

中国主要退化土壤的改良剂研究
与应用进展赵鹏¹, 黄占斌^{1*}, 任忠秀², 于家伊²

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京嘉博文生物科技有限公司, 北京 100015)



赵鹏

摘要: 在中国主要退化土壤类型和分布的基础上, 对比分析了退化土壤的不同改良技术; 结合国内外土壤改良剂研究概况和土壤改良剂的原料来源及其分类, 总结强调了土壤改良剂对土壤和农作物的主要功能影响。阐述了酸化地、盐碱地和重金属污染地土壤的土壤改良剂研究效果, 提出不同类型退化土壤的土壤改良剂在应用过程中存在的问题。最后, 进一步探讨土壤改良剂研发与应用过程中面临的主要问题, 结合绿色和可持续发展导向, 指出加强土壤改良剂的应用基础研究、新型环保低成本研发、应用评价、应用规范建立和认证管理以及退化土壤的综合治理是土壤改良剂研究与应用的发展趋势。

关键词: 土壤改良剂; 土壤改良; 重金属污染地; 酸化地; 盐碱地

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)06-0618-08

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0166

赵鹏, 黄占斌, 任忠秀, 等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 618-625.

ZHAO Peng, HUANG Zhanbin, REN Zhongxiu, et al. Research and application on advance of soil conditioners of primary degraded soils in China[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2022, 40(6): 618-625. (in Chinese)

Research and application on advance of soil conditioners
of primary degraded soils in ChinaZHAO Peng¹, HUANG Zhanbin^{1*}, REN Zhongxiu², YU Jiayi²

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Beijing Goldenway Bio-tech Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: Based on the main types and distribution of degraded soil in China, different amelioration techniques of degraded soil were compared and analyzed. Combined with the research situation at home and abroad and the raw materials and classification of soil amendments, the main functional effects of soil amendments on soil and crops were summarized. The research results of soil amendments in acidified soil, saline-alkali soil and heavy metal contaminated soil were expounded, and the problems existed in the application of soil amendments in different types of degraded soil were put forward. Finally, the main problems in soil conditioner research and development and application process were further explored. Combined with the green and sustainable development orientation, it is pointed out that strengthening the application basic research, the research and development of new and environmental protection and low-cost, the application evaluation, the application standard establishment, the certifi-

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-09-05; 网络出版时间: 2022-06-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220606.1613.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41571303); 北京嘉博文生物科技有限公司科研项目

第一作者简介: 赵鹏(1990—), 女, 山东菏泽人, 博士研究生(2317939073@qq.com), 主要从事土壤改良与修复研究。

通信作者简介: 黄占斌(1961—), 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师(zbhuang2003@163.com), 主要从事植物生理生态、环境材料和化学节水技术等研究。

cation management of soil amendments and the comprehensive management of degraded soil are the development tendency of soil amendments research and application.

Key words: soil conditioner; soil improvement; heavy metal contaminated soil; acidified soil; saline-alkali soil

土壤是一个丰富的自然生态系统.造福人类福祉的土壤生态系统服务包括:生产生物物质(提供食物、饲料、纤维等,调节碳固存,粮食生产等),储存、过滤和转化水分和养分(调节水分和养分有效性以支持生态系统功能),维持生物多样性(提供药品和生化产品,调节虫害和病害控制等),提供人类活动的场所(提供人类栖息地),供应原材料(提供有机质和矿物质),作为碳库(调节大气 CO_2 和土壤系统),保存地质和考古遗产(提供文化遗产价值;保存地质遗产,维护生态系统动态平衡).因此土壤是人类生存的必要资源,但也是一种有限的和不可再生资源^[1].土壤不仅是一种资源,还是人类生存环境的重要组成部分.它依据其独特的物质组成、结构、空间位置,在提高肥力的同时,还通过自身的缓冲、同化和净化性能,在稳定和保护人类生存环境中发挥极为重要的作用.

随着经济和社会的不断发展,日益增加的不合理人为活动不仅会改变和恶化土壤性质,而且还将一些合成有机化合物和重金属等污染物引入土壤^[2],以致土壤受到严重破坏,土壤退化日益加剧.近几十年来,土壤酸化、盐渍化、重金属污染以及肥力下降等全球性的危机日益增多,可能会引发一些次生环境和生态问题,例如:水资源短缺、土地生产力下降、粮食安全、甚至气候变化等.有机和无机污染物对土壤的污染是一个全球公认的问题,因此迫切需要研发一些环保和经济型修复技术.

解决土壤退化的方法有物理法、化学法、生物法和农业工程等修复措施.在各种方法措施中,土壤改良剂的应用是修复退化土壤、快速改善土壤环境的有效举措之一.研发和应用土壤改良剂对防治土壤退化、保障作物安全生产具有重要的理论和现实意义.土壤改良剂可以高效改善土壤理化性质,维持土壤养分,提高土壤微生物群落多样性,从而提高退化土壤的生产力.土壤改良剂种类繁多,不同改良剂其成分、性质不同,且施用于不同退化土壤类型上效果不同.因此,针对不同类型的退化土壤要选用合适的土壤改良剂,以期获得理想的改良效果.

目前对土壤改良剂的机理研究较少,且应用研究不系统,缺乏实际产品和标准.为进一步剖析土壤

改良剂的改良机理和应用概况,文中根据国内外研究进展,结合土壤改良剂的原料来源和分类应用现状,分别对酸化地、盐碱地和重金属污染地退化土壤的改良原理、土壤改良剂的研发与应用进展进行分析,并根据目前土壤改良剂应用中存在的问题,结合绿色和可持续发展导向,提出土壤改良剂研发与应用发展的对策建议.

1 中国主要退化土壤的类型和分布

农业生产是集土壤、植物、气候和生产管理为一体的综合过程,地形地貌和环境的差异使得土壤生产力具有多样性和长期性,且因化肥农药等农资施用差异,造成污染源种类繁多,包括杀虫剂污染、重金属污染和有机污染,相当多的农业用地已经退化.按照退化土壤的成因,退化土壤类型可分为水土流失、土地沙化、土壤盐碱化、土地贫瘠化、土地污染和土地损毁等.目前,土壤退化已成为中国面临的突出问题.其中,严重影响生态环境和农业生产活动的酸化地、盐碱地和重金属污染地这3类主要退化土壤极受关注.

土壤酸化主要是由于土壤中的中性和碱性盐类离子不断损失而使土壤酸性增加,变为强酸性或极强酸性的一种现象.氮肥的过量施用,农田的不合理种植以及未腐熟有机肥的施入等都会造成土壤酸化.据统计,中国有近 $2.04 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的耕地面积受土壤酸化影响,约为中国土壤面积的 22.7%;主要分布于长江以南的热带、亚热带地区和云贵川等地,其中湖南、江西、福建和广西等地土壤酸化问题尤为突出;大部分土壤 pH 值在 4.5~5.5,并且酸化程度仍在不断加剧.根据 20 世纪 80 年代初中国土壤调查结果,从 1980—2000 年,位于中国南部红、黄壤的粮食作物种植土壤和经济作物种植土壤平均 pH 值(5.37)分别下降了 0.23 和 0.30^[3].酸化土壤在全国范围内都有分布,并且酸化面积也仍在增加.

盐碱地土壤中阴阳离子大量累积,其指标存在问题:其含盐量达 0.3% 以上,或其碱化度达 15% 以上,抑制了植物生长.不恰当的灌溉方式和灌溉水质、不合理的施肥和肥料品种等都会造成土壤盐渍

化.中国第2次土壤普查表明,盐碱地面积近0.36亿 hm^2 ,约占可利用土地面积的4.88%.耕地土壤中盐碱化土壤面积占6.62%,达920.9万 hm^2 ,主要分布于东北、西北、华北地区及长江以北沿海地区.据2010年中国盐碱土资源利用学术研讨会数据,分布于西北、东北以及滨海地区的盐碱荒地和盐碱障碍耕地总面积多于3333万 hm^2 ,可发展为农业用地的盐碱地面积约1333万 hm^2 ,占中国耕地面积近10%.中国盐碱地土壤面积大、分布广,其资源的可持续利用问题已越来越受到研究者的高度关注.

重金属污染是土壤中某种金属元素含量超出中国土壤质量的限量值或高于其自然背景值.生物毒性突出的重金属有镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)、汞(Hg)和砷(As)等,具有一定毒性的重金属有锌(Zn)、铜(Cu)、镍(Ni)等.采矿、冶炼、燃煤等产生的大量废弃物不合理排放,化肥和农药过度使用,汽车尾气排放等都会造成重金属污染现象.重金属污染已成为中国土壤环境污染的主要问题之一.2014年中国发布的《全国土壤污染状况调查公报》数据,全国农用耕地土壤重金属污染点位超标率达19.4%,以Cd、Pb、Ni、Cu、As、Hg为主.2013年中国科学院学部召开的“中国土壤重金属污染问题与治理对策”总结报告显示,中国有近10万 km^2 (1.5亿亩)耕地面积受Cd、Hg、Cu、Zn等重金属的污染,每年因重金属污染的粮食达1200万t,其损失超过200亿元.近年来,随着中国经济持续高速发展,土壤重金属的污染类型不断增加,面积不断扩大,危害程度也在不断加剧.

2 主要退化土壤的改良技术

2.1 酸化地土壤的改良技术

当前针对酸化地土壤改良技术主要有控制酸雨、农艺措施、生物改良和施加土壤改良剂等.最初的酸雨控制主要是通过控制 SO_2 的排放和改进脱硫技术,美国、日本等发达国家利用具有吸硫功效的微生物菌株控制酸雨.农艺措施主要是通过减少酸性肥料的使用,改施碱性肥料;优化耕作模式,如间作套种和水旱轮作等方式减缓土壤酸化;合理的灌溉方式,如相对于畦灌和沟灌,滴灌和喷灌能减少灌溉量、提高用水效率和防治土壤酸化;选种耐酸作物,如甘蓝、土豆等.可发展的生物改良技术主要是利用土壤动物、微生物和植物修复酸化地,植物根系分泌物还可以消减酸性土壤中的铝毒.但由于

生物改良周期长、见效慢,人们逐渐采用石灰、钙镁磷肥和钾硅肥等碱性土壤改良剂以调节酸化地土壤pH,改善土壤的团粒结构以及物理、化学和生物特性,减少土壤盐基离子淋失和活性铝溶出,降低土壤重金属活性,从而提高农作物产量和品质.其中石灰是最传统的改良材料,可以中和酸化地中的活性酸和潜在酸,还可以缓解铝毒.

2.2 盐碱地土壤的改良技术

改良土壤盐碱化的技术主要有水利改良、物理改良、化学改良和生物改良等.水利改良的主要原理是在良好的排水状态下,通过水洗淋溶将土壤中的盐分直接冲走,以降低土壤含盐量,如明沟排水、暗管排水、生物排水和膜下滴灌等,其中暗管排盐是目前发展迅速和应用较多的一种灌溉方法,膜下滴灌较适用于旱作物的灌溉.物理改良技术主要是采用铺沙和覆盖等方法,调控土壤物理结构和水盐运动,以抑制地表水蒸发,促进淋水洗盐.化学改良技术主要是向土壤中添加化学改良剂,以酸碱中和原理降低土壤中有害盐离子的有效性和碱度.应用较多的含钙材料如脱硫石膏、磷石膏等改良剂,其主要原理是钙离子可置换土壤颗粒表面的交换性钠离子,钙离子结合腐殖质可增加土壤团粒结构,降低土壤钠离子含量和pH.生物改良技术主要是种植和翻压绿肥牧草、秸秆还田、施用菌肥、种植耐盐植物和施用有益微生物等,其核心是提高土壤肥力、改良土壤结构、减少地表水分蒸发和抑制返盐,以致提高盐碱土壤的利用率.例如:耐盐碱植物会吸收土壤中的可溶性盐,以降低土壤盐度;有益微生物产生的有机酸可增加土壤养分含量,改善盐碱地土壤理化性质.

2.3 重金属污染地土壤的修复技术

重金属污染土壤的修复技术途径:一是控制污染源,二是对已污染土壤进行修复.修复技术有物理、化学和生物及工程技术等.物理技术主要是通过“客土”和上下翻耕稀释土壤重金属含量,这在日本等地应用较多.生物修复主要是利用动植物和微生物分解、固定或转化土壤中的有毒有害重金属,以降低重金属的植物累积和保障食品安全.其中植物富集修复技术应用较多,中国筛选出蜈蚣草富集砷、伴矿景天和东南景天富集镉等,在湖南和云南等地有一定示范应用.化学技术有化学淋洗法和钝化稳定化法,淋洗采用重金属活化剂,通过淋洗设备将土壤中重金属淋洗出来,但由于具有淋洗液二次污染和费用较高特点,主要应用于场地土壤修复

项目.农田重金属污染的化学钝化稳定化修复,是目前国内外主要应用的重金属修复技术,其技术核心是应用重金属钝化剂,通过氧化还原、沉淀、吸附、络合等化学反应,改变重金属在土壤中的赋存形态,降低重金属在土壤中的可迁移态和生物有效态含量,达到降低重金属生物有效性的目的.采用合适的灌溉方式,也能促进植物对重金属吸收,减弱土壤重金属污染.例如:相比常规灌溉,滴灌条件下腐植酸修复重金属 Cd 污染土壤更能减少重金属对地下水的危害.

3 土壤改良剂的研究与应用

3.1 国内外土壤改良剂研究概况

19 世纪末,国外最早开始对土壤改良剂的研究,至今有 100 多年历史,主要是从天然有机物中提取天然聚合物或微生物.20 世纪初,西方国家开始将纤维素、腐植酸、蛋白质、油脂和糖类天然有机物直接进行土壤的结构改良研究,但由于其分子量较小且有较高的活化单体比例,在土壤中容易被土壤微生物分解且施用量较大,因此在农业生产上并未得到广泛应用.于是,人工合成高分子土壤改良材料的研究便逐渐发展起来.1937 年德国 BAYER 教授研制出了聚氨酯人工合成改良材料,由二异氰酸酯和聚酯二醇制成^[4].美国孟山都公司 1951 年生产出第一种合成类高分子土壤改良剂,命名为 Kri-lum,但因其价格昂贵,且人们并不清楚它与土壤间的相互作用机制而未能推广^[5].20 世纪后期,美国、英国、比利时等欧美国家开始研制各种以大分子聚合物为主体的土壤改良剂,其中比较重要的亲水性土壤改良剂有聚乙烯醇(PVA)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙二醇(PEG)、聚丙烯酸钠(SPA)等,疏水性土壤改良剂有聚醋酸乙烯(PVAc)、聚丁二烯(BUT)、聚硅氧烷等.聚丙烯酰胺(PAM)可能是现代土壤改良剂中研究最多的聚合物.1980 年 AZZAM^[6]研究证明,膨胀性 PAM 能有效改善土壤理化性质,降低灌溉需水量.1989 年 OUCHI 等^[7]制备了一种乙烯醇-丙烯酸钠共聚物(命名为 Igetabel),用作保水性土壤调节剂,并在向日葵栽培试验中证实该聚合物的有效保水性.1992 年 LEVY 等^[8]研究了低浓度的阴离子 PAM 和阳离子多糖对土壤渗透性和侵蚀的影响,发现这 2 种聚合物都能稳定土壤团聚体,但 PAM 也能将团聚体粘合在一起,增强其抗侵蚀能力.因此,目前在美国和欧洲国

家 PAM 被广泛应用于旱地农田生产和水土保持项目.

中国对土壤改良剂的研究较晚,始于 20 世纪 80 年代初,但因土壤改良剂的高成本应用等原因并未广泛推行.90 年代时,中国逐渐开始引进国外新型土壤改良剂,中国农科院土壤肥料研究所通过大量试验研发出了土面液膜等土壤改良剂.21 世纪以来,中国高效经济绿色环保型土壤改良剂的研发成为研究热点.研发原料主要从天然有机物/无机物中进一步提取,并根据土壤性质研发出复合型土壤改良材料,采用石灰、粉煤灰、白云石和废菌棒为土壤改良剂或再加入作物生长所需的营养元素,形成营养型土壤改良剂和酸/碱性土壤改良剂,以维持土壤健康和促进植物生长.在各种土壤改良剂中,矿物质改良剂因具有来源广泛、成本低、对土壤理化性质和结构影响小且二次污染小等优点,被认为是“绿化 21 世纪物质世界”的重要材料.人工合成土壤改良剂的研发与应用,对治理退化土壤,指导农业生产,改善干旱半干旱地区土壤肥力,增加作物产量和质量以及维持农业可持续和环保性发展具有重要意义.

3.2 土壤改良剂的分类及功能

土壤改良剂又名土壤调理剂(soil conditioner).广义上,可改良和调节土壤性状的材料都称为土壤调理剂;狭义上,是主要用于土壤性质改良以便促进植物生长,并不主要供给植物养分的材料.土壤改良剂可根据其来源、性质和用途进行分类.根据原料来源,土壤改良剂可分为天然改良剂、人工合成改良剂、天然-合成共聚物改良剂以及生物改良剂;根据性质,土壤改良剂可分为酸性土壤改良剂、碱性土壤改良剂、无机土壤改良剂、有机土壤改良剂、营养型土壤改良剂、防治土传病害土壤改良剂、微生物土壤改良剂等;根据用途,土壤改良剂可分为土壤退化防治土壤改良剂、土壤侵蚀防治土壤改良剂、土壤重金属污染防治土壤改良剂、贫瘠地开发土壤改良剂等.

中国当前引进和推广的土壤改良剂主要有 3 类:无机土壤改良剂(inorganic soil conditioner)、有机土壤改良剂(organic soil conditioner)和无机-有机土壤改良剂(semi-organic soil conditioner).无机土壤改良剂主要有石灰、珍珠岩、粉煤灰和石膏等;有机土壤改良剂主要有生物炭、腐植酸、城市污水污泥及生活垃圾、畜禽粪便等;无机-有机土壤改良剂包括粉煤灰与生物炭的混合配施,石灰、海泡石、沸石

与生物炭的联合应用等.虽然不同的土壤改良剂会表现出功能差异性,但其主要功能有改善土壤理化和生物特性,恢复和供给土壤养分,提高植物产量和质量,提高土壤酶活性以及修复退化土壤和重金属污染土壤等.因此,基于土壤改良剂特性,土壤改良剂对土壤性质和农作物生产的重要影响如图 1 所示.

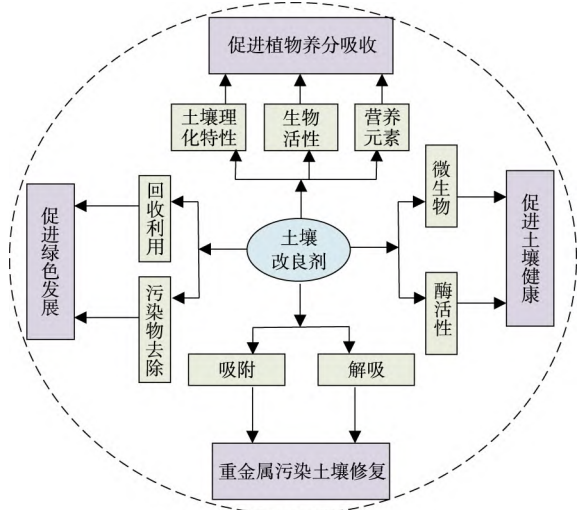


图 1 土壤改良剂施用后对土壤性质和农业植物的主要影响

Fig.1 Main effects of soil conditioners on soil properties and agricultural plants

4 主要退化土壤的改良剂研究与应用

4.1 酸化地土壤的改良剂研究与应用

目前,降低土壤酸化应用较多的土壤改良剂有石灰等碱性无机材料,生物炭、腐植酸等有机改良材料,以及微生物菌剂类、微生物菌肥类生物改良剂.

STEINER 等^[9]研究发现,生物炭可使土壤 pH 值提高 30%左右,其变化程度受生物炭施用量影响. SIKI 等^[10]研究指出,在 pH 5.14 的酸性土壤中,随着 0.5%,2.5%和 10.0%生物炭的应用,其 pH 值可分别增加到 6.80,7.34 和 8.42. JUAREZ 等^[11]研究表明,生物炭灰可以作为石灰的替代品,增加酸性土壤 pH 值,为作物生长提供养分,并刺激微生物活性. 李秋霞等^[12]得出,生物炭施用量为 40 t/hm²对旱地红壤的改良和增产效果最好,可使土壤 pH、有机碳和阳离子交换量分别提高 7.25%,47.88%和 44.61%,油菜和红薯分别增产 1.23 t/hm²和 14.83 t/hm². RENDANA 等^[13]研究表明,由木材残渣、腐植

酸和沸石矿物按一定比例组成的有机土壤改良剂 (HTOC),可以增加土壤强度、有机质含量、pH、电导率、交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 和阳离子交换能力 (CEC),改善水田软土地基. 陈士更等^[14]研究得出:施用腐植酸土壤调理剂与普通土壤调理剂相比,其土壤容重减少 2.72%~4.76%,土壤交换性钙质量比增加 0.14~2.23 g/kg,交换性酸降低 11.47%~28.46%,pH 提高 0.07~0.45,且腐植酸土壤调理剂施用量为 1 275 kg/hm²时对土壤改良、提质增产效果最佳.用于酸性土壤改良的生物改良剂主要为微生物材料,刘芳等^[15]探索复合微生物菌剂 (EM 菌剂) 配施腐植酸钾对植烟土壤改良及烤烟经济效益的影响,结果表明,EM 菌剂配施腐植酸钾可显著增加土壤中微生物数量,增强土壤酶活性,提高土壤养分含量,增加土壤 pH 值,其效果优于两者单施.

酸性土壤改良研究和应用中还存在许多问题,例如,石灰虽在短期内可快速提高土壤 pH,但长期使用将会导致土壤“复酸化”;有些有机材料遇水易发酵而产生高温,危害植物生长;大多数未经腐熟的动物粪便直接用于土壤,会带入大量致病微生物间接危害人类健康.所以,研发低成本、高效的环境友好型酸化土壤改良材料是发展的方向.

4.2 盐碱地土壤的改良剂研究与应用

目前盐碱地土壤改良剂主要有脱硫石膏 (燃煤电厂脱硫副产品,主要成分 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、磷石膏 (磷酸生产副产物,主要成分 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、红石膏 (钛白粉生产过程中产生的硫酸钙、氧化钙和铁离子)、生物炭、木醋液 (制备生物炭副产物)、腐植酸、有机肥和微生物接种菌剂等.

LIU 等^[16]研究表明,有机肥和微生物接种剂都可提高盐碱地土壤脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性,增加土壤营养物质,提高微生物多样性和活性,且在有机肥施用量为 112.5 kg/hm²下,碱性磷酸酶活性最强.施用腐植酸肥料可以改善土壤结构和养分有效性,提高光合效率;还可以调节盐碱地根际微生物群落多样性和提高作物产量. LIU 等^[17]施用腐植酸肥料 (3.75 t/hm²) 和蚯蚓粪 (3.75 t/hm²) 获得结果:土壤大团聚体分别增加 77.59%~125.58%和 35.02%~91.02%,土壤盐分明显降低;还可通过改变盐碱土中优势菌种 *Acidobacteria*, *Basidiomycota* 和 *Glomeromycota* 的丰度,增加玉米根的耐盐性和土壤养分有效性,从而提高沿海盐碱地玉米茎和根的 N、P、K 含量、生物量和产量. AKHTAR 等^[18]研究表明,生物炭具有较高的盐吸附能力,添

加5%生物炭可以显著缓解盐胁迫,提高 K^+ 有效性,改善马铃薯的生长、生理机能和提高产量.LASHARI等^[19]在利用生物炭堆肥(12 t/hm^2)和木醋液(0.15 t/hm^2)对盐碱地的修复研究中,处理组与对照组相比,其土壤pH值、土壤盐度和土壤容重分别降低0.3,3.6 g/kg和 0.1 g/cm^3 ,而土壤有机碳和有效磷质量比分别增大2.6 g/kg和27 mg/kg,春小麦和冬小麦产量比对照分别增加多倍和38%.陈建等^[20]的研究表明,脱硫石膏配合滴灌能改善甘肃盐碱地理化性质,促进枸杞生长,随脱硫石膏施用量的增加,土壤pH、碱化度呈递减趋势,最佳脱硫石膏施用量为 26 t/hm^2 .

盐碱地不同的改良措施存在效果差异,应用中存在主要问题是化学改良剂用量大、成本高、改良效果短且具有副作用,部分改良剂还携带有毒有害元素,对土壤和植物产生二次污染.因此,今后盐碱地改良剂研发和应用中,要因地因应用目标,选用和研发适宜的盐碱地改良剂,特别是与肥料结合,与排盐工程技术结合的环保型多功能盐碱地改良剂,是未来盐碱地土壤改良剂研发的方向.

4.3 重金属污染地土壤的改良剂研究与应用

重金属钝化材料按照其性质可分为无机类材料、有机类材料和氧化还原类材料等.无机类材料主要包括磷酸盐类(磷酸盐、过磷酸钙、磷矿粉等)、黏土矿物类钝化剂(海泡石、沸石、高岭土等)、硅钙类(石灰、粉煤灰、赤泥等)和金属氧化物等,有机类材料主要包括有机肥、生物炭和腐植酸等,氧化还原类材料主要是金属及金属氧化物.

SHAHEEN等^[21]研究发现,土壤中添加沸石、膨润土、活性炭、生物炭和壳聚糖(添加比例各为1%)可降低植物中可溶性交换态Cd 22%~36%;土壤中添加生物炭、壳聚糖、活性炭、膨润土、水泥窑灰、粉煤灰、石灰石、甜菜厂石灰(添加比例各为1%)和纳米羟基磷灰石(添加比例为0.2%)可降低可溶性交换态Pb 6%~87%,降低植株中Pb 35%~99%.OUSTRIERE等^[22]研究报道,将松皮屑与粗铁砂复合施用,可通过增加pH值、沉淀-共沉淀以及各种吸附机制,有效固定土壤中不稳定的Cd、Zn、Pb.在重金属污染土壤中施用牛粪和骨粉可以显著降低土壤中镉和锌的浸出率和植物利用度,其可能机制:高碱度和高碳酸盐含量的土壤改良剂以不可交换的形式吸附和固定重金属;或是牛粪等高含量有机质,通过化学吸附等方式与重金属结合,降低其迁移率.AHMAD等^[23]在研究不同种类生物炭和

土壤类型对土壤重金属迁移率的影响得出:碱性土壤(>93%)中使用 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 烧制的生物炭,可以通过金属磷酸盐沉淀和表面协同机制,显著降低铅和铜的浸出率.王红等^[24]研究表明,相对杨树枝炭和玉米秸秆炭,水葫芦炭对土壤中Zn和Pb的吸附效果最佳.水葫芦炭添加量为5%时,对Zn和Pb的吸附率分别为21.83%和44.57%;当添加量为10%时,对Pb吸附率高达93.93%.

重金属污染钝化剂的吸附效率与其性能(比表面积、吸附位点、离子交换性和动力学)密切相关,只有选择合适的钝化剂,才能达到降低重金属污染的效果.重金属污染钝化剂主要是改变土壤中重金属的赋存形态,并不能将其完全去除,从而易再次活化造成二次污染.当前对各种土壤改良剂修复重金属污染土壤的机理尚不完全清晰,且钝化剂价格偏高.因此,在今后研发与应用中,应充分考虑各种改良剂的优缺点,选用低成本、多功能和针对性强的复合土壤重金属钝化剂,使用技术规程也是需要加强的重要方面.

5 问题与对策建议

5.1 主要问题

土壤改良剂对酸化地、盐碱地、重金属污染地等退化土壤改良和作物生长促进具有显著作用,且被广泛应用于农业生产和生态环境治理中.但在实际推广应用过程中仍存在一些不可忽视的问题.

5.1.1 高效环保低成本的土壤改良剂研发不足

土壤改良剂的研究更多的是注重其功能性,而对材料本身是否环保,价格是否适合,当地使用者关注不够.例如,一些改良效果较好的合成高分子化合物,合成过程复杂,成本较高,难以在农业生产中大规模推广应用;以粉煤灰类废弃物为原料研发的各种新型多功能土壤改良剂,其自身携带一些重金属离子和盐分离离子,会累积影响土壤、抑制植物生长和污染环境.因此,高效、环保、低成本的土壤改良剂仍是今后研发的重点.

5.1.2 改良机制效应机理等基础研究不足

目前土壤改良剂的大部分研究,主要是针对土壤改良剂对土壤理化性质、作物增产、环境治理等的改良结果,而对土壤改良剂与土壤和植物间的相互作用机制研究很少.因此,可根据土壤改良剂的组分和结构特性,分析改良前后土壤和植物的理化特

性和生物学特性变化,加强改良剂修复退化土壤的改良机理研究。

5.1.3 多种改良剂混施的组成配比研究不足

已有很多研究表明,多种改良剂混施会达到比单施一种改良剂更好的改良效果,特别是有机-无机固体废弃物混施,生物改良剂与工农业废弃物混施等。但目前的研究多是证明混施优于单施的改良效果,而缺乏科学统一的改良剂原料组成和最佳配比。因此,针对不同待修复的退化土壤,需要对不同改良剂进行多因素多水平的正交试验设计,筛选出合适的改良剂组合和最佳配比。

5.1.4 土壤改良剂大田应用研究不足

目前,土壤改良剂在各种退化土壤的改良实践中都有不同程度的应用,取得一定的应用效果。但大部分应用是在实验室、温室或试验小区和局部小范围示范,缺乏实际大田试验的应用效果。大田试验中,由于受到自然环境和施肥灌溉等管理因素的影响,使土壤改良剂的改良作用异于室内的模拟效果。因此,需要加强实际大田试验中土壤改良剂的应用研究。

5.2 对策建议

5.2.1 加强土壤改良剂应用基础研究

针对不同类型退化土壤,结合土壤污染治理、国土空间管理和生态环境建设等需求,设立相应的国家和省部级科研课题。开展土壤改良剂对不同类型退化土壤改良的机理研究,在此基础上研发相应的新型环保低价土壤改良剂。

5.2.2 加强新型环保低成本的土壤改良剂研发

基于土壤母质和物质组分,结合土壤利用及其存在问题,可综合利用地区农林废弃物资源和工业废弃物资源等,研发功能性明确的有机无机复合土壤改良剂,其中煤基腐植酸和餐厨垃圾等生化腐植酸及其与黏土矿物等复合是重要的发展方向。土壤改良剂应加强环境材料理念,即强调材料功能性的同时,也要提高改良剂的环保性和经济性。

5.2.3 加强应用评价和应用规范建立

土壤改良剂对土壤和作物的影响是多方面的,主要包括土壤的理化性能和生物性能,以及作物生长和质量等方面,特别是不同气候和地形地貌环境下的作用效果差异。因此,需要布置野外大田试验评价实际改良效果,并根据不同地区差异,建立土壤改良剂的应用技术规范和规程,这是推广和应用土壤改良剂的重要基础。

5.2.4 加强土壤改良剂的认证管理

土壤改良剂的认证,主要是在农业农村部以土壤调理剂项目审批,一般需要3 a时间审查。而液态肥等只需要1 a审查,再加上土壤改良剂的利润空间有限,这在一定程度上会影响土壤改良剂的研发。所以,加快土壤改良剂的认证是其需要加强的管理环节。

5.2.5 加强退化土壤的综合治理

退化土壤的改良是一项较为复杂的综合治理体系,实际改良需要针对退化土壤性质和指示性指标,综合考虑致使土壤退化的原因,利用多种改良技术精准施策。合理增施水肥,施加最佳配比改良剂,正确轮作换茬和选种功能性植物等改良措施,因地制宜建立系统改良体系。最大程度地减少水土资源浪费,提高土壤利用率,发挥其经济效益、生态效益和社会效益。

参考文献 (References)

- [1] SIERRA A M, NAKAMARU Y M, GARCIA C M, et al. The role of organic amendment in soils affected by residual pollution of potentially harmful elements [J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124549.
- [2] YU Haowei, ZOU Weixin, CHEN Jianjun, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: a review [J]. *Journal of environmental management*, 2019, 232: 8-21.
- [3] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [4] AKINDOYO J O, BEG M D H, GHAZALI S, et al. Polyurethane types, synthesis and applications: a review [J]. *RSC advances*, 2016, 6(115): 114453-114482.
- [5] BOODT M D. Soil conditioning for better soil management [J]. *Outlook on agriculture*, 1979, 10(2): 63-70.
- [6] AZZAM R A. Agricultural polymers polyacrylamide preparation, application and prospects in soil conditioning [J]. *Communications in soil science and plant analysis*, 1980, 11(8): 767-834.
- [7] OUCHI S, NISHIKAWA A, FUJITA F. Soil-improving effect of a super-water-absorbent polymer (Part 1): total volume, three-phase distribution, and available water of super-water-absorbent polymer mixed soils [J]. *Nippon dojo hiryogaku aasshi*, 1989, 60(1): 15-21.
- [8] LEVY G J, LEVIN J, GAL M, et al. Polymers' effects on infiltration and soil erosion during consecutive simula-

- ted sprinkler irrigations [J]. Soil Science Society of America journal, 1992, 56(3): 902–907.
- [9] STEINER C, TEIXEIRA W G, LEHMANN J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and soil, 2007, 291(1/2): 275–290.
- [10] SIKA M P, HARDIE A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. European journal of soil science, 2014, 65(1): 113–119.
- [11] JUAREZ M F D, FABIANI G, MAZZIER T, et al. Reclamation of acid soils with biomass ashes from pyrolytic wood liquefaction[J]. Waste and biomass valorization, 2020(11): 5067–5078.
- [12] 李秋霞, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 208–213, 261.
LI Qiuxia, CHEN Xiaomin, JIN Zewen, et al. Persistent effects of biochar on soil physicochemical properties and crop yields in upland red soil[J]. Journal of soil and water conservation, 2015, 29(3): 208–213, 261. (in Chinese)
- [13] RENDANA M, IDRIS W M R, RAHIM S A, et al. Reclamation of acid sulphate soils in paddy cultivation area with organic amendments[J]. AIMS agriculture and food, 2018, 3(3): 358–371.
- [14] 陈士更, 张民, 丁方军, 等. 腐植酸土壤调理剂对酸化果园土壤理化性状及苹果产量和品质的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1): 83–89.
CHEN Shigeng, ZHANG Min, DING Fangjun, et al. Humic acid soil conditioner improved soil physicochemical properties, apple yield and quality in acidified orchard soil[J]. Soils, 2019, 51(1): 83–89. (in Chinese)
- [15] 刘芳, 韩丹, 赵铭钦, 等. 微生物菌剂配施腐殖酸钾对植烟土壤改良及烤烟经济效益的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(7): 1064–1069.
LIU Fang, HAN Dan, ZHAO Mingqin, et al. Effects of application of microbial agents along with humic acid potassium on tobacco-planted soil and economic benefit of fluecured tobacco[J]. Acta agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(7): 1064–1069. (in Chinese)
- [16] LIU Guangming, ZHANG Xuechen, WANG Xiuping, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2017, 237: 274–279.
- [17] LIU Mengli, WANG Chong, WANG Fuyou, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. Applied soil ecology, 2019, 142: 147–154.
- [18] AKHTAR S S, ANDERSEN M N, LIU F. Biochar mitigates salinity stress in potato[J]. Journal of agronomy and crop science, 2015, 201(5): 368–378.
- [19] LASHARI M S, LIU Y, LI L, et al. Effects of amendment of biochar–manure compost in conjunction with pyrolytic solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain [J]. Field crops research, 2013, 144: 113–118.
- [20] 陈建, 王文芬. 滴灌条件下脱硫石膏对甘肃盐碱地的改良效果研究[J]. 节水灌溉, 2018(5): 35–38.
CHEN Jian, WANG Wenfen. Improvement effect of desulfurization gypsum on saline–alkali land under drip irrigation condition in Gansu province[J]. Water saving irrigation, 2018(5): 35–38. (in Chinese)
- [21] SHAHEEN S M, RINKLEBE J. Impact of emerging and low cost alternative amendments on the (im) mobilization and phytoavailability of Cd and Pb in a contaminated floodplain soil[J]. Ecological engineering, 2015, 74: 319–326.
- [22] OUSTRIERE N, MARCHAND L, ROSETTE G, et al. Wood-derived-biochar combined with compost or iron grit for in situ stabilization of Cd, Pb, and Zn in a contaminated soil[J]. Environmental science and pollution research, 2017, 24(8): 7468–7481.
- [23] AHMAD M, LEE S S, LEE S E, et al. Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/mobilization of metals/metalloids in contaminated soils[J]. Journal of soils and sediments, 2017, 17(3): 717–730.
- [24] 王红, 夏雯, 卢平, 等. 生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3944–3952.
WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, et al. Adsorption characteristics of biochar on heavy metals (Pb and Zn) in soil[J]. Environmental science, 2017, 38(9): 3944–3952. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)