



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向

毕银丽^{1,2}, 彭苏萍^{1,2}, 杜善周³

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)生态修复研究院,北京 100083; 3. 神华准格尔能源有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯 017100)

摘要:露天煤矿开采对生态环境最严重和直接的影响是对水资源破坏与土地资源的挖损占压,以及对生态系统的物种破坏。西部干旱半干旱露天矿区生态重构的关键是水资源保护与利用、排土场土层结构重构、表土改良和植被优化组合。西部干旱半干旱露天矿区生态重构核心技术是研发露天矿区岩层结构与含水量探测技术,监测地下水存在的范围与边界。以水资源量为约束,构建排土场近地表合理的土层结构,实现重构土层保水涵水动态协调供给。提出干旱半干旱露天矿排土场近地表高效低成本的表土生态层-涵水层-隔水层的3层土层重构结构模型,研发物探检测成套技术与装备,监测矿坑水来源、排土场土层结构与含水率,保证生态工程水资源有效利用。结合土地的生态承载力,对排土场重构生态进行功能分区与景观设计。开发新型微生物菌剂培养配方,揭示微生物改良土壤及抗逆境机理,形成较好的有机生物立体生态重构模式,可产生较好的经济、生态和社会效益,促进矿区绿色可持续发展。通过对西部干旱半干旱露天矿区及其周边环境动态观测,在生态条件差的地区,人工干预能有效地打破原始生态禁锢,刺激生态正向发展,获得西部干旱半干旱露天矿区自然与人工生态协调发育规律。解除了科技界担心大规模的煤炭开发使西部干旱半干旱地区的生态环境进一步恶化,造成“雪上加霜”效应的难题。同时针对西部干旱半干旱区露天矿排土场重构土壤的结构差、肥力低、植物种类单一,重构生态难的现状,采用微生物-植物联合修复技术,研发多型号生物修复菌剂和基质,有效地促进了植物根系发育,增强了植物抗土壤压实、养分贫瘠、干旱缺水及易盐碱化等逆境的生理生化反应,人工干预重构后的生态环境比原生态效应提高10倍以上。实践了西部露天煤矿区开发金山银山,再造绿水青山的生态理念。

关键词:西部干旱半干旱区;露天煤矿区;生态重构;水资源保护利用;3层海绵土层重构模型**中图分类号:**TD88;S156**文献标志码:**A**文章编号:**0253-9993(2021)05-1355-10

Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China

BI Yinli^{1,2}, PENG Suping^{1,2}, DU Shanzhou³

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Institute of Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 017100, China)

收稿日期:2021-04-24 **修回日期:**2021-05-09 **责任编辑:**韩晋平 **DOI:**10.13225/j.cnki.jccs.ST21.0707**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51974326);首都科技领军人才资助项目(Z1811000631802)**作者简介:**毕银丽(1971—),女,陕西米脂人,长江学者特聘教授。E-mail:ylbi88@126.com

彭苏萍(1959—),男,江西萍乡人,中国工程院院士。E-mail:psp@cumt.edu.cn

引用格式:毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(5):1355-1364.

BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355-1364.



移动阅读

Abstract: The most serious and direct impact of open-pit coal mining on the ecological environment is the destruction of water resources and land resources, as well as the destruction of species in the ecological system. The key to ecological reconstruction of arid and semi-arid dumps is to develop the detection technology of rock structure and water content, in which monitor the range and boundary of underground water. Based on the constraints of water resources, a reasonable soil layer structure of the dump was constructed to obtain the dynamic characteristics of soil water retention and culvert. A three-layer sponge structure model for mining ecological environment reconstruction was proposed and implemented, including topsoil ecological layer, culvert layer and waterproof layer. Through research the geophysical detection technology and equipment, the source of mine water, soil structure and moisture content of the dump were monitored, so as to ensure the effective utilization of ecological engineering water resources. Combined with the ecological capacity of the land, the functional zoning and landscape design of the reconstruction ecology of the dump were carried out. Meanwhile, the development of new microbial culture formula has formed a better organic biological three-dimensional ecological reconstruction combination mode, which has produced better economic, ecological and social benefits, promoted the green and sustainable development of the mining area. Through the dynamic observation of arid and semi-arid open-pit mining areas and their surrounding environment, the artificial intervention can effectively break the confinement of primitive ecology, stimulated the positive development of ecology and obtained the coordinated development law of natural and artificial ecology. It solves the scientific concern that a large-scale coal exploitation will further worsen the ecological environment in arid and semi-arid areas in western China, resulting in the “worse” effect. The open-pit dumps had poor soil structure, low soil fertility, single plant composition, and difficult ecological reconstruction. Therefore, the research and development of multiple types of biological agents and substrates can effectively promote the development of plant roots, enhance the resistance of plants to soil compaction, nutrient impoverishment, drought, water shortage and salinization. The ecological environment effect after the artificial intervention is more than 10 times higher than that in the original state, realizing the ecological concept of not only maintaining “the mountains of gold and silver”, but also reestablishing “the lucid waters and lush mountains”.

Key words: arid and semi-arid areas of Western China; open pit coal mine; ecological reconstruction; water resources protection and utilization; three-layer sponge structure model

黄河流域是我国煤炭工业的主产区,煤炭产量占全国 70% 以上。该地区气候干旱半干旱,年降雨量少,蒸发量大,年蒸发量超过降雨量的 6 倍以上,大规模的现代煤炭开采对地区的生态环境造成严重的影响。2020 年中共中央政治局召开会议审议了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》^[1]。会议指出,黄河流域生态保护和高质量发展是事关中华民族伟大复兴的千秋大计,要综合治理、系统治理、源头治理。这其中,黄河流域煤炭基地的生态环境修复是整个黄河流域生态修复的重要组成部分,必须高度重视黄河流域煤矿区生态环境修复与治理^[2-3]。

加强干旱半干旱露天煤矿生态环境治理的研究与工程示范是当务之急。由于黄河中上游鄂尔多斯盆地北沿一带的煤炭资源丰富、煤层厚、煤质好、埋藏浅、开采成本低,有利于露天开采。近年来,随着我国西部煤矿露天开采的发展,露天煤矿的产量从以前的不到 10% 提高到 16.9%,而且这一比例还在进一步扩大。但该地区水资源严重缺乏(水资源总量仅占全国的 3.9%),制约了生态重构效率。而该地区是

我国乃至世界水土流失最严重的地区之一,水土流失面积占到 92.5%。露天煤矿开发进一步加剧了矿区水资源的匮乏,特别是露天开采过程对矿区上覆地层高强度的剥离,破坏了原有矿藏的上覆岩层结构,风蚀沙化更为严重,土壤侵蚀模数最高可达 18 000 t/(km²·a),使原生地表更加支离破碎,沟壑纵横,生态环境更加脆弱,抵御自然灾害的能力进一步减弱。

剥离后的岩土要搬运倒堆形成新的松散堆积排土场,使露天矿区的地表地形地貌和生态环境发生了根本的变化。重构排土场时一般底层为破碎岩石,仅在表层上覆 40 cm 以上土壤层,这种堆放结构在西部干旱半干旱露天矿区进一步造成水资源流失,土地生产力下降,植被生长难,生态景观破碎,难以保证生态重构的高效性^[4-5]。该地区每平方公里每年水土流失量高达 1.88 万 t,每年向黄河输送泥沙达 1 亿 t 以上,约占黄河上中游地区年入黄河泥沙总量的 1/16,植被覆盖度不足 25%,被国内外生态专家喻为“地球癌症”。因此,在 20 世纪 90 年代初讨论鄂尔多斯盆

地煤炭开发时,就有专家坚决反对,担心大规模的煤炭开发使西部干旱半干旱地区的生态环境进一步恶化,造成“雪上加霜”的效应!

因此,笔者就西部干旱半干旱露天煤矿区生态重构目前的研究进展、关键技术难点和发展方向进行论述,为我国黄河流域煤矿区高质量发展提供一些新的思路和技术。

1 干旱半干旱露天煤矿区生态重构研究现状

露天煤矿排土场生态重构是土层重构、水分高效利用、表土改良及生态重构的综合生态效应。土层重构是生态重构的基础,水分在排土场土壤的高效节约利用是干旱半干旱露天矿区生态重构的关键,而排土场表土的改良提质是实现矿区生态系统可持续发展的核心,通过土-水-生态的协调获得较好的露天矿区生态效应。

1.1 露天采矿对植被群落与土壤的影响

露天采矿通过剥离地表土壤和植被等方式,导致植被群落直接破坏。植被变化是区域生态变化最直接的反映,对矿区植被群落演变规律研究十分重要。在露天采煤过程中,选择高效机械化开采工艺会产生大量废弃物、扬尘,对植物赖以生存的环境造成污染。随着废矿石、土方的堆积形成高坡度大坡长的排土场新景观,导致矿区生境分割,限制了生物种群交流范围,生物多样性逐渐降低。郝志远和李素清^[6]通过对阳泉矿区不同复垦年限(2003,2013年)的煤矸石山植物群落进行研究,结果发现复垦地植被群落多样性主要受植被类型、复垦年限、地形影响,并且随着复垦年限的增加,植被群落向更加稳定、多样化的方向演替。春风等^[7]通过对内蒙古巴音华矿区植物群落进行数量化分析,证实了物种丰富度和多样性随着采矿干扰影响的减弱而显著提升的变化趋势,并且随着矿区周边干扰程度不同,植被群落更替出现较大差异。有关采矿区植被群落研究,国外多以植被复原技术和植被重建技术为主要研究方向,针对矸石山与露天采矿区的植被群落展开,进而采用植树和种草或将复垦地改造成湿地的方式加以保护。

由于露天采矿会对煤层上方的表土和岩层进行剥离,不仅在采场损毁大量土地,产生的排弃物也会占用大量土地,对区域土壤造成破坏,导致水土流失。在矿山开采过程中造成的水土流失、土壤盐碱化等问题已成为全世界研究的热点。土壤作为区域生态地质环境的重要组成部分,在资源开发过程中也被破坏的最为严重,其作为各种生态系统的基质和载体,可为生物的生长发育提供必要的水分和养分。因此,一

旦土壤遭到破坏或污染,必然会导致依附于其上生存的物种消失、生物多样性降低。尤其是处在生态脆弱区的干旱半干旱地区,因煤炭开采所致的水土流失、土壤结构破坏,对区域植被、动物、土壤微生物的生长、发育和恢复产生更为不利的影响。有学者针对我国煤矿区重金属污染进行了研究,发现煤矿区受到重金属不同程度的污染后对当地生态也造成一定的影响^[8]。另外,还有学者发现采煤也会对土壤养分具有明显的负面影响,破坏原土壤碳、氮等元素的“平衡”。开展矿区土壤生态恢复工作十分重要,赵韵美等^[9]发现矿区不同植被恢复模式下土壤养分有改善特征。刘孝阳等^[10]指出矿区排土场不同复垦类型土壤养分的变化以及矿区微地形也会对土壤养分分布产生一定影响。地面植被类型对保护和改善土壤环境具有很大作用,利用植物本身促进生态群落与土壤提质的和谐演变成为新的关注点。

1.2 露天排土场土层重构对生态效应的影响

排土场重构土体是在人工改变地貌上新发育的土壤,矿区重构土体的物理性质与自然土壤比有明显的差距,重构土体生产力通常较低,堆积过程中大型机械的压实作用,使得土壤密度较高(1.55~1.86 g/cm³),孔隙度较低(26%~45%),持水量低,渗透率差,水力传导速率慢,生物多样性空间异质性增强^[11-13]。露天排土场复垦土壤理化性质,与未扰动土壤相比,土壤结构性差,土壤质地、有效阳离子交换量、密度、持水性和相关化学性质都存在显著差异^[14-15];李玉婷等^[16]研究了黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质的空间差异,重构土壤在垂直方向上均属于弱变异,土壤密度和孔隙度在层间差异显著,土壤深度越大,土壤密度越大,土壤机械组成各土层间没有差异;黄雨晗等^[17]对比不同复垦年限排土场和原始地貌未损毁土壤的物理指标,复垦8 a和4 a的排土场土壤密度、土壤含水率和土壤砾石含量均高于未损毁的土壤,随复垦年限的增长,重构土壤密度、砾石含量和砂粒含量呈下降趋势,随土层深度的增加,重构土壤密度、粉粒和黏粒含量呈增大趋势;SHRESTHA等^[18]研究了重构土地复垦28 a后土壤物理性质变化,发现重构土壤表层土与未扰动土壤表层土密度相似,但5~10 cm和10~15 cm土层,重构土体与未扰动土体仍呈现显著差异,土壤累计入渗量重构土体显著小于未扰动土体;李芳等^[19]对复垦1,3,5和10 a后的重构土体进行研究,运用复杂神经网络进行分析,发现复垦10 a后土壤表层土壤几乎恢复到了未受损状态,反映土壤质量的指标中,土壤密度是最重要的指标,土壤有机质是影响土壤质量的

直接指标,土壤养分(速效磷和速效氮)是快速影响指标;侯湖平等^[20]研究了复垦1,6,15 a土壤及其微生物群落变化,结果显示细菌群落是对重构土体反应最敏感的一个指标,经过15 a的复垦后,重构土体的细菌群落多样性已经与天然土壤高度相似。

露天矿排土场覆土方式往往以矸石、砂砾为基底,上覆表土,由于表土不足,大量的采矿伴生土壤被堆积在排土场表面,这些土壤大多结构性差,有效养分低,不适合植物生长。为解决这一难题,研究矿区伴生土壤与矿区本地土壤、矿区工业产物等混合的重构方式改善土壤结构。砒砂岩成岩程度低,颗粒胶结作用弱,其中蒙脱石含量较高,具有保水保肥的效果,且在我国西北地区分布广泛,能有效改造粗质的排土场覆土物理性状^[21]。研究表明,砒砂岩和沙土质量比1:2~1:5配比条件下,具有良好孔隙度特征,持水能力较强,土壤理化性质较好^[22];摄晓燕等^[23]研究发现,砒砂岩对降低入渗率和饱和导水率、增加含水量和持水能力效果显著,砒砂岩与沙土比例为1:3时,复配土的吸水性和保水性能最佳;韩霖昌等^[21]以小麦、玉米、大豆、马铃薯4种作物为材料,分析不同砒砂岩和沙的质量比(1:1,1:2,1:5)作物产量,发现马铃薯在砒砂岩与沙1:5混合时产量最高,小麦、玉米、大豆在砒砂岩与沙1:2混合时产量最高;针对质地较细的排土场土壤可以将其与砂粒等粗颗粒土壤进行混合重构^[13],达到改善土壤质量的作用。

1.3 排土场土壤改良对水土高效协同利用生态效应

排土场土壤由于是新构土壤,其土壤结构极不稳定,降雨发生时不能有效地保存雨水,水分往往通过径流和漏渗的形式流失,处于干旱半干旱地区排土场在雨热同期的条件下,降雨之后往往伴随着高温天气,土壤的快速蒸发又使排土场土壤含水进一步降低,对露天开采不同复垦年限土壤真菌群落多样性产生影响^[24]。我国开展的矿区废弃地研究主要集中在土壤微生物修复技术、土壤重构技术、排土场环境治理技术等方面。杜善周^[25]对准能露天矿排土场生态建设报告指出,排土场构建过程中水土保持生物工程可有效减少地表和坡面水土流失。露天矿排土场治理的关键是水分的保持和植被的建植,并且利用沙棘有效地控制了排土场边坡的水土流失。

矿区土地复垦的难点之一是表土量不足,表土的稀缺性严重影响了排土场复垦效应和土壤质量的提升,因此有学者提出使用工业固体废弃物等材料制作表土替代材料^[26]。胡振琪等^[27]研究发现,将风化煤、粉煤灰等工业废渣以一定比例添加到土壤中,再辅以化学肥料,能够有效提高土壤肥力,促进复垦区

苜蓿生长。也有学者研究发现,采矿伴生的岩板粉末、粉煤灰以及被风化的土壤基质都有成为表土替代材料的潜力^[26]。有研究报道,在固体废弃物和矿区土壤中添加草炭、秸秆、矿物肥料、紫花苜蓿等改良剂能够有效地促进矿区生态复垦。目前国内外学者主要利用工业生产产生的固体废弃物作为表土的替代材料,或者将其制作成土壤改良剂添加于土壤中,但由于各矿区地质条件及周围工业设施的不同,产生的固体废弃物种类也不同,造成土壤改良剂的应用具有较强的局限性。因此应该因地制宜、结合当地实际情况选择复垦方式和适当的表土替代材料。

目前的土壤改良方法大多是单一的,如土壤替代材料或是不同植物组合与耕作方式的研究等。但矿区生态恢复不是一个单独的修复过程,而是以土壤基质改良为基础,植被和微生物相互作用的过程。针对露天矿排土场“土壤改良-植被组合-微生物优选”三位一体的改良方式的研究则未充分开展。在构建排土场的过程中,土壤结构不良、水肥质量下降、植被多样性减少,如何改良土壤基质就成为研究的重点。

近年来利用有机生物秸秆材料来提高土壤性状成为研究的热点。秸秆覆盖不仅可以增强土壤水分的下渗、降低土壤水分蒸发,还具有良好的蓄水保墒效果^[28]。研究表明,随着秸秆覆盖量的增加,相对蒸发量逐渐减小^[29],逢焕成^[30]在陕西部分地区设置试验田,冬小麦在夏闲期和生长期采用秸秆覆盖能有效使土壤保持湿润状态,覆盖量为6 000~7 500 kg/hm²最佳;同样对于玉米秸秆而言,覆盖量以6 500~7 500 kg/hm²最佳^[31]。秸秆覆盖除蓄水保墒作用以为,还可以改善土壤的养分状况。李娜娜等^[32]研究了2013—2015年旱地玉米秸秆覆盖模式与传统耕作模式相比,土壤有机质质量分数增加了19.8%,全氮质量分数提高了8.4%,水分利用率提高了11.3%;侯贤清等^[33]研究了覆盖措施下对旱作马铃薯生长的影响,结果表明秸秆覆盖处理可以提高15%左右的贮水量,且深松覆盖处理的土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾质量分数显著提高。秸秆覆盖在增加土壤养分的同时还能防止土壤养分流失,吕凯等^[34]连续2 a进行野外径流小区观测,结果表明随着秸秆覆盖量的增加土壤养分流失量也随之减少,相对于对照,泥沙中的有机质质量分数降低了83.97%~82.5%、全氮质量分数降低61.49%~85.56%、全磷质量分数降低44.69%~83.75%、全钾降低52.52%~81.79%,并得出以7 500 kg/hm²小麦秸秆覆盖量综合效益最好。秸秆覆盖改善了土壤中碳氮比例,为土壤微生物的活动提供了丰富的碳源和氮源,提高了土

壤微生物种群多样性,改善了土壤微生物群落结构^[35]。韩新忠等^[36]通过大田试验研究小麦秸秆覆盖对土壤微生物量及酶活性的影响,结果表明,秸秆还田覆盖显著提高了土壤微生物量碳、氮,显著提高了土壤脲酶活性、过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性。

2 干旱半干旱区露天煤矿与井工煤矿生态环境治理的差异及其关键技术难点

针对干旱半干旱煤矿区生态环境修复,煤炭企业和相关学者均进行了长期的探索,通过对区域主要井工煤矿开采过程中岩层结构及采动裂隙演化规律、地下水资源保护、煤炭开采对水和生态环境影响的研究现状分析,提出了干旱半干旱煤矿区生态环境修复要结合煤层赋存特点和煤层开采工艺技术,对上覆岩层产生的裂隙发育特征与展布格局,裂隙与地表水和矿井水的导通与耦合关系,裂隙对地表生态发育与退化作用等进行系统描述^[2]。

露天开采与井工矿开采对生态环境的损伤特征有明显的区别,井工开采虽然造成上覆地层产生裂隙、塌陷,但上覆岩土层总体结构稳定,井工开采沉陷地修复是在原位的拉伤根系修复与生态结构的稳定,而露天开采对环境生态的影响实际上是对煤层上覆岩土层的整体剥离及在另一个地方的重新堆放过程,因此露天开采的生态修复实际上是一个环境生态要素的重构过程,包括土、水和植被的重构,它涉及矿区水资源的保护与利用、排土场土层结构设计、布局与土壤改良、植物的选配组合及生态系统稳定重建等(图1),故生态修复难度更大!因此露天矿区生态环境治理与修复必须在系统调查、长期野外观测的基础上,探索新的思路和新的技术路线,并通过科学设计、规划与实施,促使西部干旱贫瘠的露天煤矿区在煤炭开发过程中,土地得到有效利用,矿区生态系统得到有效恢复和更健康发展,再造出绿水青山的生态景观。

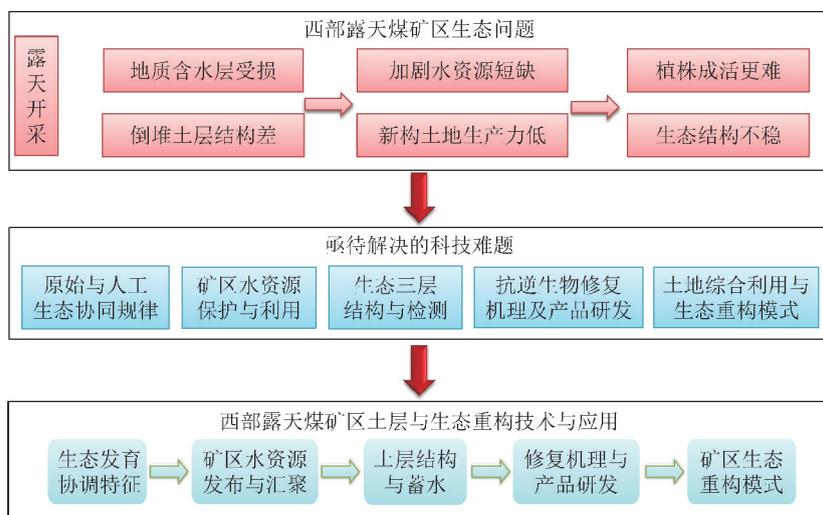


图1 西部干旱半干旱露天矿区生态重构研究思路与关键技术

Fig. 1 General research thought and key technology of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China

由于干旱半干旱地区的降水量少但集中在7—9月,且多以暴雨形式出现,加上露天排土场堆放较为松散无结构性,造成排土场边坡水土流失加重。因此露天煤矿排土场设计时应注重季节性降雨对排土场的冲刷作用和边坡稳定性,目前还没有针对矿区汇水、周边沟谷季节性径流及露天矿疏干水体有效回收利用等系统考虑,也没有形成与露天矿区开采特点相匹配的水资源保护理论和工程建设体系,造成现有的干旱半干旱露天矿区生态环境相对脆弱,抵御自然灾害的能力较弱,植被覆盖度极低。如准格尔矿区黑岱沟露天煤矿自1990年破土动工以来,已征用几十平方公里的土地。上亿吨的剥离物堆置、填沟后,形

成了矿区大面积无土壤结构、无地表植被的排土场(北排土场、东排土场、果园、捣蒜沟),不仅占用大量土地资源,而且形成大面积废弃地,极易发生新的水土流失和风蚀沙化。做好露天煤矿的生态环境整治不但具有社会效应,对矿山企业本身发展也具有非常重要的实际意义。例如内蒙古最大的准格尔露天矿区开采用地指标有限,绿化复垦成熟土地可以置换开采用地,对于保障露天煤矿正常生产来说意义重大。

露天排土场的堆放对于局地微地形及水土分布具有不同的影响,加之排土充填材料的不同、覆土厚度的不一致,导致对于露天排土场土地资源的利用不

充分,土地利用效率仍然很低,急需进行土地资源综合利用的分区规划与利用布局,但目前对露天排土场土壤质地及功能划分的研究尚属空白。以准能露天矿区为例,现有露天矿区内原生土壤主要为黄绵土,排土场土壤为复填土,堆积过程经过了剧烈扰动和碾压,其土壤质地为粉壤,密度较大,土壤养分含量低。排土场台阶土壤均为复填土,排土覆土时经过大车的来回碾压,形成了压实严重的排土场土壤,土壤渗透系数低,一般植物根系难以下扎,较难生长。压实土壤的改良技术,是提升露天排土场土壤重构质量的关键,培肥土壤的肥力水平是决定植被重建的重要措施。所以露天矿区生态重构要注重提升土壤养分水平,要建立有效的有机、生物修复技术,通过改良来增加土壤肥力,使土壤恢复到具有良好水肥气热的状态,达到土地复垦目的。

近年来,露天矿区植被覆盖率有了较大提高,但生态资源利用率还存在不合理的现象,人工植被缺乏有效的检测,未系统分析和掌握其群落演替规律。因此必须加强排土场生态分区,研究其演替规律,从而有效增加排土场生态资源的利用效率。通过研究人工植被的有效性,及时发现复垦植被组合存在的问题,避免生态退化造成的损失。通过不同配置类型植被的土壤水分利用、土壤养分利用、植物生长发育状况、植被对环境因素的影响等研究,结合生态效益评价,探索露天矿区植被优化配置模式。结合植物耗水和灌溉方式,合理调配矿区水资源生态利用,并建立起矿区植物水分利用率的评估方法。通过对露天矿区环境生态在水分因子主导下,植被、土壤、气候、地形等多因子共同作用特征分析,评估露天矿区生态承载能力。

3 干旱半干旱区露天煤矿生态环境治理的主要发展方向

以露天矿区煤炭开发中的环境生态保护为重点,针对西部干旱半干旱区露天水资源保护利用和生态重构的关键科学和技术问题,通过多学科交叉研究手段,努力查明露天矿区水资源的分布及富集特征,形成露天矿区水、土地和生物资源保护及利用可行性的技术方案、评价方法和多目标优化配置综合调控技术,实现露天矿区排土场土地资源综合利用及土壤的重构改良,构建出可协调水资源-植被组合-生态稳定的循环发展模式,寻找干旱半干旱地区露天煤矿生态环境治理关键技术。

(1)系统研究干旱半干旱露天矿区自然与人工生态协调发育规律,构建植物优化配置模式。

针对准格尔露天矿区近30a的环境生态整治成效,笔者观察到,在准格尔矿区外围的原生黄土沟壑区,由于长期处于干旱半干旱气候环境,植物属种单一,多为耐干旱的草本或灌木类植物,很少发育乔木类植物。20世纪80年代在山上多次植树造林,树木的成活率较低,植被生长缓慢。自20世纪90年代大型露天煤矿区的开发建设以来,对露天煤矿排土场按生态重构的标准进行了科学设计与规划,开展了积极的人工生态干预措施,矿区生态环境得到明显改善,矿区整体植被覆盖度提高,带动矿区周边原始生态的持续稳定增加,使矿区生态逐渐达到稳定状态,矿区植被盖度较原始生态提高2~3倍(图2)。人工重建生态是如何刺激并促进矿区原生植被生长、促进生态的多样性发展、促进矿区生态正向演替,需要从植物学、生态学等角度进行系统的描述和阐明。同时,要通过现代遥感技术,从时间角度和空间角度出发,分析和研究原始生态与露天矿山生产在生态重构状况下的生态发育特征与演变趋势,为干旱半干旱露天煤矿区的生态重构提供科学指导。

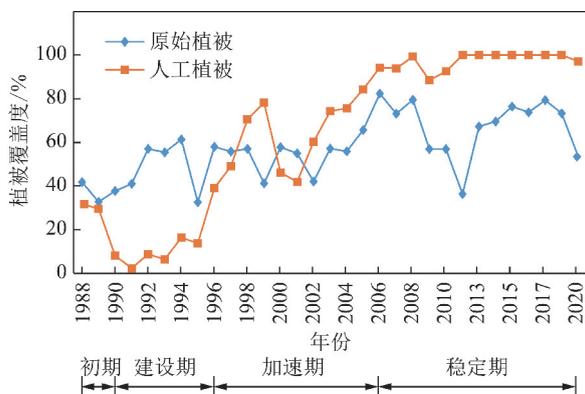


图2 人工修复对原始生态的协调作用

Fig. 2 Coordinated development law of natural and artificial ecology in arid and semi-arid open-pit mining area in Western China

(2)研究干旱半干旱露天矿区水资源分布格局和矿坑水汇聚方法,保障生态重构水资源供给。

西部干旱半干旱露天矿区生态重构,水资源是根本保障。针对西部露天矿区的地质特点,以无人机遥感影像技术、电法探测、地质雷达探测、数字测井、VSP测井和三维地震勘探为主要研究手段,结合水文地质调查,对矿区地质结构和水文地质特征进行精细刻画,在查明矿区地形地貌、植被分布、高程等信息基础上,基于地质-水文地质条件构建出准确的三维地表模型(图3)。鄂尔多斯盆地北沿露天煤矿主要由两套煤系地层,在以侏罗纪煤层为主要开发层的露天煤矿,重点研究主采煤层上覆岩

层中含水层起伏形态、断层、裂隙(或陷落柱)发育特征,特别是要对该区域可能分布的烧变岩分布特征进行准确圈定,确定导水通道,并对上覆岩层的富水性进行科学预测。在以石炭纪煤层为主要开采层的矿区,最好通过三维地震勘探对露天矿区下伏奥灰起伏形态、构造特征、裂隙发育及岩溶陷落柱分布展布规律进行系统研究,查明矿区奥灰水流

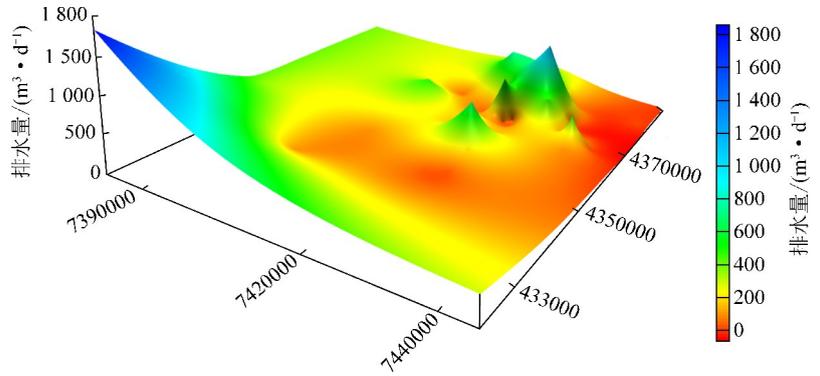


图 3 露天矿区利用物探方法对水资源的探测及其空间分布

Fig. 3 Water sources situation applied geophysical detection technology and their spatial distruction

(3) 建立干旱半干旱露天矿区近地表土层重构工程技术体系,保障矿区生态工程有效实施。

西部露天矿区地貌按成因可分为侵蚀构造梁地、丘陵和构造剥蚀波状高平原类型。梁地和丘陵区地面切割支离破碎,基岩裸露,风化强烈;波状高平原区广泛覆盖风积砂,风蚀作用强烈。建立科学的露天矿土地复垦实施方案是获得好研究与工程实施效果的基础,需要建立起干旱半干旱露天矿区生态重构工程技术体系。重点针对露天矿排土场不同处置方式对土壤的侵蚀作用进行比较研究。

针对干旱半干旱矿区水土流失严重这一难题,通过工程和技术创新,建立起露天矿区水土保持技术体系,使矿区范围内的水土流失得到有效治理。探索合理的露天矿排土作业规范与流程,对整个生态重构工程的各个环节过程进行严格的监控和追责,大幅提高表土的复用率,有效保证露天矿生态重构工程的高质量建设与维护^[25]。

大型露天矿排土场是一个人工巨型松散岩土堆积体,“平台-边坡”为基本地貌单元,平台岩土大都由大型机械分层压实,而边坡自然堆倒岩土松散。新建排土场非均匀沉降明显,多裂缝和陷穴,植被覆盖度低,其水蚀特征与原地貌相比差别显著,具体体现在 3 个方面:① 表层坚硬的覆土碾压平台和陡坡松散岩土为剧烈水蚀创造了条件;② 50~80 m 的坡长引起坡面密集的细沟状侵蚀;③ 不均匀沉陷和裂缝造成径流汇集路径具有较大的时空变化特性。在另一方面,露天开采中为了高效和容纳更多的岩土排弃

场运移规律,通过实际调查和研究揭示采后矿区含水层补、径、排恢复能力,确定煤层开采对区域地下水环境的影响边界及程度、矿坑涌水点与地表、地下水源的关系及导水通道的连通性特征,在掌握露天矿开采过程中应力场、裂隙场和渗流场“三场”演化机理基础上,形成了露天矿区矿坑水库水资源保护模式及关键技术,使矿区生态用水得到有效保障。

物,多采用机械搬运、压实增大排土场容量,往往忽视覆土层次结构、物理性状对生态布局模式的影响,因此,通过研究,构建近地表 4~5 m 厚可有效控制排土场水蚀和提高土层含水率的海绵型表层结构,是干旱半干旱黄土区大型排土场土地复垦和植被恢复的基础。将海绵型表层结构(隔水层-涵水层-表土层)与排土场的汇流工程设计有机综合在一起,使排土场的水分得到充分的保蓄和有效利用,来大幅度地提高露天煤矿的生态重构效果(图 4)。

针对露天开采中多采用机械搬运、压实,往往忽视覆土层次结构、物理性状对生态布局模式的影响这一现状,要研制排土场建设质量高精度物探检测装备与成套技术,实现对露天矿排土场工程中不同地貌、不同地表结构、不同工程类型的工程质量的快速检测,利用物探探测结果和不同植物生长需水量、土层厚度要求,设计出经济合理灌溉水系分布管网与种植分区模块,实现排土场重建生态景观布局。

(4) 研究干旱半干旱露天排土场土壤生物化学改良方法,增强植物逆境下的生物修复能力。

针对干旱半干旱区露天矿排土场重构土壤结构差,土壤肥力低、植物组合单一、重建生态难、植被易于退化,排土场压实作用对植物根系下扎困难等诸多问题,研究排土场土壤生物有机改良方法。近年来在生物修复过程发现 80% 以上植物根系侵染有菌根真菌,也发现传统的非菌根植物如莎草科、十字花科、藜科等根系中也有大量深色有隔内生真菌(DSE)定殖根内,深入研究 DSE 与菌根真菌联合生态修复技术

体系成为生物修复的一个新的方向。不但要研究单一土壤微生物菌剂,也要注重微生物组合培养,及其 DSE 菌剂产品开发和不同菌剂组合培养基质的实施方法,以获得良好的生态修复效果。通过实施接菌,

提高植物的光合效率,增加植物干物质(图 5),促进植物根系发育,增强植物的抗土壤压实、养分贫瘠、干旱缺水及易盐碱化等逆境的生理生化反应,使重构后的生态环境效果大大提高。

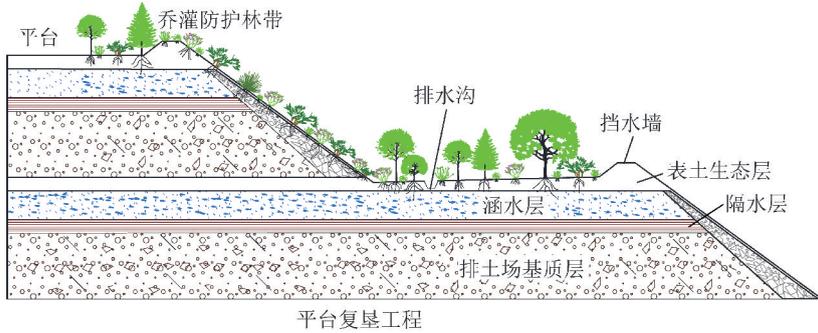


图 4 露天排土场三层结构的构建与布局模式

Fig. 4 Three-layer structure model for mining ecological environment reconstruction in arid and semi-arid open-pit dump

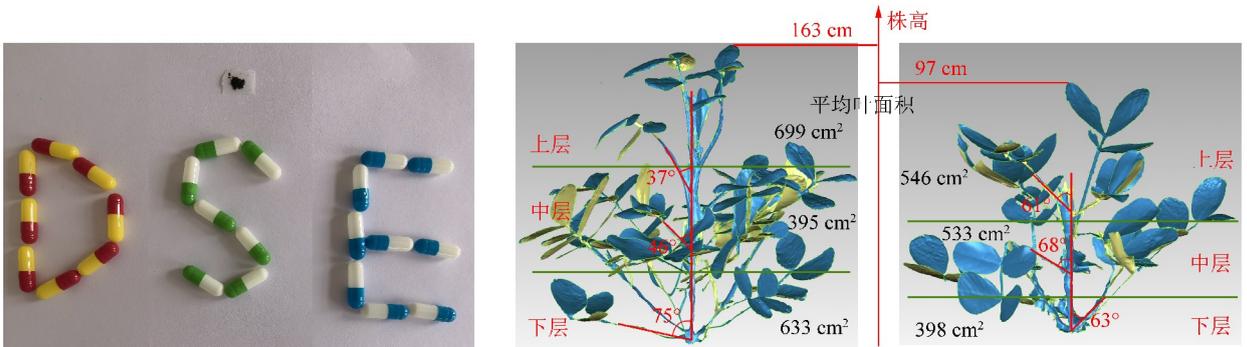


图 5 微生物 DSE 干菌剂产品开发及促生机理

Fig. 5 Product development of DSE Microbial inoculum and the mechanism of their promoting plant growth

(5) 露天排土场土地资源综合利用及生态重构关键技术,构建有机生物联合重构的模式。

采用遥感影像与现场调研相结合的方法,通过分析露天排土场中不同充填排弃物种类、充填覆土工艺、土地利用类型等,实现对不同复垦年限排土场植物群落累年演变的有效监测,对矿区重建人工生物功能结构优化和矿区生态重构的景观规划设计。系统探索利用低成本、绿色环保的改良材料,结合机械松耕物理手段与有机改良生物方法,促进土壤结构的改良技术。例如,采用覆草或秸秆联合接菌处理技术,改善土壤理化和生物性状,促进干旱地区的土壤提质与作物生长。

筛选驯化出适合地区特色的抗旱、耐寒、耐贫瘠植物。探索立体种植方式以突破原有生态重构单一的模式。在空间上形成草、灌、乔相结合的混交配置,建立起科学的生态结构模式(图 6),提高了土地利用效率及光、温、水、养分的空间互补优势。形成不同种、不同组合类型的生物群落,增加矿区范围内物种多样性和生态多样化。例如,准能矿区排土场,以“经济林/中草药、经济林/农作物、生态林/草”3 种立

体组合,作为林药间(套)作、农林复合、生态养地的最优立体种植模式,其立体生态效应及改土效率最优。优选经济合理、能促进地区经济发展的立体种植模式,可实现干旱半干旱露天矿区生态、经济与社会效益的高效性。



图 6 露天排土场不同植物组合生态重构模式

Fig. 6 Model of ecological reconstruction of the different plant type in arid and semi-arid open-pit dump

4 结 语

露天开采与井工矿开采对环境生态的损伤特点明显不同,井工矿开采造成上覆地层产生裂隙、塌陷,井

工开采沉陷地修复是原位修复与生态保护,而露天开采是对煤层上覆岩土层的整体剥离及搬运重新堆放过程,无序堆放结构在干旱半干旱露天矿区会加剧水土流失,土地生产力下降,植被生长更难。因此露天开采的生态修复实际上是生态环境因子的重构过程,包括土、水和植被的重构。它涉及矿区水资源的保护与利用、排土场土层结构重构与土壤改良、植物组合及生态系统重建与稳定等,其难度更大!因此露天矿区生态环境治理与修复必须探索新的思路和技术,促使西部干旱贫瘠土地得到高效利用,矿区生态系统得到有效恢复和健康发展,再造绿水青山的生态景观,为西部干旱半干旱露天煤矿区生态重构探索出一条高效可行新途径。

参考文献(References):

- [1] 彭苏萍,毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报,2020,45(4):1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [2] 彭苏萍. 黄河流域高质量发展亟须重视煤矿区生态修复[N]. 中国科学报,2020-09-07.
PENG Suping. High quality development in the Yellow River Basin calls for urgent attention to ecological restoration in coal mining areas[N]. Chinese Science News, 2020-09-07.
- [3] 彭苏萍. 中国工程院重点咨询研究项目丛书《煤炭资源强国战略研究》(专题卷II)[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [4] 毕银丽. 准能露天矿排土场生物综合修复技术研究及其示范基地建设[R]. 中国矿业大学(北京), 神华准格尔能源有限责任公司, 2020.
- [5] 毕银丽,杜善周,全文智. 西湾露天煤矿绿色循环产业方案研究[R]. 中国矿业大学(北京),北京合生元生态环境工程技术有限公司,陕西神延煤炭有限责任公司,2018.
- [6] 郝志远,李素清. 阳泉矿区煤矸石山复垦地不同植被下草本植物群落生态关系[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(5):1158-1164.
HAO Zhiyuan, LI Suqing. Ecological relationships in herbaceous plant communities under different plantations on reclaimed coal gob piles in the Yangquan mining area, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(5): 1158-1164.
- [7] 春风,赵萌莉,张继权,等. 内蒙古巴音布鲁克矿区自然定居植物群落物种多样性变化分析[J]. 生态环境学报,2016,25(7):1211-1216.
CHUN Feng, ZHAO Mengli, ZHANG Jiquan, et al. Analysis on diversity changes in naturally colonized plant communities of the Bayinhua Mining Area in Inner Mongolia[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(7): 1211-1216.
- [8] 朱玉高. 陕北煤矿区农田土壤重金属污染现状及修复研究[J]. 洁净煤技术,2014,20(5):105-108.
ZHU Yuga. Contamination and control of heavy metals in farmland around coal mining area in Northern Shaanxi[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 105-108.
- [9] 赵韵美,樊金拴,苏锐,等. 阜新矿区不同植被恢复模式下煤矿废弃地土壤养分特征[J]. 西北农业学报,2014,23(8):210-216.
ZHAO Yunmei, FAN Jinshuan, SU Rui, et al. Soil nutrient characteristics for different vegetation restoration model of Fuxin coal mine[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(8): 210-216.
- [10] 刘孝阳,周伟,白中科,等. 平朔矿区露天煤矿排土场复垦类型及微地形对土壤养分的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(3):6-12.
LIU Xiaoyang, ZHOU Wei, BAI Zhongke, et al. Influences of reclamation types and microtopography on soil nutrient in open cast coal mine dump of Pingsuo mining area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 6-12.
- [11] BI Yinli, WANG Kun, DU Shanzhou, et al. Shifts in arbuscular mycorrhizal fungal community composition and edaphic variables during reclamation chronosequence of an open-cast coal mining dump[J]. Catena, 2021, 203: 105301.
- [12] 毕银丽,李向磊,彭苏萍,等. 煤矿区周边植物多样性的空间变异性及其土壤养分相关性特征[J]. 煤炭科学技术,2020,48(12):205-213.
BI Yinli, LI Xianglei, PENG Suping, et al. Spatial variability of plant diversity and soil nutrients in the western open-pit mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 205-213.
- [13] 曹勇,毕银丽,宋子恒,等. 物理改良对采矿伴生黏土水分和养分保持能力的影响[J]. 矿业研究与开发,2021,41(1):116-121.
CAO Yong, BI Yinli, SONG Ziheng, et al. Effects of physical improvement on water and nutrient of mining associated clay[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(1): 116-121.
- [14] 赵艳玲,刘慧芳,王鑫,等. 基于无人机影像的复垦排土场地形因子与土壤物理性质的关系研究[J]. 中国煤炭,2018,44(9):117-122.
ZHAO Yanling, LIU Huifang, WANG Xin, et al. Research on relationship between terrain factor and soil physical properties of reclamation dump based up on UAV image[J]. China Coal, 2018, 44(9): 117-122.
- [15] SCHROEDER P D, DANIELS W L, ALLEY M M. Chemical and physical properties of reconstructed mineral sand mine soils in Southeastern Virginia[J]. Soil science, 2010, 175(1): 2-9.
- [16] 李玉婷,曹银贵,王舒菲,等. 黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质空间差异分析[J]. 生态环境学报,2020,29(3):615-623.
LI Yuting, CAO Yingui, WANG Shufei, et al. Changes of typical physical properties of reclaimed mine soil in the dump site of loess open mining area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(3): 615-623.
- [17] 黄雨晗,况欣宇,曹银贵,等. 草原露天矿区复垦地与未损毁地土壤物理性质对比[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(7):940-946.
HUANG Yuhan, KUANG Xinyu, CAO Yingui, et al. Comparison of

- soil physical properties between reclaimed land and undamaged land in grass-land opencast mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(7): 940-946.
- [18] SHRESTHA R K, LAL R. Land use impacts on physical properties of 28 years old reclaimed mine soils in Ohio[J]. *Plant and Soil*, 2008, 306(1): 249-260.
- [19] FANG L, XINJU L, LE H, et al. A long-term study on the soil reconstruction process of reclaimed land by coal gangue filling[J]. *Catena*, 2020, 195: 104874.
- [20] HOU H, WANG C, DING Z, et al. Variation in the soil microbial community of reclaimed land over different reclamation periods[J]. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2286.
- [21] 韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. *中国土地科学*, 2012, 26(8): 87-94.
HAN Jichang, LIU Yansui, LUO Lintao. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu sand land region[J]. *China Land Science*, 2012, 26(8): 87-94.
- [22] 李娟, 吴林川, 李玲. 砒砂岩与沙复配土的水土保持效应研究[J]. *土地开发工程研究*, 2018, 3(6): 35-40.
LI Juan, WU Linchuan, LI Ling. Soil and water conservation benefit of composite soil with feldspathic sandstone and sand[J]. *Land Development and Engineering Research*, 2018, 3(6): 35-40.
- [23] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 115-123.
SHE Xiaoyan, ZHANG Xingchang, WEI Xiaorong. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 115-123.
- [24] WANG Kun, BI Yinli, CAO Yong, et al. Shifts in composition and function of soil fungal communities and edaphic variables during reclamation chronosequence of an open-cast coal mining dump[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 144465.
- [25] 杜善周. 准能集团生态建设情况报告[R]. 神华准格尔能源有限责任公司, 2021.
- [26] 况欣宇, 曹银贵, 罗古拜, 等. 基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(4): 453-461.
KUANG Xinyu, CAO Yingui, LUO Gubai, et al. Analysis of biomass differences in *Melilotus suaveolens* Ledeb. based on different ratios of reconstructed soil materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 453-461.
- [27] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及苜蓿增产效果[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 120-124.
HU Zhenqi, KANG Jingtao, WEI Xiujun, et al. Experimental research on improvement of reclaimed soil properties and plant production based on different ratios of coal-based mixed materials[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 120-124.
- [28] TOLK J A, HOWELL T A, EVETT S R. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 50(2): 137-147.
- [29] 李新举, 张志国, 刘勋岭, 等. 秸秆覆盖对土壤水盐运动的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2000, 31(1): 41-43.
LI Xinju, ZHANG Zhiguo, LIU Xunling, et al. Effects of straw mulch on soil water and salt moving[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2000, 31(1): 41-43.
- [30] 逢焕成. 秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J]. *土壤通报*, 1999, 30(4): 174-175.
FENG Huancheng. Effects of straw mulching on soil environment and winter wheat yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(4): 174-175.
- [31] 杜守宇, 田恩平, 温敏, 等. 秸秆覆盖还田的整体功能效应与系列化技术研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1994(2): 88-94.
DU Shouyu, TIAN Enping, WEN Min, et al. The overall effects of stubble mulching farmlands and its technical series[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994(2): 88-94.
- [32] 李娜娜, 梁改梅, 池宝亮. 旱地玉米休闲期秸秆覆盖对农田土壤水肥的调控效应[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(2): 185-188.
LI Nana, LIANG Gaimei, CHI Baoliang. Study on regulating effect of straw mulching on soil water and fertilizer in dryland maize fallow period[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 185-188.
- [33] 侯贤清, 李荣. 秋耕覆盖对土壤水热肥与马铃薯生长的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 262-275.
HOU Xianqing, LI Rong. Effects of autumn tillage with mulching on soil water, temperature and nutrient and potato growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 262-275.
- [34] 吕凯, 吴伯志. 秸秆覆盖对坡地红壤养分流失及烤烟质量的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 320-326.
LÜ Kai, WU Bozhi. Effects of straw mulching on nutrient loss from red soil and quality of flue-cured tobacco in sloping land[J]. *Soils*, 2020, 52(2): 320-326.
- [35] 蔡晓布, 钱成, 张元, 等. 西藏中部地区退化土壤秸秆还田的微生物变化特征及其影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 463-468.
CAI Xiaobu, QIAN Cheng, ZHANG Yuan, et al. Microbial characteristics of straw-amended degraded soils in central Tibet and its effect on soil fertility[J]. *China Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 463-468.
- [36] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2192-2199.
HAN Xinzhong, ZHU Liqun, YANG Minfang, et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2192-2199.