



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

中国土壤重构及其土水特性研究进展

张玉锴, 阎凯, 李博, 黎李杨, 杨松, 普建丹, 王楚燕, 杨国东, 张川

引用本文:

张玉锴, 阎凯, 李博, 黎李杨, 杨松, 普建丹, 王楚燕, 杨国东, 张川. 中国土壤重构及其土水特性研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 511–524.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0487>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表土替代材料不同夹层位置对风沙土水分入渗和蒸发的影响

荣颖, 王淳, 胡振琪

农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 967–977 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0468>

黄土露天矿区重构土壤典型物理性质差异及对植被生长状况的影响

王舒菲, 曹银贵, 罗古拜, 况欣宇, 宋蕾, 白中科

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 344–354 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0223>

基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析

况欣宇, 曹银贵, 罗古拜, 李树志, 白中科

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 453–461 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0354>

矿区复垦地土壤改良研究进展

赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 谭菁, 王夕刚, 黄占斌

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 1–14 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0805>

平原农区空心村典型土壤的重金属污染评价——以山东省禹城市为例

李裕瑞, 王志伟, 门大威, 曹智, 范朋灿, 李峰, 龙花楼, 刘彦随

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 328–334 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0079>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张玉锴, 阎凯, 李博, 等. 中国土壤重构及其土水特性研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 511–524.

ZHANG Y K, YAN K, LI B, et al. Research progress on soil reconstruction and soil–water characteristics in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 511–524.

中国土壤重构及其土水特性研究进展

张玉锴^{1,2}, 阎凯³, 李博³, 黎李杨⁴, 杨松^{1,2}, 普建丹¹, 王楚燕¹, 杨国东¹, 张川^{1,2,5*}

(1. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201; 2. 自然资源部云南山间盆地土地利用野外科学观测研究站, 昆明 650201; 3. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 4. 云南远科土地整治规划设计有限公司, 昆明 650201; 5. 中国矿业大学中国资源型城市转型发展乡村振兴研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘 要:土壤是土地生态系统的基底和基础,土壤重构对土地复垦、土地质量提升和生态环境恢复等具有重要意义。本文采用文献分析法和对比分析法,分析了我国土壤重构基本概念与内涵、土壤重构技术及其土水特性运行机理。根据研究对象、研究目的、填充材料和关键技术的对比分析,认为土壤重构与土体有机重构两者的概念与内涵存在交叉和包含关系,两者研究对象及目的均为损毁土地及缺陷土地的再生利用及其生态系统恢复,关键技术侧重土壤剖面结构和功能的重构;重构材料属于包含关系,土体有机重构填充材料多为有机物和生物材料,包含矿区副产品等。根据土壤损毁的特征,将土壤剖面重构类型分为功能退化型、土层损毁型、土层结构紊乱型和土层污染型。土壤重构材料的选取应因地制宜;土壤重构施工技术应更多关注如何减少对土壤结构的破坏和降低压实度,从而减轻对表土的破坏并提高土壤生产力。土壤重构主要针对矿区土地复垦,其对土水特性的影响侧重于模型模拟和土壤的保水性,重构后的土壤对土壤中水分和溶质运移有一定的阻碍作用,不利于降水入渗补给;土壤重构研究还应关注不同土壤重构模式下短时间序列土壤水分运移及其机理。针对目前土壤重构技术发展现状,建议今后深入开展土壤重构的生态材料研发、土壤与其他要素耦合机理、全过程监测和信息化技术融合、农区土壤重构和城市景观重构等方面的理论与技术研究。

关键词:土壤剖面;重构材料;重构施工技术;水分运移;入渗特性;土水特征曲线

中图分类号:S152

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)03-0511-14

doi: 10.13254/j.jare.2022.0487

Research progress on soil reconstruction and soil–water characteristics in China

ZHANG Yukai^{1,2}, YAN Kai³, LI Bo³, LI Liyang⁴, YANG Song^{1,2}, PU Jiandan¹, WANG Chuyan¹, YANG Guodong¹, ZHANG Chuan^{1,2,5*}

(1. College of Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Ministry of Natural Resources Observatory of Land Use in Yunnan Mountain Basin, Kunming 650201, China; 3. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. Yunnan Yuanke Land Improvement Planning and Design Co., Ltd., Kunming 650201, China; 5. Research Center for Transition Development and Rural Revitalization of Resource-based Cities in China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Soil is the foundation of land ecosystems, and its reconstruction is of great importance for land reclamation, land quality improvement, and ecological environment restoration. Two methods, literature and comparative analyses, were adopted to analyze the basic concepts and implications of soil reconstitution, soil reconstitution techniques, and the operational mechanisms of soil and water properties in China. The results showed the following: based on a comparative analysis of the research object, research purpose, filling materials, and

收稿日期:2022-07-22 录用日期:2022-09-21

作者简介:张玉锴(1997—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事土木水利和土地资源保护研究。E-mail:794509905@qq.com

*通信作者:张川 E-mail:zhangchuan0569@sina.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32160304,41867038);自然资源部科技创新团队开放基金项目(YNTD2018KF05);云南省自然科学基金项目(202001AU070114,202101AT070754)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(32160304,41867038);Scientific and Technological Innovation Team Project of the Ministry of Natural Resources, China(YNTD2018KF05); The Natural Science Foundation of Yunnan Province, China(202001AU070114,202101AT070754)

key technologies, the concepts and implications of soil reconstruction and organic reconstruction were observed to have overlapping and inclusive relationships. The research objectives and purposes of both approaches were the recycling of damaged and defective land, and ecosystem restoration. The key technology focused on the reconstruction of the soil profile structure and function; reconstruction materials belonged to an inclusive relationship. In addition, the filling materials for soil organic reconstruction were primarily organic and biological materials, including the by-products of mining areas. Based on the characteristics of soil damage, soil profile reconstruction could be divided into four types: soil function degradation, soil damage, soil structure disorder, and soil pollution. Correspondence between the selection of soil-reconstituting materials and the local circumstances was recommended. Soil reconstruction technology also attached great importance to reducing structural damage; soil compaction should be reduced so that damage to the topsoil is reduced and soil productivity is improved. Soil reconstruction focused on land reclamation in mining areas, and its impact on soil-water characteristics focused on model simulation and soil water retention. Moisture and solute transport in the soil are blocked by the reconstructed soil to a certain extent, which is not conducive to precipitation infiltration. Studies on soil-water movement during a short time series and its mechanism under different soil remodeling patterns should also be taken into consideration in soil reconstruction. Further theoretical and technical studies on the research and development of ecological materials for soil reconstruction, the coupling mechanism between the soil and other elements, the integration of complete process monitoring and information technology, and the reconstruction of soil in rural areas and the urban landscape should be conducted.

Keywords: soil profile; reconstruction materials; reconstruction construction technology; water transport; infiltration characteristic; soil-water characteristic curve

土地是一个有机的生命体系,土壤是土地生态系统的基底,是人类生存和发展的物质基础,是经济发展和农业生产最重要的资源。矿产资源的开采、水力侵蚀和化肥农药不合理使用等引发了土壤结构紊乱、土壤肥力下降、土壤污染,造成土壤生产和生态功能部分或完全的损毁和丧失^[1-3]。目前,国内的土地复垦率仅约25%^[4],中低产田占我国耕地面积的50%以上^[5],人均耕地面积在0.1 hm²以下,不足世界平均水平的1/2^[6]。全国因采煤沉陷区造成土地损毁面积总量超过400万hm²^[7],因建设占用、损毁、退耕和农业结构调整等减少耕地面积32.04万hm²^[8],另外,南方丘陵红壤地区水土流失面积高达1亿km²^[9-10],水土流失也相当严重^[11]。土壤重构是土地复垦的有效手段之一,其以恢复或重建损毁土地为目的,不仅可重构适宜的土壤剖面,提高土壤生产力,而且可改善土壤环境质量^[12]。因此,土壤重构理论方法和技术研究对损毁土地修复、退化土地质量提升和生态恢复等具有重要意义。

土壤重构已成为现代农业和工矿区土地修复研究的热点之一^[4-5]。土壤重构技术研究重点不仅仅集中于植被恢复,更侧重于提升复垦土壤的质量。构造一个最优的、合理的、稳定的土壤是进行土壤重构和生态修复最基本的工作^[13]。农区耕作层土壤是农业生产的基础,通过土壤重构把低产田改造为高产田,全面改善农业生产条件和生态环境,从而显著提高耕地质量和土壤生产力水平,实现耕地数量和生态环境协调发展的总体目标^[14]。工矿区土壤重构强调土壤

生产能力的恢复,侧重于土地复垦的再利用,实现土地、环境和景观等生态要素的全面恢复,通过保护措施确保自然资源的成功开发,从而实现生态可持续发展^[15]。因此,土壤重构成为土地复垦与生态修复的关键和核心。本文采用文献分析法和对比分析法,系统地分析了我国土壤重构的基本概念与内涵,归纳、提出了土壤剖面重构类型,对比分析土壤重构技术及其水土特性影响机理,以期为土壤重构技术创新、土壤资源保护和水土资源可持续利用等提供理论支撑和实践指导。

1 基本概念与内涵

1.1 土壤重构

土壤重构是土地复垦与生态恢复的研究重点和核心任务。胡振琪等^[16]提出了包括土壤剖面重构和土壤改良在内的完整的土壤重构概念。土壤重构主要是对工矿区损毁的土壤进行恢复或重建,以改善土壤质量、快速培肥为目的,采用人工施工和土壤栽培技术,重建适宜植物生长的土壤剖面、土壤肥力条件和稳定的地貌景观,使土壤在相对较短的时间内恢复并提高土壤生产力,改善重构土壤的环境质量。李晋川等^[17]进一步提出,土壤重构应以重塑土地为基础,创造一个人工土壤层,增加对土壤的母质类型、元素组成、生物性状等广泛研究。土壤重构是一门交叉学科,是土壤科学、工程生态学、土壤科学和农业科学的一个创新分支,旨在科学地设计和创建土壤结构要

素,运用现代技术手段和天然或人工材料在土壤中构建不同的结构,从而优化土壤性质、机制和生态功能^[18]。胡振琪^[19]总结出土壤重构的研究重点是“受损的土地生态系统”,提出了“土壤生态位”和“土壤关键层”的概念,核心是优化设计土层生态位、确定和优化关键层,将土壤重构技术划分为工程、物理、化学、生物等改良措施^[20],其目的为重构土壤剖面 and 土壤肥力条件,在较短时间内恢复和提高土壤生产力,消除和抑制影响植被恢复和土壤生产力提高的障碍性因素。

土壤重构是一个长期的过程,研究对象是损毁的土地生态系统,以恢复土地使用价值、提高土壤质量、改善生态环境为目标,人为构建和培育新的土壤,使土壤功能更加完善。笔者认为,土壤重构是在损毁的土地上恢复或重建土壤,以土壤剖面重构为原理,运用土地工程及物理、化学、生物和生态措施,确定和优化土壤生态位和关键层,重新构造一个提高土壤生产力和适宜植物生长的复合剖面结构人工土壤,改善土壤性质,恢复土壤生态功能。

1.2 土体有机重构

土体有机重构是通过增减等技术手段实现土体重构的条件,作为土地工程的基础,其服务对象主要是土壤有机生命^[21]。土体有机重构的主要目的是满足目标生命的承载需求,如修复对象的调查、材料的选择、土体结构的构建以及土体化学成分和生物养分的调配等^[2]。土体有机重构工程技术是对未利用土地、退化土地进行改造和重建,创新性地将土体分为5层,从下到上依次是基础层、屏障层、排水层、营养

层、植被层^[22]。重点研究构成土体的材料和结构,对退化、污染、损毁、低效等有缺陷或未利用的土体进行再生或改造,使其重塑为能够支持生命特征的土体,实现生物的生存和繁衍^[23]。土体有机重构需要因地制宜,将其研究对象划分为一定深度的土体,通过相应的技术手段改变土体结构,对受污染的土体及周边环境进行综合治理和修复,通过施配、土体物理重构和土体生物重构等技术手段对土体进行有机重构^[24],胡雅^[25]利用土体有机重构技术,使潼关金矿污染等土地质量得到很大程度的改善和提升,并归纳出适宜作物种植的剖面物理构型,从上到下依次是耕作层、净土层、隔离层、矿渣。

土体有机重构是近年来提出的一个新概念,它通过工程措施改变土体结构,将没有生命特征、条件恶劣的土地改造成适宜生命体生存和繁衍的土体^[26-27],以实现损毁土壤的生态恢复,重建生态系统并提高土壤质量^[28]。土体有机重构以一定深度的土体和有机生命作为研究对象,是集物理-化学-生物等修复为一体的综合治理措施,通过土体结构重组,对矿区损毁、退化、污染、破坏和低效等有缺陷或未利用的土体进行再生或重建,以达到土体改良的目标,使土体环境得到最大程度的改善,从而保护生物多样性,切实惠及民生。

我国土壤类型复杂多样,土壤重构和土体有机重构仍需进一步完善相关理论体系,比较并分析两者在研究对象、研究目的、填充材料和关键技术上的异同(表1),笔者认为土壤重构和土体有机重构存在交叉

表1 土壤重构与土体有机重构对比分析

Table 1 Comparison between soil reconstruction and soil organic reconstruction

项目 Item	研究对象 Research object		重构材料 Reconstructed material		技术方法 Technical method	
	土壤重构 Soil reconstruction	土体有机重构 Soil organic reconstruction	土壤重构 Soil reconstruction	土体有机重构 Soil organic reconstruction	土壤重构 Soil reconstruction	土体有机重构 Soil organic reconstruction
类型	塌陷区、工矿区 损毁等全国 范围矿区	退化型、污染型、 低效型土壤等 缺陷土体	煤矸石、粉煤灰、 河湖淤泥、垃圾、 黄河泥沙	生物有机肥、脱硫石膏、 硫化铁、绿矾、石灰、 磷石膏、硼泥类物质、 有机物质、矿区副产品	一次性填充、 挖深垫浅、 分层剥离错回填、 泥浆泵复垦	改排为蓄、置换、 复配、增减
优点	恢复矿区土地或塌 陷地生产力	土壤质量得到进一步 提高,适用范围广	材料充足且易得	减少污染、 培肥地力	经济效益高、 适用范围广、 简单易行	适用范围广、 土壤结构破坏性小
局限性	以工矿区损毁 土地为主	工程量大,成本高	易造成二次污染	易产生土壤养分障碍	土壤结构错乱、 养分易流失	土体工程量大、 成本增加
差异性	多用于矿区 损毁土地	多用于退化土地,包括矿 区损毁土地	因地制宜,多数 运用矿区的 副产品	多数运用有机物 或生物材料	以挖深垫浅为主、 充填复垦土壤	物理-化学-生物措施 综合修复,设计思路 以“改排为蓄”为主
相同性	矿区损毁土地质量得到改善和优化		土体有机重构材料包含土壤重构材料		重构并快速培肥土壤、改善土壤结构, 使土壤结构达到最优	

和包含关系:①土壤重构研究对象是损毁的土地,主要针对损毁的矿区,土体有机重构强调功能退化土地;②二者目标均为损毁土地的再生利用及生态系统的恢复;③土壤重构填充材料因地制宜,以固体废物、垃圾和泥沙等填充采煤塌陷区,土体有机重构填充材料强调土壤有机质,多数为有机物和生物材料,包含矿区副产品等;④二者关键技术均为土壤剖面结构的研究与重构,土体有机重构着重强调土壤有机质改良,土壤重构研究热点有填充材料的创新、剖面结构的优化、修复后土壤质量和生态环境的动态监测。

在国土空间规划和国土综合整治的背景下,土体有机重构通过综合修复来治理土地,但工程量较大、成本较高,有机质填充材料极易产生土壤养分障碍和污染。经过国内外几十年的研究和实践,形成了较为完善的塌陷区土壤重构技术体系,针对复杂多样的损毁或退化土地,土壤重构的修复理念、修复关键技术、应用和修复后评价及改善措施等方面的研究趋于成熟,有了分层构造的理论方法,且填充材料多为土地开发利用后的副产品,可有效减少环境危害和土地占用等问题,并为土壤资源保护和生态修复提供理论依据和技术支撑。因此,土壤重构是未来我国土地利用和保护的重要研究方向。

2 土壤重构技术

土壤剖面重构是土壤重构技术的核心,指土壤物理介质和土壤剖面层次的重建。研究表明,土壤剖面构建对重构土壤质量起着决定性的作用,其意味着表土的保护和构建,即采用剥离、储存、回填等合理开采和改造工艺,构建有利于土壤剖面发展和植被生长的土壤环境和物理环境^[29]。

根据土壤重构技术方法和工程措施,将自然土壤

剖面分为有矿产资源和无矿产资源两种剖面构型(图1),自然土壤剖面构型由腐殖质层、淋溶层、淀积层和母质层4个基本层次组成,腐殖质在表层与矿物质结合产生有团粒状结构和富含营养的腐殖质-淋溶层,50%的根系在该层;淀积层不利于植物生长,主要作用是阻隔地下水位上升;母质层是由残积物或沉积物组成^[30],随着土壤颗粒由小变大,自然土壤剖面的养分含量随深度增加而减少^[31]。有矿产资源的自然土壤剖面,由于其结构被采矿严重破坏,影响植物生长和生态环境。根据土壤损毁的特征,将土壤剖面重构类型归纳为功能退化型、土层损毁型、土层结构紊乱型和土层污染型,针对这4类土壤进行不同的土壤剖面重构技术。

2.1 土壤剖面重构技术

(1)功能退化型土壤剖面构型(图2)。该剖面的形成是由于城乡建设、过量施肥等人为活动,导致自然土壤功能退化或缺失。郝瑞军等^[32]为发挥不同土层的生态功能,利用土壤剖面重构修复城市退化土壤,将土壤剖面分为表土层、亚表土层、排水层等层次,使土壤拥有较好保水保肥功能,并避免地下水位较高影响根系生长。赵梦炯等^[33]利用碎石和砂石在土壤剖面增设排水层,具有预防根部腐烂的效果。张川等^[34]设置复合耕作层、排水层和排水沟,具有水分立体双向调控的功能,保障了土壤上层水分含量,同时还解决了季节性水分差异性问题。

(2)土层损毁型土壤剖面构型(图3)。该剖面的形成是由于采矿损毁等原因使土层缺失或严重损毁。Zhu等^[35]使用表土、黄土、轻度黏土的质量比为2:2:1混合制成表土替代品,在添加有机物和微生物等改良剂后,其营养物质和微生物含量明显增加,从而加速了土壤熟化过程,使紫花苜蓿株高增加77.78%,其短时间内对作物生长的促进作用非常显著。重构土壤剖面结构时,应适当增加表土层厚度,构建适合植物

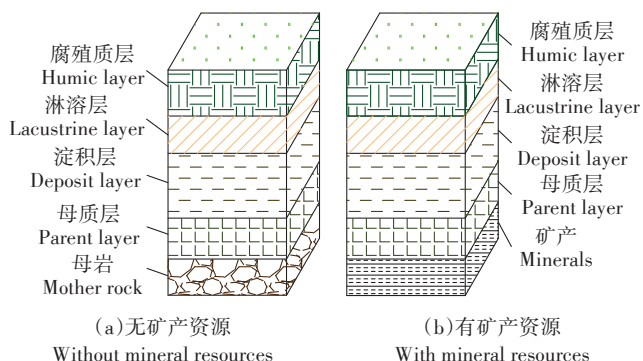


图1 自然土壤剖面构型

Figure1 Natural soil profile configuration

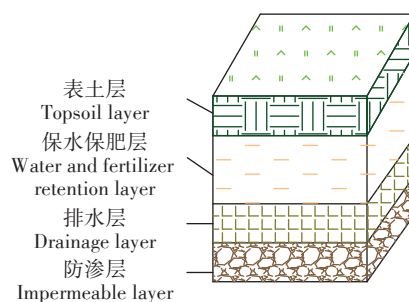


图2 功能退化型土壤剖面构型

Figure 2 Function-degraded soil profile configuration

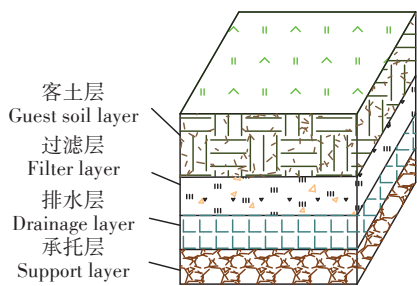


图3 土层损毁型土壤剖面构型

Figure 3 Soil profile configuration damaged soil layers

生长的表土层,以保证植物正常生长,一般表土层应在60~70 cm^[36]。土层损毁型的土壤重构,通过表土替代和客土覆盖增加了表土厚度,能够提高表土有机质和营养物质,短时间内明显促进植物生长,对采矿挖空造成的土层损毁和塌陷具有一定的修复效果。

(3)结构紊乱型土壤剖面构型(图4)。采矿等活动会使土层发生扰动、剖面构型发生紊乱,导致土壤质量和肥力明显下降。现有的煤矿沉陷区土壤剖面结构为“土壤层+充填层”的双层剖面配置。胡振琪等^[37]选择黄河泥沙沉积物作为“上土下沙”双层土壤剖面构型的充填材料,下部充填黄河泥沙80 cm,上部覆土40 cm,结果表明,双层剖面构型的含水量为正常农田的43%,农作物产量仅为正常农田的一半,揭示双层土壤剖面构型的保水保肥能力较差,抑制了农作物的生长。王晓彤等^[38]将土层夹在填充材料之间来改变土壤剖面,选取黄河泥沙为填充材料,表土为粉黏土,心土为黏土,在60 cm厚的黄河泥沙中的不同位置夹20 cm厚心土,结果表明,心土夹层距表土60 cm是黄河泥沙夹层式填充重构的理想选择,其水分入渗特性及土壤持水特性更接近普通农田,表明黄河

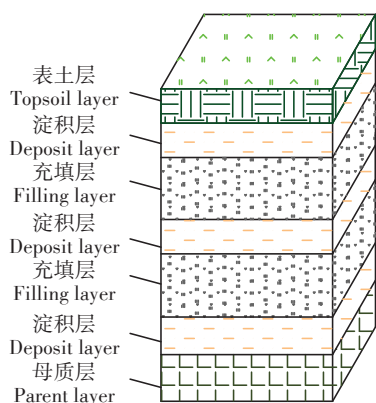


图4 结构紊乱型土壤剖面构型

Figure 4 Structurally disturbed soil profile configuration

泥沙夹层式充填复垦的夹层位置、厚度和数量对土壤水分运动有影响。夹层式多层复合土壤结构方法能够重塑土层结构,改善土壤剖面的水分和养分运移,并提高重构后土壤剖面的保水效果,为黄河泥沙夹层式土壤剖面优化设计提出了一种经济高效的方法,对指导黄河泥沙夹层式充填复垦技术在黄河流域采煤塌陷地的应用推广具有积极作用。

(4)土层污染型土壤剖面构型(图5)。工矿企业排放的废水、尾矿渣、危险废品等各类固体废物,以及过量使用化肥农药、污水灌溉等会导致土地被污染。回填表土和客土覆盖都能够为污染土壤的生态恢复提供良好的土壤条件,但存在诸多局限性,其关键是寻找合适的土源和确定覆盖的厚度和方式^[39]。王萍^[40]在重构土壤剖面中选用针刺非机织土工布和HDPE土工膜构造防渗层,有利于阻隔土壤污染物下渗迁移。污染型土壤剖面重构应根据土壤剖面结构分层构造阻隔层。

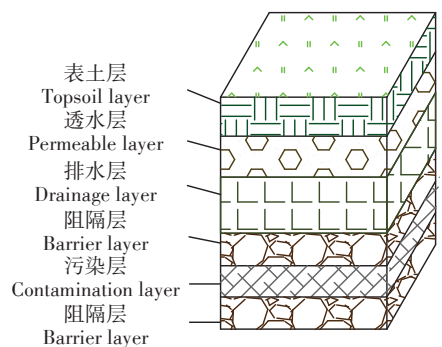


图5 土层污染型土壤剖面构型

Figure 5 Soil profile configuration with contaminated soil layers

损毁土壤的原因多种多样,如采矿挖损、过分施肥、交通建设、市政管道、城乡建设等人为活动,使得损毁土壤的特征具有不确定性和复杂性,这给土壤重构技术的选择带来极大的挑战。为实现土壤剖面的重构,需要采取科学合理的土工施工技术,根据具体土壤条件考虑土壤剖面结构设计,分析该地区土壤形成条件,制定土壤剖面重构方案,优化设计土壤关键层,从而获得具有最佳生产力的土壤剖面构型。

2.2 土壤重构材料

(1)煤矸石填充。采煤严重破坏了农田土层结构,煤矸石是煤炭的主要副产品,它是煤矿区最主要的环境危害之一,煤矸石的堆积占用大量土地,导致土壤肥力和土地生产力下降。煤矸石填充可直接用于建筑用地,也可覆土后用于农业生产,覆土厚度、煤矸石层中有机活性碳及活性成分的积累是影响采煤

沉陷区土壤重构的最重要的因素,也是土壤重构和生态重建的基础^[41-42]。

(2)粉煤灰填充。为了节约和充分利用煤炭资源,燃煤电厂和火电厂通常会靠近煤矿区和矿山,其会产生大量的固体废物,即粉煤灰。由于粉煤灰颗粒较细,占用土地面积大,对矿区周边环境的影响较大。一些学者将粉煤灰与水按一定比例掺混,充填到塌陷地,上层0~50 cm由土壤充填,可直接用于农业生产,也可以填充到地面高程用于建筑用地^[7,43-44]。粉煤灰作为填充材料填充在塌陷区,既利用了固体废物,又恢复了塌陷区的土地,还可以用作肥料来改善土壤营养状况。

(3)河湖淤泥填充。如果塌陷区靠近河流和湖泊,可以用河湖中的淤泥或泥沙进行填埋,这种方法简单,但条件限制较大,因为淤泥通常比较黏重,重构后的土壤质地较细,容重较大,不利于农业生产。胡振琪等^[45-46]将黄河泥沙充填到采煤塌陷地进行土壤重构,提出表土和心土分别实施剥离与回填的流程,并构建剥离与回填的数学模型,确保重构土壤的高生产率。河湖淤泥填充提高了土壤剖面持水性,但一定程度缩减了降水入渗系数,不利于大气降水的补给。

(4)垃圾填充。受限于充填材料的来源,上述充填方式具有一定的局限性。垃圾因量大、范围广,而成为塌陷区比较理想的回填材料。城市垃圾可充填采空区加固采空区基础,建筑垃圾可直接充填,而腐菜、烂叶、塑料、电池等,则需经过一定的处理后才能填充塌陷的土地,进行土壤重构^[47-48]。

由于土壤重构的材料不是原始土壤材料,因此实际应用中存在一定的缺陷,例如煤矸石和河湖泥沙通常粒径大、有机碳含量高、保水性差,往往会对植物生长产生障碍;粉煤灰可能会造成重构土壤的二次污染;河湖淤泥黏粒高,渗透性小,不利于大气降水的补给。由于传统的土壤重构土地恢复率低、重构周期长,有学者提出了采矿-复垦一体化的新理念^[49],使损毁土壤的恢复周期大大缩短。填充材料有限的数量及潜在的污染限制了该技术的应用,因此在选择土壤重构材料时应充分考虑材料的优缺点,除单一材料重构外,还可采用两种或多种材料混合重构;同时考虑环境友好型生态材料的研究开发和应用,并全方位评估土地重构后对土壤质量和生态环境的影响。

2.3 土壤重构施工技术

(1)土地平整法。对于地形起伏小、面积大、变化

单一、沉降浅的均质沉降地,可通过土地平整措施进行土壤重构,为防止土地平整后表土养分过于贫瘠和物理环境恶化,同时保证不破坏土壤结构层次,需要引入表土处理技术^[50],即先剥离20~50 cm的表土层进行土地平整,最后覆盖表土。土地平整法操作简单、适用面广、经济效益高、生态效益显著。

(2)修筑梯田法。对于地形起伏大、损毁严重、沉降较深的混合沉降地,可采用修筑梯田的方法进行土壤重构,通过坡改梯减缓土壤坡度,增加耕作层土层的厚度,达到改善土壤的目的,使土壤向有利于作物生长的方向发展^[51]。三峡库区退化坡耕地采取了坡改梯田整治技术、耕作农艺技术和生物篱生态过滤带技术进行恢复重建^[52]。有学者提出用植物坎代替石坎的设想,解决了石坎坡改梯中成本高和施工难度大的问题^[53]。

(3)标准条田法。适用于地势低洼、洪涝灾害频发的地区,地势平坦、排水不畅的地区,以及低度盐碱化和次生盐碱化的地区,在区域内进行条田修筑,可达到排水排盐、改良土壤、便于机械作业的目的。刘光盛等^[54]提出耕地宜机化是推进丘陵山区农业机械化的重要途径,丘陵山区应制定耕地宜机化专项规划,出台相关技术标准,因地制宜建设相互连接的地块、水平条田、水平梯田、缓坡旱地、梯台旱地等不同类型宜机化耕地;在农业区划的基础上,进一步根据地形、土壤、水文以及灌排特点的要求,结合农场具体情况,做好农田规划。

(4)深沟台田法。适用于排水良好的混合型或条带型浅塌陷地。具体方法为在塌陷地挖几段深沟,取出的土壤就近摊平,抬高地面搭建台田^[55]。深沟台田法是“挖沟”与“造田”相结合的土壤重构,成本较低,既能有效降低土壤盐碱化,又能解决耕地排水问题。淮南、淮北、滨海、黄河口等矿区均有采用“深沟台田”法恢复大面积塌陷区或盐渍荒地的实践案例^[56-57]。

(5)挖深垫浅法。适合多种类型的塌陷地,也是塌陷较深、高积水、中潜水位采煤沉陷地非填充土壤重构最常用的方法。具体是将造田与挖塘相结合,利用机械挖深沉陷区形成水塘,取出的土填入浅沉陷区形成耕地,实现水产养殖和农业种植共同发展^[29]。目前常用的方法是利用泥浆泵将深层含黏粒高的下层土翻上来,但该土壤含水量过大、透水性变差,入渗率降低,从而影响微生物活性和根系正常发育,导致生产力低下^[58]。有学者提出一种新型的沉陷地复垦技术——拖式铲运机复垦技术,与其他土壤重构相比,

该技术具有速度快、效率高、工期短、土壤养分流失较小的优点^[59]。

目前,我国已形成较为完善的塌陷区土壤重构技术体系,逐步实现了量化、程序化、规范化、标准化,为矿区生态修复提供了有力的科学依据和支撑。Luo等^[60]利用探地雷达检测重构土壤的体积含水量,以确定植被重建过程中的最佳浇水时间,促进植被生长,为研究人员分析复垦区植被生长情况提供依据和技术支撑,我国的土壤重构技术针对复杂多样的塌陷地开展修复理念、关键技术、应用、修复后评价及改善措施等方面的研究^[61],传统的一次性充填和泥浆泵充填方式存在土壤结构紊乱和养分流失严重等问题,不利于土壤的生产力恢复,之后提出的表土剥离技术和多层交替填土法解决了原有充填方式的缺陷。为降低土壤重构工程的施工难度,提升经济效益,有必要对不同区域条件的土壤剖面结构进行研究。

3 土壤重构对水土特性的影响

3.1 土壤水分变化和运移规律

土壤一般为交错复杂的层状结构,不同土壤层状结构的土壤含水量和持水能力存在显著差异^[62],由于土壤重构中的土壤剖面构型会影响土壤容重、质地和水分,因此土壤重构中不同充填材料和表土替代材料必然影响土壤水分运移^[63-64]。水分在土壤形成过程中直接影响土壤孔隙,极大地改变了土壤地下水和生态环境。

前人对土壤重构过程中土壤水分变化和运移规律进行了较多研究,根据不同的土壤剖面结构,分析了层状土壤水分入渗过程的研究现状,揭示了土壤的饱和导水率主要取决于土壤的导水特性,以及不同土壤对水分和溶质运移的影响,建立了浅层与深层之间水分运移的定量模型^[65-67]。陈帅等^[68]利用 Richards 方程模拟层状夹砂土柱的水分运移过程,发现几何平均和三点平均更适合层状夹砂土壤水分运移数值模拟。王春颖等^[69]建立 S-Green-Ampt 模型来模拟层状夹砂土柱水分运移的机理,结果表明, S-Green-Ampt 模型模拟基质吸力较大的土柱水分运移误差较大。有学者使用煤矸石作为土壤重构的填充材料^[70-72],发现煤矸山复垦重构土壤下林地和草地 1 m 土层的平均含水量和总贮水量明显高于普通农田, 60~100 cm 土层的差异最大;重构土壤温度和水分随土层深度增加而增加,超过 25 ℃时,土壤水分随土层深度增加而降低。Hydrus-1D 软件可以很好地检测不同深度的重

构土壤剖面含水量分布,土层之间的界面存在一个“障碍带”,当水汽接触“障碍带”时便开始受阻,导致水在土层中积聚^[73-74]。吴国龙等^[75]通过探究浅层不同土层的水分垂直分布变化规律,建立了浅层与深层的水分含量运移的定量模型。对于高潜水位采煤塌陷区的土壤重构,设置土柱上层 0~50 cm 为土壤填充, 50~80 cm 为粉煤灰、煤矸石、粉煤灰与煤矸石混合填充,采用室内土柱试验对固定地下水位土壤水分运移过程进行检测,测定了煤矸石和粉煤灰混合物回填土壤重构模式含水率、保水性和渗透性,该模型是高潜水位采煤塌陷区土壤重构最理想的模式^[7]。

土壤是一个复杂的生态系统,其含水率和持水能力受取样时间、压实度、容重、地形、有机碳含量、土壤结构和表层枯落物层厚度等因素的影响^[76],Chen 等^[77]揭示了煤矸石重构的土壤 12 a 再生表土(0~10 cm)的持水能力是原状土壤的 0.77 倍,粉煤灰填充的粉煤灰层含水量明显高于表层土壤,水分垂直向上运移能力较差。

综上所述,土壤重构中的充填法在很大程度上改变了土壤含水率和土壤水分运移规律,粉煤灰填充土壤含水量明显高于原状土壤表层,但溶质向下运移容易造成潜在地下水污染;煤矸石填充土壤温度超过 25 ℃时,水分会随深度增加而减小,重构后的土层之间的界面会形成积水带。目前,关于不同土壤重构模式下土壤水分运移规律的研究较少,土壤水分运移的土壤剖面重构最优设计及其机理研究有待加强。

3.2 土壤入渗特性

土壤水分入渗是指水从土壤表面渗入土壤的过程。土壤入渗特性是土壤保水和抗侵蚀能力的重要指标^[78]。由于层状界面存在毛管障碍,会降低土壤水分入渗率,提高土壤持水能力,土壤剖面不同层次的土壤入渗能力有所差异。

前人对土壤重构入渗特性进行了研究,利用 Hydrus-1D 模型模拟土壤重构中土壤容重对入渗能力的影响,发现土壤容重从 1.2 g·cm⁻³ 增加到 1.6 g·cm⁻³,土壤水分入渗深度降低^[79],以风沙土、红黏土、煤矸石、玉米秸秆和腐植酸 5 种材料代表土,证明了 Kostiaikov 入渗模型和 Rose 蒸发模型均适合模拟含表土替代材料的夹层土壤水分入渗和蒸发过程^[80]。王晓彤等^[38]和 Wang 等^[81]研究了不同位置设置黏土夹层对黄河泥沙充填重构土壤水分入渗特性的影响,当夹层距表土 60 cm 时,土壤水分入渗特性更接近普通农田,是黄河泥沙夹层式充填复垦的理想选择。混掺

树叶沙土-壤土可以提高上层土壤(0~15 cm)的含水量,提高水分入渗率,使土壤有更好的通气性^[82]。土壤重构中对采煤塌陷裂缝区采取夹层式充填,其土壤水分入渗更接近普通农田^[83],但对于露天矿区排土场而言,黏土夹层降低了降水入渗系数,不利于降水入渗补给^[84],分层重构方式可以提高土壤的累积入渗量,降低湿润锋运移和土壤水分入渗的速率,增加土壤表层水分入渗量,提高土壤保水能力^[85]。研究表明夹层厚度、数量和位置的增加,均能在一定程度上提高重构土壤入渗过程的持水量^[86]。

综上所述,模拟土壤不同土层入渗特性精确度最高的是Hydrus-1D和Kostiakov入渗模型,土壤重构中夹层充填的土壤水分入渗更接近普通农田,黏土夹层不同位置和厚度影响着土壤重构后的含水率和入渗速率,对于不同土壤损毁类型需要不同的土壤重构关键层方案,创新损毁土地的土壤重构理论,研发联合修复手段,实现土壤生态系统的修复与提升。

3.3 土壤稳定性

在土壤重构过程中,由于各种土地工程措施,土壤容重往往会发生显著变化。天然土壤容重一般为 $1.35\sim 1.53\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,而重构的土壤大多为 $1.5\sim 1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,在土壤重构施工过程中会使用大型机械对土壤进行翻、挖、垫、平等工程措施,使土壤压实并增加其容重^[30,42]。

土壤重构中的非充填重构对土壤的结构扰动较小,机械使用频率较低,其重构后表土容重($1.20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)比天然土壤容重($1.50\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)小,但土壤总孔隙度和毛管持水量较大^[87]。陈龙乾等^[88]对徐州矿区不同时期不同土层的重构土壤进行检测和分析,揭示了泥浆泵重构土壤物理特性的时空演化规律,发现泥浆泵重构后土壤表层质地与正常农田相比偏黏,底层偏砂性;土壤表层容重偏高,底层偏低;土壤团粒结构含量偏低,随时间的推移表现为表层容重不断降低、底层容重不断增加,土壤团粒结构含量不断增加。弃渣边坡土壤在植被作用下容重($1.59\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)均大于原地貌单元($1.38\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[89],超过适合植物生长的土壤容重($0.90\sim 1.49\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。Wang等^[90]以黄土地区的露天煤矿和平朔煤矿为研究区域,采用实地调查与抽样、时空置换、定性与定量相结合的研究方法,基于土壤质量指数法构建了重构土壤质量演替模型。长期开垦后,重构土壤的理化性质明显改善,但土壤物理性质仍在一定程度上限制了重构土壤质量的提高,土壤容重和田间持水量比原始地貌差得多,在倾倒和复

垦过程中,重型机械的反复碾压增加了倾倒区的土壤容重,降低了田间持水量。

由于非充填重构对土壤扰动较小,土壤容重接近正常农田。对土壤容重和团聚体影响因充填重构中使用的不同机械设备而不同,使用自卸汽车的土壤容重为 $1.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,而使用推土机的土壤容重则高达 $1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[91]。由于土壤孔隙决定土壤透水性、通气性和肥力保持,因此未受干扰的土壤比压实的土壤对土地复垦更有利,压实土壤的微观结构已被严重破坏,土壤物理性质(容重、团聚体等)产生较大的变化,土壤容重增加,导致水分入渗速率和持水量降低,不利于植物生长,因此应在土壤重构的技术方法中考虑减少土壤的压实扰动。

3.4 土水特征曲线

土水特征曲线是模拟土壤基质吸力和土壤含水率变化的模型,反映不同土壤的持水和释水特性,该曲线反映了土壤理化性质和土壤持水能力之间的相互关系,不同土壤的水分常数和特征指标是研究土壤水分必不可少的重要参数。土壤水文性质在一定程度上控制着生态系统的构成和演替,决定着生态修复的成败与效益高低。

以滨海盐渍土及历经5 a的配制客土(客土、山皮砂、草炭以3:1:1的体积比配制而成)为研究对象,利用Van Genuchten模型(简称VG模型)、Dual-porosity模型(简称DP模型)、Lognormal distribution模型(简称LND模型)和Brooks and Corey模型(简称BC模型)对这2种土壤不同土层的水分特征曲线进行拟合,结果表明,配制客土有效含水量以及田间持水量明显低于滨海盐渍土,盐渍化程度减弱,有机质增加,但持水特性和物理性质没有明显的改善^[92]。汪怡珂等^[93]利用砒砂岩复配土壤对风沙土进行改良,运用高速离心机法测定复配土壤水分特征曲线,研究结果显示在相同土壤水吸力下,砒砂岩含量越高,土壤保水性越强,且含水率均高于纯风沙复配土;低吸力阶段,砒砂岩的添加减少了土壤中大孔隙的比例,从而使含水率降低;而在中高吸力阶段,砒砂岩的添加增大了土壤中小孔隙的比例,从而提高土壤的持水能力。运用上覆岩层作为表土替代材料,结果显示AP(Arya and Paris模型)和MVVG(MV Model with Van Genuchten模型)可以准确地预测矿区上覆岩层土壤水分特征曲线和土壤有效含水量,结果表明,粉砂壤土层的土壤有效含水量最高^[94]。孙浩^[83]对露天矿区排土场进行“腐殖土+黏土+中砂”的土壤重构模式,利用Van Genu-

chten-Mualem模型描述土壤水分特征曲线和土壤水分渗透系数,结果表明现有土壤重构模式大大提高了50 cm以上土层的土壤含水率。

综上所述,土壤水分特征曲线可以有效反映土壤理化性质和土壤持水能力的关系,短期内重构土壤持水性能得到有效提高,但不利于降水入渗补给,土壤重构长期的持水特性和物理性质却没有明显改善。目前,重构土壤的持水能力主要通过直接测量土壤含水率判断,土壤水分特征曲线模型运用较少,今后可通过模拟不同时间段的土壤水分特征曲线模型,判断土壤含水量的有效程度。

4 结论

(1)土壤重构与土体有机重构的概念和内涵存在交叉和包含关系,两者研究对象及目的均为损毁土地及缺陷土地的再生利用及其生态系统恢复,关键技术侧重土壤剖面结构和功能的重构;土壤重构充填材料的选取应因地制宜,以矿区副产品、固体废物、垃圾和泥沙等填埋采煤塌陷区,而土体有机重构填充材料多为有机物和生物材料,包含矿区副产品。

(2)根据土壤损毁的特征,本文将土壤剖面重构类型分为功能退化型、土层损毁型、土层结构紊乱型和土层污染型4类。土壤重构材料的选取侧重于原位废弃物的资源化再利用,如煤矸石、粉煤灰和泥沙淤泥等,根据材料的优缺点选用两种或多种材料混合重构,可有效地提升土壤质量;土壤重构施工技术应更多关注如何减轻土壤结构破坏度、降低压实度,从而降低对表土的破坏程度,提高土壤生产力。

(3)土壤重构研究侧重于矿区土地复垦,如煤矸山、采煤塌陷区和露天煤矿等损毁土地复垦。土壤重构对水土特性的影响研究侧重于模型模拟和土壤保水性,重构后的土壤短期内避免了水分快速渗漏,有效提升了土壤持水特性和保水保肥特性,但对土壤中水分和溶质运移有一定的阻碍作用,强降雨条件下容易形成地表径流,不利于降水入渗补给,今后研究应关注不同土壤重构模式下短时间序列土壤水分运移及其机理分析。

5 展望

本文总结和评价了土壤重构和土体有机重构的概念、土壤重构剖面技术及其对水土特性的影响。土壤重构概念与内涵应进一步丰富,土壤重构在恢复土地使用价值和生态环境修复方面的理论体系应进一

步完善。针对目前土壤重构技术的发展现状,本文提出未来土壤重构研究重点:

(1)基于生态材料的土壤重构技术研发。土壤重构具有改善土壤结构、保水保肥、提高农作物产量等优点,但由于填充材料多为矿区废弃物、淤泥、垃圾等,易产生二次污染,可能对土壤造成潜在的环境风险,因此,在选择填充材料时,应注意重构后土壤材料残留组分对土壤的影响。未来应重点发展人工生态系统技术,开发纳米材料、生态环保材料等新材料作为土壤重构的填充材料,实现易获取、低成本、生态环保和循环利用。

(2)土壤要素与其他要素耦合机理研究。由于损毁或退化的土地类型多样,不同的损毁农区和矿区应采取不同的重构方式,应深入、系统地研究土壤重构的粒度要求、层次重构特征、生化需求和营养支持等,根据具体土壤条件设计土壤剖面结构,分析区域土壤形成条件,制定科学合理的土壤剖面重构方案和施工技术,创新发展联合修复技术手段,协同土壤、水分、植被、微生物、生态环境等多领域,实现整体土壤生态系统的修复与提升。

(3)土壤重构全过程监测和土地信息化技术融合研究。结合大数据技术使土地信息化,用于土壤重构后的土壤质量长时间序列监测,利用大数据模拟损毁土壤不同土层的发展状况,旨在利用科学数据信息开展土壤重构实施和土地工程开发,发展“3S”技术,对重构后土壤的生态系统进行长期的动态监测与预测,更好地保障土地生态环境。

(4)农区土壤重构和城市景观重构技术与方法研究。不同土壤损毁类型需要不同的土壤重构关键层方案,应不断创新损毁土地的土壤重构理论,实现土壤生态系统的修复与提升。目前土壤重构的研究对象多为矿区损毁土地,农区土壤重构和城市景观重构研究较少。对于低产田,可利用重构技术方法提升土地质量,减少或消除土地污染,提升农村粮食种植安全,保障农村土地生态环境健康发展。

参考文献:

- [1] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161. ZHANG P, YAO W Y, LIU G B, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24):154-161.
- [2] 韩霖昌.土地工程基础[M].北京:科学出版社,2017. HAN J C. *Fundamentals of land engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2017.

- [3] 胡振琪. 再论土地复垦学[J]. 中国土地科学, 2019, 33(5): 1-8. HU Z Q. Re-exploration of land reclamation science[J]. *China Land Science*, 2019, 33(5): 1-8.
- [4] 王莉, 张和生. 国内外矿区土地复垦研究进展[J]. 水土保持学报, 2013, 20(1): 294-300. WANG L, ZHANG H S. The research progress of land reclamation in mining areas in domestic and abroad[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 294-300.
- [5] 范玉芳, 魏朝富. 基于耕地质量提高的土壤工程技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 929-931, 958. FAN Y F, WEI C F. Research progress on soil engineering technology based on the improvement of cultivated land quality[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(2): 929-931, 958.
- [6] 闫波, 蔡苗, 魏祥. 土体有机重构技术在黄河滩地的应用——以韩城市下峪口项目为例[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2016(4): 70-74. YAN B, CAI M, WEI Y. Application of bottomland organic reconstruction on Yellow River beach: Taking project of Xia Yukou, Hancheng as an example[J]. *Land Development and Engineering Research*, 2016(4): 70-74.
- [7] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007(6): 276-280. LI X J, HU Z Q, LI J, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007(6): 276-280.
- [8] 胡一. 荒石滩土体有机重构技术与工程实践——以陕西省华阴白龙洞土地整治项目为例[J]. 农业工程, 2019, 9(1): 59-62. HU Y. Land organic reconstruction technology and engineering practice of desolate beach: Taking Bailongjian land reclamation project in Huayin City of Shaanxi Province as an example[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(1): 59-62.
- [9] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622. ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [10] 冯兆滨, 王萍, 刘秀梅, 等. 我国红壤改良利用技术研究现状与展望[J]. 江西农业学报, 2017, 29(8): 57-61. FENG Z B, WANG P, LIU X M, et al. Research progress and perspective of red soil improvement and utilization technology in China[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29(8): 57-61.
- [11] ZHANG G L, WU H Y, SHI Z, et al. Priorities of soil research and soil management in China in the coming decade[J]. *Geoderma Regional*, 2022, 29: e00537.
- [12] 尹万伟, 黄本波, 汪凤玲, 等. 土壤调理剂的研究现状与进展[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(2): 19-23. YIN W W, HUANG B B, WANG F L, et al. Research status and progress of soil conditioner[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2019, 34(2): 19-23.
- [13] 王庆日, 郎海鸥, 仲济香, 等. 2020年土地科学研究重点进展评述及2021年展望[J]. 中国土地科学, 2021, 35(2): 71-83. WANG Q R, LANG H O, ZHONG J X, et al. Progress review on land science research in 2020 and prospects for 2021[J]. *China Land Science*, 2021, 35(2): 71-83.
- [14] LI J, LU Y J, SHI C D. Research on integrated ecological management engineering model of soil organic reconstruction[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(2): 1-9.
- [15] 文姿力. 生态修复背景下的国土综合整治分析[J]. 南方农业, 2021, 15(17): 9-10. WEN Z L. Comprehensive rehabilitation analysis of land under the background of ecological restoration[J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(17): 9-10.
- [16] 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 Z Q, WEI Z Y, QIN P. Concept of and methods for soil reconstruction in mine land reclamation[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 8-12.
- [17] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J]. 科技导报, 2009, 27(17): 30-34. LI J C, BAI Z K, CHAI S J, et al. Study on technology of land reclamation and ecological reconstruction of waste land in Pingshuo surface mine[J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(17): 30-34.
- [18] SMAGIN A V, SADOVNIKOVA N B. Creation of soil-like constructions[J]. *Eurasian Soil Science*, 2014, 48(9): 981-990.
- [19] 胡振琪. 矿山复垦土壤重构的理论与方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 2499-2515. HU Z Q. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 2499-2515.
- [20] 程纪元, 白中科, 杨博宇, 等. 土地复垦美学视觉评价: 以黄土高原矿区为例[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 165-174. CHENG J Y, BAI Z K, YANG B Y, et al. Visual evaluation of land reclamation aesthetics: An example of the Loess Plateau mining areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 165-174.
- [21] 韩霖昌, 孙婴婴, 张扬, 等. 复配型土体有机重构技术初探——以砒砂岩与沙复配成土为例[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2016(1): 16-23. HAN J C, SUN Y Y, ZHANG Y, et al. Research on principle of compound land organic reconstruction technology: Taking soft rock-sand amended soil as an example[J]. *Land Development and Engineering Research*, 2016(1): 16-23.
- [22] LI G, LU N, WEI Y. Research progress on contaminated soil remediation materials based on soil organic reconstruction[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 300(3): 1-7.
- [23] 李刚. 煤矿采空区土体有机重构对植被恢复效应及生态环境影响的探讨[J]. 南方农业, 2020, 14(27): 189-191. LI G. Exploration on the effect of organic reconstruction on vegetation restoration and ecological environment in coal mining areas[J]. *South China Agriculture*, 2020, 14(27): 189-191.
- [24] 张杭州. 土体有机重构在农村土地生态修复中的具体运用研究[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(8): 158-159. ZHANG H Z. Application of soil organic restructuring in rural land ecological restoration[J]. *Agricultural Disaster Research*, 2021, 11(8): 158-159.
- [25] 胡雅. 矿区污染土体有机重构技术与实施——以潼关金矿为例[J]. 时代农机, 2020, 47(2): 22-23. HU Y. Organic restructuring technology and implementation of contaminated soil in mining areas: The example of Tongguan gold mine[J]. *Times Agricultural Machinery*, 2020, 47(2): 22-23.
- [26] 何振嘉, 范王涛, 杜宜春, 等. 基于土体有机重构的水肥耦合对土

- 壤理化性质和水稻产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(3): 176-185. HE Z J, FAN W T, DU Y C, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the physical and chemical properties of rice soil and yield based on soil organic restructuring[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(3): 176-185.
- [27] 关红飞, 蔺亚莉. 陕北矿区耕作层构建技术——以陕西省神木县孙家岔镇排界村土地开发项目为例[J]. 农业工程, 2020, 10(5): 76-79. GUAN H F, LIN Y L. Cultivation layer construction technology in northern Shaanxi in mining areas: A case study of land development project in Paijie Village, Sunjiacha Town, Shenmu County, Shaanxi Province[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(5): 76-79.
- [28] 魏静, 王欢元, 孙增慧, 等. 富平石川河的生态修复[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2545-2552. WEI J, WANG H Y, SUN Z H, et al. Ecological restoration of Shichuan River in Fuping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8): 2545-2552.
- [29] 郑礼全, 胡振琪, 赵艳玲, 等. 采煤沉陷地土地复垦中土壤重构数学模型的研究[J]. 中国煤炭, 2008(4): 54-56. ZHENG L Q, HU Z Q, ZHAO Y L, et al. A study on the soil restructure mathematical model for land reclamation in coal mining subsidence areas[J]. *China Coal*, 2008(4): 54-56.
- [30] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 198-206. HU Z Q, DUO L H, WANG X T. Principle and method of reclaiming subsidence land with interlayers of filling materials[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 198-206.
- [31] 胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 617-622. HU Z Q. Principle and method of soil profile reconstruction for coal mine land reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(6): 617-622.
- [32] 郝瑞军, 刘海波, 马薇. 园林土壤工程的土体剖面重构技术及应用[J]. 上海建设科技, 2020(6): 71-73. HAO R J, LIU H B, MA W. Soil profile reconstruction technology and application on landscape soil engineering[J]. *Shanghai Construction Science & Technology*, 2020(6): 71-73.
- [33] 赵梦炯, 姜成英, 吴文俊, 等. 一种预防油橄榄根部腐烂的土壤排水系统: CN212294956U[P]. 2021-01-05. ZHAO M J, JIANG C Y, WU W J, et al. A soil drainage system for preventing root rot of olive: CN212294956U[P]. 2021-01-05.
- [34] 张川, 张耿杰, 刘淑霞, 等. 一种渍水农田水分立体调控系统的构建方法: CN105421314B[P]. 2017-11-03. ZHANG C, ZHANG G J, LIU S X, et al. A method for constructing a three-dimensional water regulation system for waterlogged farmland: CN105421314B[P]. 2017-11-03.
- [35] ZHU Q, HU Z Q, LIU X R, et al. Topsoil alternatives selection for surface coal-mined land reclamation in Inner Mongolia, China: An experimental study[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2021, 35(6): 421-434.
- [36] 邵芳, 胡振琪, 樊延立, 等. 玉米形态指标对黄河泥沙充填复垦覆土厚度的响应[J]. 煤炭技术, 2016, 35(12): 10-11. SHAO F, HU Z Q, FAN Y L, et al. Response of maize morphological indicators to different thickness of covered soil on Yellow River sediment[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(12): 10-11.
- [37] 胡振琪, 王培俊, 邵芳. 引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 288-295. HU Z Q, WANG P J, SHAO F. Technique for filling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 288-295.
- [38] 王晓彤, 胡振琪, 赖小君, 等. 黏土夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 86-93. WANG X T, HU Z Q, LAI X J, et al. Influence of clay interlayer position on infiltration of reclaimed soil filled with Yellow River sediment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18): 86-93.
- [39] 周连碧, 王琮, 杨越晴. 典型金属矿区污染土壤生态修复研究与实践进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(3): 10-18. ZHOU L B, WANG Q, YANG Y Q. Progress in research and practice of ecological restoration of contaminated soil in typical metal mining areas[J]. *Non-ferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(3): 10-18.
- [40] 王萍. 一种基于土工布的采煤塌陷地充填复垦方法: CN107489448A[P]. 2017-12-19. WANG P. A geotextile-based method for filling and reclamation of coal mining collapsed land: CN107489448A[P]. 2017-12-19.
- [41] 陈孝杨, 周育智, 严家平, 等. 覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1236-1243. CHEN X Y, ZHOU Y Z, YAN J P, et al. Effects of topsoil thickness on active organic carbon distribution in reconstruction soil filled with coal gangue[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(5): 1236-1243.
- [42] 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 Y H, KUANG X Y, CAO Y G, et al. Comparison of soil physical properties between reclaimed land and undamaged land in grassland opencast mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(7): 940-946.
- [43] 宋扬睿, 王金满, 李新风, 等. 高潜水位采煤塌陷区重构土壤水分运移规律模拟研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 143-154. SONG Y R, WANG J M, LI X F, et al. Simulation of moisture transfer law with different soil reconstruction models in coal mining subsided area with high ground-water level[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 143-154.
- [44] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 塌陷地粉煤灰充填复垦土壤的污染性分析[J]. 中国环境科学, 2004(3): 56-60. HU Z Q, WEI Z Y, QIN P. Contamination character analysis of filling reclaimed soil with fly ash in subsided land[J]. *China Environmental Science*, 2004(3): 56-60.
- [45] 胡振琪, 邵芳, 多玲花, 等. 黄河泥沙间隔条带式充填采煤沉陷地复垦技术及实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 557-566. HU Z Q, SHAO F, DUO L H, et al. Technology of reclaiming subsided land with Yellow River sediments in form of spaced strips[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 557-566.
- [46] 胡振琪, 李勇, 陈洋. 黄河泥沙在生态修复中的作用机理与关键技术[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 1-15. HU Z Q, LI Y, CHEN Y. The mechanism and key technology of the Yellow River sediment in ecological restoration[J]. *Journal of China University of*

- Mining & Technology*, 2022, 51(1):1-15.
- [47] 孙纪杰. 不同复垦机械压实对土壤物理特性影响的模拟研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014:8-16. SUN J J. The simulation of different land reclamation mechanicals compaction effect on the soil physical properties[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014: 8-16.
- [48] 许志琴. 利用城市垃圾进行采空区路基加固技术初探[J]. 山西建筑, 2014, 40(25):168-169. XU Z Q. On exploration for consolidation technique for goaf subgrade with urban rubbish[J]. *Shanxi Architecture*, 2014, 40(25):168-169.
- [49] 胡振琪, 肖武. 矿山土地复垦的新理念与新技术——边采边复[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9):178-181. HU Z Q, XIAO W. New idea and new technology of mine reclamation: Concurrent mining reclamation[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9):178-181.
- [50] 郑财贵, 朱玉碧. 浅析南方丘陵地区土地平整中的表土问题及对策[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7):512-515. ZHENG C G, ZHU Y B. Research on surface soil of land leveling questions and countermeasures in hilly regions of south China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(7):512-515.
- [51] 胡建民, 胡欣, 左长清. 红壤坡地改梯水土保持效应分析[J]. 水土保持研究, 2005(12):271-273. HU J M, HU X, ZUO C Q. Analysis on soil and water conservation benefit of terracing on red-soil slope land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005(12): 271-273.
- [52] 董杰, 杨达源. 三峡库区退化土壤生态系统恢复与重建研究[J]. 水土保持学报, 2008, 15(3):234-238. DONG J, YANG D Y. Restoration and reconstruction of degraded soil ecosystems in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(3):234-238.
- [53] 钟厚彬. 坡改梯中植物梯坎代替石质梯坎的初步设想[J]. 中国水土保持, 2008(7):56-57. ZHONG H B. Preliminary idea of replacing stone terraces with material terraces in slope to ladder conversion [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(7):56-57.
- [54] 刘光盛, 赵乐松, 程迎轩, 等. 基于限制因子的粤北丘陵山区耕地宜机化整治分区[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12):262-270. LIU G S, ZHAO L S, CHENG Y X, et al. Land consolidation zoning of northern Guangdong for suitable mechanization transformation in hilly and mountainous areas based on limiting factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12):262-270.
- [55] 黄仲青, 黄正来, 刘晓玲, 等. 采矿塌陷区农田复耕技术的研究[J]. 安徽农业科学, 1995, 23(2):189-190. HUANG Z Q, HUANG Z L, LIU X L, et al. Research on farmland rehabilitation technology in mining collapse areas[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 1995, 23(2):189-190.
- [56] 董晓霞, 王学君, 刘兆辉, 等. 滨海盐荒地不同高度台田地下水动态变化与脱盐效果[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6):1354-1358. DONG X X, WANG X J, LIU Z H, et al. Dynamics of ground-water table and soil desalination of platform fields in coastal wasteland [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6):1354-1358.
- [57] 刘超, 王静. 台田深沟模式在黄河河口地区防浪林种植中的适用性研究[J]. 水利电力技术与应用, 2021, 3(6):10-12. LIU C, WANG J. Study on the applicability of the deep ditch model in the planting of wave protection forest in the Yellow River estuary[J]. *Technology and Application of Water Conservancy and Power*, 2021, 3(6): 10-12.
- [58] 顾和和, 胡振琪, 秦延春, 等. 泥浆泵复垦土壤生产力的评价及其土壤重构[J]. 资源科学, 2000, 22(5):37-40. GU H H, HU Z Q, QIN Y C, et al. Productivity appraisal of soil reclaimed by HDP and its reconstruction[J]. *Resources Science*, 2000, 22(5):37-40.
- [59] 胡振琪, 贺日兴, 魏忠义, 等. 一种新型沉陷地复垦技术[J]. 煤炭科学技术, 2001(1):17-19. HU Z Q, HE R X, WEI Z Y, et al. New land reclamation technology for subsidence ground[J]. *Coal Science and Technology*, 2001(1):17-19.
- [60] LUO G B, CAO Y G, XU H X, et al. Detection of soil physical properties of reclaimed land in open-pit mining area: Feasibility of application of ground penetrating radar[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193:392.
- [61] 徐艳, 王璐, 樊嘉琦, 等. 采煤塌陷区生态修复技术研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(7):80-90. XU Y, WANG L, FAN J Q, et al. Ecological restoration technologies in coal-mining subsidence area: A review[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(7):80-90.
- [62] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):105-111. REN L D, HUANG M B, FAN J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19):105-111.
- [63] 王辉, 韩宝平, 卞正富. 充填复垦土壤水分竖直运动模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5):690-695. WANG H, HAN B P, BIAN Z F. Simulation research on water upright movement in reclaimed soil by filling[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(5):690-695.
- [64] 戚家忠, 胡振琪, 周锦华. 高潜水位矿区煤矸石充填复垦对环境的影响[J]. 中国煤炭, 2002, 28(10):39-40. QI J Z, HU Z Q, ZHOU J H. Environmental impacts of waste coal back-fillings for land reclamation in coal mine areas with shallow water table[J]. *China Coal*, 2002, 28(10):39-40.
- [65] 涂安国. 层状土壤水分入渗与溶质运移研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(4):818-825. TU A G. Advances in water infiltration and solute transport in layered soil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2017, 39(4):818-825.
- [66] 曹瑞雪, 邵明安, 贾小旭. 层状土壤饱和和导水率影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):18-21. CAO R X, SHAO M A, JIA X X. Experimental study on effects of layered soils on saturated hydraulic conductivity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):18-21.
- [67] 张在勇, 王文科, 陆彦玮, 等. 改进型有限分析法模拟包气带土壤水分运移[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18):55-61. ZHANG Z Y, WANG W K, LU Y W, et al. Improved finite analytic method to simulate soil water movement in vadose zones[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(18):55-61.

- [68] 陈帅,毛晓敏,胡海珠.参数平均方式对层状夹砂土壤积水入渗数值模拟的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1):76-84. CHEN S, MAO X M, HU H Z. Impact of averaging methods on the numerical simulation of pond infiltration in layered soil with sand interlayer[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(1):76-84.
- [69] 王春颖,毛晓敏,赵兵.层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):61-67. WANG C Y, MAO X M, ZHAO B. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11):61-67.
- [70] 白东升.煤矸石堆积区生态重构模式与土壤水文性质优化的驱动要素[D]. 绵阳:西南科技大学, 2022:16-33. BAI D S. Ecological reconstruction model and driving factors of soil hydrological properties optimization in gangue accumulation area[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022:16-33.
- [71] BAI D S, YANG X, LAI J L, et al. *In situ* restoration of soil ecological function in a coal gangue reclamation area after 10 years of elm/poplar phytoremediation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305:114400.
- [72] 于亚军,任珊珊,郭李凯,等.两种利用类型煤矸山复垦重构土壤贮水特性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 23(2):44-48. YU Y J, REN S S, GUO L K, et al. Study on soil water-holding capacity between two types of reclamation agroforestry land on a coal waste pile[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2):44-48.
- [73] 徐良骥,朱小美,刘曙光,等.不同粒径煤矸石温度场影响下重构土壤水分时空响应特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8):2304-2310. XU L J, ZHU X M, LIU S G, et al. Temporal and spatial response characteristics of reconstructed soil moisture under different particle size coal gangue temperature field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8):2304-2310.
- [74] 陈敏,陈孝杨,王校月,等.煤矿区重构土壤剖面水气变化及其对温度梯度的响应[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4):1309-1319. CHEN M, CHEN X Y, WANG X Y, et al. Variation of water and air in reconstruction soil profile and its response to temperature gradient in coal mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4):1309-1319.
- [75] 吴国龙,张瑶.浅层土壤水分特征曲线模拟与运移机理研究[J]. 农机化研究, 2021(11):165-170. WU G L, ZHANG Y. Mechanism of water transport and simulation of water characteristic curve in surface soil[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021(11):165-170.
- [76] LI F, LI X J, HOU L, et al. A long-term study on the soil reconstruction process of reclaimed land by coal gangue filling[J]. *Catena*, 2020:195:104874.
- [77] CHEN X Y, YAN J P, YANG X F. Physio-chemical properties and hydraulic characteristics of reconstruction soil filling with fly ash[J]. *Advanced Materials Research*, 2011:356/360:2669-2672.
- [78] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008(7):494-499. LÜ G, WU X Y. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. *Chinese Agronomy Science Bulletin*, 2008(7):494-499.
- [79] 孙增慧,张扬,王欢元.基于HYDRUS-1D模型的土壤容重对水分入渗影响的研究[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2017, 2(7):20-27. SUN Z H, ZHANG Y, WANG H Y. Effect of soil bulk density on soil infiltration in land organic reconstruction based on HYDRUS-1D model[J]. *Land Development Engineering Research*, 2017, 2(7):20-27.
- [80] 荣颖,王淳,胡振琪.表土替代材料不同夹层位置对风沙土水分入渗和蒸发的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5):967-977. RONG Y, WANG C, HU Z Q. Effects of different layer positions of topsoil alternatives on infiltration and evaporation of sandy soil water[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5):967-977.
- [81] WANG X T, HU Z Q, LIANG Y S. Impact of interlayer on moisture characteristics of reclaimed soil backfilled with Yellow River sediments[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(1):153-159.
- [82] 陈秋计,吴锦忠,侯恩科,等.采煤塌陷裂缝区重构土壤水分特性研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(11):308-310. CHEN Q J, WU J Z, HOU E K, et al. Research on moisture characteristics of reconstructed soil in area of coal mining subsidence crack[J]. *Coal Technology*, 2015, 34(11):308-310.
- [83] 孙洁.露天矿区采煤水位下降和土壤重构对地下水补给的影响[J]. 煤矿安全, 2021, 52(5):59-65. SUN J. Influence of coal mining water level decline and soil reconfiguration on groundwater recharge in open pit mining area[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(5):59-65.
- [84] 杨永刚,苏帅,焦文涛.煤矿复垦区土壤水动力学特性对下渗过程的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(16):5876-5882. YANG Y G, SU S, JIAO W T. The influence of hydrodynamic characteristics on the infiltration process of soil water in a coal mine reclamation area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16):5876-5882.
- [85] 郭婷婷.矿区不同重构方式下土壤水文性质研究[D]. 太原:山西大学, 2020. GUO T T. Study on properties of soil hydrological under different reconstruction patterns in mining area[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [86] 王晓彤,胡振琪,梁宇生.基于Hydrus-1D的黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构优化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2):76-86. WANG X T, HU Z Q, LIANG Y S. Structural optimization of reclaimed subsidence land interlayers filling with the Yellow River sediments using a Hydrus-1D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(2):76-86.
- [87] 王云平,师学义,金志南,等.煤矿塌陷区不同复垦方法及年土壤肥力变化研究[J]. 山西农业科学, 1999, 27(1):639-643. WANG Y P, SHI X Y, JIN Z N, et al. Study on different reclamation methods and annual soil fertility changes in coal mine subsidence areas[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1999, 27(1):639-643.
- [88] 陈龙乾,邓喀中,唐宏,等.矿区泥浆泵复垦土壤物理特性的时空演化规律[J]. 土壤学报, 2001, 38(2):277-283. CHEN L Q, DENG K Z, TANG H, et al. Law of temporal and spatial evolution of physical properties of soil reclaimed by hydraulic dredge pump in

- mining areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2):277-283.
- [89] 娄义宝, 史冬梅, 蒋平, 等. 紫色丘陵区城镇化不同地貌单元的水文特征及土壤重构[J]. 土壤学报, 2018, 55(3):650-663. LOU Y B, SHI D M, JIANG P, et al. Hydrological characteristics and soil reconstruction of different landform units as affected by urbanization process in purple hilly area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3):650-663.
- [90] WANG S F, CAO Y G, GENG B J, et al. Succession law and model of reconstructed soil quality in an open-pit coal mine dump in the loess area[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 312:114923.
- [91] 张学礼, 胡振琪, 初士力. 矿山复垦土壤压实问题分析[J]. 能源环境保护, 2004, 18(3):1-4. ZHANG X L, HU Z Q, CHU S L. Analysis of soil compaction in reclaimed land[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, 18(3):1-4.
- [92] 李品芳, 杨永利, 兰天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7):149-156. LI P F, YANG Y L, LAN T, et al. Physicochemical properties and water-holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7):149-156.
- [93] 汪怡珂, 罗昔联, 花东文. 毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6):167-173. WANG Y K, LUO X L, HUA D W. Screening of water characteristic curve model based on different mass ratios of feldspathic and sand compound soil[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(6):167-173.
- [94] 王鑫, 肖武, 刘慧芳, 等. 锡林浩特矿区土壤水分特征曲线和有效含水量预测[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4):169-177. WANG X, XIAO W, LIU H F, et al. Soil moisture characteristic curve and prediction of available water content of overburden in Xilinhot mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4):169-177.