

胡振琪,陈超. 风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响及修复[J]. 矿业科学学报,2016,1(2):120-130.

Hu Zhenqi, Chen Chao. Impact of underground coal mining on land ecology and its restoration in windy and sandy region[J]. Journal of Mining Science and Technology,2016,1(2):120-130.

## 风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响及修复

胡振琪,陈超

中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所,北京 100083

**摘要:**能源“金三角”地区已成为我国能源开发的主战场,该区域大都位于风沙区,煤炭开采对该区域生态影响直接关系到矿业和区域的可持续发展。本文基于多年的监测并结合前人研究成果,系统探讨了该区域煤炭开采对土地生态的影响和修复方法。研究表明:土地生态的监测方法是揭示煤炭开采对土地生态影响的关键,以井下开采信息为先导的多源信息采集与处理以及定位、动态和长期的监测方法更具有说服力;煤炭开采对风沙区土地生态具有一定影响,主要表现在地表形变、裂缝、土壤水分、土壤理化特性和植物生长的影响,这些影响除沉陷盆地边缘裂缝外,都能在较短时间内由于自修复和自然修复而逐渐消除;该区域的生态修复应采用分区修复模式,即均匀沉陷区的自然封闭修复和非均匀沉陷区的植物修复为主、工程修复为辅的人工诱导修复模式;同时要尽可能采用超大工作面 and 边沉陷边充填裂缝的边开采边修复模式,从源头减轻土地生态损伤和及时修复。

**关键词:**风沙区;煤炭开采;土地生态;生态修复;边采边复

**中图分类号:**TD 167

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-2193-(2016)10-120-11

## Impact of underground coal mining on land ecology and its restoration in windy and sandy region

Hu Zhenqi, Chen Chao

Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Beijing 100083

**Abstract:** The energy “Golden Triangle” region, most part of which locates in windy and sandy region, has been playing an important role in China’s energy development. Impact of underground coal mining on regional ecology is directly related to the sustainable development of the mining industry and local region. Based on long-term monitoring and previous research results, the impact of underground coal mining on land ecology and its restoration methods are studied systematically. The study indicates that: the monitoring method of land ecology plays a key role in revealing the impact of underground coal mining on land ecology. The method of multi-source information collection and processing dominated by underground mining information, and dynamic and long-term field monitoring are more effective. Coal mining produces certain impact on land ecology such as surface deformation, cracks, soil moisture, soil physical and chemical properties and vegetation growth in windy and sandy region. However, most of these factors are characterized by self-healing and natural restoration in a relative short period except margin cracks of subsidence basin. This region should adopt “partition” differentiated ecological resto-

收稿日期:2016-07-15

基金项目:国家自然科学基金委员会-神华集团有限责任公司煤炭联合基金重点支持项目(U1361203)

作者简介:胡振琪(1963—),男,安徽五河人,教授,博士生导师,从事土地复垦与生态重建方面的研究。TEL:010-62339045,  
E-mail: huzq@cumtb.edu.cn

ration model, which means that the uniform subsidence region conduct “natural closure” restoration, and the differential subsidence region conduct artificial-induced restoration model which gives priority to phytoremediation supplemented with appropriate engineering restoration. Meanwhile, it should adopt the concurrent mining and reclamation model which consists of super-large working face and concurrent subsidence and ground cracks filling, aiming to reach reduction of land ecological damage and restoration in time.

**Key words:** windy and sandy region; coal mining; land ecology; ecological restoration; concurrent mining and reclamation

土地和矿产资源都是人类赖以生存和发展的重要资源和资产<sup>[1-2]</sup>。煤炭资源开发在为国民经济发展发挥巨大作用的同时,也不可避免对土地生态造成剧烈的扰动和损伤<sup>[3]</sup>。我国晋、陕、蒙、宁、甘地区是能源资源富集区,该地区煤炭储量和产量均占我国的60%左右,被称为能源“金三角”。随着煤炭行业战略西移,能源“金三角”地区已成为我国能源开发的主战场<sup>[4]</sup>。神华神东矿区地处能源“金三角”核心,目前已成为世界唯一的2亿吨级现代化矿区,而矿区平均植被覆盖率较低,以干草原、落叶阔叶灌丛和沙生类型植被为主,干燥少雨,年降雨量约400 mm,而蒸发量却为降雨量的6倍左右,属典型干旱、半干旱的荒漠高原大陆性气候。矿区地表覆盖较厚风积沙层,主要为流动沙及半固定沙,其土壤质地为沙土或沙壤,土壤组成结构较粗,保水保肥能力差,荒漠化、沙漠化严重,导致生态环境脆弱,属典型的风沙区<sup>[5]</sup>。由于风沙区本身生态阈值较低,抗扰动能力差,煤炭基地集群化建设及高强度开采方式使得风沙区土地生态损伤的范围更广、速度更快、形式更多、时空差异更大,风沙区土地生态呈现出强烈扰动的态势<sup>[6-7]</sup>。而风沙区煤炭资源的赋存条件多为薄基岩、浅埋深、上覆厚风积沙层,开采对土地生态的影响剧烈、演变迅速,在采矿扰动和自然营力的共同作用下,风沙区土地生态损伤机理及时空演变规律具有独特性,直接影响西北矿区生态修复技术的选择及煤炭开采的可持续性<sup>[8]</sup>。因此,研究风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响机理与规律及其修复技术,就显得十分必要。

针对神东矿区煤炭开采对土地生态的影响,研究者往往有两种截然不同的认识:一种认为原有生态脆弱,煤炭开采将大大加剧土地生态的恶化;二是认为原有生态本身就差,煤炭开采对土地生态的影响较小,且由于人为的绿化,地表环境得到了改善。因此,如何正确认识该区域煤炭开采对土地生

态的影响就成为亟待解决的问题。为此,本论文基于多年的实际监测并结合已有研究成果,系统探讨风沙区井工开采对生态环境影响的监测方法、影响规律和修复技术,以便更好地促进矿区生态保护与修复。

## 1 矿区土地生态影响的监测方法

土地生态的监测是研究煤炭开采对土地生态影响的基础。监测方法的合理与否,直接影响监测的结果和对生态影响的认识。

许多对神东矿区的生态影响研究首先考虑到的就是遥感技术,利用不同时期的遥感图像进行解译,研究土地生态因子的变化,即可得出该区域的生态影响,进而分析煤炭开采的影响。如胡振琪等<sup>[9]</sup>利用榆林市神府煤矿1986年—2006年四景同期TM影像数据,反演出矿区植被覆盖度,定量说明了矿区20年间的植被覆盖率动态变化。吴立新等<sup>[10]</sup>利用SPOT-4/5卫星的NDVI数据,基于沙化土地分级演变检测和一元线性回归方法,对神东矿区1999年—2008年的土地沙化和植被覆盖情况进行分析。邓飞等<sup>[11]</sup>以乌兰木伦河流域为研究区,通过1986年、2002年和2008年同期TM数据计算出归一化植被指数,对研究区植被覆盖率进行估算。大多数研究表明矿区的植被得到良好的改善,植被覆盖率有明显的提高。然而,该类遥感研究未能与地下采矿过程结合,故监测的结果无法准确解释煤炭开采的影响。

针对煤炭开采对土壤和地表植被的影响,许多研究在沉陷区按照随机布点的原理进行采样分析。由于该区域沉陷变形及其影响的分区特征以及自然修复作用明显,未考虑分区特征和沉陷时间差异的随机采样,导致结果与实际的误差很大。也有许多研究采用“空间代替时间”的方法探讨开采在时间尺度上对土地生态的影响,由于该方法未考虑地形及土壤本身特性的空间差异(尤其是风沙区土

壤的空间变异性大)以及自然修复较快等特点,对监测结果及其结论的影响较大,很难准确反映开采对土地影响在不同时间的变化。如文献[12-14]因采取的监测方法差异,导致研究的结论不一致。因此,需要探讨适宜的监测新方法,以期真实揭示煤炭开采对土地生态的影响。

### 1.1 星-空-地-井“四位一体”的监测方法

为弥补已有研究技术的不足,研发了一种基于多数据源的矿区土地生态损伤信息获取方法<sup>[15]</sup>,

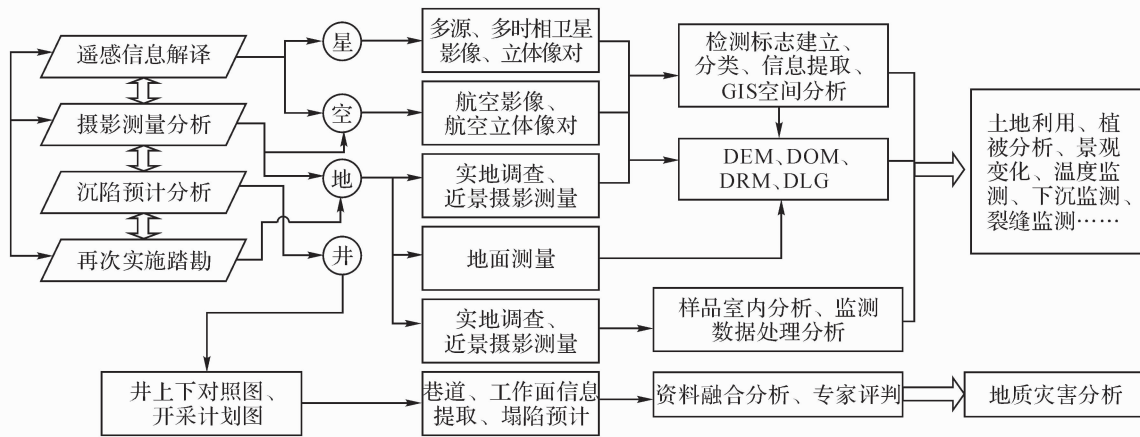


图1 “四位一体”的监测方法框架图

Fig. 1 The frame of the eco-environment monitoring method for mining areas

### 1.2 采煤沉陷地动态裂缝的监测方法与装置

建立地表移动变形观测站是监测地表移动变形的重要方法<sup>[16]</sup>,但沉陷地裂缝的动态监测则是国内研究<sup>[17-19]</sup>十分欠缺的。为此,提出一种井工开采工作面动态裂缝的监测方法<sup>[20]</sup>,研制采动地裂缝发生发育周期的监测装置<sup>[21-22]</sup>(图2)。通过井上井下相结合的空间坐标控制体系,布设裂缝监测基准线,建立工作面最前端裂缝位置与工作面位置之间的数学模型,通过该数学模型找到相应的最佳观测裂缝;在开采过程中对地裂缝进行原位全周期动态监测,突破了观测对象的辨别与选取、裂缝几何信息获取等技术难点。在神东补连塔矿区的实践中<sup>[4,23-24]</sup>,准确和完整地获取动态裂缝及其发育过程中的几何信息,并分析裂缝全生命周期中所经历的典型阶段特征和时间节点信息,为研究该区域煤炭开采对土地生态的影响机理及其自修复周期提供时间基准和技术支撑。

### 1.3 井工开采区地表环境损伤的监测方法与装置

考虑到研究区空间差异性因素的影响,基于分区、原位动态监测的思维,研发了一种井工开采区地表环境损伤的监测方法<sup>[25]</sup>(图3),即建立地表移动变形观测站研究地表移动变形特征及地表非

融合多源、多时相卫星、航空遥感影像的星-空-地-井“四位一体”的矿区土地生态损伤信息,旨在突出地下采矿信息的先导作用,以及遥感数据与非遥感数据、地上信息与地下信息的耦合,实现矿区土地生态损伤信息的快速提取和真实反映煤炭开采对土地生态的影响(图1)。根据上述方法,在神东大柳塔矿区的实践中,将遥感图像与地下采掘工程平面图叠加融合,基于开采情况分区提取遥感信息,进而解释开采的影响。

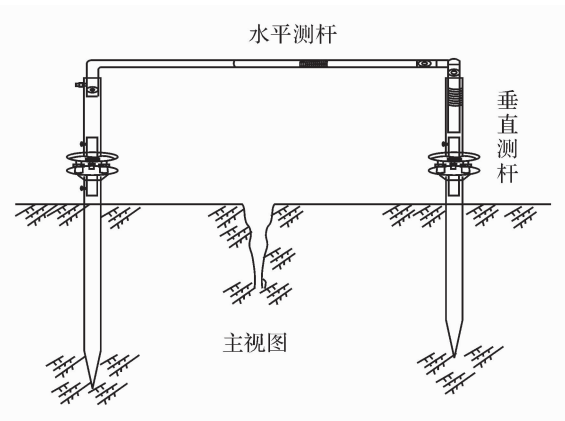


图2 一种采动地裂缝监测装置

Fig. 2 The monitoring and measuring device for dynamic surface crack due to underground coal mining

连续变形破坏;以地表移动变形观测站为基准的定位土壤观测点,研究不同区域、不同扰动程度下土壤含水量以及土壤理化性质的时空演变规律。

对土壤和水分监测点的布设,不仅要考虑沉陷损毁的最终分区特征(非均匀沉陷区、均匀沉陷区),而且要考虑某个单一裂缝周边的水分变化;不仅采用TDR进行实地监测表层30 cm以内的土壤水分变化,还布设定位监测铝管,用中子仪监测地表下2 m以内的土壤水分变化(图4)<sup>[26]</sup>。为保

证方法的科学性,还考虑时空差异与降雨对采煤地裂缝周围土壤水分损伤状况的影响<sup>[27]</sup>。为更加全面科学地掌握采动全过程中土地生态损伤情况,研制了一种深层原状土取土装置<sup>[28]</sup>,在大幅度降低对原状土壤扰动的情境下,实现浅层不同深度受采动影响的土壤样品的采集。

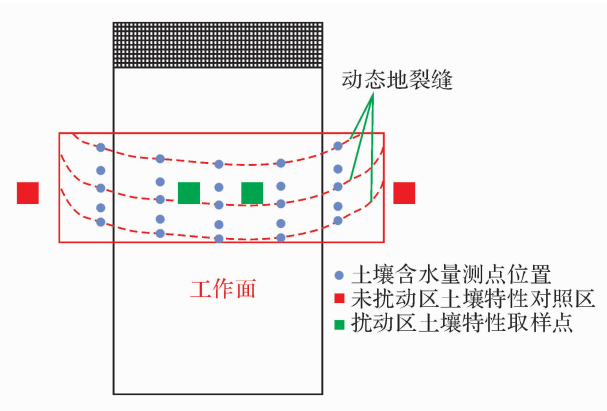


图3 地表环境损伤监测示意图

Fig. 3 Monitoring of ground environmental damages

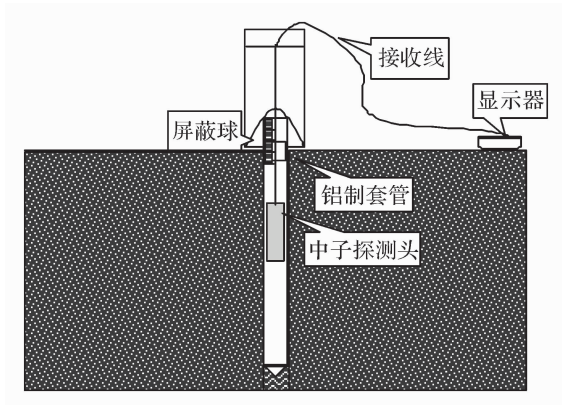


图4 中子仪实地监测示意图

Fig. 4 Field monitoring of soil moisture by neutron probe

## 2 风沙区煤炭开采对土地生态的影响

### 2.1 基于遥感的土地生态演变分析

基于星-空-地-井“四位一体”的监测方法,对大柳塔矿区1994年至2011年9景Landsat TM/ETM+影像数据反演植被覆盖率,根据工作面开采时间及人为修复时间来分区(图5)。

基于采矿时序从总矿区及分区两个尺度揭示植被时空动态演变特征,通过监测各分区采矿前、中、后及未受采矿扰动的自然条件下的植被覆盖率动态变化来揭示采矿对植被覆盖率的影响,并对植被演变的主要驱动力进行分析。研究发现,降水与植被覆盖率呈显著相关性,降雨是植被覆盖率变化的主要驱动力;而温度与矿区植被覆盖率的相关性不显著。这也说明,矿区植被覆盖率并未受采动影响

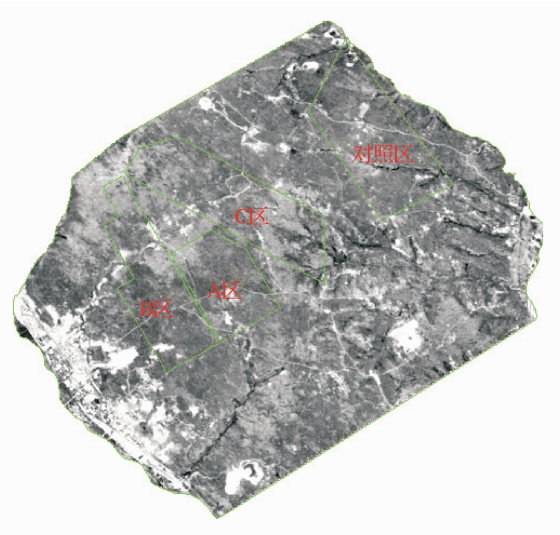


图5 研究区分区示意图

Fig. 5 The zoning diagram of the study area

而产生明显下降的主要原因:一是近十年降雨量较好;二是矿区农牧民的搬迁安置减少了人为扰动;三是自然修复的作用加强。

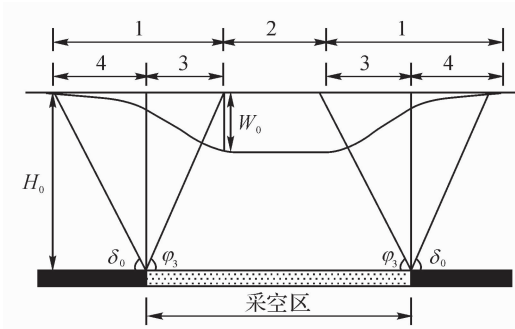
### 2.2 煤炭开采对土地形变的影响

煤炭开采造成的土地形变包括地表连续移动变形和非连续移动变形。风沙区地下水位一般大于3 m<sup>[29]</sup>,井下开采后地表一般出现无积水沉陷盆地,地表非连续移动变形主要表现为采煤沉陷地裂缝。在风沙区特殊采矿地质条件下,该区域地表移动变形特征呈现出一定的特殊性。下面以神东补连塔矿12406工作面地表移动实际观测为例揭示其变形规律<sup>[6,8]</sup>。该工作面倾向长300.5 m,走向长3592 m,所采1<sup>-2</sup>煤层平均厚度4.81 m,平均埋深约200 m,倾角1°~3°,煤层稳定,结构简单;采用一次采全高长壁式开采、自然垮落法管理顶板,平均采高4.5 m,平均推进速度约12 m/d;近地表上覆松散层厚度3~30 m,主要由易流动风积沙组成。工作面右侧为12405工作面采区,左侧为规划中的12407工作面未采区。由于该工作面倾向长度与走向长度均超过煤层平均埋深的1.4倍,故工作面达到充分采动<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.1 超大工作面开采条件下地表移动变形特征

在超大工作面开采条件下,地表移动变形呈现典型的盆地状,沉陷盆地剖面如图6所示<sup>[16]</sup>。工作面达到充分采动且其深厚比大于30,以走向下沉曲线(图7)为例,其形态在符合一般开采沉陷学规律的同时也呈现出一定的特殊性,这也与伊茂森<sup>[30]</sup>、杜善周<sup>[31]</sup>、陈俊杰<sup>[32]</sup>等的研究成果相符。

由实测数据知,最大下沉值 $W_0$ 为2459 mm,下沉系数为0.55,偏小,而边界角 $\delta_0$ 在45°左右,



$W_0$ —最大下沉值;  $H_0$ —平均采高;  $\delta_0$ —边界角;  $\varphi_3$ —充分采动角;  
1—移动变形区; 2—均匀沉陷区; 3—压缩变形区; 4—拉伸变形区

图6 沉陷盆地剖面图<sup>[16]</sup>

Fig. 6 The profile of the subsidence basin

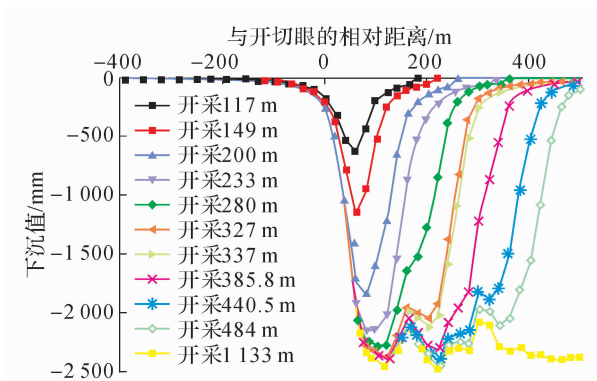


图7 走向下沉曲线

Fig. 7 The subsidence curve of longitudinal direction

表明沉陷盆地整体受到采动影响较小, 塌陷程度相比中东部矿区并未增大; 实测走向移动角为  $81.7^\circ$ , 表现为移动变形集中于开采边界附近。从图7也可看出, 盆地边缘较为陡峭, 盆地范围较小, 因而地表受影响范围相应减少; 走向充分采动角  $\varphi_3$  大于  $70^\circ$ , 均匀沉陷区面积较大, 根据赵艳玲等<sup>[33]</sup>的分类标准, 其比例超过 60%, 表明盆地中心区域大范围在采后可恢复至采前地形并实现自修复, 而盆地边缘的非均匀沉陷区则需重点修复, 表现出“分区”特征。

### 2.2.2 采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律

采煤沉陷地裂缝是风沙区最主要的损毁特征。研究发现<sup>[3,34]</sup>, 沉陷地裂缝主要分为边缘裂缝和具有自修复特征的动态裂缝。

由实测数据统计分析发现, 风沙区采煤沉陷地动态裂缝发生发育周期呈现“M”形双周期(图8), 包含两个“开裂闭合”的过程。根据裂缝宽度变化与开采沉陷规律的关系, 推导出动态裂缝发育周期计算模型为<sup>[8,35-36]</sup>

$$T = \frac{2H_0}{v} \left\{ \frac{1}{\tan \delta} + \frac{1}{\tan [68.14 - 0.013(H_0 - h)m/v]} \right\}$$

式中,  $T$  为动态裂缝发育周期,  $d; v$  为平均开采速度,  $m/d; h$  为表土层厚度,  $m; m$  为平均采高,  $m$ 。

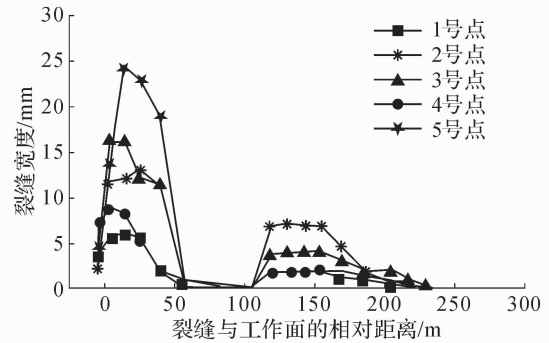


图8 动态地裂缝宽度变化趋势图

Fig. 8 Widths variation of dynamic subsidence cracks

对神东矿区, 平均开采速度  $v$  为  $12 \text{ m/d}$ , 动态裂缝的开闭周期为 18 d, 即动态裂缝一般情况下 18 d 左右会自动闭合, 呈现自修复<sup>[24]</sup>。

边缘裂缝以“带状”形式、“O”形圈的形态主要分布在工作面的开采边界(图9), 裂缝带宽一般为  $45 \sim 50 \text{ m}$ , 但受临近工作面采动影响时边缘裂缝发育带宽度明显减少, 减少约 40%。说明风积沙区高强度开采导致边缘裂缝带整体向工作面内部收缩, 临近老采区会减轻地裂缝的影响, 在大柳塔矿区的研究中也得到了类似观点<sup>[34]</sup>。

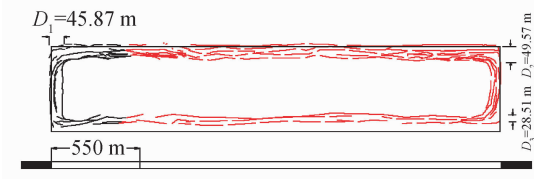


图9 边缘裂缝分布示意图

Fig. 9 Distribution of subsidence cracks along the panel marginal

### 2.3 煤炭开采对土壤特性的影响

土壤特性的变化是土壤对煤炭开采活动的内在响应。土壤含水量作为风沙区土地生态损伤的指标性因子<sup>[37]</sup>, 受采动影响较为明显。根据在补连塔煤矿 12406 工作面进行的实地监测结果, 裂缝对土壤环境影响程度与裂缝的距离成反比, 并具有自修复周期: 动态裂缝对土壤含水量影响范围  $50 \sim 75 \text{ cm}$ , 周期  $17 \sim 19 \text{ d}$ (图10); 边缘裂缝对土壤含水量影响范围  $100 \sim 125 \text{ cm}$ , 周期  $45 \sim 50 \text{ d}$ (图11); 沉陷对区域土壤含水量影响周期  $6 \sim 8$  个月(图12)<sup>[38-39]</sup>。

此外, 通过中子仪监测<sup>[26]</sup>, 初步探明了不同开采沉陷区域地表浅层  $200 \text{ cm}$  内土壤含水量垂直分布状况(图13)。根据不同区域土壤含水量均值及

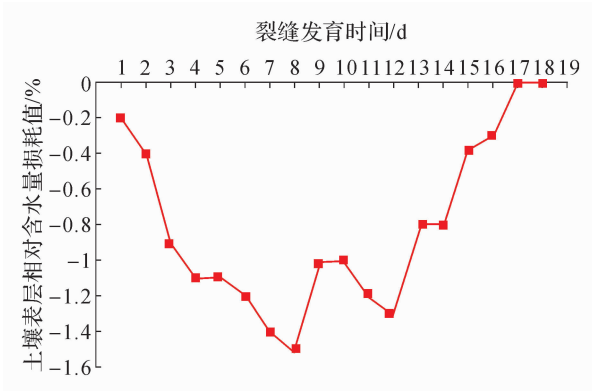


图 10 动态裂缝对土壤含水量的影响周期  
Fig. 10 The influence cycle of dynamic subsidence cracks on soil moisture

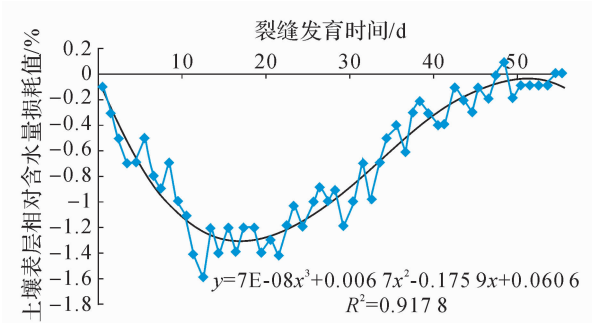


图 11 边缘裂缝对土壤含水量的影响周期  
Fig. 11 The influence cycle of margin subsidence cracks on soil moisture

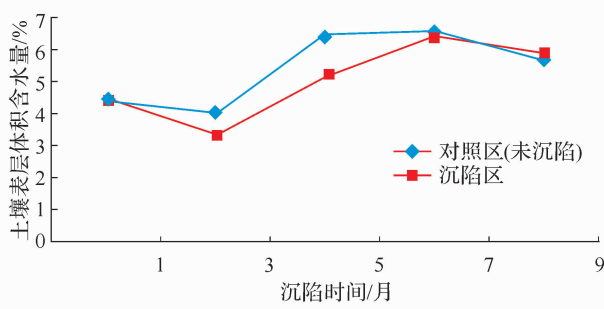


图 12 采煤沉降对土壤含水量的影响  
Fig. 12 Influence of mining subsidence on soil moisture

变异系数,可初步将 0 ~ 200 cm 土壤分为两层:土壤水分速变层(0 ~ 60 cm)和稳定层(60 cm 以下)。

土壤物理特性中,土壤容重及孔隙率均受到采煤沉降的影响<sup>[6,8]</sup>,而且非均匀沉陷区受影响程度大于均匀沉陷区。在沉陷稳定后,均匀沉陷区土壤物理性质基本可以恢复至采前状态,在一定意义上表现出“自修复”特征;而非均匀沉陷区,由于边缘裂缝的长期留存,仍然受到采动影响。这表明土壤物理特性对采动的响应存在“分区”特征。

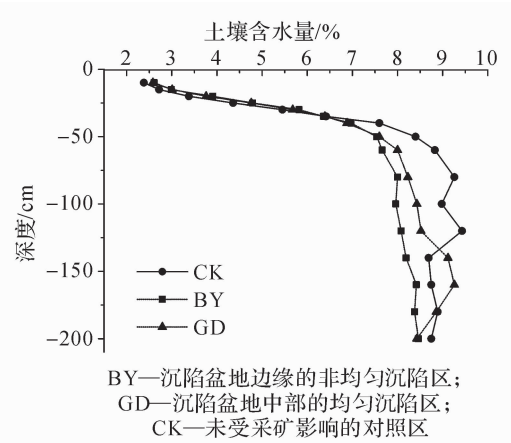


图 13 开采中不同区域土壤水分垂直变化特征  
Fig. 13 Vertical variation of soil moisture in different position of mining panels

对于土壤化学性质而言,土壤全氮、速效磷受到了采动影响,而 pH 值、速效钾以及有机质等因子未有明显变化。化学性质的变化也存在类似的“分区”特征,且在经过一个雨季,该现象更加明显。土壤化学性质相较于物理性质,存在一定的滞后性<sup>[40-41]</sup>。

### 2.4 煤炭开采对地表植被的影响

煤炭开采导致地表出现大量裂缝和台阶,引起土壤特性变化和植物根系拉伤,最终反映在地表植被的生长与发育<sup>[42]</sup>,具体表现在植被各项生长指标的波动<sup>[41]</sup>。杜涛等<sup>[43-45]</sup>分别选取青杨、油蒿、沙柳等风沙区典型植被,分析煤炭开采引起的地表裂缝对植被根际微生物及酶活性的影响。李少朋<sup>[46]</sup>基于补连塔矿区杨树、沙柳和沙蒿三种典型植物根系的损伤情况,认为煤炭开采对草本植物沙蒿生长影响时间较短,且沙蒿根系自修复能力大小为中沙蒿 > 小沙蒿 > 大沙蒿;而不同规格沙柳根系自修复能力呈现出与沙蒿类似的现象,即中沙柳 > 小沙柳 > 大沙柳;乔木杨树根系恢复能力相对较差,但随规格的不同,呈现出与沙蒿、沙柳有差异的现象,即小杨树 > 中杨树 > 大杨树。总体而言,三者根系恢复能力大小为沙蒿 > 沙柳 > 杨树,这也与李全生<sup>[23]</sup>、张建民<sup>[38]</sup>、魏婷婷<sup>[41]</sup>等人的研究结果相符。该结果进一步证明:开采对草灌影响较小、对乔木影响较大,同时植物本身具有自然修复的本能。

### 3 风沙区土地生态修复方法

基于定位、动态、长期的监测,风沙区煤炭开采对土地生态的影响呈现自修复规律,且自然修复的作用明显。因此,该区域生态修复应该以生态恢复为目标,充分利用自修复、自然修复的作用,以少扰

动、低投入、可持续的方式进行修复,避免好大喜功的大工程、高投入、甚至园林式的修复。建议重点考虑以下两方面的修复方法和策略。

### 3.1 分区修复方法

风沙区地表环境的主要影响特征是裂缝,且呈现典型的分区特征:非均匀沉陷区地表裂缝明显;均匀沉陷区动态裂缝基本闭合,但存在发生裂缝的痕迹和小台阶。基于这种“分区”特征,改变传统

的区域整体同质修复模式,提出开采沉陷区分区差异化生态环境快速修复模式(图14),即均匀沉陷区采取“植物引入”的自然封闭式修复模式以及非均匀沉陷区采取“边缘裂缝充填+水土保持+优选植物配种+根际环境改良”的植物修复为主、工程修复为辅的人工诱导修复模式<sup>[38,47]</sup>,该模式恢复的植被应选择耐旱、抗贫瘠的乡土植物种,同时应以草本、灌木为主。

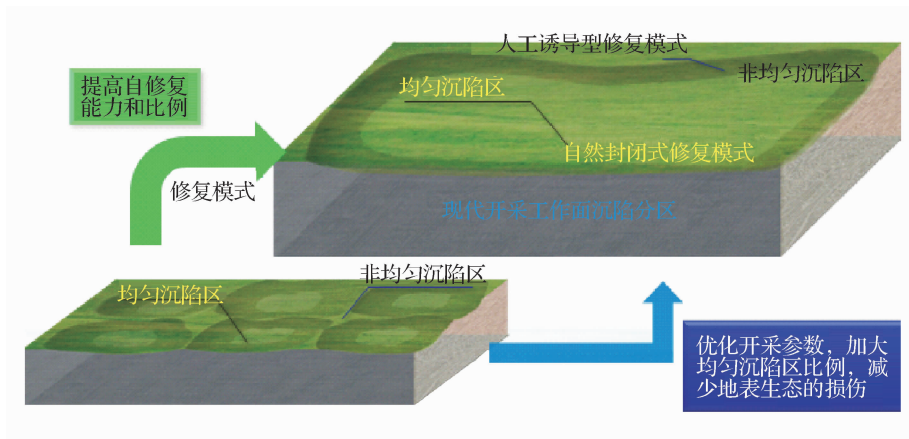


图14 分区差异化生态环境快速修复模式

Fig. 14 Differential rapid restoration model of each subsidence partition

### 3.2 边采边复方法

国外从立法时就明确要求采矿和修复同步(Spontaneous Reclamation)进行<sup>[48]</sup>,在实践中采用采矿和修复(复垦)一体化的工艺。边采边复是土地复垦的基本理念和发展趋势,作为矿山土地复垦的一种新技术,也是矿区土地复垦的必然要求<sup>[49-50]</sup>且已有较为成熟的应用案例<sup>[51-52]</sup>。该技术的实质是“井上下协同的采矿与修复的充分耦合”,对东部矿区可以达到保土、提高复垦率的目的。西部风沙区土地损伤与中东部高潜水位地区明显不同,其实质在于保护和恢复生态环境。基于该区域典型的沉陷分区特征和土地生态影响规律,提出以下边采边复方法:

(1) 尽可能扩大均匀沉陷区,以减轻开采影响。因此,通过开采设计优化,尽可能加大工作面,就理所当然地成为首选。以 $400\text{ m} \times 2\,000\text{ m}$ 的开采区域为例,传统工作面需布置3个 $120\text{ m} \times 2\,000\text{ m}$ 的工作面,而超大工作面仅需布置1个工作面进行开采。模拟计算表明:①传统工作面对开采区域扰动次数为3次,超大工作面仅为1次,扰动次数减少 $2/3$ ;②经沉陷预计,超大工作面非均匀沉陷区面积(地面水平拉伸变形值 $\varepsilon \geq 4\text{ mm/m}$ 的区域,即严重损毁区域)减少45%,均匀沉陷面积增加

40%以上,从而实现源头减损<sup>[53-54]</sup>。

(2) 沉陷裂缝边出现、边填充,及时封堵,保障土壤生态条件,以减轻生态影响并加快生态恢复。裂缝治理主要针对沉陷边缘裂缝,采用周围土壤充填、压实和平整的方法。也有人建议用高水材料充填<sup>[55]</sup>。高水材料一般用于井下采空区或其他岩石区域的充填,其特点是强度高<sup>[56]</sup>,类似于石材。但对地表土壤的沉陷裂缝,特别是神东矿区上部第四纪较厚风积沙层裂缝的治理,由于高水材料硬度大、与周围土壤不易结合且对植物生长不利,应用该方法于生态修复中值得商榷。因此,建议尽量采用周围土源或土壤的替代材料作为充填物,以有利于植物生长和生态恢复。

## 4 结论

(1) 正确认识风沙区煤炭开采对土地生态影响的关键是科学的监测方法。未与地下开采结合的遥感分析、“空间代替时间”等方法对该区域开采影响研究可能会导致研究结果的偏差,应慎重采用和给出结论。以井下开采信息为先导的多源信息采集和处理以及定位、动态和长期的监测方法,具有较强的说服力,可加强实践应用。

(2) 煤炭开采对风沙区土地生态具有一定影

响,主要表现在地表形变、裂缝、土壤水分、土壤理化特性和植物生长的影响。这些影响都在较短时间内由于自修复和自然修复而逐渐消除,如动态裂缝的自修复周期为18 d,土壤特性和植物一般在两年内逐渐修复,但沉陷盆地边缘裂缝往往留存更长时间,是生态修复的重点。

(3) 风沙区生态修复应采用分区修复模式,即均匀沉陷区的自然封闭修复和非均匀沉陷区的植物修复为主、工程修复为辅的人工诱导修复模式。同时,应尽可能采用超大工作面和边沉陷区充填裂缝的边开采边修复模式,从源头减轻土地生态损伤并及时修复。此外,裂缝的充填材料应以有利于生态修复为原则,尽量采用当地土壤或土壤替代材料。

## 参考文献

- [1] 胡振琪. 中国土地复垦与生态重建 20 年:回顾与展望[J]. 科技导报,2009,27(17):25-29.  
Hu Zhenqi. Review and prospect of land reclamation and ecological restoration in China[J]. Science & Technology Review, 2009,27(17):25-29.
- [2] Hu Zhenqi, Zhao Yanling, Gao Yongguang. Impact of coal resource development on eco-environment and its restoration in west of China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(S1):176-179.
- [3] 胡振琪,龙精华,王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1751-1757.  
Hu Zhenqi, Long Jinghua, Wang Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1751-1758.
- [4] 顾大钊. 能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J]. 中国工程科学,2013,15(4):102-107.  
Gu Dazhao. Water resource and surface ecology protection technology of modern coal mining in China's energy "Golden Triangle"[J]. Engineering Sciences,2013,15(4):102-107.
- [5] 顾大钊. “能源金三角”地区煤炭开采水资源保护与利用工程技术[J]. 煤炭工程,2014,46(10):34-37.  
Gu Dazhao. Water resource protection and utilization engineering technology of coal mining in "Energy Golden Triangle" region[J]. Coal Engineering, 2014, 46(10):34-37.
- [6] 王新静. 风沙区高强度开采土地损伤的监测及演变与自修复特征[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [7] 魏婷婷,胡振琪,曹远博,等. 风沙区煤炭开采对土壤物理性质和结皮的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(2):106-110.  
Wei Tingting, Hu Zhenqi, Cao Yuanbo, et al. Effect of coal mining on soil physical properties and soil crust in windy desert area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(2):106-110.
- [8] 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.
- [9] 胡振琪,陈涛. 基于 ERDAS 的矿区植被覆盖度遥感信息提取研究——以陕西省榆林市神府煤矿区为例[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):164-167.  
Hu Zhenqi, Chen Tao. ERDAS aided extraction of vegetation fraction from remote sensing information in coalmine area based: a case study of Shenfu coalmine[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008,23(2):164-167.
- [10] 吴立新,马保东,刘善军. 基于 SPOT 卫星 NDVI 数据的神东矿区植被覆盖动态演变分析[J]. 煤炭学报,2009,34(9):1217-1222.  
Wu Lixin, Ma Baodong, Liu Shanjun. Analysis to vegetation coverage change in Shendong mining area with SPOT NDVI data[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(9):1217-1222.
- [11] 邓飞,全占军,于云江. 20 年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J]. 水土保持研究,2011,18(3):137-152.  
Deng Fei, Quan Zhanjun, Yu Yunjiang. Study on the vegetation coverage change and Its impact factors in Wulanmulun river basin during the recent 20 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3):137-152.
- [12] Bi Yinli, Zhang Yanxu. Role of the different planting age of seabuckthorn forests to soil amelioration in coal mining subsidence land[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2014,1(2):192-197.
- [13] 赵红梅. 采矿塌陷条件下包气带土壤水分分布与动态变化特征研究[D]. 北京:中国地质科学院,2006.
- [14] 张建民,杨峰,李能考,等. 超大综采工作面开采地表层含水性自修复研究[J]. 煤田地质与勘探,2013,41(6):38-42.  
Zhang Jianmin, Yang Feng, Li Nengkao, et al. Aqueous self-healing of surface layer in mining area of super-large mechanized face[J]. Coal Geology & Explo-



- ration, 2013,41(6):38-42.
- [15] 胡振琪,王霖琳,许献磊. 基于多数据源的矿区土地生态损伤信息获取方法:中国,201210553888. 2 [P]. 2014-07-23.
- [16] 何国清,杨伦,凌赓娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [17] 李晓,路世豹,廖秋林,等. 充填法开采引起的地裂缝分布特征与现场监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(7):1361-1369.  
Li Xiao, Lu Shibao, Liao Qiulin, et al. Distribution characteristics and field monitoring of ground fissures caused by backfill mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (7): 1361-1369.
- [18] 赵超英,张勤,丁晓利,等. 利用 InSAR 技术定位西安活动地裂缝[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2009,34(7):809-814.  
Zhao Chaoying, Zhang Qin, Ding Xiaoli, et al. Positioning of Xi'an active ground fissures with SAR interferometry [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(7):809-814.
- [19] 李亮,吴侃,陈冉丽,等. 小波分析在开采沉陷区地表裂缝信息提取的应用[J]. 测绘科学,2010, 35(1):165-168.  
Li Liang, Wu Kan, Chen Ranli, et al. Information extraction of surface crack position in mining subsidence area based on wavelet transform[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010,35(1):165-168.
- [20] 顾大钊,胡振琪,王新静,等. 一种井工开采工作面动态裂缝的监测方法:中国,201210134981. X [P]. 2013-06-19.
- [21] 胡振琪,曹志国. 一种采动裂缝监测装置:中国, 201220196161. 9 [P]. 2012-11-28.
- [22] 胡振琪,杨俊哲,贺安民,等. 一种采动地裂缝监测装置:中国,201420594768. 1 [P]. 2015-03-04.
- [23] 李全生,贺安民,曹志国. 神东矿区现代煤炭开采技术下地表生态自修复研究[J]. 煤炭工程,2012,44(12):120-122.  
Li Quansheng, He Anmin, Cao Zhiguo. Study on surface ecology self-healing under modern coal mining technology in Shendong mining area [J]. Coal Engineering, 2012,44(12):120-122.
- [24] 王新静,胡振琪,杨耀淇,等. 采动动态地裂缝发育特征监测装置的设计与应用[J]. 煤炭工程,2014, 46(3):131-133.  
Wang Xinjing, Hu Zhenqi, Yang Yaoqi, et al. Application and design on monitoring and measuring device of mining dynamic cracking development features of surface ground[J]. Coal Engineering, 2014,46(3): 131-133.
- [25] 胡振琪,李全生,彭猛,等. 一种井工开采区地表环境损伤的监测方法:中国,201210134992. 8 [P]. 2015-06-24.
- [26] 台晓丽,胡振琪,陈超. 西部风沙区不同采煤沉陷区位土壤水分中子仪监测[J]. 农业工程学报, 2016,32(15):225-231.  
Tai Xiaoli, Hu Zhenqi, Chen Chao. Monitoring soil moisture at different subsidence areas of mining in western windy and sandy region with neutron instrument [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,35(15):225-231.
- [27] 胡振琪,彭猛,王新静,等. 考虑时空差异与降雨影响的采煤地裂缝水分损伤监测方法:中国, 201210591849. 1 [P]. 2015-06-24.
- [28] 胡振琪,林杉,李星宇. 一种深层原状土取土器:中国,201420287314. X [P]. 2014-10-01.
- [29] 顾大钊,张建民,王振荣,等. 神东矿区地下水变化观测与分析研究[J]. 煤田地质与勘探,2013,41(4):35-39.  
Gu Dazhao, Zhang Jianmin, Wang Zhenrong, et al. Observations and analysis of groundwater change in Shendong mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2013,41(4):35-39.
- [30] 伊茂森. 神东矿区浅埋煤层关键层理论及其应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.
- [31] 杜善周. 神东矿区大规模开采的地表移动及环境修复技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [32] 陈俊杰,南华,闫伟涛,等. 浅埋深高强度开采地表动态移动变形特征[J]. 煤炭科学技术,2016,44(3):158-162.  
Chen Junjie, Nan Hua, Yan Weitao, et al. Features of surface dynamic movement and deformation caused by high intensity mining with shallow depth[J]. Coal Science and Technology, 2016,44(3):158-162.
- [33] 赵艳玲,黄琴焕,薛静,等. 矿区土地复垦方案编制中土地破坏程度评价研究[J]. 金属矿山,2009, 38(5):161-163,167.  
Zhao Yanling, Huang Qinhuang, Xue Jing et al. Study on the assessment of land destroy degree in mine land reclamation design [J]. Metal Mine, 2009, 38(5): 161-163,167
- [34] 陈超,赵艳玲,何厅厅,等. 风沙区采煤沉陷地裂缝对土地的小尺度破坏特征[J]. 煤炭工程,2016, 48(1):130-132.  
Chen Chao, Zhao Yanling, He Tingting, et al. Small-scale land destruction features caused by coal mining subsidence ground cracks in windy desert area [J].

- Coal Engineering, 2016,48(1):130-132.
- [35] 胡振琪,王新静,贺安民. 风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J]. 煤炭学报,2014,39(1):11-18.  
Hu Zhenqi, Wang Xinjing, He Anmin. Distribution characteristic and development rules of ground fissures due to coal mining in windy and sandy region [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(1):11-18.
- [36] 张俊英,贾新果,李杰,等. 万利矿区浅部煤层快速推进条件下开采地表移动沉陷规律研究[R]. 北京:煤炭科学研究总院,2012.
- [37] Doudill A J, Heathwaite A L, Thomas D S G. Soil water movement and nutrient cycling in semi-arid rangeland: Vegetation change and system resilience [J]. Hydrological Processes, 1998,12(3):443-459.
- [38] 张建民,李全生,胡振琪,等. 西部风积沙区超大综采工作面开采生态修复研究[J]. 煤炭科学技术, 2013,41(9):173-177.  
Zhang Jianmin, Li Quansheng, Hu Zhenqi, et al. Study on ecological restoration mode of ultra wide fully-mechanized coal mining in west china aeolian sand area [J]. Coal Science and Technology, 2013,41(9):173-177.
- [39] 台晓丽,胡振琪,陈超. 风沙区采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量的影响[J]. 中国煤炭,2016,42(08):113-117.  
Tai Xiaoli, Hu Zhenqi, Chen Chao. Effect of mining subsidence fissure on moisture of surface soil in aeolian sand area [J]. China Coal, 2016,42(08):113-117.
- [40] 王新静,杨耀淇,高杨. 风沙区采煤沉陷土壤质量演变时效评价[J]. 煤炭工程,2013,45(1):89-92.  
Wang Xinjing, Yang Yaoqi, Gao Yang. Evaluation on evolution time effect of soil quality in mining subsidence ground of windy desert area [J]. Coal Engineering, 2013,45(1):89-92.
- [41] 魏婷婷,胡振琪,曹远博,等. 风沙区超大工作面开采对土壤及植物特性的影响[J]. 四川农业大学学报,2014,32(4):376-381.  
Wei Tingting, Hu Zhenqi, Cao Yuanbo, et al. Impacts of large coal mining on soil and plant characteristics in sandy area [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2014,32(4):376-381.
- [42] 陈超,梁宇生,杨坤,等. 风沙区煤炭开采对生态环境的损害及防治策略[J]. 煤炭技术,2016,35(5):10-12.  
Chen Chao, Liang Yusheng, Yang Kun, et al. Impact on ecological environment due to coal mining and control strategy in aeolian sand area [J]. Coal Technology, 2016,35(5):10-12.
- [43] 杜涛,毕银丽,张姣,等. 地表裂缝对青杨根际环境的影响[J]. 科技导报,2013,31(2):45-49.  
Du Tao, Bi Yinli, Zhang Jiao, et al. Effects of cracks on the rhizospheric environment of *Populus Cathayana* [J]. Science & Technology Review, 2013,31(2):45-49.
- [44] 杜涛,毕银丽. 地表裂缝对油蒿根际生物活性的影响及其动态演变特征[J]. 科技导报,2013,31(18):39-43.  
Du Tao, Bi Yinli. Effects of surface cracks on microorganisms quantity and enzyme activities in the rhizosphere of *Artemisia Ordosica* and its dynamic evolution characteristics [J]. Science & Technology Review, 2013,31(18):39-43.
- [45] 杜涛,毕银丽,邹慧,等. 地表裂缝对沙柳根际微生物和酶活性的影响[J]. 煤炭学报,2013,38(12):2221-2226.  
Du Tao, Bi Yinli, Zou Hui, et al. Effects of surface cracks caused by coal mining on microorganisms and enzyme activities in rhizosphere of *Salix Psammophila* [J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(12):2221-2226.
- [46] 李少朋. 煤炭开采对地表植物生长影响及菌根修复生态效应[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [47] 陈超,胡振琪,台晓丽,等. 风积沙区土地生态损伤自修复能力评价[J]. 中国煤炭,2015,41(10):124-128.  
Chen Chao, Hu Zhenqi, Tai Xiaoli, et al. Evaluation on self-healing capability of land ecological damage in Aeolian sand area [J]. China Coal, 2015,41(10):124-128.
- [48] Hemenway, David S. Surface mining [M]. Baltimore, Maryland:Port City Press,1990:1056-1058.
- [49] 胡振琪,肖武,王培俊,等. 试论井工煤矿边开采边复垦技术[J]. 煤炭学报,2013,38(2):301-307.  
Hu Zhenqi, Xiao Wu, Wang Peijun, et al. Concurrent mining and reclamation for underground coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(2):301-307.
- [50] 胡振琪,肖武. 矿山土地复垦的新理念与新技术——边采边复[J]. 煤炭科学技术,2013,41(9):178-181.  
Hu Zhenqi, Xiao Wu. New idea and new technology of mine land reclamation; concurrent mining and reclamation [J]. Coal Science and Technology, 2013,41(9):178-181.

- [51] Hu Zhenqi, Xiao Wu. Optimization of concurrent mining and reclamation plans for single coal seam: a case study in northern Anhui, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 68(5):1247-1254.
- [52] Xiao Wu, Hu Zhenqi, Chugh Y P, et al. Dynamic subsidence simulation and topsoil removal strategy in high groundwater table and underground coal mining area: a case study in Shandong Province [J]. International Journal of Mining Reclamation & Environment, 2014, 28(4):250-263.
- [53] 顾大钊,曹志国,杨俊哲,等. 一种基于生态环境保护的井工采煤方法:中国,201210134055.2 [P]. 2015-09-16.
- [54] 肖武,胡振琪. 一种延长地表土地使用时间的地下工作面采序优化方法:中国,201310139022.1 [P]. 2015-01-28.
- [55] 刘辉,雷少刚,邓喀中,等. 超高水材料地裂缝充填治理技术 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(1):72-77. Liu Hui, Lei Shaogang, Deng Kazhong, et al. Research on ground fissure treatment filling with super-high-water material [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1):72-77.
- [56] 冯光明,孙春东,王成真,等. 超高水材料采空区充填方法研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(12):1963-1968. Feng Guangming, Sun Chundong, Wang Chengzhen, et al. Research on goaf filling methods with super high-water material [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12):1963-1968.

(责任编辑:陈贵仁)