

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除

王冰清¹, 阳琴¹, 李虹颖², 熊启中¹, 徐刚¹, 孙瑞波¹, 田达¹, 李军利¹, 郜红建¹, 叶新新^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001)

摘要: 为了提升孔雀草 (*Tagetes patula* L.) 对镉 (Cd) 污染土壤的修复潜力, 通过田间试验, 研究铵态氮肥和腐殖酸对孔雀草生长以及土壤中 Cd 去除的影响。结果表明, 氮肥 (N) 与氮肥和腐殖酸联用处理 (NHA) 可显著提高孔雀草的生物量; 与对照 (CK) 相比, NHA 和 N 处理下孔雀草地上部生物量分别提高了 2.49 倍和 1.52 倍 (肥东土壤), 提高了 2.28 倍和 1.74 倍 (长丰土壤)。在孔雀草生长期间, 氮肥和腐殖酸能够降低土壤 pH 值, 尤其是 NHA 处理; NHA 处理较 CK 处理在肥东和长丰土壤上 pH 值分别降低了 0.76 和 0.84 个单位; 腐殖酸处理 (HA) 能显著提高肥东与长丰土壤中 DOC 的含量。NHA 和 HA 处理能显著促进孔雀草根系生长发育, 改善孔雀草的根系形态特征。在肥东和长丰土壤中, 与 CK 相比较, NHA 处理土壤有效态 Cd 含量分别增加了 64.1% 和 53.1%, 孔雀草 Cd 的累积量分别增加了 7.17 倍和 4.15 倍; NHA 处理的土壤 Cd 去除率最高, 在肥东和长丰土壤上分别达到 17.06% 和 14.08%。本研究表明在强化孔雀草修复重金属 Cd 污染土壤方面, 铵态氮肥和腐殖酸的联用具有潜在应用前景。

关键词: 植物提取; 协同修复; 镉; 孔雀草; 硫酸铵; 腐殖酸

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-6006-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104053

Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by *Tagetes patula* L.

WANG Bing-qing¹, YANG Qin¹, LI Hong-ying², XIONG Qi-zhong¹, XU Gang¹, SUN Rui-bo¹, TIAN Da¹, LI Jun-li¹, GAO Hong-jian¹, YE Xin-xin^{1*}

(1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China)

Abstract: In order to enhance the remediation potential of *Tagetes patula* L. on cadmium (Cd)-contaminated soil, field experiments were conducted to study the effects of ammonium nitrogen fertilizer (N) and humic acid (HA) on the growth of *Tagetes patula* L. and the removal of Cd from soil. The results showed that N treatment and the combined treatment of N and humic acid (NHA) significantly increased the biomass of the plants. Compared with that of the control (CK), the shoot biomass of the plants under NHA treatment increased by 2.49 times and 1.52 times in Feidong soil and 2.28 times and 1.74 times in Changfeng soil, respectively. The N and HA treatments, especially the NHA treatment, reduced the soil pH value during the growth period of the plant. The soil pH value in the NHA treatment decreased by 0.76 and 0.84 units in Feidong and Changfeng soils, respectively. The HA treatment significantly increased the DOC concentration in Feidong and Changfeng soils. The NHA and HA treatments significantly promoted the growth and development of the root system and improved the morphological characteristics of the plant. In the NHA treatment, the available Cd content increased by 64.1% and 53.1% in Feidong and Changfeng soils, respectively. The corresponding values in the accumulation of Cd in plants were 7.17 times and 4.15 times in Feidong and Changfeng soils, respectively. The maximum removal rates of Cd in Feidong and Changfeng soils were 17.06% and 14.08% under the NHA treatment, respectively. The results showed that the combination of ammonium nitrogen fertilizer and humic acid had a potential application prospect in enhancing the remediation of Cd-contaminated soil by *Tagetes patula* L.

Key words: phytoextraction; collaborative remediation; cadmium; *Tagetes patula* L.; ammonium sulfate; humic acid

植物修复技术是一种利用重金属超积累植物从污染土壤中提取有害金属的经济、环保和有效的方法^[1]。孔雀草 (*Tagetes patula* L.) 是一种观赏性花卉植物, 具有较好的景观恢复与环境生态效益, 适合于大面积推广^[2], 并且孔雀草对土壤中 Cd 的提取具有较大潜力^[3]。孔雀草对土壤中 Cd 去除效率的提升是其规模化应用的关键。利用外源物质来强化孔雀草对土壤 Cd 的去除, 是推动孔雀草在植物修复技术中大规模应用的重要措施^[4]。

氮素是植物体内所必需的大量营养元素之一, 施用氮肥对增加超积累植物的生物量至关重要^[5]。铵态氮肥可以通过硝化作用使土壤酸化^[6], 增加重

金属的溶解度和生物有效性。Zaccheo 等^[7]的研究发现, 铵态氮肥的施用可以通过增加植物生物量和降低土壤 pH 值来提高土壤中 Cd 的去除效率。因此, 铵态氮肥的施用是提高超积累植物提取土壤中 Cd 的有效方法。

腐殖酸的添加对土壤重金属的形态转化和有效性具有重要影响^[8]。有研究表明, 腐殖酸中低分子

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-06-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800203-3); 安徽省杰出青年科学基金项目 (2008085J13)

作者简介: 王冰清 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染土壤修复, E-mail: 1434746161@qq.com

* 通信作者, E-mail: yexx@ahau.edu.cn

量有机物质对重金属离子具有亲和力小和络合容量大等特点,可以提高土壤重金属的有效性^[9]. 腐殖酸也可以通过降低土壤 pH,酸化土壤从而增加重金属的活性^[10]. 同时,腐殖酸不仅能够抑制脲酶活性,增强氮肥的缓释性能,还能固定土壤中硝态氮和铵态氮,减少土壤中的氮素损失,提高氮肥利用率,增加植物的生物量^[11].

组合修复技术是通过优化组合各种修复技术和措施,使之达到最佳效果和最低投入的一种综合环境污染修复方法. 相对于单一修复方法而言,组合修复技术能最大限度地提高土壤中重金属的修复效率,具有周期短和效果好等优点,因此越来越受到人们广泛的关注^[12]. 当前,关于铵态氮肥和腐殖酸联用来强化孔雀草去除土壤中 Cd 的相关研究较少. 本文通过田间试验,研究铵态氮肥与腐殖酸联合施用修复 Cd 污染土壤的效果以及强化孔雀草对土壤 Cd 去除的机制,以期 Cd 污染农田植物修复技术的应用和推广提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验区土壤理化性质

本试验设置于安徽省合肥市肥东和长丰土壤重金属修复基地. 肥东县桥头集镇仙垵村试验点,土壤基本理化性质如下: pH 6.02, CEC 23.91 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (有机质) 28.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (黏粒) 29.2% ($< 2\ \mu\text{m}$), 土壤 ω (总 Cd) 0.686 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤中 ω (有效态 Cd) 0.083 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 长丰县双墩镇尚岗村试验点,土壤基本理化性质如下: pH 6.61, CEC 14.68 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (有机质) 11.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (黏粒) 24.1% ($< 2\ \mu\text{m}$), 土壤 ω (总 Cd) 0.662 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤 ω (有效态 Cd) 为 0.067 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 两个试验点土壤 Cd 总量都超过土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)中风险筛选值(0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

1.2 试验设计

供试植物为 Cd 超富集植物孔雀草,在温室内进行预培养. 本试验设置 4 个处理,分别为对照处理(CK,不加氮肥和腐殖酸)、氮肥处理(N,只添加氮肥)、腐殖酸处理(HA,只添加腐殖酸)和氮肥+腐殖酸处理(NHA,氮肥与腐殖酸联合施用),每个处理重复 4 次,每个小区面积为 60 m^2 . 分别采用尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)和氯化钾(含 K_2O 62%)作为基肥全部施入土壤. 基础施肥水平设定为 90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 N 计)、150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计)和 150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 K_2O 计). 根据当地施肥水平设置不同施氮量[0、45、90、120 和 150

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 N 计,硫酸铵)]对孔雀草修复 Cd 影响的试验结果,从产量的结果确定 90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为本试验最佳施用量. 通过文献[13]可知,施加 1%(质量分数)腐殖酸对植物修复土壤中 Cd 效果最好. 铵态氮肥和腐殖酸处理分别以 90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 N 计,硫酸铵)和 1%(质量分数)腐殖酸均匀地混合在土壤中. 本试验于 2020 年 7 月中旬开展,10 月中旬收获;试验结束后分别采集各试验小区孔雀草样品以及土壤样品. 采集孔雀草植株样品时,使用铲子在孔雀草植株四周挖出 25 $\text{cm}\times 25\ \text{cm}\times 20\ \text{cm}$ 的土块,以挖掘和抖土的方式将孔雀草与土壤分离. 装入网袋中带回实验室处理,分为地上部和根系. 地上部指的是植株与土壤接触面以上的所有部位包括茎、叶和花等,根系指的是土壤接触面以下的部位. 经自来水和蒸馏水冲洗干净,所有根系装入样品袋.

1.3 土壤和植物样品分析

土壤样品用混合酸($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$)方法进行消解,采用电感耦合等离子体质谱仪分析 Cd 浓度. 土壤有效态 Cd 采用 CaCl_2 提取的方法,具体可参考 Ye 等^[14]的方法. 用国家标准物质(GBW07455)来进行土壤消解过程和 Cd 测定的质量控制.

在孔雀草种植 15、30、45、60 和 90 d 后进行田间土壤采样. 分别测定 4 个处理土壤有效 Cd、pH 和 DOC. 土壤中的 DOC 浓度根据 Jones 等^[15]的方法进行分析.

植株生长 90 d 后收获,清洗、烘干和粉碎后备用. 称取植物样品使用混合酸($\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$)方法进行消解,采用电感耦合等离子体质谱仪分析 Cd 浓度. 采用国家标准物质(GBW07603)进行质量控制. 土壤样品和植物样品测定结果显示 Cd 回收率在 86%~105% 范围内.

用 EPSON 全自动扫描仪扫描记录孔雀草的根系形态并获取根系图像,然后采用 Win RHIZO 2009 根系扫描分析系统计算出孔雀草根系的总根长、根体积、平均直径、总表面积和根尖数等参数.

1.4 数据计算与分析

利用以下公式计算孔雀草地上部和根部 Cd 积累量:

$$\text{Cd}_{\text{积累量}} = \text{孔雀草生物量} \times \text{Cd}_{\text{含量}}$$

式中, $\text{Cd}_{\text{积累量}}$ 为地上部或根部 Cd 吸收量($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$),孔雀草生物量($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)为地上部或根部干重, $\text{Cd}_{\text{含量}}$ 为地上部或根部的 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

土壤 Cd 去除率是指孔雀草对土壤中镉的去除效率,包括了地上部和根系两部分对土壤中 Cd 的吸收. 因此采用以下公式计算:

$$Cd_{RM} = \frac{Cd_{Blank} - Cd_{Treatment}}{Cd_{Blank}}$$

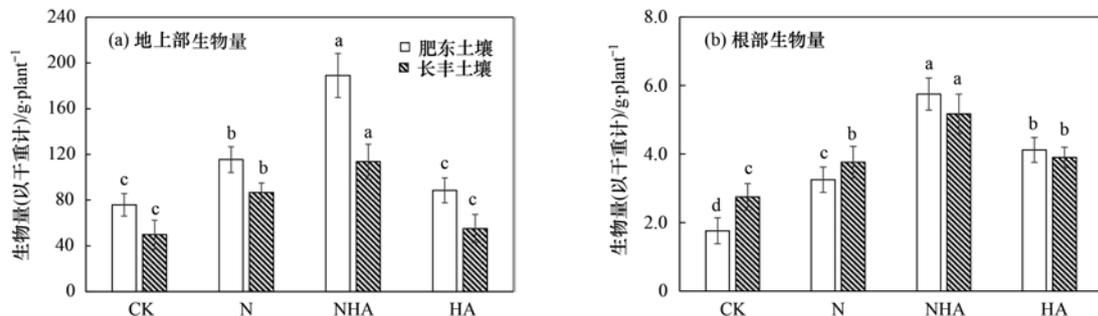
式中, Cd_{RM} 为土壤 Cd 去除率, Cd_{Blank} 为未种植孔雀草土壤 Cd 总量, $Cd_{Treatment}$ 为经过不同处理后土壤总 Cd 量。

通过 SPSS 21.0 进行统计分析, 采用最小显著差数法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 利用 Excel 2010 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 孔雀草生物量

氮肥与腐殖酸的施用对孔雀草生物量有显著影



CK: 仅种植孔雀草, N: 孔雀草 + 施氮肥, HA: 孔雀草 + 腐殖酸, NHA: 孔雀草 + N 肥 + 腐殖酸; 不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同处理条件下孔雀草地上部和根部生物量

Fig. 1 Dry weights of shoots and roots in *Tagetes patula* L. under different treatments

2.2 孔雀草中 Cd 含量

孔雀草地上部 Cd 含量排序为: NHA > N ≈ HA > CK. 在肥东和长丰两种土壤中, NHA 处理下孔雀草地上部 Cd 含量分别比 CK 提高了 2.88 倍和 1.82 倍; N 处理略高于 HA 处理, 但两者间差异不显著 [图 2(a)]. 孔雀草根部 Cd 含量以 NHA 处理最高,

响 ($P < 0.05$). 在两种土壤中, 地上部生物量的大小排序依次为: NHA > N > HA ≈ CK [图 1(a)]. 与对照相比, NHA 和 N 处理下孔雀草地上部生物量分别提高了 2.49 倍和 1.52 倍 (肥东土壤), 在长丰土壤上分别提高了 2.28 倍和 1.74 倍. 孔雀草根生物量在 NHA 处理中最高, 其次是 HA 和 N 处理, CK 处理最低. 在肥东与长丰土壤中, 与 CK 处理相比, NHA 处理下孔雀草根生物量分别增加了 3.27 倍和 1.88 倍, HA 处理下分别增加了 2.34 倍和 1.42 倍 [图 1(b)]. 结果表明, 氮肥和腐殖酸联用可以显著增加孔雀草的生物量, 并且腐殖酸能显著促进孔雀草根系生长。

其次是 HA 和 N 处理, CK 处理最低. NHA 和 HA 处理的孔雀草根 Cd 含量分别比 CK 处理 (肥东土壤) 提高了 2.17 倍和 1.44 倍, 长丰土壤相应值为 2.78 倍和 2.00 倍 [图 2(b)]. 结果表明, 添加氮肥和 HA 均能显著提高孔雀草体内 Cd 含量, 尤其是 NHA 处理。

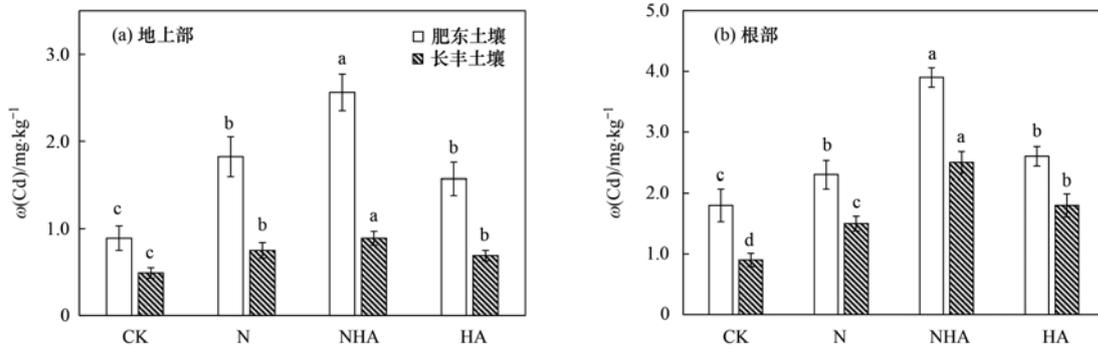


图 2 不同处理条件下孔雀草地上部和根部 $\omega(Cd)$

Fig. 2 The $\omega(Cd)$ of shoots and roots in *Tagetes patula* L. under different treatments

2.3 孔雀草中 Cd 累积量和土壤 Cd 去除效率

不同处理下孔雀草地上部分 Cd 累积量依次为: NHA > N > HA > CK [图 3(a)]. 与对照相比, NHA 和 N 处理地上部 Cd 累积量 (肥东土壤) 分别增加了 7.17 倍和 5.64 倍, 长丰土壤增加了 4.15 倍

和 3.43 倍. NHA 处理孔雀草根 Cd 累积量最高, HA 与 N 处理次之, CK 处理最低 [图 3(b)].

4 种处理土壤 Cd 去除率的变化趋势与孔雀草地上部 Cd 累积量相一致 [图 3(a) 和 3(c)]. NHA 处理的土壤 Cd 去除率最高, 在肥东和长丰两种土

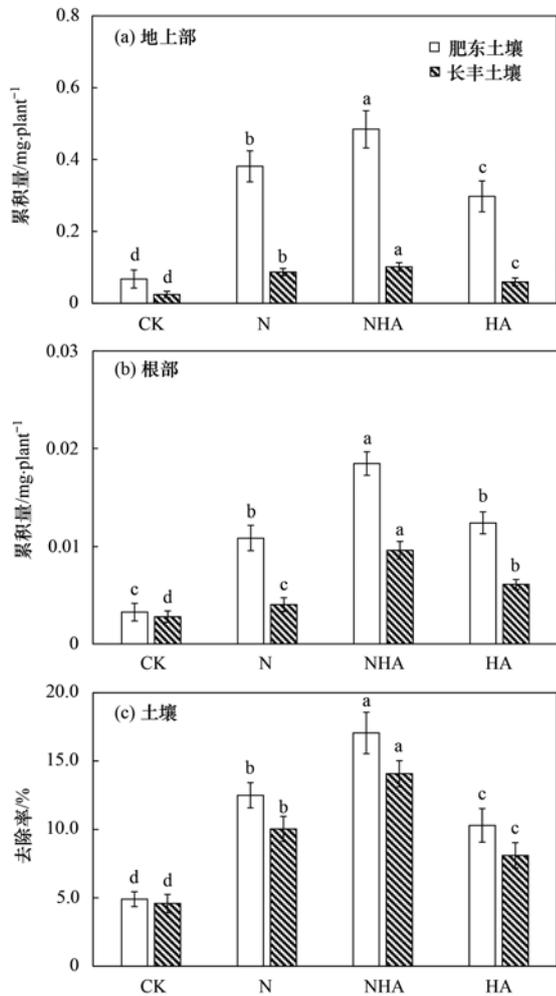


图3 不同处理条件下孔雀草地上部、根部 Cd 累积量和土壤 Cd 去除率

Fig. 3 Cd accumulations of shoots and roots in *Tagetes patula* L. and the Cd removal rate in soils under different treatments

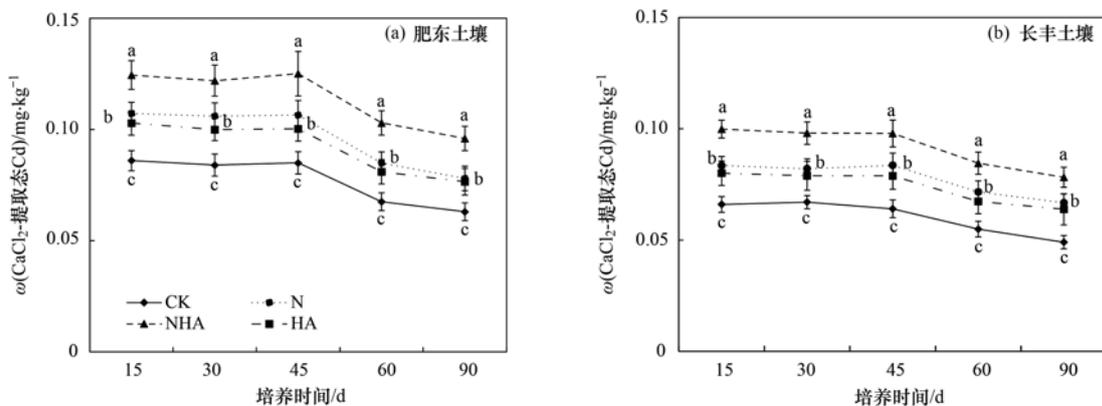


图4 孔雀草生长期间两种土壤 CaCl₂-Cd 的动态变化

Fig. 4 CaCl₂-extracted Cd in Feidong soil and Changfeng soil during the growth period of *Tagetes patula* L.

2.6 孔雀草根系形态和特征参数

从图7的根系扫描分析可以看出,NHA和HA处理下的孔雀草根系形态(总表面积、总根体积和根尖数)均高于其他处理,添加HA能够显著促进孔

壤上分别为17.06%和14.08%[图3(c)].以上结果表明,NHA处理显著提高了孔雀草Cd的吸收量,进而增加孔雀草对土壤Cd去除效率.

2.4 土壤中有效态Cd的变化

通过测定孔雀草不同生长阶段土壤CaCl₂-提取态Cd,研究铵态氮肥和腐殖酸对土壤Cd有效性的影响(图4).在两种土壤中,NHA处理CaCl₂-提取态Cd含量最高,其次是N和HA处理,CK处理最低.90d后,与CK处理相比较,NHA处理中 ω (CaCl₂-提取态Cd)在肥东土壤和长丰土壤中分别增加64.1%和53.1%(图4).以上结果表明,NHA、N和HA处理均能提高土壤Cd有效性,NHA处理效果最好.

2.5 土壤中pH和可溶性有机碳(DOC)含量的变化

在孔雀草生长期,不同处理下土壤pH值保持稳定,土壤pH值顺序为:CK > HA \approx N > NHA(图5).90d后,与对照处理相比较,NHA、N和HA处理土壤pH值在肥东土壤中分别降低了0.76、0.49和0.37个单位[图5(a)],在长丰土壤中分别降低了0.84、0.59和0.43个单位[图5(b)].结果表明,氮肥与腐殖酸的添加可以显著提高土壤酸度,NHA处理降低幅度最大.

随着时间的推移,CK和N处理的土壤 ω (DOC)保持稳定,而添加HA处理土壤 ω (DOC)逐渐下降(图6).在孔雀草生长期,腐殖酸显著提高了肥东与长丰两种土壤 ω (DOC),而氮肥的施用对土壤 ω (DOC)没有影响(图6).

雀草根系发育.与CK处理相比,NHA处理显著增加了总根长(68%)、总表面积(91%)、总根体积(106%)、平均根直径(111%)和根尖数(49%).NHA和HA处理能显著促进孔雀草根系生长发育.

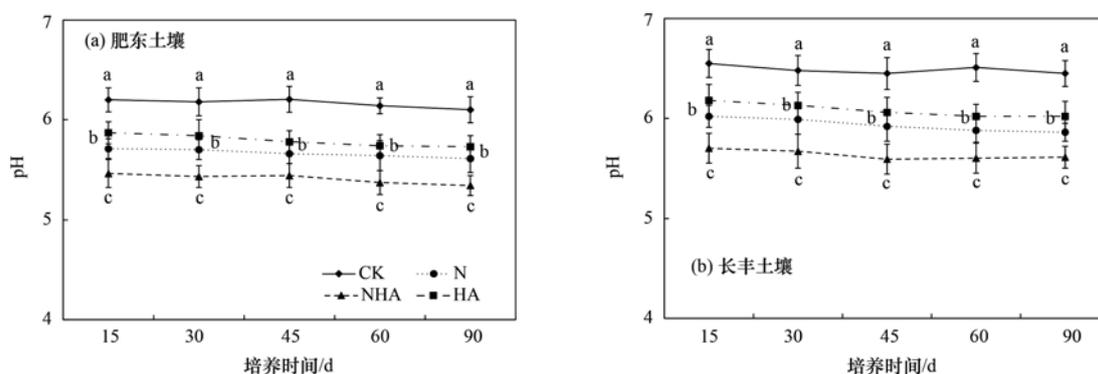


图 5 孔雀草生长期间两种土壤 pH 值的动态变化

Fig. 5 Soil pH values in Feidong soil and Changfeng soil during the growth period of *Tagetes patula* L.

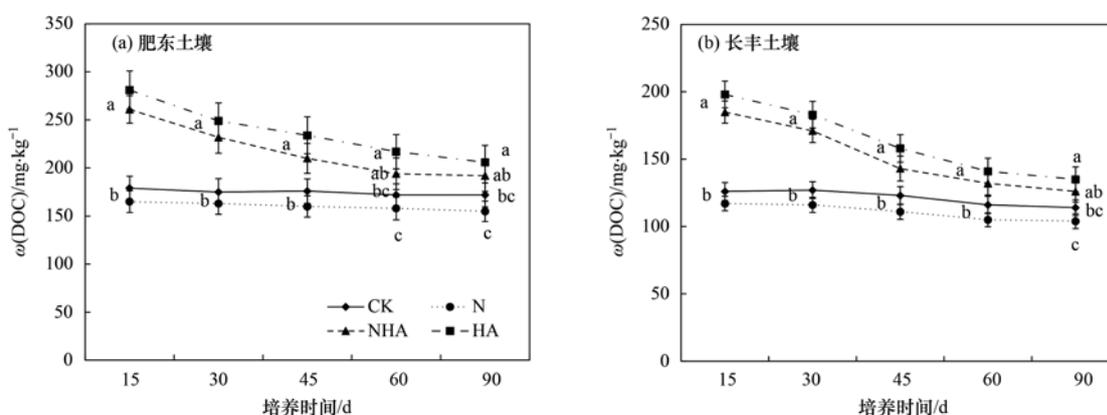
图 6 孔雀草生长期间肥东土壤和长丰土壤 $\omega(\text{DOC})$ 的动态变化

Fig. 6 The $\omega(\text{DOC})$ in Feidong soil and Changfeng soil during the growth period of *Tagetes patula* L.

3 讨论

3.1 铵态氮肥和腐殖酸对孔雀草生物量的影响

超累积植物生物量的大小是影响土壤重金属去除效率的重要因素. 从图 1 可以看出, 不同处理下孔雀草生物量存在显著差异, 其中 NHA 处理的孔雀草生物量最大, N 和 HA 处理次之, CK 处理最低. 施肥能有效地提高植物生物量, 尤其是氮素营养, 氮素占植物总养分吸收量的比例可达到 80%^[16]. 腐殖酸是一种环境友好的生物化学活性物质, 可以作为保水剂和肥料增效剂, 提高土壤的保水能力以及氮肥的利用率^[17]. 这主要是因为腐殖酸含有丰富的羧基、酚羟基和氨基等官能团, 对离子有较强的吸收能力, 可以减少土壤养分损失, 促进植物对土壤中养分的吸收^[18]. 陈振德等^[19]的研究发现腐殖酸与氮肥配合施用能明显提高玉米产量及氮素利用率. 另外, 孔雀草的最适宜生长土壤 pH 范围是 6.0 ~ 6.2, 本研究在土壤 pH < 6.0 的情况下孔雀草生长没有受到显著影响的原因是: ①土壤 pH 的降低是因为氮肥与腐殖酸的添加, 而氮肥与腐殖酸的施用均能够显著促进孔雀草生长, 进而消减了 pH 降低对孔雀草生长不利的影响; ②不同孔雀草品种对土壤 pH

适宜性有差异, 如 Escuer 等^[20]的研究发现, 在土壤 pH < 6.0 (5.7) 的情况下孔雀草的生长没有受到明显影响. 因此, 铵态氮肥与腐殖酸联合施用能极大地提高孔雀草的生物量.

3.2 铵态氮肥和腐殖酸对土壤 pH 值、DOC 含量和有效态 Cd 含量的影响

已有研究表明, pH 是影响土壤中 Cd 有效性的主要因素之一^[21]. 与对照处理相比较, 施用铵态氮肥显著降低了两种土壤 pH 值(图 5). 向土壤中施用铵态氮肥会因硝化作用而释放 H^+ ^[22], 同时植物根系通过对 NH_4^+ 的吸收也会诱导 H^+ 释放到土壤, 最终导致土壤的酸化^[23]. 腐殖酸的添加也显著降低了两种土壤 pH 值(图 5). 腐殖酸是有机酸的一种, 含有大量的羧基、酚羟基等酸性官能团, 可对土壤环境产生酸化的作用^[24]. 王敏等^[25]的研究发现腐殖酸可以强化盐碱土的改良效果, 显著降低土壤 pH. 总的来说, 土壤中有效态 Cd 的含量会随着土壤 pH 的降低而增加^[26].

腐殖酸的施用增加了两种土壤的 $\omega(\text{DOC})$ (图 6), 这一结果与王相平等^[27]的研究结果相一致. 腐殖酸施入土壤分解后, 可产生大量的 DOC, 进而促进了 Cd 的活化和迁移, 增加土壤中 Cd 的有效

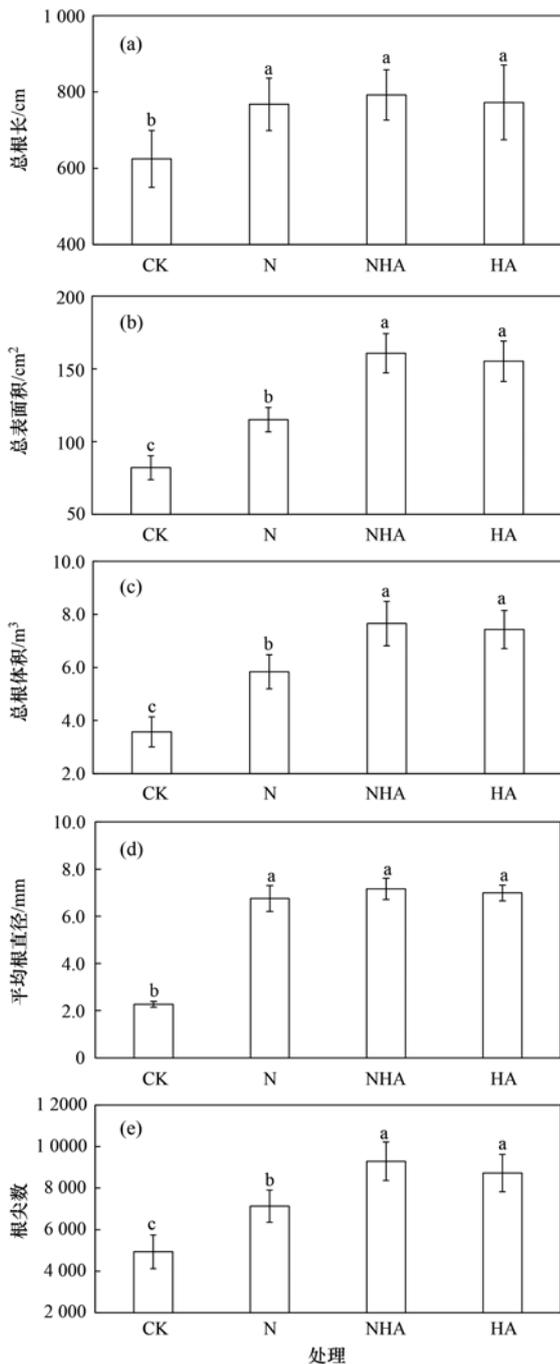


图 7 不同处理下孔雀草的根系形态特征

Fig. 7 Morphological characteristics of root in *Tagetes patula* L. under different treatments

性^[8, 28]. 已有研究表明, 有机物质(作物秸秆等)的分解可以产生大量的 DOC, 促进了土壤 Cd 的活化和有效性的提升^[29].

因此, 土壤中 pH 值降低和 $\omega(\text{DOC})$ 增加是 NHA 处理提升土壤 Cd 有效性的主要原因.

3.3 铵态氮肥和腐殖酸对孔雀草根系形态特征的影响

根系是植物吸收外界物质的重要器官, 其生长发育情况直接影响植物的生长、生物量及离子吸收量^[30]. 根据图 7 中孔雀草根系扫描结果可以看出,

NHA 和 HA 处理下孔雀草根系形态如总表面积、总根体积和根尖数均高于其他处理. 这说明腐殖酸对孔雀草根系生长有明显的促进作用. 这与周丽平等^[31]的研究结果一致, 腐植酸可以显著提高玉米总根长、总根数量和根表面积等根系参数.

腐殖酸作用于植物后, 植物根系可表现出类似外源生长素的刺激反应, 这种刺激作用与根系中蔗糖代谢、细胞支架蛋白质、ATP 酶等相关基因差异性表达有关, 其中 H^+ -ATP 酶基因的差异性对根系生长影响最大^[32]. H^+ -ATP 酶的活性增加使电化质子梯度增加, 促进了植物质子跨膜运输, 改善了植物吸收, 增加侧根发生位点数量和根长, 刺激植物根系生长^[33]. 同时, 腐殖酸含有多种具有生物活性的官能团, 如羧基和酚羟基等, 具有酸性、络合作用和阳离子交换等能力, 促进植物根系对养分的吸收利用, 能够改善植物根系形态^[34].

根系形态的改善提高了孔雀草对土壤中 Cd 的吸收能力. 根系长度和表面积是决定根系在土壤中扩展程度和根系吸收养分范围的重要参数^[35]. 大量研究发现, 植物对 Cd 吸收状况与其根系形态之间存在显著的相关性. 有研究表明, 东南景天地上部 Cd 含量与根长、根表面积和根体积均呈正相关^[36]. Berkelaar 等^[37]的研究表明, 根系表面积和根尖数量较高的小麦品种, 地上部 Cd 的累积量就大.

因此, NHA 处理显著促进根系组织的发育, 增加了植物对土壤中 Cd 的吸收, 提高了地上部的 Cd 浓度.

3.4 铵态氮肥和腐殖酸对土壤 Cd 去除率的影响

本研究中, NHA 处理下土壤 Cd 去除率最高, 在肥东和长丰两种土壤中分别为 17.06% 和 14.08%. 氮肥与腐殖酸联合施用显著提高了孔雀草对 Cd 的吸收累积, 增强了土壤 Cd 去除率. 氮肥和腐殖酸联用强化孔雀草对土壤 Cd 的去除效果最主要的原因是: ①氮肥能促进孔雀草生长, 而腐殖酸能够提高氮肥的利用效率, 二者之间的协同效应使孔雀草生物量最大化; ②铵态氮肥和腐殖酸均可通过降低土壤 pH 活化土壤 Cd, 而添加腐殖酸释放大量 DOC 也可以促进土壤 Cd 的溶解, 提升土壤 Cd 的有效性; ③腐殖酸能够对植物产生类似生物刺激素的效应. 它能够刺激根系 H^+ -ATP 酶基因表达, 增加侧根生长点、促进植物根伸长, 从而增加植物根系与土壤的接触面积, 增强植物对 Cd^{2+} 的吸收能力. 因此, 铵态氮肥和腐殖酸联用是通过增加孔雀草地上部生物量、土壤有效态 Cd 浓度以及促进根系对 Cd 吸收来提高土壤中 Cd 的去除效率.

4 结论

田间试验条件下,添加氮肥和 HA 均能显著提高孔雀草对土壤 Cd 的去除率,尤其是 NHA 处理. 铵态氮肥和腐殖酸会降低土壤 pH,腐殖酸可增加土壤 DOC 含量,进而提高 Cd 的生物有效性,且复合添加处理效果明显高于单一处理. 氮肥和腐殖酸联用可以显著增加孔雀草的生物量,并且腐殖酸能显著促进孔雀草根系生长,增强孔雀草对 Cd 的吸收能力. 因此,铵态氮肥和腐殖酸联用对孔雀草生长的促进作用以及 Cd 吸收能力的增强是其强化土壤 Cd 去除效率的主要因素. 另外,肥东土壤中孔雀草的 Cd 累积量比长丰高,原因有两个方面:一方面肥东土壤的肥力 [ω (有机质) 28.5 g·kg⁻¹] 比长丰高 [ω (有机质) 11.7 g·kg⁻¹], 肥东土壤种植的孔雀草生物量高于长丰;另一方面肥东土壤的 pH 比长丰土壤低,导致长丰土壤 Cd 有效性比肥东土壤高,有利于肥东土壤中的孔雀草对土壤中的 Cd 吸收较高. 因此,肥东土壤中孔雀草的 Cd 的累积量比长丰的高.

参考文献:

- [1] 张杏丽, 邹威, 周启星. 镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 3045-3055.
Zhang X L, Zou W, Zhou Q X. Competence of Cd phytoremediation in Cd-OCDF co-contaminated soil using *Mirabilis jalapa* L. [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 3045-3055.
- [2] 张成丽, 钱静, 张伟平, 等. 观赏性植物对土壤重金属的修复效果及其环境效应分析——以开封市菊花为例[J]. 环境化学, 2020, **39**(7): 1883-1893.
Zhang C L, Qian J, Zhang W P, et al. Study on the remediation effect and environmental benefits of ornamental plants on heavy metal soil: a case study of Kaifeng City chrysanthemum [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(7): 1883-1893.
- [3] Liu Y T, Chen Z S, Hong C Y. Cadmium-induced physiological response and antioxidant enzyme changes in the novel cadmium accumulator, *Tagetes patula* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(3): 724-731.
- [4] 安婧, 宫晓双, 魏树和. 重金属污染土壤超积累植物修复关键技术的发展[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(11): 3261-3270.
An J, Gong X S, Wei S H. Research progress on technologies of phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(11): 3261-3270.
- [5] 颜昌宙, 郭建华. 氮肥管理对植物镉吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(7): 1466-1474.
Yan C Z, Guo J H. Effects of nitrogen fertilizer management on cadmium uptake in plants [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(7): 1466-1474.
- [6] Giansoldati V, Tassi E, Morelli E, et al. Nitrogen fertilizer improves boron phytoextraction by *Brassica juncea* grown in contaminated sediments and alleviates plant stress [J]. Chemosphere, 2012, **87**(10): 1119-1125.
- [7] Zaccheo P, Crippa L, Di Muzio Pasta V. Ammonium Nutrition as a Strategy for Cadmium Mobilisation in the Rhizosphere of Sunflower [J]. Plant and Soil, 2006, **283**(1-2): 43-56.
- [8] 罗梅, 柏宏成, 陈亭悦, 等. 腐殖酸对土壤铅镉吸附、赋存形态及生物可给性的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1191-1202.
Luo M, Bai H C, Chen T Y, et al. Effects of humic acids on the adsorption, chemical speciation, and bioaccessibility of soil lead and cadmium [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 1191-1202.
- [9] 王成贤. 腐殖酸对土壤中重金属活性和植物有效性的影响[J]. 广州化工, 2015, **43**(8): 38-40.
Wang C X. Effects of humic acid on heavy metals activity and phytoavailability in soil [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, **43**(8): 38-40.
- [10] 靳志丽, 刘国顺, 聂新柏. 腐殖酸对土壤环境和烤烟矿质吸收影响的研究[J]. 中国烟草科学, 2002, **23**(3): 15-18.
Jin Z L, Liu G S, Nie X B. The study on the effect of humic acid on soil environment and absorbing ability to mineral material of flue-cured tobacco [J]. Chinese Tobacco Science, 2002, **23**(3): 15-18.
- [11] 薄录吉, 李冰, 李彦, 等. 腐植酸尿素在农业生产和面源污染防治中的应用[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (4): 240-251.
Bo L J, Li B, Li Y, et al. Application and research progress of humic acid urea in agricultural production and non-point source pollution prevention and control [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (4): 240-251.
- [12] 王玲玲. 我国土壤污染与修复技术研究进展[J]. 环境与发展, 2020, **32**(3): 79-80, 85.
Wang L L. Research progress of soil pollution and remediation technology in China [J]. Environment and Development, 2020, **32**(3): 79-80, 85.
- [13] 郭军康, 任倩, 赵瑾, 等. 生物炭与腐殖酸复配对油菜 (*Brassica campestris* L.) 生长与镉累积的影响[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(12): 2425-2432.
Guo J K, Ren Q, Zhao J, et al. Effects of biochar and humic acid on growth and cadmium accumulation in rape [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(12): 2425-2432.
- [14] Ye X X, Kang S H, Wang H M. Modified natural diatomite and its enhanced immobilization of lead, copper and cadmium in simulated contaminated soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **289**: 210-218.
- [15] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(5): 991-999.
- [16] Wei S H, Ji D D, Twardowska I, et al. Effect of different nitrogenous nutrients on the cadmium hyperaccumulation efficiency of *Rorippa globosa* (Turcz.) Thell [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(3): 1999-2007.
- [17] 郑毅, 周磊, 刘景辉. 膨润土-腐殖酸型改良剂对沙质土壤氮素气态损失、氮肥利用率和玉米产量的影响[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(12): 3887-3894.
Zheng Y, Zhou L, Liu J H. Effects of bentonite-humic acid on gaseous nitrogen loss, nitrogen use efficiency and maize yield on sandy soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(12): 3887-3894.
- [18] Stefanova M, Velinova D, Marinov S P, et al. The composition of lignite humic acids [J]. Fuel, 1993, **72**(5): 681-684.
- [19] 陈振德, 何金明, 李祥云, 等. 施用腐殖酸对提高玉米氮肥利用率的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(1): 52-

54.
Chen Z D, He J M, Li X Y, *et al.* Studies on increasing N utilizing efficiency in maize by applying humic acid[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, **15**(1): 52-54.
- [20] Escuer O, Karp K, Escuer-Gatius J, *et al.* Hardwood biochar as an alternative to reduce peat use for seed germination and growth of *Tagetes patula* [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, doi: 10.1080/09064710.2021.1903986.
- [21] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, **61**(3): 247-255.
- [22] Chaignon V, Bedin F, Hinsinger P. Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and a calcareous soil [J]. Plant and Soil, 2002, **243**(2): 219-228.
- [23] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. 田间条件下养分调控八宝景天 Cd 修复效率[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4226-4233.
Guo J M, Yang J X, Yang J, *et al.* Effect of nutrient regulation and control on Cd accumulation efficiency of *Hylotelephium spectabile* under field conditions [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4226-4233.
- [24] 刘茜, 马飞跃, 于建军, 等. 腐殖酸对植烟土壤和烟草影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(4): 132-136.
Liu Q, Ma F Y, Yu J J, *et al.* The research advance of the effect of humic acid to the soil and tobacco [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, **26**(4): 132-136.
- [25] 王敏, 刘永民. 腐殖酸强化脱硫石膏改良油污盐碱土壤的研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, **29**(2): 131-133, 139.
Wang M, Liu Y M. Effect of humic acid on improving oil contaminated saline-alkali Soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, **29**(2): 131-133, 139.
- [26] Zhang X C, Gao H J, Wu H H, *et al.* Ca²⁺ and CaM are involved in Al³⁺ pretreatment-promoted fluoride accumulation in tea plants (*Camellia sinensis* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, **96**: 288-295.
- [27] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花花生生长及土壤性质的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, **29**(4): 757-762.
Wang X P, Yang J S, Zhang S J, *et al.* Effects of different amendments application on cotton growth and soil properties in arid areas [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(4): 757-762.
- [28] 贺玉龙, 余江, 谢世前, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 强化三叶草修复镉污染土壤 [J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 979-985.
He Y L, Yu J, Xie S Q, *et al.* Enhanced phytoextraction of cadmium Contaminated soil by trifolium repens with biodegradable chelate GLDA [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 979-985.
- [29] Ye X X, Hu H X, Li H Y, *et al.* Combined nitrogen fertilizer and wheat straw increases the cadmium phytoextraction efficiency of *Tagetes patula* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **170**: 210-217.
- [30] 毛达如, 申建波. 植物营养研究方法 [M]. (第三版). 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- [31] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 不同用量风化煤腐殖酸对玉米根系的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, **52**(2): 285-292.
Zhou L P, Yuan L, Zhao B Q, *et al.* Response of maize roots to different additive amounts of weathered coal humic acids [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, **52**(2): 285-292.
- [32] Carletti P, Masi A, Spolaore B, *et al.* Protein expression changes in maize roots in response to humic substances [J]. Journal of Chemical Ecology, 2008, **34**(6): 804-818.
- [33] Canellas L P, Olivares F L, Okorokova-Façanha A L, *et al.* Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots [J]. Plant Physiology, 2002, **130**(4): 1951-1957.
- [34] Jindo K, Martin S A, Navarro E C, *et al.* Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes [J]. Plant and Soil, 2012, **353**(1-2): 209-220.
- [35] Sun C X, Wang D, Shen X B, *et al.* Effects of biochar, compost and straw input on root exudation of maize (*Zea mays* L.): From function to morphology [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **297**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106952.
- [36] 李继光, 金兰淑, 陈禹桥, 等. 氮对低镉处理下东南景天根系形态及镉积累的影响 [J]. 中国农学通报, 2007, **23**(3): 260-265.
Li J G, Jin L S, Chen Y Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on the root morphology and cadmium accumulation in low cadmium treatment *Sedum alfredii* hance [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, **23**(3): 260-265.
- [37] Berkelaar E, Hale B. The relationship between root morphology and cadmium accumulation in seedlings of two durum wheat cultivars [J]. Canadian Journal of Botany, 2000, **78**(3): 381-387.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)