



论中国耕地质量提升与储碳控碳

李荣¹李双²

1 农业农村部耕地质量监测保护中心 北京 100125

2 中国腐植酸工业协会 北京 100120

摘要: 耕地质量提升的关键是地力提升,地力提升的核心是土壤有机碳提升和腐植酸组分的改善。本文基于国家在新时期对耕地质量提升与储碳控碳的高度重视,重点从实施“藏粮于地”战略,腐植酸改良障碍和退化土壤;实施“腐植酸+”行动,减肥减药降残膜;开辟肥源,化解经济社会生态矛盾;创新机制,激发腐植酸储碳控碳积极性等4个方面,阐述了腐植酸在提升耕地质量和增强土壤储碳控碳能力的重要作用,提出了发展腐植酸绿色农资产品的8个重点方向,以期为腐植酸在耕地质量提升与储碳控碳领域的应用提供参考。

关键词: 耕地质量;有机质;腐植酸;储碳控碳

中图分类号: TQ314.1, S156.2 文章编号: 1671-9212(2024)06-0033-12

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.06.001

Discussion on Cultivated Land Quality Improvement and Carbon Storage and Control in China

Li Rong¹, Li Shuang²

1 Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing, 100125

2 China Humic Acid Industry Association, Beijing, 100120

Abstract: The key to improving cultivated land quality is the improvement of soil fertility, and the core of soil fertility improvement is the improvement of soil organic carbon and humic acid components. Based on the great importance that the state attaches to the improvement of cultivated land quality and carbon storage and control in the new period, the important role of humic acid in improving cultivated land quality and enhancing the ability of soil carbon storage and control from four aspects were expounded, including implementation of strategy of “storing grain in the ground” to improve barrier and degraded soil by humic acid, implementing the action of “humic acid +” to reduce the amount of chemical fertilizers, pesticides and residual agricultural film, opening up fertilizer sources to resolve economic, social and ecological contradictions, innovating mechanism to stimulate the enthusiasm of carbon storage and control using humic acid, etc.. Furthermore, eight key directions for the development of humic acid green agricultural products were proposed in order to provide a valuable reference for humic acid in improving cultivated land quality and carbon storage and control.

Key words: cultivated land quality; organic matter; humic acid; carbon storage and control

粮食安全是“国之大者”，耕地是粮食生产的命根子。耕地质量提升是对耕地最大最好的保护，是落实国家粮食安全战略最大最好的措施。耕地质

量提升的关键是地力提升，地力提升的核心是土壤有机碳提升和腐植酸组分的改善。腐植酸作为土壤有机碳的核心，不但影响土壤质量、功能和粮食产

[收稿日期] 2024-10-28

[作者简介] 李荣，男，1963年生，推广研究员，主要从事耕地质量监测与保护方面的研究与管理工，E-mail: lirong@agri.gov.cn。

量，而且在全球气候变化中扮演着重要角色。

1 国家高度重视耕地质量提升

自党的二十大报告首次明确提出“加快建设农业强国”战略要求以来，党中央多次强调，要全方位夯实粮食安全根基，牢牢守住18亿亩耕地红线，确保中国人的饭碗牢牢端在自己手中。

——2022年10月16日，党的二十大首次提出“加快建设农业强国”。坚决守住18亿亩耕地红线，逐步把永久基本农田全部建成高标准农田。高标准农田新定义为“适宜耕作，旱涝保收，高产稳产”划定为永久基本农田的耕地。

——2023年5月5日，“二十届中央财经委员会第一次会议”强调“要更加重视藏粮于技，突破耕地等自然条件对农业生产的限制”。解决国家粮食安全“卡脖子”问题最佳途径在于提高“肥、水、种”利用效率（控碳），以构建土肥和谐环境。

——2023年7月20日，“二十届中央财经委员会第二次会议”聚焦“加强耕地保护和盐碱地综合改造利用等问题”，落实“藏粮于地、藏粮于技”战略，切实加强耕地保护，全力提升耕地质量。

——2023年9月11日，中共中央办公厅国务院办公厅发布《关于推动盐碱地综合利用的意见》（中办发〔2023〕44号），对开展盐碱地综合利用提出了明确要求，“到2025年，盐碱地综合利用取得阶段性成效。力争利用盐碱地等耕地后备资源新增耕地500万亩左右，盐碱地治理取得有效进展。到2035年，盐碱地综合利用取得全方位成效。利用盐碱地等耕地后备资源新增耕地1500万亩左右，改造提升盐碱耕地1亿亩以上，有效遏制现有耕地盐碱化趋势、不发生大面积次生盐碱化。”

——2023年12月1日，第23期《求是》杂志发表了中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平的重要文章《切实加强耕地保护 抓好盐碱地综合改造利用》，再次强调“加快耕地质量保护立法，实施黑土地保护工程，加强酸化等退化耕地治理，实施耕地有机质提升行动。中央和地方财政要为提升耕地质量提供资金保障，同时加强监

管，确保把钱用到耕地上。”

新征程上，耕地保护任务没有减轻，反而更加艰巨。腐植酸是土壤地力的核心，是落实“藏粮于地”战略的最佳技术之一，也是实现“藏粮于地”最好的物质基础。通过工业制取的腐植酸反哺土壤，是直面解决“土壤问题—肥料问题—粮食问题—气候问题”等系统性问题的利器，也是直面“双碳农业”的重要抓手。

2 腐植酸是改良障碍和退化土壤的重要手段

目前，我国耕地仍存在较为突出的土壤退化和障碍问题，包括土壤盐碱（渍）化、酸化、贫瘠化、沙化、板结、耕层浅化和土传病害等。这些问题归根结底是土壤耕层不健康。大量的科学研究和实践证明，腐植酸对不同酸碱度的土壤具有遇酸调酸、遇碱调碱和稳定缓冲酸碱的功能^[1]，可以有效改善土壤团聚体特性，优化土壤理化性状^[2]。通过工业化制取的腐植酸反哺土壤，是快速构建土壤健康耕层、解决众多土壤问题的利器，是构筑新时期“土肥和谐”新关系的不二法宝。

2.1 腐植酸与盐碱地（盐渍土）综合利用

我国盐碱荒地多，盐碱耕地面积也很大，问题比较复杂。据统计，2017年全国盐碱耕地面积总计达16821万亩，占比8.31%（表1）。可见，盐碱地的综合开发利用，对保障国家粮食安全、端牢中国饭碗具有战略意义。

2.1.1 盐碱的危害及盐碱地改良措施

盐碱地是各类盐土、碱土以及不同程度盐化和碱化土壤的总称^[3]。盐碱的危害主要表现在3个方面^[4]：（1）渗透胁迫，土壤中过高的盐分导致土壤水势下降，造成植株吸水困难甚至脱水；（2）盐基离子毒害，土壤溶液中某些盐离子如 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等对植物生长具有毒害影响；（3）土壤pH较高，不仅会对植物生长造成损伤，还会破坏土壤团粒结构，造成表层土壤板结，影响植物根系生长。

盐碱荒地垦造 / 盐碱耕地改良主要工程措施有3类：（1）平整土地。通过平整土地消除盐分聚



集的微域地形,防止盐斑形成,减少盐分聚集地表^[5]。(2)降低地下水位。通过明沟排水、暗管排水、竖井排水等方式,将地下水位降低到临界深度以下,避免土壤盐分随土壤毛管水上升^[6,7]。(3)淡水洗盐。利用淡水浸泡淋洗耕层土壤中过

多盐分直接减轻盐碱危害。以上3类工程可联合使用,同时结合秸秆还田、增施有机肥/腐植酸、化学脱盐降碱、生物/腐植酸降害、平衡营养等改良措施,促进盐碱地土壤团粒结构形成,进一步减轻盐碱危害。

表1 2017年全国耕地土壤盐碱化情况

Tab.1 Soil salinization situation of cultivated land in China in 2017

项次	盐碱(万亩)		障碍层次(万亩)		瘠薄(万亩)		渍潜(万亩)		沙化(万亩)		合计(万亩)	占比(%)
	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素		
盐碱	富磷	2	1295	—	—	—	—	—	—	—	16821	8.31
	不富磷	6	13231	0	1519	1.24	727	—	34	—		
总计	8	14526	0	1519	1.24	730	0	34	0	3.37	16821	8.31

2.1.2 腐植酸与盐碱地治理

腐植酸、腐植酸土壤调理剂、腐植酸肥料等可通过降低土壤pH和含盐量、影响土壤水分入渗和水盐运移特征、改善土壤交换性盐基离子组成等,实现对盐碱地的改良且效果显著。

现列举3篇盐碱地治理的研究文献。韩康等^[8]对初始含盐量为3.2 g/kg的盐碱地进行改良发现,施用腐植酸型改良剂显著降低了土壤的含盐量,相较对照减少0.59~3.17个百分点,甜菜产量、产糖量相较于对照分别增加11.29%~32.54%、13.50%~38.61%。孙艳等^[9]在对土壤初始pH为8.19、含盐量为3.88 g/kg的盐碱地进行改良时发现,添加生化黄腐酸能提高土壤持水效率和相对脱盐率,在生化黄腐酸添加量为2 g/kg条件下,0~20 cm土层内土壤平均体积含水率提高3.38%,平均持水效率提高10.65%,相对脱盐率提高36.32%;同时生化黄腐酸还能显著改善土壤交换性盐基离子组成,促进土壤中交换性Ca²⁺、Mg²⁺、

K⁺与有害离子Na⁺等的置换作用;在2 g/kg添加量时交换性Ca²⁺平均浓度增加20.94%,交换性Na⁺平均浓度减少14.72%。杨彦明等^[10]在对土壤初始pH为8.85、全盐量为17.84 g/kg的盐碱地进行改良时发现,增施腐植酸可有效降低土壤pH,可使K⁺显著提高,增加K⁺/Na⁺,极大减少Na⁺对植物的伤害,配合苗期浅松处理,增施腐植酸的盐碱土碳库及微生物群落结构最优。

2.2 腐植酸与酸化土壤(pH < 5.5)治理

40多年来,我国耕地土壤酸碱度在不断变化,耕地土壤酸碱度30多年间下降0.6~0.8个pH单位。南方14个省(区、市)耕地土壤pH < 6.5的比例由30多年前的52%扩大到65%,pH < 5.5的耕地面积由20%扩大到40%,pH < 4.5的耕地面积由1%扩大到4%。据统计,2017年我国耕地土壤酸化面积总计29794万亩,占比14.73%(表2),而且土壤酸化还在加剧。可见,酸化土壤治理刻不容缓。

表2 2017年全国耕地土壤酸化情况

Tab.2 Soil acidification situation of cultivated land in China in 2017

项次	酸化(万亩)		障碍层次(万亩)		瘠薄(万亩)		渍潜(万亩)		沙化(万亩)		合计(万亩)	占比(%)	
	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素			
酸化	富磷	20	7088	7	1021	0.39	439	12	559	—	0.45	29794	14.73
	不富磷	138	18119	6	1053	0.95	324	25	982	—	0.14		
总计	158	25207	13	2074	1.34	763	37	1541	0	0.59	29794	14.73	

2.2.1 土壤酸化的危害及改良措施

土壤酸化的危害^[11, 12]主要表现在4个方面:

(1) 盐基离子淋失, 造成植物缺素; (2) 活性铝、锰溶出, 如锰毒会导致苹果粗皮病; (3) 活化(有毒)重金属元素, 导致农产品品质差, 出现安全问题; (4) 土壤生态功能变差, 加剧土传病害。其中, 活性铝、锰溶出危害最为严重。

酸化土壤的改良措施主要有6类: (1) 根据作物需求, 控制氮肥施用量。酰胺态、铵态等氮肥过度投入是农田土壤酸化的重要原因^[13], 控制氮肥施用量可从源头上减缓土壤酸化。(2) 增施有机肥。施用有机肥可提高土壤有机质和盐基离子总量, 进而提高农田土壤酸中和容量^[14]。(3) 施用化学改良剂。施用碱性肥料或石灰质土壤调理剂, 利用其碱性可以中和土壤酸性。(4) 秸秆还田。通过秸秆直接还田和转化还田, 可以提高土壤pH, 降低交换性酸总量, 同时提高有机质含量及交换性能^[15]。(5) 高分子改良剂。高分子改良剂主要分为天然类高分子物质和合成类高分子物质两大类。天然类高分子物质主要有腐植酸类、多聚糖类、纤维素类以及木质素类等, 合成类高分子物质主要有聚丙烯酰胺及盐类、聚乙烯醇、聚醋酸乙烯、脲醛树脂以及聚谷氨酸等^[16]。(6) 综合改良措施。综合利用上述改良措施, 可以有效避免单一改良措施的局限性, 达到“1+1 > 2”的效果。如大量或者长期施用生石灰会引起土壤板结, 同时也会引起土壤中钙、钾、镁、磷等营养元素的失衡失调, 最终导致作物减产。实践证明, 如果将石灰质土壤调理剂与腐植酸/有机肥/秸秆搭配使用, 不仅能很好地解决这一矛盾, 同时也能延缓改良后土壤反复酸化的时间。

2.2.2 腐植酸对酸化土壤的改良效果

单施碱性腐植酸、腐植酸肥料或与其他调理剂配施, 对不同程度酸化土壤均具有显著的改良效果。改良作用机理主要表现为: 碱性腐植酸肥料类产品自身的碱性直接与土壤中的 H^+ 反应, 或与腐植酸盐形成腐植酸-腐植酸盐相互转化的缓冲系统, 间接消耗土壤溶液中的 H^+ , 从而达到对酸化土壤的改良^[17]。

现列举3篇文献研究成果例证。潘晓莹等^[18]研究表明, 添加黄腐酸显著提高了2种酸化土壤的pH, 随着黄腐酸添加量的增加对土壤pH的提升效果逐渐增强, 使土壤pH从初始4.32和5.01提高至5.91和5.97, 同时提高了2种土壤的pH缓冲容量, 最高增加0.70和1.99倍, 因而显著提高了土壤的抗酸化能力。苏初连等^[17]在基施有机肥的基础上, 以追施水溶性复合肥为对照, 追施腐植酸型功能肥将土壤pH从初始3.69提高至4.90, 土壤交换性钙和阳离子交换量显著提高(分别为96%和31.3%), 保持了土壤养分含量, 土壤颗粒数量增加且体积变大, 土壤团聚体蜂窝状结构变多。李丹等^[19]研究表明, 生石灰和含腐植酸水溶肥料配施处理能有效改良酸化土壤, 且改良时效持续较长, 其中生石灰 900 kg/hm^2 +含腐植酸水溶肥料 37.5 kg/hm^2 改良效果最佳, 施用两季后, 与空白对照比较, 土壤pH从初始5.03提高至6.73, 土壤交换性酸总量降低90.25%, 土壤交换性 Al^{3+} 降低93.59%。

2.3 腐植酸与中性耕地(pH 5.5~8.5)地力提升

目前, 我国中性耕地土壤障碍问题仍较为突出。据统计, 2017年我国中性耕地土壤障碍退化面积总计35972万亩, 占比17.78%(表3)。此外, 耕地土壤板结的问题日益突出。根据2019年全国耕地质量调查评价结果, 耕层厚度小于20cm的耕地所占比例超过71%; 土壤容重大于 1.3 g/cm^3 的耕地占50%左右。据专家预测, 有约4亿亩的耕地存在不同程度的土壤板结问题, 主要分布在黄河流域以北, 特别是东北、黄淮海等区域, 集中表现为耕层土壤变薄、土壤容重加大、土壤结构变差等方面。

2.3.1 中性耕地土壤障碍及改良措施

中性耕地土壤障碍表现是多方面的, 主要表现在5个方面: (1) 障碍层次; (2) 瘠薄; (3) 渍潜; (4) 沙化; (5) 板结等。

直面中性耕地土壤障碍, 主要解决地力提升的问题。全面提升中性耕地土壤有机质的措施主要有3类: (1) 大力发展绿色种养循环农业, 使畜禽粪便肥料化、高效化利用。(2) 发展绿肥种植,



合理开发冬闲田（3亿亩）、秋闲田（7000万亩）种植绿肥，重点发展肥饲、肥菜、肥粮等经济绿肥。

（3）合理利用秸秆覆盖还田、秸秆翻压还田、秸秆过腹还田、秸秆转化成腐植酸还田等。

表3 2017年全国中性耕地土壤障碍退化情况

Tab.3 Soil obstacle degradation situation of neutral cultivated land in China in 2017

项次	障碍层次（万亩）		瘠薄（万亩）		渍潜（万亩）		沙化（万亩）		合计 （万亩）	占比 （%）	
	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素	不缺素	缺素			
障碍层次	富磷	45	3111	—	—	—	—	—	15864	7.84	
	不富磷	206	12501	—	—	—	—	—			
瘠薄	富磷	—	—	18.80	2872	—	—	—	14019	6.93	
	不富磷	—	—	94.54	11033	—	—	—			
渍潜	富磷	—	—	—	—	23	2657	—	6061	3.00	
	不富磷	—	—	—	—	14	3366	—			
沙化	富磷	—	—	—	—	—	—	1.09	28	0.01	
	不富磷	—	—	—	—	—	—	26.90			
总计		251	15612	113.34	13905	37	6023	0	27.99	35972	17.78

2.3.2 腐植酸对中性耕地土壤的改良效果

腐植酸、腐植酸肥料可以通过其自身的物理、化学、生物刺激性，提高土壤团聚体的含量，降低土壤容重，改善土壤持水能力、供肥能力，从而达到对中性耕地土壤的改良。

现列举3篇文献研究成果例证。周磊等^[20]通过连续3年（2020—2022年）田间定位试验研究发现，一次性施用褐煤腐植酸2年后均显著提高了风沙土0~40 cm土层的贮水量，以高量褐煤腐植酸处理（6 t/hm²）土壤贮水量最高；3年后，高量褐煤腐植酸处理的土壤有机质、全氮、铵态氮、速效磷和速效钾含量总体高于其他处理。李玉晨^[21]研究表明，在水土流失严重的黄土区的土壤中施用生物源黄腐酸与矿物源黄腐酸均能提高土壤中各粒级团聚体含量，降低黏粒含量和土壤分形维数，增大土壤Zeta电位绝对值，使土壤胶体颗粒不易聚沉，达到提高土壤胶体稳定性的效果。刘灿华等^[22]研究表明，腐植酸与适宜用量的氮肥配施，可有效改善豫南褐土低肥力区土壤的理化性质，其中常规施肥减氮15%+腐植酸3000 kg/hm²的效果最佳，与其他处理相比土壤容重最低，土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量最高。

3 实施“腐植酸+”行动，减肥减药降残膜

当前，直面农田土壤环境安全问题，化肥、农药、地膜等减量增效是必然要求。化肥产品创新与产业绿色转型升级的关键途径是“腐植酸+”。通过“腐植酸+化肥”，即化肥全面黑色化（腐植酸化），可以提高化肥利用率，实现减肥增效；通过“腐植酸+功能性物质”，可以减少化肥、农药的用量及地膜的残留。

3.1 腐植酸+化肥，提高肥料利用效率

腐植酸+化肥，将腐植酸与化肥结合，如腐植酸氮肥、腐植酸磷肥、腐植酸钾肥、腐植酸复合肥以及腐植酸中微量元素肥等，可以提高肥料利用率，从而减少化肥用量；同时也对作物产量提高、品质改善，土壤理化性质改善和养分含量提高有显著效果。

（1）腐植酸氮肥。田贵生等^[23]研究表明，与普通尿素相比，梅川镇和大金镇水稻施用脲基活化腐植酸氮肥、常规掺混腐植酸氮肥均能显著提高籽粒产量、产值及氮肥利用率，氮肥利用率分别提高15.0、6.7个百分点和10.9、4.2个百分点。东强等^[24]研究表明，缓释尿素配施黄腐酸处理较

缓释尿素处理的黑青稞籽粒产量、氮肥农学效率、偏生产力、贡献率分别提高 21.66%、54.69%、21.64%、27.13%，黑青稞干物质积累量、产量、氮肥利用率显著提高。刘艳等^[25]研究表明，与普通尿素处理相比，施用腐植酸尿素的水稻产量显著增加 3.26%，氮肥利用率显著提高 30.42%。

(2) 腐植酸磷肥。李建峰等^[26]研究表明，在棉花生育后期施用混合磷源+腐植酸液体肥料，棉花吐絮期干物质积累量、籽棉产量较施用单一磷源液体肥料和对照处理分别提高 7.4%、12.4% 和 25.3%、33.7%；该处理磷肥利用率和农学利用率较施用单一磷源液体肥料提高 46.2%、77.1%。李伟等^[27]研究表明，与普通磷肥相比，风化煤腐植酸、高分子量腐植酸、中分子量腐植酸、低分子量腐植酸磷肥偏生产力和农学效率分别提高 14.71%、6.01%、18.82%、21.35% 和 14.95%、1.66%、20.18%、23.03%，磷肥表观利用率分别提高 2.93、0.51、4.52、5.41 个百分点，以中、低分子量腐植酸磷肥效果最为明显。李志坚等^[28]研究表明，与普通磷酸一铵相比，低磷水平下，腐植酸增效磷肥小麦产量、小麦吸磷总量、磷肥表观利用率分别提高 26.28%、42.59%、26.21 个百分点；高磷水平下，腐植酸增效磷肥则分别提高 26.81%、18.18%、6.13 个百分点。

(3) 腐植酸钾肥。张一扬等^[29]研究表明，在烟草植株生长偏弱的环境下，以 75% 硫酸钾+25% 腐植酸钾肥配施效果最佳，烟叶钾素分配率达到 57.14%；与单施硫酸钾相比，钾素含量提高 16.50%，钾肥利用率提高 126.42%。梁太波等^[30]研究表明，施用腐植酸可明显提高生姜的根系活力，增加植株钾素吸收量和干物质积累量，比空白对照增产 8.88%；施用腐植酸钾显著促进根系生长发育，提高钾素积累速率、钾素积累量，钾肥农学利用率和钾肥吸收利用率比等量氧化钾对照分别显著提高 31.23%、61.50%，并最终提高产量，比空白对照增产 61.29%，比等量氧化钾对照增产 9.92%。王振振等^[31]研究表明，与施等量氧化钾相比，施用腐植酸缓释钾肥可促进甘薯对钾素的吸收，钾肥吸收利用率、农学利用率、偏生产力和甘

薯块根产量分别显著增加 20.09%、42.69%、5.89% 和 22.83%。

(4) 腐植酸复合肥。尚大朋等^[32]研究表明，腐植酸增效协同处理与配方施肥处理相比，氮、磷、钾农学效率分别提高 37.62% ~ 56.62%、55.90% ~ 80.77%、57.35% ~ 167.57%；氮肥、磷肥、钾肥利用率分别提高 9.02 ~ 12.48、5.95 ~ 8.92、7.74 ~ 20.33 个百分点；耕层土壤 pH 呈下降趋势，土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量有所提高。钟禄威等^[33]研究表明，与等量掺混肥相比，施用腐植酸保水缓释肥土壤含水量、有机质和碱解氮含量分别提高 20.83% ~ 47.22%、42.49% ~ 46.09% 和 25.03% ~ 62.36%；紫花苜蓿产量增加 12.04% ~ 37.86%；氮肥、磷肥、钾肥利用率分别提高 0.89 ~ 2.74 倍、0.48 ~ 1.83 倍、0.89 ~ 2.16 倍，肥料贡献率提高 1.13 ~ 1.40 倍。尹静等^[34]研究表明，与氮磷钾处理相比，腐植酸复合肥可显著提高鲁东酸性土壤冬小麦籽粒产量，增产率 4.52%；增加地上部对养分的吸收，显著提高土壤碱解氮含量，显著提高氮肥、磷肥、钾肥利用率，分别增加 42.7%、11.4% 和 24.8%。

(5) 腐植酸中微量元素肥。刘晓辰等^[35]研究表明，锌肥与腐植酸协同作用下小麦产量增加 24.90 ~ 201.14 kg/hm²，小麦籽粒锌含量增加 1.98 ~ 4.67 mg/kg，小麦籽粒淀粉及蛋白质含量分别增加 1.45% ~ 2.64%、3.05% ~ 5.02%。姜小凤等^[36]研究表明，喷施 30% 腐植酸钙 15 天后，皇冠梨果皮中的钙含量最高，较对照增加 26.02%，与其他钙肥、对照差异极显著；喷施 30 天后，花斑病病情指数显著降低 65.18%。陈海宁等^[37]研究表明，与对照相比，硅钙钾镁肥与黄腐酸钾配施后的土壤有机质、速效钾、交换性钙含量和阳离子交换量分别显著提高 11.6%、24.8%、24.7% 和 1.55 cmol/kg；叶片 SPAD 值和叶面积分别显著提高 11.9% 和 16.1%；单果重和产量分别显著增加 9.4% ~ 11.8% 和 11.4% ~ 14.8%；果实可溶性固形物、固酸比、Vc 含量和硬度分别显著增加 8.6% ~ 10.2%、14.1% ~ 16.8%、10.1% ~ 12.3% 和 3.2% ~ 3.8%。



3.2 腐植酸 + 功能物质, 减肥减药降残膜

通过腐植酸 + 功能物质, 或是发挥腐植酸的特定功能, 可以改善土壤理化性质、提高功能物质的利用效率、增强作物抗逆能力等, 从而更好地为绿色可持续农业发展服务。

(1) 腐植酸生物刺激剂。腐植酸生物刺激剂可以提高作物抗逆能力, 减少农药化肥用量。李双^[38]研究表明, 腐植酸生物刺激剂具有促进作物生长, 提高作物生理活性、健康水平和抵御恶劣环境的能力。肖富容等^[39]研究表明, 在黑土中, 施用添加腐植酸与 2-氯-6(三氯甲基)-吡啶的尿素处理可以提高玉米产量、植株吸氮量、株高、叶片叶绿素含量和肥料利用率, 从而减少化肥用量。李思琦等^[40]研究表明, 叶面喷施矿源黄腐酸生物刺激剂番茄幼苗热害指数相比高温对照显著降低, 降幅最高可达 72.9%, 植株的生物量也显著增加; 同时, 叶片的电解质渗透率和丙二醛含量显著降低; 脯氨酸和可溶性蛋白含量显著增加。

(2) 腐植酸农药。腐植酸 + 农药可提高杀虫剂、杀菌剂、除草剂等农药药效, 减少农药用量, 降低农药残留。杨德荣等^[41]研究表明, 将传统有机肥、凹凸棒、腐植酸以及复合生物刺激素有机融合, 制得一种具有抑制线虫和土传病害作用的功能有机肥, 与传统药剂协同, 对烟草根黑腐病和根结线虫病的防效达 82.4% 和 86.2%, 对番茄根结线虫的防效达 86.7%。何秀院等^[42]研究表明, 腐植酸铵与除草剂草甘膦配伍, 可提高除草剂药效 10% ~ 15%, 药效进程提前 2 ~ 5 天; 腐植酸铵与烟嘧磺隆、2, 4-D 丁酯配伍不仅可提高药效 20%, 而且还能促进玉米生长, 增加其抗旱性。刘美菊等^[43]研究表明, 腐植酸营养液及其与植物源杀线剂和微量元素配施, 可促进根系生长, 显著降低烤烟病级、根结指数、根结干重、根结数量和根结体积, 进而提高烤烟抗病和抑病能力。

(3) 腐植酸可降解地膜。腐植酸可降解地膜既具有塑料地膜增温保墒的作用, 又易降解, 且降解后可改良土壤、提高土壤肥力, 是很好的塑料地膜替代品。刘国惠等^[44]研究表明, 与喷等量清水相比, 腐植酸有机地膜和塑料地膜均可以显著提

高 5、10、15 cm 土层温度, 提高 0 ~ 20 cm 土层的保水效果; 显著促进花生生长和根系结瘤; 使花生产量增加 20.58%。王旭钰^[45]研究表明, 喷施腐植酸钾液膜可以有效抑制土壤水分蒸发、提高土壤温度, 土壤水分蒸发量比对照减少 12.89%, 土壤温度比对照增加 0.84% ~ 12.16%, 还可以提高土壤肥力和增加土壤酶活性。李允等^[46]研究表明, 腐植酸和腐植酸生物降解膜复合处理可减轻土壤连作障碍, 施用后细菌、放线菌数量分别比对照提高 115.79%、135.14%, 真菌数量降低 87.25%, 细菌/真菌值增大 16 倍, 且土壤有机质及营养元素含量也有所提升, “平邑甜茶”幼苗地上部和根系生长健壮。

(4) 腐植酸重金属解毒剂。腐植酸治理土壤重金属污染, 既可以作为淋洗剂(黄腐酸), 活化重金属, 将土壤中重金属淋洗出; 又可以作为钝化剂(黑腐酸), 将重金属固定在土壤中, 使其失去生物活性。陈虹任等^[47]研究表明, 磷酸二氢钾与黄腐酸复配淋洗剂在液固比为 10 mL/g、淋洗时间为 24 h 及淋洗温度为 30 °C 的淋洗条件下, 土壤砷的最高淋洗效率为 58.10%, 而且可以更好地保护土壤 pH。吴梅等^[48]研究表明, 铁基腐植酸钾钝化剂的施加可提高土壤 pH 和钝化土壤砷, 在 5.36 g/kg 施用量下效果最好, 钝化率为 26.2%。任汉儒等^[49]研究表明, 腐植酸复配凹凸棒石产生的新活性官能团, 增强了其对重金属的吸附作用, 腐植酸和凹凸棒石质量比为 1 : 5 时, 能够将土壤 pH 和电导率分别提高至 7.31 和 366.00 μ S/cm, 与对照组相比, 土壤中重金属镉的酸溶态含量降低 34.10%; 镉的还原态和残渣态分别升高 21.09% 和 63.13%。

(5) 腐植酸微生物菌剂。腐植酸微生物菌剂具有刺激作物生长, 调节根际微生态, 提高作物抗病虫能力等功效。王凤娇等^[50]研究表明, 施用腐植酸、碱活化腐植酸、微生物菌剂均能促进丹参幼苗生长, 碱活化腐植酸 + 微生物菌剂配施效果更好; 与常规施肥相比, 碱活化腐植酸 + 微生物菌剂处理可使丹参壮苗指数、地上部干物质质量、地下部干物质质量、干物质总量、根冠比分别显著提高

250.94%、59.67%、240.0%、80.88%和107.69%。施河丽等^[51]研究表明,黄腐酸与微生物菌剂协同对烟草青枯病有较好的防治效果,使根际土壤细菌群落多样性显著增加,细菌群落结构发生明显变化。段佳丽等^[52]研究表明,生防放线菌与腐植酸钾配施处理能明显促进丹参生长,提高丹参产量及抗病虫能力,可使田间根结线虫侵染率降低49.3%,调节丹参根域微生态平衡。

4 开辟肥源,化解经济社会生态矛盾

腐植酸主要来源包括两大类:(1)风化煤、褐煤、泥炭。(2)大量农业废弃的、洁净的生物质。高效利用两大类资源,既丰富了腐植酸原料来源,也可以化解经济社会生态矛盾问题。

4.1 创新腐植酸生产技术化解经济社会生态问题

通过创新腐植酸生产技术,对症下药,可以有效化解4类经济社会生态问题。

(1) 化解矿产资源经济浪费问题。

主要问题:据不完全统计,我国风化煤储量约1000亿吨^[53],已探明褐煤储量1431亿吨^[54]。总体来看,资源储量丰富,但是浪费问题十分严重。例如,大型国有企业用低热值煤来发电,这是对矿产资源的极大浪费。

解决措施:矿物源腐植酸高效开发利用。风化煤、褐煤作为低热值煤是提取制备腐植酸的宝贵资源。通过低热值煤制取腐植酸及系列环境友好产品,是减少矿产资源浪费、提高低热值煤利用价值的一个直接有效措施。

(2) 化解秸秆禁烧社会和负面生态问题。

主要问题:虽然很多研究表明,秸秆还田益处多多^[55~59],但负面效应也不少,导致人们反对秸秆禁烧的呼声越来越高,急需一种可以科学高效利用秸秆的新技术新产业。

解决措施:生物质腐植酸产业化。针对大量的农作物秸秆综合利用问题,通过创新技术制备生物质腐植酸,可以实现资源高效循环利用。如中国石油大学(华东)田原宇教授团队荣获2020年度国家技术发明二等奖技术成果——《典型农林

废弃物快速热解创制腐植酸环境材料及其应用》。该项成果通过创新技术将秸秆等转化为生物质腐植酸,可以有效解决农林有机废弃物高效清洁循环利用中的五大问题——腐殖化率不高、能量消耗率高、腐植酸质量安全、生产成本低、秸秆有效还田率低。目前,针对该项技术的配套研究成果车载移动秸秆制腐植酸装置已经完成初试,可以实现从田间地头解决秸秆的收集储存、运输和制成腐植酸及其肥料。

(3) 化解地膜残留污染严重问题。

主要问题:我国旱作区地膜残留日趋严重。根据第二次全国污染源普查数据显示,2017年全国种植业中地膜多年累积残留量达118.48万吨,与第一次全国污染源普查数据(2007年,12.10万吨)相比,增加了近10倍。环境友好的可降解地膜,是今后我国地膜产业的发展趋势,也是实现绿色可持续农业发展的必要前提。

解决措施:腐植酸液态地膜/可降解地膜。以矿物源腐植酸或生物质腐植酸为原料,通过创新技术制备腐植酸液态地膜/可降解地膜,是替代传统塑料薄膜的绿色环保产品,可降解、可养土、可培肥,是从源头解决地膜残留问题的有效措施。

(4) 化解影响碳中和的耕地生态问题。

主要问题:当前,我国除草剂、杀虫剂、杀菌剂等农药用量仍然很大,这些产品的残留及污水灌溉等对耕地生态造成严重影响,直接影响耕地质量和土壤碳库。

解决措施:腐植酸绿色农资系列产品。腐植酸肥料、腐植酸农药、腐植酸重金属解毒剂、腐植酸可降解地膜、腐植酸污水处理剂等,可实现对土壤、水体、大气多维度共治,减轻对耕地生态的影响。

4.2 发展腐植酸绿色农资产品的重点方向

新时期,以耕地问题、需求和目标为导向,发展腐植酸绿色农资产品的8个重点方向:(1)以耕层板结、浅薄硬化问题为导向,通过腐植酸肥料促进作物根系生长;(2)以土壤、肥料营养释放和作物营养吸收的规律为导向,发展腐植酸同步营养肥;(3)基于化肥黑色化发展的必然趋势和要求,加强“腐植酸+化肥”有机无机配合研究;(4)针



对不同地区土传病害、拮抗缺素,开发腐植酸功能性、专一性产品,解决当地的困惑;(5)针对土壤酸、碱、瘦、潜、毒等问题,开发功能性腐植酸植物生长调节剂和土壤调理剂;(6)针对土传病害治理、健康土壤构建,开发腐植酸生物有机肥;(7)针对土壤污染问题,开发修复、治理污染土壤专用腐植酸功能性产品;(8)基于农业生产中保水保肥、提高抗逆能力的需求,开发腐植酸抗逆产品,构建适宜作物生长的健康耕层。

5 创新机制,激发腐植酸储碳控碳积极性

实现农业碳减排,腐植酸可以发挥重要作用。同时,需要国家层面给予更好的政策引导和支持,也需要更大限度地激发农民储碳控碳积极性。

5.1 发挥腐植酸在土壤储碳控碳中的重要作用

土壤碳库约占生物圈总碳的85%,土壤碳库中腐植酸碳最大,约占土壤有机碳的80%。可见,腐植酸在地球碳循环中发挥着重要作用。腐植酸对储碳控碳的影响主要通过①促进土壤固碳②促进生物固碳③减少二氧化碳、氨氮排放3个途径实现。

(1)腐植酸促进土壤固碳。土壤固碳的实质就是有机碳、无机碳与土壤颗粒团聚形成复杂多样的土壤团聚体的过程。大量研究表明,腐植酸、腐植酸肥料可促进土壤团聚体形成,提高大团聚体的含量,极大增强土壤团聚体的稳定性,从而提高土壤团粒结构,改善土壤理化特性^[60~62]。

(2)腐植酸促进生物固碳。植物通过光合作用将空气中的二氧化碳转化为有机质,是重要的生物固碳途径。腐植酸一方面通过其物理、化学、生物活性,改善土壤理化性质,改善障碍地地力,提升植被覆盖率;一方面作用于植物,提高叶片叶绿素的含量、提高净光合速率,促进植物光合作用,增强植物抗逆性,增加植物生物量^[63,64]。

(3)减少二氧化碳、氨氮排放。土壤腐植酸的光催化聚合可以提高土壤结构的稳定性,而且可以降低在聚合土壤有机质中大量细菌的呼吸作用,促进碳固定,减少二氧化碳排放^[65];腐植酸还可

以抑制脲酶的活性、减缓尿素分解、减少氮挥发,同时逐渐释放氮素,延长肥效,提高氮肥利用率,减少肥料用量^[66~68]。

5.2 土壤储碳与耕作控碳存在的4个问题

耕地是农村改革发展稳定的基石,于农民而言,耕地是重要的生产、生活、生态空间,保护耕地农民既有义务又是受益人。

我国农村土地是“三权”分置责任,三权为所有权、承包权和经营权。土地所有权归政府集体,政府集体有责任保护耕地,为主体责任。为了让政府集体更好地履行保护耕地的责任,国家要立法,要问责,如现在地方领导干部离任审计,党政同责,就是对耕地的保护;对于农民、经营者,拥有土地的承包权、经营权,有义务保护耕地;为了让农民、经营者更好地保护耕地,国家要激励,要规范,要提高农民保护耕地的积极性需要政府、社会和农民共同努力。

目前,我国土壤储碳与耕作控碳依然存在以下4个问题:(1)缺乏提升耕地的有效技物措施和指导;(2)土地经营者自觉保护耕地的积极性差;(3)土壤碳汇交易制度没有明确建立;(4)责任传导上热、下凉。

5.3 创新土壤储碳与耕作控碳机制的5个建议

面对土壤储碳与耕作控碳的诸多问题,需要思考怎样创新机制压实责任,激发储碳控碳积极性。对此,提出以下5个建议。

(1)提升农田土壤碳汇。2022年5月8日,农业农村部、国家发展改革委印发《农业农村减排固碳实施方案》,要求开展农田碳汇提升行动。加强高标准农田建设,加快补齐农业基础设施短板,提高水土资源利用效率。推进退化耕地治理,重点加强土壤盐碱化、酸化治理,消除土壤障碍因素,提高土壤肥力,提升固碳潜力。建议建立土壤碳汇指标体系和碳汇交易平台。

(2)建立耕地地力指标指数保险制度。2022年8月19日,新华社组织专家在“中经智库每月谈”围绕“中国耕地质量保护与提升”这一主题,对耕地地力指标体系进行了专题研究。建议以耕地地力指标指数为基础,建立保护耕地、种粮贡献与农民



养老保险挂钩机制,将土地经营者补充到养老保险。

(3) 实施土壤医生行动计划。联合国粮食与农业组织 (FAO) 《全球土壤医生计划》是农民对农民的培训计划,旨在建立农民对可持续土壤管理的能力,支持该国政府和利益相关者,满足农民社区的需求。全球土壤医生行动计划给农民、政策制定者、农业推广人员、非政府组织、私营机构和对土壤资源感兴趣的利益相关者和从业人员提供支持。建议腐植酸行业率先行动,开展土壤医生技能培训,推动腐植酸土壤医生行动的实施。

(4) 施行“田长”制。建议压实乡村“田长”责任,赋予“田长”的激励责任。规范耕地保护、建设、监督管理及其相关活动,将耕地保护管理延伸到“最后一公里”,构建覆盖全部、责任到人、监管到位的乡村耕地保护体系,形成“横向到边、纵向到底、全覆盖、无缝隙”的耕地保护机制。

(5) 开展腐植酸储碳控碳系统性研究。建议系统开展腐植酸、腐植酸肥料土壤储碳控碳机理和应用研究,制定土壤腐殖质-腐植酸碳计量标准、腐植酸肥料低碳化计量标准、腐植酸低碳肥料碳达峰碳中和计量标准等,为腐植酸、腐植酸肥料进入碳交易市场提供支撑。

6 结语

耕地质量提升与储碳控碳是国家粮食安全战略和生态文明建设的关键。腐植酸的科学应用能改土壤碳源为土壤碳汇,上接“天”下接“地”,是利国利民、利子孙万代的环境友好产业。全国腐植酸行业要发挥技术资源优势,协助建立健全土壤储碳和耕作控碳的有效机制,充分发挥腐植酸在提升耕地质量和增强土壤储碳控碳能力中的重要作用,不断创新,为中华民族可持续发展作出新的贡献。

参考文献

[1] 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]. 西安理工大学硕士学位论文, 2021.

- [2] 孟和那仁, 包翔, 王明玖. 不同治理措施对盐碱土团聚体组成和碳氮的影响 [J]. 北方园艺, 2021 (12): 88 ~ 93.
- [3] 张强, 赵文娟, 陈卫峰, 等. 盐碱地修复与保育研究进展 [J]. 天津农业科学, 2018, 24 (4): 65 ~ 70.
- [4] 胡宗英, 孙泽威. 土壤盐渍化及其危害的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41 (33): 12888 ~ 12890.
- [5] 张克强, 白成云, 马宏斌, 等. 大同盆地金沙滩盐碱地综合治理技术开发研究 [J]. 农业工程学报, 2005 (S1): 136 ~ 141.
- [6] 李茜, 孙兆军, 秦萍. 宁夏盐碱地现状及改良措施综述 [J]. 安徽农业科学, 2007 (33): 10808 ~ 10810, 10813.
- [7] 衡通, 何新林, 杨丽莉, 等. 暗管与竖井排水工程改良新疆盐渍土的设计与效果评价 [J]. 农业工程学报, 2022, 38 (21): 111 ~ 118.
- [8] 韩康, 黄春燕, 苏文斌, 等. 腐植酸型改良剂对盐碱地甜菜生长发育的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (11): 189 ~ 194.
- [9] 孙燕, 王春宏, 王全九, 等. 生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特征及盐基离子组成的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (4): 228 ~ 235.
- [10] 杨彦明, 周祎, 张子健, 等. 腐殖酸与不同耕作措施对盐碱土碳库和微生物群落结构的影响 [J]. 作物杂志, 2024 (1): 157 ~ 165.
- [11] 尹力初. 土壤酸化的防治 [J]. 湖南农业, 2019 (7): 14.
- [12] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展 [J]. 生态学杂志, 2014, 33 (11): 3137 ~ 3143.
- [13] 宗浩霖. 长期施用控释尿素对农田土壤酸化特征的影响及机制研究 [D]. 山东农业大学硕士学位论文, 2024.
- [14] 徐影, 李彦生, 刘晓冰, 等. 长期施肥改变玉米大豆轮作/连作黑土农田酸化速率和酸中和容量 [J]. 土壤, 2024, 56 (4): 750 ~ 759.
- [15] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响 [J]. 环境科学, 2020, 41 (9): 4246 ~ 4252.



- [16] 聂天宏, 杨兴, 李永春, 等. 高分子材料在土壤物理性质改良方面的研究进展 [J]. 土壤学报, 2020, 51 (6): 1504 ~ 1512.
- [17] 苏初连, 邓爱妮, 范琼, 等. 腐植酸型功能肥料对酸化土壤改良和香蕉生长的作用 [J]. 分子植物育种, 2022, 20 (6): 1923 ~ 1929.
- [18] 潘晓莹, 时仁勇, 洪志能, 等. 富里酸对红壤酸度的改良及酸化阻控效果 [J]. 土壤, 2020, 52 (4): 685 ~ 690.
- [19] 李丹, 王道泽, 赵玲玲, 等. 不同土壤改良剂对设施蔬菜土壤酸化的改良效果研究 [J]. 中国农学通报, 2017, 33 (27): 112 ~ 116.
- [20] 周磊, 辛志杰, 杜品廷, 等. 褐煤腐植酸对科尔沁沙地风沙土壤特性及芥麦产量的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (6): 62 ~ 72.
- [21] 李玉晨. 不同类型黄腐酸对土壤性质及生菜生长特征的影响研究 [D]. 西安理工大学硕士学位论文, 2022.
- [22] 刘灿华, 袁天佑, 闫军营, 等. 减氮配施腐植酸对耕层土壤理化性质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 77 ~ 83.
- [23] 田贵生, 赖细巧, 何德志, 等. 腐植酸氮肥对水稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 腐植酸, 2023, (2): 29 ~ 33.
- [24] 东强, 朱定英, 周新, 等. 缓释尿素配施黄腐酸对黑青稞干物质积累、分配及转运的影响 [J]. 中国农学通报, 2023, 39 (11): 57 ~ 63.
- [25] 刘艳, 曲航, 邢月华, 等. 新型氮肥对水稻生长、氮肥利用率和经济效益的影响 [J]. 作物杂志, 2023 (5): 110 ~ 116.
- [26] 李建峰, 杨延龙, 马超, 等. 施用含不同磷源和腐植酸液体肥料对棉花生长发育和磷肥利用率的影响 [J]. 肥料与健康, 2023, 50 (4): 38 ~ 43.
- [27] 李伟, 袁亮, 张水勤, 等. 中低分子量腐植酸提高冬小麦磷吸收和产量的机理 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (11): 2043 ~ 2050.
- [28] 李志坚, 林治安, 赵秉强, 等. 增效磷肥对冬小麦产量和磷素利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (6): 1329 ~ 1336.
- [29] 张一扬, 方丽婷, 李强, 等. 不同类型钾肥配施对烤烟钾素积累分配及生长发育的影响 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2019, 34 (2): 338 ~ 343.
- [30] 梁太波, 王振林, 刘兰兰, 等. 腐植酸钾对生姜生长、钾素吸收及钾肥利用率的影响 [J]. 水土保持学报, 2008 (1): 87 ~ 90, 139.
- [31] 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.
- [32] 尚大朋, 付文, 侯占领, 等. 配方施肥与腐植酸增效协同效应研究 [J]. 农业科技通讯, 2023 (3): 122 ~ 128.
- [33] 钟禄威, 栗丽, 杨立帆, 等. 腐植酸保水缓释肥对紫花苜蓿生长和肥料利用率的影响 [J]. 腐植酸, 2022, (4): 36 ~ 41.
- [34] 尹静, 张晶, 宋孛, 等. 腐植酸复合肥料对冬小麦产量、肥料利用率及土壤化学性质的影响 [J]. 腐植酸, 2022 (5): 39 ~ 44.
- [35] 刘晓辰, 杨忠浩, 郭新送, 等. 腐植酸与锌肥配施对小麦籽粒产量、品质及锌含量的影响 [J]. 腐植酸, 2023 (4): 47 ~ 52.
- [36] 姜小凤, 王淑英, 郭天文, 等. 黄冠梨果实花斑病与果实钙·氮含量的关系及防治方法研究 [J]. 安徽农业科学, 2008 (17): 7304 ~ 7305.
- [37] 陈海宁, 高文胜, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥与黄腐酸钾配施对酸化果园土壤化学性质及苹果产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (3): 82 ~ 87.
- [38] 李双. 腐植酸: 为开启生物刺激素第5次农业生产资料变革大门举旗定标 [J]. 腐植酸, 2021 (1): 7 ~ 13.
- [39] 肖富容, 李东坡, 薛妍, 等. 添加腐植酸与生化抑制剂的稳定性增效尿素在黑土中的施用效果 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (8): 47 ~ 55.
- [40] 李思琦, 蒋芳玲, 周艳朝, 等. 叶面喷施生物刺激素对番茄幼苗高温胁迫的减缓效应 [J]. 西北农业学报, 2021, 30 (2): 224 ~ 233.
- [41] 杨德荣, 曾志伟, 朱小花, 等. 抑制线虫和土传病害的功能有机肥开发与应用 [J]. 磷肥与复肥, 2019, 34



- (2): 24 ~ 27.
- [42] 何秀院, 周永全, 许恩光. 腐植酸铵与除草剂配伍的效应研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(7): 102 ~ 105.
- [43] 刘美菊, 余亚琳, 李江舟, 等. 腐植酸与植物源杀线剂和微量元素配施对烤烟抗线虫病害的影响[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(16): 104 ~ 108.
- [44] 刘国惠, 刘国为, 陈晨, 等. 腐植酸有机地膜对花生生长和产量的影响[J]. 腐植酸, 2021(1): 29 ~ 34.
- [45] 王旭钰. 腐植酸钾液态地膜对生菜和马铃薯生长及产量的影响[D]. 山西农业大学硕士学位论文, 2015.
- [46] 李允, 高丽萍, 付尊尊, 等. 腐植酸及其生物降解膜对连作土壤环境及苹果幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(4): 83 ~ 93.
- [47] 陈虹任, 李志萌, 闫秀懿, 等. 环境友好的复配淋洗剂对砷污染土壤的淋洗修复[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 656 ~ 658, 650.
- [48] 吴梅, 李社红, 廖杰, 等. 3种复合铁基钝化剂对黔西南高砷土壤的修复效果研究[J]. 地球与环境, 2022, 50(6): 909 ~ 915.
- [49] 任汉儒, 任珺, 陶玲, 等. 腐植酸复配凹凸棒石对土壤Cd污染的钝化效果[J]. 非金属矿, 2023, 46(4): 67 ~ 71.
- [50] 王凤娇, 郭新送, 祝丽香, 等. 腐植酸与微生物菌剂对丹参幼苗生长的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 70 ~ 74.
- [51] 施河丽, 向必坤, 左梅, 等. 黄腐酸与微生物菌剂协同对烟草青枯病及根际土壤细菌群落的影响[J]. 烟草科技, 2021, 54(9): 1 ~ 10.
- [52] 段佳丽, 薛泉宏, 舒志明, 等. 放线菌 Act12 与腐植酸钾配施对丹参生长及其根域微生态的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1807 ~ 1819.
- [53] 张彩凤. 何为风化煤腐植酸[J]. 腐植酸, 2007(4): 5.
- [54] 成绍鑫. 腐植酸类物质概论(第二版)[M]. 化学工业出版社, 2020.
- [55] 林存莉. 玉米秸秆还田对土壤理化性状及玉米生长发育的影响[J]. 基层农技推广, 2024, 12(7): 24 ~ 27.
- [56] 崔越, 刘明华, 李秀美, 等. 秦岭中段北麓农耕地秸秆还田对土壤团聚体及可蚀性季节性变化的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2024, 37(3): 316 ~ 322.
- [57] 杨冰, 孟祥海, 王佰成, 等. 不同耕作及秸秆还田方式对土壤养分及微生物生物量碳氮的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2024(7): 24 ~ 29.
- [58] 顾鑫. 秸秆还田对苏打盐碱土 pH、电导率及玉米生长的影响[J]. 青海农林科技, 2024(2): 104 ~ 107, 116.
- [59] 赵政, 王呈玉, 米洋辰, 等. 秸秆还田方式对土壤水分影响的机制[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(5): 835 ~ 845.
- [60] 赵少官, 杨秋云, 丁满, 等. 褐煤基改性材料对石灰性土壤团聚体及其重金属镉分布的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(11): 1492 ~ 1503.
- [61] 郭亚茹. 黄腐酸施用量对盐碱土壤改良机制研究[D]. 石河子大学硕士学位论文, 2023.
- [62] 赵萌萌, 冯俊义, 黄震, 等. 煤基与生物基腐植酸配施对土壤结构改良的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 83 ~ 91.
- [63] 包秀英. 腐植酸肥对黄河三角洲小麦玉米生长和土壤肥力的影响[D]. 山东农业大学硕士学位论文, 2023.
- [64] 王艳芳, 武月胜, 李灵芝, 等. 不同水分胁迫条件下腐植酸类钾盐对西葫芦幼苗生长及光合荧光特性的影响[J]. 腐植酸, 2022(1): 44 ~ 51.
- [65] 马盼, 吕亮, 徐佳宁, 等. 卟啉催化土壤腐植酸氧化聚合反应的研究进展[J]. 广东化工, 2015, 42(6): 128 ~ 129.
- [66] 王平, 付战勇, 李絮花, 等. 腐植酸对土壤氮素转化及氨挥发损失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(4): 28 ~ 33.
- [67] 孙克刚, 王春兰, 刘高远, 等. 腐植酸复合肥在夏玉米上的增产效果及对氮肥表观利用率和土壤硝态氮的影响[J]. 腐植酸, 2024(3): 26 ~ 30.
- [68] 李欢, 杨清夏, 李扬, 等. 减氮及增施腐植酸对玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1331 ~ 1339.