

DOI: 10.5846/stxb202003270722

杨鑫光,李希来,王克宙,李志炜,马盼盼.煤矸石山生态恢复的主要路径.生态学报,2022,42(19):7740-7751.

Yang X G, Li X L, Wang K Z, Li Z W, Ma P P. Major paths of ecological restoration of coal mine spoils. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7740-7751.

煤矸石山生态恢复的主要路径

杨鑫光^{1,*}, 李希来², 王克宙¹, 李志炜³, 马盼盼²

1 青海民族大学生态环境与资源学院, 青海省特色经济植物高值化利用重点实验室, 西宁 810007

2 青海大学农牧学院, 西宁 810016

3 中国地质工程集团有限公司, 北京 100093

摘要: 煤矿开采过程伴随着大量煤矸石和废弃物的堆积, 对当地生态环境造成巨大危害, 恢复受损煤矿区煤矸石山生态系统成为近年来研究的热点。目前, 许多研究者从煤矸石山土壤和植被恢复技术、监督管理等方面进行归纳总结, 各有侧重地提出相应恢复措施, 对于指导当地生态恢复实践发挥了重要作用。然而, 绝大部分研究综述均未深入分析煤矸石山生态恢复过程中的关键问题, 同时也未从生态系统的整体性和长期稳定性考虑设置恢复路径。基于此, 通过梳理前人研究成果, 归纳出煤矸石山恢复过程中的地质安全、土壤环境、植被恢复、种群繁衍、生态系统稳定等方面关键问题, 从恢复前后逻辑关系和生态系统整体性考虑, 设计出边坡稳定性处理及整形、土地复垦、物种选择、人工建植、土壤种子库形成、种群繁衍与更新、生态系统健康和稳定性评价、补充措施等一整套煤矸石山生态恢复的主要路径和方法, 对煤矸石山生态系统恢复的基本途径从六个方面进行了总结, 同时提出存在的问题和未来需要进一步研究的方向, 为煤矸石山生态系统恢复实践提供重要理论指导。

关键词: 生态恢复; 煤矸石山; 土地复垦; 植被重建; 稳定性

Major paths of ecological restoration of coal mine spoils

YANG Xinguang^{1,*}, LI Xilai², WANG Kezhou¹, LI Zhiwei³, MA Panpan²

1 Qinghai Provincial Key Laboratory of Highvalue Utilization of Characteristic Economic Plants, College of Eco-environment and Resources, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China

2 College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China

3 China Geo-engineering Corporation, Beijing 100093, China

Abstract: The process of coal mining accompanied with the cumulative coal gob and other residues causes great damage to local ecological environment. It has become a research hotspot to restore the ecosystem of coal mine spoils in the damaged coal mining areas in recent years. At present, many studies focused on soil and vegetation restoration technology, supervision and management of coal mine spoils, and put forward corresponding restoration measures according to different objectives. These efforts have played an important role to guide the practical activity of the ecological restoration. However, most reviews did not deeply analyze the key problems in the process of the ecological recovery of coal mine spoils, and also did not set the restoration paths based on considering of the integrity and long-term stability of the ecosystem. Thus, by summarizing the previous research results, analyzing the key problems such as geological safety, soil environment, vegetation restoration, reproduction, and ecosystem stability in the process of restoring coal mine spoils, meanwhile, considering the successively logical relationship of restoration courses and ecosystem integrity, this study designed a set of major paths and methods of the ecological restoration of coal mine spoils including slope stability treatment and reshaping, land reclamation, species selection, artificial revegetation, soil seed bank formation, population reproduction and renewal,

基金项目: 青海省财政支农资金林业新技术推广项目(2021-002)

收稿日期: 2021-03-27; 网络出版日期: 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxg618@163.com

ecosystem health and stability evaluation, supplementary measures, etc. In conclusion, this study summarizes the basic ways of ecosystem restoration of coal mine spoils from six aspects. Successively, the order is (1) evaluation of geological safety risks of coal mine spoils by selecting the appropriate indicators such as mechanics indexes, meteorological indexes, physical indexes, etc, (2) land reclamation for reducing the geological safety risks and creating favorable soil environment of vegetation growth, (3) improvement of soil quality by topsoil replacement and other methods like fertilizing and using soil amendments, (4) revegetation for high values of plant coverage and biomass by selection of appropriate species and cultivation approaches, (5) population reproduction and renewal by increasing the number of vegetative propagules, improving seed maturity and migration spread, and creating the high-quality environment, in which seed germination and seedling growth are more suitable, (6) evaluation of ecosystem health and stability, which can be used as the basis for follow-up measures such as reseedling, fertilization, film mulching and plant introduction to promote the stable development of ecosystem of coal mine spoils. At the same time, problems of ecological restoration and directions for further research were proposed, which provides important theoretical guidance for the practice of ecosystem restoration in coal mine spoils.

Key Words: ecological restoration; coal mine spoils; land rehabilitation; revegetation; stability

煤矿开采业是世界重要的工业产业之一,煤矿开采活动特别是露天煤矿开采造成了严重的环境问题,归纳起来主要有三类。一是地质结构破坏问题,包括采煤引起的地面沉陷、坍塌、泥石流、地裂缝,以及较大范围及程度的景观改变等^[1-3],对于堆积的煤矸石山来说,主要是边坡不稳定造成的泥石流、滑坡等次生灾害问题;二是环境污染问题,主要为采煤过程中及结束后(包括煤矸石山堆积)产生的废气、废水和固体废弃物对周边环境的危害,包括大气污染、地下水污染、重金属对土壤的污染等^[4-6];三是生态破坏问题,主要为植被和土壤的破坏,煤矿开采对植被造成巨大破坏,表层土壤剥离或被废弃物覆盖,形成的煤矸石山植被缺失,土壤物理性质差,氮磷钾等土壤营养含量低,土壤 pH 增加,不利于植物良好生长^[7-10]。

恢复生态学形成于 20 世纪 80 年代。90 年代国际生态恢复学会提出,生态恢复是帮助研究生态整合性的恢复和管理过程的科学,生态整合性包括生物多样性、生态过程和结构、区域及历史情况、可持续的社会实践等广泛的范围^[11]。生态恢复的目标是通过修复生态系统功能并补充生物组分,使受损的生态系统回到一个更自然条件下,最终实现生态系统的可持续性和自我发展^[12-13]。生态恢复的理论基础之一为自我设计与人为设计理论^[14],自我设计理论认为,在充足的时间条件下,随着时间的推移,退化生态系统将根据环境条件合理地组织并最终改变其有效组分;人为设计理论认为,通过工程方法和植物重建可直接恢复退化生态系统,但恢复类型可能是多样的。由于受损煤矿区特别是煤矸石山生态系统严重退化,自然演替过程将非常漫长甚至根本不会发生,其恢复的理论依据应主要采取人为设计理论,即需要通过施加人工干预手段来恢复煤矸石山土壤和植被,尽管恢复后的生态系统与原始群落相比其群落组成可能会出现较大差异^[7]。从以往研究来看,受损煤矿区生态恢复研究往往侧重于土壤复垦、植被恢复的技术手段以及管理方式的转变等^[15-16],对于利用生态恢复学原理系统梳理煤矸石山生态恢复的关键路径方面缺乏思考,从煤矸石山地质安全问题处理直到生态系统的构建和稳定发展,每个阶段的问题和应对措施未有深入研究。本研究着重关注煤矸石山生态恢复的主要路径,包括采取稳定性评估和人工干预、土壤选择和改良、物种选择和人工建植、土壤种子库的形成和物种繁衍、生态系统健康评估和补充措施等,主要解决地质安全、土壤环境、植被恢复、种群繁衍、生态系统稳定性等几个方面问题,最终目标为维持煤矸石山生态系统稳定,具体如图 1 所示。通过系统归纳煤矸石山生态恢复主要阶段存在的问题及解决路径,提出下一步研究的重点方向,旨在为煤矸石山生态系统恢复实践提供理论支撑。

1 煤矸石山地质安全问题及处理方式

煤矸石山由采煤过程中大量煤矸石和废弃物堆积而成。煤矸石山在堆积过程中如果事先没有合理规划,

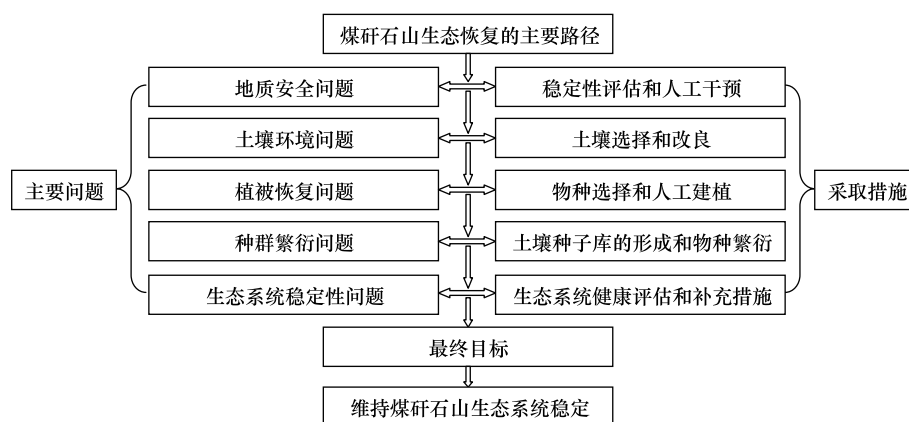


图1 煤矸石山生态恢复技术路线框架图

Fig.1 Technical route framework for ecological restoration of coal mine spoils

随意堆积存放,将会引起地质安全问题,甚至引发塌方、滑坡、泥石流等地质灾害。对于煤矸石山在生态恢复中可能会遇到的地质安全问题,首先要开展矿山地质安全监测工作,调查其地质安全风险,对堆积的煤矸石山边坡进行稳定性分析和评估,查找存在的隐患,提前采取有针对性的措施降低风险,提高稳定性。目前,对矿山地质安全问题的评价主要集中于对地质环境质量的评价,采用的方法有:指标加权评价法、模糊判别法、层次分析法等^[17-18],由于影响因子较多,评价因子的选取也不尽相同,与煤矸石山地质安全有关的评价因子有崩塌、滑坡、水土流失等。以上指标的选取与评价主要体现了地质灾害发生后的结果,对于通过煤矸石山稳定性评价提前预防地质灾害、开展边坡稳定性处理等方面意义不大。

近年来,在土壤和岩体的边坡稳定性评估和滑坡预警模型建立方面开展了大量研究^[19-20],而对煤矸石山稳定性评估方面的研究相对较少。有学者依据力学原理,在煤矸石山坡面土壤抗冲性、抗剪强度特性等方面进行了研究,为煤矸石山的稳定性分析提供了思路^[21-22]。通过在煤矸石山种植草本植物提高盖度,在坡面形成根-土复合体,能够有效提高边坡抗剪强度,同时发现,土壤含水量、密度、颗粒大小等土壤物理性质影响土壤粘聚力大小,其中土壤含水量、土壤密度与土壤粘聚力分别达到显著正相关、极显著负相关^[23]。对重庆万盛南桐矿区胡家沟矸石山滑坡灾害成因分析,造成煤矸石山滑坡的原因主要有地形、降水、自燃和喷爆等^[24],这些因子也可以作为煤矸石山稳定性评估因子。对黄土边坡稳定性分析的研究表明,边坡安全系数与冻融次数、冻融深度及含水率等密切相关^[25],随着冻融循环的进行,极有可能导致边坡失稳破坏。此外,环境温度变化能够造成煤矸石山山体内部发生膨胀或收缩,岩层或土壤的这种变化也会对煤矸石山稳定性产生影响。以上研究总体上来说各有侧重,未能形成煤矸石山稳定性综合评估体系。针对煤矸石山边坡稳定性评估,可以采取矿山地质环境质量评价的相似方法,在因子选择上,应选择与煤矸石山稳定性评估密切相关的指标,如力学、气象、物理、地貌及自燃等指标。图2中,初步构建了煤矸石山稳定性评估的指标体系,根据实际情况,可以相应增加或缩减指标。

对于经评估后稳定性风险比较大的煤矸石山,为降低风险,防止水土流失和滑坡,同时有利于植被生长和土壤恢复,需采取人工干预措施开展整形,具体方式有坡改梯、排土压脚、削坡降高,下滑区减重、坡面种植、修建排水沟、修建截洪沟等。实际操作中,应根据当地地质状况及特点,采取操作简易、节约成本、效益显著的方式^[11]。以青海省天峻县江仓煤矿区为例,首先将煤矸石山坡面整形为坡度小于25°的坡台式,底部修筑围堰防止滑移,在此基础上,采取覆盖深层底土、人工建植、施肥、覆盖无纺布等组合方法,边坡治理工作成效显著^[7,26]。对于煤矸石山自燃可能引发的次生灾害问题,应坚持预防为主和科学有效的方针,采用红外热成像、多参数气体检测、钻孔测温等方法强化自燃环境监测与评估^[27-28],将煤矸石山划分为不同的防控区域^[29],因地制宜地采取覆土、隔绝氧气、直接挖出、注浆、灌水等措施消除矸石山自燃隐患,同时对参与监测评估和施工

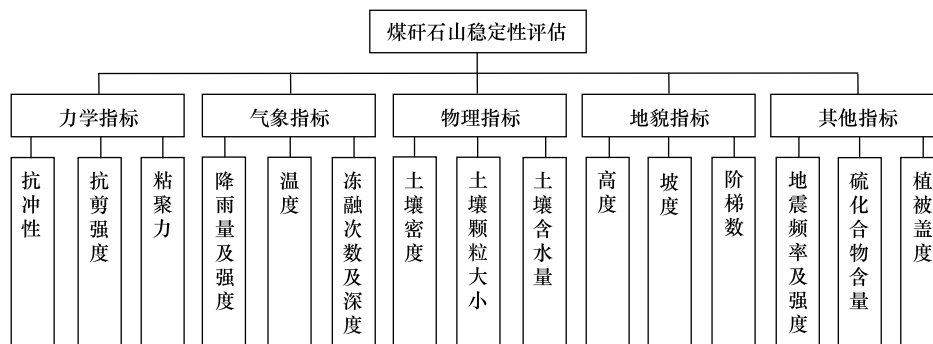


图2 煤矸石山稳定性评估指标体系

Fig.2 The index system of stability evaluation of coal mine spoils

作业人员进行专业技术和安全培训,并配备防护用具,防止安全事故发生。

2 煤矸石山土壤环境问题及恢复途径

2.1 土壤环境问题

矿山开采特别是露天采矿活动造成地表植被剥离,大量煤矸石与废弃物堆积形成煤矸石山,不仅使土地毁损和被侵占,而且造成土壤侵蚀、地下水污染等,严重危害区域生态安全^[7,30]。同时由于表层土壤丧失,造成煤矸石山基质养分含量低、土壤 pH 值失衡、持水能力差,土壤质量严重下降,植物几乎无法正常生长^[31—32]。归纳起来,煤矸石山土壤环境问题突出表现为:堆放采矿剥离物、废石、矿渣、粉煤灰等固体废弃物压占土地;有害成分和化学物质进入土壤造成污染;表土破坏严重,土壤理化性质差等。此外,煤矸石在堆放过程中一定程度上造成了资源浪费。

2.2 修复的主要措施——土地复垦

由于土壤可作为植物生长的基质和物质基础,能够提供必要的支撑及水分、养分^[33—34],为建立起煤矸石山人工植被生态系统,首先需要创造能够使植物正常生长发育的土壤环境条件,土地复垦显得尤为重要。依据 2011 年国务院颁布实施的《土地复垦条例》,土地复垦是指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。经过归纳整理,煤矸石山土地复垦一般有三种方法,一种是将煤矸石山回填采矿坑或者塌陷区,减少煤矸石占地,并进一步复垦塌陷区^[35]。此外是对煤矸石进行综合利用,主要利用方式有煤矸石发电、生产水泥和砖等建材、筑基修路、提取有价元素等。第三,土地平整及坡面整形后,通过客土覆盖、表土回填等方式整治受破坏的土地,恢复煤矸石山土壤基质,改善土壤性质,为后续人工建植及生态系统的恢复打下基础^[7,36]。煤矸石山土地复垦方式的选择,应当依据当地恢复目标和可能实现的途径,综合经济、生态、社会等价值进行考虑。在煤矸石无法进行回填或者综合利用的情况下,需要采取覆土的方式恢复煤矸石山土壤基质,再通过人工建植进一步恢复生态系统,避免煤矸石山长期暴露造成环境污染和地质灾害。本文以下所提土地复垦,重点强调通过覆土、土壤改良等措施恢复煤矸石山土壤理化性质,因为土壤理化性质的改善对于植被恢复能否成功非常重要^[37]。许多研究表明,随着土地复垦时间的延长,土壤中有机质、速效养分等含量增加,土壤理化性质得到改善,物种多样性增加,土壤种子库逐步形成,植被得到恢复^[38—40]。由此可见,在煤矸石山开展土地复垦,为进一步推动植被及生态系统恢复提供了重要的物质保障,是煤矸石山生态恢复的重要环节之一。

2.3 覆土及覆土厚度

煤矿开采特别是露天开采后,若剥离表土未受较大破坏,可以选择表土回填覆盖的方式来进行煤矸石山土地复垦,一方面表土中原始植被和土壤种子库种子全部或部分保留,能够为下一步开展植被恢复创造更好条件,另外表土理化性质好,营养含量高,有利于植物生长发育,因此采用表土回填覆盖的方式是煤矸石山土

地复垦的优先方式。需要指出的是,表土回填覆盖不能破坏周边原始植物群落的表层土壤,只有在周边有采矿剥离表土的情况下,才能进行回填和覆盖。在很多情况下,采矿过程中表土严重破坏,表土土壤无法获取,可选择距离较近、容易获取的土壤(如矿坑中的土壤及深层底土)作为煤矸石山基质^[7,26]。对于周边无法获取土壤的煤矸石山,则需要选择客土覆盖的方式,客土的选择应当按照土地复垦的目标(经济目标或生态目标)和获取的难易程度有针对性地开展,如选择黄土、城市污泥、工业废弃物等。徐良骥等利用粉煤灰作为土壤基质进行矿区覆盖填充,表土质量较好,农作物生长正常^[41]。

在土地复垦中,适宜的覆土厚度是其中的一项关键技术,目前主要研究集中于覆土厚度对于植物生长及土壤特性的影响等方面^[11]。在植物群落结构特征方面,有研究表明,覆土能够显著提高植被物种组成,而未覆土的煤矸石山则几乎没有植物生长^[32]。随着覆土厚度的增加,植物群落丰富度和多样性指数逐步增加,但是覆土过厚反而降低其生物多样性^[42]。群落多样性变化主要与植物对环境的适应能力、不同植物种间竞争、外来物种的入侵、不同的群落演替阶段、土壤种子库等多方面因素有关,覆土对群落多样性的影响需要深入研究;植物生长特征方面,随着煤矸石山覆土厚度的增加,植物盖度和地上生物量均显著增加,植物生长相对更加高大^[7]。相同的植物在不同的气候和土壤条件中根系分布是不相同的^[43],在同一气候条件下,根系的生长和垂直分布与土壤质地、水分含量、营养状况等土壤有效供给状况密切相关^[44],覆土深厚的土壤有效供给相对更高,植物根系得到延伸拓展,从而能够吸收更多水分及土壤营养元素,促进植物更好生长^[11]。但是覆土过厚对植物生长并没有太大帮助,反而增加生态恢复的经济成本;土壤性质方面,随着覆土深度的增加,土壤理化性质得到改善,土壤有机碳增加^[35,45-46],土壤有机质(有机碳)储存积累被认为是矿山生态恢复成功的一个重要标志^[39]。从减少经济投入的角度出发,可以用大量施肥代替人工覆土,利用植物——土壤相互促进作用,逐步实现生态系统的稳定发展^[32]。总结以上研究成果,煤矸石山土地复垦工作当中,应该综合植物类型、生长特性、立地条件、填充物的获取便利程度及经济承受能力等,采取最适宜植物生长发育的覆土厚度或相应复垦措施。

2.4 土壤的改良

煤矸石山覆土后一定程度上具备了植物生长所需土壤环境条件,但是煤矸石山充填复垦土壤类型不同,基质营养元素含量往往差异较大,特别是营养元素含量低会严重影响植物正常生长。此外,煤矸石山在堆积和土壤复垦过程中,往往伴有重金属元素的累积,造成环境污染。针对以上煤矸石山充填复垦土壤特点,需要结合实际对煤矸石山土壤基质进一步进行改良,以利于植物生长,同时减少土壤和水环境污染^[11]。

对于土壤营养元素缺乏问题,采取的修复方法之一为种植豆科牧草,如通过种植紫花苜蓿、小冠花等豆科牧草,固定大气中的游离氮素,增加土壤碳氮含量,提高土壤肥力^[47]。另外,施肥有利于土壤肥力增加,是恢复退化生态系统的有效手段。一般情况下,通过施用速效氮磷钾肥料,土壤中的速效营养元素含量可以得到有效提升^[48],而对土壤全氮、全磷等含量的影响不大^[49]。同时,施用速效肥能够加快植物生长,生物量积累和分解增加了土壤中的有机质(有机碳)含量^[50],而土壤有机质含量增加是煤矸石山土壤肥力增加的重要依据^[51]。由以上分析可见,在煤矸石山极端贫瘠的土壤条件下,可通过施用速效肥料快速增加土壤营养元素含量,对于后续人工建植及生态系统的成功恢复具有重大促进作用。但是这种促进作用应该是在一定范围的施肥量之内,施肥过多会对植物造成伤害,反而不利于植物生长^[52]。鉴于有机肥含有大量有机质,具有改良土壤通气性能和蓄水状况、增加肥力等作用,煤矸石山复垦过程中,应该优先选用有机肥,或者速效肥和有机肥配合施用^[53],有效改善煤矸石山土壤理化性质,在实际操作过程中,具体施肥类型和施肥量可结合煤矸石山生态恢复实际需求,采取经济有效的方式。近年来也有研究报告,通过对人工建植植物接种丛枝菌根真菌,能够促进土壤营养有效性和酶活性,提高土壤肥力,促进植物在贫瘠的土壤环境中生长,有利于煤矸石山植被恢复^[54-55]。

对于煤矸石富含重金属问题,通常采用的土壤修复方法有三个方面。一是物理修复,包括热解吸、土壤淋洗、电动修复等;二是化学修复,包括添加土壤改良剂、活性剂等;三是生物修复,包括植物、动物和微生物修复

等^[11]。近年来,由于土壤改良剂和植物修复技术操作简便、成本较低,在重金属污染土壤治理中得到普遍应用^[56]。在煤矸石山土壤改良中,通过使用客土、城市污泥等作为土壤改良剂改善土壤理化性质,在此基础上选择并种植重金属富集和转移能力强的植物,能够显著降低土壤重金属含量^[57-58],改良期间,需要对超富集植物成熟后进行适当处理,避免二次污染。此外,针对煤矸石山复垦土壤酸碱失衡问题,在强化土壤酸碱性质监测分析基础上,也可采取施用土壤改良剂配合植物修复措施,逐步调节土壤酸碱平衡,推动煤矸石山复垦土壤向中性过度。

煤矸石山土壤质量高低主要涉及土壤的获取及覆土厚度、土壤理化性质改善、土壤重金属污染防治等方面,今后在提高煤矸石山土壤质量基础上,需要更加关注土壤恢复成本、恢复技术可行性、恢复效益等方面,采取既经济又有效的方式改善煤矸石山土壤环境条件,以利于后续开展人工建植。

3 煤矸石山植被恢复问题及采取措施

植被恢复是退化生态系统修复中的重要环节之一,其根本是恢复遭受破坏的生态系统,最终实现系统的自我更新和稳定发展^[11]。一般来说,植被恢复有自然恢复和人工恢复两种方式。自然恢复应当满足自然和生物两个条件,一方面需要恢复地周边物种繁殖入侵能力较强,此外需要具备外来物种正常生长发育的环境条件,如平均海拔 1000 米左右的陕蒙交界地区,自然条件适宜当地物种入侵,自然恢复能够有效提高植被覆盖度^[59];又如泥炭沼泽地等具有适合种子着床并萌发的立地条件,自然恢复也是一种有效的恢复方式^[60]。但是对于绝大多数煤矸石山来说,由于表层土壤的损失改变了生物和非生物环境,植物立地条件受到严重限制,极大影响了植物的正常生长发育^[61-63],使得自然恢复很难实现或者根本实现不了。为此需要通过人工建植,加快煤矸石山生态系统恢复进程^[64]。

3.1 物种的选择

由于植被破坏严重,对于煤矸石山恢复初期来说,通过人工建植尽快达到较高水平的植被覆盖度和生物量显得尤为重要^[11]。首先应根据气候带植物分布规律、不同立地条件及最终恢复目标,合理选择人工建植的植物品种。不同植物种的适应能力不同,在相同环境条件下的生长繁衍能力也不同,在煤矿废弃地植被恢复试验中发现,8 种供试植物在植苗造林中的成活率介于 86.67% 到 47.28% 之间,不同品种间差别很大^[65];对青藏高原受损煤矿区垂穗披碱草、冷地早熟禾、星星草 3 种人工栽培禾本科植物的适应性研究发现,更适合低温环境条件下生长的植物为垂穗披碱草、冷地早熟禾^[66]。选择适宜的植物种对于煤矸石山植被恢复具有重要意义,如果物种选择不当,生长成活状况差,就有可能造成生态恢复失败^[11]。

为保证选择物种的生态环境适应性,有研究者倾向于选择栽种本地物种^[67],这种选择要以本地物种能够适应新的生长环境、具有成熟的种子并且能够正常繁衍为基础。由于采矿破坏了原有生态环境,当地植物种不一定能够适应煤矸石山形成的特殊生境,通过种植原始群落优势物种并不一定可行。比较有代表性的如青海木里高寒矿区煤矸石山,由于原始植被土壤腐殖质形成过程漫长,加之种群一般以营养繁殖为主^[7,68],受到立地条件及繁殖策略的极大限制,在恢复初期本地物种无法作为恢复煤矸石山的物种,为此应选择能够快速生长繁衍的外来物种作为先锋植物。近年来研究发现,不同生长特性物种相结合、本地物种和外来物种相结合等人工建植方式(多种植物的组合方式)应该是生态恢复的更好方式,可以在恢复初期快速生长,形成有效盖度和生物量,后期保障人工草地群落的多样性和稳定性^[69-70]。总之,煤矸石山生态恢复物种的选择应该具备几个基本条件:适应当地自然环境;适应贫瘠土壤;能够正常生长发育,抗逆性强;能够形成较高盖度,地下根系伸展良好;兼顾经济效益和生态效益^[71-72]。物种的适应性是环境和遗传长期相互作用的结果,目前对于物种的适应性研究基本为短期研究结果,并不能有效鉴别外来物种受环境的影响程度^[73],煤矸石山人工建植物种的适应性和恢复潜力研究需要长期的观测过程。

3.2 人工建植方法

在物种选择基础上,许多研究者对不同的人工建植方法进行了探索和对比,以期达到最佳的建植效

果^[11]。物种组合方面,对煤矸石山6种植被类型的恢复效果研究发现,与栽培单一植物种相比,侧柏+刺槐和榆树+紫穗槐混交模式对土壤养分的增加效果较好^[74]。肥料组合方面,通过研究不同的施肥方式对受损矿区土壤肥力和人工植被的影响,结果表明速效肥料、堆肥、石灰等均不同程度促进了植物生长,改善了土壤理化性状,但是长期来看,堆肥的使用效果更好^[75],在实际应用中,应当根据土壤营养状况适时补充速效养分和有机质^[76]。种植技术方面,不同的种植技术下露天煤矿排土场植被和土壤恢复效果是不同的,与旱梯田坡面建植法、旱坡植生袋建植法、沙柳围护建植法相比较,穴铺植生袋建植法的植被和土壤恢复效果最好^[77];对于高海拔高寒矿区煤矸石山植被恢复的研究结果表明,种植方式的选择应当尽量规避和减少低温环境及土壤营养元素缺乏的影响,可采用补播+施肥+覆盖无纺布的方式,加快植被恢复进程,进一步研究发现,单纯的人工建植方式不利于生态修复,采取人工建植+覆土或人工建植+施肥的组合方式,是恢复煤矸石山生态系统的有效途径^[32,51]。可见,在种植方法的选择上,应同时满足能够快速恢复地力、增加植被覆盖度的人工建植组合方式。

煤矸石山植被恢复主要采取人工建植的方式,建植物种适应能力大小需要经过长期观察,较长时间跨度下植被恢复研究结果较少,未来需要加强此方面研究。此外人工建植投入成本较大,在一些特殊的煤矸石山生态恢复中(如高寒矿区煤矸石山)可考虑引入毒杂草,通过其入侵繁殖能力强等特点增加植被覆盖度,依靠自然恢复推动煤矸石山生态系统向良性方向发展。

4 煤矸石山种群繁衍问题及采取措施

煤矸石山人工植被建立以后,种群能否正常繁衍并自我更新,是煤矸石山生态系统最终能否恢复成功的关键。因此,需要关注的几个重点问题有:种群能否形成成熟的种子、种群无性繁殖能力判断、土壤种子库的形成和发展、种子萌发与生长发育环境条件分析、种群之间的竞争和促进关系、外来物种的入侵过程等。对于以上问题国内外研究较少,相关研究主要集中在土壤种子库、植物繁殖策略等方面。

4.1 土壤种子库的形成

土壤种子库指存在于土壤表层凋落物和土壤中全部活性种子的总和,对于维护人工建植草地群落结构和盖度具有重要作用^[78]。土壤种子库是生态系统复原能力的重要组成要素,一定程度代表着植被恢复潜力的大小^[79]。在煤矿开采过程中,原始植被土壤种子库被破坏,造成煤矸石山土壤中种子缺失,加之种子发芽及植物生长条件丧失,煤矸石山几乎没有植物生长。有研究指出,随着采煤排土场复垦时间的延长,土壤种子库能够得到恢复^[40],一方面与外来物种的入侵有关,另一方面人工建植物种对土壤种子库的形成也将发挥重要作用^[11]。在土壤种子库形成以后,温度、降水等多种环境因素会制约土壤种子库种子的萌发,进而影响种群的繁衍与更新。在荒漠地区,影响种子萌发的限制因子主要为降水,而增水能够提高土壤种子库种子的萌发数量和物种数,有利于退化草地的演替和恢复^[80]。对于高寒矿区煤矸石山,由于高寒低温,种子大部分不能够完全成熟,加之周边原始群落物种主要以营养繁殖为主,不利于人工建植过程中土壤种子库的形成,导致人工复绿植被自然更新过程困难^[7,51],为此要采取补播、覆膜、覆盖无纺布等措施,一方面增加土壤种子库种子数量,另外通过增加积温,延长生育期,促进植物种子成熟^[11]。

4.2 人工建植物种繁衍

植物的繁殖策略分为有性繁殖和无性繁殖。有性繁殖是利用种子来繁殖后代,如绝大部分被子植物的繁殖过程;无性繁殖不需要经过受精过程,是利用孢子、营养体等进行的繁殖,如青藏高原地区大部分植物种子不能萌发,植物主要以营养繁殖为主^[81-82]。植物在不同的生境当中具有不同的繁殖策略,这是植物长期适应环境变化过程中遗传演化的结果。在对高寒草甸人工草地的繁殖对策研究中发现,随着恢复年限的增加,人工草地物种有性繁殖逐步降低,无性繁殖构建数量及生物量逐步增加^[83],表明特殊的自然环境条件,促进了人工草地种群繁殖策略的逐步转变,这种转变有利于物种适应新的环境,对于人工建植群落的稳定发展将起到重要的作用。施加人为干预措施有助于种群有性繁殖能力的提高,对松嫩平原退化羊草草地实施封育、翻

耙处理后,种群抽穗率显著增加,从而产生更多的种子扩大种群规模^[84]。目前,对于煤矸石山人工植被构建后种群繁殖策略的研究鲜有报道,总结相关研究成果,通过深入研究分析群落中不同种群的繁殖策略,在此基础上有针对性地采取人为干预手段,促进人工植被营养繁殖体数量增加、提高种子成熟度及迁移扩散、创造适合种子萌发和幼苗生长发育的自然条件等,均会有利于种群的繁衍和自我更新,从而为煤矸石山生态系统稳定发展提供保障。

煤矸石山人工建植后,种群能否正常繁衍是生态系统成功恢复的关键要素,不仅涉及土壤种子库、物种繁殖策略,还包括种群之间的竞争和促进关系、种群自我更新能力判断等,以上均可作为未来研究的重点。

5 煤矸石山生态系统稳定性问题及补充措施

煤矸石山生态系统的恢复需要通过一定的时间,将退化或受损的生态系统恢复到健康、稳定的状态,涉及植被群落演替、土壤性状的改善等一系列植被土壤恢复过程。一般情况下,物种丰富度、多样性等指标被用于估计植被演替阶段及生态系统的恢复程度^[69,85-86],也就是说,群落中的物种数越多,群落丰富度和多样性越大,生态系统稳定性越强。但是多样性与稳定性之间的关系具有适用范围^[87],对于一些特殊生境如高寒高海拔煤矿开采区,经过长期的自然演替,虽然周边原始群落只有少数几种植物,群落丰富度和多样性低,但是原始群落生态系统依然能够保持长期稳定发展^[7],在未遭受人为过度干扰情况下,高寒高海拔地区生态系统稳定性依然较高。也有研究发现,通过改善土壤性质、人工建植等措施,能够促进盖度、生物量的增加,但减少了植物群落丰富度和多样性^[45,88],在这种情况下,群落中的优势种群稳定将对整个生态系统稳定起到决定性作用^[89]。为此,生态系统稳定性研究中需将种群、群落、多样性和稳定性的关系在特定环境中加以区分。

从演替时间角度来看,恢复时间对于煤矸石山土壤、植被的演替发展影响显著^[90]。土壤质量、物种选择、种植方式等初始条件(人为因子),以及气候条件、植物繁殖体潜在源等环境因素是植被演替的主要驱动力^[91]。不同的恢复措施下(初始条件不同),植物群落的演替及发展规律是不同的^[92],主要表现在植被生长特征、群落组成和结构、土壤理化性质等多个方面存在差异和变化^[93-95],使得不同的恢复措施下,群落处于不同的恢复和演替阶段,生态系统稳定性差别较大。如在未实施覆土、施肥等改善土壤营养状况的情况下,单纯的人工建植不利于群落正向演替,表现为物种数量少,结构相对单一,而通过改善土壤质量后再开展人工建植的恢复效果好^[32];环境因子影响方面,有研究表明,在低海拔露天煤矿开采区,人工建植的禾本科植物随着恢复时间的延长,植被种类、盖度、生物量及土壤营养元素含量等均显著增加^[96]。而在高寒高海拔煤矿区,人工恢复煤矸石山生态系统,植被总盖度并没有增加,同时土壤速效养分含量逐步下降,煤矸石山生态系统有退化风险^[51]。可见,不同的初始条件和生长环境使得煤矸石山人工植被群落演替朝不同方向发展,最终会导致两个结果:一是形成稳定的生态系统(包括植被盖度和生物量保持在较高水平、群落物种组成和结构稳定、土壤质量得到改善等),煤矸石山恢复成功;二是生态系统逐步退化(包括植被盖度和生物量持续下降、群落组成简单、群落结构和功能逐步退化、土壤质量下降等),煤矸石山恢复失败。

从以上分析可见,随着恢复时间的延长,判断评价煤矸石山生态系统是否达到了稳定状态,是需要进一步思考的问题。矿区生态系统是复杂的复合系统,影响矿区生态系统健康及其演化的因素(因子)非常复杂,涉及生态环境、自然资源、经济社会等各个方面,具体应用中可根据评价目标和重点的不同选择不同的指标^[97-98]。对于煤矸石山生态系统的健康和稳定性评价,为简化分析,可剔除煤炭资源利用、经济社会发展等相关指标,主要考虑煤矸石山人工建植后植被生长繁衍、土壤质量改善、群落稳定等方面。评价方法可参照侯扶江等对生态系统健康的评价方法^[99],通过确定参照系统,计算煤矸石山生态系统基况、活力、组织力、恢复力等,判断生态系统健康和稳定程度^[11]。经过评价,对仍然处于不稳定和亚健康以下状况的煤矸石山生态系统,则需要强化生态系统退化原因分析,采取有针对性地补充措施推动其朝稳定方向发展。如对于人工建植物种不适应当地环境条件而导致的退化问题,可采取更换本地物种或更换适宜当地环境的外来物种并进行适时补播;对于土壤营养元素缺乏而导致的退化问题,可采取补种豆科牧草、补充施肥等措施;对于种子不成熟

而导致的退化问题,可采取覆盖秸秆、覆盖无纺布等保温增温方法,延长生育期,促进种子成熟。近年来有学者研究发现,一些毒杂草具备了作为生态系统恢复物种的基本条件,其强大的生存适应和繁殖入侵能力,对退化生态系统的恢复和可持续管理发挥了重要作用,典型的如甘肃马先蒿、狼毒等,可以考虑利用这些物种的生态恢复功能,通过自然入侵增加草地盖度及生物多样性,加速煤矸石山生态恢复进程^[100-101]。

目前,国内外对煤矸石山植被恢复后生态系统稳定性评估方法的研究相对较少,未来需要加强煤矸石山生态系统稳定性评估体系的研究和应用,为是否继续采取措施巩固生态恢复效果提供依据。

6 总结和展望

煤矸石山生态系统恢复的基本途径主要包括以下几个方面:一是对煤矸石山存在的地质安全风险进行评估;二是为降低地质安全风险,同时有利于植被生长和土壤恢复,对煤矸石山开展土地复垦;三是针对煤矸石山土壤理化性质差、重金属污染等问题,采取覆土、施肥、施用土壤改良剂等措施,满足植物生长基本需求;四是选择适宜的物种,采取有利于植物生长发育的栽培和耕作方式进行人工建植,形成较高盖度和生物量;五是通过人为施加干预手段,促进土壤种子库的形成,实现种群的繁衍和自我更新;六是对煤矸石山生态系统是否达到稳定状态进行评价,评价结果作为后续采取补播、施肥、覆膜、引种等措施的依据,推动煤矸石山生态系统朝稳定方向发展。未来相关工作中,应突出解决煤矸石山生态系统恢复当中的关键问题,重点研究方向包括:煤矸石山稳定性评估技术与方法;人工建植物种的生态适应性评价;人工建植物种的繁殖特性及对群落演替的影响;原始群落物种繁殖策略及生态恢复利用途径;不同栽培和耕作方式对煤矸石山生态系统的影响;较长恢复年限下的植物和土壤变化特征及未来演替趋势;煤矸石山生态系统健康和稳定性评价等。

参考文献 (References):

- [1] 武强. 我国矿山环境地质问题类型划分研究. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 107-112.
- [2] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, Lv C J. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. CATENA, 2015, 128: 44-53.
- [3] Xue D J, Wang J Q, Zhao Y W, Zhou H W. Quantitative determination of mining-induced discontinuous stress drop in coal. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 111: 1-11.
- [4] Saini V, Gupta R P, Arora M K. Environmental impact studies in coalfields in India: a case study from Jharia coal-field. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1222-1239.
- [5] Guan Y, Chu C L, Shao C F, Ju M T, Dai E F. Study of integrated risk regionalisation method for soil contamination in industrial and mining area. Ecological Indicators, 2017, 83: 260-270.
- [6] Zhou Z Q, Chen Z Z, Pan H J, Sun B B, Zeng D M, He L, Yang R, Zhou G H. Cadmium contamination in soils and crops in four mining areas, China. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 192: 72-84.
- [7] Yang X G, Li X L, Shi M M, Jin L Q, Sun H F. The effects of replaced topsoil of different depths on the vegetation and soil properties of reclaimed coal mine spoils in an alpine mining area. Israel Journal of Ecology and Evolution, 2019, 65(3/4): 92-105.
- [8] Li S Q, Liber K. Influence of different revegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1314-1323.
- [9] Bradshaw A. Restoration of mined lands—using natural processes. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [10] Ahirwal J, Maiti S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India. CATENA, 2016, 140: 155-163.
- [11] 杨鑫光. 高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [12] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学. 生态学报, 2004, 24(8): 1760-1768.
- [13] Parker V T. The scale of successional models and restoration objectives. Restoration Ecology, 1997, 5(4): 301-306.
- [14] 任海, 王俊, 陆宏芳. 恢复生态学的理论与研究进展. 生态学报, 2014, 34(15): 4117-4124.
- [15] Alday J G, Marrs R H, Martínez-Ruiz C. Soil and vegetation development during early succession on restored coal wastes: a six-year permanent plot study. Plant and Soil, 2012, 353(1/2): 305-320.
- [16] Brock A, Dunlap A. Normalising corporate counterinsurgency: engineering consent, managing resistance and greening destruction around the

- Hambach coal mine and beyond. *Political Geography*, 2018, 62: 33-47.
- [17] 刘金涛, 冯文凯, 胥良, 吕键. 矿山地质环境质量评价数学模型研究概述. *灾害学*, 2011, 26(4): 110-115.
- [18] 王创业, 张金山, 于贵忠. 基于 AHP 法的鄂尔多斯市煤矿矿区环境质量评价研究. *煤炭工程*, 2012, (8): 97-100.
- [19] Michalowski R L. Stability assessment of slopes with cracks using limit analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 50(10): 1011-1021.
- [20] Rose N D, Hungr O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 308-320.
- [21] 潘德成, 李海燕, 吴祥云, 宋品玉, 邓春晖, 齐鹏春, 张丹丹. 阜新煤矿区次生裸坡土壤抗冲性动态变化. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 203-206.
- [22] 李东升, 刘东升. 煤矸石抗剪强度特性试验对比研究. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2808-2816.
- [23] 杨幼清, 胡夏嵩, 李希来, 王涛, 刘昌义, 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅. 高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 105-113.
- [24] 董倩, 刘东燕, 朱正伟, 孙海涛. 重庆万盛南桐矿区胡家沟矸石山滑坡灾害成因分析. *煤炭学报*, 2007, 32(6): 586-591.
- [25] 王掌权, 许健, 郑翔, 任建威. 反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(2): 15-21.
- [26] Li X L, Gao J, Zhang J, Wang R, Jin L Q, Zhou H K. Adaptive strategies to overcome challenges in vegetation restoration to coalmine wasteland in a frigid alpine setting. *CATENA*, 2019, 182: 104142.
- [27] 吴海军, 曾凡宇, 姚海飞, 郑忠亚, 徐长富, 王永仁, 马超. 矸石山自燃危险性评价及治理技术. *煤炭科学技术*, 2013, 41(4): 119-123.
- [28] 曾凡宇, 田云福, 芦根玲, 樊少武, 姚海飞. 西曲煤矿矸石山自燃火区探测及治理技术. *煤炭科学技术*, 2012, 40(6): 41-43, 85-85.
- [29] 王亚文, 王晓军, 王兵, 王伟鹏, 宫有寿, 李广强. 基于系统测温的矸石山自燃状况评估方法. *煤矿安全*, 2017, 48(9): 167-170, 174-174.
- [30] Dutta R K, Agrawal M. Restoration of opencast coal mine spoil by planting exotic tree species: a case study in dry tropical region. *Ecological Engineering*, 2003, 21(2/3): 143-151.
- [31] Halofsky J E, McCormick L H. Establishment and growth of experimental grass species mixtures on coal mine sites reclaimed with municipal biosolids. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 569-578.
- [32] 杨鑫光, 李希来, 金立群, 孙华方. 不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究. *草业学报*, 2019, 28(3): 1-11.
- [33] Rivas-Ubach A, Barbeta A, Sardans J, Guenther A, Ogaya R, Oravec M, Urban O, Peñuelas J. Topsoil depth substantially influences the responses to drought of the foliar metabolomes of Mediterranean forests. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2016, 21: 41-54.
- [34] 单贵莲, 初晓辉, 田青松, 马玉宝, 李临杭, 陈功. 典型草原恢复演替过程中土壤性状动态变化研究. *草业学报*, 2012, 21(4): 1-9.
- [35] 陈孝杨, 周育智, 严家平, 王芳, 陈敏, 刘本乐. 覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响. *煤炭学报*, 2016, 41(5): 1236-1243.
- [36] O'Brien P L, DeSutter T M, Ritter S S, Casey F X M, Wick A F, Khan E, Matthees H L. A large-scale soil-mixing process for reclamation of heavily disturbed soils. *Ecological Engineering*, 2017, 109: 84-91.
- [37] Liu X Y, Bai Z K, Zhou W, Cao Y G, Zhang G J. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 228-239.
- [38] Zhao Z Q, Shahrour I, Bai Z K, Fan W X, Feng L R, Li H F. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 40-46.
- [39] Shrestha R K, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 168-176.
- [40] 吕春娟, 白中科, 陈卫国. 黄土区采煤排土场生态复垦工程实施成效分析. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 232-236.
- [41] 徐良骥, 许善文, 严家平, Meuser H, Makowsky L, Weiss E, Max B. 基于粉煤灰基质充填覆土复垦的最佳覆土厚度. *煤炭学报*, 2012, 37(S2): 485-488.
- [42] 孙永秀, 严成, 徐海量, 姚艳丽. 受损矿区草原群落物种多样性和地上生物量对覆土厚度的响应. *草业学报*, 2017, 26(1): 54-62.
- [43] Tron S, Dani A, Laio F, Preti F, Ridolfi L. Mean root depth estimation at landslide slopes. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 118-125.
- [44] Zhou Z C, Shanguan Z P. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant and Soil*, 2007, 291(1/2): 119-129.
- [45] Bowen C K, Schuman G E, Olson R A, Ingram L J. Influence of topsoil depth on plant and soil attributes of 24-year old reclaimed mined lands. *Arid Land Research and Management*, 2005, 19(3): 267-284.
- [46] 王锐, 李希来, 张静, 周华坤, 胡夏嵩. 不同覆土处理对青海木里煤田排土场渣山表层土壤基质特征的影响. *草地学报*, 2019, 27(5): 1266-1276.

- [47] 王大勇, 刘涛, 郭慕萍, 张永清. 豆科植物对不同深度土壤水分及养分含量的影响. 土壤通报, 2013, 44(3): 551-555.
- [48] 李小坤, 鲁剑巍, 陈防, 李文西, 赵慧星. 苏丹草-黑麦草轮作中不同施肥措施对饲草产量及土壤性质的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 581-586.
- [49] 冯鹏艳, 梁利宝. 施肥对采煤塌陷区复垦土壤理化性质和磷分级的影响. 水土保持学报, 2018, 32(5): 229-233.
- [50] Poeplau C, Zopf D, Greiner B, Geerts R, Korvaar H, Thumm U, Don A, Heidkamp A, Flessa H. Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands?. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 144-155.
- [51] 杨鑫光, 李希来, 金立群, 孙华方. 短期恢复下高寒矿区煤矸石山土壤变化特征研究. 草业学报, 2018, 27(8): 30-38.
- [52] Hou X Y, Liu S L, Zhao S, Zhang Y Q, Wu X, Cheng F Y, Dong S K. Interaction mechanism between floristic quality and environmental factors during ecological restoration in a mine area based on structural equation modeling. Ecological Engineering, 2018, 124: 23-30.
- [53] 武冬梅, 张建红, 吕珊兰, 赵锦逵. 山西矿区矸石山复垦种植施肥策略. 自然资源学报, 1998, 13(4): 333-336.
- [54] Qiu L, Bi Y L, Jiang B, Wang Z G, Zhang Y X, Zhakypbek Y. Arbuscular mycorrhizal fungi ameliorate the chemical properties and enzyme activities of rhizosphere soil in reclaimed mining subsidence in northwestern China. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 135-147.
- [55] Guo W, Zhao R X, Fu R Y, Bi N, Wang L X, Zhao W J, Guo J Y, Zhang J. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the development of maize (*Zea mays* L.) grown in three types of coal mine spoils. Environmental Science and Pollution Research International, 2014, 21(5): 3592-3603.
- [56] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍, 孙健. 四种草本植物对铅锌尾矿土壤重金属的抗性 with 吸收特性研究. 草业学报, 2005, 14(6): 57-62.
- [57] 张静雯, 张成梁, 宋楠, 王贤, 张焜. 煤矸石渣土改良及其效果研究. 水土保持通报, 2011, 31(4): 227-231.
- [58] Juwarkar A A, Jambhulkar H P. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4732-4741.
- [59] 刘中奇. 哈拉沟煤矿塌陷区植物群落特征及植被恢复技术研究. 煤炭工程, 2015, 47(4): 121-123, 127-127.
- [60] Zhen Q, Ma W M, Li M M, He H H, Zhang X C, Wang Y. Effects of vegetation and physicochemical properties on solute transport in reclaimed soil at an opencast coal mine site on the Loess Plateau, China. CATENA, 2015, 133: 403-411.
- [61] Menta C, Conti F D, Pinto S, Leoni A, Lozano-Fondón C. Monitoring soil restoration in an open-pit mine in northern Italy. Applied Soil Ecology, 2014, 83: 22-29.
- [62] Hausman C E, Fraser L H, Kershner M W, de Szalay F A. Plant community establishment in a restored wetland: effects of soil removal. Applied Vegetation Science, 2007, 10(3): 383-390.
- [63] Ahirwal J, Maiti S K, Reddy M S. Development of carbon, nitrogen and phosphate stocks of reclaimed coal mine soil within 8 years after forestation with *Prosopis juliflora* (Sw.) De. CATENA, 2017, 156: 42-50.
- [64] Yuan Y, Zhao Z Q, Bai Z K, Wang H Q, Wang Y Z, Niu S Y. Reclamation patterns vary carbon sequestration by trees and soils in an opencast coal mine, China. CATENA, 2016, 147: 404-410.
- [65] 李强. 8种植物在废弃煤矿植被恢复中的应用. 防护林科技, 2015, (8): 22-23, 45-45.
- [66] 杨鑫光, 李希来, 张静, 周华坤. 高寒煤矿区3种人工栽培种对自然降温的生理响应. 中国草地学报, 2019, 41(6): 72-79.
- [67] 王同智, 薛焱, 包玉英, 屈永安, 齐云龙, 王海娟, 董明月. 不同复垦方式煤矿排土场植物群落与土壤因子的关系. 西北植物学报, 2014, 34(3): 587-594.
- [68] 安福元, 高志香, 李希来, 王懿萱. 青海省木里江仓煤矿区高寒湿地腐殖质层的形成过程. 水土保持通报, 2019, 39(2): 1-9.
- [69] Swab R M, Lorenz N, Byrd S, Dick R. Native vegetation in reclamation: Improving habitat and ecosystem function through using prairie species in mine land reclamation. Ecological Engineering, 2017, 108: 525-536.
- [70] Rinella M J, James J J. A modelling framework for improving plant establishment during ecological restoration. Ecological Modelling, 2017, 361: 177-183.
- [71] 杨勤学, 赵冰清, 郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1152-1157.
- [72] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. International Journal of Soil, Sediment and Water, 2010, 3(2): 13.
- [73] Wang X L, Wang Y Q, Wang Y J. Use of exotic species during ecological restoration can produce effects that resemble vegetation invasions and other unintended consequences. Ecological Engineering, 2013, 52: 247-251.
- [74] 王丽艳, 韩有志, 张成梁, 裴宗阳. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6429-6441.
- [75] Pedrol N, Puig C G, Souza P, Forján R, Vega F A, Asensio V, González L, Cerqueira B, Covelo E F, Andrade L. Soil fertility and spontaneous revegetation in lignite spoil banks under different amendments. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 134-142.
- [76] 金立群, 李希来, 宋梓涵, 孙华方, 杨鑫光. 高寒矿区植被恢复对渣山表层基质的响应. 草业科学, 2018, 35(12): 2784-2793.

- [77] 孔令伟, 薛春晓, 苏凤, 石龙. 不同建植技术对露天煤矿排土场生态修复效果的影响及评价. 水土保持研究, 2017, 24(1): 187-193.
- [78] Li Y Y, Dong S K, Wen L, Wang X X, Wu Y. Soil seed banks in degraded and revegetated grasslands in the alpine region of the Qinghai-Tibetan Plateau. Ecological Engineering, 2012, 49: 77-83.
- [79] González-Alday J, Marrs R H, Martínez-Ruiz C. Soil seed bank formation during early revegetation after hydroseeding in reclaimed coal wastes. Ecological Engineering, 2009, 35(7): 1062-1069.
- [80] 巴德木其其格, 孙宗玖, 李培英, 田梦, 吴咏梅. 增水对伊犁绢蒿荒漠草地土壤种子库种子萌发特征的影响. 草业学报, 2018, 27(10): 136-146.
- [81] 邓自发, 谢晓玲, 周兴民. 高寒草甸矮嵩草种群繁殖对策的研究. 生态学杂志, 2001, 20(6): 68-70.
- [82] 李希来, 杨元武, 张静, 牛周羊杰. 不同退化程度“黑土滩”高山嵩草克隆生长特性. 草业学报, 2003, 12(3): 51-56.
- [83] 李媛媛, 董世魁, 朱磊, 温璐, 李小艳, 王学霞. 青藏高原高寒草甸退化与人工恢复过程中植物群落的繁殖适应对策. 生态学报, 2013, 33(15): 4683-4691.
- [84] 李红, 杨允菲. 恢复措施对退化草地羊草种群有性生殖数量特征的影响. 应用生态学报, 2004, 15(5): 819-823.
- [85] Jochimsen M E. Vegetation development and species assemblages in a long-term reclamation project on mine spoil. Ecological Engineering, 2001, 17(2/3): 187-198.
- [86] Sanaei A, Ali A, Chahouki M A Z, Jafari M. Plant coverage is a potential ecological indicator for species diversity and aboveground biomass in semi-steppe rangelands. Ecological Indicators, 2018, 93: 256-266.
- [87] 王长庭, 龙瑞军, 丁路明, 来德珍, 李有福. 草地生态系统中物种多样性、群落稳定性和生态系统功能的关系. 草业科学, 2005, 22(6): 1-7.
- [88] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, Hu T M, Chen J M. Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 469-479.
- [89] Sennhauser E B. The concept of stability in connection with the gallery forests of the Chaco region. Vegetatio, 1991, 94(1): 1-13.
- [90] Yuan Y, Zhao Z Q, Niu S Y, Li X Z, Wang Y Y, Bai Z K. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: a case study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China. CATENA, 2018, 165: 72-79.
- [91] Moreno-de las Heras M, Nicolau J M, Espigares T. Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment. Ecological Engineering, 2008, 34(2): 168-178.
- [92] 贾希洋, 马红彬, 周瑶, 张蕊, 宿婷婷, 张双乔, 张俊. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落数量分类和演替. 草业学报, 2018, 27(2): 15-25.
- [93] 李愈哲, 樊江文, 于海玲. 京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响. 草业学报, 2018, 27(5): 1-14.
- [94] Yuan J Y, Ouyang Z Y, Zheng H, Xu W H. Effects of different grassland restoration approaches on soil properties in the southeastern Horqin sandy land, northern China. Applied Soil Ecology, 2012, 61: 34-39.
- [95] Bauman J M, Cochran C, Chapman J, Gilland K. Plant community development following restoration treatments on a legacy reclaimed mine site. Ecological Engineering, 2015, 83: 521-528.
- [96] Huang L, Zhang P, Hu Y G, Zhao Y. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine. Global Ecology and Conservation, 2015, 4: 255-263.
- [97] 王广成, 闫旭骞. 分形理论在矿区生态系统稳定性评价中的应用. 煤炭学报, 2008, 33(4): 427-430.
- [98] 闫旭骞, 张顺堂, 袁怀雨. 矿区生态系统健康评价的理论和方法. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 351-355.
- [99] 侯扶江, 于应文, 傅华, 朱宗元, 刘钟龄. 阿拉善草地健康评价的 CVOR 指数. 草业学报, 2004, 13(4): 117-126.
- [100] Bao G S, Suetsugu K, Wang H S, Yao X, Liu L, Ou J, Li C J. Effects of the hemiparasitic plant *Pedicularis kansuensis* on plant community structure in a degraded grassland. Ecological Research, 2015, 30(3): 507-515.
- [101] Cheng W, Sun G, Du L F, Wu Y, Zheng Q Y, Zhang H X, Liu L, Wu N. Unpalatable weed *Stellera chamaejasme* L. provides biotic refuge for neighboring species and conserves plant diversity in overgrazing alpine meadows on the Tibetan Plateau in China. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 746-754.