

腐植酸在旱地农业土壤改良 和水肥增效中的作用研究

黄占斌, 冯俊义, 马浩冉, 吴美玲

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:腐植酸是农田土壤有机质的重要组成部分,是土壤生命最具活力的核心物质。针对旱地农业发展中土壤结构退化、水肥利用效率低和作物低产低效等核心问题,总结了我国生物腐植酸和煤基腐植酸等腐植酸资源及其行业发展进展,分析了腐植酸组成特点及其在改良土壤结构和维持土壤酸碱平衡、提高肥料利用效率、刺激作物生长、增强作物抗逆、改善作物品质和降低重金属污染等方面的作用原理,开展了腐植酸在酸化地、盐碱地土壤改良和在废弃地土壤结构改良以及水肥保持中应用的研究,对研发的腐植酸保水肥剂、腐植酸土壤改良剂和重金属污染治理的材料及其应用效果进行介绍。针对我国旱地农业发展态势和腐植酸在旱区土壤改良应用中存在的问题,指出腐植酸产品研发和应用技术在旱地农业中的发展方向。

关键词:腐植酸;土壤改良;水肥利用效率;节水增效;旱地农业

中图分类号:S156 **文献标志码:**A

Effects of humic acid on soil improvement and water and fertilizer use efficiency in dryland agriculture

HUANG Zhanbin, FENG Junyi, MA Haoran, WU Meiling

(School of Chemistry and Environmental Engineering, China University
of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Humic acid is an important component of soil organic matter in farmland, and it is the most dynamic core material of soil life. To study the problems of soil structure degradation, low efficiency of water-fertilizer, low yield and efficiency in the development of dryland farming, this paper summarized the biochemical humic acid and coal-based humic acid resources and its industry development progress and analyzed the principle of the composition characteristics of humic acid in improving soil structure, maintaining soil acid and base balance, and improving fertilizer utilization efficiency and stimulating crop growth and crop quality and reducing heavy metal pollution. It also examined the application of humic acid in acid soil, saline-alkali soil improvement and soil structure improvement on water and fertilizer maintenance in abandoned land and introduced the development materials and the effects of water conservation fertilizer with humic acid, soil amendment with humic acid and the heavy metal pollution treatment. The development trend and demand of dryland agriculture and the application of humic acid in arid areas and future direction of the research and development of humic acid in dryland farming were also discussed.

Keywords: humic acid; soil improvement; water and fertilizer use efficiency; water saving and efficiency; dryland farming

旱地农业是我国农业生产的重要类型,主要集中在北方地区。我国旱地农业地区的土地面积 542 万 km²,约占国土面积 56%,耕地面积 0.51 亿 hm²,

约占全国总耕地面积 51%。旱地农业按降雨量可分为两类:一是年降水量 300~550 mm 的半干旱、半湿润的北方旱地农业区,属于资源性缺水的传统旱

地农业区;二是降雨量较高的南方山地丘陵雨养农业区,属于工程性缺水的特殊农业区。山仑院士发现并提出旱地农业土壤属于“多变低水环境”,认为提高干旱缺水农田生产力有两个途径:一是改造环境使之适应于农作物生长的需求,二是改造作物本身以适应变动的外部环境。外部环境改造包括气候调节、土地改造、土壤改良、补充灌溉以及采取减少蒸发、渗漏、水土流失等措施^[1]。土壤角度的技术体系核心是提高降水利用率,一是重点建设基本农田,改变立地条件,促进雨水入渗以增加土壤含水量;二是用地膜和秸秆等材料覆盖土壤,以降低农闲田地无效蒸发;三是以建设土壤水库为中心,提高土壤保水和用水效率。植物改造的技术体系核心是提高降水利用效率。包括优化作物种植结构、合理调整作物布局,选育优良节水品种以及以耕作培肥为中心,重视农田作物栽培的管理,提高农艺节水水平^[2]。

随着我国社会经济的快速发展,旱地农业的内涵也在不断深化,旱地农业不仅仅是指传统的种植业耕地,也包括畜牧业草地和林地。万物生于土,土壤是作物水分供给的主要途径。所以,土壤质量提升是旱地农业节水增产的关键,也是促进畜牧业、林业发展的重要途径。

土壤是由土壤有机质和大量无机质组成,而形成植物生长环境的核心是土壤有机质的形成。土壤有机质含量高低是衡量土壤质量的重要指标。由“土”变“壤”的自然过程中,0.1%含量土壤有机质形成一般需要 50~60 年,施用有机肥等耕作农技管理也需要 3~5 年。土壤有机质 80% 以上的组成是腐殖质,而腐殖质主要由腐植酸组成。

腐植酸在我国的研究和应用有较长历史,特别是自 20 世纪 80 年代国务院组织的南北腐植酸协作组开展研究以来,经过多年的积累和完善,以腐植酸工业协会组织提出了腐植酸改良土壤、提高肥效、调节作物生长、增强作物抗逆能力、改善作物品质等五大作用原理^[3],在农用腐植酸肥料、环保材料和饲料等方面研发形成了较多材料与产品,对农业生产和环境治理发挥了巨大推动作用。但是,以黄土高原为中心的旱地农业土壤节水改土中,腐植酸应用及其节水增效的研究显得不足。黄土高原地区地处黄河中游地带,是我国煤炭生产的集中地区,煤基腐植酸应用于旱地农业的潜力巨大^[4]。为此,本文在介绍腐植酸资源及其在农业的应用理论基础,介绍了腐植酸在酸化地、盐碱地土壤改良以及在废弃地土壤结构改良和水肥保持中的应用研究,对研发的腐植酸保水肥、腐植酸土壤改良剂

和重金属污染地治理材料及其应用效果进行介绍,指出腐植酸研发技术和研究在旱地农业中的发展方向,以期为腐植酸在旱地农业土壤改良和节水增效中的应用提供参考。

2 腐植酸资源及特性

腐植酸(Humic acid, HA)是组成土壤腐殖质(Humic substance, HS)的大分子物质,是动植物残体经微生物分解合成及地球物理、化学等系列相互作用,形成的一类富含羧基、酚羟基、醌基、羰基、甲氧基等多种活性官能团非均一脂肪-芳香族无定形高分子化合物,广泛分布于土壤、江河湖海和低品位煤炭中^[5],是地球上自然存在的最丰富的有机分子化合物^[6],也是维持土壤结构和肥力的关键组成。

腐植酸类型按其来源可分为天然腐植酸和人工腐植酸。天然腐植酸主要包括煤基腐植酸、土壤腐植酸、水体腐植酸等。目前,商业生产的腐植酸主要为煤基腐植酸,包括褐煤、风化煤和泥炭,其资源丰富,总存储量约 2 100 亿 t 以上,主要分布在黑龙江、内蒙古、新疆、山西及福建、广西和云南等省(自治区)^[7]。此外,我国年产畜禽粪便 38 亿 t、作物秸秆 9.95 亿 t、市政污泥 0.70 亿 t,还有生物质热解木醋液、厨余垃圾渗滤液等^[8],这些工农业废弃物、餐厨垃圾、作物秸秆和牲畜粪便经化学或微生物发酵处理得到的生物腐植酸,也称人工腐植酸,在生产实际中有广泛的应用。

土壤学中,腐植酸根据其溶解度和颜色可分为 3 个类型,即(1)胡敏酸(Humic acid, HA, 煤化学中称棕腐酸,下同),溶于碱性介质,可利用稀碱液从土壤中提取,但在酸性介质中会沉淀;(2)富里酸(Fulvic acid, FA, 黄腐酸),既溶于酸又溶于碱;(3)胡敏素(Humin, Hm, 黑腐酸),既不溶于碱也不溶于酸溶液,长久存于土壤中^[9]。

腐植酸含有 70 多种元素和 20 多种不同活性基团,其数量取决腐植酸资源来源、提取和生产方式以及应用环境条件。腐植酸功能主要源于其特殊结构和官能团类型及数量。这些官能团使腐植酸具有酸性和碱性、亲水性和阳离子交换性,以及络合性和吸附性等不同特殊功能,可以用来改善土壤结构、提高土壤肥力、退化土壤改良和提高作物产量与质量等。

3 腐植酸与土壤改良

土壤改良是针对土壤退化而言,是对土壤不良物理结构、化学和生物特性等采取的改良措施。我

国土壤退化面积占土地面积的40%,70%耕地为中低产田,黄土高原地区长城沿线由于风蚀和水蚀作用,土壤退化突出^[8]。中国科学院南京土壤研究所将退化土壤分为盐碱化、酸化、荒漠化、侵蚀退化和废弃地等类型,其主要特征是土壤团粒结构破坏、肥料利用率下降、酸碱平衡失调和生物活性低下等^[10]。腐植酸土壤改良的主要原理如下:

3.1 改良土壤的团粒结构和水分保持

腐植酸主要由芳香结构和多种活性较高的化学功能团的碳链构成,其比表面积巨大,可高达 $2\,000\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。腐植酸上的醇羟基、酚羟基、羧基、羰基等亲水性基团,与水接触后电离并与水分子结合成氢键,吸收水分而提高土壤含水率。腐植酸加入土壤后,通过絮凝作用把松散土壤颗粒聚集起来,调节土壤容重,增加土壤总孔隙度,形成水稳性好的团粒结构,提高土壤的透水性、持水量和抗蚀性^[11]。其次,腐植酸保水剂能吸水抗旱,促使土壤保留雨水为植物“需时即用”,解决水土流失地区土壤保水的问题。第三,腐植酸固化剂和腐植酸液态地膜能固持土壤,应用农田覆盖、工程护坡和防沙治沙等水土保持领域。研究表明^[12],腐植酸可使土壤团粒结构增加1.5~3.0倍,水稳性团粒结构数增加8.5%~30%,改善土壤耕作层中水、肥、气、热状况,即土壤肥力得到明显改善。王泽祥^[13]在陕西长武黑垆土中试验发现,土壤容重与土壤腐植酸含量显著负相关,且胡敏酸比富里酸能更好降低土壤容重,富里酸处理对土壤水稳性团聚体影响更为显著。5%含量富里酸对土壤水稳性大团聚体改良的效果更显著。此外,各种腐植酸类肥料能促进植物根深叶茂,提高作物抗逆能力和发挥植物保持水土功能,对水土流失地区恢复植被具有独特作用。

3.2 提高土壤养分的利用效率

土壤水土保持的重要目标是通过改良土壤结构和提升土壤养分的保持能力,促进植物有效利用土壤养分进而提高生产力。目前,我国农业生产和环境修复中土壤养分利用率低,氮、磷肥的当季利用率一般在30%~36%和15%~20%,而发达国家可达到50%~60%和30%~35%。2015年,我国农业部提出化肥农药减量化,其核心就是提高土壤养分的利用效率。腐植酸具有提高肥料利用效率的功能,其主要途径是通过控氮、释磷、促钾和微量元素活化的作用提高土壤养分^[14]。

3.2.1 控氮 腐植酸中的羧基、羰基、醇羟基、酚羟基等亲水官能团,有较强离子交换和吸附能力,快速吸附氮肥水解生成的 NH_4^+ ,与其发生氨化反应形

成解离度低的腐植酸铵盐,减少氮损失及其铵态氮与水形成碳酸氢铵的挥发损失。同时,腐植酸中酚羟基和醌基等氧化性官能团对土壤脲酶和硝化细菌有抑制作用^[15],能够有效减缓尿素分解速度,提高氮肥利用率。张水勤等^[16]研究表明,施加腐植酸尿素较单施尿素使玉米对氮肥利用率提高4.8%,氮损失率较单施尿素降低5.1%;玉米地上部干物质质量和籽粒产量分别较单施尿素提高13.8%和14.2%。

3.2.2 释磷 在北方地区的石灰性土壤中,腐植酸促进土壤中难溶性磷酸盐 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 转化成 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 或 Ca_2HPO_4 等易溶性磷酸盐,使其溶解度增加10倍;同时腐植酸可加快磷在土壤中的迁移扩散,促进作物根系对磷的吸收。在酸性土壤里,腐植酸活性基团能与铁、铝螯合或络合,减少磷与土壤中铁、铝生成沉淀的活性丧失^[17]。磷在土壤中垂直移动距离为3~4 cm,添加腐植酸可增加到6~8 cm。Cooper等^[18]证明,在贫瘠沙地栽培葡萄,施加腐植酸组对磷的吸收比对照组提高3%~5%。Lo-bartini等^[19]试验证明,施加腐植酸可以增加磷酸铝和磷酸铁溶解度,且腐植酸对磷的释放随时间推移逐渐增加。李军等^[20]研究发现,磷肥中添加腐植酸1%~2%,磷肥施用量减少20%左右;与普通磷肥相比,腐植酸磷肥使玉米籽粒产量增加4.5%~13.6%。

3.2.3 促钾 腐植酸阳离子代换量一般为 $200\sim 400\text{ meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$,约为一般土壤的10~20倍。土壤钾素与腐植酸结合成腐植酸钾,降低土壤固钾率^[21]。腐植酸能够活化钾,使钾肥缓慢分解,提高作物钾肥利用率。王振振等^[22]在腐植酸缓释钾肥对土壤钾及其甘薯利用试验得出,与等量氧化钾相比,腐植酸钾肥可使钾利用率增加20.09%,甘薯块根产量增加22.83%。

此外,腐植酸可与一些难溶盐的微量元素(如Fe、Al、Cu、Mg、Zn等)形成络合并溶于水而被作物吸收。所以,腐植酸可作为天然螯合剂与微量元素螯合。

3.3 维持土壤的酸碱平衡

腐植酸是一种大分子有机两性物质。腐植酸酸性功能团可释放出 H^+ 与土壤中碱性物质发生中和反应生成 H_2O ,降低土壤碱度。腐植酸中醛基、羧基等官能团^[23],能与土壤中阳离子生成腐植酸盐,形成腐植酸-腐植酸盐相互转化的缓冲系统;同时,也能够与土壤中的各种阳离子结合和促进作物吸收,使土壤溶液中有害离子能够与腐植酸发生交换反应,降低土壤盐基含量^[24]。

促进土壤的生物活性。腐植酸对土壤中的微生物和酶活性有促进作用^[25]。首先是促进土壤自生固氮菌显著增多,使硝酸盐含量明显增大,丰富土壤氮素营养;同时,腐植酸可使土壤中好气性细菌、放线菌、纤维分解菌数量增加,加速有机物矿化,促进营养元素释放。党建友等^[26]研究表明,风化煤活化制备的复合控释肥能为冬小麦育提供有机活性物质,为土壤微生物也提供有机能源。

4 腐植酸在退化地土壤改良中的应用

4.1 腐植酸在盐碱地土壤改良中的应用

盐碱地土壤积累大量 Na^+ 和 Ca^{2+} , 对土壤理化性质和微生物活性不利,抑制植物的生长。土壤盐碱形成主要是不合理灌溉、耕作和施肥用药、海水倒灌等因素造成。盐分高、结构退化和养分缺乏是盐碱地土壤改良的三个主要核心问题^[27]。土壤盐碱化是当今世界面临的严重问题,全球约 20% 耕地和 50% 农田受到土壤盐碱化影响,盐碱土总面积约 3 600 万 hm^2 , 其中耕地盐渍化面积 920.9 万 hm^2 ^[28]。因此,盐碱化改良是我国耕地可持续利用和农业发展的重要途径。

盐碱地土壤改良措施有物理、化学、生物及水利等方法。随着循环经济和现代化工发展,应用具有功能性明显、无二次污染和经济实用特征的环境材料是改良盐碱地的重要选择^[29]。目前盐碱地改良的环境材料主要有两类:一是添加具有代换作用的含钙材料,包括石膏、磷石膏、脱硫石膏、氧化钙和石灰石等;二类是添加具有中和反应的酸性材料,主要有腐植酸、糠醛渣、硫磺、硫酸亚铁和硫酸铝及酸性肥料等^[30]。其中施用腐植酸改良盐碱地的研究进展较快。

腐植酸与土壤中各种阳离子结合可生成腐植酸盐,有效调节土壤酸碱度;同时,其自身也是一种本身带有负电荷的胶体物质,施于土壤会增加土壤的阳离子代换量和吸附量,具有隔盐、吸盐作用,降低表土盐分含量;腐植酸还可以与土壤中碱性物质中和,降低土壤 pH 值。孙在金等^[31]在滨州用脱硫石膏和腐植酸盐改良碱地,二者单施与配施改良含盐量分别为 0.13%、0.24%、0.86% 和 2.07% 的四种土壤效果发现,土壤 pH 较对照分别降低 0.26%、0.83%、1.05% 和 1.83%; Na^+ 含量也分别降低 82.4%、92.6%、89.1% 和 78.6%,作用效果显著。周阳^[32]利用脱硫石膏和腐植酸改良盐碱土的田间种植试验证明,0~20cm 盐碱土壤的容重降低 0.30 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH 值降低 3.19,碱化度降低 0.89;处理组的玉米出苗

率和籽粒产量分别达到 78% 和 4 200 $\text{kg} \cdot 666.7\text{m}^{-2}$, 而对照组仅为 27% 和 1 382 $\text{kg} \cdot 666.7\text{m}^{-2}$, 脱硫石膏和腐植酸混施能够显著改善土壤质量和提高作物经济产量。

作者研究组曾采用腐植酸、保水剂和有机肥等材料及优化组合研制出“复合保水肥 SFO”,可明显改善因融雪剂造成的道路绿化带的土壤盐碱化^[33],产品在改善土壤结构、增强土壤保水性、降低土壤 Na^+ 和 Cl^- 含量和土壤钠吸附比、促进作物生长、降低融雪剂对道路绿化带植物伤害等方面具有显著的效果和经济效益。

4.2 腐植酸在废弃地土壤改良中的应用

矿山土场、废石堆、尾矿等废弃物堆场、废弃庄基地和水土流毁坏等废弃地的复垦,是我国土地资源开发和生态修复的重要手段,常用改良方法有物理改良、肥力改良和生物改良法等。腐植酸的特殊性使其在解决废弃地土壤结构、肥力提升和土壤微生物活性等方面有着重要价值。王哲^[34]研究表明,腐植酸复合肥和表土可替代草炭作为客土基材修复矿山废弃地。董雪等^[35]发现,腐植酸组分与 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,与胡敏酸含量相关最大。将浓度为 0.06 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.6 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的胡敏酸添加在侵蚀程度不同的红壤中可导致 $\geq 0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量增加、 $\leq 0.5 \text{ mm}$ 的团聚体增加量大于 $\geq 2 \text{ mm}$ 大团聚体。庞庆阳等^[36]研究表明,腐植酸复合肥处理与对照相比,田间土壤的脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性均显著升高。植物生长期,表层施用腐植酸复合肥的土壤碱解氮、速效钾和有效磷含量分别增加 37.27%、37.02% 和 42.24%。与等养分的复合肥相比,腐植酸复合肥的土壤碱解氮、速效钾和有效磷含量分别增加 5.92%、4.29% 和 8.80%。

于学胜^[37]在平朔露天煤矿废弃地复垦中施用生物腐植酸(Bio-active humic acid, BHA)证明,每亩土壤中单施 30 kg 的 BHA 较对照的土壤微生物数量提高 96%,植物生长量提高 34%。作者研究组在河北涉县开展粉煤灰地客土改良中,采用改性腐植酸、高分子保水剂和粘合剂等材料配置的 TG 土壤改良剂^[38],在粉煤灰地客土 20% 下,每亩土壤添加 1 000 kgTG 土壤改良剂,可使土壤容重从 0.78 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 提高到 1.10~1.16 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $<0.05 \text{ mm}$ 土壤水稳定团聚体量增加显著,极大提升粉煤灰地土壤水肥保持能力;改良地种植玉米试验证明,玉米株高较对照提高 65.38%~200%;玉米植株干重提高 80.70%~176.92%。

5 腐植酸在旱地农业中的应用前景

腐植酸在土壤改良和污染修复中的应用取得较大进展^[39],在旱地农业土壤改良和节水增效中同样具有较大的应用潜力。目前需要加强以下方面的研究:

(1)加强腐植酸品类对旱地土壤改良应用基础研究。生化腐植酸不同类型(厨余垃圾、畜禽粪便发酵、有机肥和生物炭热解木醋液等)在土壤改良中的应用范围、土壤类型效应、时间效应以及水、温、肥力等效应研究方面,缺乏突破性进展;

(2)加强腐植酸品类对土壤污染物固化应用基础研究。煤基和生化腐植酸组分(HA、FA、Hm)对土壤重金属形态(GB15618-2018)、生物有效性(GB2762-2017)效应有别,重金属(阳离子、阴离子)效应、土壤-植物效应结果矛盾;第4代新型肥料的新功能开发等有待加强。

(3)加强煤基和生化腐植酸组合产品研发,制定安全应用技术规程。生化腐植分子量小、组成多样,在土壤中效应时间较短;煤基腐植酸分子量大、组分复杂,在土壤中效应时间较长。二者复合互补则可研发功能互补土壤改良材料和重金属钝化产品,这方面已在水果、蔬菜、花卉等生产领域有应用,但远未形成规模,主要是缺乏应用技术研发和安全应用技术规程。

(4)加强腐植酸在黄土高原旱地农业,特别是蔬菜林果和经济作物中应用技术研究,增强旱地农业高质量发展、抗旱节水和节能减排碳中和战略中的作用。

参考文献:

- [1] 山伦. 中国旱区农业持续发展的技术途径[J]. 科技导报, 2014, 32(23): 1.
SHAN L. Technical approach of sustainable development of agriculture in arid areas of China[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(23): 1.
- [2] 黄占斌, 山伦. 论我国旱地农业建设的技术路线与途径[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 1-6.
HUANG Z B, SHAN L. A study on technology line and approaches of dryland farming construction in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(2): 1-6.
- [3] 成绍鑫. 腐植酸类物质概论[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2020.
CHENG S X. Introduction to humic acids[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [4] 李小花, 张建民, 黄占斌. 腐植酸在退化土壤改良中的应用研究[J]. 科学, 2020, 72(2): 31-34.
LI X H, ZHANG J M, HUANG Z B. Applied research on degenerated soil improvement by humic acid[J]. Science, 2020, 72(2): 31-34.
- [5] PARSONS J W. Humus chemistry—genesis, composition, reactions[J]. Soil Science, 1983, 135(2): 129-130.
- [6] SIMPSON A J, KINGERY W L, HAYES M H B, et al. Molecular structures and associations of humic substances in the terrestrial environment[J]. Naturwissenschaften, 2002, 89(2): 84-88.
- [7] 周爽, 其力莫格, 谭钧, 等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制[J]. 腐植酸, 2015, (2): 1-8.
ZHOU S, QI L M G, TAN J, et al. Strategies in efficient utilization of soil NPK nutrients with humic acid amendments[J]. Humic Acid, 2015, (2): 1-8.
- [8] 徐衣显, 刘晓, 王伟. 我国生物质废物污染现状与资源化发展趋势[J]. 再生资源与循环经济, 2008, 1(5): 31-34.
XU Y X, LIU X, WANG W. Pollution status and utilization of biomass waste in China[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2008, 1(5): 31-34.
- [9] CALVO P, NELSON L, KLOEPPER J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. Plant and Soil, 2014, 383(1): 3-41.
- [10] 脱登峰. 黄土高原水蚀风蚀交错区土壤退化机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
TUO D F. The study of the soil degradation mechanism in wind-water erosion crisscross region on the loess plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [11] 许新桥, 刘俊祥. 腐植酸的作用机制及其在林业上的应用[J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 48-52.
XU X Q, LIU J X. Function mechanism of humic acid and its application in forestry[J]. World Forestry Research, 2013, 26(1): 48-52.
- [12] 王曰鑫, 李强. 腐植酸在水土保持中的作用与应用前景[C]//2010中国腐植酸行业低碳经济交流大会暨第九届全国绿色环保肥料(农药)新技术、新产品交流会论文集, 北京: 中国腐植酸工业协会, 2010: 40-44.
WANG Y X, LI Q. Role and application prospect of humic acid in soil and water conservation[C]//Proceedings of the 2010 China Humic Acid Industry Low Carbon Economic Exchange Conference and the 9th National Green Fertilizer (Pesticide) New Technology and New Product Exchange Conference, Beijing: China Humic Acid Industry Association, 2010: 40-44.
- [13] 王泽祥. 不同组分腐植酸对土壤水分运动和理化性质的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
WANG Z X. Effects of different components of humic acid on soil water movement with physical and chemical properties[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [14] 刘丹, 黄占斌, 李柯, 等. 腐植酸对氮、磷肥的增效机理研究综述[J]. 腐植酸, 2016, (2): 1-5.
LIU D, HUANG Z B, LI K, et al. Summary on synergistic mechanism of humic acid to nitrogen and phosphorus fertilizer[J]. Humic Acid, 2016, (2): 1-5.
- [15] 高树清, 王宝申, 韩英群. 腐植酸及不同原料对土壤脲酶活性及氮素的影响研究[J]. 腐植酸, 2004, (6): 32-36.
GAO S Q, WANG B S, HAN Y Q. Study on influence of humic acid and its precursor on activity of urease and nitrogen in soil[J]. Humic Acid, 2004, (6): 32-36.
- [16] 张水勤, 袁亮, 李伟, 等. 腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1207-1214.
ZHANG S Q, YUAN L, LI W, et al. Effects of humic acid urea on maize yield and the fate of fertilizer nitrogen[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(5): 1207-1214.
- [17] 文雅, 李东旭. 风化煤腐植酸在土壤改良中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(33): 148-150.
WEN Y, LI D X. The applications of weathered coal humic acid in soil amelioration[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010,

- 20(33): 148-150.
- [18] COOPER R J, LIU C H, FISHER D S. Influence of humic substances on rooting and nutrient content of creeping bentgrass[J]. *Crop Science*, 1998, 38(6): 1639-1644.
- [19] LOBARTINI J C, TAN K H, PAPE C. Dissolution of aluminum and iron phosphate by humic acids[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(5/6): 535-544.
- [20] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 641-648.
- LI J, YUAN L, ZHAO B Q, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 641-648.
- [21] 杨滨. 腐植酸大小分子氧化还原能力及其氧化还原官能团的分布研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- YANG Z. Study of humic acids low/high molecules on reducing capacity and distribution of redox active functional groups[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [22] 王振振, 张超, 史春余, 等. 腐植酸缓释钾肥对土壤钾素含量和甘薯吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 249-255.
- WANG Z Z, ZHANG C, SHI C Y, et al. Effects of Ha-K fertilizer on potassium content of soil and absorption and utilization of potassium in sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(1): 249-255.
- [23] 范慧娟. 浅议腐植酸肥料在改良土壤及提高肥料利用率中的作用[J]. *中国农业信息*, 2014, (1): 105.
- FAN H J. Discuss the role of humic acid fertilizer in improving soil and improving fertilizer utilization rate[J]. *China Agricultural Informatics*, 2014, (1): 105.
- [24] 冯莉杰, 刘子静, 孙彬, 等. 简述腐植酸土壤改良最新研究成果[J]. *腐植酸*, 2022, (6): 7-12.
- FENG L J, LIU Z J, SUN B, et al. Brief describe the latest research results of humic acid soil improvement[J]. *Humic Acid*, 2022, (6): 7-12.
- [25] 袁英, 何小松, 席北斗, 等. 腐植质氧化还原和电子转移特性研究进展[J]. *环境化学*, 2014, 33(12): 2048-2057.
- YUAN Y, HE X S, XI B D, et al. Research progress on the redox and electron transfer capacity of humic substances[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(12): 2048-2057.
- [26] 党建友, 王秀斌, 裴雪霞, 等. 风化煤复合包裹控释肥对小麦生长发育及土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6): 1186-1192.
- DANG J Y, WANG X B, PEI X X, et al. Effect of weathered coal-based coated fertilizer on winter wheat growth and soil enzyme activity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(6): 1186-1192.
- [27] 刘阳春, 何文寿, 何进智, 等. 盐碱地改良利用研究进展[J]. *农业科学研究*, 2007, 28(2): 68-71.
- LIU Y C, HE W S, HE J Z, et al. Progress of improvement and utilization of saline-alkali land[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 28(2): 68-71.
- [28] 徐璐, 王志春, 赵长巍, 等. 东北地区盐碱土及耕作改良研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(27): 23-31.
- XU L, WANG Z C, ZHAO C W, et al. A review of saline-sodic soil and tillage amelioration in Northeast of China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(27): 23-31.
- [29] 黄占斌, 张博伦, 田原宇, 等. 腐植酸在土壤改良中的研究与应用[J]. *腐植酸*, 2017, (5): 1-4, 25.
- HUANG Z B, ZHANG B L, TIAN Y Y, et al. Study and application of humic acid in soil improvement[J]. *Humic Acid*, 2017, (5): 1-4, 25.
- [30] SARWAR G, IBRAHIM M, TAHIR M A, et al. Effect of compost and gypsum application on the chemical properties and fertility status of saline-sodic soil[J]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 2011, 44(3): 510-516.
- [31] 孙在. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- SUN Z J. Research on effects and the mechanism of desulfurization gypsum and humic acid on coastal saline-alkali soil improvement[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [32] 周阳. 脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- ZHOU Y. Research on effects of desulfurization gypsum and humic acid on saline soil improvement[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- [33] 张小明, 孙宇轩, 胡兴安, 等. 环境材料对高速公路绿化带土壤盐碱化的改良效应[J]. *公路*, 2013, (8): 286-289.
- ZHANG X M, SUN Y X, HU X A, et al. The improving effect of environmental material on soil salinization in greenbelt of expressway[J]. *Highway*, 2013, (8): 286-289.
- [34] 王哲. 霍林河露天煤矿植被恢复技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- WANG Z. Study on vegetation recovery of huolinhe coal mine[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [35] 董雪, 王春燕, 黄丽, 等. 侵蚀红壤腐植酸组分特点及其对水稳性团聚体的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 114-125.
- DONG X, WANG C Y, HUANG L, et al. Characteristics of humus fraction in erosion ultisols and their effects on water-stable aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 114-125.
- [36] 庞庆阳, 宣毓龙, 蔡旭, 等. 棉粕腐植酸肥对土壤团聚体、酶及养分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(4): 54-60.
- PANG Q Y, XUAN Y L, CAI X, et al. Effects of cottonseed meal humic acid fertilizer on soil water-stable aggregates, soil enzymes and soil nutrition[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 54-60.
- [37] 于学胜. 生物腐植酸对矿区废弃土壤微生态重建作用的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- YU X S. Effects of bioactive humic acid on rebuilding of soil microbial ecology in mining wastelands[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [38] 李昉泽, 毋振庆, 门妹慧, 等. 腐植酸复合材料对生土熟化及黑麦草生长的效应研究[J]. *腐植酸*, 2019, (2): 19-24.
- LI F Z, WU Z Q, MEN S H, et al. Effects research of compound materials with humic acid on immature soil maturity and growth of ryegrass[J]. *Humic Acid*, 2019, (2): 19-24.
- [39] 黄占斌, 郝文静, 冯泽坤, 等. 腐植酸在土壤改良和污染修复中的应用现状及研究展望[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 354-361, 376.
- HUANG Z B, HAO W J, FENG Z S, et al. Application situation and research prospects of humic acid in soil improvement and pollution remediation[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 354-361, 376.