411	8.45±0.73a	1.92±0.12g	41.50±9.97c	1.11±0.10e	107.38±11.62h
	坡中	裂缝区	7.26±0.58n	49.62±3.78ab	6.52±0.38n	8.66±0.30a	1.32±0.22l	29.65±6.58h	0.86±0.09k	81.87±12.22n
		非裂缝区	7.89±0.43lm	47.33±4.24b	6.88±0.40nm	8.72±0.29a	1.61±0.14j	33.61±6.71f	0.96±0.15jk	93.09±10.01l
	坡脚	裂缝区	8.42±0.46j	41.67±4.34cd	7.76±0.491	8.15±0.33a	1.85±0.10h	44.90±8.96b	1.15±0.24cd	111.72±11.16gh
		非裂缝区	9.09±0.51h	40.77±6.31ce	8.47±0.55h	8.19±0.27a	3.11±0.16a	50.01±9.18ac	1.27±0.18ah	124.38±12.13d
	坡顶	裂缝区	8.02±0.25lm	40.69±5.09ce	8.11±0.19j	8.31±0.35a	1.43±0.22l	39.30±9.55d	1.06±0.20f	101.55±11.43j
		非裂缝区	8.93±0.44hi	38.29±2.83de	8.68±0.16g	8.43±0.37a	2.07±0.31e	44.76±8.18b	1.20±0.21c	116.27±13.14g
	坡中	裂缝区	8.23±0.76k	40.91±4.58ce	7.02±0.35nm	8.97±0.53a	1.77±0.34i	31.56±8.63gh	0.91±0.14j	87.33±11.98mn
		非裂缝区	9.03±0.39h	40.54±3.85cf	7.44±0.47m	8.63±0.31a	2.05±0.10e	36.34±7.11e	1.04±0.17f	100.97±10.22j
	坡脚	裂缝区	8.79±0.14i	39.08±4.83de	8.46±0.44h	8.28±0.36a	1.98±0.32f	47.39±7.54b	1.21±0.15c	118.20±11.02f
		非裂缝区	9.32±0.42g	38.74±3.27de	9.02±0.71e	8.44±0.42a	3.02±0.24a	53.63±9.24ac	1.36±0.12ae	134.39±12.54bcd
地表下沉系数 0.45~0.58 低位厚砂岩+ 砂层系数小于73% 5.92%~6.61%	坡顶	裂缝区	9.11±0.32h	39.58±5.49de	8.23±0.85i	8.38±0.38a	1.56±0.27k	41.49±8.88c	1.11±0.13e	107.44±12.07h
		非裂缝区	10.01±0.46eg	37.16±2.38def	8.81±0.56f	8.46±0.35a	2.11±0.09e	46.95±8.82b	1.25±0.22b	122.16±12.08e
	坡中	裂缝区	9.64±0.28f	38.07±4.77de	7.32±0.54nmj	8.56±0.78a	1.84±0.33h	33.47±8.19f	0.96±0.08jk	92.79±10.78l
		非裂缝区	10.26±0.41d	36.99±4.58def	7.92±0.50k	8.27±0.65a	2.21±0.10de	38.26±6.99e	1.10±0.21e	106.43±11.11i
	坡脚	裂缝区	10.12±0.66ef	37.92±4.44def	8.99±0.57e	8.39±0.43a	2.09±0.31e	49.89±7.04ac	1.27±0.11ah	124.68±10.66d
		非裂缝区	10.94±0.45cd	36.12±3.55def	9.23±0.49c	8.41±0.26a	2.94±0.13ab	56.12±9.33ac	1.43±0.16ac	140.87±0.46b
	地表下沉系数 0.45~0.51 高位厚砂岩+ 砂层系数大于73% 5.75%~6.01%	裂缝区	10.73±0.55ce	35.74±2.13def	8.69±0.45g	8.53±0.37a	2.28±0.36d	42.53±7.54b	1.14±0.12d	110.39±10.48ghi
		非裂缝区	11.02±0.31c	33.68±3.18f	8.98±0.35e	8.83±0.66a	2.44±0.10c	48.04±8.25ac	1.28±0.15ag	125.10±12.39d
	坡顶	裂缝区	10.61±0.32ce	36.43±6.14def	7.77±0.311	8.51±0.43a	2.02±0.11e	34.43±7.26f	0.99±0.09h	95.52±10.39k
		非裂缝区	11.88±0.33b	35.97±5.22def	8.04±0.77j	8.44±0.68a	2.28±0.17d	39.21±8.01d	1.12±0.11e	109.16±10.71h
	坡中	裂缝区	11.09±0.48c	34.67±4.17e	9.09±0.81d	8.82±0.86a	2.66±0.15b	51.14±8.41ac	1.30±0.16af	127.92±10.67c
		非裂缝区	11.86±0.52b	33.19±3.33g	9.41±0.66b	8.77±0.59a	2.91±0.14ab	57.37±9.44ab	1.50±0.13ab	144.11±10.08ac
高位厚砂岩+ 砂层系数小于73% 4.15%~4.79%	坡脚	裂缝区	11.98±0.53b	31.08±2.80h	9.12±0.51d	8.32±0.34a	2.66±0.26b	54.59±8.92ac	1.41±0.31ad	147.18±11.50ab
		非裂缝区	13.41±0.60a	34.23±3.08e	8.35±0.59h	8.26±0.35a	2.34±0.16cd	47.82±7.69ac	1.32±0.14af	136.45±10.88bc
	CK坡脚	裂缝区	12.05±0.62b	32.88±2.96g	9.76±0.67a	8.89±0.38a	2.87±0.28ab	62.36±9.09a	1.55±0.17a	161.92±15.09a
		非裂缝区								

注: 同一指标同列数据后不同字母表示在0.05的水平上差异显著, 下同。表层土壤垂直深度为0~20 cm; 裂缝区为距裂缝水平距离100 cm以内; 有效钾质量分数、有效磷质量分数单位为mg/kg; 有机质质量分数、铵态氮质量分数单位为g/kg。

表4 不同覆岩层状结构下黄土坡面表层土壤微生物与侵蚀特性指标检测结果

Table 4 Detection results of surface soil microorganisms and erosion characteristics of loess slope under different overburden structures

覆岩层状结构特征	地表移动变形特征	坡面部位及损害形式	细菌数量	放线菌数量	真菌数量	蔗糖酶活性	脲酶活性	过氧化氢酶活性	磷酸酶活性	土壤可蚀性K值
地表下沉系数 0.64~0.69 坡面坡度增幅 7.33%~8.22%	坡顶 0.53±0.42k 3.99±0.52ij	裂缝区	3.51±0.22m	5.71±0.27m	5.18±0.27m	11.68±1.42m	0.64±0.12k	2.25±0.10k	1.37±0.14m	0.396±0.0166a
		非裂缝区	6.39±0.49i	5.83±0.32j	13.63±1.00j	0.76±0.15h	2.53±0.11bi	1.60±0.16j	0.360±0.0205b	
		裂缝区	2.80±0.35p	4.38±0.45r	2.96±0.31p	11.08±1.12o	0.59±0.02l	2.14±0.02m	1.11±0.11r	0.389±0.0156ab
	坡中 5.08±0.57o 5.19±0.47f	非裂缝区	3.28±0.36l	5.08±0.57o	3.60±0.38o	12.92±1.28k	0.71±0.04hl	2.41±0.03f	1.30±0.12n	0.369±0.0224abd
		裂缝区	7.17±0.82f	6.38±0.32g	16.49±1.65f	1.03±0.12f	2.22±0.04lm	2.03±0.05f	0.355±0.0166c	
		非裂缝区	8.18±0.79c	7.37±0.33d	18.93±1.79c	1.20±0.14bf	2.51±0.07c	2.29±0.09cd	0.299±0.0220j	
地表下沉系数 0.45~0.58 坡面坡度增幅 5.92%~6.61%	坡顶 5.92±0.26j 4.11±0.28i	裂缝区	3.67±0.26j	5.92±0.69i	5.38±0.25lm	12.26±1.46m	0.68±0.13i	2.34±0.07h	1.44±0.08khn	0.376±0.146abc
		非裂缝区	6.64±0.74hi	6.04±0.23i	14.79±1.47i	0.82±0.12hi	2.62±0.08abg	1.72±0.06i	0.339±0.0126efg	
		裂缝区	2.95±0.48o	4.59±0.57qr	3.15±0.37op	11.64±1.67no	0.62±0.15l	2.22±0.16hn	1.17±0.09qr	0.360±0.0263bcd
	坡中 5.53±0.49k 5.43±0.77ef	非裂缝区	3.53±0.49k	5.44±0.66n	4.10±0.34n	13.90±1.56j	0.77±0.11hm	2.49±0.14d	1.40±0.09l	0.339±0.0234efg
		裂缝区	7.47±0.61ef	6.68±0.33f	17.27±1.53ef	1.08±0.24e	2.30±0.18i	2.11±0.10e	0.345±0.0224def	
		非裂缝区	6.41±0.82bcd	8.69±0.63bd	7.87±0.36c	20.41±1.32bcd	1.28±0.22bd	2.58±0.16bh	2.36±0.04bc	0.296±0.0195k
地表下沉系数 0.45~0.51 坡面坡度增幅 5.75%~6.01%	坡顶 4.20±0.63hij 3.04±0.41n	裂缝区	3.75±0.65j	6.06±0.49k	5.51±0.29lm	12.65±1.61hm	0.71±0.06hl	2.39±0.19g	1.48±0.11k	0.361±0.0185b
		非裂缝区	6.79±0.58h	6.17±0.21h	15.18±1.66h	0.85±0.08gh	2.68±0.18ab	1.79±0.10h	0.326±0.0107f	
		裂缝区	4.73±0.52qr	3.28±0.23op	12.02±1.52no	0.65±0.04j	2.27±0.21j	1.21±0.12p	0.344±0.0126d	
	坡中 5.59±0.58e 6.65±0.54bc	非裂缝区	5.65±0.61m	4.54±0.25n	14.46±1.59ij	0.81±0.08hi	2.55±0.19bh	1.46±0.11kl	0.324±0.0146gh	
		裂缝区	7.68±0.43e	6.88±0.34e	17.79±1.82e	1.11±0.11ld	2.36±0.22h	2.16±0.17d	0.326±0.0166g	
		非裂缝区	8.99±0.45bc	8.18±0.35bc	21.20±1.68bc	1.33±0.18bc	2.64±0.19abf	2.41±0.15abc	0.292±0.0205lm	
地表下沉系数 0.34~0.40 坡面坡度增幅 4.15%~4.79%	坡顶 4.34±0.46ii 3.19±0.40m	裂缝区	3.89±0.42im	6.28±0.39j	5.71±0.28k	13.23±1.86k	0.74±0.03hl	2.48±0.24ek	1.55±0.16jk	0.314±0.0175hi
		非裂缝区	7.00±0.38g	6.37±0.21g	15.57±1.85g	0.88±0.07g	2.76±0.21ab	1.83±0.12h	0.305±0.0107i	
		裂缝区	4.94±0.33p	3.47±0.29o	12.58±1.37lm	0.68±0.06i	2.36±0.24h	1.27±0.19o	0.327±0.0185f	
	坡中 5.84±0.34d 6.81±0.20b	非裂缝区	5.79±0.29lm	5.10±0.30m	14.84±1.44i	0.83±0.06h	2.63±0.15abg	1.50±0.07k	0.306±0.0136i	
		裂缝区	7.97±0.74d	7.18±0.22de	18.58±1.26de	1.16±0.16c	2.44±0.12el	2.24±0.18cde	0.294±0.0117k	
		非裂缝区	9.19±0.71b	8.37±0.19b	21.72±1.21b	1.37±0.17b	2.73±0.11abd	2.49±0.13ab	0.274±0.0185n	
高位厚砂岩+ 砂层系数大于73%	CK坡顶		4.47±0.84h	7.22±0.74f	6.56±0.32fg	19.46±1.84bce	1.17±0.08c	2.85±0.15a	2.32±0.07bcd	0.287±0.0214lm
	CK坡中		4.83±0.19g	7.06±0.50g	6.30±0.45g	18.78±1.13d	1.22±0.14be	2.74±0.04abc	1.95±0.14g	0.291±0.0117lm
	CK坡脚		8.11±0.40a	10.10±0.77a	9.97±0.44a	26.17±1.62a	1.71±0.01a	2.84±0.12a	2.54±0.08a	0.279±0.0087mm

注: 表层土壤垂直深度为0~20 cm; 裂缝区为距裂缝水平距离100 cm以内; 细菌、放线菌、真菌数量单位为 $10^4$  cfu/g; 蔗糖酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性单位为mg/(g·24 h); 土壤可蚀性K值采用EPIC模型计算得到, 单位为Mg·ha<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>·mm<sup>-1</sup>。

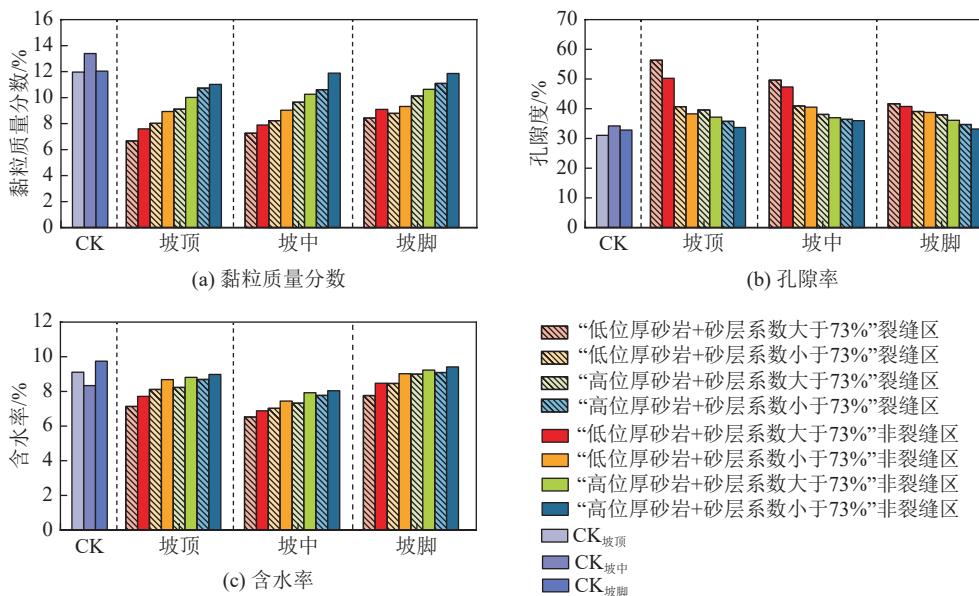


图 10 不同覆岩层状结构特征下黄土坡面各部位裂缝区、非裂缝区土壤物理特性对比

Fig.10 Comparison of soil physical properties in fractured and non-fractured areas of loess slope under different overburden rock structure characteristics

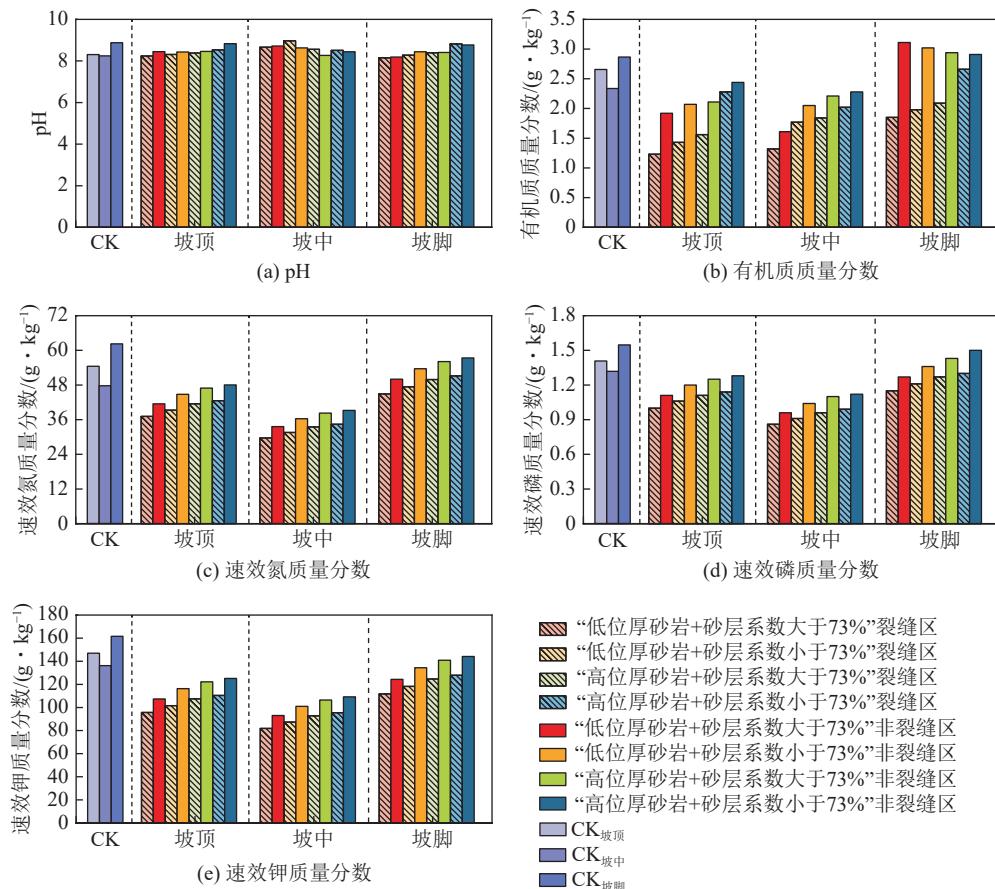


图 11 不同覆岩层状结构特征下黄土坡面各部位裂缝区、非裂缝区土壤化学特性对比

Fig.11 Comparison of soil chemical properties in fractured and non-fractured areas of loess slope under different overburden rock structure characteristics

效氮、速效磷、速效钾质量分数、细菌数量、放线菌数量、真菌数量、蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性和磷酸酶活性的平均降幅在坡中部位最大, 依次为

11.81%( $p < 0.05$ )、30.28%( $p < 0.05$ )、27.72%( $p < 0.05$ )、24.81%( $p < 0.05$ )、29.72%( $p < 0.05$ )、32.12%( $p < 0.05$ )、28.12%( $p < 0.05$ )、40.08%( $p < 0.05$ )、31.15%( $p < 0.05$ )、

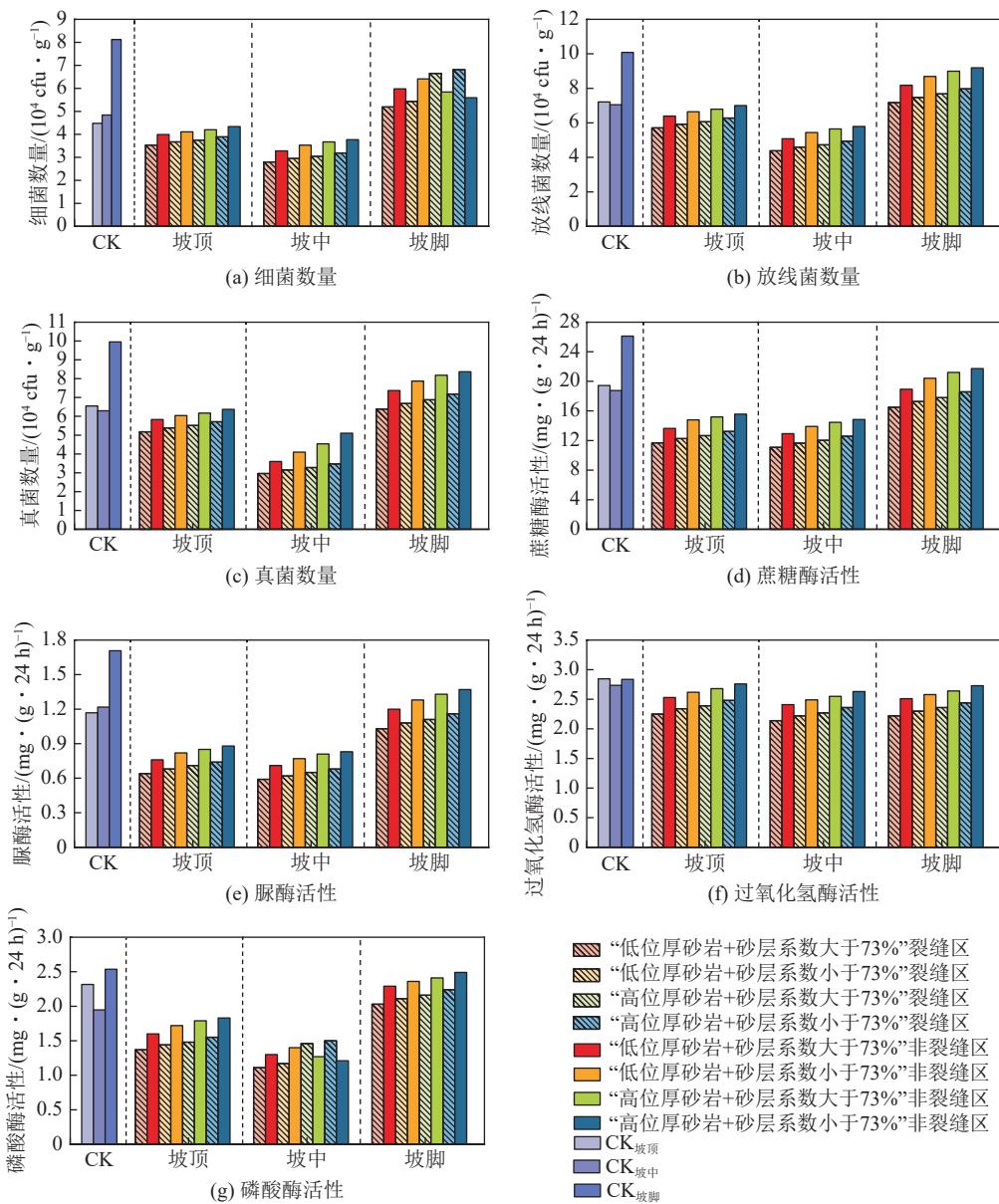


图 12 不同覆岩层状结构特征下黄土坡面各部位裂缝区、非裂缝区土壤微生物特性对比

Fig.12 Comparison of soil microbial characteristics in fracture zone and non-fracture zone of loess slope under different overburden rock structure characteristics

42.01%( $p < 0.05$ )、13.00%( $p < 0.05$ )、33.21%( $p < 0.05$ )，表明沉陷坡面土壤物理、化学和微生物特性的损害主要集中于坡顶、坡中部位。③从坡面移动变形类型的生态损害效应来看，沉陷坡面裂缝区 0~20 cm 土壤孔隙度的平均增幅较非裂缝区高出 28.76%( $p < 0.05$ )，而含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数和速效钾质量分数细菌数量、放线菌数量、真菌数量及蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性的平均降幅较非裂缝区高出依次高出 65.58%( $p < 0.05$ )、28.90%( $p < 0.05$ )、217.64%( $p < 0.05$ )、54.13%( $p < 0.05$ )、65.11%( $p < 0.05$ )、46.71%( $p < 0.05$ )、57.37%( $p < 0.05$ )、80.72%( $p < 0.05$ )、67.70%( $p < 0.05$ )、51.50%( $p < 0.05$ )、39.19%( $p < 0.05$ )、

129.65%( $p < 0.05$ ) 和 67.51%( $p < 0.05$ )，表明地裂缝的发育是沉陷坡面土壤物理、化学、微生物特性损害的主要原因。

### 3.2 采煤沉陷对土壤侵蚀特性的损伤效应

根据计算结果，绘制了相应的土壤侵蚀特性指标值对比如图 13 所示。

由图 13 可知，相对于对照组，无论在何种覆岩层状结构类型下，地表沉陷坡面 0~20 cm 土壤可蚀性  $K$  值表现出全坡面性的显著增大的变化规律，坡顶部位及裂缝区尤甚。具体而言：

在“低位厚砂岩+砂层系数大于 73%”条件下，沉陷全坡面的土壤可蚀性  $K$  值平均增幅为 26.38%( $p < 0.05$ )；在“低位厚砂岩+砂层系数小于 73%”条件下，

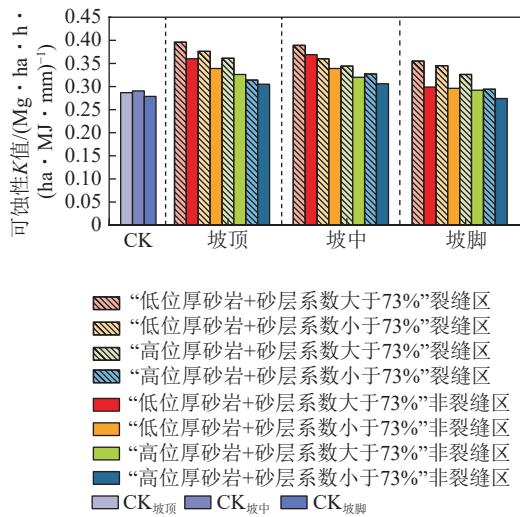


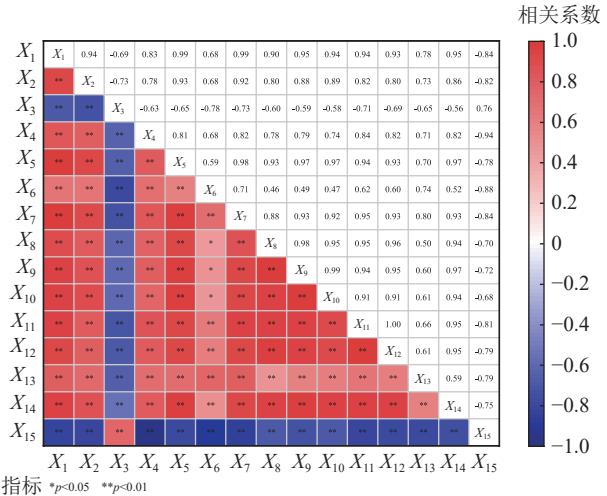
图 13 不同覆岩层状结构特征下黄土坡面各部位裂隙区、非裂隙区土壤侵蚀特性对比

Fig.13 Comparison of soil erosion characteristics in fractured and non-fractured areas of loess slope under different overburden rock structure characteristics

沉陷全坡面的土壤可蚀性  $K$  值平均增幅为 19.85% ( $p < 0.05$ )；在“高位厚砂岩+砂层系数大于 73%”条件下，沉陷全坡面的土壤可蚀性  $K$  值平均增幅为 14.84% ( $p < 0.05$ )；在“高位厚砂岩+砂层系数小于 73%”条件下，沉陷全坡面的土壤可蚀性  $K$  值平均增幅为 6.31% ( $p < 0.05$ )。由此可见，①从覆岩层状结构类型将地下采动效应转换为地表生态损害效应的效果来看，“低位厚砂岩+砂层系数大于 73%”的类型下，地表坡面 0~20 cm 土壤可蚀性  $K$  值上升最为明显，这与该类型下地表沉陷坡面移动变形程度最大有直接关系。②从坡面部位的生态损害效应来看，地表坡面 0~20 cm 土壤可蚀性  $K$  值最大增幅出现在坡顶部位，平均为 20.95% ( $p < 0.05$ )，表明沉陷坡面土壤侵蚀特性的损害主要集中于坡顶部位。③从坡面移动变形类型的生态损害效应来看，沉陷坡面裂隙区 0~20 cm 土壤可蚀性  $K$  值平均增幅较非裂隙区高出 92.28% ( $p < 0.05$ )，表明地裂缝的发育是沉陷坡面土壤侵蚀特性损害的主要原因。

经相关性检验，黄土坡面表层土壤的物理、化学及生物指标与土壤可蚀性  $K$  值之间存在显著相关性（图 14）。其中，土壤孔隙度与可蚀性  $K$  值的相关系数为 0.76，达到极显著正相关水平 ( $p < 0.01$ )，而含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效氮质量分数、速效磷质量分数、速效钾质量分数、细菌数量、放线菌数量、真菌数量、蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性与可蚀性  $K$  值的相关系数依次为

-0.82、-0.88、-0.94、-0.78、-0.84、-0.70、-0.72、-0.68、-0.81、-0.79、-0.79、-0.75，均达到极显著负相关水平 ( $p < 0.01$ )。由此可见，沉陷坡面土壤孔隙度的增加以及其他物理、化学、微生物指标的降低均会提高土壤潜在侵蚀能力。



注：式中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$  依次为土壤速效磷质量分数 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、含水率 (%)、孔隙度 (%)、有机质质量分数 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、速效氮质量分数 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、黏粒质量分数 (%)、速效钾质量分数 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、细菌数量 ( $10^4 \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )、放线菌数量 ( $10^4 \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )、真菌数量 ( $10^4 \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ )、蔗糖酶活性 ( $\text{mg}(\text{g} \cdot 24\text{h})^{-1}$ )、脲酶活性 ( $\text{mg}(\text{g} \cdot 24\text{h})^{-1}$ )、过氧化氢酶活性 ( $\text{mg}(\text{g} \cdot 24\text{h})^{-1}$ )、磷酸酶活性 ( $\text{mg}(\text{g} \cdot 24\text{h})^{-1}$ )、土壤可蚀性  $K$  值 ( $\text{Mg} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot (\text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})^{-1}$ )。

图 14 黄土坡面表层土壤物理、化学、微生物指标与土壤可蚀性  $K$  值相关分析

Fig.14 Correlation analysis between soil physical, chemical, microbial indexes and soil erodibility  $K$  value on loess slope surface

## 4 结 论

1) 针对覆岩层状结构对地下采煤的“响应-传递”特点，研究发现了在相同或相近的采矿条件下采煤沉陷区地表生态损害结果的迥异主要取决于煤层上覆岩(土)层对地下采煤活动的应力应变响应与传递以及土壤损害特点。覆岩层状结构与采动应力传递共同导致煤层覆岩自下而上形成垂向强力链塑性变形区 (VCP)、水平强力链弹塑性变形区 (HCEP)、水平强力链弹性变形区 (HCE) 的采动损害特征。其中，煤层覆岩下部的互层结构及特征对塑性变形区界面高度具有重要影响。煤层上覆岩(土)层和地表土层(壤)均是地下采煤活动及其损害作用的响应载体。岩层层数、层厚、岩性、坚硬岩层与煤层的空间位置及地表变形等是影响土壤损害类型及特点的重要地质因素。

2) 在覆岩层状结构与采动应力传递耦合作用下,覆岩中厚砂岩与煤层的空间位置是采动覆岩“VCP-HCEP”界面与“HCEP-HCE”界面发育高度和地表形变程度的第一主控因素,决定了“两界面”的发育位置和地表变形的程度,相比较高位厚砂岩对“两界面”发育和地表形变具有较明显的抑制作用;砂层系数作为第二主控因素,在既定厚砂岩位置条件下与“两界面”发育和地表形变均呈正相关关系,但在砂层系数超过73%时逐渐减弱并最终消失。由此基于两大主控因素划分出陕北黄土沟壑煤炭开采区4个覆岩层状结构基本类型。

3) 从“地下覆岩层状结构基本类型+地表黄土沉陷坡面部位+地表形态变化程度+土壤质量特性指标”耦合的角度发现了“低位厚砂岩+砂层系数大于73%”类型对地表土壤质量的损害效应最为显著,其中沉陷坡面土壤物理、化学、微生物特性的损伤均集中在坡顶、坡中部位,土壤孔隙度平均增幅、有机质质量分数平均降幅在坡顶部位最大,依次为33.41%( $p < 0.05$ )、29.32%( $p < 0.05$ ),土壤含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效养分质量分数以及微生物数量、酶活性的平均降幅均在坡中最大,降幅介于11.81%~42.01%( $p < 0.05$ );裂缝发育是沉陷坡面土壤物理、化学、微生物特性损伤的主要原因。

4) “低位厚砂岩+砂层系数大于73%”类型对坡面土壤可蚀性K值的放大效应最为明显,平均增幅为26.38%( $p < 0.05$ ),其中坡顶土壤可蚀性K值平均增幅最大,为37.98%( $p < 0.05$ );沉陷坡面同一部位裂缝区土壤可蚀性K值平均增幅较非裂缝区高出92.28%( $p < 0.05$ );沉陷坡面可蚀性K值与土壤孔隙度呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),与土壤含水率、黏粒质量分数、有机质质量分数、速效养分质量分数、土壤微生物数量及酶活性呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ )。

## 参考文献(References):

- 王双明,申艳军,宋世杰,等.“双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J].煤炭学报,2023,48(7):2599~2612.  
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599~2612.
- 王双明,刘浪,朱梦博,等.“双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J].煤炭学报,2024,49(1):152~171.  
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 152~171.
- 匡立春,邹才能,黄维和,等.碳达峰碳中和愿景下中国能源需求预测与转型发展[J].石油科技论坛,2022,41(1):9~17.  
KUANG Lichun, ZOU Caineng, HUANG Weihe, et al. China’s energy demand projection and energy transition trends under carbon peak and carbon neutrality situation[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(1): 9~17.
- 中国能源中长期发展战略研究项目组.中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究.综合卷[M].北京:科学出版社,2011.
- 中华人民共和国中央人民政府.国家发展改革委等部门关于加强煤炭清洁高效利用的意见[EB/OL].(2024-09-11) [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content\\_6978315.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6978315.htm).
- 卞正富,朱超斌,周跃进,等.黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J].煤田地质与勘探,2022,50(12):51~64.  
BIAN Zhengfu, ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, et al. Evaluation on potential of using abandoned mines for pumped storage in nine provinces of Yellow River Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 51~64.
- 国家能源局西北监管局.2023年全国规模以上分省区原煤产量数据[EB/OL].(2024-01-31)[2024-11-20].[https://xbj.nea.gov.cn/dtyw/hyxz/202401/t20240131\\_235437.html](https://xbj.nea.gov.cn/dtyw/hyxz/202401/t20240131_235437.html).
- 田惠文,张欣欣,毕如田,等.煤炭开采导致的农田生态系统固碳损失评估[J].煤炭学报,2020,45(4):1499~1509.  
TIAN Huiwen, ZHANG Xinxin, BI Rutian, et al. An assessment of the carbon sequestration loss of farmland ecosystems caused by coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1499~1509.
- 宋世杰.基于关键地矿因子的开采沉陷分层传递预计理论与实践[M].北京:地质出版社,2019.
- 宋世杰,张家杰,杨帅,等.黄河上中游采煤沉陷区水土流失效应的探索与思考[J].绿色矿山,2024,2(2):169~182.  
SONG Shijie, ZHANG Jiajie, YANG Shuai, et al. Exploration and thinking on soil erosion effect of coal mining subsidence area in the upper and middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(2): 169~182.
- 中华人民共和国中央人民政府.习近平主持召开全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会强调:以进一步全面深化改革为动力开创黄河流域生态保护和高质量发展新局面[EB/OL].(2024-09-12)[204-11-20].[https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content\\_6974190.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6974190.htm).
- 崔希民,邓喀中.煤矿开采沉陷预计理论与方法研究评述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):160~169.  
CUI Ximin, DENG Kazhong. Research review of predicting theory and method for coal mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 160~169.
- 滕永海,王金庄.综采放顶煤地表沉陷规律及机理[J].煤炭学报,2008,33(3):264~267.  
TENG Yonghai, WANG Jinzhuang. The law and mechanism of ground subsidence induced by coal mining using fully-mechanized caving method[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 264~267.
- 郭文兵,白二虎,赵高博.高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J].煤炭学报,2020,45(2):509~523.  
GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHAO Gaobo. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 509~523.

- [15] 戴华阳, 阎跃观, 刘存玉, 等. 厚煤层协调全采沉陷控制技术及在村庄下采煤中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4352–4364.  
DAI Huayang, YAN Yueguan, LIU Cunyu, et al. Subsidence control by coordinated full-area mining of thick coal seam and its application in mining under villages[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4352–4364.
- [16] 徐良骥, 张坤, 刘潇鹏, 等. 离层注浆开采关键层变形特征及地表沉陷控制效应[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 931–942.  
XU Liangji, ZHANG Kun, LIU Xiaopeng, et al. Deformation characteristic of key strata and control effect of surface subsidence in mining with grouting into overburden bed-separation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 931–942.
- [17] 李怀展, 唐超, 郭广礼, 等. 热力耦合作用下煤炭地下气化地表沉陷预测方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 242–251.  
LI Huaizhan, TANG Chao, GUO Guangli, et al. Prediction method of surface subsidence due to underground coal gasification under thermal coupling[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 242–251.
- [18] 刘瑾, 孙占法, 张永波. 采深和松散层厚度对开采沉陷地表移动变形影响的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(4): 88–93.  
LIU Jin, SUN Zhanfa, ZHANG Yongbo. Numerical simulation of the effect of thickness mining and loose seam's thickness on ground movement and deformation in mining subsidence[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(4): 88–93.
- [19] 徐飞亚, 郭文兵, 王晨. 浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 11–20.  
XU Feiya, GUO Wenbing, WANG Chen. Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 11–20.
- [20] 夏玉成. 构造环境对煤矿区采动损害的控制机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2003.  
XIA Yucheng. Study on control mechanism of tectonic environment on mining damage in coal mining area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2003.
- [21] 陈绍杰, 刘瑞, 徐贞社, 等. 不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 38–48.  
CHEN Shaojie, LIU Rui, XU Zhenshe, et al. Surface subsidence laws of footwall coal seam mining of normal fault under different overburden strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 42(1): 38–48.
- [22] 孙学阳, 夏玉成, 白红梅. 褶皱构造对采煤沉陷控制作用的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 490–493.  
SUN Xueyang, XIA Yucheng, BAI Hongmei. Numerical simulation of control of fold structures on mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 490–493.
- [23] 于广明, 张春会, 赵建锋. 初始节理对岩体内部沉陷范围的影响研究与实验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1478–1482.  
YU Guangming, ZHANG Chunhui, ZHAO Jianfeng. Research and examination-validation of effect of original joints on subsidence range in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1478–1482.
- [24] 胡海峰. 不同土岩比复合介质地表沉陷规律及预测研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.  
HU Haifeng. Study on surface subsidence law and prediction of composite media with different soil-rock ratio[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [25] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
- [26] 汤伏全. 西部厚黄土层矿区开采沉陷预计模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 74–78.  
TANG Fuquan. Mining subsidence prediction model in western thick loess layer mining areas[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 74–78.
- [27] 芦家欣, 汤伏全, 赵军仪, 等. 黄土矿区开采沉陷与地表损害研究述评[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(5): 859–866.  
LU Jiaxin, TANG Fuquan, ZHAO Junyi, et al. Review of study on mining subsidence and ground surface damage in loess mining area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(5): 859–866.
- [28] 李春意, 马爱阳, 丁来中, 等. 厚黄土层下采动地表沉陷规律研究[J]. 金属矿山, 2019(10): 14–22.  
LI Chunyi, MA Aiyang, DING Laizhong, et al. Study on the mining subsidence evolution regularity under thick loess condition[J]. Metal Mine, 2019(10): 14–22.
- [29] 张志鹏, 余洋, 孙伟, 等. 黄土节理力学性质对地表开采沉陷的影响研究[J]. 金属矿山, 2017(8): 181–187.  
ZHANG Zhipeng, YU Yang, SUN Wei, et al. Research in mechanical parameters of the loess joints under the condition of mining subsidence[J]. Metal Mine, 2017(8): 181–187.
- [30] 宋世杰, 赵晓光, 王双明, 等. 覆岩内砂岩层数对开采沉陷的影响分析与数值模拟[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(5): 9–12, 16.  
SONG Shijie, ZHAO Xiaoguang, WANG Shuangming, et al. Analysis on influence of sandstone layer number in overburden strata upon mining subsidence and its numerical simulation[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2014, 41(5): 9–12, 16.
- [31] 宋世杰, 王双明, 赵晓光, 等. 基于覆岩层状结构特征的开采沉陷分层传递预计方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(B06): 87–95.  
SONG Shijie, WANG Shuangming, ZHAO Xiaoguang, et al. Stratification transfer method of the mining subsidence based on the characteristics of layered structure in coal overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(B06): 87–95.
- [32] 宋世杰, 赵晓光, 王双明, 等. 榆神矿区覆岩岩土比对开采沉陷的影响分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(5): 200–204.  
SONG Shijie, ZHAO Xiaoguang, WANG Shuangming, et al. Influence analysis of overburden rock-soil ratio on mining subsidence in Yushen coal mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(5): 200–204.
- [33] 王双明, 魏江波, 宋世杰, 等. 黄河流域陕北煤炭开采区厚砂岩对覆岩采动裂隙发育的影响及采煤保水建议[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 1–11.  
WANG Shuangming, WEI Jiangbo, SONG Shijie, et al. Influence of thick sandstone on development of overburden mining fissures in northern Shaanxi coal mining area of Yellow River Basin and suggestions on water-preserved coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 1–11.
- [34] SONG S J, ZHENG B B, SUN T, et al. Influence of different min-

- ing damage types on soil erodibility in coal mining areas of northern Shaanxi in the middle reaches of the Yellow River in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5434.
- [35] CHENG W, BIAN Z F, DONG J H, et al. Soil properties in reclaimed farmland by filling subsidence basin due to underground coal mining with mineral wastes in China[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2014, 24(8): 2627–2635.
- [36] 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 57–64.  
PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 57–64.
- [37] 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 Yuning, WANG Jinman, ZHANG Yafu, et al. Soil water in arid and semi-arid mining areas: A review[J]. *Soils*, 2023, 55(3): 494–502.
- [38] 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特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(5): 839–849.  
BI Yinli, LIU Jing, SHANG Jianxuan, et al. Study on the characteristics of soil moisture infiltration and evaporation in the coal mining subsidence area of coal mines in northern Shaanxi[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 839–849.
- [39] 王新静, 胡振琪, 胡青峰, 等. 风沙区超大工作面开采土地损伤的演变与自修复特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 2166–2172.  
WANG Xinjing, HU Zhenqi, HU Qingfeng, et al. Evolution and self-healing characteristic of land ecological environment due to super-large coalface mining in windy and sandy region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2166–2172.
- [40] 陈孝杨, 王芳, 王长奎, 等. 砂姜黑土区采煤塌陷坡耕地水蚀输沙过程研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 32–35.  
CHEN Xiaoyang, WANG Fang, WANG Changlei, et al. Soil erosion and sediment transport process of subsidence slope farmland for coal mining from Shajiang black soil areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 32–35.
- [41] 严家平, 陈孝杨, 王长奎, 等. 煤矿开采地表沉陷区土壤养分流失与分布特征: 以五沟煤矿为例[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(6): 41–45.  
YAN Jiaping, CHEN Xiaoyang, WANG Changlei, et al. Research on soil nutrient loss and distribution characteristics in coal mining subsidence area: A case of Wugou coal mine[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2017, 37(6): 41–45.
- [42] MA K, ZHANG Y X, RUAN M Y, et al. Land subsidence in a coal mining area reduced soil fertility and led to soil degradation in arid and semi-arid regions[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 3929.
- [43] CHEN Z C, LUO J L, JIAO Y H, et al. Soil characteristics and response mechanism of the microbial community in a coal–grain compound area with high groundwater levels[J]. *Agronomy*, 2024, 14(9): 1993.
- [44] 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 Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. 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.
- [45] 叶瑶, 全占军, 肖能文, 等. 采煤塌陷对地表植物群落特征的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(5): 736–744.  
YE Yao, QUAN Zhanjun, XIAO Nengwen, et al. Effects of land subsidence by mining on the plant community[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(5): 736–744.
- [46] 杜华栋, 宋世杰, 张勇, 等. 彬长矿区不同地表沉陷类型下植物群落特征[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1520–1527.  
DU Huadong, SONG Shijie, ZHANG Yong, et al. Characteristics of plant community in different types of coal mining subsidence in Bin-Chang mining area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1520–1527.
- [47] 牛鸿波, 田少国, 祖鹏举, 等. 神东矿区煤炭开采对植被净初级生产力的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(7): 267–277.  
NIU Hongbo, TIAN Shaoguo, ZU Pengju, et al. Effect of coal mining on net primary productivity of vegetation in Shendong Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(7): 267–277.
- [48] 陈怀满. *环境土壤学*[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [49] 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 煤炭开采地球关键带响应及减损开采技术体系[J/OL]. 中国地质: 1–22[2024–11–20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240709.0914.004>.  
WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Geological support for response and damage reduction in earth's critical zone under coal mining[J/OL]. *Geology in China*: 1–22[2024–11–20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240709.0914.004>.
- [50] 王家臣, 王兆会, 唐岳松, 等. 千米深井超长工作面顶板分区破断驱动机制与围岩区域化控制研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3615–3627.  
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, TANG Yuesong, et al. Regional failure mechanism of main roof and zonal method for ground control in kilometer-deep longwall panel with large face length[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3615–3627.
- [51] 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国煤层顶板水害研究现状与防控路径[J/OL]. *煤炭学报*. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0039>.  
ZENG Yifan, ZHU Huicong, WU Qiang, et al. Research status and prevention and control path of coal seam roof water disaster in China[J/OL]. *Journal of China Coal Society*. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0039>.
- [52] 张建国, 王满, 张东明, 等. 采动应力作用下煤与瓦斯突出过程中孔隙压力与温度变化规律研究[J/OL]. *煤炭学报*: 1–9[2024–11–20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1377>.  
ZHANG Jianguo, WANG Man, ZHANG Dongming, et al. Study on changes in pore pressure and temperature during coal and gas outburst stimulated by mining-induced stress[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1–9[2024–11–20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1377>.
- [53] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(9): 2081–2095.  
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situ-

- ation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [54] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894–1918.
- CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianqi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894–1918.
- [55] 左建平, 孙运江, 刘海雁, 等. 采矿岩石多尺度破坏力学[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(5): 509–523.
- ZUO Jianping, SUN Yunjiang, LIU Haiyan, et al. Multi-scale failure mechanics of rock in mining engineering[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(5): 509–523.
- [56] 谢晓深, 侯恩科, 王双明, 等. 黄河中游榆神府矿区采动含水层失水模式及保护技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 197–207.
- XIE Xiaoshen, HOU Enke, WANG Shuangming, et al. Syudy on water loss model and prediction technology of aquifer induced by coal mining in Yushenfu Mining Area in the middle reaches of the Yellow River[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 197–207.
- [57] 张志刚, 张庆华, 刘军. 我国煤与瓦斯突出及复合动力灾害预警系统研究进展及展望[J/OL]. 煤炭学报: 1–13[2024–11–20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1079>.
- ZHANG Zhigang, ZHANG Qinghua, LIU Jun. Research progress and prospects of coal and gas outburst and composite dynamic disaster warning systems in China[J]. Journal of China Coal Society: 1–13[2024–11–20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1079>.
- [58] 王双明, 孙强, 耿济世, 等. 西部矿区采动损害及减损开采的地质保障技术框架体系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 1–13.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, GENG Jishi, et al. Geological support technology framework system for mining induced hazards and damage reduction mining of geological conditions in western mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 1–13.
- [59] 吴群英, 冯泽伟, 胡振琪, 等. 生态脆弱矿区地表裂缝动态变化对土壤含水量的影响[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 148–155.
- WU Qunying, FENG Zewei, HU Zhenqi, et al. Influence of dynamic variation of ground cracks on soil water content in ecological-frangible coal mining areas[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 148–155.
- [60] 高琴, 党晓宏, 蒙仲举, 等. 风沙区采煤沉陷裂缝对不同坡位土壤养分的影响[J]. 金属矿山, 2023(9): 223–230.
- GAO Qin, DANG Xiaohong, MENG Zhongju, et al. Effect of coal mining subsidence cracks on soil nutrients at different slope positions in windy desert area[J]. Metal Mine, 2023(9): 223–230.
- [61] 宋世杰, 张玉玲, 王双明, 等. 陕北煤矿区采动地裂缝对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1630–1640.
- SONG Shijie, ZHANG Yuling, WANG Shuangming, et al. Influence of mining ground fissures on soil microorganism and enzyme activities in Northern Shaanxi coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1630–1640.
- [62] 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 Shijie, PENG Ruisi, ZUO Jing, 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.
- [63] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [64] 宋世杰, 冯泽煦, 孙涛, 等. 陕北采煤沉陷区黄土坡面形变与土壤侵蚀效应[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(2): 301–311.
- SONG Shijie, FENG Zexu, SUN Tao, et al. Loess slope deformation and soil erosion effect in coal mining subsidence area of northern Shaanxi[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(2): 301–311.
- [65] 赵国彦, 戴兵, 马驰. 平行黏结模型中细观参数对宏观特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1491–1498.
- ZHAO Guoyan, DAI Bing, MA Chi. Study of effects of microparameters on macroproperties for parallel bonded model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1491–1498.
- [66] 杨柳, 李飞, 王金安, 等. 综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2144–2154.
- YANG Liu, LI Fei, WANG Jin'an, et al. Structures and evolution characteristics of force chains in top coal and overlying strata under fully mechanized caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2144–2154.
- [67] 周勇, 李飞, 韩现刚. 综放开采覆岩破断与顶煤力链结构演化特性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 751–755.
- ZHOU Yong, LI Fei, HAN Xiangang. Analysis on evolution characteristics for overburden and chain of top-coal using fully mechanized top coal caving mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 751–755.
- [68] WEI J B, WANG S M, SONG S J, et al. Experiment and numerical simulation of overburden and surface damage law in shallow coal seam mining under the gully[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5): 207.
- [69] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380–385.
- XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380–385.
- [70] 宋世杰, 杜麟, 王双明, 等. 陕北采煤沉陷区不同沉陷年限黄土坡面土壤可蚀性的变化规律[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 289–299.
- SONG Shijie, DU Lin, WANG Shuangming, et al. Variation of soil erodibility on loess slope under various subsidence years in coal mining subsidence area located Northern Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 289–299.
- [71] 宋世杰, 王艺, 彭芮思, 等. 陕北不同地貌类型区采煤沉陷对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 110–124.
- SONG Shijie, WANG Yi, PENG Ruisi, et al. Effects of coal mining subsidence on soil microorganisms and enzyme activities in different landform types of northern Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 110–124.