

◆健康保育与环境修复◆

黄河流域中下游灌区沙性土壤改良研究进展

贾瑞峰, 肖晨星, 李婷婷, 沈彦辉, 高璐阳, 武良

(新乡丰农业科技股份有限公司 农业农村部作物高效专用肥料重点实验室 养分资源高效利用湖北省工程研究中心, 湖北 荆门 448000)

[摘要] 黄河中下游引黄灌溉区域沙性土壤结构性差、保水保肥能力弱, 易受风蚀水蚀。为提高沙性土壤的生产力, 梳理近20年黄河流域沙性土壤改良相关研究, 重点分析水分调控和有机质提升技术在沙土改良中的关键作用, 系统综述物理改良、化学改良和生物改良等主要技术的研究进展, 并剖析当前技术推广面临的长期效应不足、区域适应性差异等瓶颈问题。在此基础上, 明确了以水分管理、复合改良、抗逆植物和微生物协同改良等技术为创新方向, 并展望规范沙性土壤改良工作的政策与管理, 旨在为黄河中下游灌区沙性土壤改良工作提供参考与支撑。

[关键词] 黄河流域; 沙性土壤; 物理改良; 化学改良; 生物改良

[中图分类号] X717; S156.4 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 04-0095-07

Research progress on improvement of sandy soil in irrigation districts of middle and lower reaches of the Yellow River Basin

JIA Ruifeng, XIAO Chenxing, LI Tingting, SHEN Yanhui, GAO Luyang, WU Liang

(Key Laboratory of Crop Efficient and Specific Fertilizers Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Provincial Engineering Research Center of Efficient Utilization of Nutrient Resources, Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: The sandy soil in the irrigation area of the middle and lower reaches of the Yellow River Basin has poor structure and weak water and nutrient retention capacity, and is prone to wind and water erosion. To enhance the productivity of sandy soil, by sorting out the relevant research on the improvement of sandy soil in the Yellow River Basin in the past 20 years, the key roles of water regulation and organic matter enhancement technologies in sandy soil improvement are analyzed, and the research progress of main technologies such as physical improvement, chemical improvement and biological improvement are systematically reviewed. And the bottleneck problems such as insufficient long-term effects and regional adaptability differences faced by the current technology promotion are analyzed. On this basis, the technological innovation directions such as water management construction, composite improvement technology, and the synergy of stress-resistant plants and microorganisms have been clearly defined. The future is also prospected from the perspective of policies and management for regulating sandy soil improvement work, aiming to provide reference and support for sandy soil improvement work in the irrigation area of the middle and lower reaches of the Yellow River.

Key words: Yellow River Basin; sandy soil; physical improvement; chemical improvement; biological improvement

在全球范围内, 土壤沙化已然演变成一场严峻的生态危机, 致使超过40%的陆地生态系统陷入荒漠化困境。中国深受沙化影响, 在众多国家中形势尤为严峻^[1]。数据显示, 我国荒漠化土地面积占国土总面积的27.2%, 沙化土地面积占比达17.9%^[2]。黄河流域中下游灌区是典型的沙质土壤分布区域, 该区域的沙化土地呈现出极为明显的土壤结构松

散、保水保肥能力差、养分流失严重以及土壤侵蚀加剧等水土复合型退化特点^[3]。黄河流域中下游灌区的生态安全状况对黄河流域高质量发展战略的推进起着至关重要的作用。

鉴于黄河流域中下游灌区沙化土壤改良的紧迫性, 亟须探索有效的土壤改良技术以提升其生产力。相关研究表明, 生物炭的应用可增强黄河流域

收稿日期: 2025-05-06

作者简介: 贾瑞峰(2000—), 男, 山西晋城人, 硕士, 主要从事新型肥料开发与应用研究工作。

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD1902704)

典型沙质土壤在干旱或半干旱条件下的持水能力,进而影响土壤物理性质^[4];沥青的使用则通过在沙质土壤下方形成连续屏障,阻断水分流动^[5]。此外,覆盖等土壤管理措施亦可对土壤水分保持发挥积极作用^[6]。堆肥、食物垃圾、作物残渣以及粪肥等有机改良剂的施加,对于提升土壤肥力及改善土壤结构具有重要意义^[7]。本研究聚焦于黄河流域中下游灌区沙性土壤改良,系统综述当前沙性土壤改良技术的研究进展,并剖析了当前存在的问题,旨在为该区域沙性土壤改良工作提供参考与支撑。

1 黄河流域中下游灌区沙性土壤面临的问题

黄河流域中下游灌区沙性土壤的研究起步较晚。20世纪中期以前,该区域的研究主要集中在农业领域。进入21世纪以后,研究逐渐拓展至生态领域,并在土壤沙化、风力侵蚀及生态环境等方面取得了一定进展^[8]。该区域的沙性土壤主要由历史上多次黄河泛滥所形成的沉积物构成。综合前人研究成果,黄河流域中下游灌区沙性土壤面临以下2个主要问题。

1) 土壤持水性能弱,结构稳定性差

黄河流域中下游灌区的土壤表层以沙土为主,其质地主要由粗砂粒(粒径范围为0.1~1.0 mm)构成,占比超过80%,而黏粒(粒径小于0.002 mm)含量极低,由于质地疏松,团聚性差,导致其表层水分蒸发速率和渗透速率较快^[9-10]。此外,该区域沙层厚度较大,土壤结构松散且脆弱,容重较高,极易受到风力侵蚀的作用而被活化。区域内植被覆盖率低,土壤在风力侵蚀作用下易发生沙尘飞扬和流沙现象。在干旱多风的季节,土壤表层的黏粒、粉粒和细砂颗粒易被风吹蚀,导致土壤表层结构破坏,耕作层变薄^[11]。

2) 土壤有机质含量低

黄河流域中下游灌区沙性土壤有机质质量分数在该区域所有土壤类型中处于最低水平,一般低于5 g/kg^[12],仅在少数受洪积影响的地势较低区域或长期封育的固定沙丘地带,有机质含量略高。沙性土壤有机质含量低的主要原因是土壤生物量少,生物活性低,且大部分有机物质因风蚀作用而流失,同时土壤矿化作用较强,部分有机质随表层细土被吹蚀而丧失,导致该区域沙性土壤成为地力最为贫瘠的土壤类型。

2 黄河流域中下游灌区沙性土壤改良技术

2.1 水分调控技术

针对黄河流域中下游灌区沙土颗粒间孔隙大、

保水性差等固有特点,水分调控技术的重点是构建科学高效的多级保水性体系,从多个方面提高沙性土壤的蓄水利用效率。其中,生物炭改性技术作为其中的重要组成部分,通过精确调节生物炭的孔隙结构和表面电荷特性,显著优化了沙土的保水性能。汤家喜等^[13]研究表明,在沙性土壤中添加改性生物炭可使土壤的田间持水能力提高18%~35%。其作用机制是改性生物炭丰富的孔隙结构可以提供更多的储水空间,调整后的表面电荷增强了对水分子的吸附能力,从而有效改善了沙性土壤的保水状况。此外,秸秆或地膜覆盖可使土壤水分蒸发量显著减少42%~67%^[14]。秸秆覆盖通过物理屏障减少太阳辐射,降低土壤温度,从而抑制水分蒸发;同时,秸秆在分解过程中形成腐殖质,改善了土壤结构,间接提高了土壤保水能力。地膜覆盖具有良好的防水性能,直接阻止土壤水分散失到大气中,有效保持土壤水分,为作物生长创造适宜的土壤湿度环境。

水分调控技术通过优化土壤内部孔隙结构、阻断深层水分、抑制地表水蒸发等方面,构建了全面高效的多级保水体系,有效解决了沙性土壤保水能力差的问题,有力地促进了黄河流域中下游灌区农业的可持续发展。

2.2 有机质提升技术

有机质提升技术主要通过对碳氮循环的精确调控来优化黄河流域中下游灌区沙性土壤的结构和肥力。堆肥改良是土壤有机质提升的关键方法之一。在沙性土壤中施用有机废弃物堆肥能显著提高土壤有机质含量。研究数据表明,堆肥改良后的沙性土壤有机质质量分数可显著提高至1.8%,且碳氮比($m(C)/m(N)$)保持在25%~30%的适宜范围^[15]。在此过程中,堆肥中复杂的有机物在微生物的分解作用下,逐渐转化为稳定的腐殖质。这不仅增加了土壤的有机碳含量,而且改善了土壤颗粒的团聚性,优化了土壤的孔隙结构,从而增强了土壤的保水、保肥能力。此外,合理施用牛粪、猪粪等粪肥可显著提高土壤有效磷质量分数,提升幅度为5.6%~10.6%,大幅度提高土壤阳离子交换能力(CEC),提升幅度为18.0%^[16]。肥料中的磷在土壤中通过一系列化学反应,转化为可以被植物直接吸收利用的有效磷形式,满足作物生长对磷的需求。较高的阳离子交换能力意味着土壤对养分离子的吸附和交换能力增强,有助于保持土壤肥力,防止养分流失,为作物生长创造更有利的土壤

化学环境。

有机质提升技术中的堆肥改良、粪肥施用通过不同途径参与和调节土壤碳氮循环。二者在增加沙性土壤有机质含量、改善沙性土壤微生物群落结构、提高沙性土壤养分有效性方面具有协同效应，为改善黄河流域中下游灌区沙土结构和肥力提供了可持续的解决方案。

3 黄河流域中下游灌区沙性土壤改良研究进展

3.1 物理改良法

3.1.1 滴灌+覆膜改良

在黄河流域中下游灌区沙性土壤治理工作中，节水技术主要聚焦于灌溉与保墒。就灌溉而言，运用节水型灌溉方法能够推动水分以更高的效率渗透至作物根系，进而被作物充分吸收利用；像表膜、地膜覆盖此类保墒举措，能够有效减少土壤水分的无效蒸发损耗，进一步优化节水灌溉的整体成效。例如，中国农业科学院农业资源与农业区划研究所成功研发出“上膜下秸”抑盐增产成套技术。该技术融合了控盐、抑盐、土壤培肥、作物促生以及节水等多项功能。在宁夏引黄灌区实际应用中，该技术能够让耕层土壤中 $w(\text{盐})$ 下降10.2%~53.2%，使土壤 $w(\text{H}_2\text{O})$ 显著提高2~4个百分点，促使土壤有机质质量分数增加0.2~0.3 g/kg^[17]。

3.1.2 客土改良

沙性土壤存在“过沙”以及养分稀缺的状况，而应对这一问题，添加具备“黏性”的材料，能够切实改变土壤特性，助力达成增产目的。黄河流域中下游灌区的风沙土主要由砂粒组成，具备良好的通气性，然而却存在水分易流失、难以留存、含量低以及热容小等问题。这些问题致使土壤温度变化剧烈，理化条件波动明显。向这类风沙土中加入黏土，能够有效调整土壤的通透性能，增强土壤的保水能力，增大土壤热容，提升土壤的保温性能。在实际操作中，相关研究通过按特定比例将某些物质与沙土混合来改良土壤。比如，将污泥掺混比例为20%的沙土作为表层土壤，以此对“泥-沙”掺混复合土壤的水分入渗规律和土壤保水性能开展研究^[18]，结果表明沙土和20%比例掺混土壤含水率均会从初始含水率逐渐升高，直到接近饱和含水率时会趋于稳定。

3.2 化学改良法

3.2.1 无机改良剂

无机材料像黏土、膨润土、磷石膏、沸石以及粉煤灰等常见矿物质材料，具备较强的抗风化特

性，能够在较长时间内保持对离子和水分的稳定吸附能力。这些材料施用于沙性土壤后，可通过多种作用机制来增强土壤的保水能力，并提高土壤有机碳(SOC)的含量，同时对土壤pH发挥缓冲调节作用。

以石膏等软岩类矿物质为典型代表，其能够提高土壤的pH，而土壤pH的提升，有助于提高植物对自身生长必需养分的吸收利用率。研究^[19]表明，施用矿物质调理剂后黄河中下游河流泥沙pH提高5.8%~11.8%，土壤阳离子交换量(CEC)显著增加。通过增强土壤对钾、钙等带正电离子的吸附保持能力，促使土壤养分得以更好地留存，也让植物在获取养分上更为便利。此外，矿物质能够提高沙性土壤的持水能力，田间持水量显著提高26%~33%，有效减少因蒸发作用造成的水分损失，以此强化沙性土壤的保水性能^[20]。

3.2.2 有机改良剂

丰富的有机物料来源为有机改良剂的大规模应用奠定了基础，诸如各类作物残留物以及覆盖有机材料等，均是常见的有机改良原料。相较于那些成本高昂、操作流程烦琐且耗时的先进技术，有机改良剂的使用成本更为低廉，这无疑是在早期快速发展的关键因素。不过，受限于部分区域土壤生产力偏低，加之作物残留物常被优先用作牲畜饲料或燃料，致使有机残留物供应短缺，进而对有机改良剂在黄河流域中下游灌区沙性土壤中的大规模推广应用形成了一定制约。

有机土壤改良剂依据功能特性，可进一步细分为土壤结构改良剂、土壤保水剂、土壤酸碱度调节剂、盐碱土改良剂等多个类别。在黄河流域中下游灌区沙性土壤改良实践进程中，有机土壤改良剂发挥着极为重要的作用。它能够有效优化土壤结构，改善土壤物理化学性质，提升土壤肥力水平，增强土壤保水性能，从而对防止水土流失起到积极作用。

研究表明，固废堆肥在沙性土壤改良领域具有显著的应用潜力和重要的实践价值^[21]。此外，有研究尝试在沙性土壤中添加谷壳生物炭以及锯末生物炭^[22]，以期提高沙性土壤的肥力以及保水能力。LU等^[23]研究表明，在黄河流域沙性土壤中添加2%、4%和6%的生物质炭，培养180 d后土壤田间持水量分别提高了12%、20%和31%，说明生物质炭施用量与土壤田间持水量呈正相关。HOSSAIN等^[24]研究发现，施用生物炭可使沙性土壤 $w(\text{全氮})$

显著增加4.8%，全氮含量的提升是其改良沙土理化性质、提升土壤保肥供肥能力的重要体现。从作用机制深入探究，有机改良剂可对沙性土壤结构起到优化功效，其可降低沙性土壤的紧实程度，使土壤内部孔隙空间得以增加。此外，有机添加物为土壤微生物供应了碳素，促进土壤微生物活性提升，推动沙性土壤养分循环进程。

3.2.3 复合改良剂

复合改良剂一般是以有机材料和无机材料当作基础原料，按照特定的比例复合制作而成。其选用的原料包含泥炭、生物炭、腐植酸以及有机固体废物等。复合改良剂拥有广泛的适用范围，能够依照土壤的实际肥力情形，灵活地对配方加以调整，进而将有机材料和无机材料各自的优势充分施展出来。以生物炭为实例，它能够和多种肥料复合制备碳基复合肥^[25]。施加腐植酸肥料与有机肥料可改善沙性土壤的理化特性。

研究表明，不同改良材料及其组合对沙性土壤的改良效果存在显著差异，但均表现出极为显著的改良成效。WU等^[26]的研究表明，复合肥与污泥生物质炭一同施用，能够使黄河冲积平原沙性土壤毛管孔隙度显著提高4.55%~22.73%，非毛管孔隙度降低20.5%~42.2%，从而使得水分能够在孔隙中保存，显著改善土壤的水含量、贮水量等关键指标，让土壤状况相较于原本的沙性土壤有显著提升。LIU等^[27]利用稻壳生物炭与膨润土作为土壤改良剂，研究发现其可以降低引黄灌区沙性土壤容重，提高土壤水含量和孔隙度，还能增加沙性土壤中有机质、全氮等养分的含量。SHEN等^[28]研究钠基膨润土、菌渣和腐植酸构成的复合材料，发现随着施加量增多，对沙性土壤理化性质的改善作用愈发突出，土壤容重降低8.3%~12.2%，土壤速效钾和速效磷质量分数分别增加33.7%和48.7%。而LARNEY等^[29]将聚乙烯醇和有机物料混合后施用，能够有效调控沙性土壤的pH，减少水分蒸发散失，降低土壤容重并增加总孔隙度。

另外，由褐煤、黏土以及有机肥复合而成的土壤改良剂，可推动沙性土壤有机无机复合体的生成以及结构发展。将黏土、有机肥和腐植酸组合作为改良剂使用，能够显著增强沙性土壤的持水能力与保肥性能。在运用沙蒿生物炭改良沙土时，若配合有机物料一同施入，对于提升土壤有效养分有着协同增效的作用。经推测，这是因为有机物料与生物炭混合施用后，增加了沙性土壤中微生物的数量，

同时提高了微生物的活性。而将腐植酸、凹凸棒石黏土、保水剂以及其他有机质复配制成的腐植酸复合材料，能够增强沙性土壤保持水分的能力，降低土壤的pH，让土壤结构得到优化。

3.2.4 人工合成的高分子改良剂

用于沙性土壤改良的人工合成的高分子改良剂，主要涵盖聚丙烯酸盐、聚乙烯醇、聚丙烯酰胺、羧甲基纤维素钠以及高分子保水剂等种类。研究表明^[30-32]，高吸水性聚合物组成的人工合成改良剂可使饱和和水力传导度下降56.9%~85.3%，沙性土壤 $w(\text{H}_2\text{O})$ 增加6.8%~68.0%。在改良黄河流域中下游灌区沙性土壤的实际使用过程中，传统的有机改良剂和无机土壤改良剂普遍暴露出施用量较大、施用效果难以长期维持等问题。与之相比，人工合成的高分子改良剂能够有效克服这些缺陷，所以在实际应用中愈发受到青睐。不过，研发出成本低廉、用量少且对环境友好的人工合成高分子改良剂，仍是当下研究工作面临的一大难点。

3.3 生物改良法

3.3.1 微生物改良剂

在黄河流域中下游灌区沙性土壤改良实践中，有研究开展农用酵素对沙性土壤进行短期改良的尝试。研究结果表明^[33]，农用酵素能使沙性土壤的pH从原本的9.63降至6.42，与此同时，土壤有机质含量大幅度提升。不仅如此，土壤中氮、磷、钾等各类养分的含量均有不同程度的上升，极大地改善了沙性土壤的肥力状况。另有研究指出^[34]，施用含有30%煤基固废的地质肥料，并配合微生物菌剂一起使用，能够最大程度地优化沙性土壤的理化性质，显著提高沙土的肥力等级，为作物生长营造更为优良的土壤环境。

3.3.2 植物改良剂

借助特定植物来改良土壤的途径，为攻克沙性土壤质量提升这一难题，贡献了全新的策略与手段。在植物生长过程中，以及其根系腐烂分解后，会对土壤发挥胶结与团聚作用，由此大幅度优化沙土结构，提高土壤的肥力程度。研究表明^[35-37]，于灌溉条件下种植铃铛刺、梭梭和粗毛甘草等指示作物，对提高沙性土壤水含量成效显著，同时能有效调节沙土的pH，降低沙土容重，0~30 cm耕层土壤有机质质量分数显著增加2.1~10.7 g/kg，有效磷和速效钾质量分数分别显著提升25.6%和53.9%。通过栽种这类指示作物，从多个维度改善了沙土的物理化学特性，为优化土壤环境提供了一种绿色环

保且可持续的方法。

4 存在问题

4.1 技术推广瓶颈

在推广沙性土壤改良技术时,面临着诸多严峻的挑战,其中改良成本过高以及技术研发与实际应用的限制,成了显著的阻碍。人工合成高分子改良剂是改良沙性土壤的关键方式之一,然而其研发过程复杂,涵盖化学合成工艺、材料挑选与优化等流程。从原材料的筛选、反应条件的精确把控,到产品的提纯以及性能测试,每一个步骤都需要投入大量人力、物力和财力,使得人工合成高分子改良剂的生产成本一直处于高位。并且,目前对于其是否会对土壤和植物产生潜在的负面作用,尚未有全面深入的研究和评估,这极大地限制了沙性土壤改良技术在更大范围内的推广应用。

4.2 长期效应研究不足

众多改良技术在实际应用期间,长期效应不足已成为阻碍沙性土壤改良成效持续稳固的原因,部分改良技术缺乏对土壤微生物群落的长期监测。以生物炭为例,在农田施用后面临较为严重的碳损失,此外,当前关于生物炭与其他关键农业管理措施,诸如施肥策略、灌溉制度之间协同作用机制的研究尚显薄弱。如不同种类肥料的施用及用量差异,极有可能改变土壤微生物对生物炭的分解转化路径与速率;而灌溉制度的调整,会改变土壤水含量与分布状况,进而深刻影响生物炭在土壤中的稳定性以及与土壤颗粒之间的相互作用关系。

当农家肥施用于土壤时,能在其中形成有机胶体;然而,由于少量农家肥在沙性土壤中分解迅速,缺乏长期有效性。土壤中施用有机物的效应及其对环境的影响,以及土壤中固碳和有毒元素积累的过程,都是缓慢发展的。此外,沥青屏障技术在15~20年内存在材料老化造成二次污染的风险。因此,需要对所有这些方面进行长期监测测试。

4.3 区域适应性差异

黄河流域中下游灌区不同区段土壤盐分、沙化程度差异大,需制定定制化方案。现有改良技术多源于干旱区经验,与黄河流域中下游灌区特有的“高蒸发-强淋溶”水盐耦合机制存在匹配偏差。在利用生物炭改良沙性土壤的实践中,生物炭性质受原料种类以及制备条件的制约,呈现出显著的异质性。加之不同土壤自身特性与作物属性存在差异,使得生物炭在实际应用中所展现出的改良效果参差

不齐。当运用有机物料开展土壤改良工作时,添加至土壤内的有机质碳氮比是关键考量因素。若加入土壤的有机质碳氮比过高,土壤中的微生物在分解过程中会大量摄取土壤中的速效氮以满足自身生长繁殖需求,从而与作物形成氮素竞争,进而对土壤中速效氮含量以及有机质分解速率产生直接影响。

5 未来展望

5.1 技术创新方向

在黄河流域中下游灌区独特的地理条件下,迫切需要在几个关键技术领域取得重大进展:(1)水分管理,借助数学建模以及数值模拟等技术手段,构建出精确的水分管理模型,精准预估不同时间与空间尺度下,沙性土壤的水分动态变化情况。这一模型能够为科学规划灌溉策略、合理优化水资源配置,提供坚实的理论基础和技术支持,进而提高水分利用效率,缓解土壤沙化的问题。(2)复合改良,通过物理、化学或者生物的方法,对复合改良剂中养分以及活性成分的释放速度进行调控。比如,运用包膜技术将生物炭与有机质复合体包裹起来,使其能够依据沙性土壤环境的变化,做出响应性释放;又或者通过调节复合体系里微生物群落的结构和功能,实现对养分转化与释放的生物调控。(3)抗逆植物与微生物协同改良,黄河流域中下游灌区的土壤常常面临沙化、盐碱化等不利环境的胁迫,这极大地限制了植物的生长。所以,筛选出适合黄河流域中下游灌区恶劣环境的抗逆植物品种,并结合有益微生物,构建协同改良体系,尤为关键。通过优化植物与微生物的组合,调控其相互作用关系,打造出高效且稳定的协同改良体系,以此有效改善黄河流域中下游灌区沙性土壤的生态环境,推动植被恢复,维持生态系统的稳定。

5.2 政策与管理

为规范沙性土壤改良工作,保障改良流程科学、安全且可持续,亟待研究并制定适用于沙性土壤改良的国家规范和产品质量标准。在该标准体系里,需要清晰界定土壤水含量、营养成分(如氮、磷、钾以及中微量元素的含量)、pH等常见理化指标的合理区间与测定办法,以此精确引导改良物料的使用以及土壤质量评估。同时,要严格设置污染物和重金属的限制指标,明确各类污染物(例如持久性有机污染物、农药残留)和重金属在改良物料以及土壤里的最高允许值。通过标准化方式规范废弃有机肥料资源的合理利用步骤,从根源上把控潜在污染物进入沙性土壤生态系统。规范性的政策与

管理要求下,才能在充分发挥废弃有机肥料资源改良沙性土壤潜能的同时,切实维护沙性土壤开发利用过程中的生态环境安全,达成黄河流域中下游灌区沙性土壤的可持续发展。

[参考文献]

- [1] HUANG J Y, HARTEMINK A E. Soil and environmental issues in sandy soils[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103295.
- [2] 屠志方, 李梦先, 孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J]. *林业资源管理*, 2016(1): 1-5.
TU Z F, LI M X, SUN T. The Status and Trend Analysis of Desertification and Sandification [J]. *Forest Resources Management*, 2016(1): 1-5.
- [3] 李玮, 尹广生, 李琪瑞, 等. 不同改良措施对黄河南岸灌区盐碱土壤理化性质及团聚体特征的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(S1): 33-41.
LI W, YIN G S, LI Q R, et al. Effects of different soil improvement measures on physicochemical properties and aggregate characteristics of saline-alkali soils in irrigation areas on the south bank of the Yellow River [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(S1): 33-41.
- [4] AODA M I, SMUCKER A J M, MAJEED S S, et al. Novel root zone soil water retention improves production with half the water in arid sands[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(3): 2398-2406.
- [5] DANTAS N S A, PEREIRA C G F, ABREU A A. Stabilization of sandy soil with high content of asphalt emulsion [J]. *REM-International Engineering Journal*, 2020, 73(2): 163-169.
- [6] ZAIDUN S W, JALLOH M B, AWANG A, et al. Biochar and clinoptilolite zeolite on selected chemical properties of soil cultivated with maize (*Zea mays* L.) [J]. *Eurasian Journal Soil Science*, 2019, 8(1): 1-10.
- [7] DOLIT M S A, ASLI U A, KHAMIS A K, et al. Improving the water retention characteristics of sandy soil using food waste compost amendment and indigenous microorganisms [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2022, 97: 211-216.
- [8] CHEN Y P, FU B J, ZHAO Y, et al. Sustainable development in the Yellow River Basin: Issues and strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121223.
- [9] 张建国, 李晶晶, 余红兵. 黄河流域黄土高原地区水土流失动态变化及分布特征[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 110-116.
ZHANG J G, LI J J, YU H B. Dynamic changes and distribution characteristics of soil and water loss in Loess Plateau area of Yellow River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4): 110-116.
- [10] 张亚楠, 宋小宁, 冷佩, 等. 近20年黄河流域夏季土壤水分时空变化特征及驱动因素分析[J]. *中国科学院大学学报(中英文)*, 2024, 41(4): 477-489.
ZHANG Y N, SONG X N, LENG P, et al. Temporal and spatial variation of summer soil moisture and its driving factors in Yellow River basin during the last 20 years [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 41(4): 477-489.
- [11] ABUBAKER O, MA Z G, ZHENG Z Y, et al. Natural and anthropogenic influences on the recent droughts in Yellow River Basin, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 704: 135428.
- [12] DONG L L, ZHANG H D, WANG L Q, et al. Irrigation with sediment-laden river water affects the soil texture and composition of organic matter fractions in arid and semi-arid areas of Northwest China [J]. *Geoderma*, 2018, 328: 10-19.
- [13] 汤家喜, 李玉, 朱永乐, 等. 生物炭与膨润土对辽西北风沙土理化性质的影响研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(3): 143-150.
TANG J X, LI Y, ZHU Y L, et al. Effect of biochar and bentonite on physicochemical properties of sandy soil in northwestern Liaoning province [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(3): 143-150.
- [14] MA J T, CHANG L, LI Y W, et al. Straw strip mulch improves soil moisture similar to plastic film mulch but with a higher net income [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2024, 362: 108855.
- [15] RAVIV M, MEDINA S, KRASNOVSKY A, et al. Organic matter and nitrogen conservation in manure compost for organic agriculture [J]. *Compost Science & Utilization*, 2004, 12(1): 6-10.
- [16] 李振永, 李磊, 闫超, 等. 不同连作年限下粪肥还田量对土壤养分及微生物特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(17): 253-260.
- [17] 刘涛. 宁夏引黄灌区盐碱荒地水肥盐与植物根系调控技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [18] 黄殿男, 赵超越, 张羽鑫, 等. 污泥改良沙化土壤水分入渗及再分布模拟[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2768-2775.
- [19] TIAN S M, LI Z W, WANG Z Y, et al. Mineral composition and particle size distribution of river sediment and loess in the middle and lower Yellow River [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(3): 392-400.
- [20] YAN X D, SHI L, CAI R M. Improvement of nitrogen utilization and soil properties by addition of a mineral soil conditioner: mechanism and performance [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(3): 2805-2813.
- [21] 顾雯曦, 周继豪, 刘杰. 基于固废堆肥施用的沙土养分调节及改性能效研究[J]. *当代化工*, 2019, 48(3): 462-466.
GU W X, ZHOU J H, LIU J. Nutrient Regulation and Modification Efficiency of the Sandy Soil Based on the Solid Waste Compost Application [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(3): 462-466.
- [22] 侯建伟, 索全义, 梁桓, 等. 有机物料对沙蒿生物炭改良沙土中有效养分的增效作用[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 463-467.
HOU J W, SUO Q Y, LIANG H, et al. Synergy of Organic Material on Amelioration of *Artemisia ordosica* Biochar on Sandy Soil Available Nutrients [J]. *Soils*, 2016, 48(3): 463-467.
- [23] LU S G, SUN F F, ZONG Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol) [J]. *CATENA*, 2014, 114: 37-44.
- [24] HOSSAIN M Z, BAHAR M M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant [J]. *Biochar*, 2020, 2(4): 379-420.

- [25] MUHAMMAD R, QAISER H, KHALID S K, et al. Carbon-based slow-release fertilizers for efficient nutrient management: synthesis, applications, and future research needs[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(2): 1-26.
- [26] WU N, LIU S M, ZHANG G L, et al. Anthropogenic impacts on nutrient variability in the lower Yellow River[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 755(P1): 142488.
- [27] LIU B Y, LIAO M J, WAN Y. et al. Hydraulic characteristics and vegetation performance of the Yellow River sediment modified by biochar[J]. *Biogeotechnics*, 2024, 2(2): 100070.
- [28] SHEN Y W, JIAO S Y, MA Z, et al. Humic acid-modified bentonite composite material enhances urea-nitrogen use efficiency[J]. *Chemosphere*, 2020, 255: 126976.
- [29] LARNEY F J, ANGERS D A. The role of organic amendments in soil reclamation: A review [J]. *Can J Soil Sci*, 2012, 92: 19-38.
- [30] HOU X Q, LI R S, HE W S, et al. Superabsorbent polymers influence soil physical properties and increase potato tuber yield in a dry-farming region [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(3): 816-826.
- [31] 秦舒浩, 王蒂, 张俊莲, 等. 保水剂对旱作马铃薯土壤水分特性及马铃薯产量形成的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2013, 48(2): 30-33.
- QIN S H, WANG D, ZHANG J L, et al. Effects of aquasorbs on soil water characteristic and yield formation of potato [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(2): 30-33.
- [32] EL-ASMAR J, JAAFAR H, BASHOUR I, et al. Hydrogel banding improves plant growth, survival, and water use efficiency in two calcareous soils[J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2017, 45: 1700251.
- [33] 张越, 高游慧, 陈颖, 等. 农用酵素对沙土、酸性土和盐碱土的改良效果研究[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(6): 177-186.
- ZHANG Y, GAO Y H, CHEN Y, et al. Effects of agricultural Jiaosu on the improvement of sandy soil, acidic soil and saline-alkali soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 177-186.
- [34] 许继飞, 康振中, 赵吉, 等. 煤基固废与牲畜粪便固态发酵基质改良沙土的研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(7): 160-166.
- XU J F, KANG Z Z, ZHAO J, et al. The amelioration of sandy soil using the solid fermentation mixture of the based-coal solid waste and the livestock ex-crement [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(7): 160-166.
- [35] MUSA A, JIANG D M, NIU C Y. The applicable density of sand-fixing shrub plantation in Horqin Sand Land of Northeastern China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 250-254.
- [36] AKTAVIA H, JAUHARI S, MUJIYO M, et al. Mycorrhizae and a soil ameliorant on improving the characteristics of sandy soil [J]. *Sains Tanah*, 2021, 18(1): 73.
- [37] GAO Y, LIU L, JIA R, et al. Evapotranspiration over artificially planted shrub communities in the shifting sand dune area of the Tengger Desert, north central China [J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(2): 290-299.

(上接第56页)

随着现代农业对肥料利用率、施用便捷性和环境友好性要求不断提高,能够精准调控肥料溶解行为的崩解剂市场需求日益凸显。它不仅应用于传统复合肥,在水溶肥、生物肥等新型特种肥料中的创新应用也愈发广泛。崩解剂行业已从早期的单一功能产品,发展到如今针对不同肥料配方、工艺和施用场景提供定制化解决方案的阶段。企业致力于研发高性能、专用型的崩解剂,并与造粒、包膜等技术结合,提供一站式解决方案,以破解肥料生产中的“卡脖子”难题(如结块、溶解性差)。未来的研发将更注重助剂本身的环保与可降解性,推动行业的绿色发展。

[参考文献]

- [1] MANDAL M, LODHI R S, CHOURASIA S, et al. A review on sustainable slow-release N, P, K fertilizer hydrogels for smart agriculture[J]. *ChemPlusChem*, 2025, 90(3): e202400643.
- [2] 曹鹏, 王国栋, 张星, 等. 氮肥增效剂的研究进展与展望[J]. *生态产业科学与磷氟工程*, 2025, 40(12): 57-62.
- CAO P, WANG G D, ZHANG X, et al. Research progress and prospects of nitrogen fertilizer enhancers[J]. *Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering*, 2025, 40(12): 57-62.
- [3] 任孟伟, 李任丰. 崩解剂在土壤调理剂中的应用研究[J]. *肥料与健康*, 2022, 49(6): 38-40.
- REN M W, LI R F. Application of Disintegrating Agent in Soil Conditioner[J]. *Fertilizer & Health*, 2022, 49(6): 38-40.
- [4] MIRBOLOOK A, RASOULI-SADAGHIANI M, KESHAVARZ P, et al. Development and characterization of a slow-release dual-purpose N and Zn fertilizer based on diatomite and nano-diatomite[J]. *Clays and Clay Minerals*, 2024: 72(e6): 1-14.
- [5] 李娟, 王亚静, 杨相东, 等. 农业高质量发展背景下的新型肥料发展[J]. *蔬菜*, 2024(6): 1-13.
- LI J, WANG Y J, YANG X D, et al. Development of New-type Fertilizers under the Background of High-quality Development of Agriculture[J]. *Vegetables*, 2024(6): 1-13.
- [6] 刘旺, 袁树忠, 张省委, 等. 国内农药泡腾剂的应用研究概况[J]. *农药*, 2019, 58(1): 16-20.
- [7] 李汝会, 陈欣, 江志阳. 肥料增效剂的种类及作用原理[J]. *肥料与健康*, 2024, 51(3): 1-9.
- LI R H, CHEN X, JIANG Z Y. Types and Working Principles of Fertilizer Synergists[J]. *Fertilizer & Health*, 2024, 51(3): 1-9.
- [8] BORASE G B, PATIL S P, TAYADE R R, et al. Slow release of NPK fertilizer using biodegradable porous carriers synthesized from agricultural waste[J]. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 2024, 29(1): 48-59.
- [9] ALSHAMAILEH E, AL-RAWAJFEH A E, ALRBAIHAT M. Mechanochemical synthesis of slow-release fertilizers: A review [J]. *The Open Agriculture Journal*, 2018, 12: 11-19.