# 采煤沉陷地微地形改造及其应用研究进展

李斯佳[1] 王金满[1,2*] 万德鹏[1] 白中科[1,2]

([1]中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; [2]国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

**摘 要** 井工采煤导致地表沉陷进而引发水土流失,微地形改造对沉陷地水土流失控制效果明显,但理论研究尚有欠缺,特别是对水土流失的控制机理不明确。为了进一步探索微地形改造的基础理论,研究微地形改造对采煤沉陷地水土流失与植被恢复的影响机理,本文在系统总结国内外相关研究的基础上,综述了采煤沉陷区微地形变化特征及水土流失规律、微地形改造方法、沉陷土地微地形改造应用及其生态环境效应的研究进展。总结发现:(1)采煤沉陷在沉陷区地表带来新的微地形变化;(2)微地形改造方法对土壤水肥特性、土壤侵蚀和植被恢复均有影响,但许多作用机理依然不明确;(3)微地形整地措施在采煤沉陷地有较好的水土保持与植被恢复效果,但许多研究方向不够深入,需进一步加强。针对当前研究的不足,提出了今后采煤沉陷地复垦微地形改造的研究方向,包括研发采煤塌陷地微地形及其改造的信息获取方法、探讨采煤沉陷地微地形的水文过程、加强采煤沉陷地微地形改造的效应机理分析、研究采煤沉陷地微地形设计与改造方法和技术体系等。

**关键词** 微地形; 土壤; 采煤沉陷地; 水土流失; 土地复垦

**Micro-landform modification and its application in coal-mining subsidence area: A review.**

LI Si-jia[1], WANG Jin-man[1,2*], WAN De-peng[1], BAI Zhong-ke[1,2] ([1] *College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; [2] *Key Laboratory of Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing* 100035, *China*).

**Abstract**: Underground coal-mining leads to severe surface subsidence and thus accelerates soil erosion in the subsidence area. The effects of micro-landform modification on the control of soil and water losses have been observed. However, the theoretical studies of micro-landform modification are still insufficient, and the underlying mechanisms on the control of soil and water losses are unclear. To explore the basic theory of micro-topography modification and analyze its effect mechanisms on soil erosion and vegetation restoration in coal-mining subsidence area, we reviewed the research progresses on micro-landform modification and its application in coal-mining subsidence area. There are three main contents, including the micro-landform features and the law of soil and water loss in coal-mining subsidence area, the measures of micro-landform modification, and the application of micro-landform modification and its effects on ecological environment. The results showed that: (1) the underground coal-mining can result in new micro-landform changes. (2) The measures of micro-landform modification affect soil moisture, soil fertility, soil erosion, and vegetation restoration, with many of the underlying mechanisms being unclear; (3) The micro-landform modification has positive effects on soil and water conservation and vegetation restoration in coal-mining subsidence area, but related research is not profound enough and needs to be further strengthened. Considering the deficiencies of the current theoretical research and practical application, we put forward future researches on the micro-landform modification in coal-mining subsidence lands, including developing information acquisition methods for micro-landform and its transformation in coal mining subsidence area, exploring the hydrological processes of micro-landform, deepening the underlying mechanism analysis of the

国家重点研发计划课题(2017YFF0206802)资助。
收稿日期: 2017-12-21 接受日期: 2018-03-26
*通讯作者 E-mail: wangjinman@cugb.edu.cn

micro-landform modification in coal mining subsidence area, and developing the designing modes and technical system of micro-landform.

**Key words**: micro-landform; soil; coal-mining subsidence land; soil and water loss; land rehabilitation.

我国是世界上煤炭生产量最大的国家,截止到2014年,我国煤炭产量高达38.7亿吨(张增奇等,2015)。由于我国煤炭资源普遍埋藏较深,适合井工开采的煤矿资源约占96.4%,因而形成了当前以井工开采为主露天开采为辅的作业模式(黄翌等,2014)。井工开采造成了严重的生态环境问题。据统计显示,中国井工开采每万吨煤沉陷约0.2~0.33 $hm^2$土地,目前全国开采煤矿已造成400万$hm^2$的土地沉陷,并且采煤沉陷范围以每年330~470 $km^2$的速度递增(高光耀等,2013)。沉陷不仅改变了原有的地貌,引起建筑物的形变,降低了土壤质量,其带来的水土流失问题更引起政府及学者的高度关注。水土流失不仅削弱了土壤肥力,影响植被生长,对生态环境造成严重破坏,更降低了耕地的数量和质量,甚至影响粮食安全,这对于中国人多地少的土地利用现状构成了严重的威胁。因此,研发更高效的沉陷地土地复垦措施,遏制土壤侵蚀现状并有效解决由此带来的土壤质量问题,是当前矿区土地复垦研究中一项十分紧迫的科学命题。

为了有效治理采煤沉陷地水土流失等生态环境问题,专家学者对沉陷地复垦方法进行了理论研究和实践应用(张耀方等,2011;王神虎等,2012),其中包括各种下垫面改造和整地措施,在采煤沉陷区人工塑造了形态各异的微地貌景观,并起到了较好的水土保持效果。然而,尽管微地形改造方法在矿区有较为明显的水土流失防治效应,但是目前的微地形设计主要与土地复垦措施相关,缺乏更为系统的改造设计,同时由于相关的量化、监测等技术还不十分完善,致使当前研究中微地形措施对土壤侵蚀与植被恢复的作用机理依然不十分明确、理论研究依旧较为落后。目前我国采煤矿区生态问题十分严峻,有较大比例的损毁土地等待复垦。因此,采煤沉陷区微地形改造的深入研究对于矿区环境问题治理和生态恢复具有重要意义。

为此,本文从采煤沉陷区微地形变化特征及其水土流失研究、微地形改造方法、沉陷土地微地形改造应用及其生态效应研究3个方面进行系统总结,归纳当前研究经验和不足并指出今后需要加强的研究方向,以期为采煤沉陷地复垦与生态恢复提供一定的理论依据和技术支撑。

## 1 采煤沉陷区微地形变化特征及其影响

### 1.1 沉陷区微地形变化特征

井工开采使煤层覆岩应力平衡状态逐渐被打破,在采区的上方会形成大面积的沉陷区(臧荫桐等,2010),沉陷会改变其原有的地表形态和自然过程。沉陷区微地形变化主要体现在地表移动盆地、地裂缝和沉陷坑等方面。

煤矿井工开采过程中,由于采空区的不断扩大,地表沉陷区的面积也随之不断扩大,并逐步发展为地表移动盆地。地表移动盆地的出现,使采煤沉陷区地表微地形发生变化,包括高程、坡度等(陈孝杨等,2015;张子月等,2016)。当前沉陷地表移动盆地有关研究中,以地表移动盆地的沉降机理和预测等方面的研究较多,而对于地表微地形定量化的深入研究较少。同时,沉陷盆地微地形的空间分布研究、微地形变化和土壤理化性质以及植被恢复的交互影响研究是今后需要加强的研究方向,这将为沉陷移动盆地复垦与植被恢复提供较强的理论和实践支撑。

地裂缝是采煤沉陷在地表导致的另一种微地形变化现象(许传阳等,2015),是采煤沉陷区常见的地表破坏形式之一。采煤沉陷会在地表形成宽度不等的裂缝,从形态上裂缝可划分为拉伸型、沉陷型及滑动型3类,3种裂缝类型的宽度、深度、台阶数量各不相同(刘辉等,2013)。当前研究对地裂缝形成机理(胡振琪等,2014)、分布发育规律(范立民等,2015)、生态环境影响(魏婷婷等,2014;张延旭等,2015)较为全面,微地形尺度的地裂缝发展规律已有初探,但由于起步较晚及技术限制,目前该方面的研究成果不多。更有效的地裂缝微地形量化监测技术,微地形尺度上不同时间、区位的地裂缝发育规律和环境影响研究是目前亟需研究的内容,这对于采煤沉陷区土地复垦时机选择及复垦效应具有重大现实意义。

沉陷坑、塌方等是采煤沉陷发生后沉陷区微地

形变化的另一种直观表现形式。白中科等(2006)、贾俊姝等(2007)在对采煤沉陷区进行现状分析时均发现,采煤沉陷导致的地表移动变形会在沉陷地表留下陷坑、塌方及小滑坡等微地形,但是对沉陷坑等沉陷后的新微地形进行的针对性研究不多,在采煤沉陷地复垦中常常与地裂缝一起进行综合整治。

**1.2** 沉陷区水土流失特点

**1.2.1** 大量的地裂缝造成了地表水严重渗漏 采煤沉陷带来地表裂缝之后,由于冒落带岩石的不规则性和裂隙岩层中的裂隙、离层及断裂,覆岩层的导水能力大大提升。若采煤工作面上方存在冲沟、凹陷积水区则极易发生地表水渗漏。当地裂缝与采空区贯通时,也容易引发漏水、漏风、溃沙等现象,地裂缝在加速沉陷区水土流失的同时,还带来巨大的安全隐患(刘辉等,2014)。李晓静等(2012)借助高密度电法探测和探地雷达等技术手段,对我国西南采煤沉陷漏水耕地进行了探测,发现耕地土层下方有裂缝或微小裂隙存在;Sahu 等(2015)发现,地裂缝会加大细沟侵蚀、沟蚀、重力侵蚀强度,对生态环境造成恶劣的影响。这些研究分别从理论分析、野外监测的角度探索了地裂缝对沉陷区水土流失的影响,研究内容主要集中在地裂缝发生发育规律和预测、分布特征以及对土壤理化影响等方面,而关于地裂缝对水土流失的影响机理以及时空变异性等研究还亟需加强,这对于采煤沉陷区控制水土流失和减少安全隐患具有重要的指导意义。

**1.2.2** 地表坡度变化致使水土流失加剧 采煤沉陷不仅在矿区造成土地资源、植被资源的破坏,更产生严重的水土流失问题。采煤沉陷区水土流失形式是以水力侵蚀为主,而其地表径流量相比于沉陷前发生了巨大变化,原因主要是沉陷盆地产生后,由于坡度和坡长等微地形的改变,沉陷区底部的汇流面积较未沉陷前增大;同时,沉陷改变了土壤理化性质,土壤中的水分、养分条件也随之改变,随后植被覆盖降低导致径流量增加。

采煤沉陷在增加地表坡度的同时,更会加剧坡面的土壤侵蚀,对矿区生态环境构成严重威胁(王军等,2015;宋世杰等,2016)。黄翌等(2014)以开采沉陷规律和模型为基础,运用数字地形分析、遥感影像融合技术,揭示了黄土高原煤矿区山地开采沉陷引起的地表坡度、坡长在空间上的改变量以及由此导致的土壤侵蚀变化量,发现开采沉陷导致地表平均坡度降低、平均坡长降低,沉陷区内土壤侵蚀量增加的面积大于减小的面积。张合兵等(2015)采用$^{137}Cs$示踪技术对焦作矿区采煤沉陷坡的侵蚀过程进行了研究,发现沉陷区发生了较为强烈的水蚀,径流侵蚀在沉陷坡的水土流失中扮演着重要角色。总体上看,学者们对采煤沉陷地土壤侵蚀开展了一些研究,各类技术在探求沉陷地土壤侵蚀机理的研究中均有应用,包括遥感技术、示踪技术等;但过去研究往往是针对土壤侵蚀过程的始态和终态的前后变化分析,对于微地形下土壤侵蚀全程变化研究尚不多见,对侵蚀区位、侵蚀量预测研究依然欠缺,更加科学有效的监测技术的研发和应用也亟需加强,这对于采煤沉陷地的水土流失控制和土地复垦利用具有重要的指导意义。

**1.3** 采煤沉陷对生态环境的影响

采煤沉陷导致矿区土地、水热循环以及生态环境受到破坏,从而改变和破坏了矿区的生态平衡,使自然界、人类和生物和谐的食物链和食物网发生断缺,最终危及人类自身的生存和发展。

在不同的区域,采煤沉陷对生态环境的影响存在显著差异。史沛丽等(2017)针对采煤沉陷对中国西部风沙区土壤质量的影响机制进行了研究,发现中国西部风沙区生态环境脆弱,采煤塌陷导致地下水位下降、土壤养分流失、微生物数量和群落结构发生变化、土壤沙化、植被死亡以及生物多样性破坏等生态环境问题。同时,煤矿开采改变和破坏了矿区的生态平衡条件、生态过程,沉陷区的碳源、碳汇生态功能的转化关系也发生了变化(渠俊峰等,2014)。在高潜水位矿区,塌陷会导致大面积的积水,导致土地盐渍化,严重制约了农业生产的发展(纪万斌,1998)。李保杰等(2012)、徐嘉兴等(2017)研究发现,长时间、大规模和高强度煤炭开采不可避免地破坏原生的矿床地质条件,占用和破坏大量土地,导致植被退化及物种减少,并且区域景观多样性指数呈现明显的下降趋势,从而使得区域景观多样性降低。由于当前监测技术体系不够完善,采煤沉陷对于生态环境影响的作用机制还不十分明确,定量化研究相对不足,沉陷地对生态环境各方面产生的影响机理是今后需要加强的方向。

## 2 采煤沉陷地微地形改造方法

**2.1** 微地形改造方法

根据立地尺度上微地貌特征和土壤粗糙度变异程度,微地形改造措施的空间尺度一般小于1 m,但

是考虑到于微地形改造的实际需要并兼顾其多样性,小至水平沟槽、鱼鳞坑,大至各类梯田、淤地坝等工程都属于微地形改造措施,其空间尺度变化范围也较大(卫伟等,2013)。大量研究表明,微地形对地表的水文过程和土壤侵蚀过程有着十分显著的影响(Raulings *et al.*,2007;Thompson *et al.*,2010;Keith *et al.*,2014),然而自然界中的微地形有着随机性,相关研究表明,微地形对土壤侵蚀有着正向和负向双重作用(Gómez *et al.*,2005;卫伟等,2012)。目前,国内外关于微地形研究主要集中在微地形改造对土壤水肥特性和土壤侵蚀两个方面,另外,许多科研学者为探究微地形改造措施对土壤表面水文过程的影响,进行了一系列关于微地形的水文实验研究。今后,在采煤沉陷地微地形改造研究过程中,应当继续加强微地形对地表径流、土壤侵蚀的多角度研究,例如考虑气候、土壤条件、土地损毁等,这对微地形改造方法的实际应用具有重要现实意义。

**2.2** 采煤沉陷地常用微地形改造方法

当前的采煤塌陷地微地形改造方法广泛分布于采煤沉陷地土地复垦的工程措施中,主要采用的措施有土地平整、梯田工艺、挖深垫浅、裂缝充填和其他固坡技术等,这些微地形改造方法具有成本低、污染小及水土保持效果好等优点。

**2.2.1** 土地平整 土地平整的具体操作方法可分为两种:一种是简单的土地平整措施,对地表起伏不大的沉陷区进行人工整平;另一种是针对土壤较肥沃的沉陷区,需先进行表土剥离,平整土地之后再进行表土覆盖以保证复垦后土壤肥力(赵庚星等,2000)。土地平整常被应用在两类采煤沉陷地的微地形改造过程中:(1)沉陷但未沉稳区,这类沉陷地由于沉陷依然在进行,首先使用土地平整措施使其恢复部分生态功能,待沉稳以后再进行大规模工程措施;(2)沉陷幅度不大的区域,该类沉陷区可以从节约成本的角度直接采用土地平整工艺进行微地形改造。

**2.2.2** 梯田工艺 在丘陵区或中低潜水位采煤厚度较大的地区,对沉陷程度较大、沉陷地表破坏复杂的区域常采用梯田工艺对塌陷地表进行改造。在对沉陷地进行梯田改造时,需根据其实际的地表变化情况,按照“大弯就势,小弯取直”的原则就势修筑梯田,达到拦水保墒的微地形改造效果(赵庚星等,2000)。梯田化微地形改造同时还可以解决充填物料不足的问题。

**2.2.3** 挖深垫浅 挖深垫浅主要适用于塌陷程度较大,塌陷区存在常年性积水的塌陷区,常用的方法是泥浆泵法,具体操作流程是输送高压水、冲土水枪挖土、输送土、充填与沉淀、平整,最终在塌陷较深的区域形成鱼塘,在塌陷较浅的区域形成平整的农田(胡振琪,1997)。泥浆泵法往往导致土层顺序的变化和上下土壤层的混合,从而使复垦土壤条件差,较难很快达到期望的生产力水平。胡振琪(1997)对泥浆泵法进行改进,在“垫浅区”上新构造的土壤除“首填块段”以外,其余块段的土层顺序基本保持不变,可快速恢复原土壤生产力。

**2.2.4** 裂缝和沉陷地充填 地裂缝是导致采煤沉陷地地表破碎化、水土流失的重要原因,采用裂缝充填工艺对损坏地表进行改造,可涵养水土、减小地表下沉量。裂缝充填工艺一般针对于裂缝宽度较大的区域,常用步骤是深部充填、表层覆土、植被绿化(刘辉等,2014)。对轻度破坏、土层较厚、裂缝未贯穿土层的土地,采用填堵方法;对破坏程度严重、裂缝透穿土层的土地,按反滤层的原理填堵裂缝、孔洞,首先用粗砾石填堵孔隙,其次用次粗砾,最后用砂、细砂、土填堵(王神虎等,2012)。同时,在充填物料丰富地区,也可以对一些积水型和季节性积水型沉陷地进行充填。

**2.2.5** 不同微地形改造方法适用条件 不同地区的沉陷地,由于其沉陷的特点不同,故采用的微地形改造措施也不尽相同。中东部平原矿区的沉陷区边缘由于非均匀沉降进而产生裂缝和坡地,中心往往会出现常年积水,进一步会形成湖泊等其他类型的湿地,挖深垫浅、充填、土地平整工艺在这类地区应用较多;针对稳沉后复垦耕地恢复率不高、复垦周期长的问题,胡振琪等(2013)提出了边采边复的概念,在土地即将沉入水中或部分沉入水中时预先分层剥离部分表土与心土,交错回填至将要塌陷的区域。西南地区降水充足,地貌类型多为喀斯特地貌,采煤沉陷后地表起伏较大,多采用梯田工艺和裂缝充填工艺,微地形改造效应主要表现在表土资源保护、水土流失治理及地质灾害防治方面。黄土高原矿区沉陷特点是下沉系数大,地表移动剧烈且速度快,地裂缝发育明显,滑坡较为多发,梯田工艺、土地平整工艺及裂缝充填工艺在该类矿区均可应用,并且能够达到较好的保持水土和增强生态系统稳定性的效果。西北荒漠采煤沉陷区由于地形、气候的特殊性,沉陷坑和裂缝进一步加剧该地区的荒漠化和

水土流失,复垦多采用生物治理措施,以不同植物的搭配种植以改善区域地表生境,微地形改造方法应用的较少。

## 3 沉陷土地微地形改造应用效应

### 3.1 沉陷土地微地形改造的水土保持效应

为控制采煤沉陷土地水土流失问题,专家学者将微地形改造方法在沉陷区进行了研究,并通过各种量化技术确定了其水土保持效果。由于我国矿区复垦相比于国外起步较晚,专门针对于沉陷地微地形改造及其效应研究不多。

当前关于采煤沉陷区微地形改造应用的研究区域以黄土高原区和高潜水位平原区为多。在黄土高原矿区,秦朝亮等(2015)采用削坡+复合锚杆框架梁等综合防治措施,将坡面整平后设计了尺寸为4 m×4 m的框架梁;殷建河等(2013)提出在沉陷预测最大范围边际周围形成一道水泥防护墙,先开挖再回填原土的裂缝充填等综合改造措施对沉陷区进行治理。但是以上研究仅提出了相应的改造方案,并没有对其各自方案的水土保持效果进行验证分析。王帅红等(2011)分别对轻度、中度、重度塌陷土地按照集中连片的原则采用坡改梯的改造方法,对沉陷耕地同时运用梯田工艺和裂缝填充等微地形改造工艺,并量化分析了其水土涵养效果,发现研究区每年可减少水土流失量4.94万t,达到了控制水土流失的目的并且提高了耕地质量。在高潜水位平原地区,主要是采用充填法进行微地形改造,充填材料包括粉煤灰、煤矸石、建筑垃圾和土壤等,但是会存在充填物料数量不足和潜在污染性问题(胡振琪,1997)。近年来,王培俊等(2014)选取黄河泥沙用作充填复垦材料,克服了这些问题,但需要采取适当措施加以改良,以提升重构土壤生产力水平。在其他区域,学者们也开展了一些研究。在太行山脉与豫北平原过渡地带,学者们在对丘陵沉陷区与平原沉陷区进行对比分析后,提出了梯田、缓坡地结合的改造措施和土地平整、植被恢复相结合的治理措施;在西南丘陵地区,采用煤矸石充填的微地形改造措施对损毁土地进行复垦,另外借助铺设粘土层的方法改善矿区水土流失、土壤和水体的重金属污染等环境问题,提高了生态环境质量。

总结当前各个地区采煤沉陷地微地形改造应用研究,微地形改造措施能有效遏制采煤沉陷地水土流失,但大部分研究集中于微地形改造措施的选择、布局和配置,对改造后的长期水土保持效应研究较少,尤其是微地形改造措施水土保持效应的量化研究及其生态效应在时间上的变化研究。加强这些研究对于探索微地形改造措施对土壤侵蚀的影响机理和研发更加科学有效的改造方法具有重要的理论和现实意义。

### 3.2 沉陷土地微地形改造的土壤与植被恢复效应

研究表明,不同微地形改造措施及其空间组合模式能够创造出许多不同的斑块镶嵌体,使之显著区别于周围环境的微地貌结构和生物地球化学过程(Appels *et al.*,2011)。而微地形改造的这种影响在不同的自然地理单元和生态系统类型区均发挥重要作用。科学合理的微地形改造措施对于改善土壤质量、提高植被生产力、积累生物量和促进生态系统正向演替发挥着重要作用,这主要和实施改造后能有效降低水土养分的流失比率、改善地表微环境密切相关(Moser *et al.*,2009)。

采煤沉陷地的微地形改造和生态修复是进行土地复垦和土地整理利用的基础。李新举等(2007)对采煤塌陷地复垦后的土壤质量进行研究,发现不同微地形改造方法对土壤质量有较大影响:非充填复垦措施对土壤扰动不大,土壤质量变化也不大,挖深垫浅复垦的土壤质量低于一般农田,但复垦后土壤质量逐年提高。粉煤灰充填和煤矸石充填复垦的土地,土壤有机质含量高于当地土壤,其他养分含量低于当地土壤,土壤质量较低。刘进来等(2016)以GIS空间分析为主要研究方法,对矿区数字地形、水文网、地形复杂度进行研究,探讨了基于微地形塑造的土壤改良和植被恢复方案,并针对不同地形特征进行分区绿化设计,实现了废弃矿区的可持续利用和景观效果的提升。进一步的研究显示,坡面植被恢复状况与对应的生态功能、水文特性和生物多样性都有非常紧密的联系(Courtwright *et al.*,2011)。科学合理的微地形改造措施能有效降低水土养分的流失比率、改善地表微环境,卫伟等(2013)发现通过科学合理的微地形改造和整地能促进植被恢复效果的充分发挥。在黄土高原沉陷区,坡改梯田会使生物量积累提高27%~53%。在亚热带丘陵山地,与对照相比,合理的坡面整地措施可以将树高、胸径和蓄积量分别提高124%、130%和226%(Liu *et al.*,2011)。

综上可知,当前国内外研究已经表明微地形改造对植被的生长发育起着重要作用,但微地形改造

影响植被恢复的机理并不十分明确。微地形改造对植被群落动态与分布格局的影响机制是今后需要加强的研究方向,对于改善植被生长状况、提高生态系统服务功能有着重要意义。

### 3.3 沉陷土地微地形改造的景观多样性效应

微地形改造能够创造出许多不同的地表微生境和局地小气候,进而显著增加坡面景观的异质性。在沉陷地微地形改造过程中,为了有效提高植被成活率和覆盖度,采用了形式多样的下垫面改造和整地措施,塑造了形态各异的微地形和集水区,从而对不同立地条件下的微景观、土壤水文和植被恢复进程产生重要影响(Stavi *et al.*, 2008; Moser *et al.*, 2009)。

李保杰等(2012)应用 GIS 和景观生态学方法,以徐州市九里矿区采煤沉陷地土地复垦项目为例,分析了微地形改造后的矿区景观格局变化,九里矿区采煤沉陷地结合徐州市土地利用总体规划,因地制宜,通过地形重塑将整个项目区域划分为"四区两园",使采煤沉陷地景观类型得到了提高。经过微地形改造和植被恢复工程,矿区景观朝多样化发展。为揭示土地复垦对矿区景观生态状况的影响,徐嘉兴等(2013a, 2013b)以徐州市贾汪矿区为例,运用 RS、GIS 和景观生态学方法,评价了该区地貌重塑后的景观生态质量变化,发现从 2000 年以来,矿区开展了大规模的地形重塑工程,提出了适宜的"一平、二填、三水冲"的地貌重塑复垦模式,把采煤沉陷区复垦为不同的植物景观区、湿地公园,煤炭开采导致破碎的土地复垦为旱田、水田等,并对原有的农田基础设施进行完善,大大提高了景观多样性,景观生态环境逐步得到改善和提高。

尽管国内外有关微地形改造影响景观多样性的研究已经取得一定进展,但大多是对于大尺度景观的研究,对于微景观的研究较少,且许多和微地形改造有关的关键过程和作用机理不明,导致无法研判不同改造措施的长期生态环境效果和后续效应,因此,加强这方面的研究可为微地形改造对生态环境的影响研究提供理论和技术支持,实现改造技术的优化和改良。

## 4 结语与展望

本文从采煤沉陷后微地形变化特征、塌陷地的微地形改造方法及其水土保持研究等方面总结了当前有关研究现状,针对当前研究的不足,建议今后在以下方面加强研究:

(1)研发采煤塌陷地微地形及其改造的信息获取方法。采煤塌陷地微地形改造的空间特征和其水土保持功能有着重要联系,而目前针对微地形空间特征的一系列获取技术与方法仍十分欠缺,现状调查的方法因为其精度差、效率低的缺点已经越来越不能满足当前的需求。因此,要引进无人机、三维激光扫描、InSAR 和沉陷预计等先进技术,快速精确采集采煤沉陷地微地形空间特征因子,并进行定量表征,以为微地形改造控制水土流失的机理和实践应用提供支持。

(2)加强采煤沉陷地微地形的水文过程分析研究。目前对微地形改造方法的水文过程有所研究,但是不同微地形改造方法在不同时间和空间尺度上的水文过程并不明确。为使微地形方法能在采煤沉陷地复垦的实践中有更好的应用,对采煤沉陷地地表径流过程、微地形改造后土壤侵蚀过程的时空变异进行研究,有针对性地深入分析微地形改造控制水土流失机理,同时加强微地形特征变化与土壤侵蚀全程监测研究十分必要。

(3)加强采煤沉陷地微地形改造的效应机理分析。当前采煤沉陷地的微地形改造对于生态环境的效应研究已取得一定的进展,微地形改造对于生态环境的改善起着重要作用,但微地形改造对于生态环境的影响机制还不十分明确。因此,有必要根据微地形改造对生态环境的影响结果,分析不同微地形改造方式对生态环境的影响机制,根据研究结果,结合矿区沉陷情况和生态恢复的需求,合理结合各类微地形改造方法,达到矿区在当前技术条件下能恢复的最佳状态。

(4)创新采煤塌陷地微地形设计与改造的方法。当前采用微地形改造方法主要依托于土地复垦技术中的一些工程措施,微地形设计主要有梯田、反坡台、防水堤、水平槽等,这些改造设计都有涵养水土改善生境的作用,但大多技术陈旧,不排除在未来采煤塌陷地改造应用中出现难以使用或效果不明显的情况。因此,有必要依据微地形改造控制水土流失机理借助水文模型进行更多的微地形优化设计研究,对当前的微地形改造方法进行创新,对整地措施的结构布局进行更科学的安排,并研发和应用更高效的微地形改造材料和技术。

### 参考文献

白中科, 段永红, 杨红云, 等. 2006. 采煤沉陷对土壤侵蚀与

土地利用的影响预测. 农业工程学报, **22**(6): 67-70.
陈孝杨, 王 芳, 王长垒, 等. 2015. 砂姜黑土区采煤塌陷坡耕地水蚀输沙过程研究. 水土保持学报, **29**(1): 32-35.
范立民, 张晓团, 向茂西, 等. 2015. 浅埋煤层高强度开采区地裂缝发育特征——以陕西榆神府矿区为例. 煤炭学报, **40**(6): 1442-1447.
高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 2013. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, **33**(1): 12-22.
胡振琪. 1997. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法. 煤炭学报, **22**(6): 617-622.
胡振琪, 王新静, 贺安民, 等. 2014. 风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律. 煤炭学报, **39**(1): 11-18.
胡振琪, 肖 武, 王培俊, 等. 2013. 试论井工煤矿边开采边复垦技术. 煤炭学报, **38**(2): 301-307.
黄 翌, 汪云甲, 王 猛, 等. 2014. 黄土高原山地采煤沉陷对土壤侵蚀的影响. 农业工程学报, **30**(1): 228-235.
贾俊姝, 周心澄, 高国雄, 等. 2007. 采煤沉陷区土地利用变化及其景观异质性分析——以山西省东大煤矿为例. 水土保持通报, **27**(6): 199-202.
纪万斌. 1998. 我国采煤塌陷生态环境的恢复及开发利用. 中国地质灾害与防治学报, (S1): 50-54.
李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 2012. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应. 农业工程学报, **28**(3): 251-256.
李晓静, 胡振琪, 赵艳玲, 等. 2012. 我国西南地区采煤塌陷水田漏水探测及机理分析. 煤炭科学技术, **40**(11): 125-128.
李新举, 胡振琪, 李 晶, 等. 2007. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展. 农业工程学报, (6): 276-280.
刘 辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 2013. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析. 采矿与安全工程学报, **30**(3): 380-384.
刘 辉, 雷少刚, 邓喀中, 等. 2014. 超高水材料地裂缝充填治理技术. 煤炭学报, **39**(1): 72-77.
刘进来, 马树恩, 刘 玲. 2016. 基于 GIS 的露天开采矿区地形特征及植被恢复研究. 中国水土保持, (12): 62-66.
秦朝亮, 龙建辉, 经 明, 等.2015. 采煤塌陷区内地质灾害与生态环境的综合治理方案.煤炭技术, 34(3):320-323.
渠俊峰, 李 钢, 张绍良. 2014. 高潜水位采煤沉陷区复垦与湿地生态保护——以徐州九里高潜水位采煤沉陷区治理为例. 中国水土保持, (1): 37-39.
史沛丽, 张玉秀, 胡振琪, 等.2017. 采煤塌陷对中国西部风沙区土壤质量的影响机制及修复措施. 中国科学院大学学报, **34**(3): 318-328.
宋世杰, 赵晓光, 张 勇, 等. 2016. 井下采煤影响矿区坡面形态及侵蚀的数值模拟分析. 安全与环境学报, **16**(4): 368-373.
王 军, 杨小敏, 赵欢欢. 2015. 我国西北地区浅埋煤层开采对生态环境影响研究. 河南理工大学学报: 自然科学版, **34**(5): 730-734.
王培俊, 胡振琪, 邵 芳, 等. 2014. 黄河泥沙作为采煤沉陷地充填复垦材料的可行性分析. 煤炭学报, **39**(6): 1133-1139.
王神虎, 任智敏, 窦志荣, 等. 2012. 煤矿采空区地表沉陷产生的影响及防治对策. 矿业安全与环保, **39**(6): 68-69.
王帅红, 孙泰森, 周 伟, 等. 2011. 黄土丘陵沟壑区煤矿沉陷耕地复垦. 农业工程学报, **27**(9): 299-304.
卫 伟, 贾福岩, 陈利顶, 等. 2012. 黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应. 环境科学, **33**(8): 2674-2679.
卫 伟, 余 韵, 贾福岩, 等. 2013. 微地形改造的生态环境效应研究进展. 生态学报, **33**(20): 6462-6469.
魏婷婷, 胡振琪, 曹远博, 等. 2014. 风沙区超大工作面开采对土壤及植物特性的影响. 四川农业大学学报, **32**(4): 376-381.
徐嘉兴, 李 钢, 陈国良, 等. 2013a. 矿区土地生态质量评价及动态变化. 煤炭学报, **38**(S1): 180-185.
徐嘉兴, 李 钢, 陈国良, 等. 2013b. 土地复垦矿区的景观生态质量变化. 农业工程学报, **29**(1): 232-239.
徐嘉兴, 李 钢, 余嘉琦, 等. 2017. 煤炭开采对矿区土地利用景观格局变化的影响. 农业工程学报, **33**(23): 252-258.
许传阳, 马守臣, 张合兵, 等. 2015. 煤矿沉陷区沉陷裂缝对土壤特性和作物生长的影响. 中国生态农业学报, **23**(5): 597-604.
殷建河, 李 斌. 2013. 浅埋厚煤层综放开采塌陷区治理研究. 煤炭科学技术, (S1):163-165.
臧荫桐, 汪 季, 丁国栋, 等. 2010. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究. 土壤学报, **47**(2): 262-269.
赵庚星, 王可涵, 史衍玺, 等. 2000. 煤矿塌陷地复垦模式及综合开发技术研究. 中国土地科学, **14**(5): 42-44.
张合兵, 聂小军, 程静霞. 2015. $^{137}Cs$ 示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响. 农业工程学报, **31**(4): 137-143.
张延旭, 毕银丽, 陈书琳, 等. 2015. 半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响. 环境科学与技术, **38**(3): 11-14.
张耀方, 江 东, 史东梅, 等. 2011. 重庆市煤矿开采区土壤侵蚀特征及水土保持模式研究. 水土保持研究, **18**(6): 94-99.
张增奇, 梁吉坡, 李增学, 等. 2015. 山东省煤炭资源与赋煤规律研究. 地质学报, **89**(12): 2351-2362.
张子月, 邹友峰, 陈俊杰, 等. 2016. 采煤塌陷区土地动态沉降预测模型. 农业工程学报, **32**(21): 246-251.
Appels WM, Bogaart PW, van der Zee S. 2011. Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scalehydrological connectivity. *Advances in Water Resources*, **34**: 303-313.
Courtwright J, Findlay SG. 2011. Effects of microtopography on

hydrology, physicochemistry, and vegetation in a tidal swamp of the Hudson River. *Wetlands*, **31**: 239-249.

Gómez JA, Nearing MA. 2005. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. *Catena*, **59**: 253-266.

Keith EG, Brian CM. 2014. Microtopography influences early successional plant communities on experimental coal surface mine land reclamation. *Restoration Ecology*, **22**: 232-239.

Liu XH, He BL, Li ZX, *et al*. 2011. Influence of land terracing on agricultural and ecological environment in the Loess Plateau regions of China. *Environmental Earth Sciences*, **62**: 797-807.

Moser KAC, Noe G. 2009. The influence of microtopography on soil nutrients in created mitigation wetlands. *Restoration Ecology*, **17**: 641-651.

Raulings EJ, Boon PI, Bailey PC, *et al*. 2007. Rehabilitation of Swamp Paperbark (*Melaleuca ericifolia*) wetlands in south-eastern Australia: Effects of hydrology, microtopography, plant age and planting technique on the success of community-based revegetation trials. *Wetlands Ecology and Management*, **15**: 175-188.

Sahu P, Lokhande RD. 2015. An investigation of sinkhole subsidence and its preventive measures in underground coal mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, **11**: 63-75.

Stavi I, Ungat ED, Lavee H, *et al*. 2008. Surface microtopography and soil penetration resistance associated with shrub patches in a semiarid rangeland. *Geomorphology*, **94**: 69-78.

Thompson SE, Katul GG, Porporato A. 2010. Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry. *Water Resources Research*, **46**: 58-72.

**作者简介** 李斯佳,女,1995 年生,硕士研究生,主要从事土地整治与生态恢复研究。E-mail: lsj_luna@ 163.com

**责任编辑** 张 敏