



## 腐植酸在污染土壤修复中的应用研究进展

王立娟<sup>1,2</sup> 周洪印<sup>2,3</sup> 张乃明<sup>1,2,3\*</sup>

1 云南农业大学资源与环境学院 昆明 650201

2 云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心 昆明 650201

3 云南农业大学植物保护学院 昆明 650201

**摘要:** 土壤污染已经成为全球土壤功能退化的主要威胁之一。然而,由于造成土壤污染的原因复杂,污染物种类繁多且污染程度存在较大差异,因此迫切需要寻找解决土壤污染问题的方法。腐植酸作为一种天然的有机混合物,在污染土壤修复中展现出了巨大的潜力。本文综述了国内外腐植酸在修复重金属、有机污染物和放射性物质等污染土壤中的应用效果,并探讨了腐植酸在污染土壤修复中的机制,指出污染土壤中腐植酸修复技术的优势和不足以及未来的应用前景,以为腐植酸在污染土壤治理中的应用提供一定的参考。

**关键词:** 腐植酸; 污染土壤; 土壤修复机制

**中图分类号:** TQ314.1, TE991.3      **文章编号:** 1671-9212(2024)02-0001-08

**文献标识码:** A      **DOI:** 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.02.001

**Research Progress on Application of Humic Acid in Contaminated-soil Remediation**

Wang Lijuan<sup>1,2</sup>, Zhou Hongyin<sup>2,3</sup>, Zhang Naiming<sup>1,2,3\*</sup>

1 College of Resources and Environment, Yunnan Agriculture University, Kunming, 650201

2 Yunnan Soil Fertilization and Pollution Remediation Engineering Research Center, Kunming, 650201

3 College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming, 650201

**Abstract:** Soil pollution has become one of the major threats to global soil function degradation. However, the causes of soil pollution is complex, there are many kinds of pollutants, and the degree of pollution is very different. Thus, it is urgent to find a way to solve the problem of soil pollution. As a natural organic mixture, humic acid has shown great potential in the contaminated-soil remediation. The application effects of humic acid in the contaminated-soil by heavy metals, organic pollutants and radioactivity material at home and abroad were reviewed in this paper. The remediation mechanism of humic acid in contaminated-soil was discussed. The advantages and limitations of contaminated-soil remediation technology with humic acid and its future application prospects were pointed out, all of these may provide scientific basis for contaminated-soil remediation with humic acid.

**Key words:** humic acid; contaminated-soil; soil remediation mechanism

近年来,随着工业化和城市化的发展,农村乡镇企业、农业生产,污水灌溉,化肥、农药、农膜等多重影响,土壤环境质量及生态功能极度退化,

土壤污染问题日益严重。污染土壤中的有害物质不仅对环境和生态系统造成危害,还会通过食物链等途径对人类健康造成威胁<sup>[1~3]</sup>。腐植酸类物质结

[基金项目] NSFC-云南联合基金重点项目(项目编号 U2002210)。

[收稿日期] 2023-11-26

[作者简介] 王立娟,女,1999年生,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染, E-mail: 2729282107@qq.com。\* 通讯作者: 张乃明,男,教授/博士生导师, E-mail: zhangnaiming@sina.com。



构各异、基团众多、分子大、分布广，具有溶解性、酸性、离子交换性、络（螯）合性等丰富的理化性质<sup>[4~6]</sup>。近年来，越来越多的研究表明，腐植酸可以有效修复重金属、有机污染物、放射性物质等污染的土壤，降低污染物对环境 and 人类健康的危害<sup>[7]</sup>。本文综述了腐植酸在重金属、有机污染物、放射性物质等污染土壤中的应用效果，探讨了腐植酸在污染土壤修复中的机制，指出了污染土壤中腐植酸修复技术的优势和不足以及应用前景，为腐植酸在污染土壤治理中的应用提供一定的参考。

## 1 腐植酸在不同类型污染土壤修复中的应用研究

### 1.1 重金属污染土壤修复

腐植酸的结构对多种重金属具有吸附、钝化效应。腐植酸分子内包含的 -OH、-COOH 等基团，与重金属阳离子可以发生吸附、离子交换、络合等作用使重金属沉淀<sup>[8]</sup>。因此，腐植酸会降低自然界中金属离子的生物利用度、迁移率和毒性，对重金属污染土壤有很好的修复效果。重金属污染来源主要包括农业和工业污染，农业重金属污染土壤主要是由于农业废弃物中重金属在土壤中过量沉积而引起的土壤污染。农业重金属污染土壤的重金属主要包括汞、镉、铅、铬和砷等生物毒性显著的元素，以及有一定毒性的锌、铜、镍等元素，这些重金属主要来自采矿废渣、农药、废水、污泥和大气沉降等。腐植酸主要作为钝化剂用于农业重金属污染土壤修复，冯于航<sup>[9]</sup>将腐植酸类物质引入镉污染土壤中，进行了 90 d 的土壤培养试验。结果表明，腐植酸能够钝化土壤中的活性镉，使土壤中最稳定的残渣态镉含量快速增加。我国现阶段提倡绿色环保和节能减排的理念，腐植酸与其他节能环保的材料配合使用越来越受欢迎。杨金康等<sup>[10]</sup>采用硅钙镁肥、改性腐植酸或二者复配作为钝化剂对河南省新乡市某农田镉污染土壤开展盆栽试验，研究结果表明硅钙镁肥与改性腐植酸复配效果显著，硅钙镁肥与改性腐植酸复配处理小麦籽粒镉含量下降幅度为 81.77%，能有效钝化土壤中的镉活性，并显著降低小麦籽粒镉含量；任汉儒<sup>[11]</sup>对污染土壤进行

修复，采用腐植酸与凹凸棒石复配作为钝化剂施用到人工模拟镉污染土壤和矿区污染土壤中，研究结果表明腐植酸复配凹凸棒石钝化材料具有良好的钝化效果。工业重金属污染土壤是一个严重的环境问题，主要来源于工业生产中产生的废水、废气和废渣。工业废水中含有大量的重金属元素，如果处理不当，这些重金属会通过大气沉降、地表径流等途径进入土壤，导致土壤重金属污染。工业废气中含有的重金属一旦沉降到地表，也会渗入到土壤中，长期残留，会引发严重的土壤污染。随着我国工业化飞速发展，重金属的积聚致使土壤受到严重破坏，在全世界引起了广泛关注<sup>[12]</sup>。腐植酸的多基团结构对多种重金属具有吸附、钝化效应，腐植酸可以有效地结合多种金属，被认为是一种有前途的土壤清洗剂<sup>[13]</sup>，而腐植酸对工业重金属污染土壤的修复方式主要是淋洗法。陈晨等<sup>[14]</sup>研制了一种以生物炭粉和腐植酸钠为原材料，用乙酸进行表面改性的腐植酸基修复材料，用于研究在受铅、汞、铬、镉污染的化工厂区的土壤和农田耕地，研究采用土壤淋洗法对污染土壤进行修复。在铅、汞、铬、镉污染的土壤中，对比研究单纯生物炭粉和改性腐植酸基复合材料不同添加量下，对土壤重金属的有效态影响。研究表明通过与单纯生物炭粉修复材料对比，改性腐植酸基复合材料降低土壤中重金属有效态含量更多，修复效果更为显著，表现出更强的吸附重金属能力。Piccolo A 等<sup>[15]</sup>采用受污染土壤进行淋洗的方式，表明天然有机表面活性剂例如褐煤中的腐植酸可以清洗意大利北部严重工业污染土壤中的重金属（HM）。

### 1.2 有机污染物污染土壤修复

土壤有机物污染也主要来源于农业和工业污染，农业有机污染物主要包括化学农药、化肥、农业废弃物和畜禽粪便等。农药的不合理使用会导致土壤污染；未经处理的畜禽粪便直接施用于农田，其中的有害物质会污染土壤<sup>[16]</sup>。工业有机污染物主要来源于石油化工、农药和化肥生产、染料和涂料生产等。石油化工行业是土壤有机物污染的主要来源之一，该行业产生的废气、废水和废渣中含有大量的苯、甲苯、二甲苯等有机污染物<sup>[17]</sup>，这些



污染物通过大气沉降、地表径流等方式进入土壤，导致土壤污染；农药、化肥、染料和涂料生产过程中会产生大量的废水、废气和废渣，其中含有高浓度的有害有机污染物，如芳香胺、硝基苯、氯化氢、以及苯酚、苯胺等有机污染物，这些污染物会对厂区附近的土壤造成直接污染<sup>[18]</sup>。腐植酸由于具有良好的土壤有机污染修复性能，目前已在多种土壤有机污染物修复中应用。在农业有机物污染方面，雒宇<sup>[19]</sup>采用土壤淋洗法研究了腐植酸钠对多菌灵农药类污染地块的修复作用，结果表明，5 mg/L的腐植酸钠对土壤中多菌灵和有机质的增溶淋洗效果最显著，去除率分别达81%和82%。在淋洗液中，15 mg/L的腐植酸钠在初始阶段和总淋洗过程中对重铬酸盐需氧量的淋洗效果最佳；5 mg/L的腐植酸钠对氨氮的总淋洗效果最佳。在工业有机物污染方面，朱军峰等<sup>[20]</sup>研究了腐植酸和纳米TiO<sub>2</sub>的复合催化材料催化降解土壤中多环芳烃(PAHs)和菲，降解率分别为72.1%和83.3%；腐植酸与纳米TiO<sub>2</sub>之间产生了静电作用及配合作用，提高了TiO<sub>2</sub>表面的催化反应位点，对纳米TiO<sub>2</sub>的光催化性能起到了正向促进作用。Piccolo A等<sup>[15]</sup>采用受污染土壤进行淋洗的方式，评估了天然有机表面活性剂(例如褐煤中的腐植酸)从意大利北部严重污染的工业土壤中清洗多氯联苯(PCB)的有效性。研究表明，用腐植酸溶液清洗高度污染的土壤不仅是一种有效且快速的土壤修复技术，而且还可以同时去除持久性有机污染物(POP)和PCB同系物。Pellegrino C等<sup>[21]</sup>研究修复位于意大利北部的原ACNA化工厂周围的严重污染地时发现，天然腐植酸溶液能够增强微生物活性，他们利用腐殖质对土壤中的PAHs进行淋洗，结果表明污染物去除率达到90%。

### 1.3 放射性物质污染土壤修复

随着核工业的不断发展，产生的核废料不断累积，对核废料的妥善处理和安妥处置有利于核科学研究以及核工业的健康发展，这也是当前世界上许多国家所面临的亟需解决的问题之一。放射性核素在核能的研究和利用过程中不可避免地被释放到环境中，如核燃料制备过程中产生的废水、核

武器爆炸、核泄漏事故等，从而对环境造成污染并威胁人类健康。放射性核素能够产生电离辐射破坏生物组织、引发遗传信息的突变，从而引发恶性肿瘤等疾病和先天性畸形等遗传效应<sup>[22]</sup>。六价铀是一种危害极大的放射性污染物，铀废石堆在雨水侵蚀和流水浸渍冲刷下产生的酸性渗滤液流入土壤环境中，对人类健康与生态和谐构成严重威胁<sup>[23]</sup>。腐植酸的氧化还原性质对重金属和六价铀等放射性核素以及芳香化合物等物质的迁移、转化起着重要作用<sup>[24]</sup>。张园园<sup>[25]</sup>利用六水合氯化铁以及四水合氯化锰，与腐植酸相互作用形成腐植酸铁、锰盐后，通过土柱吸附实验系统研究了在接触时间、溶液pH、初始铀浓度和温度等因素影响下，腐植酸铁、锰盐对水溶液中六价铀的去除。结果发现，在腐植酸及其铁、锰盐的协助下，土壤固定的铀含量从1598.08 mg增加到1902.68 mg，提升幅度达19.06%，说明腐植酸及其铁、锰盐能抑制六价铀在土壤中的迁移。

## 2 腐植酸修复污染土壤的机制

### 2.1 污染物吸附和解吸的过程

腐植酸在土壤和沉积物中广泛存在。它具有复杂的化学性质，可以与多种金属离子、有机污染物和无机污染物发生吸附和解吸作用，同时腐植酸具有疏松的海绵状结构、较大的比表面积和丰富的微孔结构，对多种物质有较好的吸附作用<sup>[26]</sup>，腐植酸可以作为吸附剂，将污染物从溶液中吸附到其表面。这种吸附作用主要依赖于腐植酸分子中的多种基团，如羧基、酚羟基和氨基等。另一方面，腐植酸也可以在解吸过程中作为解吸剂，将已吸附的污染物从其表面解吸下来，通过淋洗去除污染物。这种解吸作用主要依赖于腐植酸分子结构的改变，如功能基团的离解和重新排列，以及腐植酸与周围环境的作用力的变化等<sup>[27]</sup>。刘梦圆<sup>[28]</sup>通过研究不同因素下腐植酸-团聚体对重金属Cd<sup>2+</sup>的吸附效应。表明在温度为30℃，pH为7时达到最大吸附量；不同腐植酸含量对团聚体吸附Cd<sup>2+</sup>有显著影响，在腐植酸含量为3%时，吸附效果最显著。王

兴权等<sup>[29]</sup>通过提取以羊粪为原料发酵腐熟的有机肥腐植酸,研究投加量、溶液 pH 对其吸附  $Pb^{2+}$  的影响,结果表明有机肥腐植酸对  $Pb^{2+}$  的饱和吸附时间为 30 min,最佳的投加量为 0.3 g, pH 为 6,吸附率达 93.39%,理论最大吸附量为 36.236 mg/g。宋悦<sup>[30]</sup>从剩余污泥中提取多糖和腐植酸研究其对  $Zn^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  的吸附效应,结果表明二者带有较强的负电荷,主要通过离子交换吸附金属离子,多糖表面的多聚糖、腐植酸中的羰基、羧基等参与吸附反应。王海涛等<sup>[31]</sup>研究了腐植酸钠对黄土中柴油类污染物的协同增溶作用。结果表明,腐植酸钠对黄土中柴油的解吸均有显著增溶作用,使柴油的解吸量明显增加,柴油的去除率最高可达 63%。

## 2.2 污染物迁移和转化的调控

作为环境中存在范围最广泛的天然有机物质之一,腐植酸和黄腐酸在分子量、基团、理化性质等方面都具有不同的特性<sup>[32]</sup>。腐植酸本身是影响土壤、水体等自然环境中重金属迁移转化的重要载体,也是一种环境友好型的天然活性剂,它与矿物协同可以成为固定去除重金属、有机污染物等的重要材料<sup>[33]</sup>。腐植酸中的  $-COOH$ 、 $-OH$ 、 $-NH_2$  及  $C=O$  等基团也可以与重金属形成络(螯)合物,使重金属吸附在土壤表面,降低其迁移能力<sup>[34]</sup>。杜振宇等<sup>[35]</sup>采用室内土柱实验研究了腐植酸与钾共施时腐植酸对钾在褐土施肥点附近微域中迁移和形态转化的影响。结果表明,腐植酸明显增加了交换性钾含量以及在土壤中的迁移量,共施腐植酸减少了土壤晶格对钾离子的固定,提高了外源钾在褐土中的有效性。赵庆圆等<sup>[36]</sup>研究发现,单独施加腐植酸能降低土壤中有效态铅、镉含量,促进残渣态铅、镉含量的增长。另外,腐植酸的醌、酚等官能团是其还原能力的主要来源,尤其是醌基团在电子传递中扮演重要角色,影响环境中重金属的迁移转化和生物活性<sup>[37]</sup>。

## 2.3 土壤理化性质的改善

腐植酸可以通过改变土壤的理化性质从而缓解土壤重金属的污染。土壤 pH、有机质、电导率(EC)、阳离子交换量(CEC)和土壤团聚体等对土壤中重金属的形态转化和毒性具有重要的影

响。腐植酸作为一种有机酸,能与土壤中阳离子结合生成腐植酸盐,进而形成腐植酸-腐植酸盐相互转化的缓冲体系<sup>[38]</sup>。腐植酸能提高土壤的 pH,土壤的酸碱度能改变重金属的有效态形式, pH 越高,重金属越可以较稳定的可氧化态和残渣态形式存在<sup>[39~41]</sup>。腐植酸能够显著提高土壤有机质的含量,进而诱导土壤淀粉酶活性的提高,促进土壤碳循环。有机质含量提高,腐植酸的生理活性和吸收、络(螯)合、交换等作用增强,从而抑制重金属的有效性<sup>[42]</sup>。腐植酸还可以通过调节土壤 EC 值,通过增加阳离子交换量,升高土壤氧化还原电位,促进土壤中重金属吸附离子的离解和交换性能,增强各种离子与土壤胶体相互作用的强度,从而达到修复污染土壤的目的<sup>[43]</sup>。腐植酸可以增加土壤 CEC,腐植酸含有的多种活性基团可以与土壤中的阳离子发生交换反应,将原本被固定在土壤中的有害离子置换出来<sup>[44]</sup>,促进土壤中可交换态和可还原态镉转化为更稳定的残渣态镉<sup>[45, 46]</sup>。除此之外,腐植酸的添加还能够提高土壤通透性,改善土壤结构,从而增加土壤总孔隙度和通气孔隙度<sup>[47]</sup>,利于增加土壤微生物活性,提高微生物对重金属的降解和转化效率<sup>[48, 49]</sup>。

## 2.4 生物活性的影响和调节

腐植酸具有较大的比表面积和多种基团,能与各种有机、无机污染物发生反应,从而改变土壤中重金属的形态和生物活性。一般认为腐植酸相对于黄腐酸聚合程度高、分子量大、结构更为复杂等,因此在土壤中常与土壤无机胶体组分形成复合体,能够高强度吸持固定土壤重金属,从而降低其生物有效性,对重金属产生钝化效应<sup>[50]</sup>。此外,腐植酸能够显著提高土壤脲酶(URE)、磷酸酶、淀粉酶、过氧化氢酶等土壤酶的活性,进而促进污染土壤修复<sup>[51~54]</sup>。同时,腐植酸也能够作为电子供体或电子受体参与微生物的呼吸作用,进而强化污染物的去除<sup>[55]</sup>。蒋煜峰等<sup>[56]</sup>研究表明,腐植酸可使土壤中可溶态重金属减少 60%~80%,降低土壤重金属的活性、生物毒性和生物可利用性。含砷灌溉水的使用导致大面积的农田砷污染;Wang Q 等<sup>[57]</sup>探索了用不同浓度的砷酸盐处理过的莴苣



中砷酸盐的积累,并研究了腐植酸对砷酸盐积累和毒性的影响。研究表明,添加腐植酸对抗氧化酶的活性有显著影响,从而提高了莴苣的抗氧化能力,腐植酸可以缓解砷污染对莴苣的毒害。

### 3 利用腐植酸修复污染土壤的优势与不足

#### 3.1 腐植酸修复技术的优势

(1) 环境友好:腐植酸是一种天然有机混合物,主要来源于动植物遗骸的分解,具有极高的生物活性。它能够改变土壤中重金属的形态,降低重金属的生物有效性,从而降低其对作物的毒害作用;腐植酸能够降低土壤中有机污染物的活性,使其失去对土壤和作物的危害;腐植酸能够促进土壤中微生物的活动与繁殖,增加土壤中微生物的数量和活性,提高土壤的生物肥力,有利于土壤生态系统的平衡与稳定;腐植酸还可以用于污水治理和废气处理等方面,具有广阔的应用前景和市场需求<sup>[58]</sup>。

(2) 成本优势:腐植酸是一种天然、廉价的有机肥料,可以就地取材,降低肥料成本。同时,腐植酸还可以与其他肥料或药剂混合使用,提高肥效和药效,减少化肥和农药的使用量;腐植酸修复技术可以改善土壤结构和环境,提高作物的抗逆性,减少作物病虫害的发生,从而降低农作物的生产成本。

(3) 容易推广:腐植酸修复技术适用于各种类型的土壤和作物,具有广泛的适用性。无论是酸性污染土壤还是碱性污染土壤,或者是旱地和水田的污染土壤,都可使用腐植酸修复技术来改善土壤环境和提高作物产量。腐植酸修复技术操作简单、易于掌握,不需要特殊的设备和技能。农民可根据土壤和作物的实际情况,寻找合适的腐植酸相关产品。

#### 3.2 腐植酸修复技术的不足

腐植酸修复技术以其独特的环保特性和资源利用价值,在环境治理和资源可持续利用领域扮演着重要角色。然而,实际应用中的诸多限制和挑战制约了其进一步的发展和推广。比如腐植酸

修复技术的不稳定性,由于腐植酸的来源和性质差异较大,其质量和修复效果难以保证;腐植酸修复技术的效率不高,在实际应用中,腐植酸对土壤或水体的改良需要较长时间才能显现效果,而且不同地区的土壤条件和水资源状况差异较大,这使得技术应用具有较大的不确定性。目前,政府对腐植酸修复技术的支持力度虽然不断加大,但市场环境仍需进一步优化,以激发更多的创新和实践。

#### 3.3 腐植酸用于土壤修复的一些标准或者技术规范

在土壤修复领域,我国已制定了一系列法规、政策和指导性文件,如《中华人民共和国土壤污染防治法》《土壤污染防治行动计划》等。关于腐植酸修复污染土壤的多项标准也已经发布实施,如国家标准《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),地方标准《河套灌区盐碱地脱硫石膏与腐植酸配施改良土壤技术规程》(DB15/T 2790—2022),行业标准《腐植酸土壤调理剂》(HG/T 5782—2020)、《腐植酸肥料行业绿色工厂评价要求》(HG/T 6192—2023)和团体标准《腐植酸残渣制备重金属钝化材料及其应用技术规程》(T/CSER 008—2023)、《改性风化煤负载微生物制备重金属钝化材料及应用技术规程》(T/CSER 010—2023)、《绿色设计产品评价技术规范腐植酸有机肥》(T/CIET 150—2023),这些文件为腐植酸修复污染土壤提供了政策指导和法律依据。

### 4 小结

腐植酸在污染土壤修复中的应用具有广阔前景,在受重金属、有机污染物和放射性物质等污染的土壤中有很好的应用效果,不仅可以通过自身的特性来降低土壤中重金属活性,还通过改善土壤理化性质如改良土壤结构和调节土壤生物活性等方式来提高土壤质量,促进生态环境的改善。如中国科学院南京土壤研究所和中国农业大学资源与环境学院在腐植酸修复污染土壤方面的应用取得了一系列创新性成果;华南农业大学资

源环境学院在腐植酸改良土壤结构和提高土壤生物活性方面做了大量的研究工作,深入探讨了腐植酸对重金属污染土壤的修复机制和应用效果;美国康奈尔大学环境科学系在腐植酸与重金属相互作用方面进行了深入的研究,在腐植酸对重金属在土壤中的迁移、转化和生物有效性方面取得了重要成果;德国慕尼黑工业大学环境工程学院通过创新的工艺和技术,成功地将腐植酸应用于实际污染场地的修复项目中。基于腐植酸修复技术的不足。未来需要进一步深入探讨腐植酸与重金属之间的相互作用机制、腐植酸对植物和土壤微生物的影响机制以及不同来源腐植酸的质量标准等方面的问题。此外,还需要加强腐植酸在污染土壤修复中的实际应用研究,通过长期田间试验验证腐植酸在污染土壤修复中的可行性和效果。最终目标是开发出高效、环保、可持续的污染土壤修复技术,为保障人类健康和生态安全提供有力支持。

### 参考文献

- [1] 史广宇,余志强,施维林.植物修复土壤重金属污染中外源物质的影响机制和应用研究进展[J].生态环境学报,2021,30(3):655~666.
- [2] 郑德良,李学武,火元明.污染土壤修复在环境治理中的作用[J].中国科技期刊数据库工业A,2023(6):66~69.
- [3] 王丹丹.浅谈土壤污染与我国农业环境保护[J].农业灾害研究,2023,13(4):166~169.
- [4] Yang F, Tangcy, Antonietti M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(10): 6221 ~ 6239.
- [5] 王亚军,马军.水体环境中天然有机质腐殖酸研究进展[J].生态环境学报,2022(6):1155~1165.
- [6] 沈蝶,代静玉,季飞跃.不同培肥模式下腐殖酸对二氯喹啉酸光降解的影响[J].应用生态学报,2023,34(8):2178~2184.
- [7] 郭军康,赵隽隽,李怡凡,等.矿区土壤重金属污染修复技术研究进展[J].农业资源与环境学报,2023,40(2):249~260.
- [8] 陈晨,唐雨蒙,王磊,等.改性腐植酸基复合材料钝化土壤重金属的应用研究[J].工业技术与职业教育,2023,21(4):13~16.
- [9] 冯于航.腐殖质对镉污染土壤-头花蓼体系中镉形态及植物有效性的影响[D].贵州大学硕士学位论文,2022.
- [10] 杨金康,朱利楠,杨秋云,等.硅钙镁肥和改性腐殖酸对土壤镉形态和小麦镉积累的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(6):808~816.
- [11] 任汉儒.腐植酸复配凹凸棒石对土壤重金属的钝化和生态毒性的影响[D].兰州交通大学硕士学位论文,2023.
- [12] 李元杰,森杰,张敏,等.土壤和地下水污染的监控自然衰减修复技术研究进展[J].中国环境学,2018,38(3):1185~1193.
- [13] Yang T, Hodson M E. Investigating the use of synthetic humic-like acid as a soil washing treatment for metal contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 290 ~ 300.
- [14] 陈晨,红梅,施和平,等.腐殖酸添加对土壤中重金属释放特征的影响[J].北方农业学报,2023,51(3):12~21.
- [15] Piccolo A, De Martino A, Scognamiglio F, et al. Efficient simultaneous removal of heavy metals and polychlorobiphenyls from a polluted industrial site by washing the soil with natural humic surfactants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 25748 ~ 25757.
- [16] 胡荣桂.农药污染与土壤微生物[J].环境污染与防治,1993(3):24~27.
- [17] 汪苹.精细化工行业水污染减排与实用综合治理技术[J].中国建设信息(水工业市场),2007(8):32~37.
- [18] 胡佳晨.污染场地土壤环境管理与修复对策研究[J].江西建材,2016(19):253.
- [19] 雒宇.腐植酸钠和十二烷基苯磺酸钠修复多菌灵农药类污染地块研究[J].环境卫生工程,2023,31(1):



- 69 ~ 73.
- [20] 朱军峰, 杨宇啸, 杨乐, 等. 腐植酸对纳米  $\text{TiO}_2$  催化降解土壤中萘和菲的影响 [J]. 化工新型材料, 2023, 51 (3): 221 ~ 226, 233.
- [21] Pellegriano C, Anna A, Riccardo S, et al. Soil remediation: humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2005(135): 515 ~ 522.
- [22] 赵超锋. 腐植酸和二硫化钼基材料用于重金属离子和放射性核素污染物去除的理论研究 [D]. 华北电力大学硕士学位论文, 2020.
- [23] 黄凤羽. 地下水中微生物, 矿物与核素的多元耦合作用机理研究 [D]. 西南科技大学博士学位论文, 2021.
- [24] 栾富波, 谢丽, 李俊, 等. 腐植酸的氧化还原行为及其研究进展 [J]. 化学通报, 2008 (11): 833 ~ 837.
- [25] 张园园. 腐植酸及其铁、锰盐对铀 (VI) 在土壤中迁移的影响研究 [D]. 南华大学硕士学位论文, 2019.
- [26] 李燕捷. 腐植酸对纳米二氧化钛的吸附性能和光解行为的影响 [D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2014.
- [27] 吕飞勇, 易浩然, 王玉环, 等. 煤基腐植酸对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附—解吸特性研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (6): 172 ~ 176.
- [28] 刘梦圆. 腐植酸及土壤团聚体结构对重金属 Cd 的吸附行为实验研究 [D]. 中国矿业大学硕士学位论文, 2022.
- [29] 王兴权, 程金莲, 刘宏, 等. 有机肥腐植酸对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附性能 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49 (13): 202 ~ 206.
- [30] 宋悦. 剩余污泥 EPS 中多糖和腐植酸对典型重金属的吸附效能 [D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2017.
- [31] 王海涛, 朱琨, 魏翔, 等. 腐植酸钠和表面活性剂对黄土中石油污染物解吸增溶作用 [J]. 安全与环境学报, 2004, 4 (4): 52 ~ 55.
- [32] 张立超, 王绍伟, 水晶, 等. 土壤胡敏酸和富里酸的性质表征 [J]. 淮北师范大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (4): 65 ~ 69.
- [33] 姜璐. 铵根 / 腐植酸介导下水钠锰矿的形成机制及其对砷迁移转化的影响 [D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2022.
- [34] 何晶晶, 杨志敏, 王莉玮, 等. 几种化学物质抑制土壤汞、镉进入蔬菜的研究 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2014, 39 (1): 15 ~ 19.
- [35] 杜振宇, 王清华, 刘方春, 等. 腐植酸对钾在褐土中迁移和转化的影响 [J]. 土壤, 2012, 44 (5): 822 ~ 826.
- [36] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐植酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤 [J]. 环境科学, 2018, 39 (1): 389 ~ 398.
- [37] Aeschbacher M, Vergari D, Schwarzenbach R P, et al. Electrochemical analysis of proton and electron transfer equilibria of the reducible moieties in humic acids[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(19): 8385 ~ 8394.
- [38] 何洁, 卢维宏, 张乃明. 腐植酸在重金属污染土壤修复中的应用研究进展 [J]. 腐植酸, 2020 (2): 38 ~ 42, 55.
- [39] Ph Y Y, Wan Y, Camara A Y, et al. Effects of the addition and aging of humic acid-based amendments on the solubility of Cd in soil solution and its accumulation in rice[J]. Chemosphere, 2018, 196: 303 ~ 310.
- [40] Li B, Zhang T, Zhang Q, et al. Influence of straw-derived humic acid-like substance on the availability of Cd/As in paddy soil and their accumulation in rice grain[J]. Chemosphere, 2022, 300: 134368.
- [41] 赵锦萍, 罗红洁. 生物炭 - 腐植酸 - 磷酸盐联合修复土壤重金属 Cd 污染研究 [J]. 化工矿物与加工, 2023, 52 (11): 41 ~ 45.
- [42] 武瑞平, 薛金辉, 王莹. 腐植酸对铅污染土壤理化性质的影响 [J]. 环境科学导刊, 2018, 37 (2): 56 ~ 61.
- [43] 赵柯棋. 硅肥和腐植酸对重金属污染土壤的理化性质、酶活性及重金属特性的影响 [D]. 湖南农业大学硕士学位论文, 2022.
- [44] Mohamed A A E. 腐植酸对基质栽培黄瓜生长、产量、品质和基质性质的影响 [D]. 中国农业科学院博士学位论文, 2019.

- [45] 王卓群. 腐殖酸改性矿物对镉污染农田土壤的钝化修复效应研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2023.
- [46] 马翔邦. 腐植酸复合材料对白银某农田土壤镉、铅稳定作用研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2023.
- [47] Zhang J, Yin H, Wang H, et al. Molecular structure reactivity correlations of humic acid and humin fractions from a typical black soil for hexavalent chromium reduction[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651(2): 2975 ~ 2984.
- [48] 武瑞平. 风化煤腐植酸对重金属铅污染土壤修复作用的研究[D]. 山西大学硕士学位论文, 2010.
- [49] 王晓纯. 腐殖酸和 EDTA 对土壤理化性质和白菜生长的影响[D]. 东北农业大学硕士学位论文, 2020.
- [50] 陈亭悦. 腐殖酸不同分子量组分对铅生物有效性的调控效应与机制[D]. 西南大学硕士学位论文, 2020.
- [51] 权刚, 仝玉琴, 张洁, 等. 腐殖酸与土壤酶活性交互响应初探[J]. 农村实用技术, 2022(2): 86 ~ 87.
- [52] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065 ~ 1076.
- [53] 赵海霞, 裴红宾, 张永清, 等. 不同氮、腐殖酸肥施用量下芽孢杆菌 ZJM-P5 对红小豆幼苗根际土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(6): 109 ~ 113.
- [54] 刘芸婷, 潘俊臣, 莫碧霞, 等. 腐殖酸和生物质炭对土壤磷素转化及甘蔗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(7): 220 ~ 226.
- [55] 蒋其涛, 汤晴岚, 吴曲, 等. 腐殖质和典型矿物强化微生物呼吸去除污染物的研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 589 ~ 599.
- [56] 蒋煜峰, 袁建梅, 卢子扬, 等. 腐殖酸对污灌土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn 形态影响的研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(6): 42 ~ 46.
- [57] Wang Q, Wen J, Zheng J, et al. Arsenate phytotoxicity regulation by humic acid and related metabolic mechanisms[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207: 111379.
- [58] 刘志伟, 刘娟, 吴家森, 等. 生物炭和腐殖酸施用对稻麦轮作系统 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合温室效应的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 220 ~ 229.

## 开展腐植酸肥料土壤固碳研究迫在眉睫

首先申明一点：但凡研究土壤碳汇，就与腐植酸有关。对此，希望行业同仁积极参与进来。

今年全国“两会”上，中国生物多样性保护与绿色发展基金会提交了一份《关于建设农田土壤碳汇功能快速提升先行试验区的建议》的议案，值得大家学习！

议案明确，农田土壤碳汇具有自身的特殊性和复杂性，一是农田土壤碳汇功能具有多元性，二是农田土壤碳汇功能具有季节差异性，三是农田土壤碳汇功能具有区域性，四是农田土壤碳汇功能具有系统性。因此，准确评估农田土壤碳汇潜力，快速提升农田土壤碳汇功能已成为农业转型升级和绿色高效发展的重要途径。

议案聚焦《生物质生化裂解生物工程技术》，提出农田土壤碳汇功能快速提升的4项建议。该技术采用“模拟生物酶法”裂解处理方式，将农业废弃物（畜禽粪污、秸秆、废弃菜叶及藤蔓、林果枝条、厨余垃圾等），经催化裂解、水解，转化为黄腐酸、氨基酸、小肽及内源激素类物质等小分子有机物质，制成土壤改良剂，可实现每亩固定二氧化碳当量近2吨。

基于该项议案，协会号召全行业开展腐植酸/黄腐酸肥料土壤固碳技术论证、标准制定、碳汇核算等工作迫在眉睫！

(2024年3月1日中腐协秘书处供稿)