土壤改良剂的应用现状与研究进展

刘双月，王　兴，李　珂，王　婷，傅光华，华　佳，刘　裕

（湖北富贵象农业科技有限公司，湖北 武汉　430000）

［摘　要］土壤退化已成为制约农业可持续发展的关键因素，主要表现为酸化、盐渍化、板结及污染等问题。土壤改良剂作为改善退化土壤的重要物质，近年来在调控土壤理化性质、优化微生物环境和提升作物生产力方面发挥了显著作用。综述无机、有机、生物及复合型土壤改良剂的类型与作用机制，总结其在不同障碍土壤及主要作物体系中的应用进展。同时指出当前存在的产品标准不统一、单一材料效果有限、施用技术缺乏规范等问题。未来土壤改良剂的发展应聚焦精准化与区域化施用、多功能复合化材料创新以及生态安全的长期评估。

［关键词］土壤改良剂；土壤退化；作用机制；应用进展；发展趋势

［中图分类号］S156.2　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）12-0107-07

Current status and research progress of soil conditioners

LIU Shuangyue, WANG Xing, LI Ke, WANG Ting, FU Guanghua, HUA Jia, LIU Yu

(*Hubei Foragri Agricultural Technology Co., Ltd., Wuhan* 430000, *China*)

Abstract: Soil degradation has become a key factor restricting sustainable development of agriculture, mainly manifested in problems such as acidification, salinization, compaction and pollution. Soil conditioners, as an important substance to improve degraded soils, have played a significant role in recent years in regulating soil physicochemical properties, optimizing the microbial environment and enhancing crop productivity. The types and action mechanisms of inorganic, organic, biological and composite soil conditioners are reviewed, and their application progress in different obstacle soils and major crop systems are summarized. It also points out current problems such as inconsistent product standards, limited effectiveness of single materials, and lack of standardized application techniques. In future, the development of soil conditioners shall focus on precise and regionalized application, innovation of multifunctional composite materials and long-term assessment of ecological safety.

Key words: soil conditioner; soil degradation; action mechanism; application progress; development trend

目前，全球约30%的土壤因盐碱化、酸化、污染、板结和侵蚀而被归类为中度至重度退化，其中52%的农业用地已受到中度至重度退化的影响。据预测，土壤退化将导致粮食产量每年下降约1%[1]。未来25年，持续的土壤退化可能导致全球粮食产量下降12%，粮食价格上涨高达30%，日益威胁全球粮食安全[2]。

土壤质量被认为是维持环境健康和生物多样性、维持生物生产力的可持续能力[3]。为改良土壤，提高土壤性状，前人研究采用添加秸秆生物炭、稻壳生物炭、生物质灰、腐植酸、微生物菌剂等土壤改良物质改善果园土壤质量[4-7]。有研究表明，土壤改良剂能显著提高土壤微生物数量，改善土壤性状[8]。因此，如何有效提升土壤质量、修复退化土壤并持续提高土壤生产力，已成为学术界关注的焦点。本文在国内外相关研究的基础上，系统综述土壤改良剂的分类、作用机制、应用现状及研究进展，并展望其未来发展趋势，以期为该领域的进一步研究提供参考。

1　土壤改良剂的类型与特性

1.1　无机土壤改良剂

无机土壤改良剂主要包括石灰、石膏、粉煤灰和硅酸盐等矿物质材料。石灰具有资源丰富、易

［收稿日期］2025-10-10

［作者简介］刘双月（1999-），女，湖北孝感人，农艺师，主要从事新型肥料研发的农艺与生测评价工作。

［通信作者］刘　裕（1969-），男，湖北武汉人，正高级工程师，从事化工工艺设计、新产品开发及应用研究。

得、成本低廉等优势，可以提高土壤pH值，促进金属碳酸盐、氧化物或氢氧化物沉淀，降低金属溶解度[9]。石膏通过其提供的钙离子置换土壤中的钠离子，有效降低盐碱土的pH值，并促进土壤团聚体形成，从而改善土壤结构、提高渗透性以利于排盐[10]。粉煤灰通过改变土壤质地来调节容重、孔隙度、水力传导率、孔隙比和持水量，从而影响植物生长、养分保持和生物活性[11]。硅酸盐及其副产物可用来改良土壤酸度和提高作物产量。单独施用水溶性硅酸盐肥料或与足量推荐剂量的矿物肥料配合施用，可以提高土壤磷的有效性、土壤pH值和交换性酸度，同时增加土壤持水能力，并改善养分保持力[12]。

1.2 有机土壤改良剂

与矿物改良剂相比，有机土壤改良剂能够以可持续的方式改善土壤的物理、化学和生物性质。有机土壤改良剂主要来源于动植物残体及其再加工产物，如农家肥、堆肥和生物炭等。粪肥和堆肥后的有机废弃物已被广泛应用，并通过可持续的土壤管理措施，实现土壤修复、养分状况改善和环境保护的目标。农家肥用作有机肥具有一定优势，它是干旱条件下微生物增强其生长促进活性所需的有机碳来源，并通过补充土壤有机质、提供大量和微量营养元素来改善土壤健康和可持续性[13]。生物炭具有容重低、吸附能力强、孔隙结构丰富、比表面积大等特点，尤其具有稳定性强等优势，成为土壤培肥、固碳、水土修复的有效途径[14]。生物炭可以封存碳，并通过中和土壤酸度、提高阳离子交换容量和增强微生物功能来改善土壤质量[15]。乳酸钙是同时含有钙离子和有机酸的有机钙盐，可以通过生物技术方法从农业废弃物中提取，是一种潜在的盐碱土壤改良剂。乳酸钙通过桥接和氢键作用，促进更稳定的土壤团聚体形成，从而改善土壤结构。此外，它还能促进有机矿物复合物的形成，增加土壤碳储量，最终提高土壤肥力[16]。有机改良剂可以减缓盐碱生态系统土壤有机碳的流失，并增强总碳的封存[17]。

1.3 生物土壤改良剂

生物土壤改良剂是指含有对植物生长有益的微生物或其代谢产物的制剂，主要包括微生物菌剂、生物有机肥和复合微生物肥等。微生物制剂作为绿肥、土壤净化剂和土壤改良剂已在全球70多个国家得到推广应用，比传统化学肥料更适合土壤施用[18]。其中，有机肥中掺加微生物制剂被认为是通过调节土壤微生物群落结构来改善土壤质量和促进植物生长的有效方法[19]。生物有机肥富含大量功能微生物，可以通过激活土壤养分、增加土壤总有机碳和土壤水溶性碳含量来改善土壤环境[20]。此外，生物有机肥可以改善土壤微生物多样性、土壤酶活性以及根际土壤微生物群落的数量和结构[21]。植物促生根际细菌可以通过直接和间接的作用方式促进植物生长。据观察，大多数菌株通过改变根际土壤结构间接促进植物生长，包括产生植物生长调节剂、溶解矿物质以及固定大气中的氮[22-23]。生物有机改良剂能有效缓解非生物胁迫，促进农作物生长和产量提高，降低土壤交换性钠离子含量，提高土壤肥力[24]。

1.4 新型多功能复合土壤改良剂

新型多功能复合土壤改良剂包括生物炭类土壤改良剂、有机无机复合肥类土壤改良剂和微生物菌剂类土壤改良剂等。改性生物炭凭借其高孔隙率、大表面积等特性，在改良土壤时能有效改善土壤透气性、增加持水能力，为微生物提供栖息地，提高酶活性并促进养分保留和利用[25]。研究表明，有机肥与无机肥配施，即使减少磷肥投入，也能维持甚至提高土壤磷素活性和农作物产量[26]。有机无机复合肥类土壤改良剂能改变土壤中盐离子组成比例，有效地降低和抑制盐碱土壤盐分积累，防止土壤碱化[27]。土壤微生物是磷活化过程和调节磷生物有效性的主要驱动因素[28]。解磷细菌可以刺激土壤功能微生物，从而提高土壤磷的生物有效性，促进植物吸收利用[29]。根瘤菌与豆科植物共生，通过生物固氮作用将大气中的氮转化为植物可直接利用的形态。

2 土壤改良剂的作用机制

2.1 物理改良机制

有机改良剂可通过影响土壤水分储存和保持、土壤温度、表土聚集和稳定性以及孔隙度等来改善土壤质量。有机秸秆通过改善土壤结构、提高孔隙度和质量，并显著调节微生物的多样性、丰度与群落演替，进而对稻田土壤碳循环产生影响，最终调控土壤养分[30-31]。生物炭具有发达的孔隙结构、较大的比表面积、较强的吸附能力和较高的稳定性，具备改善土壤质量的潜力[14]。研究表明，施用生物炭可显著增加土壤水含量、总有机碳和总氮含量，提高土壤肥力和酶活性，并显著降低土壤无机氮含量[32]。

2.2 化学改良机制

化学改良剂不仅可以降低土壤盐分和碱度，还

可以增强土壤胶体的聚集和结构。石膏是一种常用的化学改良剂，它通过Ca^{2+}离子与CO_3^{2-}反应生成碳酸钙来降低土壤碱度。同时，Ca^{2+}离子取代土壤中可交换的Na^+，从而降低土壤盐分[33]。其他化学改良剂，如腐植酸、酸化生物炭和硫酸，也被用于修复盐渍土[34]。这些改良剂通过平衡酸碱反应促进土壤中方解石的溶解[35]。该机制提高了土壤溶液中Ca^{2+}和H^+离子的浓度，从而降低了土壤盐分和碱度，最终改善了土壤结构质量。

2.3　生物改良机制

土壤为微生物提供了复杂的层次性生境，例如孔隙和团聚体[36]。不同团聚体组分的特定微环境条件影响微生物群落和土壤有机碳的稳定性[37]。生物改良剂能显著提升土壤微生物的丰富度。具体而言，生物炭、有机肥复配脱硫石膏以及秸秆等改良剂，可使耕层土壤中的细菌、放线菌和真菌数量分别增加1.5～8.8倍、1.2～10.0倍和1.1～4.4倍[38]。这些微生物在其代谢过程中产生的有机酸及其他产物，能有效调节主要的生态系统过程，如土壤养分循环、有机质形成和分解，促进土壤结构的改善[39]。

3　土壤改良剂的应用现状

3.1　在不同障碍土壤中的应用

3.1.1　在酸化土壤和盐碱地中的应用

持续的土壤酸化是土壤退化最严重的问题之一，对粮食安全构成重大威胁。目前，全球酸性土壤面积约为39.5亿hm^2，酸性耕地约占全球耕地总面积的50%，土壤酸化程度和受影响面积均呈持续上升趋势[40]。通过施用适当的土壤改良剂，包括有机和无机材料，可以有效缓解土壤酸化[41]。施用石灰、碱渣、磷石膏等无机材料可提高土壤pH值、交换性钙和盐基饱和度，降低交换性酸和铝，从而提高作物产量[42]。在一项长达20年的田间试验中，施用有机肥使土壤pH值每年增加0.04个单位，w（有机质）每年增加0.6 g/kg，促进了碳封存和土壤肥力提高[43]。目前已证实，在酸性土壤中添加生物炭是提高土壤pH值和微生物丰度、促进氮磷循环以及土壤生态系统正常运作的有效方法[44-45]。

根据联合国粮食及农业组织的数据，全球超过8.33亿hm^2土地受到盐渍化影响，超过10%的农田面临盐渍化问题。石膏和生物炭是改良盐碱土最常用的材料。石膏通过增加盐渍土中的Ca^{2+}含量并降低交换性钠含量，从而显著改善土壤团聚体结构、容重、渗透性及碱化程度。生物炭富含有机碳，能够促进多价阳离子与土壤颗粒结合，从而加速盐碱土团聚体的形成[46]。生物炭可以增强土壤毛细管持水能力，减少水分流失，提高土壤水分利用效率[47]。钙基膨润土可与盐碱土中的游离Na^+发生阳离子交换，降低土壤中可溶性Na^+浓度并释放Ca^{2+}。释放出的Ca^{2+}与盐碱土中的矿化剂发生反应，固定CO_3^{2-}并降低其溶解度，将重度盐碱地转化为优质耕地[48]。此外，以凝灰岩石粉为主要成分的复合土壤改良剂通过提供活性Al_2O_3和SiO_2，能有效降低滨海盐碱土pH值，提升速效钾浓度，同时增加有机质与有效磷含量，从而促进作物生长[49]。

3.1.2　在板结土壤上的应用

土壤板结严重威胁土壤健康和生态系统服务，因其改变土壤结构相关特性，导致土壤孔隙空间减少、容重增加，进而影响粮食、纤维和生物能源的生产。针对土壤板结问题，施用堆肥改良剂可通过促进土壤颗粒团聚来构建稳定结构，进而实现降低容重、提高孔隙度以及增强持水与入渗性能的综合改良效果[50]。聚丙烯酰胺与石灰或石膏结合作为土壤改良剂，可通过减少土壤侵蚀和物质流失来间接缓解板结，有助于维持表层土壤的结构稳定性[51]。生物炭凭借其轻质多孔的特性，能够增加土壤表面积和碳氮含量，为有益微生物提供栖息地，从而减轻土壤板结压力，改善土壤结构以实现农作物高产。研究发现，每平方米土壤施用200 g酵母和200 g葡萄糖特定组合的微生物肥料，可以降低浅层压实土壤的容重，增加土壤养分，并促进草坪、盐碱化沿海地区和高寒草甸的草类生长[52]。

3.1.3　在重金属污染土壤中的应用

重金属会破坏土壤结构、微生物活动和生态系统平衡，并通过作物积累危害人类健康。施用土壤改良剂可有效固定重金属，降低其生物有效性，对污染土壤的安全利用至关重要。锰改性竹炭作为土壤改良剂，可有效固定化Pb、As、Cd、Cu等重金属，通过抑制其迁移和降低活性实现对污染土壤的修复[53]。外源施用黄腐酸可通过固定土壤中的锰、铜，并促进钙吸收，从而促进苹果生长、提升品质与产量。它能改善土壤微生态环境，提高微生物多样性并强化植株谷胱甘肽代谢解毒功能[54]。鸡粪与生物炭结合处理可以改善土壤质量，显著降低有效态Cr和Ni的含量，略微降低有效态Cd、Pb的含量，维持茶叶产量，提高茶叶品质[55]。生物有机肥通过增加有益微生物数量、提高真菌群落稳定性并改变关键类群，优化了微生物互作关系，进

而增强植物对重金属和盐胁迫的适应性，促进其生长，最终显著提升植物修复重金属污染土壤的效率[56]。石墨烯在减少土壤养分和重金属淋失方面优于传统改良剂，其巨大的比表面积和独特结构能强力吸附并固定重金属离子，有效防止其向下迁移，兼具环境友好潜力[57]。

3.2 在不同作物体系中的应用

3.2.1 粮食作物

土壤改良剂的施用优化了土壤理化性质，并通过刺激微生物活动与土壤酶活性来提升保肥能力，为粮食作物的生长及增产提供了良好的条件。4年定位试验表明，有机–无机改良剂与化肥复配，可使小麦、玉米产量分别提高54.16%和24.26%。其通过促进砂质潮土大团聚体形成、增加微生物量，有效提升了土壤肥力，实现农作物持续增产[58]。通过施用酸性土壤改良剂，土壤pH得以显著提高，水稻产量也随之增加了8.95%～82.6%。通过作物增产、碳固定和温室气体减排的综合作用，实现了每公顷798美元的收入[59]。在低铝土壤中，施用石灰不仅能通过提高养分有效性来增加作物产量，更能直接改善作物品质[60]。土壤改良剂通过创造健康的根系环境、消除生长胁迫、提升肥料效率并改善作物品质，成为保障粮食安全与农业可持续发展的关键环节。

3.2.2 经济作物

土壤改良剂的应用能显著提升萝卜和紫甘蓝在各类盐渍化土壤上的产量。此外，随着施用量增加，它还能有效降低萝卜肉质块根和紫甘蓝叶球中的硝酸盐含量，同步改善作物品质[61]。研究表明，施用2%的酸改性茶渣生物炭能显著促进红洋葱生长，其中硝酸与硫酸改性分别使植株总干质量增加约30%和27%。此外，该材料可使红洋葱对铅、镉、铬的吸收降低80%以上，能有效阻控重金属迁移[62]。生物土壤改良剂通过其有益微生物显著提升经济作物的生长、产量及抗逆性。接种日本慢生根瘤菌可使大豆在低投入条件下增产18%～30%，氮吸收提高40%以上[63]。施用哈茨木霉与荧光假单胞菌则让番茄增产19%～24%，同时将尖镰孢菌引起的病害发病率降低32%，展现出增产与抗病的双重优势[64]。

4 土壤改良剂的主要问题及发展趋势

4.1 目前存在的主要问题

4.1.1 产品标准不统一、质量不稳定

目前市场上的土壤改良剂种类繁多，但产品质量和有效成分含量差异显著，缺乏统一的行业标准和评价体系。一方面，不同来源的原料在化学性质、生态安全性及长期稳定性上差别很大；另一方面，企业对有效成分的标注方式不一致，导致农户难以判断产品有效性与适用性。此外，目前国内土壤改良剂缺乏长期定位试验数据，产品效果受土壤类型、施用方式和原料稳定性影响较大，无法建立可靠的质量认定体系[65]。

4.1.2 单一改良剂效果有限，缺乏复合机制研究

多数土壤改良剂仍以石灰、石膏、生物炭或单一微生物菌剂为主，而实际障碍土壤往往由酸化、盐渍化、板结和养分失衡等多重因素耦合形成，单一材料难以实现综合调理效果。现有研究普遍缺乏“有机–无机–微生物复合材料”的机制探索，材料间的协同机制、界面反应、微生物群落重塑过程及其长期稳定性仍不明确，导致改良效果在不同地区差异较大，使得复配型土壤改良剂开发进展缓慢，也限制了更高效、系统化产品的推广应用。

4.1.3 推广应用不足，施用技术缺乏规范

在实际生产中，农户普遍对土壤改良剂的性质、作用机制及施用方式缺乏认知，往往将其与肥料混为一谈，导致施用量不足或方法不当，影响改良效果。同时，不同障碍土壤的修复需要差异化施用深度、施用时期及配套耕作管理方式，但目前尚缺乏权威的技术规范和区域化指导手册。此外，示范推广体系薄弱、缺少长期动态监测与评价，使得土壤改良剂难以形成可复制的技术路线，制约了规模化推广。

4.2 土壤改良剂的发展趋势

4.2.1 精准化、区域化与定制化成为主流方向

土壤改良剂是确保经济作物实现高产优质从而获取最大化经济效益的核心技术支撑。未来土壤改良剂将从传统的“普适型产品”迈向“基于诊断的精准化方案”。随着土壤检测、大数据、遥感监测及数字农业的发展，可以依据土壤类型、障碍因子、作物需求和区域特征制定差异化改良策略，实现从经验施用向科学处方施用转变。这种精准化施用将显著提高材料利用率、缩短改良周期，并提升投入产出比，使土壤改良迈向精准农业时代。

4.2.2 多功能复合化与协同机制成为核心创新方向

新一代土壤改良剂将朝“有机质–矿物材料–微生物”的复合体系发展，通过材料协同实现物理、化学及生物结构的全面改善。复合化土壤改良剂不仅提高效果稳定性，也能形成更完整的土壤健康提

升路径。

4.2.3 材料绿色化、智能化与长期生态安全成为研究重点

为了适应绿色农业与“双碳”目标，未来土壤改良剂将更多采用低碳、可再生生态友好材料，如生物炭、改性硅酸盐、生物基聚合物及农业废弃物资源化产品。同时，结合智能装备实现精准施用，提高效率。更重要的是，随着改良剂大规模推广，长期生态风险评估将成为核心研究方向。

5 总结与展望

土壤改良剂在改善酸碱化、盐渍化、板结与重金属污染等多类型障碍土壤方面发挥着重要作用，是提升耕地质量、保障农作物稳产高产和推进农业绿色转型的关键技术路径。尽管当前各类改良剂在材料类型、作用机制与应用成效方面取得了显著进展，但仍面临产品标准不统一、改良机制研究不足、应用技术规范缺乏以及长期生态安全评估不足等突出问题。

未来研究应更加注重精准化与区域化诊断指导下的定制化应用，加强有机–无机–微生物等多功能复合材料的研发与协同机制解析，推进土壤改良剂材料的绿色化、低碳化与资源化利用，并构建基于数字农业的智慧化施用体系。同时，需要开展长期定位监测，系统评估不同改良策略对土壤生态功能、微生物网络和碳循环的影响，以建立科学规范的评价体系和可持续改良模式。通过技术创新、机制探索与政策引导协同推进，土壤改良剂将在未来农业高质量发展和国家粮食安全保障中发挥更加关键的战略作用。

[参考文献]

[1] PIMENTE L D, HARVEY C, RESOSUDARMO P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. Science, 1995, 267(5201): 1117–1123.

[2] NOEL S, MIKULCAK F, STEWART N, et al. Report for policy and decision makers: Reaping economic and environmental benefits from sustainable land management[R]. Bonn: [s.n.], 2015.

[3] LEHMANN J, HANSEL C M, KAISER C, et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(8): 529–534.

[4] 徐鹏程, 冷翔鹏, 彭永彬, 等. 玉米秸秆隔层改良盐碱土壤及应用于葡萄栽培中的效果初探[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2014(1): 17–21.
XU P C, LENG X P, PENG Y B, et al. The preliminary result of improving saline-land soil with smaize straw interlayer and using in the culture of grapes [J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2014(1): 17–21.

[5] 李丹琼, 周来, 张谷春, 等. 生物质灰理化特性及其应用于土壤改良的研究进展[J]. 能源环境保护, 2020, 34(1): 1–7.
LI D Q, ZHOU L, ZHANG G C, et al. Review on the physicochemical properties of biomass ash and its application in soil amelioration and remediation [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(1): 1–7.

[6] 吴敏, 韦家少, 何鹏, 等. 腐殖酸类营养型改良剂改善火龙果果园土壤理化特性和幼茎养分含量[J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 211–216.
WU M, WEI J S, HE P, et al. Humic Acid Nutrient Modifier Improved Soil Physicochemical Properties in Orchard and Nutrient Contents of Young Stems of Pitaya [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(2): 211–216.

[7] 董琼娥, 童江云, 田云霞, 等. 复合微生物菌剂对土壤改良及切花玫瑰产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(1): 32–36.
DONG Q E, TONG J Y, TIAN Y X, et al. Effects of Compound Microbial Agent on Yield and Quality of Cut Rose and Soil Improvement [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(1): 32–36.

[8] 王伟军, 郝建宇, 陈文朝, 等. 松土剂对葡萄园土壤结构和土壤微生物数量的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2018(2): 22–25, 31.
WANG W J, HAO J Y, CHEN W C, et al. Effects of spraying scarification agent on soil structure and soil microbial quantity in vineyard [J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2018 (2): 22–25, 31.

[9] LAHORI A H, ZHANG Q Z, GUO Z, et al. Potential use of lime combined with additives on (im)mobilization and phytoavailability of heavy metals from Pb/Zn smelter contaminated soils [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 313–323.

[10] ZHANG W C, ZHANG W X, WANG S J, et al. Band application of flue gas desulfurization gypsum improves sodic soil amelioration [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113535.

[11] RAM L C, MASTO R E. Fly ash for soil amelioration; A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 128: 52–74.

[12] GOBENA N, KASSU T, DUGASA G, et al. Impact of silicate fertilizer on soil properties and yield of bread wheat in Nitisols of tropical environment[J]. Heliyon, 2023, 9(12):e22933.

[13] LAIK R, SINGH S K, PRAMANICK B, et al. Improved method of boron fertilization in rice (Oryza sativa L.)-mustard (Brassica juncea L.) cropping system in upland calcareous soils [J]. Sustainability, 2021, 13:5037.

[14] RIZWAN M, MURTAZA G, ZULFIQAR F, et al. Sustainable manufacture and application of biochar to improve soil properties and remediate soil contaminated with organic impurities: A systematic review [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1277240.

[15] CHA J S, PARK S H, JUNG S C, et al. Production and utilization of biochar; A review [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 40: 1–15.

[16] FAN J B, LV Q L, ZHOU T R, et al. Calcium lactate as a soil amendment: Mechanistic insights into its effect on salinity,

alkalinity, and aggregation in saline-alkaline soils[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 248: 106459.

[17] YU R, SONG J S, ZHOU J, et al. Subsurface organic ameliorant is beneficial in reducing inorganic carbon loss and improving carbon sequestration in saline soils[J]. Applied Soil Ecology, 2025, 214: 106403.

[18] SINGH V, KUMAR B. A review of agricultural microbial inoculants and their carriers in bioformulation[J]. Rhizosphere, 2024, 29: 100843.

[19] SHAHZAD S M, KHALID A, ARIF M S, et al. Co-inoculation integrated with P-enriched compost improved nodulation and growth of Chickpea (Cicer arietinum L.) under irrigated and rainfed farming systems[J]. Biology and Fertiliyty of Soils, 2014, 50(1): 1-12.

[20] 王秀斌,唐栓虎,荣勤雷,等.不同措施改良反酸田及水稻产量效果[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):404-412.
WANG X B, TANG S H, RONG Q L, et al. Effects of different ameliorant measures on the chemical and physical properties of soil in acid sulfate paddy field and rice yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 404-412.

[21] WANG J F, LI X L, XING S Z, et al. Bio-organic fertilizer promotes plant growth and yield and improves soil microbial community in continuous monoculture system of Chrysanthemum morifolium cv. Chuju[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2017, 19(3):563-568.

[22] NOEL T C, CHENG C, YOST C K, et al. Rhizobium leguminosarum as a plant-growth rhizobacterium: direct growth promotion of canola and lettuce[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1996, 42(3): 279-283.

[23] SON H J, PARK G T, CHA M S, et al. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt and pH-tolerant Pantoea agglomerans R-42 isolated from soybean rhizosphere[J]. Bioresource Technology, 2005, 97(2): 204-210.

[24] HAFEZ M, ABDALLAH A M, MOHAMED A E, et al. Influence of environmental-friendly bio-organic ameliorants on abiotic stress to sustainable agriculture in arid regions: A long term greenhouse study in northwestern Egypt[J]. Journal of King Saud University-Science, 2022, 34(6):102212.

[25] HUANG D D, YANG L, KO J H, et al. Comparison of the methane-oxidizing capacity of landfill cover soil amended with biochar produced using different pyrolysis temperatures[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133594.

[26] CHEN M M, ZHANG S R, LIU L, et al. Influence of organic fertilization on clay mineral transformation and soil phosphorous retention: Evidence from an 8-year fertilization experiment[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 230: 105702.

[27] 邵玉翠,任顺荣,廉晓娟,等.有机-无机土壤改良剂对滨海盐渍土降盐防碱的效果[J].生态环境学报, 2009, 18(4): 1527-1532.
SHAO Y C, REN S R, LIAN X J, et al. Effects of inorganic and organic amendments on desalting and preventing alkalization in coastal salinized soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4):1527-1532.

[28] WANG Y J, HUANG Q Q, GAO H, et al. Long-term cover crops improved soil phosphorus availability in a rain-fed apple orchard[J]. Chemosphere, 2021, 275: 130093.

[29] BREITKREUZ C, BUSCOT F, TARKKA M, et al. Shifts between and among populations of wheat rhizosphere Pseudomonas, Streptomyces and phyllobacterium suggest consistent phosphate mobilization at different wheat growth stages under abiotic stress[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 3109.

[30] CHEN L M, SUN S L, ZHOU Y Y, et al. Straw and straw biochar differently affect fractions of soil organic carbon and microorganisms in farmland soil under different water regimes[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023,32: 103412.

[31] WU G, LING J, ZHAO D Q, et al. Straw return counteracts the negative effects of warming on microbial community and soil multifunctionality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 352:108508.

[32] CHEN Y, FENG X Y, ZHAO X, et al. Biochar application enhances soil quality by improving soil physical structure under particular water and salt conditions in arid region of Northwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24(8): 3242-3263.

[33] XU X, WANG J H, TANG Y M, et al. Mitigating soil salinity stress with titanium gypsum and biochar composite materials: Improvement effects and mechanism[J]. Chemosphere, 2023, 321: 138127.

[34] SADIQ M, HASSAN G, MEHDI S M, et al. Amelioration of saline-sodic soils with tillage implements and sulfuric acid application[J]. Pedosphere, 2007(2):182-190.

[35] TIAN T, ZHANG C L, ZHU F, et al. Effect of phosphogypsum on saline-alkalinity and aggregate stability of bauxite residue[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(5):1484-1495.

[36] JIANG Y J, LIU M Q, ZHANG J B, et al. Nematode grazing promotes bacterial community dynamics in soil at the aggregate level[J]. The ISME Journal, 2017, 11(12): 2705-2717.

[37] MURUGANANDAM S, ISRAEL D W, ROBARGE W P. Nitrogen transformations and microbial communities in soil aggregates from three tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 120-129.

[38] 贾林, 刘璐瑶, 张涛, 等. 土壤改良剂在盐渍化土壤生态修复中的应用[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(3): 92-99.
JIA L, LIU L Y, ZHANG T, et al. Research Progress of Soil Amendments in Salinized Area[J]. Journal of Hunnan Ecological Science, 2023, 10(3): 92-99.

[39] PANKAJ T, MANUEL D, THOMAS C J, et al. Soil aggregation and associated microbial communities modify the impact of agricultural management on carbon content[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2017, 19(8): 3070-3086.

[40] DAI Z M, ZHANG X J, TANG C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification-A critical review[J]. Science of the Total Environment, 2016, 581-582: 601-611.

[41] SHI R, NI N, WANG R H, et al. Dissolved biochar fractions and solid biochar particles inhibit soil acidification induced by nitrification through different mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2023, 874: 162464.

[42] BARCELOS J P Q, MARIANO E, JONES D L, et al. Topsoil

and subsoil C and N turnover are affected by superficial lime and gypsum application in the short-term [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 163: 108456.

[43] WANG H X, XU J, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China [J]. Soil & Tillage Research, 2019, 195: 104382.

[44] BOLAN N, SARMAH A K, BORDOLOI S, et al. Soil acidification and the liming potential of biochar [J]. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 2022, 317: 120632.

[45] HAN Z Q, XU P S, LI Z T, et al. Microbial diversity and the abundance of keystone species drive the response of soil multifunctionality to organic substitution and biochar amendment in a tea plantation [J]. GCB Bioenergy, 2022, 14(4): 481–495.

[46] XIE Y H, LI C B, CHEN H B, et al. Methods for quantification of biochar in soils: A critical review [J]. Catena, 2024, 241: 108082.

[47] RAZZAGHI F, OBOUR F B, ARTHUR E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis [J]. Geoderma, 2020, 361: 114055.

[48] DIAO S T, MA W Q, WANG Y P, et al. Synergistic effects of Ca-bentonite and in-situ layered double hydroxide formation in ameliorating saline-alkali soil [J]. Science of the Total Environment, 2025, 971: 179084.

[49] 陈燕婷, 高秦, 魏泽慧, 等. 复合土壤改良剂对舟山滨海盐碱土的改良机理及配方优选研究 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2025, 52(5):605-616,627.
CHEN Y T, GAO Q, WEI Z H, et al. Research on the improving mechanism and formula optimation of composite soil amendment on coastal saline-alkali soil in Zhoushan [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2025, 52(5):605-616,627.

[50] OLSON N C, GULLIVER J S, NIEBER J L, et al. Remediation to improve infiltration into compact soils [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 117: 85–95.

[51] LEPORE B J, THOMPSON A M, PETERSEN A, et al. Impact of polyacrylamide delivery method with lime or gypsum for soil and nutrient stabilization [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2009, 64(3): 223–231.

[52] YAO X, GUO H L, LI D D, et al. Novel approaches for alleviating shallow soil compaction using microbial fertilizers and their beneficial impacts on plant growth and soil physicochemical properties [J]. Soil & Tillage Research, 2025, 247: 106380.

[53] SU J Z, GUO Z L, ZHANG M Y, et al. Mn-modified bamboo biochar improves soil quality and immobilizes heavy metals in contaminated soils [J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 34: 103630.

[54] JIANG W T, CHEN R, LYU J H, et al. Remediation of the microecological environment of heavy metal-contaminated soil with fulvic acid, improves the quality and yield of apple [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 460: 132399.

[55] YI X Y, JI L F, HU Z M, et al. Organic amendments improved soil quality and reduced ecological risks of heavy metals in a long-term tea plantation field trial on an Alfisol [J]. Science of the Total Environment, 2022, 838(9): 156017.

[56] WANG R, LIU T, LU C Y, et al. Bioorganic fertilizers improve the adaptability and remediation efficiency of Puccinellia distans in multiple heavy metals-contaminated saline soil by regulating the soil microbial community [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 448: 130982.

[57] ALESSANDRINO L, COLOMBANI N, ASCHONITIS V, et al. Performance of graphene and traditional soil improvers in limiting nutrients and heavy metals leaching from a sandy Calcisol [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159806.

[58] 张贺, 杨静, 周吉祥, 等. 连续施用土壤改良剂对砂质潮土团聚体及作物产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 791–801.
ZHANG H, YANG J, ZHOU J X, et al. Effects of organic and inorganic amendments on aggregation and crop yields in sandy fluvo-aquic soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 791–801.

[59] XU Z, ZHANG S W, LAKSHMANAN P, et al. Mitigation of soil acidification is critical for reducing GHG emission and improving soil quality, crop yield and farm economic benefits: Evidence from a global meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2025, 322: 109757.

[60] HOLLAND J E, BENNETT A E, NEWTON A C, et al. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610–611:316–332.

[61] 祁石刚, 高学双, 赵宇航, 等. 土壤改良剂对蔬菜作物产质量及设施土壤理化性状的影响 [J]. 现代农业科技, 2020(22): 46–49.

[62] PEIRIS C, WATHUDURA P D, GUNATILAKE S R, et al. Effect of acid modified tea-waste biochar on crop productivity of red onion (Allium cepa L.) [J]. Chemosphere, 2021, 288: 132551.

[63] GITONGA N M, NJERU E M, CHERUIYOT R, et al. Bradyrhizobium inoculation has a greater effect on soybean growth, production and yield quality in organic than conventional farming systems [J]. Cogent Food & Agriculture, 2021, 7(1): 1935529.

[64] TÓTH E, CSAMBALIK L, BIRÓ B, et al. Are the nutritional properties of organic tomatoes altered by single and combined microbial soil inoculants? : a multiperspective approach [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 43(10): 3718–3728.

[65] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation [M]. Oxford:Taylor and Francis, 2015.