

露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展*

黄元仿¹ 张世文² 张立平¹ 张红艳³ 李贞¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001;

3. 中国农业大学理学院, 北京 100193)

摘要: 露天煤矿开采损毁大量土地资源,同时引发植被受损、景观结构功能遭到破坏和生物多样性降低等一系列生态环境问题,已成为制约矿区可持续发展乃至区域生态安全的重大隐患。土地复垦是对损毁土地采取整治措施,使其达到可供利用状态的活动,也是生物多样性的恢复过程。因此,露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究对促进矿区经济和生态环境协调发展具有重要意义。简要介绍了生物多样性内涵和研究热点,以及露天煤矿开采复垦过程中生物多样性扰动与恢复特征,重点阐述了露天煤矿生物多样性保护中的多样性调查、监测和评价以及受损评估和预测研究进展。同时,重点论述了露天煤矿土地复垦生物多样性恢复中的土壤生境再造、植被重建以及复垦土地景观结构与生态功能的研究进展。阐释了露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复的相关法规政策。最后展望了未来露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复领域的研究重点,以期为推动该领域进一步研究提供思路。

关键词: 生物多样性 露天煤矿 土地复垦 土壤生境再造 植被重建

中图分类号: Q16; S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0072-11

Research Progress on Conservation and Restoration of Biodiversity in Land Reclamation of Opencast Coal Mine

Huang Yuanfang¹ Zhang Shiwen² Zhang Liping¹ Zhang Hongyan³ Li Zhen¹

(1. College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

3. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Biodiversity provides the necessary resources and living environment for human life, which is a core component of the earth's life-support system. Opencast coal mining destroys a considerable number of land resources. Meanwhile, series of ecological problems were triggered, such as vegetation damage, the destruction of structure and function of landscape and biodiversity loss, etc. Land reclamation is an activity making damaged land to reach available state through taking remediation measures; of course, it is also the recovery process of biodiversity. Therefore, it is greatly significant to promote the coordinated development of economy and environment on the study of conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of opencast coal mine. The connotation and research which focus on biodiversity and disturbance and recovery features of conservation and restoration of biodiversity in the process of mining and land reclamation of opencast coal mine were briefly introduced. In the aspect of biodiversity conservation of opencast coal mine, some study progresses on investigation, monitoring and evaluation of biodiversity, damage assessment and forecasting were concentrated on. In the aspect of biodiversity restoration of opencast coal mine, the researches on soil habitat reconstruction, revegetation, reclamation landscape structure, and ecological function of biodiversity reengineering were mainly discussed.

收稿日期: 2015-06-25 修回日期: 2015-07-13

* 国土资源部公益性行业科研专项资助项目(201411017)

作者简介: 黄元仿, 教授, 博士生导师, 主要从事土地整治、计量土壤学和数字农业研究, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

Relevant regulations and policies for conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of opencast coal mine were interpreted. Finally, the future research about conservation and restoration of biodiversity in land reclamation of opencast coal mine were looked forward. It may provide some ideas for further promoting the research in this area.

Key words: Biodiversity Opencast coal mine Land reclamation Soil habitat reconstruction
Revegetation

引言

露天煤矿开采是世界范围内的主要采煤方式,全球煤炭产量增加值的75%源自露天开采。我国露天煤矿年产量逐步上升到煤炭总产量的15%。据统计,我国露天煤矿每开采万吨煤损毁土地面积0.22 hm²,其中直接挖掘损毁土地面积0.12 hm²,外排土场占用土地面积0.10 hm²,年均损毁和占用的土地面积多达1万hm²,而全国露天煤矿土地复垦率仅为20%~30%^[1-2]。露天煤矿开发过程中的采、剥、运、排、覆等环节损毁和占用大量的土地资源,土地作为动物、植物和微生物多样性的载体,剧烈的土地利用变化必然伴随着生物多样性的相应变化。生物多样性是指生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,它是人类生存之本,为人类提供了必要的生活资源和生存环境^[3],它也是地球生命支持系统的核心组成部分和生态服务功能的基础,关系到生态安全和粮食安全^[4]。

土地复垦是对生产建设活动和自然灾害损毁的土地采取整治措施,使其达到可供利用状态的活动,可分为地貌重塑、土壤重构、植被重建和生物多样性重组4个阶段,生物多样性保护与恢复贯穿于矿山开采、土地损毁、土地复垦的全过程。我国露天煤矿主要分布在草原区、荒漠区和丘陵区等生态环境脆弱地区,矿山开采对当地生物多样性保护与恢复造成了巨大挑战。因此,露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复已成为当前所面临的紧迫任务,也是实现可持续发展和区域生态安全优先关注的问题之一。

露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究主要包括矿山开采和复垦过程中生物多样性调查、监测和评价、受损评估和预测以及土壤生境再造、植被重建等保护与恢复内容。该领域的研究目的是通过上述理论方法、技术手段和实践研究最大限度减轻露天煤矿开采对生物多样性的影响,最大程度恢复生物多样性,且为恢复更加稳定的生态系统提供理论依据和技术支撑。本文简要介绍生物多样性内涵和研究热点,以及露天煤矿开采复垦过程中生物

多样性扰动与恢复特征,重点阐述露天煤矿开采、土地损毁和复垦全过程中生物多样性保护与恢复的研究进展,以期为推动该领域进一步研究提供思路。

1 生物多样性内涵与研究热点

生物多样性这一术语及其内涵是在1992年《生物多样性公约》(Convention on biological diversity)正式签署后才被全球广泛理解和接受,该公约将生物多样性定义为:地球上陆地、海洋和其他水生生态系统及其所构成的生态系统综合体中的所有生物体,包括物种内、物种之间和生态系统的多样性^[5]。我国2010年发布的《生物多样性保护战略行动计划》(2011—2030年)将生物多样性定义为:地球上所有的生物(植物、动物和微生物)及其所构成的综合体。

随着研究和认识的逐步深入,生物多样性也由原来的遗传、物种和生态系统3个层次拓展到包含景观在内的4个层次^[6-8],基本涵盖了生物多样性从微观到宏观的全部尺度。以下简要介绍各层次生物多样性的研究热点。①遗传多样性(也称“基因多样性”)是生物多样性的基础,主要研究内容包括起源、维持机制、基因变异如何影响种群进化等方面^[9-10]。②物种多样性是生物多样性的一个重要层次,是遗传多样性分化的来源,同时又是生态系统多样性的基础,起到承上启下的作用。它的研究热点包括物种多样性测度方法^[11]、群落结构时空变化^[12]、与气候、土壤、土地利用等环境因子的关系^[13]、空间模拟预测^[14]和生态入侵等。③生态系统多样性是指生物圈内生境、生物群落和生态过程的多样化以及生态系统内生境差异、生态过程变化的巨大的多样性。该方面研究主要集中于生态系统测度、关键种及其保护^[15]、冗余种^[16]、干扰下的生态系统多样性^[17]、动态监测^[18]以及生态系统多样性与稳定性和功能的关系^[19-20]等。④景观多样性是指景观单元在结构、功能以及随时间变化方面的多样性,揭示了景观的复杂程度。研究内容主要包括景观生态保护和恢复、评价规划和模拟、生态过程和尺度以及景观空间异质性及其对其他层次生物多样性的影响^[21-22]。

近年来,物种灭绝的加剧,遗传多样性的减少,以及生态系统特别是热带森林的大规模破坏,引起了国际社会对生物多样性问题的极大关注。人类活动是造成生物多样性以空前速度丧失的根本原因。矿山开采,特别是露天煤矿开采,是目前最大规模改变土地利用方式和损坏陆地生态系统的有组织的人类活动^[23]。露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究将进一步丰富生物多样性保护的内涵,为露天煤矿生态系统重建、土地复垦方案编制、复垦工程设计与施工提供技术支撑,增强矿区重建生态系统的稳定性与抗逆性,促进矿区土地资源的可持续利用。

2 露天煤矿开采复垦过程中生物多样性扰动与恢复的主要特征

与井工开采相比,露天煤矿开采具有生产效率高和生产成本低的特点,为 global 经济发展做出了不可磨灭的贡献。然而,露天煤矿穿爆、采装、运输、排土等一系列生产建设工程对地表产生剧烈扰动,这给生物多样性保护与恢复带来了巨大挑战。

(1) 露天煤矿开采量和比例较大,融入生物多样性保护理念的绿色开采工艺和设计相对较少。美国、俄罗斯及印度等几个主要采煤国家都大力发展露天采煤,露天采煤比例基本都在 50% 以上,部分国家达到 90% 以上,我国露天开采比例在 10% 以上^[24]。露天采煤提供了世界范围内大约 3/4 的煤炭产量,露天煤矿大规模开采引发的一些生态与环境问题,严重影响区域经济的可持续发展。目前多数露天煤矿开采过程中未考虑到生态的破坏与环境的损伤,特别是我国,普遍采用先开采后恢复、先破坏后治理的被动开采模式。

(2) 露天煤矿生物多样性受损严重,恢复难度大。与原生境相比,露天煤矿开采复垦过程中新形成的生境虽趋于简单,但重新组合堆置的固相岩土结构松散、地层层序紊乱、地表物质更加复杂、土壤性质趋于恶化^[25]。露天煤矿生物多样性受损环节主要包括岩土剥离、岩土堆放、煤矸石堆放等。① 岩土剥离。大型露天煤矿采煤需剥离数百米厚的土层和岩石,这些土层和岩石形成的地质年代和环境条件变化甚大,剥离后理化性质也发生改变,破坏了原有的土壤结构和生态系统。② 岩土堆放。剥离物从地下移至地表,堆放地点、体积和位置发生改变;土岩层层位从有序排列到混合堆放,这种混排完全破坏了原有岩土剖面,岩土物料松散,易产生非均匀沉降。此外,露天煤矿排土过程中重型卡车碾压使地表严重压实,造成植物扎根困难。③ 煤矸石堆放。

由于无土、缺水、干热、强酸、有毒等恶劣条件,缺少植物种子和残根,且自燃现象较为普遍,煤矸石山很难具备植物生存和更新的条件。就我国而言,除了上述露天煤矿生物多样性扰动受损特征,我国露天煤矿的区域分布及其特征也成为露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复的制约因素,我国大多数露天煤矿地处生态脆弱区,水土资源贫瘠,区域经济相对落后,矿产资源开发是这些区域的主要经济增长点之一。由于这些区域通常气候条件恶劣,降水稀少,植物物种贫乏,生态系统非常脆弱等原因,自然资源与非自然生态环境附合性强,生态环境制约力对资源开发的限制作用很强。因此,若对自然资源开发利用不当,会使生态环境遭受破坏,也会使开发区域的生态环境发生改变,造成生态系统很难或不可恢复的破坏。

露天煤矿生物多样性保护与恢复工作任务重、难度大,且事关矿区及所在地区的生态和粮食安全。由于其不可替代性和重要性,所以,有必要对露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复相关理论方法和技术展开研究。

3 露天煤矿土地复垦生物多样性保护研究进展

矿产资源大量开采导致土地资源损毁的同时,引发了矿区景观受损、土壤质量下降、植被覆盖度降低、人地生态系统退化和生物多样性减少等一系列生态环境问题^[26]。为实现开采过程中露天矿区生物多样性影响最小化和复垦过程中生物多样性恢复最大化的目标,应对采矿前、中、后全程中生物多样性演变情况进行调查、监测和评价以及受损分析和预测,并制定专门的法律法规。

3.1 露天煤矿生物多样性调查、监测和评价

露天煤矿生物多样性调查、监测和评价是指借助于一定技术手段和方法揭示露天煤矿开采和复垦过程中遗传、物种、生态系统和景观多样性等不同层次生物多样性现状、演变过程及其驱动机制的过程。矿区生物多样性调查、监测与评价是矿业开发过程中需开展的重点工作,也是科学保护与决策的基础。

目前该方面研究侧重于露天煤矿生产建设对生态环境影响的评价。Monjezi 等建立了涵盖公共安全、空气质量、水质等评价因子体系,综合评价露天采矿对各因子的总体影响^[27];Katpatal 等采用 TM、CARTOSAT 等遥感数据,监测了露天煤矿排土场时空变化,并利用地理信息系统(GIS)空间分析评估了采矿排土堆积对流域洪水暴发的影响^[28];贺亮采用层次分析法确定了露天采矿生态环境影响评价指

标的权重^[29];黄丹等利用多期遥感数据对黑岱沟煤矿进行了植被修复监测和效果评价^[30]。相比露天煤矿,国内外学者对其他陆地矿产开发的生物多样性调查、监测和评价的研究较多。Antwi 等通过遥感解译采煤区土地覆盖情况,利用景观生态指数评价了采矿活动对生境和生物多样性的影响^[31];Charou 等评估了遥感数据在识别、监测采矿活动的污染源和影响范围中的适用性,并指出通过高分辨率遥感影像与 GIS 结合可以长期、有效地为矿区生态环境管理、土地复垦监测服务^[32]。庞妍等采用了污染负荷指数法和潜在生态危害指数评价了矿区土壤污染风险,发现煤矿区呈无污染或轻微到中度污染^[33]。

矿区生物多样性调查监测技术手段和方法主要包括样方调查法、遥感(RS)和3S耦合的多因子分析等^[34-36]。评价方法包括生态机制分析法、美国生境评价程序、基于GIS的生境模型和生态风险评价等^[37-40]。

通过梳理国内外研究文献可知,露天煤矿生态影响评价相对较少,且评价范围多限于矿区尺度,以单一因子的评价为主,缺乏对物种的生境、生存健康等的影响分析和评价。今后一段时间,应结合露天煤矿矿区地物特点及其光谱特征,研发针对露天煤矿开采复垦过程中不同层次生物多样性变化状况的遥感数据信息提取模型。研究借助于野外样方调查法和3S技术结合的方法,从遗传、物种、生态系统和景观4个层次生物多样性,按照小、中、大的空间尺度,建立不同层次不同尺度生物多样性评价的指标体系和模型,实现露天煤矿开采复垦过程中生物多样性现状、演变过程及其驱动机制的综合调查、监测和评价。

3.2 露天煤矿生物多样性受损评估和预测

露天煤矿资源开发是一种具有大规模、高强度性质的生态扰动行为,会产生区域地表侵蚀、植被破坏等生态扰动和环境污染等问题。因此,分析评估露天煤矿生物多样性受损现状、演变规律和受损机制,以及预测伴随土地利用变化发生的生物多样性受损变化十分必要,该方面的研究成果将为矿区环境恢复和治理提供信息支撑。

露天煤矿生物多样性受损评估分析是指借助于野外调查、采样化验和遥感等多源数据,结合GIS、相关分析和统计分析等技术方法,分析评估露天煤矿生物多样性受损现状、演变规律及其受损机制的过程。目前国内外学者主要侧重于基于RS技术支持下的植被(或群落)受损状况评估的研究。露天矿区生物多样性受损评估大致分成3个阶段。第1

阶段重点从微观层面,是在实验室内进行生理演变过程及其驱动机制的研究。该阶段侧重于露天矿山生产建设过程中产生的粉尘对生物多样性的影响,国外学者很早就在该方面开展了研究。Naidoo 等研究发现煤尘可以显著减少植被的CO₂交换和光合效率^[41];Nanos 等分析了惰性粉尘对橄榄生化性质的影响,结果表明,粉尘会导致植被叶片的干物质含量增加,叶绿素含量减少,且粉尘会造成光合速率和量子产率减少^[42];Brandt 等研究了粉尘类型和降尘速率对不同物种的影响,发现粉尘类型和降尘速率阻碍槭树的生长,而对鹅掌楸属的生长却有促进作用^[43]。第2阶段主要是从宏观层面,利用RS技术分析评估露天矿区生物多样性受损状况。Latifovic 等利用不同时相的Landsat 遥感影像对矿区植被受损状况进行了分类,并对加拿大埃德蒙顿北部某矿区的植被变化情况和受损状况进行了评定^[44];Erener 利用多时相TM 影像,对矿区生态环境进行动态监测,定量分析了矿区生态环境的动态变化情况^[45];姚峰等以干旱荒漠区新疆准东五彩湾露天煤矿为例,基于多年的TM 影像数据,借助植被指数和植被覆盖度指数,通过植被覆盖度的时空变化趋势和波动程度,评估了露天煤矿开采中不同等级植被群落的受损范围与受损程度^[46]。第3阶段是利用高光谱遥感技术,通过研究受损生物(主要是植被)的光谱特征和植被指数,开展煤矿开采对生物影响的研究。Holer 等分析了受损植被的光谱特征,发现受损叶簇的红边位置比正常植被叶子向短波方向偏移5 nm,即所谓的蓝移,并且发现蓝移与重金属含量偏高有关,这种在光谱上表现出的细微变化,可以作为监测植被状况的指标^[47];McGwire 等利用多光谱和高光谱数据,通过计算干旱地区稀疏植被的宽波段和窄波段归一化植被指数(NDVI)值,监测植被覆盖度^[48]。

与受损评估分析研究相比,露天煤矿生物多样性受损预测相关研究较为滞后。付慧等以伊敏五牧场煤矿为例,通过图形叠加法、调查法和类比法,探讨了呼伦贝尔草原矿区生态受损预测与修复^[49]。考虑到土地作为生物多样性的载体,露天煤矿生物多样性常伴随着土地利用变化而变化,今后应结合露天煤矿开采活动及其对土地利用的影响,探讨土地领域的预测模型在露天煤矿生物多样性受损预测的可行性,如综合城市模型、基于经济理论的土地利用模型、CLUE-S 模型、细胞自动机CA(Cellular automata)等^[50-51]。借助于露天煤矿生物多样性受损预测方法研究成果,实现生物多样性受损预测,摸清演变趋势及其驱动机制。

目前该方面的研究对象多为植被(或群落),研究内容多局限于受损面积、区域和时空特征等,且重分析,轻诊断评估。研究尚未形成较为统一的诊断指标和诊断标准,也没有受损机制的分析,导致难以准确把握受损过程中不同外界因素对受损的作用程度,无法准确制定合理高效的治理和保护策略。同时,露天煤矿生物多样性受损预测有待进一步加强。

4 露天煤矿土地复垦生物多样性恢复研究进展

土地复垦的基础是再造良好的土壤结构和层次,提供植物生长必备的土壤生境;植被恢复能提高退化土壤的生物活性、增加土壤养分、改善土壤的理化属性等;矿山开采复垦活动将改变原有土地景观结构,结构发生变化必然导致功能发生变化。本节将就土壤生境再造、植被重建、复垦土地景观结构与生态功能3个方面的研究进展进行论述。

4.1 土壤生境再造

土壤生境再造(或称“土壤重构”)的核心是增加土壤生物活性,加速矿区复垦土壤的熟化,重构适合植被生长的土壤结构,改善重构土壤的环境质量。土壤生境再造可分为实施前准备、实施过程和实施后维护3个阶段和表土剥离存放、剖面重构、土壤培肥改良和水土保持与人工管护等5个环节(图1)。

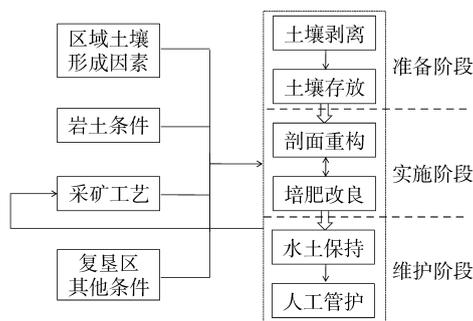


图1 土壤生境再造阶段与环节

Fig. 1 Stages and segments of soil habitat reconstruction

按土地损毁的成因和形式,煤矿土壤生境再造主要分为采煤沉陷地、露天煤矿扰动区和矿区固体污染废弃物堆积地3种^[52]。国外对露天矿复垦土壤生境再造的研究起步较早,再造措施与采矿工艺结合得较好,并形成了一些好的模式。近年来,针对特定用地类型(如排土场),国内学者也提出了相应的具有较强区域特色的土壤生境再造技术和模式^[25]。科学合理的土壤生境再造技术与模式要求对复垦土壤(土源土壤)的土壤地质背景、物理性质、化学性质和生物性状等进行详细的分析研究。

Dancer等研究发现了影响植被群落动态演替的土壤因子主要是土壤氮素、磷素和有机质^[53];

Costigan等对限制矿区植被生长恢复的土壤属性因子进行了分析研究,提出土壤肥力和pH值是限制植被生长恢复的主要因素^[54];Pichtel等分别采用造纸厂污泥、污水污泥、石灰和粉煤灰作为改良剂修复受损土壤,结果表明:造纸厂污泥、污水污泥和与石灰处理改良土壤的效果相当,而粉煤灰作为添加物由于其无法提供适宜的pH值和足够的营养水平而改良效果最差^[55];Johnson等^[56]和Bendfeldt等^[57]分别对较长复垦年限(15年和16年)的土壤性质进行了研究;Frouz等分析了矿区复垦土壤与植被的演替规律及其交互作用影响^[58];Alday等分析了不同覆土厚度对采煤损毁土地植物演替产生的影响,认为当覆土厚度达到一定程度时,植被的多样性恢复和植被演替主要受复垦年限和复垦土壤pH值的影响^[59];Konstantinos等通过对废弃的Kokkinopezoula和Mathiatis矿进行调查,得知矿区土壤中重金属含量极高,水中pH值极低,土壤污染治理势在必行,并从法律层面提出了土壤污染治理的要求^[60]。

我国在复垦土壤物理性质、化学性质和生物性状方面的研究起步较晚,但近年来发展迅速。Zhao等对西北黄土高原区平朔露天煤矿不同复垦年限和复垦植被措施下的复垦土壤物理、化学和生物性质进行了分析,发现随着复垦年限的增加,土壤发育水平明显升高^[13];王金满等利用土壤多重分形理论法分析了山西平朔矿区安太堡露天煤矿排土场4种重构土壤方案的2mm以下土壤粒径分布分形情况,发现黄土重构剖面0~90cm内土壤多重分形参数变化明显^[61];马佳慧等结合野外调查和室内分析,对黑岱沟矿区排土场不同土地复垦方式下的土壤性质进行了研究^[62];郭建英等以典型草原区的胜利东二号露天矿排土场边坡为例,利用标准径流场定位观测设施对不同治理措施植被生长-枯萎期间的次降雨产流、产沙过程进行了连续观测,发现生物和工程措施组合要优于单纯的生物措施^[63];李晋川等选取土壤有机碳、全氮、碱解氮、细菌数量、蔗糖酶、固氮菌数量等作为安太堡露天煤矿植被模式筛选与土壤生态肥力评价的科学指标^[64]。

目前尚未形成系统的土壤重构理论与方法体系,多数研究仍停留在不同复垦方式(措施组合)下复垦土壤理化性质差异性分析。今后,应针对露天煤矿不同用地类型(排土场、煤矸石山),通过长期野外定位实验,开展不同重构方案下复垦土壤过程量化及其互馈机制研究,为露天煤矿不同用地类型土壤重构技术与模式的选择提供依据。

4.2 植被重建

植被恢复是露天煤矿生态恢复的关键,几乎所

有自然生态系统的恢复都以植被恢复为前提。露天煤矿植被重建研究主要包括重建区自然条件、植被的适宜性筛选、建植与管理技术和植被配置模式等。

国外矿区植被重建研究更侧重于植物适宜性筛选、建植技术和配置模式等。Parrotta等通过研究认为快速生长的外来树种比本地物种在生物多样性恢复的前几年中更具优势^[65];Holl通过对美国东部复垦35年的煤矿植被研究发现恢复35年的植被组成与棕壤阳坡缓坡植物群落相似,但种植具有入侵性的外来种会减缓植被演替的进程^[66];Martinez-Ruiz等分析了坡向对露天矿排弃的废弃物上植被恢复的影响,发现北坡植被演替速度较快^[67];Pensa等比较了在4种废弃油页岩堆上生长35年的林木,认为自然演替更能够促进多种植被的恢复^[68];Burton等认为自然过程的恢复会长达十几年或几个世纪,可利用人工演替过程加快植被恢复^[69];Zipper等以美国Appalachian露天煤矿为例,提出了涵盖合适的生根培养基、松散不同程度的生根培养基、压实的地表覆盖物、不同的树种和适宜的树木种植技术等内容的林地复垦技术^[70];Sullivan等以阿巴拉契亚煤矿区域为例,提出了符合当地实际的最优硬木植树造林和在复垦矿山土地上进行林地复垦的政策措施^[71]。

国内在该方面也取得了一定的进展,研究对象主要为露天煤矿排土场,研究内容侧重于重建后植被的演变及其驱动机制。苏伟等以辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场为例,基于1975—2000年共4期多时相Landsat遥感影像,构建植被覆盖度指数,研究了该排土场25年来植被生长状况及时空变化特征^[72];Zhao等对安太堡排土场植物种群数量特征与空间结构进行了研究^[73];王金满等分析了安太堡露天煤矿复垦排土场不同复垦年限土壤环境因子和乔木林地植被生物量的动态演变规律^[74];赵洋等对黑岱沟露天煤矿北排土场不同人工植被配置模式对生物多样性的影响进行了研究^[75]。国内也有部分学者对植被适宜性筛选、重建技术等进行了初步探讨。台培东等认为草原露天矿排土场最理想的恢复植物为沙棘,其可以在短时期内形成郁闭的人工沙棘灌丛,并能很好地留住如猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)等风滚植物,土壤培肥及水土保持效果显著^[76];陈来红等以霍林河露天煤矿排土场为例,基于实地考察和观测,提出了一套场地整理、表土覆盖、排土场稳定和边坡护理、植物种类选择、种植模式,以及种植与管护等适合霍林河露天煤矿排土场的植被重建技术^[77]。

综合国内外的文献资料可知,目前该方面研究重在排土场的乔灌草配置模式和已恢复植被的演变

及其驱动机制等。基于长时间序列的野外定位试验设计,结合待重建区自然条件和重建对象的工程条件,开展露天煤矿复垦过程中涵盖植物适宜性筛选、建植与管理技术、配置模式以及植被演变等方面综合性一体化研究是必要的。

4.3 复垦土地景观结构与生态功能

露天煤矿开采复垦过程将改变原有土地景观结构(景观组成要素的大小、形状、数量、类型、多样性及其空间配置关系、异质性等),结构发生变化必然导致功能的变化。这将使得矿区土地利用斑块密度、破碎度、边缘密度和分形维数增大,导致矿区生态系统的稳定性降低;使得部分生态廊道被切断,阻碍了矿区生物的迁徙与觅食等活动,导致区域生物多样性的下降。

Soltanmohammadi等采用一系列逻辑分析方法对复垦后的土地用途进行了规划^[78]。毕如田等将平朔安太堡露天煤矿复垦区的5个排土场按照植被覆盖和地形分类,并利用3S技术和分形理论对景观结构进行分析,讨论了景观特性及其变化的分形性质^[79];李保杰等应用GIS和景观生态学方法,以徐州市九里矿区土地复垦项目为例,分析了该区土地利用结构和景观格局变化,并结合景观格局优化目标建立了相应的评价指标体系,利用层次分析法对各评价因子赋以权重,对矿区复垦的生态效应进行评价^[80];徐嘉兴等以徐州市贾汪矿区为例,运用RS、GIS和景观生态学研究方法,从生态系统稳定程度与干扰程度2个方面构建景观生态质量评价模型,并分析评价了该区2001—2010年间的景观生态质量及变化^[81];张立平等以北方农牧交错生态脆弱区魏家岭露天煤矿为例,分析了矿区开采前、开采结束和完全复垦3个阶段的13种格局水平景观指数的粒度效应,筛选了能够反映矿区开采损毁、复垦对景观格局产生影响的10个代表性景观指数^[82];张灵等以安太堡露天煤矿西排土场为研究对象,选定58个样点、18个立地因子进行调查,分析了排土场立地条件及特征,并运用SPSS聚类分析法对样点进行了立地类型划分^[83]。

目前该方面研究主要为基于遥感技术从土地利用和土地覆被角度分析矿区景观异质性和动态变化。露天煤矿不同时空尺度复垦土地景观“斑块—廊道—基质”的组合格局、时空耦合异质性及其生态效应响应,以及基于此的复垦土地景观结构与生态功能整体优化有待进一步研究。

5 露天煤矿生物多样性保护与恢复的相关法规政策

西方发达国家均制定了专门针对露天开采复垦

的法律法规,如美国的《露天开采控制与复垦法》,澳大利亚的《采矿法》、《环境保护法》和《环境和生物多样性保护法》,加拿大的《领土土地法》和《公共土地授权法》,德国的《联邦自然保护法》等,这些法律法规明确要求在露天矿山开采初期、建设与运营过程中和闭矿后等生产建设全过程中必须注重生物多样性保护与恢复。①明确规定开采初期应注重采用预防控制措施降低矿山开采对生物多样性的影响,并实施生物多样性调查和影响评价。美国的《露天采矿与复垦法》明确要求,矿区土地复垦活动要剥离表土,建立了关于农用地进行采矿活动前表层土的剥离、存储、回填和重建的相关规定;加拿大的《表土保护法》、《领土土地法》和《公共土地授权法》等规定,工程建设、矿山勘察和土地复垦要进行表土剥离与养护,矿山开采前必须对当地的生态环境状况进行本底调查,并将其作为采矿过程和结束后复垦参照;澳大利亚的《采矿法》提出土地复垦过程中必须进行表土剥离与养护,矿山开采前必须进行环境影响评价,编制详尽复垦方案。②确定建设与运营过程应遵循生物多样性影响最小化原则。国际矿业与金属理事会(ICMM)制定了“Good practice guidance for mining and biodiversity”,对矿业开发过程中的生物多样性保护进行了政策与技术层面的指导。加拿大规定矿区勘查阶段的探矿、钻孔等活动要尽可能地减少对土地、水、植被、野生动物的影响。③确保闭矿规划应以生物多样性保护与恢复为目标。将生物多样性保护目标纳入闭矿规划中,以植被配置与污染物防治为闭矿期关键技术,维护生态系统功能的稳定性。澳大利亚要求复垦后的土地要具备再利用的条件,且稳定和不再释放污染;德国的《联邦自然保护法》规定矿山开采后必须通过修复、复原、复垦等措施对景观进行补偿,使其接近于自然或半自然的状态,保护生物多样性。

矿区土地复垦生物多样性保护与恢复的重要性早已被大家认识,但我国土地复垦领域专门立法相对滞后。2007年之前,我国制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《中国生物多样性保护战略和行动计划》(2011—2030年)中都将与生态脆弱区域生态系统、露天煤矿生物多样性保护与恢复相关的相关研究作为优先主题和重点研究领域,旨在明确矿区生产建设全过程中应充分考虑生物多样性保护的要求,保护当地物种和生态系统,并研究提出煤矿区的生态恢复治理技术和模式,增强煤矿区退化生态系统的生态恢复能力。2007年之后,随着我国《土地复垦条例》、《土地复垦条例实施办法》、《土地复垦方案编制规程》和《土地

复垦质量控制标准》等土地复垦领域专门的法律法规和标准规范的相继颁布出台,推动了我国土地复垦理论和实践发展,也为我国今后土地复垦快速、有序发展构建了制度框架。但是,目前我国露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复的专门立法几乎缺失,今后一段时间,应充分将生物多样性保护融入露天煤矿开采、损毁和复垦中,加大以最大限度地实现开采中保护和复垦中恢复为目标的露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复的专门立法力度,形成露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复的法律体系。

6 展望

国内外学者已经认识到生物多样性保护与恢复是露天煤矿生态健康和实现可持续发展的重要基础,已在露天煤矿生物多样性调查、监测和评价以及土壤生境再造和植被恢复方面进行了大量的研究,也取得了一定的成果。但目前和保护性开采技术优化、不同层次生物多样性尺度效应与耦合关系、生物多样性受损诊断预测以及露天煤矿景观结构与功能优化研究等方面的研究仍显不足,这势必影响露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复的实践工作。

(1) 保护性开采技术优化研究

在分析比较国内外已有的露天煤矿开采技术、工艺流程等的基础上,针对露天煤矿矿区地形地貌、区域环境特征等,进一步开展露天煤矿开采技术优化研究,对露天煤矿采、剥、运、排、覆等环节周期、排土场排弃参数、采排布局等进行优化,减少开采过程中对生物多样性的影响。开展集保护性开采、资源综合利用化、采矿与生态环境修复一体化以及粉尘、烟尘净化等综合一体的绿色开采规划设计的研究,注重矿区生态修复,保护与恢复矿区生物多样性。

(2) 借助于新技术手段,深化露天煤矿生物多样性受损评估和预测研究

结合露天煤矿开采工艺流程、生产开发时序和土地损毁特征以及开采对生物多样性的影响等,基于高精度多源多时序遥感图像,采用改进的遥感信息提取模型和GIS结合的技术手段,深化生物多样性受损机制分析,建立受损诊断指标体系和诊断标准,准确把握受损过程中不同外界因素对受损的作用程度,科学制定合理高效的治理和保护策略。基于长期野外定位观测站,针对不同类型的生物进行模拟试验与分析,对受损的生理变化过程进行观测,从微观机理方面对受损过程和程度进行研究。另外,需探讨其他领域(如土地利用和土地覆被变化)的理论与技术方法应用于露天煤矿生物多样性预测

可行性,科学预测露天煤矿生物多样性受损趋势。

(3) 不同尺度和层次的露天煤矿生物多样性尺度效应与耦合关系研究

目前的研究多局限于较小尺度,且多数针对物种多样性。针对露天煤矿开采复垦过程中生物多样性演变特征,不同尺度露天煤矿生物多样性及其尺度效应、不同层次露天煤矿生物多样性及其耦合关系以及尺度、层次累加效应的研究相对较少。根据地面试验、野外调查和遥感观测,综合考虑尺度效应,对露天煤矿生物多样性在遗传、物种、生态系统和景观层次空间分布特征进行研究,揭示不同尺度不同层次间有何种耦合关系,进而揭示生物多样性维持机制。

(4) 露天煤矿景观结构与功能优化研究

结合露天煤矿矿区生物区系条件和环境特征,

开展露天煤矿不同时空尺度复垦土地景观“斑块-廊道-基质”的组合格局、时空耦合异质性及其生态效应响应研究。从景观结构与生态功能的整体性及其与周围环境的协调性出发,开展复垦土地景观结构与生态功能的整体布局优化研究。研发涵盖植物物种筛选、植物重建、斑块廊道设计等矿区景观结构与功能优化技术,为矿区复垦土地生态系统稳定性的提高、矿区及其周边区域生态安全保障能力提升和绿色国土空间格局建立提供强有力的科技和信息支撑。

除上述4个方面外,还应在露天煤矿生物多样性专门立法、土壤重构理论方法、植被重建技术体系等方面开展相关研究,进而为露天煤矿生物多样性保护与恢复提供法律和理论依据以及技术支撑。

参 考 文 献

- 1 罗明. 土地复垦潜力调查评价研究[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2013.
- 2 赵洋,张鹏,胡宜刚,等. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被配置对生物土壤结皮拓殖和发育的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):269-275.
- 3 Zhao Yang, Zhang Peng, Hu Yigang, et al. Effect of re-vegetation types on colonization and growth of biological soil crusts of dumping site in open pit coal mine of Heidaigou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(2): 269-275. (in Chinese)
- 4 Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity[J]. Nature, 2000, 405(6783):208-211.
- 5 Toledo Á, Burlingame B. Biodiversity and nutrition: a common path toward global food security and sustainable development[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(6-7): 477-483.
- 6 United Nations. Convention on biological diversity (text with annexes)[R]. New York: United Nations,1992.
- 7 Noss R F. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach[J]. Conservation Biology, 1990, 4(4):355-364.
- 8 West N E. Biodiversity of rangelands[J]. Journal of Range Management, 1993, 46(1): 2-13.
- 9 Crawley M J, Harral J E. Scale dependence in plant biodiversity[J]. Science, 2001, 291(5505): 864-868.
- 10 Reusch T B H, Ehlers A, Hämmerli A, et al. Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(8): 2826-2831.
- 11 Hughes A, Inouye B, Johnson M, et al. Ecological consequences of genetic diversity[J]. Ecology Letters, 2008, 11(6): 609-623.
- 12 Williams C B. Area and number of species[J]. Nature, 1943, 152(3853): 264-267.
- 13 茹文明,张金屯,张峰,等. 历山森林群落物种多样性与群落结构研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4):561-566.
- 14 Ru Wenming, Zhang Jintun, Zhang Feng, et al. Species diversity and community structure of forest communities in Lishan Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4):561-566. (in Chinese)
- 15 Zhao Z Q, Shahroui I, Bai Z K, et al. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 13 years in the West-Northern Loess Plateau of China[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 55(3): 40-46.
- 16 Algar A C, Kharouba H M, Young E R, et al. Predicting the future of species diversity: macroecological theory, climate change, and direct tests of alternative forecasting methods[J]. Ecography, 2009, 32(1): 22-33.
- 17 Magle S, Reyes P, Zhu J, et al. Extirpation, colonization, and habitat dynamics of a keystone species along an urban gradient [J]. Biological Conservation, 2010, 143(9): 2146-2155.
- 18 Wittebolle L, Marzorati M, Clement L, et al. Initial community evenness favors functionality under selective stress[J]. Nature, 2009, 458(7238): 623-626.
- 19 Helmus M, Keller W, Paterson M, et al. Communities contain closely related species during ecosystem disturbance[J]. Ecology Letters, 2010, 13(2): 162-174.
- 20 Nemani R, Hashimoto H, Votava P, et al. Monitoring and forecasting ecosystem dynamics using the Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS)[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(7): 1497-1509.
- 21 McCann K. The diversity-stability debate[J]. Nature, 2000, 405(6783): 228-233.
- 22 Ives A R, Carpenter S. Stability and diversity of ecosystems[J]. Science, 2007, 317(5834): 58-62.
- 23 傅伯杰,吕一河,陈利顶,等. 国际景观生态学研究新进展[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 798-804.
- 24 Fu Bojie, Lü Yihe, Chen Liding, et al. The latest progress of land scape ecology in the world[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,

- 28(2): 798–804. (in Chinese)
- 22 Turner M. Landscape ecology in North America: past, present, and future[J]. *Ecology*, 2005, 86(8): 1967–1974.
- 23 魏远, 顾红波, 薛亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 107–114.
Wei Yuan, Gu Hongbo, Xue Liang, et al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(2): 107–114. (in Chinese)
- 24 张峰玮, 甄选, 陈传玺. 世界露天煤矿发展现状及趋势[J]. *中国煤炭*, 2014, 40(11): 113–116.
Zhang Fengwei, Zhen Xuan, Chen Chuanxi. Development status and tendency of world open-pit coal mine [J]. *China Coal*, 2014, 40(11): 113–116. (in Chinese)
- 25 李晋川, 白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建——平朔露天矿的研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 26 王军, 张亚男, 郭义强. 矿区土地复垦与生态重建[J]. *地域研究与开发*, 2014, 33(6): 113–116.
Wang Jun, Zhang Ya'nan, Gu Yiqiang. Land reclamation and ecological reconstruction of mining areas [J]. *Areal Research and Development*, 2014, 33(6): 113–116. (in Chinese)
- 27 Monjezi M, Shahriar K, Dehghani H, et al. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran [J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(1): 205–216.
- 28 Katpatal Y B, Patil S A. Spatial analysis on impacts of mining activities leading to flood disaster in the Erai watershed, India [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2010, 3(1): 80–87.
- 29 贺亮. 露天采矿的生态影响综合评价与生态环境保护[D]. 西安: 西北大学, 2010.
He Liang. Comprehensive evaluation of the ecological impact and environment protection of surface mining [D]. Xi'an: Northwestern University, 2010. (in Chinese)
- 30 黄丹, 刘庆生, 刘高焕. 黑岱沟煤矿生态修复遥感监测及效果评价[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(1): 69–74.
Huang Dan, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan. Remote sensing monitoring and effect evaluation on ecological restoration of Heidaigou coal mining [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(1): 69–74. (in Chinese)
- 31 Antwi E K, Wiegand G. Standards and indicators for monitoring impact of disturbance on biodiversity in a post-mining area using GIS [M] // Schmidt M, Glasson J, Emmelin L, et al. Standards and Thresholds for Impact Assessment. Berlin: Springer, 2008.
- 32 Charou E, Stefouli M, Dimitrakopoulos D, et al. Using remote sensing to assess impact of mining activities on land and water resources [J]. *Mine Water and the Environment*, 2009, 29(1): 45–52.
- 33 庞妍, 同延安, 梁连友, 等. 矿区农田土壤重金属分布特征与污染风险研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 165–171.
Pang Yan, Tong Yan'an, Liang Lianyou, et al. Distribution of farmland heavy metals and pollution assessment in mining area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 165–171. (in Chinese)
- 34 Thomas K, Timothy A, Waner J B. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(1): 100–112.
- 35 胡海德, 李小玉, 杜宇飞, 等. 生物多样性遥感监测方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(6): 1591–1596.
Hu Haide, Li Xiaoyu, Du Yufei, et al. Research advances in biodiversity remote sensing monitoring [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(6): 1591–1596. (in Chinese)
- 36 Crist P J, Kohley T W, Oakleaf J. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert systems tool [J]. *Landscape Ecology*, 2000, 15(1): 47–62.
- 37 孙刚, 万华伟, 王昌佐, 等. 蒙陕甘宁能源金三角植被覆盖遥感监测与动态分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 247–250.
Sun Gang, Wan Huawei, Wang Changzuo, et al. Vegetation monitoring and analyzing of golden triangle energy in Inner Mongolia, Shaanxi, Gansu, and Ningxia region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 247–250. (in Chinese)
- 38 Bongco I G, Santos-Borja A C, Nauta T A. Application of habitat evaluation procedure for impact assessment studies in Laguna de Bay, Philippines [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506(1–3): 811–817.
- 39 Etienne R S, Vos C C, Jansen M J W. Ecological impact assessment in data-poor systems: a case study on metapopulation persistence [J]. *Environmental Management*, 2003, 32(6): 760–777.
- 40 Gontier M. Scale issues in the assessment of ecological impacts using a GIS-based habitat model — a case study for the Stockholm region [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2007, 27(5): 440–459.
- 41 Naidoo G, Naidoo Y. Coal dust pollution effects on wetland tree species in Richards Bay, South Africa [J]. *Wetlands Ecology & Management*, 2005, 13(5): 509–515.
- 42 Nanos G D, Ilias I F. Effects of inert dust on olive (*Olea europaea* L.) leaf physiological parameters [J]. *Environmental Science and Pollution Research-International*, 2007, 14(3): 212–214.
- 43 Brandt C J, Rhoades R W. Effects of limestone dust accumulation on lateral growth of forest trees [J]. *Environmental Pollution*, 1973, 4(3): 207–213.
- 44 Latifovic R, Fytas K, Chen J, et al. Assessing land cover change resulting from large surface mining development [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2005, 7(1): 29–48.

- 45 Erenner A. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitomer opencast coal mine[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(1): 20–26.
- 46 姚峰, 古丽·加帕尔, 包安明, 等. 基于遥感技术的干旱荒漠区露天煤矿植被群落受损评估[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 707–713.
Yao Feng, Guli Jiapaer, Bao Anming, et al. Damage assessment of the vegetable types based on remote sensing in the open coalmine of arid desert area[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(4): 707–713. (in Chinese)
- 47 Horler D H N, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 273–288.
- 48 Mcgwire K, Minor T, Fenstermaker L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 27(3): 360–374.
- 49 付慧, 白中科, 张树礼, 等. 呼伦贝尔草原矿生态受损预测与修复对策[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 90–94.
Fu Hui, Bai Zhongke, Zhang Shuli, et al. Ecological damage prediction and restoration of coal mine in Hulun Buir Grassland [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5): 90–94. (in Chinese)
- 50 Britz W, Verburg P H, Leip A. Modelling of land cover and agricultural change in Europe: combining the CLUE and CAPRI – Spat approaches[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(1–2): 40–50.
- 51 张云鹏, 孙燕, 陈振杰. 基于多智能体的土地利用变化模拟[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 255–265.
Zhang Yunpeng, Sun Yan, Chen Zhenjie. Simulation of land use change using multi-agent model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 255–265. (in Chinese)
- 52 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. *土壤*, 2005, 37(1): 8–12.
Hu Zhenqi, Wei Zhongyi, Qin Ping. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 8–12. (in Chinese)
- 53 Dancer W S, Handley J F, Bradshaw A D. Nitrogen accumulation in kaolin mining wastes in Cornwall I. Natural communities [J]. *Plant & Soil*, 1977, 48(1): 153–167.
- 54 Costigan P A, Bradshaw A D, Gemmell R. The reclamation of acidic colliery spoil waste I: acid production potential[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1981(8): 685–678.
- 55 Pichtel J R, Dick W A, Sutton P. Comparison of amendments and management practices for long-term reclamation of abandoned mine lands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 766–772.
- 56 Johnson C D, Skousen J G. Mine soil properties of 15 abandoned mine land sites in West Virginia[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24: 635–643.
- 57 Bendfeldt E S, Burger J A, Daniels W L. Quality of amended mine soils after sixteen years[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1736–1744.
- 58 Frouz J, Prach K, Pizl V, et al. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(1): 109–121.
- 59 Alday J G, Marrs R H, Martinez-Ruiz C. Vegetation succession on reclaimed coal wastes in Spain: the influence of soil and environmental factors[J]. *Applied Vegetation Science*, 2011, 14(1): 84–94.
- 60 Konstantinos K, Ifigenia G, Marinos S. Legacy soil contamination at abandoned mine sites: making a case for guidance on soil protection[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 94(3): 269–274.
- 61 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 230–238.
Wang Jinman, Zhang Meng, Bai Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(4): 230–238. (in Chinese)
- 62 马佳慧, 张兴昌, 邱莉萍. 黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 93–96.
Ma Jiahui, Zhang Xingchang, Qiu Liping. Study on soil properties under different types of reclamation in Heidaigou mine dump [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 93–96. (in Chinese)
- 63 郭建英, 何京丽, 李锦荣, 等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 296–303.
Guo Jianying, He Jingli, Li Jinrong, et al. Effects of different measures on water erosion control of dump slope at opencast coal mine in typical steppe[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 296–303. (in Chinese)
- 64 李晋川, 王翔, 岳建英, 等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 66–71.
Li Jinchuan, Wang Xiang, Yue Jianying, et al. Evaluation on soil ecologic fertility during vegetation succession in Antaibao open pit[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 66–71. (in Chinese)
- 65 Parrotta J A. Productivity, nutrient cycling and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta* and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 124(1): 45–77.
- 66 Holl K D. Long-term vegetation recovery on reclaimed coal surface mines in the eastern USA[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 39(6): 960–970.
- 67 Martinez-Ruiz C, Fernández-Santos B. Effect of substrate coarseness and exposure on plant succession in uranium-mining wastes [J]. *Plant Ecology*, 2001, 155(1): 79–89.

- 68 Pensa M, Sellin A, Luud A, et al. An analysis of vegetation restoration on opencast oil shale mines in Estonia[J]. *Restoration Ecology*, 2004, 12(2): 200–206.
- 69 Burton C M, Burton P J, Hebda R, et al. Determining the optimal sowing density for a mixture of native plants used to revegetate degraded ecosystem[J]. *Restoration Ecology*, 2006, 14(3): 379–390.
- 70 Zipper C E, Burger J A, Skousen J G, et al. Restoring forests and associated ecosystem services on Appalachian coal surface mines[J]. *Environmental Management*, 2011, 47(5): 751–765.
- 71 Sullivan J, Amacher G S. Optimal hardwood tree planting and forest reclamation policy on reclaimed surface mine lands in the Appalachian coal region[J]. *Resource Policy*, 2013, 38(1): 1–7.
- 72 苏伟, 孙中平, 李道亮, 等. 基于多时相 Landsat 遥感影像的海州露天煤矿排土场植被时空特征分析[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 5860–5868.
Su Wei, Sun Zhongping, Li Daoliang, et al. Monitoring of temporal and spatial change of vegetation in waste dump of Haizhou opencast coal mine area using multi-temporal Landsat remote sensing images[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5860–5868. (in Chinese)
- 73 Zhao Z Q, Bai Z K, Zhang Z, et al. Population structure and spatial distributions patterns of 17 years old plantation in a reclaimed spoil of Pingshuo opencast mine, China[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44(3): 147–151.
- 74 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 223–232.
Wang Jinman, Guo Lingli, Bai Zhongke, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(21): 223–232. (in Chinese)
- 75 赵洋, 张鹏, 胡宜刚, 等. 露天煤矿排土场不同配置人工植被对草本植物物种多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 387–392.
Zhao Yang, Zhang Peng, Hu Yigang, et al. Effect of re-vegetation on herbage plant species diversity of dumping site in an open pit coal mine[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 387–392. (in Chinese)
- 76 台培东, 孙铁珩, 贾宏宇, 等. 草原地区露天矿排土场土地复垦技术研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 90–93.
Tai Peidong, Sun Tieheng, Jia Hongyu, et al. Restoration for refuse dump of open-cast mine in steppe region[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(3): 90–93. (in Chinese)
- 77 陈来红, 马万里. 霍林河露天煤矿排土场植被恢复与重建技术探讨[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(4): 117–120.
Chen Laihong, Ma Wanli. Discussion on vegetation restoration and reconstruction in dumping site of open coal mine in Huolinhe [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(4): 117–120. (in Chinese)
- 78 Soltanmohammadi H, Osanloo M, Bazzazi A A. An analytical approach with a reliable logic and a ranking policy for post-mining land-use determination[J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 364–372.
- 79 毕如田, 白中科, 李华, 等. 基于 3S 技术的大型露天矿区复垦地景观变化分析[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(11): 1157–1161.
Bi Rutian, Bai Zhongke, Li Hua, et al. Landscape change analysis of reclamation land in open cast coal mine based on 3S technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(11): 1157–1161. (in Chinese)
- 80 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 251–256.
Li Baojie, Gu Hehe, Ji Yazhou. Evaluation of landscape pattern changes and ecological effects of land reclamation project in mining area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3): 251–256. (in Chinese)
- 81 徐嘉兴, 李钢, 陈国良, 等. 土地复垦矿区的景观生态质量变化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 232–239.
Xu Jiaying, Li Gang, Chen Guoliang, et al. Changes of landscape ecological quality for land reclamation in mining area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 232–239. (in Chinese)
- 82 张立平, 张世文, 叶回春, 等. 露天煤矿区土地损毁与复垦景观指数分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 55–64.
Zhang Liping, Zhang Shiwen, Ye Huichun, et al. Landscape indices of land damage and land reclamation in an opencast coal mine[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 55–64. (in Chinese)
- 83 张灵, 白中科, 景明, 等. 黄土区大型露天煤矿复垦排土场植被恢复立地类型划分——以安太堡露天煤矿为例[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 54–60.
Zhang Ling, Bai Zhongke, Jing Ming, et al. Type classification for vegetation restoration on dump of large opencast coal-mine in loess area—taking Antaibao opencast coal-mine as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 54–60. (in Chinese)