

土壤调理剂研发及应用研究进展

白博文^{1,2}, 刘善江^{1*}, 申俊峰², 孙昊¹, 吴荣¹

(1. 北京市农林科学院, 北京 100089; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 土壤改良一般是根据各地的自然、经济条件, 采取因地制宜的措施, 以有效地达到改善土壤生产性状和环境条件的目的, 其过程就是控制土壤退化和增加土壤有机质及养分。其中, 土壤调理剂能有效地改善土壤养分状况及其理化性质, 促进土壤团粒的形成、降低土壤密度、提高肥力、改善土壤保水保肥性、提高粮食产量, 对土壤问题起到积极的修复作用。经查阅大量相关文献, 总结了土壤调理剂及其在各类土地上的应用进展, 并在土壤调理剂的研究方面提出展望。

关键词 土壤调理剂; 研发; 应用; 土壤结构; 酸化土地; 盐碱地; 重金属污染

中图分类号 S156 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)03-0014-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress on the Development and Application of Soil Conditioners

BAI Bo-wen^{1,2}, LIU Shan-jiang¹, SHEN Jun-feng² et al (1. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100089; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract Soil improvement is generally based on the natural and economic conditions in different places, and measures are taken to effectively improve soil production characteristics and environmental conditions. The process is to control soil degradation and increase soil organic matter and nutrients. Among them, soil conditioner can effectively improve the soil nutrient status and its physicochemical properties, promote the formation of soil aggregates, reduce soil density, improve soil fertility, improve soil water retention and fertility, and increase grain yield to play a positive role in the rehabilitation of soil problems. The progress of soil conditioners and their applications in various kinds of land were summarized by referring to a large number of related literatures. At the same time, it puts forward the prospect in the research of soil conditioners.

Key words Soil conditioner; Research and development; Application; Soil structure; Acidified land; Saline-alkali land; Heavy metal pollution

土壤退化是指人类对土壤的不合理利用而引起的土壤性质变差及生产力下降的过程, 主要有土壤侵蚀、土壤酸化、土壤盐渍化以及肥力下降等形式。随着经济的持续发展, 土壤问题严重限制了生产力, 土壤退化问题日趋引起人们的重视^[1-2]。根据 2000 年世界粮农组织 (FAO) 的报告指出, 全球严重土地退化面积约为 35 亿 hm^2 , 占总土地面积的 26%, 其中由于农业生产活动造成的严重土地退化面积占总土地面积的 9%^[2-3]。我国有 1.3 亿 hm^2 耕地, 其中退化耕地约为 0.25 亿 hm^2 。据国内外研究预测, 到 2050 年, 世界近 6 亿 hm^2 的土地沙漠化, 约有 200 万 hm^2 土壤遭到盐渍化侵蚀。笔者对土壤改良剂研究现状、主要种类、功能作用、使用技术、存在问题及应用前景等进行了探讨。

1 土壤调理剂的发展与分类

从 19 世纪末开始, 众多学者开始研究土壤调理剂, 距今已有 100 多年的历史。在研究的早期主要是针对干旱、半干旱和盐碱地, 研究较多的有沸石、粉煤灰和污泥等单一原料, 但会引起一些负面效果, 如重金属超标污染等^[3-4]。根据土壤调理剂的来源、制法和性质等可以划分为天然土壤调理剂和人工合成土壤调理剂。天然土壤调理剂的研究主要从 19 世纪末开始。众多学者主要研究的是天然的有机高分子化

合物(如瓜尔豆提取液、淀粉共聚物、纤维素、多糖和淀粉等), 但是此类调理剂易被土壤中的微生物分解, 释放较多阳离子, 对土壤有很大的毒害作用; 早期施用量较大, 成本较高, 在生产中难以推广^[5]。

19 世纪 50 年代, 随着对人工合成类的土壤调理剂研究的进行, 学者逐渐对一些合成高聚物材料包括聚丙烯酰胺 (PAM)、聚乙烯醇 (PVA) 等进行了较为深入的研究, 发现 PAM 对退化土壤的改良效果很明显, 同时也是应用最广泛的土壤调理剂之一^[6-7]。但是在 20 世纪末, 高性能的 PAM 高聚物才得到较为广泛的应用, 主要以比利时的 TC 调理剂 (terra cottem) 和印度的 Agri-CS 土壤调理剂最为成功^[5]。2000 年以后, 研究者利用农业或工业废弃物、矿石等作为原料, 研发出一系列环保且高效的产品, 如土壤结构调理剂、土壤保水剂等, 广泛应用于生产实践中, 以应对越来越严重的土壤与环境问题^[8]。

我国的土壤改良剂研究开始于 20 世纪 80 年代初期。例如中国农业大学张青文教授研制出的“康地宝”脱盐剂, 是通过生物络合、置换反应来清除土壤团粒上多余的 Na^+ 来改善盐渍化^[9]。中国农业科学院土壤肥料研究所研制的土壤改良剂“液态地膜”, 能吸附土壤中不同粒级的团粒, 达到改善退化土壤的效果^[10]。目前对土壤调理剂的分类并没有明确的规定, 根据前人的研究, 笔者将土壤调理剂按原料分类如表 1 所示。

2 土壤调理剂的作用

2.1 改良土壤物理性状 土壤物理性状包括土壤三相比、孔隙度、容重、水分等, 影响着土壤的通气状况、氧化还原性

基金项目 北京市农林科学院科技创新能力专项 (KJCX20170302, KJCX20190302); 北京市农林科学院植物营养与资源研究所科技能力提升专项 (KJCK2020302)。

作者简介 白博文 (1996—), 男, 辽宁丹东人, 硕士研究生, 研究方向: 环境矿物学与生命矿物学。* 通信作者, 研究员, 硕士, 硕士生导师, 从事土壤质量监测与评价、土壤改良与施肥、有机废弃物资源循环与利用研究。

收稿日期 2020-06-08

和含氧量,从而影响土壤中养分的转化速率和赋存状态、土壤水分的性质和运行规律以及植物根系的生长力和生理活动。不良土壤物理性状限制根系对水分、养分的吸收,影响根系正常生长。研究土壤调理剂是如何改善土壤物理性状这一问题逐渐引起学者的重视^[11]。

表 1 土壤调理剂的分类
Table 1 Classification of soil conditioners

序号 No.	原料 Raw material	土壤调理剂 Soil conditioner
1	天然无机物原料	沸石、蒙脱石、蛭石等
2	有机质原料	泥炭、炭等
3	废弃物原料	粉煤灰、高炉渣、污泥污水、豆科绿植、作物秸秆等
4	天然高分子化合物	多糖、纤维素、腐殖酸、木质素等
5	人工合成改良剂	聚丙烯酰胺、聚乙烯醇、聚乙二醇等
6	天然-合成共聚物改良剂	腐殖酸-聚丙烯醇、纤维素-丙烯酰胺等
7	生物改良剂	微生物、蚯蚓、生物控制剂等

2.1.1 改善土壤结构。土壤结构关系到土壤肥力,土壤结构与决定土壤肥力的化学因素(黏粒物质、酸碱度、氧化还原电位等)、生物因素(微生物、活性酶等)、物理因素(机械强度、通透性、温度、水分等)都密切相关^[7]。长期以来国内外众多学者在土壤调理剂的研究方面得出了较为成熟的成果:施用土壤调理剂可促进土壤团粒的形成,降低土壤容重,增大土壤孔隙度、通气和透水性,改善土壤结构,增加土壤肥力^[12-14]。

孙云秀等^[15]的田间试验表明,地表喷施土壤结构调理剂,可以增加 5 cm 耕层内大于 1 mm 的土壤水稳性团粒结构的形成率,提高土壤结构保持率 0.4 倍,同时减少容重 0.01~0.03 g/m³,增加孔隙度 8.0%~8.3%。霍习良等^[16]研究发现,施用沸石能促进土壤团聚体的形成,土壤总孔隙度增加 1.7%,容重降低 0.1 g/cm³,更有利于作物的生长。邵玉翠等^[17]研究表明,施用膨润土可使土壤容重降低 12.23%,孔隙度增加 12.28%。赵英等^[18]在砂土中添加不同比例的粉煤灰,检测出砂粒含量降低 11%~18%,而且土体中粉粒所占比例也显著提高,有效降低了砂土的砂粒含量。Blanco-Canqui^[19]研究表明,生物炭作为土壤调理剂可以降低土壤密度(3%~31%),增加土壤孔隙度(14%~31%),同时效果随着生物炭施用量的增加呈线性上升。

2.1.2 改善土壤蓄水能力,提高水分利用率。土壤结构调理剂与土壤混合,由于氢键和静电的作用,对电解质离子、有机分子、络合物等发生吸附,而促使分散的土壤颗粒团聚形成团粒,增加了土壤水中稳性团粒的含量及其稳定度^[20-22]。

1987—1989 年的试验证明,施用土壤结构调理剂,能显著增加土壤的水稳性团粒,而且 0.3% 的土壤结构调理剂能显著增加水稳性团粒,而且随着施用浓度的增加而增长^[23]。陈伏生等^[24]研究表明泥炭改良风沙土能提高土壤保水能力。姜淳等^[25]研究发现,沸石可使耕作层田间持水量比对照提高 5%~15%,最高接近 28%。沸石内部有较多孔隙,比表面积较大,从而能吸附更多的水分子,增加土壤的保水性,

并且沸石能够与土壤中的阳离子发生交换吸附^[26]。黄静^[21]研究表明,施入过氧化钙和生物炭后,外界因素对 20~60 cm 层的土壤的影响力逐渐减小,土壤趋于稳定,调理剂能很好地起到蓄水、保水作用。

2.1.3 改善土壤保肥能力,增加作物产量。疏松的土壤有利于土壤中的水、气、热等的交换及微生物的活动,及时通气排水,调节水气矛盾,协调水肥供应,并利于植物根系在土体中穿插生长。高永恒^[27]研究表明,施用土壤调理剂后,增加了草坪床土壤的有机质和全氮含量。郭和蓉等^[28]研究表明,营养型土壤调理剂能活化酸性土壤中的磷和钾,促进氮和钾的缓效化,有利于养分的保蓄,防止土壤养分的次生盐渍化与淋失,提高了养分利用率。沸石作为矿物型土壤调理剂能够在土壤中长期保持温度,并且持续为植物提供水分,同时可以促进氮素硝化作用,显著降低作物的硝酸盐含量^[29]。王志玉等^[30]利用土壤调理剂 MDM 检验其对水稻生长的影响,结果发现出苗率比对照组高 14.29%。唐泽军等^[31]在 PAM 对玉米的影响中发现,PAM 覆盖率 80% 及 60% 试验地的高秆(高于 1.60 m)和中秆(1.0~1.6 m)分别比对照多 13% 和 2%,鲜物质质量分别比对照提高 31% 和 24%。

2.2 改善土壤化学性状 土壤化学性状是指土壤的酸碱度、养分、阳离子吸附和交换性能、还原性物质的含量等,土壤酸碱度与土壤养分的有效性之间也存在一定相关性。同时,土壤改良剂对重金属离子具有良好的吸附固定能力,常被用作修复剂用于固定土壤中的重金属离子与吸附盐分;土壤胶体与土壤溶液之间时刻都在发生化学反应,土壤所有的外在性状表现全都是微观的土壤化学性质的反映,所以改善土壤化学性质是改良土壤的根本所在。

龙明杰等^[32]研究表明,中性和两性型聚合物调理剂均能增加土壤对养分离子的吸附量并提高土壤含肥料元素离子的抗淋溶作用,阴离子型聚合物增加土壤对 NH₄⁺、K⁺ 的吸附量及其抗淋溶作用,降低土壤对 NO₃⁻、PO₄³⁻ 的吸附量及其抗淋溶作用。Hailegnaw 等^[33]研究发现,8% 的生物炭施用量能够最有效地提高酸性土壤的 pH,并且 CEC 增幅可达到 35.4%,Ca²⁺ 的增幅高达 38.6%。关连珠等^[34]研究发现,沸石可吸附 NH₄⁺ 和 P,并且大部分是可解吸的。沸石也可活化土壤难溶性 P,改善土壤供钾状况。土壤中施用 PAM 可使土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量增加。PAM 与土壤混合能增加土壤对 NH₄⁺、NO₃⁻、K⁺、PO₄³⁻ 的吸附量,减少其淋溶损失。

2.3 改善土壤生物学性状 土壤生物是土壤生命力的重要部分,生物与微生物的多样性为维持土壤肥力、构造土壤结构做出了巨大贡献。土壤生物是土壤有机质的分解者、土壤营养循环的促进者。微生物群落机构失调会造成土传病害加重。微生物数量直接影响土壤的生物化学活性及土壤养分的组成与转化。

邢世利^[35]研究表明,施用土壤调理剂后耕层土壤各种细菌的数量以及土壤过氧化氢酶等多种酶的活性对比都有不同程度的提高。施用腐殖酸和蚯蚓肥料能改变优势盐碱

土细菌(酸杆菌)和真菌(担子菌和球孢菌)的丰度,提高玉米根系的耐盐性和土壤养分有效性,从而提高玉米地上部和根部的 N、P、K 含量^[36]。董晓伟^[37]用牡蛎壳制成的土壤调理剂施于大棚土壤,研究结果表明,牡蛎壳一定程度上影响了土壤酶活性,抑制了脲酶活性,提高了尿素的利用率,促进了淀粉酶活性,为土壤微生物提供了丰富的碳源,有效地提高了土壤肥力。孙蓟锋^[38]在研究麦饭石、硅钙矿、牡蛎壳和蒙脱石 4 种调理剂对土壤生物特性的影响时发现,施用牡蛎壳调理剂后,土壤碱性磷酸酶、脲酶和过氧化氢酶活性均得到显著提高;而施用硅钙矿调理剂后,土壤微生物总量与对照相比提高了 64.1%。张晓海等^[39]研究发现,禾本科秸秆改良土壤可增加长期施化肥的烟地土壤中微生物数量。姜井军等^[40]研究表明,生物炭的孔隙结构及其对水肥的吸附作用使其可称为土壤微生物的良好栖息环境,保护土壤中有益微生物,促进微生物繁殖。

3 土壤调理剂的应用

3.1 在酸化土地上的改良应用 土壤酸化是指土壤中氢离子增加,同时伴有铝溶出形成铝毒的过程,酸性土壤铝毒害是抑制作物生长和导致作物减产的主要原因。酸性土壤是指 pH 小于 6.5 的土壤的统称。影响土壤酸化的因素可分为自然因素和人为因素 2 个方面,其中人为因素起着决定性作用。土壤酸化面积呈加速扩大的趋势,已成为制约我国农业可持续发展的主要问题之一^[41-43]。

传统的石灰石化学调理剂虽然可以降低土壤酸度,但若长期使用则会加强土壤酸化程度,所以需要配合其他碱性肥料共同使用。某些矿物和工业废弃物同样可以改良土壤酸度,如白云石、粉煤灰和制浆污泥等。低温生物炭在施入茶园酸性土壤时,能发生明显的石灰化反应,使酸性土壤的 pH 和交换性阳离子显著提高^[44-45]。生物质灰(biochar ashes)在施入酸性土壤中,显著提高了 Ca、Mg、K 和 P 的含量^[46],并且有研究表明,生物质灰、骨粉和碱渣的联合使用,不仅能够降低土壤酸度,同时也能提高交换阳离子的含量^[47]。生物改良技术主要是运用肥和土壤中的一些生物来改善酸性土壤^[37, 48-49]。矫威^[50]的水稻季试验结果也表明,施用石灰类和氨基酸类调理剂均能不同程度提高土壤 pH。文星等^[51]研究表明,在酸性水稻土中分别施用碱性氧化物调理剂(生石灰、白云石粉、钙镁磷肥等)后,改变了原土壤 pH 增加幅度。敖俊华等^[52]的土壤培养试验表明,石灰用量与供试酸性土壤 pH、钙、镁、硅等的有效含量呈显著正相关。储祥云等^[53]研究也发现,在酸性土壤中施用石灰,能够提高有效磷的含量,而在土壤含磷高的情况下,施用石灰提高的作物产量主要源自土壤补钙。魏岚等^[54]通过盆栽试验发现,施用 0.67 g/kg 的碱渣处理,能使土壤 pH 提高 1.72,并能有效降低土壤中交换性铝的含量。张文玲等^[55]研究发现,生物质炭可有效吸附铵盐、硝酸盐、磷及其他水溶性盐离子。

3.2 在盐碱地上的改良应用 盐碱土也称盐渍土,是盐化或碱化土壤的总称。土壤含盐量大于 0.6% 的称为盐土,土壤胶体的交换 Na^+ 占总交换阳离子超过 20% 且 $\text{pH} > 9$ 的称为

碱土。我国盐碱土面积约为 $1.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 主要分布在滨海、黄淮海平原、东北松嫩平原、西北干旱半干旱地区和青新极端干旱荒漠等地^[56], 且呈整体恶化、面积增加的趋势,现已成为影响我国区域经济发展、生态恢复建设的重要因素之一^[57-58]。

郝秀珍等^[59]研究表明,早在 20 世纪 60 年代日本就已经将沸石用作土壤调理剂。左建等^[60]研究表明,施用沸石可使土壤中的碱化度降低,并对土壤 pH 起到缓冲作用。凹凸棒石为一种晶质水合镁铝硅酸盐矿物,具有独特的层链状结构特征,其独特的性质对盐碱地土壤改良具有重要的研究和推广意义^[61]。王相等^[62]将石膏与腐殖酸结合使用,发现石膏与腐殖酸质量配比为 9:1,施用量为 $3\ 000 \text{ kg/hm}^2$ 的条件下,可使 0~20 cm 土壤含盐量较对照下降 24.3%,棉花增产 24%。生物炭能显著降低玉米育苗期和收获期 0~20 和 20~40 cm 盐碱土层的 pH、盐分和 Na^+ 浓度,显著提高土壤有机质、CEC、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等。同时,生物炭能促使土壤中的水向下流动,将盐分从根区淋洗出来,并且最佳施用量为 20 t/hm^2 ^[63]。张黎明等^[13]研究表明,脱硫石膏在 6 年的施用期内对盐碱土的团聚体、pH 和 ESP 均有较大改善,并且经过改良的复垦盐碱地的有机碳含量增加至 22.5%^[64]。秸秆和脱硫石膏的联合使用降低了土壤的盐碱程度,秸秆提供了适宜的环境促使了脱硫石膏和土壤的反应,使 Na^+ 和 Cl^- 随水流到土层深部,且改良效果与脱硫石膏用量成正比^[65]。

3.3 在重金属污染土地上的修复应用 随着工业的发展,重金属污染土壤已经不能忽视。目前修复重金属污染土壤的方法有物理化学修复、微生物修复、植物修复等,而物理化学修复包括化学固化、土壤淋洗和电动修复等。其中的化学固化包括加入土壤调理剂,通过对重金属离子的吸附或(共)沉淀作用改变其在土壤中的存在形态,从而降低其生物有效性和迁移性^[66-67]。

在目前日渐受关注的重金属污染上,土壤调理剂也能发挥重要的作用。镉(Cd)对土壤和农作物的污染是一个无处不在的环境问题,王凯荣等^[68]研究重金属污染土壤施用不同土壤调理剂对降低水稻糙米铅镉含量的作用发现,碱性煤渣的改良效果最突出,糙米 Pb、Cd 含量降低到国家食品卫生标准允许的含量以下。在土壤中添加石膏可以促进土壤中硫化物的形成,能够显著降低 Cr 和 Pb 的浓度(6 个月后分别降低 24% 和 64%)^[69]。龚海军等^[70]研究发现,施用土壤调理剂能降低土壤有效态 Cd、Pb 及水稻糙米 Cd、Pb 含量。王毅等^[71]对硫代蒙脱石用于铅、汞吸附试验进行了研究并取得了较好的效果,对铅离子饱和吸附值达 70 mg/g ,而对汞离子的饱和吸附值达 65 mg/g 。麦饭石经风化、蚀变而形成多孔海绵状结构,对重金属离子也同样具有强大的吸附性能,其对砷、汞、铅、铬等重金属的吸附可达 96%^[72-73]。同时有研究表明,磷酸盐作为土壤调理剂可以有效降低土壤砷污染,特别是在中性条件下,可以除去污染土壤中 80% 的砷^[74-75]。生物炭可以作为污染土壤的一种化学钝化剂,相比石灰具有更稳定的效果。通过吸附、沉淀、络合、离子交换等一系列反

应,降低污染物的可迁移性和生物可利用性,并且越来越受到学者关注^[76]。生物炭对铅的固化效果较好,随着生物炭的比例和试验时间的增加,固化效果增强^[77]。Liu等^[78]研究了我国西南地区铊(Tl)污染土壤,在施用了由不同硅酸盐矿物合成的碱性改良剂 SMA 后,土壤 pH 上升 0.46~2.13 个单位,土壤中 Tl 的含量明显降低,并且使 Tl 从活性成分转化为残留组分而失去活性。

4 问题与展望

土壤调理剂具有改良土壤结构、保水保肥和改善土壤微生物环境等优点,但是在环境保护、研发推广等方面还有许多问题亟待探讨:天然土壤调理剂改良效果较为局限,废弃物和聚合物作为调理剂造成潜在的环境风险很大等问题;在农业推广方面,土壤调理剂的效果较好但是成本高;产品研发材料较为单一,导致产品土壤调理剂质量和效果不稳定;对土壤调理剂的成分分类模糊,对学者的研究造成一定困扰。

对于优质土壤调理剂的研发,应该注意以下几点:①我国退化土壤类型多样,在研究中应该针对不同的土壤质地、酸碱度和农作物进行研制,进一步提高土壤调理剂的针对性和创新性,同时达到改良土壤以及作物增产等要求。②土壤调理剂应该能够同时实现保水保肥,改善根系生长环境和土壤结构等功能。③现有部分土壤调理剂具有一定的环境污染性,易对土壤造成二次污染。所以在研发过程中,应注意改良土壤后残留组分对土壤不会造成污染。总之,土壤调理剂的生产技术及应用研究不断发展,使土壤调理剂在遏制土壤退化、改良中低产田、增容扩蓄等方面的应用越来越广泛。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 徐福银. 土壤调理剂及其在农业生产中的应用[C]//中国土壤学会. 面向未来的土壤科学(下册)——中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. 成都:电子科技大学出版社,2012:39-41.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王英男. 多功能土壤调理剂应用效果研究[D]. 福州:福建农林大学,2017.
- [6] 韩小霞. 土壤结构改良剂研究综述[J]. 安徽农学通报,2009,15(19):110-112.
- [7] 杨丽丽,董肖杰,郑伟. 土壤改良剂的研究利用现状[J]. 河北林业科技,2012(2):27-30,37.
- [8] 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.
- [9] 石国元,郭良,刘忠军,等. “康地宝”脱盐剂改良重盐碱地试验初报[J]. 新疆农垦科技,2005,28(6):48-49.
- [10] 刘芳,乔英云. 新一代腐植酸多功能可降解液态膜技术有突破[J]. 腐植酸,2007(2):61.
- [11] 李晨昱,卢树昌,王茜. 土壤调理剂在农业领域研究现状、问题及前景[J]. 北方园艺,2018(14):154-160.
- [12] 骆国,熊德中. 土壤调理剂应用效应研究进展[J]. 安徽农业科学,2015,43(13):77-79,86.
- [13] 张黎明,邓万刚. 土壤改良剂的研究与应用现状[J]. 华南热带农业大学学报,2005(2):32-34.
- [14] 冯浩,吴淑芳,吴普特. 高分子聚合物对土壤物理及坡面产流产沙特征的影响[J]. 中国水土保持科学,2006,4(1):15-19.
- [15] 孙云秀,张奇珠. 土壤结构改良剂的改土效果及其使用的研究[J]. 干

- 旱区研究,1988,5(3):51-53.
- [16] 霍习良,周恩湘,姜淳,等. 沸石改良土壤结构性状的研究[J]. 河北农业大学学报,1991,14(2):20-24.
- [17] 邵玉翠,张余良,李悦,等. 天然矿物改良剂在微咸水灌溉土壤中应用效果的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):100-103.
- [18] 赵英,喜银巧,董正武,等. 土壤改良剂在沙漠治理中的应用进展[J]. 鲁东大学学报(自然科学版),2019,35(1):51-58.
- [19] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil science society of America journal,2017,81(4):687-711.
- [20] 徐晓敏,吴淑芳,康倍铭,等. 五种天然土壤改良剂的养分与保水性研究及评价[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(9):85-89.
- [21] 黄静. 改良剂对旱地红壤保水保肥效果的影响[D]. 南昌:南昌工程学院,2014.
- [22] 颜朝霞,陈红蕾. 关于多功能土壤改良保水剂的应用研究[J]. 甘肃科技纵横,2018,47(11):27-29.
- [23] 汪德水,张美荣,蔡典雄. 乳化沥青作为土壤结构改良剂改土保水增产的研究[J]. 石油沥青,1990,4(3):21-24.
- [24] 陈伏生,曾德慧,王桂荣. 泥炭和风化煤对盐碱土的改良效应[J]. 辽宁工程技术大学学报,2004,23(6):861-864.
- [25] 姜淳,周恩湘,霍习良,等. 沸石改土保肥及增产效果的研究[J]. 河北农业大学学报,1993,16(4):48-52.
- [26] 姜新福,孙向阳,关裕沁. 天然沸石在土壤改良和肥料生产中的应用研究进展[J]. 草业科学,2004,21(4):48-51.
- [27] 高永恒. 土壤改良剂对多年生黑麦草生长特性和土壤理化性质的影响研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2004.
- [28] 郭和睿,陈琼贤,郑少玲,等. 营养型土壤改良剂对酸性土壤中钾的调节及玉米吸钾量的影响[J]. 土壤肥料,2004(2):20-22.
- [29] EPRIKASHVILI L, ZAUTASHVILI M, KORDZAKHIA T, et al. Intensification of bioproductivity of agricultural cultures by adding natural zeolites and brown coals into soils[J]. Annals of agrarian science,2016,14(2):67-71.
- [30] 王志玉,刘作新. 土壤改良剂 MDM 对草甸碱土和水稻生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(2):31-34.
- [31] 唐泽军,雷廷武,赵小勇,等. PAM 改善黄士水土壤环境及对玉米生长影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):216-219.
- [32] 龙明杰,曾繁森. 高聚物土壤改良剂的研究进展[J]. 土壤通报,2000,31(5):199-202,223.
- [33] HAILEGNAW N S, MERCL F, PRAČKE K, et al. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment[J]. Journal of soils and sediments,2019,19(5):2405-2416.
- [34] 关连珠,张继宏,颜丽,等. 天然沸石增产效果及对氮磷养分和某些肥力性质调控机制的研究[J]. 土壤通报,1992,23(5):205-208.
- [35] 邢世利. 微生物土壤改良剂在农业中的应用[J]. 河北农业科技,2007(6):45-46.
- [36] LIU M L, WANG C, WANG F Y, 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.
- [37] 董晓伟. 牡蛎壳土壤调理剂对大棚土壤理化、生物性状影响的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [38] 孙蓟峰. 几种矿物源土壤调理剂对土壤养分、酶活性及微生物特性的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2012.
- [39] 张晓海,邵丽,张晓林. 秸秆及土壤改良剂对植烟土壤微生物的影响[J]. 西南农业大学学报,2002,24(2):169-172.
- [40] 姜井军,郭端,陈伶俐. 生物炭对酸性土和盐碱土改良效果的研究进展[J]. 农业开发与装备,2014(11):30-32.
- [41] 李忠意. 重庆涪陵榨菜种植区土壤酸化特征及其改良研究[D]. 重庆:西南大学,2012.
- [42] 汪裕. 酸性土壤改良剂在水稻—油菜轮作上的应用效果[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
- [43] 何健云. 改性脱硫灰对酸性土壤的改良及重金属污染修复研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [44] WANG L, BUTTERLY C R, WANG Y, et al. Effect of crop residue biochar on soil acidity amelioration in strongly acidic tea garden soils[J]. Soil use and management,2014,30(1):119-128.
- [45] YU H W, ZOU W X, CHEN J J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review[J]. Journal of environmental management,2019,232:8-21.
- [46] SHI R Y, LI J Y, JIANG J, et al. Characteristics of biomass ashes from different materials and their ameliorative effects on acid soils[J]. Journal of

- environmental sciences, 2017, 55(5): 294–302.
- [47] SHI R Y, LI J Y, XU R K, et al. Ameliorating effects of individual and combined application of biomass ash, bone meal and alkaline slag on acid soils[J]. Soil and tillage research, 2016, 162: 41–45.
- [48] 黄庆, 林小明, 柯玉诗, 等. 多元酸性土壤调理剂在辣椒上的施用效果研究[J]. 广东农业科学, 2007, 34(1): 42–44.
- [49] 蓝佩玲, 廖新荣, 李淑仪, 等. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土上的农作价值与利用原理[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1135–1138.
- [50] 矫威. 不同改良剂对作物生长发育及酸性土壤理化性状的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [51] 文星, 李明德, 吴海勇, 等. 土壤改良剂对酸性水稻土 pH 值、交换性钙镁及有效磷的影响[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 618–623.
- [52] 敖俊华, 黄振瑞, 江永, 等. 石灰施用对酸性土壤养分状况和甘蔗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(15): 266–269.
- [53] 储祥云, 黄昌勇, 何振立. 磷肥和石灰对酸性土壤上一年生黑麦草生长的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(1): 19–22.
- [54] 魏岚, 杨少海, 邹献中, 等. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(1): 77–81.
- [55] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153–157.
- [56] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 158–159, 177.
- [57] 贾敬敦, 张富. 依靠科技创新推进我国盐碱地资源可持续利用[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 1–7.
- [58] 刘瑞敏. 盐渍化土壤改良剂筛选和调控机理及水盐运移模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [59] 郝秀珍, 周东美. 沸石在土壤改良中的应用研究进展[J]. 土壤, 2003, 35(2): 103–106.
- [60] 左建, 孔庆瑞. 沸石改良碱化土壤作用的初步研究[J]. 河北农业大学学报, 1987, 10(3): 58–64.
- [61] 霍成立. 凹凸棒石基复合功能材料的应用基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [62] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 327–332.
- [63] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. Science of the total environment, 2020, 722: 1–9.
- [64] WANG S J, CHEN Q, LI Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, conservation and recycling, 2017, 121: 82–92.
- [65] ZHAO Y G, LI Y, WANG S J, et al. Combined application of a straw layer and flue gas desulphurization gypsum to reduce soil salinity and alkalinity[J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 226–235.
- [66] 王学刚, 王光辉, 刘金生. 矿区重金属污染土壤的修复技术研究现状[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(4): 29–31.
- [67] 朱雁鸣, 韦朝阳, 冯人伟, 等. 三种添加剂对矿冶区多种重金属污染土壤的修复效果评估——大豆苗期盆栽实验[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1277–1284.
- [68] 王凯荣, 张玉烛, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 476–481.
- [69] VINK J P M, HARMSSEN J, RIJNAARTS H. Delayed immobilization of heavy metals in soils and sediments under reducing and anaerobic conditions; consequences for flooding and storage[J]. Journal of soils and sediments, 2010, 10(8): 1633–1645.
- [70] 龚海军, 刘昭兵, 纪雄辉, 等. 新型土壤改良剂对水稻吸收累积 Cd、Pb 的影响初探[J]. 湖南农业科学, 2010(5): 50–53.
- [71] 王毅, 王艺, 王恩德. 改性蒙脱石吸附 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(4): 565–567.
- [72] 王苏新. 麦饭石特性及作用分析[J]. 江苏陶瓷, 2003, 36(1): 1–2.
- [73] 于化泓, 李力桦. 麦饭石吸附除蜂胶中重金属铅的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(12): 99–100.
- [74] ALAM M G M, TOKUNAGA S, STAGNITTI F. Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants[J]. Journal of environmental science and health: Part A, 2007, 42(4): 447–451.
- [75] CHRYSOCHOOU M, DERMATAS D, GRUBB D G. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization; The unclear role of phosphate[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 144(1/2): 1–14.
- [76] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075–2081.
- [77] CAO X D, MA L N, LIANG Y, et al. Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar[J]. Environmental science & technology, 2011, 45(11): 4884–4889.
- [78] LIU J, REN J M, ZHOU Y C, et al. Effects and mechanisms of mineral amendment on thallium mobility in highly contaminated soils[J]. Journal of environmental management, 2020, 262: 1–8.

(上接第 13 页)

- [61] CEDERLUND H, WESSÉN E, ENWALL K, et al. Soil carbon quality and nitrogen fertilization structure bacterial communities with predictable responses of major bacterial phyla[J]. Applied soil ecology, 2014, 84: 62–68.
- [62] 张海芳. 贝加尔针茅草原植物与土壤微生物群落对氮素和水分添加的响应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [63] 郁培义, 朱凡, 王志勇, 等. 氮添加对樟树林红壤微生物群落代谢功能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(3): 70–74.
- [64] 吴松芹, 汪成忠, 李梦莎. 模拟氮沉降对滨海湿地土壤微生物功能多样性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1153–1158.
- [65] NEWMAN E I. Competition and diversity in herbaceous vegetation[J]. Nature, 1973, 244(5414): 310–311.
- [66] WEINER J. Asymmetric competition in plant populations[J]. Trends in ecology & evolution, 1990, 5(11): 360–364.
- [67] 张杰琦. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [68] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838–1844.
- [69] HOLLAND E A, COLEMAN D C. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem[J]. Ecology, 1987, 68(2): 425–433.
- [70] 王晶晶, 樊伟, 崔琨, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8361–8373.
- [71] 倪壮, 聂彦霞, 欧阳胜男, 等. 氮添加对东南亚常绿阔叶林土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3202–3209.
- [72] 张镡铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1–8.
- [73] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459–462.
- [74] XU W, ZHENG K, LIU X J, et al. Atmospheric NH_3 dynamics at a typical pig farm in China and their implications[J]. Atmospheric pollution research, 2014, 5(3): 455–463.
- [75] YU C Q, ZHANG Y J, CLAUS H, et al. Ecological and environmental issues faced by a developing Tibet[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(4): 1979–1980.
- [76] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau[J]. Ecology letters, 2004, 7(12): 1170–1179.
- [77] KLEIN J A, HARTE J, ZHAO X Q. Decline in medicinal and forage species with warming is mediated by plant traits on the Tibetan Plateau[J]. Ecosystems, 2008, 11(5): 775–789.
- [78] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production[J]. Nature communications, 2017, 8: 1–7.