

土壤调理剂应用现状及施用风险研究

索琳娜, 马杰, 刘宝存, 孙向阳, 陈广锋

引用本文:

索琳娜, 马杰, 刘宝存, 等. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141–1149.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0364>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土壤调理剂对镉污染水稻田控镉效应研究

李心, 林大松, 刘岩, 焦位雄, 张丽

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1511–1520 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0802>

矿物-有机质复合调理剂对Pb污染土壤的改良效果

蔡如梦, 石林

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2438–2444 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0887>

基于专利文献分析的土壤污染修复技术发展现状与展望

串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 赵静娟, 颜志辉, 张晓静

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2041–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0219>

联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 李懋松, 熊润忠, 秦太峰

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2217–2226 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0573>

南荻炭与镉钝化剂互作对水稻镉含量和产量的影响

廖雄辉, 龙琴, 王惠群, 易自力, 薛帅

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1818–1826 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0477>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

索琳娜, 马杰, 刘宝存, 等. 土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141–1149.

SUO Lin-na, MA Jie, LIU Bao-cun, et al. Soil conditioner application status and application of risk research[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(6): 1141–1149.



开放科学 OSID

专家介绍



刘宝存, 二级研究员, 享受国务院政府特殊津贴。现任中国植物营养与肥料学会监事长、北京土壤学会秘书长, 国家“十三五”重点研发计划“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”重点专项专家组组长和管理专家委员会委员。曾任北京市农林科学院植物营养与资源研究所所长, 兼任中国土壤学会理事, 北京农学会理事, 中国环境科学学会理事, 中国植物营养学会常务理事、副理事长, 北京土壤学会常务副理事长, 北京市农资协会副会长, 中国北方农科院土肥所所长工作会会长, 中国农资传媒全国专家顾问委员会委员, 中国绿色食品专家咨询委员会委员, 农业部无公害农产品认证评审委员会委员, 农业部肥料登记评审委员会委员, 《中国土壤与肥料》《农业资源与环境学报》杂志编辑委员会委员, 农业部黄淮海平原农业环境重点实验室委员会委员, 北京市农业技术系列高级专业技术职务任职资格评审委员会委员。

主要从事植物营养与肥料、土壤资源与环境方面的研发工作。曾主持北京市科委“京郊粮田提高化肥利用率研究与示范”“新型肥料研制与产业化”“缓控释肥料工程技术研发中心”等重大项目; 主持国家生态环境部“北方有效控制农村面源污染示范工程”项目; 主持国家科技部“十一五”沿湖地区、“十二五”粮食主产区“农业面源污染综合防控与治理技术研究”等国家重点研发计划项目; 组织设计国家“十三五”农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发重点专项。

土壤调理剂应用现状及施用风险研究

索琳娜¹, 马杰², 刘宝存^{1*}, 孙向阳², 陈广锋³

(1. 北京市农林科学院, 北京 100097; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要: 伴随着土壤的不断开发和利用, 土壤污染、退化问题愈发严重, 严重限制了土地的生产力, 由此土壤调理剂应运而生。合理使用土壤调理剂产品能有效改善土壤物理性状、化学性状, 补充土壤中的营养元素, 同时对土壤微生物群落的结构和数量进行调整, 从而改善土壤的障碍因子, 使之可再次进行投入高质高效的农作物生产活动。但土壤调理剂的不合理施用会直接引起土壤退化加剧甚至产生二次污染, 同时长期施用土壤调理剂也可能对土壤生态系统的结构和功能造成一定影响, 导致土壤的产能与品质下降, 引发农产品安全等相关问题。本文根据现阶段我国土壤调理剂研究及应用状况, 分析不同类型的土壤调理剂在施用过程中可能产生的环境风险, 并对土壤调理剂的施用提出了展望及管理建议。

关键词: 障碍性土壤; 土壤调理剂; 环境风险

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)06-1141-09 doi:10.11654/jaes.2021-0364

收稿日期: 2021-03-25 录用日期: 2021-05-17

作者简介: 索琳娜(1984—), 女, 河北石家庄人, 博士, 从事土壤污染治理与质量提升研究。E-mail: suolinna@163.com

马杰与索琳娜同等贡献。

*通信作者: 刘宝存 E-mail: 13801016030@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801104); 北京市农林科学院青年科研基金课题(QNJJ201810); 北京市农林科学院植物营养与资源研究所自主立项课题(YZS201910); 农业农村部种植业管理司项目(2019, 2020)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0801104); Youth Research Fund of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences(QNJJ201810); Independent Project of the Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences(YZS201910); Project of Planting Management Department of Ministry of Agriculture and Rural Affairs(2019, 2020)

Soil conditioner application status and application of risk research

SUO Lin-na¹, MA Jie², LIU Bao-cun^{1*}, SUN Xiang-yang², CHEN Guang-feng³

(1. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: With the continuous development and utilization of soil, the problem of soil pollution and degradation is becoming more and more serious, which greatly limits the productivity of land. Consequently, soil conditioners emerge as the times require. The rational use of soil conditioner products can effectively improve the physical and chemical properties of soil, supplement nutrient elements in soil, and adjust the structure and quantity of the soil microbial community, thus improving soil obstacle factors. This allows soil to be put back into high quality and efficient agricultural production activities again. However, the unreasonable application of soil conditioners directly leads to soil degradation and even secondary pollution. At the same time, long-term application of soil conditioners may also have an impact on the structure and function of the soil ecosystem, resulting in the decline of soil productivity and quality, leading to related problems such as the safety of agricultural products. According to the current situation of research and application of soil conditioners in China, this paper analyzes the possible environmental risks of different types of soil conditioners in the process of application. It puts forward prospects and management suggestions for the application of soil conditioners.

Keywords: barrier soil; soil conditioner; environmental risk

农业生产活动为我国经济社会的稳定发展提供了有力支持。农业生产中最基本的生产资料即土壤,虽然我国疆域辽阔,但巨大的人口数量使得我国人均土地资源非常有限。并且在人为因素及成土母质的影响下还产生了许多障碍因子,包括土壤结构耕性较差、土壤盐碱化、土壤重金属污染、土壤养分匮乏等,通常障碍性土壤生产力低下,难以进行农作活动。在不断的生产实践以及研究中发现,向障碍性土壤中投入特定的物料可以改良土壤性状,从而能够进行正常的农业生产活动^[1]。鉴于此,土壤调理剂广受关注,与之相关的行业也得到了快速发展,截至目前农业农村部种植业管理司登记备案的土壤调理剂产品信息高达197条。

1 土壤调理剂研究与应用现状概述

1.1 土壤调理剂的定义

土壤调理剂的定义在学术界尚未达成统一,有些研究中也称土壤调理剂称为土壤改良剂,但土壤改良剂仅针对障碍性土壤而言,而土壤调理剂对能够正常生产的土壤也具有一定的增产作用,所以土壤调理剂较土壤改良剂的使

用也更为广泛。目前相关部门发布的标准文件对土壤调理剂的定义如下:(1)用于改善土壤的物理和(或)化学性质,及(或)其生物活性的物料。(2)加入障碍土壤中用于改善土壤的物理、化学和(或)生物性状的物料,用于改良土壤结构、降低土壤盐碱危害、调节土壤酸碱度、改善土壤水分状况或修复污染土壤等。

1.2 土壤调理剂的国内外研究进展

早在传统的农耕社会,生产中就利用客土换土、施用石灰、秸秆还田等简单的调理方式对土壤进行改良。但随着人类对土壤开发利用的不断深入,土壤问题也逐渐变得多元化、复杂化。关于土壤调理剂的研究开始于19世纪的末期^[2],距今已有百余年的历史,在研究初期主要是污泥、沸石、粉煤灰等单一调理剂的应用,少有研究进行复合施用。20世纪50年代以前,西方国家的研究人员开始利用多糖、淀粉共聚物、纤维素等材料进行土壤结构的改良,但这些天然有机物质分子量相对较小,施入土壤后易被降解,因此在后期的生产活动中没有得到广泛应用^[3]。20世纪50年代以后,各国学者开始了对人工合

成土壤调理剂的研究。首先美国研发出一种名为“Kriluim”的土壤结构改良剂^[4],向土壤施用后有利于土壤团粒结构的形成,可以增强土壤的水稳性能,且施用后不易被微生物降解。其后多国也陆续研发出多种合成改良剂,主要包括水解聚丙烯腈(HPAN)、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酰胺(PAM)、沥青乳剂(ASP)等,其中聚丙烯酰胺当前仍应用较广^[5]。20世纪80年代,许多国家将人工合成技术应用到土壤调理剂的生产当中,涌现出大量的调理剂产品,其中以比利时的TC调理剂^[6]最为成功。

20世纪80年代初,我国从比利时引进了聚丙烯酰胺和沥青乳剂,主要用于盐渍土改良、固持水土、旱地保墒增温等工作^[7]。近年来,我国土壤调理剂产品的种类愈加全面,产品数量也有所增加,这些产品主要用于改善土壤结构、养分和水分状况、改良盐渍土壤、调节土壤酸碱度、修复土壤污染等;产品原料也较为广泛,包括天然矿物、天然活性物质、工农业废弃物、人工合成聚合物等。当前许多研究利用工农业有机废弃物以及多种黏土矿物、贝类作为生产原料,实现废弃物料二次利用的同时也达到了较好的调理效果。针对不

同的土壤障碍因子,我国的土壤调理剂产品也更加具有指向性,不断地被应用到了各类障碍性土壤的改良工作当中。

1.3 土壤调理剂的主要功能及分类

土壤调理剂的主要功能即调节土壤障碍因子、改善土壤养分状况,合理施用土壤调理剂能够改善障碍性土壤的物理性状(土壤结构、水土保持能力等)、化学性状(土壤酸碱度、土壤盐渍化、重金属污染等)、生物学性状(微生物群落多样性、土壤酶活性等),使之能够进行优质高效的农业生产活动。

通常土壤调理剂产品由多种材料制成,成分较为繁杂,因此难以执行严格统一的分类标准。目前存在两种主流的分类依据和方法,主要参照土壤调理剂的功能用途或主要成分进行分类。

按照功能用途可将土壤调理剂分为结构改良剂、水分调节剂、酸性土壤改良剂、盐碱土壤改良剂、重金属污染修复剂五大类。其中结构改良剂一般根据生产原料的不同分为天然和人工合成两类;土壤水分调节剂主要用于土壤水分的保持,多指土壤保水剂,近年来也有研究利用特定材料制备土壤增水剂吸收气态水以供植物生长利用^[8];酸性土壤改良剂主要包括石灰、矿物及工矿废弃物、微生物肥料、有机物料、生物炭等几类;盐碱土壤改良剂主要包括化学改良剂、微生物改良剂、烟气脱硫

废弃物、有机肥、腐植酸、沸石等几类;重金属污染修复剂根据对重金属元素产生的作用可以分为钝化修复剂和淋洗修复剂两类^[9],依据钝化材料的理化性质又可将钝化修复剂分为无机类、有机类、生物炭、新型纳米材料和复合材料几类,淋洗修复剂根据淋洗技术的差异可分为无机溶液清洗剂、螯合剂、表面活性剂等几类。

另外也有学者主张按照土壤调理剂的主要成分和生产原料划分^[11,10],可将其分为天然材料改良剂、人工提取或合成的改良剂、天然-合成共聚物改良剂、固体废弃物改良剂、生物改良剂五类。天然材料改良剂由自然界中天然存在的物料制备而成,主要包括天然矿物、天然提取高分子化合物、天然有机质物料等;人工提取或合成的改良剂是由人工技术制备的一类非天然改良剂,如壳聚糖、聚丙烯酰胺等;将天然与人工制备的单体材料进行聚合反应得到的天然-合成共聚物改良剂,对障碍土壤也可起到很好的改良作用,常见的有腐植酸-聚丙烯酸、纤维素-丙烯酰胺等;固体废弃物改良剂一般可分为无机和有机两类,无机类包括粉煤灰、高炉渣、脱硫废弃物等,有机类包括城市污水、作物秸秆、畜禽粪便等;另外通过微生物或动物也可对障碍土壤进行改良,例如微生物菌剂、蚯蚓等。具体分类见表1。

2 土壤调理剂的施用风险分析

土壤调理剂通常需要长期连续施用且建议施用量较大,当下主流的推荐施用量一般为 $900\sim 1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。根据粗略的计算,我国化肥施用量仅为 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右,相同面积下土壤调理剂可达到化肥施用量的1.5~2.5倍,在长期大量施用条件下土壤调理剂改良障碍土壤的效率可能有所下降,对土壤生态系统的稳定性和安全性可能也会造成一定的潜在风险。不同功能用途的土壤调理剂在施用过程中的安全风险具体包括以下几方面。

2.1 土壤结构改良剂的施用风险

目前研究多应用聚丙烯酰胺、沥青乳剂、聚乙烯醇等人工合成材料进行土壤结构改良,多数研究者认为这些材料对土壤无毒害,在科学合理的情况下施用不会对土壤造成负面的影响^[5,7]。聚丙烯酰胺施入土壤后,会在土壤中残留一定量的丙烯酰胺,这种物质已被证实具有致癌性,对人体的神经有毒害作用,但是该物质能够被微生物降解,通常不会在土壤中积累。Sojka等^[11]指出丙烯酰胺在土温高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会被快速地降解,如果对聚丙烯酰胺产品中的丙烯酰胺含量进行严格限制,可以认为聚丙烯酰胺对土壤环境不会产生威胁。但聚丙烯酰胺与聚乙烯醇均不易被生物所降解,因此可能会存在一定的隐

表1 土壤调理剂的分类

Table 1 Classification of soil conditioner

主要成分 Main components	土壤调理剂 Soil conditioner
天然矿物	石灰石、膨润土、石膏、蛭石、珍珠岩、褐煤、风化煤、硫磺、沸石、磷矿粉、钾长石、白云石、蒙脱石、麦饭石、硅酸盐等
天然提取高分子化合物	多糖、纤维素、树脂胶、丹宁酸、腐植酸、木质素等
天然有机质物料	泥炭、炭等
人工提取或合成的改良剂	壳聚糖、聚合氨基酸、水解聚丙烯腈、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇、聚乙二醇、脲醛树脂等
天然-合成共聚物改良剂	腐植酸-聚丙烯酸、纤维素-丙烯酰胺、淀粉-丙烯酰胺/丙烯腈、沸石/凹凸棒石-丙烯酰胺、磺化木质素-醋酸乙烯等
固体废弃物改良剂	粉煤灰、磷石膏、高炉渣、碱渣、乳化沥青、脱硫废弃物、城市污水污泥、城市生活垃圾、作物秸秆、木屑、豆科绿肥、畜禽粪便、酒糟、纸浆废液、味精厂发酵物、鱼产品下脚料等
生物改良剂	微生物菌剂、菌根、好氧堆制茶、蚯蚓等

患^[12]。另外,沥青中含有一定数量的致癌物质3-4苯并芘($3\sim 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但有试验表明该物质难以转移到植物体内^[17]。

从目前的文献报道看这类材料对土壤不会产生负面作用,但随着土壤性质的不断变化以及施用量的增加,土壤结构改良剂究竟有无施用风险应进一步探讨研究。

2.2 土壤水分调节剂的施用风险

向施用保水剂的土壤灌溉后,保水剂吸水后膨胀导致土壤中的气相和固相减少,进而产生植物缺氧、吸收养分不充分等问题。武毅等^[13]研究发现,当每株白蜡和油松的保水剂用量超过30 g时,植物生长会受到抑制。杨红善等^[14]发现,当保水剂用量大于0.25%时土壤0.25~5.00 mm粒径的团聚体含量会减少,表明过量的保水剂可能会破坏土壤结构,引起土壤板结。员学峰等^[15]得出当聚丙烯酰胺浓度过高时,会在土壤表层形成黏结土粒,从而抑制土壤水分的渗透作用,当施用浓度超过 $1.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,随着施用浓度的增大土壤容重不断上升,孔隙度不断下降,导致土壤通气透水的能力下降。因此在施用土壤水分调节剂时,适宜用量尤为重要。

2.3 酸性土壤改良剂的施用风险

酸性土壤调理剂主要包括石灰、矿物工业废弃物、微生物肥料、有机物料类、生物炭、新型改良剂几类。

2.3.1 石灰类改良剂

(1) 导致复酸化现象

石灰的长期施用能够显著降低土壤交换性氢和铝的含量,但同时也会降低表层土壤的交换性钾、钠含量^[16],从而导致土壤中 K^+ 和 Mg^{2+} 加速浸出。当停止施用就会出现复酸化的现象,并且酸化程度可能比施用石灰之前还有一定程度的加剧^[17]。

(2) 影响土壤淋溶过程

石灰的施用也会对土壤元素淋溶过程产生一定的影响。石灰含有大量

的钙镁元素,施用后使土壤中交换性钙和镁含量迅速提升,导致盐基饱和度上升^[16,18]。长期施用条件下, Mg^{2+} 的移动速度更快。Huber等^[19]在施用石灰20 a后发现,0~40 cm土层的渗透水中, Mg^{2+} 含量远高于 Ca^{2+} ,说明大量 Mg^{2+} 被淋洗,而多数 Ca^{2+} 则被固定在了主根区域。另外石灰能够推进土壤硝化作用的发生,致使硝态氮在土壤中快速积累^[20],大量的 NO_3^- 在淋溶过程中发生淋失,可能导致地下水 NO_3^- 含量超标,引发污染。

(3) 影响土壤磷的含量

石灰的施用可能也会影响到土壤有效磷的含量。随着石灰的施用土壤酸碱度上升,此时活性铁铝生成的沉淀聚合于土壤中形成吸附表面,其会显著增强对磷的吸附能力。在交换性铝含量较高的土壤中该现象尤为明显,石灰使土壤pH值迅速上升形成大量氢氧化铝胶状沉淀,该沉淀会吸附土壤中的可溶性磷形成难溶性磷酸铝盐聚合物^[21]。此外还有研究表明石灰可能会抑制磷在土壤中的移动和扩散,降低土壤中水溶性磷的含量。向土壤施入石灰 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后培养28 d,磷仅能扩散到表层下1.5 cm处,而未施入石灰的处理可扩散到2.1 cm处^[22]。

(4) 导致土壤板结及植物缺失

石灰在土壤中的扩散十分缓慢,因此短期的施用对深层土壤的改良效果甚微,但长期施用石灰会产生 CaSO_4 ,导致土壤孔隙结构受到破坏,引发土壤板结。另有研究表明施用石灰会引起土壤锌元素含量下降^[23],导致作物产量降低。因此施用石灰时要充分考虑土壤中锌等植物营养元素的含量,确保土壤营养元素均衡。

(5) 影响土壤酶及微生物活性

石灰也可能对土壤酶活性产生一定的影响,有研究发现当石灰的投入量为 $400\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,土壤脲酶活性、土壤蔗糖酶活性、多酚氧化酶活性均会有一

定程度的提高,但过氧化氢酶活性会出现降低的现象。同时石灰的施用也会对土壤真菌数量产生显著的影响, $400\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 施用量处理较未施用石灰的处理土壤真菌数量可降低48.3%^[24]。

2.3.2 矿物和工业废弃物

矿物和工业废弃物含有一定的碱性成分,可以用于中和土壤中的酸性成分,因此这类物质也常被用作改良酸性土壤。在提高土壤pH值的同时,矿物和工业废弃物中的部分微量元素也会进入土壤,对植物的生长发育产生积极作用。但是这类物质自身含有的少量重金属元素很难在生产中消除,长期施用可能导致土壤发生重金属污染。

2.3.3 微生物肥料

微生物肥料投入土壤后,其携带的菌种与土著微生物必然会产生竞争,并且这些菌种均是在目标土壤的环境条件下筛得,所以对环境的适应性较强,长期大量施用可能对原土壤中的微生物产生较为明显的抑制作用,导致土壤中微生物原有的生态平衡被破坏。施加的微生物在进入新的生存环境之后,微生物之间可能发生水平基因转移或在细菌的染色体内进行基因重排、突变、复制^[25],形成适应新环境条件的优势菌种,一旦优势菌种大量繁殖将对其他菌种产生抑制,必然会带来许多潜在的生态环境危害。另外新加入的菌种也可能对土壤生物的生长代谢产生负面影响,破坏生态平衡。因此微生物制剂类土壤调理剂的添加须遵循适量适度原则,过量和不合理的添加非本土原生的外源微生物或者无限地扩繁目标功能微生物,可能会打破土壤原有微生物群落结构,引发一系列连锁反应,存在难以预测的生态风险。

2.3.4 有机物料类

农作物秸秆、畜禽粪便、绿肥等有有机物料常用于酸性土壤的改良,这些有机物料能够提高土壤肥力、降低酸性土壤对作物的毒害作用,但长期施用也可

可能存在一定的问题。杨振兴等^[26]通过16 a的长期定位试验发现,长期秸秆还田造成的土壤氮素盈余可能会导致氮素淋失引起污染。秸秆的长期施用也可能会将重金属元素带入土壤造成污染。有研究表明在长期秸秆或秸秆生物炭还田条件下,土壤总镉含量会有所增加^[27]。穆虹宇等^[28]研究分析了我国畜禽粪便重金属含量特征,结果表明有毒元素镉、砷超标率较高,认为畜禽粪便还田后土壤中铜元素的环境累积风险相对最大,若原始粪便中铜元素含量过高,则不应大量还田。此外,由于抗生素被广泛应用于畜禽养殖业,大量抗生素以母体或代谢物的形式随粪尿排出体外,导致畜禽粪便中抗生素残留达到较高水平,因此长期施用畜禽粪便也可能导致大量抗生素进入土壤和水体环境并不断积累,造成农田土壤和水体的抗生素污染^[29]。

2.3.5 生物炭

生物炭的制备原料来源广泛,且能有效保水保肥,在土壤改良中体现出巨大的潜力^[30]。但有研究称,生物炭应用于肥沃健康的土壤中不仅不能提高作物产量,甚至可能抑制植物的生长^[31],这是因为生物炭在制备过程中会产生多环芳烃(PAHs)、重金属、以及环境持久性自由基(EPFRs)等化学物质^[32]。多环芳烃是一类广泛存在于环境中的持久性有机污染物,其致癌、致畸风险非常强^[33]。当生物炭施入土壤后,多环芳烃会长期存留于土壤当中,其能够被植物吸收迁移转化,进入人体增加癌症风险。制备生物炭的原料多为农业废弃物,例如秸秆、木屑、畜禽粪便等。这些农业废弃物自身的重金属元素在生物炭热解过程中可能形成易溶解的形式,从而增大其生物有效性及迁移风险,并且热解过程会导致有机组分大量损失,重金属元素相对浓缩^[34]。另外生物炭应用于酸性土壤时,原本稳定的重金属元素也可能被活化而在植物体内富集。

环境持久性自由基是相对于传统的短寿命自由基而提出的^[35],这类自由基的寿命长,对环境造成的危害也更大^[36]。环境持久性自由基能够诱导 $\text{OH}^\cdot$ 和 $\text{O}_2^\cdot$ 的产生,从而导致植物细胞加速老化,同时还会扰乱表皮细胞的生长代谢周期,抑制植物的生长发育^[37]。另外环境持久性自由基可能会与原污染物发生相互作用,致使污染物结构发生变化,毒性增强,造成二次污染。

生物炭对土壤中的有效成分同样具有一定的吸附能力,过量施用可能会导致植物所需的营养成分受到影响。同时生物炭的理化性质以及内源污染物会对土壤微生物活性产生多元影响^[38],改变土壤微生物群落组成,进而对土壤环境产生影响。

2.4 盐碱土壤改良剂的施用风险

常用于盐碱土壤改良的调理剂主要有化学改良剂、微生物改良剂、烟气脱硫废弃物、有机肥、腐植酸、沸石几类,其中微生物改良剂和有机肥的施用风险与酸性土壤改良剂类似,故本节主要针对其他几种盐碱土壤改良剂的施用风险进行总结。

2.4.1 化学改良剂

应用于盐碱土壤改良的无机化学改良剂主要分为两类:一类是含钙物质,即直接钙作用剂,包括石膏、磷石膏、煤矸石、粉煤灰等;另一类是酸性物质,即钙有效化剂,包括硫磺、硫酸、磷酸、盐酸、硫酸铁、硫酸铝等。在盐碱土壤中长期大量使用磷石膏可能会带来一些安全风险,主要体现在重金属污染、氟化物污染、放射性元素污染、含磷化合物污染几个方面。王小彬等^[39]通过分析中国磷石膏的相关统计数据表明,磷石膏中汞、镉、砷、铬、铅、镍、钼元素含量较相关土壤和地下水标准均有一定程度的超标,存在土壤和水体污染风险。磷矿石中的氟会进入磷石膏,其中全氟和水溶氟含量同样超过相关标准,存在土壤和水体氟污染风险。磷矿

石中约80%的放射性元素镭226残留在磷石膏中,可被作物吸收或累积,对人类健康具有潜在威胁。磷石膏中的含磷化合物可能会随雨水而浸出,存在地下水污染的风险。长期施用煤矸石与粉煤灰可能会导致土壤重金属污染^[40-41],原因是这类材料本身含有的重金属元素难以去除。硫磺、硫酸、盐酸、磷酸等钙有效剂要注意适量施用,长期大量施用可能会导致土壤过度酸化而不能达到良好的调理效果,另外硫酸铝单独施用不利于土壤结构的改善,还需要与其他改良措施配合使用^[42]。

2.4.2 烟气脱硫废弃物

烟气脱硫废弃物的理化性质与天然石膏接近,利用 Ca^{2+} 置换出土壤胶体中的 Na^+ 、 Mg^{2+} ,进而降低盐碱土壤对植物造成的危害。长期施用烟气脱硫废弃物对土壤造成的影响与磷石膏类似,可以从以下几方面考虑^[43]:烟气脱硫废弃物中的汞、镉、砷、铅、镍、铬元素含量较高,长期施用可能会造成土壤和地下水的重金属污染;高量的硒元素可能产生硒元素的安全问题;高量的氟污染物可能会进入农田土壤并渗入地下水,存在土壤和水体的氟污染风险。除此之外,高量的 Cl^- 易导致地下水的 Cl^- 污染。

2.4.3 腐植酸

腐植酸能够中和土壤碱性、增加土壤有机质,因此也常配合其他土壤调理剂应用于盐碱土壤改良。目前鲜有研究报道长期施用腐植酸对土壤造成的负面影响,多为正面的积极效应。但也有研究称,腐植酸可与水体中的许多离子发生交换或络合作用,增强某些污染物的溶解度,增强其迁移能力。因此,腐植酸的施用可能会对水体造成污染,给水体环境及人体健康带来隐患^[44]。另外,在饮用水消毒的过程中会产生氯气,氯气与水体的腐植酸发生反应生成三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)等,这类卤化副产物对人体具有致癌作用^[45-46]。

因此应进一步探讨研究腐植酸是否会对地下水造成污染带来环境隐患与风险,在盐碱土壤改良工作中应充分考虑腐植酸的用时用量问题。

2.4.4 沸石

针对施用沸石对土壤环境造成负面影响的研究报道较为少见,但有研究称4A沸石应用于实际的盐碱土壤改良时,虽然具有较强的 Ca^{2+} 交换能力,但是可能由于沸石颗粒过细,会加剧土壤的板结程度,因此应用4A沸石改良盐碱土壤可能会存在一些负面影响^[47]。故选用沸石材料进行盐碱土壤改良时应选择合适的粒径规格,防止土壤板结现象发生而影响到土壤修复效果。另外,研究表明沸石可能会对人体的某些细胞产生毒性,并且可能具有致癌性^[48-49],因此施用沸石过程中应做适当的防护措施以避免对人体健康造成损伤。

2.5 重金属污染修复剂的施用风险

根据修复原理,可将常见重金属污染修复剂分为钝化修复剂和淋洗修复剂两类。

2.5.1 钝化修复剂

常用的钝化修复剂包括有机和无机两类。无机钝化修复剂主要有碱性物质、磷酸盐以及矿物质。有机钝化修复剂主要包括草炭、生物炭、黏土矿物等。

碱性物质包含较广,应用实践中碳酸钙、氧化钙等廉价环保的材料常被选用,此外工业石灰也常用于重金属污染土壤的修复^[50]。但在实际应用中一定要把握合适的用量,过高的土壤pH值会破坏土壤的结构,降低植物对一些营养元素的吸收利用效率。另外,重金属元素在强碱性的条件下能够形成羟基络合物,导致其移动性增强,适得其反。

磷酸盐化合物易与重金属形成难溶态沉淀,因此可利用磷酸盐类化合物修复某些发生重金属污染的土壤。有研究表明当羟基磷灰石用量超过5% (质量分数)就会对某些植物产生毒害,抑制生长^[51],合适用量的问题仍需充分

考虑。此外,磷的淋失会造成土壤的酸化并有造成水体污染的风险,土壤酸化后会增强某些重金属元素的生物活性,更易于被植物吸收积累;同时,在使用磷酸盐时,不能忽视其对砷的负面影响所带来的环境风险^[52-53]。

向土壤中施加有机物质和黏土矿物,能够增加土壤的有机质含量,改善土壤物理化学性质、渗水性和持水量,在提升土壤肥力的同时,增强土壤对重金属离子的吸附能力,减轻土壤污染对植物和生态环境的危害。施用这类物质时同样需要考虑最佳施用量,超过最佳施用量后其对重金属元素的吸附能力可能会有所降低,导致修复效率的下降。另外此类物质大多含有重金属,应注意避免新的污染元素进入土壤造成二次污染。通过离子间的拮抗作用来降低植物对某种污染物的吸收也是经济有效的方法之一,但是离子拮抗剂在减轻某种重金属离子毒害的同时,又使另外一种元素含量增高,这可能会造成新的污染问题,需要特别加以关注。

2.5.2 化学淋洗剂

土壤淋洗是修复重金属污染土壤最有效的手段之一,土壤淋洗修复是否成功,主要取决于淋洗液的选择。土壤淋洗所使用的淋洗液包括酸、螯合剂、氧化还原剂、表面活性剂和助溶剂。除水溶性污染物外通常不会选用水作为淋洗液,这是因为大多数污染物的溶解性较小,所以合适的淋洗剂对土壤淋洗十分重要。但需要注意的是,淋洗液可能会改变土壤的理化特性,影响土壤生态的平衡。淋洗修复结束后,一定要妥善处理淋洗液,避免残留于土壤当中引发污染,造成环境风险。

传统的无机溶液淋洗液对重金属污染的清除效果好、速度快,但修复过程中会导致土壤pH值发生剧烈变化、造成土壤中养分大量流失、改变土壤物理化学性质,同时对土壤的生物结构也会有一定程度的破坏。人工合成的淋

洗液不易被土壤中的微生物所降解,因此易残留于土壤中造成二次污染,并且价格相对较高,难以得到广泛应用。

3 展望与管理建议

通过对近5a土壤调理剂相关的研究内容整理分析,发现多数研究结果均表现的是土壤调理剂的积极效应。研究集中在土壤调理剂施用种类的选择、调理剂的施用量以及调理效果等方面,调理机理方面的研究主要针对土壤理化性状开展,而对地上作物生长生理指标影响的研究相对较少,未能将地上部作物与地下土壤统一起来,研究的系统性不足。目前土壤调理剂的研究与应用多局限于盆栽试验和小区试验,研究的时间短、范围小,缺少较大范围的农田长期定位试验研究。调理剂针对的目标作物多为经济作物,其中在茶叶和烤烟中尤为突出,这可能与茶田土壤易出现酸化,烟叶易富集重金属元素有关。多数研究将土壤调理剂与其他改良剂配合施用,少有研究仅通过单一的土壤调理剂进行土壤的改良,常见的组合方式有土壤调理剂+有机肥^[54]、土壤调理剂+微生物^[55]、土壤调理剂+泥炭^[56]等,通过其他物质的添加为植物提供更多的养分,从而达到更好的调理效果,有研究表明利用土壤调理剂与特定植物联合修复污染土壤也达到了较好的修复效果^[57]。对于目前土壤调理剂材料的选择,多数研究中提到的土壤调理剂主要以天然矿物类、有机无机废弃物及其相关制品为主,新型高分子土壤改良剂的有关研究仍相对较少。近期有研究提出利用餐厨垃圾制备土壤调理剂改良土壤结构并供给土壤养分,经过长期施用的定位试验验证了餐厨垃圾能够改善土壤结构,有助于土壤团聚体中有机质的赋存转化,提高团聚体的稳定性和土壤抗侵蚀能力^[58]。也有研究提出了钛石膏作为土壤调理剂的可能性,这为废弃物的再利用以及土壤调理

改良提供了新思路^[59]。通过整合分析发现,土壤调理剂相关领域目前主要的问题是施用后的风险研究较少,未能形成标准化的风险评价体系,长期、大量、连续施用是否会给土壤生态系统造成危害需要进一步探索。

管理方面,当前土壤调理剂生产市场存在产品种类繁多,原料繁杂,功能稳定性和产品使用风险性缺乏统一、规范、可靠的第三方监测,评价认证流程和机构,导致土壤调理剂大规模生产和应用无据可依,企业“自卖自夸”现象严重,从而给土壤调理剂使用过程带来许

多不可控的风险因素,也给有关部门进行规范化的监督管理带来实际困难。因此,建议尽快强化第三方社会服务机构功能。通过在全国建立典型性、代表性土壤类型、污染或障碍类型以及种植制度不同的集中化、规范化、长期性土壤调理剂使用的有效性、安全性定位监测点,由土壤调理剂官方评审、登记部门认可的第三方社会服务机构与监测点当地环境监督管理部门合作,对不同品牌、不同原料、不同功能(如土壤重金属污染修复、盐碱化及连作障碍治理等)的土壤调理剂产品进行统一、连续、

规范化的使用过程跟踪监测与评价。由第三方社会服务机构定期向评审、登记部门提交监测结果与评价报告,从而为土壤调理剂产品登记提供科学数据支持。同时,第三方社会服务机构也可以向土壤调理剂生产企业和使用单位提供产品优化和使用安全性指导建议。

随着相关领域研究的持续推进以及土壤调理剂检测评价体系的不断完善,未来我国土壤调理剂产品的调理效率、施用效益、施用风险必将得到更加全面科学的评价,土壤调理剂相关行业也将得到飞速的发展。

参考文献

- [1] 孙蓟锋,王旭.土壤调理剂的研究和应用进展[J].中国土壤与肥料,2013,50(1):1-7. SUN Ji-feng, WANG Xu. Advance in research and application of soil conditioner[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, 50(1): 1-7.
- [2] Ghodrati M, Simb J T, Vasilas B L. Enhancing the benefits of fly ash as a soil amendment by pre-leaching[J]. *Soil Science*, 1995, 81(3): 244-252.
- [3] 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 Wan-wei, HUANG Ben-bo, WANG Feng-ling, et al. Research status and progress of soil conditioner[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2019, 34(2): 19-23.
- [4] Wallace A, Wallace G A. Effects of soil conditioners on emergence and growth of tomato-cotton, and lettuce seedlings[J]. *Soil Science*, 1986, 141(5): 313-316.
- [5] 王小彬,蔡典雄.土壤调理剂PAM的农用研究和应用[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):457-463. WANG Xiao-bin, CAI Dian-xiong. Research and application of soil conditioner in agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2000, 6(4): 457-463.
- [6] 蔡典雄,张志田,张镜清,等.TC土壤调理剂在北方旱地上的使用效果初报[J].土壤肥料,1996,33(4):34-36,48. CAI Dian-xiong, ZHANG Zhi-tian, ZHANG Jing-qing, et al. Preliminary report on the application effect of TC soil conditioner on northern dry land[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1996, 33(4): 34-36, 48.
- [7] 朱咏莉,刘军,王益权.国内外土壤结构改良剂的研究利用综述[J].水土保持学报,2001,15(6):140-142. ZHU Yong-li, LIU Jun, WANG Yi-quan. Summary of soil structure conditioners utilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(6): 140-142.
- [8] 吴丽丽.土壤增水剂在大青山山地造林中应用效果研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014:9-10. WU Li-li. Studies on effects of using soil-water increasing agent on forestation in Daqing mountain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014: 9-10.
- [9] 安志装,索琳娜,赵同科,等.农田重金属污染危害与修复技术[M].北京:中国农业出版社,2018:45. AN Zhi-zhuang, SUO Lin-na, ZHAO Tong-ke, et al. Harm of heavy metal pollution in farmland and remediation technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 45.
- [10] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289. CHEN Yi-qun, DONG Yuan-hua. Progress of research and utilization of soil amendments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2008, 17(3): 1282-1289.
- [11] Sojka R E, Lentz R D. Time for yet another look at soil conditioners[J]. *Soil Science*, 1994, 158(4): 233-234.
- [12] 陈貽海,戴九兰,王仁卿.聚乙烯醇生物降解的研究进展[J].环境污染与防治,2014,36(3):82-86. CHEN Yi-hai, DAI Jiu-lan, WANG Ren-qing. Research progress of biodegradability of polyvinyl alcohol[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(3): 82-86.
- [13] 武毅,孙保平,张建锋,等.保水剂对4种木本植物生长及根系形态的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):96-102. WU Yi, SUN Bao-ping, ZHANG Jian-feng, et al. Effects of water-retaining agent in different dosage on the growth and root morphology of 4 woody plants[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(1): 96-102.
- [14] 杨红善,刘瑞凤,张俊平,等.PAAM-atta复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):38-41. YANG Hong-shan, LIU Rui-feng, ZHANG Jun-ping, et al. Effects of poly (acrylic-acylamide) /attapulgit superabsorbent composite on soil water content and physical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 38-41.
- [15] 员学锋,汪有科,吴普特,等.PAM对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J].水土保持学报,2005,19(2):37-40. YUAN Xue-feng, WANG You-ke, WU Pu-te, et al. Effects and mechanism of PAM on soil physical characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 37-40.

- [16] Moore J D, Duchesne L, Ouimet R. Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand[J]. *Forest Ecology & Management*, 2008, 255(8/9): 3460-3468.
- [17] 白博文, 刘善江, 申俊峰, 等. 土壤调理剂研发及应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(3): 14-18. BAI Bo-wen, LIU Shan-jian, SHEN Jun-feng, et al. Research progress on the development and application of soil conditioners[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(3): 14-18.
- [18] Prielzel J, Rehfuess K E, Stetter U, et al. Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction[J]. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127(1): 43-61.
- [19] Huber C, Baier R, Göttele A, et al. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany[J]. *Forest Ecology & Management*, 2006, 233(1): 11-20.
- [20] Dorland E, Berg L J L V, Berg A J V D, et al. The effects of sod cutting and additional liming on potential net nitrification in heathland soils[J]. *Plant & Soil*, 2004, 265(1/2): 267-277.
- [21] 王光火, 朱祖祥. pH对土壤吸持磷酸根的影响及其原因[J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 1-6. WANG Guang-huo, ZHU Zu-xiang. The effect of pH on phosphate sorption in soils and its possible mechanism [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1): 1-6.
- [22] Hao X, Cho C M, Racz G J, et al. Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(3): 213-224.
- [23] Brennan R F, Bolland M D A, Bell R W. Increased risk of zinc deficiency in wheat on soils limed to correct soil acidity[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2005, 43(5): 647-657.
- [24] 贾茹. 不同措施对连作土壤生物活性和蔬菜生物抗氧化性影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016: 15. JIA Ru. Effect of different measures on continuous cropping soil biological activity and vegetable antioxygenation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016: 15.
- [25] 马鸣超, 姜昕, 李力, 等. 胶质类芽孢杆菌功能及基因组学研究进展[J]. 生命科学, 2014, 26(10): 1038-1045. MA Ming-chao, JIANG Xin, LI Li, et al. Function and genomics of *Paenibacillus mucilaginosus*[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2014, 26(10): 1038-1045.
- [26] 杨振兴, 周怀平, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地土壤硝态氮分布与累积的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(3): 179-182. YANG Zhen-xing, ZHOU Huai-ping, GUAN Chun-lin, et al. Effect of long-term straw returning on distribution and accumulation of nitrate nitrogen in dryland soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(3): 179-182.
- [27] 朱文彬, 王慎强, 赵旭, 等. 秸秆炭化物长期还田下农田镉风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 117-123. ZHU Wen-bin, WANG Shen-qiang, ZHAO Xu, et al. Risk of cadmium in farmland soil after long-term application of carbonization straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 117-123.
- [28] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996. MU Hong-yu, ZHANG Zhong, LI Yan-ming, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 986-996.
- [29] 彭秋, 王卫中, 徐卫红. 重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4757-4766. PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong. Ecological risk assessment of tetracycline antibiotics in livestock manure and vegetable soil of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4757-4766.
- [30] Kookana R S, Sarmah A K, Zwieter L V, et al. Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences[J]. *Advances in Agronomy*, 2011, 112(3): 103-143.
- [31] Gaskin J W, Speir R A, Harris K, et al. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(2): 623-633.
- [32] 吴丹萍, 李芳芳, 赵婧, 等. 生物炭在制备及土壤应用中的潜在环境风险[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 98-103. WU Dan-ping, LI Fang-fang, ZHAO Jing, et al. Potential environmental risks in the preparation and application of biochars in soil[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 44(1): 98-103.
- [33] 佟瑞鹏, 杨校毅. 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评估: 以PAHs为例[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2522-2529. TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi. Environmental health risk assessment of contaminated soil based on Monte Carlo method: A case of PAHs[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6): 2522-2529.
- [34] Uchimiya M, Wartelle L H, Klasson K T, et al. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil[J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(6): 2501-2510.
- [35] Dellinger B, Lomnicki S, Khachatryan L, et al. Formation and stabilization of persistent free radicals[J]. *Proceedings of the Combustion Institute International Symposium on Combustion*, 2007, 31(1): 521-528.
- [36] Vejerano E, Lomnicki S, Dellinger B. Formation and stabilization of combustion-generated environmentally persistent free radicals on an Fe(III)₂O₃/silica surface[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(2): 589-594.
- [37] Liao S, Pan B, Li H, et al. Detecting free radicals in biochars and determining their ability to inhibit the germination and growth of corn, wheat and rice seedlings[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8581-8587.
- [38] Mackie K A, Marhan S, Ditterich F, et al. The effects of biochar and compost amendments on copper immobilization and soil microorganisms in a temperate vineyard[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 201(1): 58-69.
- [39] 王小彬, 闫湘, 李秀英, 等. 磷石膏农用的环境安全风险[J]. 中国农业科学, 2019, 52(2): 293-311. WANG Xiao-bin, YAN Xiang, LI Xiu-ying, et al. Environmental risks for application of phosphogypsum

- in agricultural soils in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(2): 293-311.
- [40] 梁师英, 赵锦慧, 李海燕. 电厂粉煤灰作为碱化土壤改良剂的风险分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(34): 16945-16947.
- LIANG Shi-ying, ZHAO Jin-hui, LI Hai-yan. Risk evaluation of coal ash from power plant used as alkaline soil amendment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(34): 16945-16947.
- [41] 丛鑫, 雷旭涛, 付玲, 等. 海州煤矿矸石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地球与环境*, 2017, 45(3): 329-335.
- CONG Xin, LEI Xu-tao, FU Ling, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of Haizhou coal mine, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(3): 329-335.
- [42] 马玉涛, 苑伯飞, 张鹏, 等. 硫酸铝对新开垦苏打盐碱水田的快速改良和培肥效果[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 325-330.
- MA Yu-tao, YUAN Bai-fei, ZHANG Peng, et al. Effects of aluminium sulphate on rapid amelioration and fertility improvement of newly reclaimed soda saline-alkali paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 325-330.
- [43] 王小彬, 闫湘, 李秀英, 等. 燃煤烟气脱硫石膏农用的环境安全风险[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 926-939.
- WANG Xiao-bin, YAN Xiang, LI Xiu-ying, et al. Environment risk for application of flue gas desulfurization gypsum in soils in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 926-939.
- [44] 侯丽雅. 水中腐植酸的去除及去除方法[J]. *水利科技与经济*, 2011, 17(9): 68-70.
- HOU Li-ya. Removal methods and harms of humic acid in water[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2011, 17(9): 68-70.
- [45] 朱红霞, 薛荔栋, 刘进斌, 等. 含氯消毒副产物的种类、危害与地表水污染现状[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(7): 1640-1648.
- ZHU Hong-xia, XUE Li-dong, LIU Jin-bin, et al. Types, hazards and pollution status of chlorinated disinfection by-products in surface water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(7): 1640-1648.
- [46] 李冰璟, 张巍, 刘婉冬, 等. 去除饮用水中三卤甲烷和腐植酸的活性炭选型方法[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(4): 48-51.
- LI Bing-jing, ZHANG Wei, LIU Wan-dong, et al. Selection of activated carbon for removing THMs and humic acid from water[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(4): 48-51.
- [47] 杨卫东, 吴永健, 刘春光. 盐碱土改良剂的研究和应用进展[J]. *天津科技*, 2014, 41(2): 17-20.
- YANG Wei-dong, WU Yong-jian, LIU Chun-guang. Advances in research and application of saline soil amendments[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2014, 41(2): 17-20.
- [48] 刘建业. 非石棉矿物纤维对健康的危害[J]. *工业卫生与职业病*, 1992, 20(6): 378-380.
- LIU Jian-ye. Health hazards of non asbestos mineral fibers[J]. *Industrial Health and Occupational Diseases*, 1992, 20(6): 378-380.
- [49] 吴卫东, 刘树春. 沸石及其危害[J]. *国外医学(卫生学分册)*, 1989, 16(6): 321-324.
- WU Wei-dong, LIU Shu-chun. Zeolite and its harm[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 1989, 16(6): 321-324.
- [50] 缪德仁. 重金属复合污染土壤原位化学稳定化试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 11.
- MIU De-ren. Chemical immobilization bench-scale studies on in-situ remediation of multi-heavy metals contaminated soils[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010: 11.
- [51] Boisson J, Ruttens A, Mench M, et al. Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part 1. Influence of hydroxyapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 104(2): 225-233.
- [52] Peryea, Frank J. Phosphate-induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5): 1301-1306.
- [53] Seaman J C, Arey J S, Bertsch P M. Immobilization of nickel and other metals in contaminated sediments by hydroxyapatite addition[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 460-469.
- [54] 崔保伟. 土壤调理剂、有机肥对豫东黄潮土区马铃薯产量和品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(12): 47-53.
- CUI Bao-wei. Effect of application of soil conditioner and organic fertilizer on yield and quality of potatoes in yellow-tide soil region of eastern Henan[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(12): 47-53.
- [55] 王光飞, 高晓东, 马艳, 等. 生物有机类复合调理剂在设施叶菜障碍土壤上的应用效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, 58(2): 56-65.
- WANG Guang-fei, GAO Xiao-dong, MA Yan, et al. Amendment effect of bio-organic soil conditioner on leafy vegetable greenhouse soil with continuous cropping obstacle[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, 58(2): 56-65.
- [56] 陶远征, 李海平, 丁梦娇, 等. 不同配方富钾土壤调理剂施用对土壤钾素及烟叶品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(1): 94-99.
- TAO Yuan-zheng, LI Hai-ping, DING Meng-jiao, et al. Effect of different new potassium-rich soil conditioners on soil potassium and tobacco quality[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(1): 94-99.
- [57] 吴建富, 魏雪娇, 卢志红, 等. 土壤调理剂与狼尾草联合修复废弃稀土矿区尾砂土壤研究[J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(6): 1222-1226.
- WU Jian-fu, WEI Xue-jiao, LU Zhi-hong, et al. A study of the effects of soil conditioner and pennisetum alopecuroides on repair on tailings soil in abandoned rare earth mining area[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41(6): 1222-1226.
- [58] 贾璇, 赵冰, 吴昊天, 等. 餐厨垃圾调理剂对果园土壤团聚体组成及分布的影响[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(9): 2163-2168.
- JIA Xuan, ZHAO Bing, WU Hao-tian, et al. Effects of soil aggregates composition and distribution using food waste soil conditioner in the orchard soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(9): 2163-2168.
- [59] 王晓琪, 姚媛媛, 陈宝成, 等. 硫酸法钛石膏作为土壤调理剂在油菜上的施用效果研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 333-338.
- WANG Xiao-qi, YAO Yuan-yuan, CHEN Bao-cheng, et al. Effects of titanium gypsum produced by sulfuric acid method as soil conditioner on rape seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 333-338.