



## 腐植酸在环境领域的应用研究综述

王一博<sup>1</sup> 吕东妍<sup>1</sup> 刘长勇<sup>2</sup> 马献发<sup>1\*</sup>

1 东北农业大学资源与环境学院 哈尔滨 150030

2 新疆农垦科学院分析测试中心 石河子 832000

**摘要:** 腐植酸对于环境领域的应用研究, 包括对土壤及水体中重金属、有机污染物的影响和大气污染防治及减少温室气体排放等方面, 一直是热点话题。结合国内外的研究现状, 根据腐植酸的特性, 综述了腐植酸在防治土壤、水体、大气污染及减少温室气体排放中的应用及机理, 并对其今后在环境领域中的应用提出研究展望。

**关键词:** 腐植酸 土壤污染 水体污染 大气污染

**中图分类号:** TQ314.1 **文章编号:** 1671-9212(2021)04-0001-06

**文献标识码:** A **DOI:** 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2021.04.001

A Review on the Application of Humic Acid in Environment

Wang Yibo<sup>1</sup>, Lv Dongyan<sup>1</sup>, Liu Changyong<sup>2</sup>, Ma Xianfa<sup>1\*</sup>

1 College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, 150030

2 Analysis and Testing Center, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation, Shihezi, 832000

**Abstract:** The research on the effects of humic acid on environmental, including the effects of heavy metals and organic pollutants in soil, water and air pollution prevention and reduction of greenhouse gas emissions, has always been a hot topic. Based on the research status at home and abroad and based on the characteristics of humic acid, this article summarized the application and prevention mechanism of humic acid in the pollution prevention of soil, water, air and reducing greenhouse gas emissions in the atmosphere. The research prospect of its application in the field of environment in the future was put forward.

**Key words:** humic acid; soil pollution; water pollution; air pollution

腐植酸是动植物残体, 主要是植物残体, 经微生物分解和转化以及一系列地球生物化学过程, 生成的一类高分子聚合有机物质的总称<sup>[1]</sup>。腐植酸广泛存在于土壤、湖泊、河流、海洋以及泥炭、褐煤、风化煤中, 这使其结构具有多样性。总体来说, 腐植酸大分子的基本结构是芳香环和脂肪链, 富含羧基、羟基、羰基、醌基、甲氧基等活性官能团。结构的多样性决定了腐植酸理化性质的多样性。腐植酸具有与金属离子交换、吸附、络合、螯合等作用; 作为聚电解质, 在分散系中还可起到凝聚、胶溶、

分散的作用<sup>[2]</sup>。腐植酸可使土壤中微生物活动增加, 加快土壤腐殖化过程。腐植酸在改良土壤结构方面也具有明显效果, 还可通过活化土壤养分和增加土壤养分有效性来提高土壤养分供给能力<sup>[3]</sup>。据目前研究表明<sup>[4~8]</sup>, 腐植酸对于土壤肥力的改善、土壤生态的保护、水体污染物的防治和地球碳循环都有着重要的影响。腐植酸因自身化学性质的多样性, 能够用于环境污染防治, 本文对腐植酸在环境领域的应用和机理进行了探讨, 以期对腐植酸在环境污染防治及减少温室气体排放方面的研究提供参考。

[收稿日期] 2020-11-19

[作者简介] 王一博, 男, 2001年生, 本硕博连读生, 主要研究方向为农业资源与环境, E-mail: wyb166262898@163.com。

\* 通讯作者: 马献发, 男, 副教授, E-mail: mxf7856@163.com。

## 1 污染物种类及来源

环境污染物是指由于人类的活动进入环境,使环境正常组成和性质发生改变,直接或者间接有害于生物和人类的物质。

土壤污染物包括无机污染物和有机污染物两大类,常见的主要是重金属污染物和有机污染物。土壤重金属污染指的是土壤中的重金属离子,不能被土壤中的微生物分解,也不能通过土壤的自净作用降解或通过吸附、沉淀、络合、氧化还原等化学反应变为不溶物,退出生物循环,只能累积在土壤中,对土壤造成污染。常见的土壤重金属污染物主要有铬、汞、铅、铜、锌、镉等。土壤中的重金属来源主要有自然来源和人为输入2种途径<sup>[9]</sup>。其中,人为输入占主导地位。人为输入可分为工业污染、农业污染和交通污染3种。工厂企业排放的烟尘和废气中所含有的重金属通过自然沉降和降雨沉降进入到土壤当中;固体废弃物由于长时间的日晒雨淋,含有的重金属进入到土壤当中;部分农药中含有镉、汞重金属,长时间施用会增加土壤重金属的含量;利用未处理的污染水灌溉农田,会导致土壤重金属污染;汽车尾气的排放,会导致道路两旁的土壤重金属污染物含量增加<sup>[10]</sup>。土壤的有机污染是指由土壤有机物含量过高而引起的土壤污染。土壤中的有机污染物主要包括挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物。造成土壤有机污染的原因主要是农业生产过程中农药的残留,常见的农药如有机磷农药、有机氯农药、氨基甲酸酯类农药、苯氧羧酸类农药等<sup>[11]</sup>。此外,石油、多环芳烃、多氯联苯、甲烷、有害微生物等,也是土壤中常见的有机污染物。

水体中常见的污染物也是重金属污染物和有机污染物。水体重金属污染是含有重金属离子的污染物进入到水体,不能通过常用的水处理方法进行分解,对水体造成的污染。水体中的重金属来源有两方面,一方面是农业生产中农药化肥的不合理使用,通过径流进入水体;另一方面是城市发展的过程中工业废水的排放和工业废物焚烧,经降雨、沉降进入水体<sup>[12]</sup>。水体有机污染是指由城市污水、食品工业等排放含有大量有机物的废水或农业生产

中化肥农药的残留,进入水体造成的污染。

大气污染物包括粉尘、烟、雾等小颗粒状的污染物,也包括一氧化碳、二氧化硫、氧化亚氮等气态污染物。常见大气污染物的来源主要是化石燃料的燃烧、工业废气的排放、交通运输过程的排放以及农业畜牧活动排放。减少大气污染物的含量也是环境污染防治的一个重要项目。另外,温室气体的排放对大气环境存在潜在的危害,给人的生存造成了威胁。最主要的温室气体是二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等,来源同大气污染物。

## 2 腐植酸在环境污染防治上的应用

### 2.1 腐植酸在土壤污染防治上的应用

腐植酸在改善土壤中重金属污染及有机污染方面有着较为显著的作用。

腐植酸在土壤重金属污染防治的应用主要表现在:钝化重金属、降低有效态重金属含量,降低重金属生物有效性。王宏鹏<sup>[13]</sup>对石灰性土壤镉污染原位钝化修复材料进行了研究,结果表明:单施腐植酸和混施碱改性沸石+腐植酸对石灰性土壤中有效态镉的钝化效率为23.87%和28.11%。刘千钧等<sup>[14]</sup>研究了针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能,结果表明:复合材料中黄腐酸的质量比越高,对铅镉钝化作用效果越好;土壤中铅镉的钝化率随钝化时间的延长而增加,并趋于稳定;钝化修复后可交换态及碳酸盐结合态铅含量降低,残渣态铅含量增加,土壤中镉可交换态含量降低,铁锰氧化态及残渣态含量显著增加。高洁等<sup>[15]</sup>研究了腐植酸对灰棕紫泥中汞赋存形态的影响,结果表明:施用腐植酸降低汞的活性,促进土壤中水溶态、交换态和酸溶态汞向碱溶态、有机结合态和残渣态汞转化。马婵华<sup>[16]</sup>研究了腐植酸类液体肥调理剂对稻米重金属含量的影响,结果表明:腐植酸类液体肥调理剂对于降低稻米重金属(尤其是镉)的含量有明显效果,对稻米籽粒中重金属镉、铬、汞和砷含量分别降低了67.4%、33.7%、35.3%和2.1%。由此可见,腐植酸作用于土壤重金属污染物效果显著。



土壤中的有机污染物的去除也是当今的研究热点之一。据王海涛等<sup>[17]</sup>的研究发现,腐植酸对柴油的解吸有显著增容作用;练湘津等<sup>[18]</sup>的研究也表明,腐植酸具有表面活性剂的作用,除油率高达56.6%。Keum等<sup>[19]</sup>研究腐植酸促进漆酶去除多氯联苯的作用显示,腐植酸可以帮助多氯联苯快速地被漆酶所降解,但腐植酸浓度的增加会导致速率常数的降低。多氯联苯因具有高疏水性导致自身的生物降解性很差,在使用腐植酸等天然表面活性剂处理后,多氯联苯的生物降解性显著提高,从而达到多氯联苯的降解。据石弘弢<sup>[20]</sup>研究表明,外源腐植酸能够促进黑土中邻苯二甲酸二丁酯的降解,同时能够改善被污染黑土的理化性质。由此可见,腐植酸对去除土壤中有机污染物具有明显作用。

## 2.2 腐植酸在水体污染防治上的应用

水是生命之源,也是自然界和人类生存发展过程中不可或缺的重要因素。因此,水体中的污染也同样不容小觑。

水体中的重金属污染占较大比例且易富集,利用腐植酸降低水体中重金属的浓度是一项较为有效的方法。程亮等<sup>[21]</sup>探究了平均粒径60 nm的腐植酸动态吸附重金属镉的能力,结果表明:所制备的纳米腐植酸经30次吸附、再生后基本无形貌变化,其所含的多种活性基团对镉的吸附起了积极影响。王丹丽等<sup>[22]</sup>制备了针铁矿-腐殖质复合胶体,研究了其对重金属离子吸附-解吸的性能,发现相较于针铁矿、腐殖质单体系,针铁矿-腐殖质复合胶体对铜、锌的吸附能力更加强烈。杨毅等<sup>[23]</sup>用河流底泥提取的腐植酸吸附水中镉,结果表明:投加腐植酸总浓度为10  $\mu\text{mol/L}$ 、溶液pH为6.0时镉去除率为71.4%。上述研究均表明,腐植酸在吸附镉、铜、锌方面有积极作用。

水体有机污染中染料废水脱色是一个难题。但经腐植酸处理印染废水却有较好的净化效果。陈仙<sup>[24]</sup>利用腐植酸钠对印染废水进行处理研究,结果表明:腐植酸对染色污染物有较高的去除率,而且工艺成本较低,净化效果较高;此外,腐植酸在一定程度上可促进水中4,4'-二氯二苯三氯乙烷(DDT)的吸附<sup>[25]</sup>。Lin等<sup>[26]</sup>研究表明,腐植酸

可用于处理芬顿工艺过程中产生的废水,腐植酸和 $\text{MgSO}_4$ 作为吸附剂和沉淀剂进行物理化学预处理,协同效果达到化学需氧量去除率39%,颜色去除率89%,降低了废水中有机污染物的含量。李生英等<sup>[27]</sup>研究表明,改性腐植酸对甲基紫具有很好的吸附作用,当改性腐植酸的用量为0.8 g时,其对甲基紫的去除率达98.34%。上述研究表明,腐植酸能够降低有机污染物含量,且腐植酸防治水体有机污染物的成本低,净化效果较高,表明腐植酸极其契合环境污染防治。

## 2.3 腐植酸在大气污染防治及温室气体减排上的应用

腐植酸被称为大气碳平衡的“调控阀”和“缓冲器”,它可以与很多形成雾霾的污染物作用,起到抗雾霾的作用;还可以减少温室气体的排放。

据孙志国<sup>[28]</sup>研究发现,腐植酸可用于吸收烟气中的二氧化硫和二氧化氮。在常温下,pH > 4.5、浓度0.06 g/mL是腐植酸钠溶液脱硫的最佳条件。Biplob等<sup>[29]</sup>研究表明,缓释褐煤尿素显著提高了甜菜对氮肥的利用率和吸收量,减少了29%的氧化亚氮排放和36%的氨气排放。张艺磊等<sup>[30]</sup>研究表明,与普通尿素相比,腐植酸尿素的土壤氧化亚氮累计排放量最低,减少了58.7%。张地方等<sup>[31]</sup>研究可知,添加木本泥炭能够明显降低堆肥堆体温室气体及臭气排放。木本泥炭含量比例的增加,可使堆体对甲烷、氨气和硫化氢的吸附量增大;木本泥炭添加量增加至15%以上时,总温室气体排放量减少70.34%~83.26%。成绍鑫等<sup>[32]</sup>研究表明,施用腐植酸有机-无机复合肥对节能减排有明显的影 响,能够减少二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物的排放。此外,腐植酸的衍生物,如腐植酸(黄腐酸)抗干旱剂<sup>[33]</sup>还能够促进植物的光合作用,增加二氧化碳的吸收和氧气的排放,改善空气质量。

## 3 腐植酸对环境污染防治的机理

### 3.1 腐植酸对土壤污染防治的机理

一般认为,腐植酸防治土壤重金属污染可能存在于3种途径。众所周知,土壤中的腐植酸是一种带

负电荷的较大颗粒胶体，但是腐植酸边棱带有正电荷，由于土壤中粘土矿物带有负电荷，使其对腐植酸有较强的吸附能力，粘土矿物吸附腐植酸的同时加强了土壤对金属离子的吸附及络合作用<sup>[34]</sup>。这使得腐植酸可以作为淋洗剂，加速土壤中重金属离子迁移，从耕层土壤中去除，减少生物的吸收。不仅如此，腐植酸中的多种活性官能团，也可以与重金属发生络合作用、螯合作用等，使得水溶态和交换态的重金属离子含量减少，形成难溶性盐类，从而抑制重金属的迁移，使得重金属离子在土壤中的活性和生物可利用性都得到了降低。此外，腐植酸基于它的氧化还原能力，可以与土壤溶液中的重金属镉、汞结合生成硫化物沉淀，影响重金属离子的生物毒性和迁移性<sup>[35]</sup>。

腐植酸能够与农药、除草剂、多环芳烃、多氯联苯等有机污染物通过疏水性吸附、氢键作用、电荷转移、配位交换等方式产生作用行为，从而影响有机污染物在土壤中的迁移、转化及生物降解等过程<sup>[36]</sup>。腐植酸通过多种作用力达到对土壤中有有机污染物的吸附，其吸附作用使得有机污染物团聚在腐植酸分子的周围，从而降低了土壤中有有机物的迁移，起到固化的作用，避免对土壤地下水的污染。丁海涛等<sup>[37]</sup>研究表明，溶解性腐植酸是以芳香碳为疏水内核、以脂肪链及分布在脂肪链上的极性官能团为亲水外壳的类胶束结构，HA结合多环芳烃污染物代表芘的能力随着腐植酸芳香度和疏水组分含量升高而增强，随着其脂肪度、极性官能团升高而减弱，研究结果可为多环芳烃的迁移转化及环境归趋评价提供一定的理论支持。刘晋湘<sup>[38]</sup>比较了腐植酸与多种表面活性剂，发现腐植酸去除有机污染物效果更好，因腐植酸更易于生物降解，是一种理想的化学表面活性剂的替代品。此外，腐植酸中的多种官能团具有可逆性的氧化还原和离子交换功能，可对土壤中的有机污染物进行氧化还原，从而将有机污染物降解生成醇类和酚，达到降低土壤中有有机污染物的目的。

### 3.2 腐植酸对水体污染防治的机理

如上所述，腐植酸富有多种活性官能团，例如羧基、醇羟基、酚羟基等，从而使得腐植酸能对重

金属离子实现化学吸附效应，例如离子交换、络合反应，从而降低了水体中重金属的浓度。当水体中重金属离子浓度过高时，腐植酸可以与重金属离子发生交换反应，从而重金属离子结合在腐植酸大分子上。此外，腐植酸的总酸性基团含量（羧基与酚羟基）和重金属离子吸附量有密切的关系，可以与铜、铅、镉等金属离子发生络合效应形成较为稳定的络合物。腐植酸自身的疏松“海绵状”结构，使得其具有较大的表面积和表面能，金属离子能被腐植酸表面物理吸附。但是物理吸附不够稳定，容易受到外界因素的干扰，导致重金属离子解吸<sup>[39]</sup>。因此，腐植酸针对水体中重金属污染的防治机理主要是依赖腐植酸的离子交换和络合反应。张亚萍等<sup>[40]</sup>通过序批式实验研究了腐植酸物质对重金属的吸附机理，结果表明：在pH为5左右时，腐植酸的投入量越大，对水中的重金属吸附效率越高，最高可达99%，且体系中的 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 会对腐植酸的吸附起到促进作用。陆中桂等<sup>[41]</sup>用风化煤中提取的腐植酸吸附水中的镉和铅，结果表明：腐植酸对镉和铅吸附为物理吸附和化学吸附的复合吸附过程。

水体中的有机污染物大多为工厂废水的排放以及农药的不合理使用导致，如多环芳烃、多氯联苯、除草剂等。卢静等<sup>[11]</sup>研究表明，腐植酸可以通过配位交换、疏水作用和氢键作用吸附有机污染物，然后通过螯合作用富集水体污染物，表现为增强有机污染物溶解度，从而限制有机污染物在水体中的迁移作用。腐植酸也可作为吸附剂去除有机污染物，例如泥炭腐植酸去除废水中的有机染料。徐雪松<sup>[42]</sup>利用褐煤对染料废水的作用研究发现，主要依赖褐煤中腐植酸自身的羟基、羧基官能团及苯环来降低染料废水中的有机污染物含量。腐植酸的光化学性质较为活泼，吸收光子可引发一系列自由基反应，从而影响有机污染物的光降解过程。通过欧晓霞等<sup>[43]</sup>的研究可知，腐植酸可以促进有机污染物的光降解作用，从而降低水体中有机污染物的浓度。不仅如此，腐植酸也能够通过氧化还原作用降低水体中有机污染物含量。电子将腐植酸作为电子传递体，使其从还原态的化合物上转移到有机污染物上，将有机污染物从氧化态转变为还原态，达



到降解有机污染物的目的；腐植酸还能接收有机污染物的电子，从而氧化有机污染物，进一步去除有机污染物<sup>[44]</sup>。在厌氧环境下，腐植酸在多种菌体的作用下，促进厌氧微生物的繁殖，从而促进有机污染物的降解<sup>[45]</sup>。

### 3.3 腐植酸对大气污染防治及温室气体减排的机理

腐植酸是土壤腐殖质最主要的组分，具有固碳功能。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。腐植酸作为一种亲水有机胶体，在土壤中可以通过各种力的作用相互结合，形成多种类型的有机无机复合体。这种复合体对于土壤团聚体的形成发挥着重要的作用<sup>[46]</sup>。

腐植酸含有多种官能团，且具有胶体性质，可以与氮氧化物、硫氧化物、氨、气溶胶组分（乙酸乙酯、苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯）以及PM<sub>2.5</sub>的二次颗粒（NH<sub>4</sub>）<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>等发生作用，从而达到抗雾霾的作用。利用腐植酸的络合性能、胶体性能制成腐植酸钾、钙、镁等液体抗雾霾制剂，既可以起到液体肥料作用，又可以减少氨、三氧化硫、五氧化二氮的挥发性，改善大气环境<sup>[47]</sup>。

施用腐植酸肥料间接机理主要表现在以下4个方面：（1）减少化学肥料的施用，从而降低了二氧化碳和二氧化硫排放；（2）使氮肥利用率提高而减少氨、硝态氮、亚硝态氮、氮氧化物等的排放；（3）提高绿色植物产量和呼吸强度而增加二氧化碳的吸收量；（4）改善了土壤理化性能和微生物活性，减少了腐殖质的分解以及二氧化碳和其他气体的排放<sup>[33]</sup>。由此可见，合理利用腐植酸是改善大气环境、储碳控碳和维护地球碳循环的一项重要举措。

## 4 研究展望

（1）腐植酸与环境污染物的作用机制研究还需不断深入。首先需要更深层次地了解污染物的来源、种类及其性质，才能够快速且有效地利用腐植酸改善环境污染；其次是腐植酸与污染物之间的作用机理及对其应用缺乏更深层次更广泛

的研究。

（2）腐植酸应用于土壤及水体重金属污染的研究较为普遍，而对于水体中有机物污染的研究相对来说需要进一步深入。可以积极利用腐植酸的光化学过程来解决水体有机污染物的污染问题，并对腐植酸的浓度和光源等因素进行分析研究，这将反过来进一步使我们更加了解腐植酸的光化学过程。此外，对污染土壤、污染大气的有机污染物，能否发挥腐植酸的光降解作用还未见报道，也需要我们作进一步研究。

（3）对于腐植酸在大气污染及减少温室气体排放方面的研究，需要精进研发各类腐植酸功能性抗雾霾制剂、农业投入品，用扎实的理论和实践数据去充分证明工业提取反哺的腐植酸，可以减少一些大气污染物的形成和温室气体的排放。

（4）实现碳达峰、碳中和目标是推动污染源头治理、实现减污降碳协同效应的重要路径。开展腐植酸在促进土壤碳中和、肥料碳达峰方面的研究势在必行。

（5）腐植酸在绿色修饰、节能减排、土壤改良、水质净化、污染修复等方面的作用不可忽视，培育腐植酸环境治理新产业应当成为时代要求。

## 参考文献

- [1] 刘诗婷, 么强, 陈芳, 等. 腐植酸联合铁氧化物去除水体中重金属的研究进展 [J]. 工业水处理, 2020, 40 (5): 7 ~ 11.
- [2] 张康, 戴亮, 赵伟繁, 等. 污泥腐植酸对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附特性 [J]. 环境科学研究, 2020, 33 (6): 1459 ~ 1468.
- [3] 孔令冉, 董雯昕, 杨天一, 等. 腐植酸在改良和培肥土壤中的作用 [J]. 腐植酸, 2019 (1): 7 ~ 12.
- [4] 曾完成, 李双. 腐植酸、腐植酸肥料在构筑“土肥和谐”关系中的重要作用和地位 [J]. 腐植酸, 2017 (1): 4 ~ 14.
- [5] 曾完成, 李双. 让腐植酸在补充和提升土壤肥力中发挥重要作用——开展“土壤腐植酸肥力综合指数”研究刻不容缓 [J]. 腐植酸, 2014 (2): 1 ~ 8.
- [6] 童毅, 陈坤, 杨睿彬. 腐植酸在环境生态领域中的应

- 用进展[J]. 腐植酸, 2014(1): 9~13.
- [7] 中腐协秘书处. 建立健全腐植酸绿色农资低碳循环生产体系, 助力农业碳达峰碳中和[J]. 腐植酸, 2021(2): 83.
- [8] 《腐植酸》编辑部. 话说腐植酸之低碳功能[J]. 腐植酸, 2010(3): 39~41.
- [9] 温鑫, 谷晋川, 魏春梅, 等. 腐殖酸-海泡石复合钝化剂的制备及其对Cd污染土壤的修复[J]. 化工环保, 2020, 40(5): 518~523.
- [10] 张峻, 付蓉蓉. 土壤重金属污染物来源及植物修复技术研究进展[J]. 上海农业科技, 2011(5): 25~27.
- [11] 卢静, 朱琨, 赵艳锋, 等. 腐殖酸在去除水体和土壤中有有机污染物的作用[J]. 环境科学与管理, 2006(8): 151~154.
- [12] 吴倩云. 水体重金属污染来源及修复技术研究进展[J]. 广东化工, 2020, 47(10): 119, 122.
- [13] 王宏鹏. 石灰性土壤镉污染原位钝化修复材料研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2020.
- [14] 刘千钧, 李想, 周阳媚, 等. 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5623~5628.
- [15] 高洁, 李雪梅, 闫金龙, 等. 腐殖酸对灰棕紫泥中汞赋存形态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 199~203.
- [16] 马婵华. 腐殖酸类液体肥调理剂对稻米重金属含量的影响研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(23): 74~75.
- [17] 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]. 腐植酸, 2008(4): 40.
- [18] 练湘津, 刘云国, 曾光明, 等. 腐殖酸做表面活性剂对加油站油污土壤的修复[J]. 石油化工高等学校学报, 2006(3): 23~26, 75.
- [19] Keum Y S, Li Q X. Copper dissociation as a mechanism of fungal laccase denaturation by humic acid[J]. 2004, 64(4): 588~592.
- [20] 石弘弢. 腐殖酸对黑土邻苯二甲酸二丁酯污染的强化修复机制研究[D]. 东北农业大学硕士学位论文, 2020.
- [21] 程亮, 侯翠红, 徐丽, 等. 纳米腐殖酸动态吸附废水中镉离子及其洗脱特性[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1348~1356.
- [22] 王丹丽, 王恩德. 针铁矿及腐殖质对水体重金属离子的吸附作用[J]. 安全与环境学报, 2001(4): 1~4.
- [23] 杨毅, 王晓昌, 金鹏康, 等. 水环境中腐殖酸与镉离子结合作用影响因素[J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 4603~4606.
- [24] 陈仙. 腐钠处理染色废水研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2002(2): 255~256.
- [25] Mézin L C, Hale R C. Combined effects of humic acids and salinity on solid-phase microextraction of DDT and chlorpyrifos, an estimator of their bioavailability[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 23(3): 576~582.
- [26] Lin G, Zhu N, Liang W, et al. Combined humic acid adsorption and enhanced Fenton processes for the treatment of naphthalene dye intermediate wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 198: 232~240.
- [27] 李生英, 魏云霞, 马明广. 改性腐殖酸对染料甲基紫的吸附研究[J]. 安徽农业科学, 2008(19): 8285~8286, 8391.
- [28] 孙志国. 腐植酸钠吸收烟气中SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>的实验及机理研究[D]. 上海交通大学博士学位论文, 2011.
- [29] Biplob K S, Michael T R, Vanessa N L W 著, 矫威译. 缓释褐煤尿素可减少土壤气态氮损失并提高甜菜产量和氮的吸收[J]. 腐植酸, 2021(3): 88.
- [30] 张艺磊, 韩建, 张丽娟, 等. 新型尿素对农田土壤N<sub>2</sub>O排放、氨挥发及土壤氮素转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 313~316.
- [31] 张地方, 袁京, 王国英, 等. 木本泥炭添加比例对猪粪堆肥腐熟度和污染及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 233~240.
- [32] 成绍鑫, 韩立新. 腐植酸的低碳效应解析[J]. 腐植酸, 2011(1): 1~7.
- [33] 《腐植酸》编辑部. 腐植酸在修复生态环境中的重要作用[J]. 腐植酸, 2013(1): 41~42.
- [34] 卢静, 朱琨, 侯彬, 等. 腐植酸与土壤中重金属离子的作用机理研究概况[J]. 腐植酸, 2006(5): 1~5.
- [35] 陈静, 黄占斌. 腐植酸在土壤(下转第49页)

