

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.002

贾振江, 吴洋洋, 李王成, 等. 隔层创建技术的土壤生态环境效应进展分析与发展展望[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 1-12, 22.

JIA Zhenjiang, WU Yangyang, LI Wangcheng, et al. Progress analysis and development prospects of soil ecological and environmental effects of interlayer construction[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 1-12, 22.

## 隔层创建技术的土壤生态环境效应进展分析与发展展望

贾振江<sup>1</sup>, 吴洋洋<sup>1</sup>, 李王成<sup>1,2,3,4</sup>, 马东祥<sup>1</sup>, 陈继虹<sup>1</sup>, 高素素<sup>1</sup>, 牛宵宵<sup>1</sup>, 徐天渊<sup>5</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021;

3. 省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021; 4. 宁夏回族自治区黄河水联网数字

治水重点实验室, 银川 750021; 5. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 西安 710001)

**摘要:** [目的] 系统梳理、总结、分析隔层创建技术在土壤改良、养分循环、生态修复及作物管理等方面的应用现状、技术特征与环境效益, 以为现代农业提质增效与可持续发展提供科学依据和理论支撑。[方法] 选取隔层创建技术为研究对象, 全面综述其对土壤物理结构、土壤水盐热效应、土壤养分状况、土壤酶活性、土壤微生物特性和作物生产力的影响效应及其调控过程。[结果] 隔层创建技术对土壤结构、养分含量及其生态系统服务功能具有正向调节效应, 并能够有效提升农业生产效能, 但具体调控效果则因模式选择与田间管理等而异。[结论] 今后的相关研究可拓展和深化 4 个方面: (1) 深入揭示水盐调控、养分释放、生境演替对“隔层—土壤—微生物—作物”系统的响应机制及其遗留效应; (2) 研发集成生产成本可控、实际操作可行的隔层铺设技术及其配套设备; (3) 筛选优化适用于不同气候条件、土壤质地、作物布局和农田管理模式的隔层创建关键技术及其作业参数; (4) 拓展验证隔层创建技术在田间尺度的实际应用效果及其有效路径。而在双碳发展格局和多重战略叠加背景下, 基于固废资源化高效利用理念的新型隔层材料属性创新与技术变革则是未来研究的关注重点和选题方向。

**关键词:** 隔层创建; 土壤改良; 生态系统服务; 可持续发展

**中图分类号:** S147.3; S156.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)06-0001-12

## Progress Analysis and Development Prospects of Soil Ecological and Environmental Effects of Interlayer Construction

JIA Zhenjiang<sup>1</sup>, WU Yangyang<sup>1</sup>, LI Wangcheng<sup>1,2,3,4</sup>, MA Dongxiang<sup>1</sup>,

CHEN Jihong<sup>1</sup>, GAO Susu<sup>1</sup>, NIU Xiaoxiao<sup>1</sup>, XU Tianyuan<sup>5</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research

Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education,

Yinchuan 750021, China; 3. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in

Northwest China, Yinchuan 750021, China; 4. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital

Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 5. Shaanxi Water

Conservancy and Electric Power Survey and Design Research Institute, Xi'an 710001, China)

**Abstract:** [Objective] This study systematically summarized and analyzed the current application status, technical characteristics, and environmental benefits of interlayer construction in soil improvement, nutrient cycling, ecological restoration, and crop management, aiming to provide scientific basis and theoretical support for improving modern agriculture's quality, efficiency, and sustainable development. [Methods] The effects and regulation mechanisms of interlayer construction on soil physical structure, soil water-salt-heat, soil nutrient status, soil enzyme activities, soil microbial properties, and crop productivity were comprehensively addressed. [Results] Interlayer construction could improve soil structure, nutrient content,

收稿日期: 2024-04-11 修回日期: 2024-06-12 录用日期: 2024-06-25 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52169010); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900600); 宁夏自然科学基金重点项目 (2021AAC02008); 宁夏重点研发计划项目 (2019BEH03010); 清华大学—宁夏银川水联网数字治水联合研究院项目 (sklhse-2023-low013); 宁夏高等学校一流学科建设项目 (NXYLXK2021A03); 宁夏大学研究生创新项目 (CXXM2023-15)

第一作者: 贾振江 (1997—), 男, 博士研究生, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 2474697460@qq.com

通信作者: 李王成 (1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liwangcheng@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

ecosystem service functions, and agricultural production efficiency, but the responses process to interlayer mode selection and farmland management measures have shown differences. [ **Conclusion** ] The critical scientific problems and future development directions that need to be solved in the process of agricultural development and ecological governance were provided. It primarily involves exploring the response mechanism and residual effects of water and salt regulation, nutrient release, and habitat succession on the interlayer-soil-microbial-crop system in depth. This also includes developing and integrating cost-effective and practical interlayer laying technology and supporting equipment, as well as screening and optimizing key technologies and operational parameters for interlayer construction suitable for various climate conditions, soil textures, crop layouts, and farmland management methods. Furthermore, it aims to expand and validate the practical application effects and successful pathways of interlayer construction technology. Within the framework of the dual carbon development pattern and multiple strategic overlapping context, the focus and direction of future research will be on innovating and technologically transforming new interlayer materials based on the efficient utilization of solid waste resources.

**Keywords:** interlayer construction; soil improvement; ecosystem services; sustainable development

Received: 2024-04-11

Revised: 2024-06-12

Accepted: 2024-06-25

Online(www.cnki.net): 2024-07-25

土地生态嬗变直接关乎全球粮食安全和人类生存空间<sup>[1]</sup>。据统计<sup>[2]</sup>,全球约 75% 的土壤已出现不同程度的退化现象(酸化、板结、盐碱化、重金属污染等),且这种趋势仍在不断蔓延,严重制约可持续农业的构建和发展。因此,亟需分区制定和科学实施多样化、多元化、生态化的农业管理策略以有效应对土壤退化问题<sup>[3]</sup>,尤其是要充分发挥土壤遗留效应对农业可持续性的正向驱动<sup>[4]</sup>。隔层创建作为一种新型的土地管理模式,通过重构土壤耕层结构,优化外源养分输入,重塑土壤生态功能,在增温保墒、阻盐培肥、增碳扩容等方面优势突出,对损毁、退化、污染、破坏、低效等存在缺陷或未被利用土体的质量提升与健康保育具有现实意义<sup>[5-6]</sup>。然而,由于不同隔层材料自身的差异效应,致使其在实际应用中的功能属性和调控效果亦不尽相同。一般而言,无机材料(沸石、煤矸石、河湖淤泥等)主要被研发用于盐碱土壤治理<sup>[7]</sup>、矿区土地复垦<sup>[8]</sup>及其环境生态修复<sup>[9]</sup>,发挥阻盐保墒的物理功效;而有机材料(作物秸秆、林副产品等)在兼具上述功能的同时,其中富含的营养元素和有机物质还将为底土培肥与生境重塑提供关键支持,被视为退化土壤修复和固废资源利用的潜在生物质能源<sup>[10]</sup>,并可为化肥减施增效工作的全面落实与深入推进提供理论基础和技术路径,但其生态功能亦因自身布设形式<sup>[11]</sup>、埋设位置<sup>[12]</sup>、隔层厚度<sup>[13]</sup>、物理尺寸<sup>[14]</sup>、材料属性<sup>[15]</sup>及田间管理<sup>[16]</sup>而异。近年来,无机和有机材料联合施用的复合隔层技术<sup>[17]</sup>、结合地表覆盖的“上膜下秸”模式<sup>[18]</sup>以及有效构建深厚肥沃耕层的秸秆富集深还策略<sup>[19]</sup>亦备受瞩目,其在土壤物理、化学和

生物特性方面的互补、耦合与叠加,往往使得水盐调控效果、培肥增产效应及生态环境效益俱佳,已逐步发展成为一种助力农业可持续发展及强化区域土地管理与生态重建的资源替代方案和提质增效策略。

现阶段,诸多学者围绕土壤遗留效应对隔层创建的响应规律及其调控路径,已开展相关理论分析与试验研究,并就发展规律、作用机理和关键机制等问题进行深入剖析。然而,目前尚缺乏对其的系统梳理、归纳和评述。鉴于此,文章通过全面论述隔层创建技术对土壤理化性状、土壤生态环境及作物生产力的影响效应,旨在深入了解其在农业实践和资源利用方面的应用现状,深刻明晰其对土壤改良和生态修复的运行机制,进一步精准把握其在技术创新和产能提升方面的演化方向,以期为退化土壤的障碍因子消减和地力快速提升,以及农业农村节能减排固碳及其绿色低碳发展提供思路和借鉴。

## 1 隔层创建的基本概念与技术内涵

以快速培肥、减损增效和生态治理为目的的隔层创建技术,主要通过通过对已损毁、退化、低效土地的土壤物理结构重组或土体有机重构,因地制宜利用固体废料、天然材料、人造产品等的禀赋优势及其环境属性,科学合理选取遵循区域农业发展实际需求的隔层创新模式,进而有效改善功能退化土壤的理化特性,全面营造健康稳定的耕层土壤生态环境,最终实现对障碍土地的定向调节与产能提升<sup>[5]</sup>。

根据材料属性及其要素组成的不同,可将隔层模式大致分为 3 种,即无机隔层创建、有机隔层创建和复合隔层创建,其实际应用情景与基本技术特征见表 1。

表1 不同隔层创建模式的实际应用情景与基本技术特征对比分析

Table 1 Comparison of practical application scenarios and basic technical characteristics of different interlayer construction patterns

项目	隔层创建基本技术特征				
	无机隔层创建模式		有机隔层创建模式		复合隔层创建模式
材料属性	固体废料(煤矸石、粉煤灰、河湖淤泥、建筑垃圾等)	天然材料(沸石、砂砾等);人造产品(陶粒等)	作物秸秆	林副产品	隔层创建结合多种隔层材料联合施用
研究对象	塌陷区和工矿区的损毁土地	滨海地区的盐碱退化土壤	东北、华北等地区的退化或低产土壤	果园、林园等园区的退化或低产土壤	河套灌区的盐碱退化土壤
创建方法	土壤结构重组或土体有机重构	土体有机重构		土体有机重构	土体有机重构
功能定位	土地复垦、植被重建、生态修复	减渗阻盐、耕层淡化、控盐增产	减少污染、培肥增产、提质增效;提高资源利用效率		长效抑盐、节水保墒
应用优势	来源广泛、材料充足、容易获取、成本可控		材料充足、容易获取、成本可控;适用范围广泛、调控效果全面		弥补单一隔层长期作用对耕层土壤水盐调控效果减弱的缺陷
生产局限	应用场地单一;容易造成养分流失;可能存在二次污染	改良效果单一;调控对象特定;作业成本较高	材料类型单一;作业成本较高;容易产生养分供给障碍;具有生产调控的时效性和时滞性		调控效果单一;工程规模较大;作业成本较高

## 2 隔层创建技术对土壤物理性质的影响效应

### 2.1 土壤物理结构

隔层创建通过剖面构型优化进而具有重塑耕层土壤物理结构的功能特性<sup>[8]</sup>。深施下的秸秆施用量对耕层土壤质量密度的降幅效果呈显著正向效应<sup>[20-21]</sup>,并可进一步丰富土壤通气孔隙及总孔隙度,显著增加有效孔隙数量(0.000 2~0.05, >0.05 mm),且其对深层土壤的改良效果优于表层土壤<sup>[22-23]</sup>,特别是对于秸砂组合隔层而言,其<0.5 mm的当量孔隙明显高于普通隔层创建模式<sup>[15]</sup>。然而,常量深还对土壤质量密度及孔隙特性的调控效果在长期施用过程中呈逐年减弱效应,还田3年后的耕层土壤结构较对照处理已无显著差异<sup>[22]</sup>,一次性大剂量投入的改土成效则可维持多年<sup>[20]</sup>。而在矿区土地复垦过程中,以富含悬移质颗粒的黄河泥沙为代表的表土替代或夹层改良材料的加入可有效调节深层土壤颗粒级配及其质地结构,显著增加泥沙充填层的黏粒与粉粒含量<sup>[24]</sup>,且这种调控效应伴随耕作时长的延续而愈加强烈<sup>[25]</sup>。需要注意的是,由于土壤重构进程中的持续机械压实与人工扰动影响,致使作物种植前的表层土壤结构不断趋向紧实,土壤颗粒逐渐朝向细化发展<sup>[26]</sup>,同时表现出较高的土壤密度与较低的孔隙特性<sup>[9,24]</sup>。然而,伴随土地复垦时间的延长及植被恢复程度的提升,耕层土壤质量密度大小即可呈现逐年下降态势,其孔隙结构特性亦得以明显改善<sup>[27]</sup>。因此,正式播种前的深耕松土整地作业尤为必要。同时,还需深入推进施工技术优化与作业机械改进,以进一步减少复垦过程对重构土壤结构的过度碾压和深度破坏。

有机隔层的存在亦深刻影响土壤团聚体的形成、转化、分布及其稳定性<sup>[6]</sup>。近年来的研究<sup>[20,22]</sup>结果显

示,秸秆深埋可有效促进微团聚体向大团聚体的转化过程,进而显著提高亚耕层土壤的大团聚体数量及其稳定性。秸秆分解过程中有机酸、腐殖酸等有机胶结物质的释放效应与微生物菌丝的缠绕作用是土壤大团聚体成为优势粒级的主要动力来源<sup>[28]</sup>。秸秆隔层亦可进一步驱动非水稳性团聚体的有效分解,显著增加耕层土壤中的水稳性团聚体含量(<0.25 mm),而这可能与其创造的特殊土壤水分环境有关<sup>[29]</sup>;另一方面,土地复垦中的反复机械碾压则对表层土壤大团聚体的形成与稳定具有明显冲击消散作用,致使其破碎、分解及细化过程不断加剧<sup>[26]</sup>。而长期的植被重建及其生态演替,特别是有机肥、凋落物等营养成分的有效输入,则能够持续驱动大团聚体向小团聚体的周转进程,进而加快土壤团聚体结构与功能的有效恢复<sup>[25]</sup>。

### 2.2 土壤水盐热效应

2.2.1 土壤水分 夹层由于存在上下界面与土壤间的孔隙结构特性差异,使得其水分渗透模式(水分在土壤中的运动速度和运移方向)发生相应变化,并进一步改变其迁移与分配过程,进而延缓湿润锋通过夹层的运移耗时,减少深层土壤的水分蒸发,最终起到阻渗保墒的功效<sup>[30]</sup>,且这一效应与夹层的质地<sup>[31]</sup>、数量<sup>[8]</sup>、位置<sup>[12]</sup>、厚度<sup>[13]</sup>及材料的尺寸<sup>[14]</sup>、属性<sup>[15]</sup>、形态<sup>[32]</sup>等因素密切相关。以黄土隔层和砂岩隔层为例<sup>[33]</sup>,尽管土壤水分在其夹层界面均可发生明显突变,但前者主要是夹层渗透性能较差而引发的水分滞留,后者则归因于夹层土壤基质势能较小导致的水分积聚。因此,依据不同夹层水分阻滞原理的迥异,秸秆富集深层还田技术<sup>[19]</sup>、黄河泥沙夹层充填复垦技术<sup>[9]</sup>、固体废弃物隔层填埋覆土模式<sup>[34]</sup>等诸多创新方案应运而生,并被成功应用于盐渍化农田、采煤沉陷地及矿山排土场的土地管理与生态重建<sup>[5]</sup>。值得关注的是,虽然上部的土壤墒情及其水力特性在夹层



施用初期被明显改善,但由于隔层介质的导水性能通常较差,且与土壤界面逐步形成毛管屏障,致使深层水分难以有效向上迁移;另一方面,隔层创建对土壤水分渗漏的阻碍效应,亦容易造成强降雨情形下地表径流的快速形成,进而影响有效降水对下层土壤的入渗补给<sup>[35]</sup>,这可能导致作物于关键生育期发生一定的水分胁迫,并直接影响其后续生长发育及最终产量形成<sup>[14,36]</sup>。为有效解决上述问题,进一步减缓表层土壤水分逸散及其与外界环境的能量交换,基于功能协同互补理念的土壤保水优化方案被陆续提出,主要包括有机无机物料相结合的复合隔层技术<sup>[14,17]</sup>及地表地下隔层相配套的多重隔层模式<sup>[18]</sup>等。而在土地复垦的应用与实践中,“粉煤灰—煤矸石”混合隔层形式(矸灰比为 3:7)的选优与实施,则能够充分保证对植物正常生长所需水分的有效供给<sup>[37]</sup>。

**2.2.2 土壤盐分** 基于水能量原理及水盐运移规律研发的疏松隔层因其具备出色的阻水减渗淋盐物理特性,而被广泛应用于盐碱土壤的修复与治理<sup>[7]</sup>。埋置于深层土壤中的有机或无机夹层,主要通过促进盐分充分溶解与淋洗<sup>[30]</sup>、切断界面土壤毛管孔隙<sup>[38]</sup>以及增加对盐基离子的吸附封存<sup>[39]</sup>,进而有效抑制可溶性盐分的上行和滞留,以达到减弱深层土壤返盐与耕层盐分表聚的功效<sup>[40]</sup>。就天然有机夹层而言,其盐浸通量通常取决于夹层厚度,盐分阻滞效应伴随隔层厚度的增加而愈加显著<sup>[41]</sup>。然而,受到自身分解过程的影响,存蓄于较厚隔层中的大量可溶性盐分将在长期农业生产实践中不断向上运移,进而增加耕层土壤发生次生盐碱化的风险<sup>[14,41]</sup>。已有研究<sup>[42]</sup>发现,相较于养分供给效应,秸秆隔层对耕层土壤水盐环境的优先调控效果仅在试验刚开始的 2~3 年突出显现。因此,合理的夹层选取应在兼顾隔盐保墒性能的同时,进一步充分权衡其对土壤环境的长期效应。“上抑、下隔、中改”技术模式及基于不同物料组合的复合隔层阻盐策略的创建和制定则可有效弥补生物有机隔层腐解给土壤水盐调控效率造成的负面影响<sup>[40]</sup>。河套灌区的应用实践结果<sup>[15,17,43]</sup>表明,“秸秆—保水剂”复合隔层具有优化节水情形下耕层土壤盐分分布,以及提高深层土壤水分补给效果的优势;覆膜调控与隔层创建相结合的综合技术模式,可以有效抑制多种盐基离子于耕层土壤的积聚;而秸砂组合隔层则对作物生育后期的土壤水盐调控效果更优。另一方面,成本低廉且来源广泛的多种无机材料被证明是有效提升滨海退化土壤隔盐脱盐效果的理想材料<sup>[7]</sup>。用于延缓深层土壤盐分上行的沸石<sup>[44]</sup>、砂砾<sup>[45]</sup>、泥炭<sup>[46]</sup>等物理隔层材料和以阻碍地下盐水上

参与抑制潜水蒸发为核心理念的化学防渗隔层<sup>[47]</sup>的科学施用,则可为沿海地区盐渍化土壤的精准治理及其综合利用提供全新思路和解决方案。而在沉陷矿区的土地复垦过程中,将红泥岩<sup>[39]</sup>、煤矸石<sup>[48]</sup>等矿山固体废弃材料作为夹层基质进行土壤重构,可有效阻碍深层土壤盐分的上移及表聚。值得注意的是,风化作用和淋溶过程对废弃物中盐基离子溶解、释放、迁移与重分布的相对贡献及长期效应不容忽视。相关研究<sup>[49]</sup>显示,煤矸石夹层在多年的生态复垦中可明显改变不同垂直深度土壤剖面的离子组成,持续驱动风化产物中可溶性盐分于土壤表层及深层的转移与富集行径,最终诱导并加剧以碳酸氢钠为主的土壤次生盐渍化的发生。因此,如何科学处理和合理调控夹层阻盐与风化释盐的协同演化进程和其平衡互馈机制,即成为深刻理解废弃资源禀赋特征和高效发挥无机隔层阻盐功效的核心与关键。

总体来看,现阶段关于隔层创建对土壤水盐效应的研究多聚焦基于水分淋洗的单一材料夹层埋设(厚度、用量、层位等)下的盐渍化土壤改良试验及其数值模拟分析,而其中的内在影响机理目前尚不明晰,有待结合同位素示踪技术和 CT 扫描原理,对夹层界面的土壤微观孔隙特性与盐基离子动态迁移机制进行深入剖析。同时,进一步开展兼具高效保墒和长效抑盐功效的复合夹层技术的组配、试验与遴选,以充分发挥其在耕层淡化应用方面的稳定性、持久性和有效性。

**2.2.3 土壤温度** 土壤中的热量传输及其自身温度变化主要取决于内部水分与有效孔隙含量<sup>[50]</sup>。夹层作为一种特殊的深层覆盖模式,能够通过改善界面孔隙特性以及水分运移过程,进而激发对耕层土壤的增温效应<sup>[51]</sup>。以有机隔层为例,秸秆深埋处理下的耕层土壤剖面在作物生育期表现出明显增温效果<sup>[52]</sup>,且与夹层厚度呈现显著正相关效应<sup>[53]</sup>。同时,隔层处理还可以通过实现对耕层土壤温度效应的有效调节,进而减缓作物遭受高温热害与低温胁迫的潜在风险<sup>[54]</sup>。此外,田间管理措施(灌溉、施肥等)可进一步促进土壤热量的充分释放,从而加剧隔层上部土壤的温度变化<sup>[55]</sup>。进一步的研究<sup>[52,56-57]</sup>显示,不秋浇只春灌处理结合秸秆隔层构建对提高食葵生育前期的耕层土壤温度具有显著正向效应;而适量的鸡粪配施则对秸秆隔层增温效应的激发效果最佳。需要进一步指明的是,受到农田环境(气温、降水等)变化的影响,表层土壤温度对大气温度的响应过程往往存在协同效应,并可同步实现对耕层土壤增温幅度的不确定调控<sup>[52]</sup>。同时,由于生物隔层的腐解属性,其对田间土壤温度的实际

调控效果具有明显时效性,土壤剖面平均温度对大气温度的敏感程度伴随隔层埋藏时间的延长及土层深度的增加而愈加微弱<sup>[53,56-57]</sup>;另一方面,夹层厚度、空间位置和粒径级配亦深刻影响冻结与消融过程中的剖面土壤温度分布<sup>[58]</sup>。室内土柱试验及数值模拟结果进一步证明<sup>[59]</sup>,一定厚度的近地表砂砾夹层在季节性冻土区的浅埋潜水中具有较好的保温隔热特性,并可有效减缓下部土壤温度效应的剧烈变动。而将煤矸石作为夹层埋设于土壤中时,隔层上部土壤的昼夜温度变幅随其有效厚度的缩减而愈为强烈<sup>[60]</sup>,太阳辐射强度<sup>[61]</sup>与自身氧化释热反应<sup>[62]</sup>被视为该模式下剖面土壤温度梯度形成及其能量传递的主要驱动来源。

回顾当前关于隔层对土壤热效应的相关研究,大多集中于秸秆隔层深还模式下的农田耕层土壤温度效应,尚缺乏无机夹层构建对其时空分布特征和长期演变规律的影响探究,特别是不同情景下的土壤水—盐—热耦合迁移转化机制及其相互作用机理还有待基于理论分析与试验验证进行深入揭示。

### 3 隔层创建技术对土壤化学性质的影响效应

不同于传统的整体混施策略,生物有机材料局部施用因其具有独特的生态化学计量而在农业生产实践中备受关注<sup>[6]</sup>,并呈现出强化耕层土壤培肥效应、提升农业土壤固碳潜力和提高养分资源循环利用的应用效果<sup>[63]</sup>。已有研究<sup>[64]</sup>发现,作物秸秆隔层的科学创建在持续激发微生物腐解作用,有效增强营养组分缓释效果的同时,亦能够显著抑制有机物质的矿化损失,且这种土壤正向遗留效应伴随隔层埋置深度的增加而愈加强烈。此外,经由秸秆释放的大量营养元素(磷、钾等),对深层土壤速效养分含量的增加具有显著正向效应<sup>[65]</sup>;而有机隔层材料对离子的吸附截留特性,则能够有效减少土壤中硝态氮的淋溶、浸出与流失<sup>[21,66]</sup>;另一方面,秸秆深层添加亦对亚耕层土壤团粒结构及其有机碳和有机质形成转化影响显著<sup>[67]</sup>,并具有优化调节土壤化学环境<sup>[66]</sup>和有效驱动温室气体减排<sup>[68]</sup>的功效。然而,需要特别注意的是,土壤养分释放对有机隔层创建的响应过程呈现明显的时滞效应,田间培肥效果往往在施用后的2~3年方开始显现<sup>[42]</sup>。同时,伴随机械耕作的长期压实与秸秆隔层的不断分解,其对耕层土壤固碳培肥的贡献效果逐年减弱,养分增效的饱和效应进一步凸显,严重制约绿色农业的健康稳定及其可持续发展<sup>[12,15]</sup>。基于此,新发展格局下的有机隔层技术变革与模式创

新刻不容缓。秸秆造粒连年高量深埋技术<sup>[69]</sup>、有机无机材料组合隔层模式<sup>[15]</sup>及生物质隔层配施基肥策略<sup>[70]</sup>的应用与实践,则可为耕层土壤的快速长效培肥及农业生产的持续稳产增收提供理论参考和技术保障。而对于园林植物残体而言,其在深埋状态下的自然分解速率明显优于覆盖处理与菌剂添加,这对于局域尺度的茶园土壤环境修复、有效营养供应和酸碱平衡调节至关重要<sup>[71]</sup>。

然而,以往研究主要关注有机材料腐解动态特征与土壤养分周年释放规律,而隔层创建引发的能量循环过程、碳氮分配策略及其物理生化机制,特别是对其中微量营养元素和毒性金属元素的析出特性、分异特征、富集机制及其在深层土壤中的长期环境效应值得进一步深入探析与深刻揭示。此外,当前有关矿物材料隔层的功效仅仅集中于水盐调控方面,其在长期风化进程中的岩源性养分释放效应还需特别关注。

矿区复垦后合理的农业耕作活动有助于土壤养分的有效改善与持续恢复<sup>[9,24]</sup>。传统的生态修复充填材料(煤矸石、粉煤灰、河湖淤泥等),虽然在科学覆土处理<sup>[36]</sup>、先锋植被演替<sup>[72]</sup>、菌剂合理配施<sup>[73]</sup>、营养隔层组配<sup>[74]</sup>下能够一定程度改善土壤养分环境,有效缓解因土地占用及土壤退化而引起的环境和社会问题,但亦普遍存在改良效率不足与环境二次污染的弊端<sup>[36,49]</sup>。尤其是经过长期的风化、侵蚀等自然作用过程及氧化、分解等物理化学反应,固废隔层中的硝酸盐离子、重金属元素等毒性产物不断溶解析出,并向地表土壤迁移,致使耕层土壤养分环境损害或失衡<sup>[75]</sup>。另一方面,降雨和灌溉的持续冲刷、淋滤与渗透驱动,则进一步改变毒性物质的向下运移路径,进而导致地下水资源的污染和破坏<sup>[76]</sup>。因此,后续的相关研究亟需通过理论分析、田间试验、数值模拟及工程实践深入明晰矿区土地复垦过程中相关隔层创建对重金属离子的控制驱动机理、污染发生机制及其在土壤中的赋存特征、吸附特性、迁移规律、沉积效应与多元种类,并持续加强充填复垦利用的无害化处理技术研发,严格制定和科学优化绿色有效的水土污染防治策略、生态环境修复模式及其风险评估方法,以充分保证隔层高效创建与土壤健康调节的协同发展。

引黄泥沙作为一种绿色环保的复垦隔层材料,能够有效促进土壤中营养物质的吸附固持及其均匀分布<sup>[8]</sup>,且不受潜在环境污染风险的限制<sup>[9]</sup>,特别是携带丰富矿质养分的悬移质泥沙,可在塌陷区与工矿区的土壤培育和生态治理协同路径高效构建中发挥关键作用。已有研究<sup>[77]</sup>表明,基于黄河泥沙的夹层式多层剖



面构型对土壤肥力的保持效果最佳。而在实际的应用过程中,复垦农田于连续种植 5~6 年后,其耕层土壤中的有机质、碱解氮和速效钾含量即可恢复至常规耕地养分水平<sup>[78]</sup>。值得注意的是,复垦后较高的土壤 pH 严重制约农作物的正常生长。因此,实际耕作过程中的土壤酸碱改良工作尤为必要<sup>[24]</sup>。然而,目前关于不同夹层剖面构型在施肥、灌排、耕作等情形下的化学元素形态分布特征及其迁移转化机理仍较为缺乏,对隔层创建下的土壤生物地球化学关键过程及其环境功能有待结合理论分析与试验研究进一步开展。

## 4 隔层创建技术对土壤生物性质的影响效应

### 4.1 土壤酶活性

由于土壤环境因素与田间管理模式等的影响,土壤酶活性的分布格局和演替动态对有机隔层创建的响应过程存在差异效应<sup>[6]</sup>。相关研究<sup>[21,79-80]</sup>显示,秸秆富集深还模式下有机物含量及养分有效性的增加,特别是微生物活性的提高,能够有效促进根际土壤胞外酶的合成、加工和分泌,进而显著增加土壤碳、氮及磷代谢关键酶活性,并伴随还田年限及土层深度的增加整体表现出前期大幅提升而后期逐步下降的时空发展态势。但亦有研究<sup>[81]</sup>发现,长期秸秆隔层创建将致使土壤  $\beta$ -D 葡萄糖苷酶活性显著降低,这可能与土壤扰动造成的孢菌相对丰度减小有关。而在茶树枯落物隔层的腐解过程中,表层土壤  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性的表现效果最佳<sup>[71]</sup>。

高潜水位地区废弃矿坑的复垦土地土壤酶活性及其分布因隔层材料属性和剖面土层深度影响而异,这与土地利用方式、植被重构类型及土壤环境特性密切相关<sup>[82]</sup>。相关研究<sup>[83]</sup>表明,黄河泥沙夹层模式的土壤脲酶含量具有明显表聚效应,而在湖泥和煤矸石的隔层创建情景下,脲酶于耕层土壤的恢复效果较好,并在整个土壤剖面呈先降低后升高的垂直分布差异;表层土壤过氧化氢酶活性在不同复垦土地(煤矸石、黄河泥沙及湖泥)中的表现效果均较差;而表层土壤蔗糖酶活性则在基于湖泥夹层的土地复垦模式中的恢复效果最佳。伴随复垦实践的逐年增加,表层土壤脱氢酶活性可逐步恢复至正常农田土壤水平<sup>[84]</sup>,下层土壤剖面则无显著变化,可能归因于根际土壤特殊的养分结构及丰富的生物活性。

然而,当前的相关研究仅局限于隔层创建下的土壤酶活性时空动态格局定量分析,关于其响应表达效果的潜在驱动机制及其主控因素尚不明确,特别是隔

层分解风化、养分周转循环与酶活性演替的协同互馈机理,还需进一步深入探究。

### 4.2 土壤微生物特性

有机隔层的合理创建对于提高土壤生物活性和数量、改善微生物群落结构与潜在生态功能具有正向调节效应<sup>[6]</sup>。秸秆深层还田能够通过为微生物生命活动提供所需能量及营养底物,进而激发对根际土壤的启动效应<sup>[85]</sup>。园林中植物残体隔层的周年腐解则可显著促进土壤微生物量碳的固定、转化与利用<sup>[71]</sup>。进一步的报道<sup>[86]</sup>显示,秸秆隔层创建初期的土壤微生物群落变幅最为明显,且其对真菌的影响效应较为敏感,这仅与材料形态有关;至试验第 2 年时,高量隔层依托稳定的碳源供应,对土壤微生物的有效贡献逐步突显;需要注意的是,由于缺少来自外界的反反复扰动或长期刺激,第 3 年的耕层土壤微生物群落结构开始出现分异现象,并最终回归至初始的稳定状态。因此,高量连年深还配套长期深翻施肥成为持续促进微生物激发效应的必要手段;另一方面,目前关于深层土壤微生物群落组成及其结构变化对生物有机隔层模式的响应特性存在争议。部分研究<sup>[64,87]</sup>显示,相较于其他耕作模式,秸秆隔层创建下的深层土壤细菌和真菌物种组成及其多样性均可呈现大幅提升态势。但亦有研究<sup>[80-81]</sup>认为,功能微生物介导的土壤碳氮循环过程仅能有效驱动亚耕层的富营养微生物(如放线菌等),特别是促进共生有益真菌的生长、繁殖及富集,而不利于整体细菌种群水平及病原真菌丰度的提高。然而,当前关于有机隔层,特别是复合隔层界面的微生物代谢机制、基因表达和生态习性尚不明晰,深入摸清影响其群落结构动态及功能演化的主要环境因子与关键生物要素,对于科学解释根际及深层土壤微生物的分布特征及其生化机制至关重要。

相较于生物有机隔层,无机隔层创建对原有土壤微生境平衡的影响更为深刻。相关研究<sup>[15]</sup>显示,受试验后期水分胁迫的影响,砂层处理在有效增加优势菌群放线菌相对丰度的同时,亦显著降低根际土壤细菌群落的生物多样性;另一方面,不同固废隔层模式的土壤微生物类群均呈细菌占比最大,放线菌次之,真菌最少的分布格局,但在不同植被等级和重构方式下存在显著差异<sup>[82]</sup>。同时,其在各个分类水平的细菌种类数量及其群落丰度大幅低于正常农田土壤<sup>[84]</sup>,且在土壤垂直剖面,特别是充填土层存在明显差异效应<sup>[88]</sup>。土壤优势菌群的种群类型于长期土地复垦中虽无显著变化,但其数量结构则在不断朝着健康土壤的方向发展<sup>[84]</sup>。因此,在矿区土地修复及生

态重建过程中,可通过合理增施生物有机肥或特定微生物菌剂,以持续加速对土壤微生境演替进程的正向调节,进而有效缩短退化土壤恢复年限,逐步提升其生态系统稳定性、多样性和持续性。

## 5 隔层创建技术对作物生产力的影响效应

天然有机隔层的高效深还,能够通过改善亚耕层土壤的物理、化学和生物学特性,进而有效缓减传统免耕或旋耕还田模式给作物定植生长及其产量效应带来的负面影响<sup>[6]</sup>。秸秆隔层创建结合灌排、施肥、覆盖、深耕等农田管理措施,通过优化土壤物理结构与养分库容,调控耕层土壤盐分淋洗下移,促进有效水分和营养组分获取,强化土壤微生物活动及其生化过程,进而显著减少作物播种出苗限制与病虫害发生,持续驱动地上部分各器官的干物质分配、转运与积累,最终有效提升主粮作物(小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)等)的产量效益和经济价值<sup>[21,79]</sup>。需要指出的是,秸秆深还模式下的作物综合产量提升效果具有明显时效性。众多研究<sup>[15,21,42]</sup>表明,作物产量及其构成因素的增幅效果仅在隔层创建初始的1~2年凸显,2~3年后的增产效应则显著减弱。但亦有研究<sup>[89]</sup>得出不同的结论,认为沟埋处理结合水稻轮作下的小麦增产效果具有显著时滞效应,隔层分解速度的减缓是导致作物有效生产力出现滞后的关键内因。而秸砂组合隔层稳定长效的土壤水盐调控与培肥改土效应,则能够充分保障作物产量于试验后期的持续提高<sup>[15]</sup>。

另一方面,用于耕层淡化的无机隔层(沸石、砂层等)能够显著提高田间作物的出苗效果<sup>[15]</sup>及景观植物的存活效应<sup>[45]</sup>。沸石隔层的科学创建则对滨海盐渍土壤中刺槐的生理光合特性及其水分利用效率的改善具有明显正向效应<sup>[90]</sup>。值得注意的是,由于砂层处理对隔层下部水汽的有效阻隔而引起的耕层土壤水分持续亏缺,致使其对河套灌区作物的实际增产效果并不显著<sup>[15]</sup>。而先锋植被及农业布局的优化与演替,对于基于固废夹层的土地复垦进程及其生态修复效果具有显著驱动效应<sup>[9,36]</sup>。特别是经黄河泥沙长期充填后,复垦地块中的小麦和玉米产量与正常农田基本无异<sup>[24]</sup>。

综上所述,现有内容多针对不同隔层创建下作物产量效应与生态修复效果的共性及差异对比分析。今后的相关研究还需深入揭示养分获取、生境演替及植物生长的耦合响应特性与协同作用机制,全面摸清制约隔层模式下土壤环境及作物生产力的关键技术

路径与决定性生态因子。同时,进一步实现对实际应用效应的尺度转换和农业生态系统服务功能价值的定量评估,以有效推动隔层创建的高质高效利用及其可持续发展。

## 6 应用与展望

隔层创建技术的兴起可为区域生态修复、土壤培肥与农业增效提供崭新视角和有效路径。相较于传统及现行的土地管理方式,隔层构建具有土壤质量与作物产量协同提升的禀赋特征和应用潜力。然而,当前的理论、技术和模式探究普遍存在作用机理不明晰、配套机械不完善、核心技术不成熟及田间应用不全面的研究局限和认知差异。为进一步深化隔层创建理论与技术创新,拓展隔层模式应用及发展空间,未来的相关研究应重点关注5个方面:

(1)深入揭示“隔层—土壤—微生物—作物”系统互作机制及其土壤遗留效应。当前对隔层培肥增效研究的理论局限进一步限制这一技术的应用和发展。今后还需依托长期连续定位观测和生物信息学原理分析,全面揭示隔层深还下各要素间的相互作用机制及其内在依存关系;深入解析微生境视角下的隔层腐解风化特征、养分释放迁移规律、碳氮周转关键过程及其生物学机理;进一步摸清隔层创建在时空尺度下的土壤生态环境遗留效应及其功能性时间阈值,并最终实现对其经济、生态及社会效益的科学评价和综合评估,以便为全球农业生产提供更为精准和可持续的管理建议。

(2)研发集成低耗、高效、优质的隔层铺设技术及其配套耕作机具。现阶段,隔层还田机械的功能特性、生产成本、作业效率及其在实际应用中的匹配程度是制约新技术模式高效发展的重要因素。今后还需坚持以农业发展现实需求为战略导向,进一步改进和创新基于生态发展理念与多要素协同的复合隔层技术及其富集深还策略;同时,因地制宜地开展配套田间耕作栽培及作物水肥管理且集机械化、数字化和智能化于一体的设备研发、功能改造与服务优化工作,以助力隔层深还技术在农业生产和生态管理中的开发、应用及推广。

(3)筛选优化考虑多因素整体协同效应的隔层创建关键技术及其作业参数。通过算法优化、模型构建和试验验证,创建具备普适性、实用性、可操作性、可持续性且耦合地域特征、气候环境、种植布局及农田管理等关键要素的隔层创建技术模式,并进一步基于土壤生态修复和农业产能提升的多目标优化分析,明确适用于不同复杂应用情景的最佳技术参数组合,包括

隔层适宜埋深、物理形态尺寸、最佳施用剂量、机械作业方式及田间管理措施等。

(4) 拓展验证隔层创建技术在田间尺度的规模化应用及其有效实施路径。以往关于隔层对土壤调控和作物管理的研究大多基于室内土柱模拟试验或田间微区定位试验,致使这一新型技术模式在农业生产实践中的科学实施途径和实际调控效果尚不明晰。因此,亟需通过延伸隔层创建应用范畴,推进相关技术产品装配与示范,加快核心技术产业转化与落地,以充分验证上述策略在退化土地管理及作物生产过程中的有效性与可靠性,进而不断促使其向特色化、标准化、集约化和生态化方向发展。

(5) 开发利用生态环保型隔层材料,充分挖掘废弃资源禀赋潜力。进一步发挥地理区位优势,赋予并践行园林枯落物等天然有机资源安全还田和改土培肥的生态使命,以全面实现固废消纳过程的无害化、资源化、减量化与高值化。立足我国西北旱区,由于砂田退化和弃耕而引发的废弃风化砾石于地表的长期遗留与大量堆积,给地区生态环境及其农业经济发展带来潜在危机和不确定性。如何有效协调田间砾石废弃与土地资源保护间的突出矛盾,即成为当今资源节约、环境友好与绿色低碳农业转型发展和提质增效的关键。

因此,今后的理论与技术研究应持续深入挖掘废弃矿物资源在土壤水分和养分环境调控方面的应用潜质,创新发展砾石隔层在退化土壤中的高效裂化消减科学途径及其有效深还应用策略。

#### 参考文献:

- [1] HERMANS K, MÜLLER D, O'BYRNE D, et al. Land degradation and migration[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6:1503-1505.
- [2] UNESCO. UNESCO raises global alarm on the rapid degradation of soils[EB/OL]. (2024-07-01) [2024-07-04] [https://www.unesco.org/en/articles/spreading-open-and-inclusive-literacy-and-soil-culture-through-artistic-practices-and-education?\\_hub=66489](https://www.unesco.org/en/articles/spreading-open-and-inclusive-literacy-and-soil-culture-through-artistic-practices-and-education?_hub=66489).
- [3] ARNETH A, OLSSON L, COWIE A, et al. Restoring Degraded Lands[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2021, 46(1):569-599.
- [4] JING J Y, CONG W F, BEZEMER T M. Legacies at work: Plant-soil-microbiome interactions underpinning agricultural sustainability[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8):781-792.
- [5] 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.
- [6] 饶越悦, 周顺利, 黄毅, 等. 秸秆富集深层还田对农田土壤质量影响的研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(10):1579-1587.  
RAO Y Y, ZHOU S L, HUANG Y, et al. Advances in research involving deep incorporation of enriched straw on soil quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(10):1579-1587.
- [7] 邹荣松, 陈军华, 邓丞, 等. 盐渍化土壤隔盐脱盐材料及技术研究进展[J]. *世界林业研究*, 2023, 36(2):20-25.  
ZOU R S, CHEN J H, DENG C, et al. Research progress of materials and technologies for salt isolation and desalination of salinized soil[J]. *World Forestry Research*, 2023, 36(2):20-25.
- [8] 王晓彤. 黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构的作用机理及模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.  
WANG X T. Mechanism of action of interlayers in reconstructed soil filled with Yellow River sediments and its simulation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, Beijing, 2020.
- [9] 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 rehabilitation[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022, 51(1):1-15.
- [10] BABU S, SINGH R S, SINGH R, et al. Exploring agricultural waste biomass for energy, food and feed production and pollution mitigation: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 360:e127566.
- [11] 王丽红. 秸秆深埋还田方式对玉米光合特性和水氮利用效率的影响[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2023.  
WANG L H. Effects of straw deeply-buried methods on photosynthetic characteristics and water and nitrogen-use efficiencies of maize [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [12] 范浩. 秸秆深埋对土壤盐碱及养分调控作用的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.  
FAN H. The study of straw buried on saline-alkali and nutrient regulation of soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [13] 王国丽. 秸秆隔层厚度对盐碱地水盐肥运移及食葵生长的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.  
WANG G L. Effects of straw interlayer thickness on water, salt and fertilizer transport and sunflower growth in saline-alkali soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [14] 史丽霞. 玉米秸秆还田的影响因素及其生态效应研究[D]. 山西 太谷: 山西农业大学, 2023.



- SHI L X. Study on influencing factors and ecological response of returning corn stalk to soil[D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [15] 刘娜. 河套平原盐碱地不同材料隔层水盐调控及培肥增产机制与效应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- LIU N. Mechanism and effect of interlayer by different material on soil water and salt regulation, fertilization and yield for saline-alkali soil in Hetao Plain [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [16] SONG J S, ZHANG H Y, CHANG F D, et al. If the combination of straw interlayer and irrigation water reduction maintained sunflower yield by boosting soil fertility and improving bacterial community in arid and saline areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: e107424.
- [17] 霍宏鑫, 杨劲松, 姚荣江, 等. 复合隔层对河套灌区盐碱土水盐运移的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(1): 90-96.
- HUO H X, YANG J S, YAO R J, et al. Effect of composite interlayer on soil water-salt transport in Hetao irrigation district[J]. *Soils*, 2024, 56(1): 90-96.
- [18] 仲昭易, 张瑜, 冯绍元, 等. 秸秆深埋结合地膜覆盖土壤水盐运移模拟试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 25-30.
- ZHONG Z Y, ZHANG Y, FENG S Y, et al. Incorporating straw coupled with film mulching to ameliorate soil salinization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 25-30.
- [19] 窦森. 秸秆“富集深还”新模式及工程技术[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 553-560.
- DOU S. New model of “straw enrichment and deep incorporation” and engineering techniques[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 553-560.
- [20] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 921-934.
- DONG J X, CONG P, LIU N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 921-934.
- [21] WU G, LING J, ZHAO D Q, et al. Deep-injected straw incorporation improves subsoil fertility and crop productivity in a wheat-maize rotation system in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2022, 286: e108612.
- [22] 张宏媛. 基于 CT 技术秸秆隔层与亚表层培肥的水盐调控机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- ZHANG H Y. Study on water and salt regulation mechanism of straw interlayer and subsurface fertilization based on CT scanning technology[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [23] 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 秸秆粉碎集条深埋机械还田对土壤物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 43-49.
- WANG Q J, LIU F, JIAO F, et al. Effects of strip-collected chopping and mechanical deep-buried return of straw on physical properties of soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(17): 43-49.
- [24] 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. Technique of reclaiming subsided land with Yellow River sediments in the form of spaced strips[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 557-566.
- [25] 原野, 高嫒, 赵艺芳, 等. 黄土丘陵区露天煤矿复垦土壤熟化过程中团聚体碳氮演变特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 72-80.
- YUAN Y, GAO Y, ZHAO Y F, et al. Succession of soil aggregate associated carbon and nitrogen amid the reclaimed mine soils pedogenic process in an opencast coal mine within the Loess hilly region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(11): 72-80.
- [26] 黄晓娜, 李新举, 刘宁, 等. 不同施工机械对煤矿区复垦土壤颗粒组成的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 136-140.
- HUANG X N, LI X J, LIU N, et al. Effect of different construction machineries on particle composition of reclaimed soil in coal area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 136-140.
- [27] 刘宁. 基于探地雷达的复垦土壤压实与工程质量评价[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2016.
- LIU N. Evaluation of reclaimed soil compaction and project quality based on ground penetrating radar[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2016.
- [28] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [29] 孟庆英, 邹洪涛, 韩艳玉, 等. 秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23): 119-125.
- MENG Q Y, ZOU H T, HAN Y Y, et al. Effects of straw application rates on soil aggregates, soil organic carbon content and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23): 119-125.
- [30] 汪志荣, 王文焰. 砂土夹层的阻水减渗机制及合理埋深[J]. *西安理工大学学报*, 2000, 16(2): 170-174.
- WANG Z R, WANG W Y. The physical mechanism and depreciation and rational burying depth of sand layer in loess[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2000, 16(2): 170-174.
- [31] 郭拿拿, 黄明斌. 不同类型重构土壤水分运移特征[J]. *农*

- 业工程学报,2024,40(3):94-102.
- GUO N N, HUANG M B. Water movement characteristics of different reconstructed soils[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3):94-102.
- [32] 张宏媛,逢焕成,卢闯,等.CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J].农业工程学报,2019,35(6):114-122.
- ZHANG H Y, PANG H C, LU C, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(6):114-122.
- [33] 王强民,赵明,彭鸿杰,等.旱区不同层状结构土壤的水分运移过程与模拟[J].水文地质工程地质,2023,50(4):84-94.
- WANG Q M, ZHAO M, PENG H J, et al. Water transport process and simulation of layered soils with different configurations in an arid region[J].Hydrogeology and Engineering Geology,2023,50(4):84-94.
- [34] 胥凌霄.不同介质夹层土壤的入渗研究[D].山西 太谷:山西农业大学,2017.
- XU L X. Study on infiltration into soils interbedded with different media [D].Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2017.
- [35] 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.
- [36] 李梦刚.覆土模式对煤矸石填埋土壤水分动态及聚合草生长的影响[D].银川:宁夏大学,2021.
- LI M G. Effect of soil covering model on soil moisture dynamics and growth of *Symphytum officinale* L. in gangue landfill[D].Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [37] 邱俊杰.煤矸石-粉煤灰混合充填复垦土壤水气运移特征研究[D].合肥:安徽大学,2021.
- QIU J J. Study on the characteristics of water and gas migration in the reclamation land by coal gangue and fly ash mixed filling[D].Hefei: Anhui University, 2021.
- [38] JIA H, ZHANG H, ARAYA K, et al. Improvement of salt-affected soils, part 2: Interception of capillarity by soil sintering[J].Biosystems Engineering, 2006, 94(2): 263-273.
- [39] 张凯,李晓楠,暴凯凯,等.西北干旱露天煤矿排土场土壤重构与水盐运移机制[J].煤炭学报, 2024, 49(3): 1556-1569.
- ZHANG K, LI X N, BAO K K, et al. Soil reconstruction and water-salt transport mechanism of waste dump in arid open-pit coal mine in Northwest China[J].Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1556-1569.
- [40] 孙波,朱安宁,姚荣江,等.潮土、红壤和盐碱地障碍消减技术与产能提升模式研究进展[J].土壤学报, 2023, 60(5):1231-1247.
- SUN B, ZHU A N, YAO R J, et al. Research progress on barrier remediation technology and productivity enhancement model for fluvo-aquic soil, red soil, and saline-alkali soil[J].Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1231-1247.
- [41] ZHANG H Y, PANG H C, ZHAO Y G, et al. Water and salt exchange flux and mechanism in a dry saline soil amended with buried straw of varying thicknesses[J].Geoderma, 2020, 365: e114213.
- [42] CHANG F D, ZHANG H Y, SONG J S, et al. Once-middle amount of straw interlayer enhances saline soil quality and sunflower yield in semi-arid regions of China: Evidence from a four-year experiment[J].Journal of Environmental Management, 2023, 344: e118530.
- [43] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils [J].Soil and Tillage Research, 2016, 155: 363-370.
- [44] 翟鹏辉.天津滨海土壤盐渍化特征与隔盐层处理技术的脱盐效应研究[D].北京:北京林业大学, 2013.
- ZHAI P H. Characteristic analysis of saline-alkali soil and effects of isolated-layer management technology on desalting in coastal area of Tianjin [D].Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [45] SUN J X, KANG Y H, WAN S Q, et al. Influence of drip irrigation level on salt leaching and vegetation growth during reclamation of coastal saline soil having an imbedded gravel-sand layer[J].Ecological Engineering, 2017, 108: 59-69.
- [46] 杨懋.隔盐层调控滨海盐渍土水盐运移的机理研究[D].山东 烟台:鲁东大学, 2021.
- YANG M. Study on mechanism of controlling water and salt transport in coastal saline soil by the salt-isolation layer [D].Yantai, Shandong: Ludong University, 2021.
- [47] 王杰,杨延杰.盐碱地化学防渗隔盐层初探[J].辽宁农业科学, 2020(3): 65-67.
- WANG J, YANG Y J. A preliminary study on chemical anti-seepage and salt-insulating layer in saline land[J].Liaoning Agricultural Sciences, 2020(3): 65-67.
- [48] 章如芹.煤矸石充填复垦地水盐运移特征及复垦效应研究[D].安徽 淮南:安徽理工大学, 2015.
- ZHANG R Q. Water and salt migration mechanism and study on reclamation effect in reclaimed land by filling gangue[D].Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [49] 张治国,胡友彪,郑永红,等.煤矸石堆存对土壤盐分空

- 间分布特征的影响及主要因子的研究[J].煤炭学报, 2018,43(4):1118-1126.
- ZHANG Z G, HU Y B, ZHENG Y H, et al. Effect of coal gangue stockpiling on spatial distribution characteristics and main factors of soil salinity[J].Journal of China Coal Society,2018,43(4):1118-1126.
- [50] DUC CAO T, KUMAR THOTA S, VAHEDIFARD F, et al. General thermal conductivity function for unsaturated soils considering effects of water content, temperature, and confining pressure[J].Journal of Geotechnical and Environmental Engineering,2021,147(11):e2660.
- [51] 邹小童.层状非均质多孔介质中水盐热运移特征模拟研究[D].辽宁 大连:大连理工大学,2021.
- ZOU X T. Numerical studies on characteristics of water, solute and heat transport in layered heterogeneous porous media[J].Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology,2021.
- [52] 李玮,张佳宝,张丛志.秸秆掩埋还田对黄淮海平原耕层土壤温度及作物生长的影响[J].生态环境学报,2012,21(2):243-248.
- LI W, ZHANG J B, ZHANG C Z. Effects of the straw incorporation on arable layer soil temperature and crop growth[J].Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(2):243-248.
- [53] 王国丽,常芳弟,张宏媛,等.不同厚度秸秆隔层对河套灌区盐碱土壤温度、水分和食葵产量的影响[J].中国农业科学,2021,54(19):4155-4168.
- WANG G L, CHANG F D, ZHANG H Y, et al. Effects of straw interlayer with different thickness on saline-alkali soil temperature, water content, and sunflower yield in Hetao irrigation area[J].Scientia Agricultura Sinica,2021,54(19):4155-4168.
- [54] 刁生鹏,高日平,高宇,等.内蒙古黄土高原秸秆还田对玉米农田土壤水热状况及产量的影响[J].作物杂志, 2019(6):83-89.
- DIAO S P, GAO R P, GAO Y, et al. Effects of straw returning on soil hydrothermal and yield of maize in Loess Plateau of Inner Mongolia[J].Crops,2019(6):83-89.
- [55] 庞明亮.深埋秸秆对作物主要根系层土壤温度的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- PANG M L. Effects of deep buried straw on soil temperature of the main root system[D].Shenyang: Shenyang Agricultural University,2017.
- [56] 常芳弟,王国丽,张晓丽,等.河套灌区春灌结合秸秆隔层对盐碱土壤温度的调控效果[J].植物营养与肥料学报,2020,26(11):1987-1997.
- CHANG F D, WANG G L, ZHANG X L, et al. Regulation effect of spring irrigation combined with straw interlayer on saline-alkali soil temperature in Hetao Irrigation District[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2020,26(11):1987-1997.
- [57] 于茹,宋佳坤,张宏媛,等.秸秆隔层结合春灌对河套灌区盐碱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].中国农业科学,2023,56(12):2341-2353.
- YU R, SONG J S, ZHANG H Y, et al. Effects of straw interlayer combined with spring irrigation on SalineAlkali soil respiration and its temperature sensitivity in Hetao irrigation district[J].Scientia Agricultura Sinica,2023,56(12):2341-2353.
- [58] CHEN J F, REN J M, WANG E Q, et al. Effect of the interlayer on soil temperature and the transformation between phreatic water and soil water under laboratory freeze-thaw action[J].Frontiers in Earth Science,2023, 11:e1200677.
- [59] 杜文杰.冻融作用下浅埋潜水与土壤水转化规律的室内试验与数值模拟研究[D].太原:太原理工大学,2022.
- DU W J. Indoor experiment and numerical simulation study on transformation of shallow phreatic water and soil water under freeze-thaw action[D].Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2022.
- [60] 陈孝杨,王芳,严家平,等.覆土厚度对矿区复垦土壤呼吸昼夜变化的影响[J].中国矿业大学学报,2016,45(1): 163-169.
- CHEN X Y, WANG F, YAN J P, et al. Effect of coversoil thickness on diurnal variation characteristics of reclaimed soil respiration in coal mining areas[J].Journal of China University of Mining and Technology,2016,45(1):163-169.
- [61] 陈敏,陈孝杨,桂和荣,等.煤矸石充填重构土壤剖面温度变化对覆土厚度的响应[J].煤炭学报,2017,42(12): 3270-3279.
- CHEN M, CHEN X Y, GUI H R, et al. Temperature variation and its response to topsoil thickness from reconstruction soil profile filled with coal gangue[J].Journal of China Coal Society,2017,42(12):3270-3279.
- [62] 贾海林,余明高.煤矸石绝热氧化的失重阶段及特征温度点分析[J].煤炭学报,2011,36(4):648-653.
- JIA H L, YU M G. Analysis on the zero-g period and characteristic temperature of coal gangue during adiabatic oxidation process[J].Journal of China Coal Society, 2011,36(4):648-653.
- [63] LIU J, FANG L C, QIU T Y, et al. Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: A global meta-analysis[J].Agronomy for Sustainable Development,2023,43(6):e78.
- [64] 葛选良,钱春荣,宫秀杰,等.东北北部不同埋深玉米秸秆腐解进程及效应的研究[J].东北农业科学,2022,47(5):57-61.
- GE X L, QIAN C R, GONG X J, et al. Research on decomposition process and effect of different buried depth of maize straw in north of northeastern China[J].Journal of Northeast



- Agricultural Sciences, 2022, 47(5): 57-61.
- [65] 丛萍, 李玉义, 王婧, 等. 秸秆一次性深埋还田量对亚表层土壤肥力质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 74-85.  
CONG P, LI Y Y, WANG J, et al. Effect of one-off bury of different amounts of straws at 40 cm deep on subsoil fertility[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(1): 74-85.
- [66] 吴三鼎, 董强, 党廷辉. 减量施氮及秸秆深埋对春玉米地土壤电导率和硝态氮淋溶的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 46-51.  
WU S D, DONG Q, DANG T H. Effects of reduced nitrogen application and deep burial of straw on soil electrical conductivity and nitrate nitrogen leaching in spring maize field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 46-51.
- [67] CHANG F D, WANG X Q, SONG J S, et al. Maize straw application as an interlayer improves organic carbon and total nitrogen concentrations in the soil profile: A four-year experiment in a saline soil[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(6): 1870-1882.
- [68] SONG J S, ZHANG H Y, PEIXOTO L, et al. Burying straw interlayers decreases CO<sub>2</sub> emissions in deep saline soil[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 43: 194-203.
- [69] WANG X Q, LV G Y, ZHANG Y, et al. Annual burying of straw after pelletizing: A novel and feasible way to improve soil fertility and productivity in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 230: e105699.
- [70] 王璐. 秸秆深还配套水肥一体化对土壤质量及玉米植株的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.  
WANG L. Effects of straw depth matching water and fertilizer integration on soil quality and maize plants[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.
- [71] 于翊鹏. 不同还田方式下茶树修剪物腐解特征及其对土壤肥力的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.  
YU Y P. Study on the decomposition characteristics of tea tree pruning materials under different returning methods and their impact on soil fertility[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [72] 靳东升, 张强, 张变华, 等. 种植植物对煤矸石填埋区复垦土壤真菌多样性及养分含量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 206-213.  
JIN D S, ZHANG Q, ZHANG B H, et al. Effect of planting plants on fungi diversity and nutrients in reclaimed soil of coal gangue landfill area[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(5): 206-213.
- [73] 孔涛, 张开, 黄丽华, 等. 菌剂混施对各粒径矸石性质及苜蓿生长的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增刊 1): 241-251.  
KONG T, ZHANG K, HUANG L H, et al. Effects of mixed application of microbial agents on properties of gangue with different particle sizes and alfalfa growth[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 241-251.
- [74] 荣颖. 西部露天矿区海绵营养土及其应用方法与作用机理的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.  
RONG Y. The study on the formulation, application method and mechanism of sponge-nutrient soil in the western opencast mining areas[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2018.
- [75] 徐朝容. 矿区充填复垦物料中重金属元素释放—迁移研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
XU C R. Study on heavy metal elements release and migration in filling reclamation materials in mining area[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2020.
- [76] 张晓. 高潜水位矿区煤矸石中典型重金属的释放特征及潜在威胁[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2022.  
ZHANG X. Release characteristics and potential threats of typical heavy metals in coal gangue in high phreatic water level mining area[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022.
- [77] 唐本玲, 胡振琪, 王亚平. 不同黄河泥沙充填复垦土壤剖面对土壤与作物中元素分布的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊 2): 915-924.  
TANG B L, HU Z Q, WANG Y P. Effects of different reclaimed soil profiles filled with Yellow River sediment on element distribution in soil and crops[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 915-924.
- [78] 李俊颖, 李新举, 吴克宁, 等. 济宁引黄复垦区不同年限土壤养分变化预测[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1358-1366.  
LI J Y, LI X J, WU K N, et al. Prediction of variation of soil nutrient status in reclaimed subsidence-damaged farmlands by filling with Yellow River sediment different in reclamation history in Jining city[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1358-1366.
- [79] LING J, ZHOU J, WU G, et al. Deep-injected straw incorporation enhances subsoil quality and wheat productivity[J]. Plant and Soil, 2024, 499(1): 207-220.
- [80] ZHAO D Q, LING J, WU G, et al. The incorporation of straw into the subsoil increases C, N, and P enzyme activities and nutrient supply by enriching distinctive functional microorganisms[J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(5): 1297-1310.
- [81] YANG H S, LI Y F, ZHAI S L, et al. Long term ditch-buried straw return affects soil fungal community structure and carbon-degrading enzymatic activities in a rice-wheat rotation system[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 155: e103660.

- [27] 樊桐桐,王冬梅,张泽洲,等.放水冲刷条件下工程边坡产流产沙及氮磷输出特征[J].水土保持学报,2023,37(4):101-109.  
FAN T T, WANG D M, ZHANG Z Z, et al. Characteristics of runoff, sediment and nitrogen and phosphorus output of steep slope of abandoned soil deposits under scouring flow[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):101-109.
- [28] 曹程鹏,张飞,段建明.黑土区坡耕地壤中流水平迁移动力学模型研究[J].水土保持研究,2019,26(4):259-264.  
CAO C P, ZHANG F, DUAN J M. Study on the dynamics model of horizontal migration of interflow in cropland in black soil area[J].Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4):259-264.
- [29] 司琴,赖本忠,付智勇,等.管道孔径对西南喀斯特坡地水土漏失的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):49-56.  
SI Q, LAI B Z, FU Z Y, et al. Impact of conduit aperture on soil and water loss on Karst slope in Southwest China[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):49-56.
- [30] PENG X D, DAI Q H, DING G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the Karst rocky desertification area[J].Journal of Hydrology, 2019, 578:e124086.
- (上接第 12 页)
- [82] 王凡,曹银贵,王玲玲,等.土壤微生物及酶活性对露天矿不同土壤重构方式的响应特征[J].煤炭科学技术, 2022, 50(9):249-260.  
WANG F, CAO Y G, WANG L L, et al. Response characteristics of soil microorganisms and enzyme activities to different soil remodeling modes in open-pit mine [J].Coal Science and Technology, 2022, 50(9):249-260.
- [83] 王华龙.高潜水位矿区不同充填材料复垦土壤有机碳空间分布与影响因素研究[D].山东 泰安:山东农业大学, 2023.  
WANG H L. Spatial distribution and influence factors of soil organic carbon reclaimed by different filling materials in high diving level mining area: A case study on the Jining mining area[D].Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [84] 侯湖平,王琛,李金融,等.煤矸石充填不同复垦年限土壤细菌群落结构及其酶活性[J].中国环境科学,2017,37(11):4230-4240.  
HOU H P, WANG C, LI J R, et al. Variation of bacterial community structure and enzyme activities in reclaimed soil filled with coal gangues along a reclamation chronosequence [J].China Environmental Science, 2017, 37(11):4230-4240.
- [85] ZHU F N, LIN X X, GUAN S, et al. Deep incorporation of corn straw benefits soil organic carbon and microbial community composition in a black soil of Northeast China [J].Soil Use and Management, 2022, 38(2):1266-1279.
- [86] 丛萍,王婧,董建新,等.秸秆还田对黑土亚表层微生物群落结构的影响特征及原因分析[J].农业工程学报, 2020, 36(1):109-118.  
CONG P, WANG J, DONG J X, et al. Effects and analysis of straw returning on subsoil microbial community structure in black soil[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1):109-118.
- [87] CHENU C, ANGERS D A, BARRÉ P, et al. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations[J].Soil and Tillage Research, 2019, 188:41-52.
- [88] 焦赫,李新举.煤矸石充填复垦土壤细菌群落变化[J].煤炭学报, 2021, 46(10):3332-3341.  
JIAO H, LI X J. Variation in the soil bacterial community of reclaimed land filled with coal gangue[J].Journal of China Coal Society, 2021, 46(10):3332-3341.
- [89] YANG H S, ZHAI S L, LI Y F, et al. Waterlogging reduction and wheat yield increase through long-term ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system [J].Field Crops Research, 2017, 209:189-197.
- [90] 王琳琳,李素艳,孙向阳,等.不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响[J].生态学报, 2015, 35(5):1388-1398.  
WANG L L, LI S Y, SUN X Y, et al. Application of salt-isolation materials to a coastal region: Effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of Robinia pseudoacacia[J].Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5):1388-1398.