环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM2.5空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽，刘笑杰，李丁，孙颖琦

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年3月
第43卷 第3期
Vol.43 No.3

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第3期
2022年3月15日

目 次

2000 ~2020年天津$PM_{2.5}$质量浓度演变及驱动因子分析 …… 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)
天津市$PM_{2.5}$-O_3复合污染特征及来源分析 …… 肖致美, 徐虹, 高璟赟, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戢运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气$PM_{2.5}$来源解析 …… 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 …… 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)
"大气十条"实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 …… 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秣麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)
郑州市典型污染过程PM_1中重金属浓度、来源及健康风险评估 …… 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝囡, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)
长江经济带$PM_{2.5}$空间异质性和驱动因素的地理探测 …… 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)
长三角地区$PM_{2.5}$浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 …… 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)
"2+26"城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 …… 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谞, 王帅, 陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省$PM_{2.5}$污染特征及影响因素 …… 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 …… 赵楠, 卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 …… 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志炯, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)
山东半岛近地面O_3浓度时空变化及潜在源区解析 …… 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安地区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 …… 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐堃, 宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 …… 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 …… 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 …… 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 …… 李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李莺(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 …… 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 …… 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析 …… 刘彦龙, 郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 …… 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄燚, 杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 …… 黄伟, 张钘, 罗晓佼, 张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 …… 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张浏, 郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 …… 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价 …… 龚润强, 赵华珒, 高占啟, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 …… 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)
百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 …… 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 …… 胡愈炘, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 …… 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 …… 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 …… 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 …… 陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 …… 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附 …… 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)
天津市滨海河流N_2O扩散通量及控制因子 …… 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 …… 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法 …… 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 …… 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制 …… 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)
F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 …… 张冰, 孙晨翔, 文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 …… 刘书淮, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 …… 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统锑迁移转换特征及污染评价 …… 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土矿区土壤中重金属的阻控效应 …… 杨士, 刘祖文, 龙焙, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 …… 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物质炭材料对镉和砷的吸附机制 …… 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 …… 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙约兵, 赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 …… 任超, 任彧仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 …… 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)
蚯蚓/铈锰改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 …… 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)
DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 …… 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 …… 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸的影响 …… 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N_2O和N_2排放的影响 …… 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)
基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氨挥发的影响 …… 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 …… 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)
《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第3期 2022年3月
Vol.43,No.3 Mar.,2022

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤

闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华*
(石河子大学农学院农业资源与环境系, 新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003)

摘要:为探究溶解性有机质(DOM)对棉花修复镉(Cd)污染土壤的影响,通过盆栽试验研究棉花秸秆溶解性有机质(CM)和农家肥溶解性有机质(FM)在3种外源Cd(mg·kg^{-1})添加含量为0(C0)、5(C5)和10(C10)下对土壤有效态Cd含量、棉花生物量、光合作用参数和Cd积累的影响.结果表明,CM和FM施入能提高土壤有效态Cd含量,最大增幅分别为30.89%和8.51%,且CM高于FM;CM和FM施入对棉花总生物量和光合作用参数的影响表现为C0水平下促进生物量积累和净光合速率,C5水平下与对照相比无显著差异,C10水平下抑制总生物量积累和净光合速率,但蒸腾速率均呈现出高于同一Cd水平的CK处理;与CK处理相比,施入CM使得棉花各部位(棉纤维除外)Cd含量显著高于同一Cd水平的CK处理,施入FM主要表现在提高根系Cd含量;根系为Cd积累总量增加的主要器官,施加CM和FM均能显著提高棉花的Cd积累总量,增幅范围分别为27.76%~113.05%和17.77%~93.79%.因此,DOM能作为一种添加剂修复Cd污染土壤,具有一定的应用潜力,推荐施用棉花秸秆DOM用于修复Cd污染土壤.

关键词:溶解性有机质(DOM);棉花;镉(Cd);植物修复;光合作用
中图分类号:X171.5 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2022)03-1577-07 **DOI**:10.13227/j.hjkx.202107253

Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM

MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, RU Si-bo, LI Jun-hua*
(Key Laboratory of Oasis Eco-Agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Department of Resources and Environmental Sciences, College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: To reveal the effects of dissolved organic matter (DOM) on the remediation of cadmium (Cd)-contaminated soils by cotton, the effects of cotton straw dissolved organic matter (CM) and farmyard manure dissolved organic matter (FM) on soil available Cd (DTPA-Cd) content, cotton biomass, photosynthetic characteristics, and Cd accumulation were investigated in a pot-based experiment under three exogenous soil Cd levels (mg·kg^{-1}) of 0 (C0), 5 (C5), and 10 (C10). The results showed that the application of CM and FM increased the content of available Cd in soil, with the maximum increase of 30.89% and 8.51%, respectively, and that of CM was higher than that of FM. The effects of CM and FM application on total biomass and photosynthetic characteristics in cotton showed that biomass accumulation and net photosynthetic rate were promoted at the C0 level, there was no significant difference compared to that in the control (CK) at the C5 level, and total biomass accumulation and net photosynthetic rate were inhibited at the C10 level; however, transpiration rate both showed higher than the CK treatment at the same Cd level. The application of DOM altered the Cd content of all parts of the cotton compared to that in the CK treatment, where the application of CM resulted in significantly higher Cd content in all parts of the cotton (except for lint) than that in the CK treatment at the same Cd level; however, the application of FM mainly increased the Cd content in the root. The root was the main organ for the increase in total Cd accumulation, the application of CM and FM significantly increased the total Cd accumulation in cotton, and the total Cd accumulation increased by 27.76%-113.05% and 17.77%-93.79%, respectively. Therefore, DOM can be used as an additive to repair Cd-contaminated soil, which has certain application potential. It is recommended to apply cotton straw DOM to repair Cd-contaminated soil.

Key words: dissolved organic matter (DOM); cotton; cadmium (Cd); phytoremediation; photosynthesis

文献[1]显示我国Cd污染点位超标率高达7.0%.Cd在土壤中具有较高的移动性和生物有效性[2],能通过土壤-根系界面进行积累,直接或间接被摄入到人体内,最终威胁到人类健康[3].因此,需要对Cd污染土壤采取必要的措施进行修复以保障人类健康.

在多种Cd污染土壤修复方式中,植物修复具有经济和环境友好等优点,是最有吸引力的修复方法之一[4,5].然而,植物修复效率通常受到生物量小和抗逆性差等因素的制约.棉花是我国主要的经济作物之一,具有易于种植、生物量大和抗逆性强等优点并且棉纤维没有进入食物链,使棉花成为植物修复技术的理想植物材料之一[6].因此,选取棉花作为植物材料用于修复Cd污染土壤可以兼顾生态效益及经济效益,具有一定的应用潜力.

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是一类包含不同分子量组分的水溶性有机复合物,具有来源广泛(如秸秆、有机肥、垃圾等)和使用成本较低等优点[7,8],并且我国秸秆和有机肥资源丰富[9,10],使源于秸秆和有机肥DOM在污染土壤修复方面具有广泛的潜在应用价值.有研究表明,DOM富含多种不同分子量的有机组分以及丰富的负电荷官能团[11,12].当DOM进入土壤后,能够改变土壤对

收稿日期:2021-07-30;**修订日期**:2021-08-18
基金项目:国家自然科学基金项目(31660598);国家重点研发计划项目(2018YFD0200406)
作者简介:闵涛(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境与生态安全,E-mail:893420468@qq.com
* 通信作者,E-mail:ljh630703@163.com

重金属的吸附、解吸和络合等行为状态[13]，影响 Cd 的生物有效性[14]，使植物体内的 Cd 含量和光合能力发生变化，改变植物生长状况. 此外，不同来源 DOM 对土壤重金属的有效性的影响程度不同[15]. Wang 等[16]的研究表明，秸秆 DOM 和农家肥 DOM 使土壤对 Cd 的吸附量降低，从而提高了 Cd 的生物有效性，其中秸秆 DOM 对小白菜 Cd 积累能力的促进作用强于农家肥 DOM.

因此，本文通过盆栽试验，研究棉花秸秆 DOM 和农家肥 DOM 对棉花生物量、光合能力和 Cd 含量等指标的变化，揭示两种 DOM 影响对棉花生长和 Cd 含量的作用机制并分析两种 DOM 的修复能力，以期为 Cd 污染土壤的修复提供一种方法参考.

1 材料与方法

1.1 供试土壤及材料

供试棉花品种为新陆早 84 号，供试土壤样品取自石河子大学农学院试验田(0 ~20 cm 耕层土壤). 土壤经自然风干，过 5 mm 筛后供盆栽试验使用. 基础土样理化性质如下：pH 为 8.10，ω(有机质)为 9.37 $g\cdot kg^{-1}$，ω(碱解氮)为 55.88 $mg\cdot kg^{-1}$，ω(速效磷)为 26.82 $mg\cdot kg^{-1}$，ω(速效钾)为 165.41 $mg\cdot kg^{-1}$，ω(总 Cd)为 0.69 $mg\cdot kg^{-1}$.

1.2 试验设计

本试验设置 3 个外源 Cd 添加梯度：0(C0)、5(C5)和 10(C10) $mg\cdot kg^{-1}$以及两种 DOM 来源：棉花秸秆源(CM)和农家肥源(FM)，去离子水作为对照(CK)，共 9 个处理，每个处理设置 3 个重复. 于棉花长出 4 片真叶后开始定苗，每盆保留 3 株长势相同的棉花幼苗. DOM 处理根据 DOC 含量调节到 250 $mg\cdot L^{-1}$后每次每盆施入 120 mL，10 d 为一个施用周期，整个生育期共计施用 9 次，于棉花吐絮期收获植株样品.

本盆栽试验于石河子大学农学院试验田进行. 本试验所用土壤都经过风干和过 5 mm 筛. 按上述含量向土壤中添加 $CdCl_2\cdot 2.5H_2O$(分析纯)，与土壤混匀并存放 30 d 后装入塑料盆中(直径为 20 cm，高为 25 cm)，每盆装土 6.0 kg 并添加 1.2 g 的尿素、磷酸二铵和硫酸钾作为底肥.

1.3 DOM 制备

供试棉花秸秆取自石河子大学农学院试验站，农家肥(羊粪)取自石河子大学动物科技学院. 棉花秸秆经过粉碎，农家肥腐熟后经研磨过筛后保存备用. 将两种物料和去离子水按照 1∶10 的质量比混合，经保鲜膜封口后，置于 200 $r\cdot min^{-1}$的振荡机上连续振荡 16 h，上清液在12 000 $r\cdot min^{-1}$条件下离心 10 min 后用真空泵通过孔径为 0.45 μm 水系滤膜抽气过滤，滤液于 4℃冰箱中保存备用，滤液即为棉花秸秆 DOM(CM)和农家肥 DOM(FM)，并测定其性质. DOM 性质如表 1 所示.

表 1 DOM 基本性质及紫外光谱特征

Table 1 Basic properties and UV-visible spectra properties of DOM

处理	pH	ρ(DOC)/$mg\cdot L^{-1}$	ω(Cd)/$mg\cdot kg^{-1}$	$SUVA_{254}$	$SUVA_{260}$	$SUVA_{280}$
CM	4.89	250	0.01	1.88	1.79	1.58
FM	8.51	250	0.01	2.11	2.03	1.82

1.4 测试指标及方法

1.4.1 紫外可见光光谱分析

采用紫外-可见光分光光度计测定 DOM 吸收光谱(纯水为空白)，用 10 mm 石英比色皿在波长 200 ~700 nm 范围内扫描，间隔 2 nm. 根据计算和单位有机碳吸光度[17]，吸收系数公式：

$$a(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda)/l$$

式中，λ 为波长(nm)，$a(\lambda)$为在波长 λ 下的吸收系数(m^{-1})，l 为光程路径(m)，$A(\lambda)$为吸光度. 单位有机碳吸光度 $SUVA_\lambda$ 计算公式为：

$$SUVA_\lambda = a(\lambda)/\rho(DOC)$$

式中，$a(\lambda)$是 DOM 的吸收系数，ρ(DOC)为 DOC 浓度($mg\cdot L^{-1}$)

1.4.2 棉花生物量测定

收获后的棉花分为根、茎、叶、铃壳、棉纤维和棉籽部分. 将各部分于 105℃下杀青 30 min 后，于 75℃烘至恒重，使用百分之一天平称重.

1.4.3 叶片光合作用参数测定

于 10:00 ~12:00 使用便携式光合速率测定仪(LI-6800，USA)测定棉花功能叶光合参数，测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r).

1.4.4 Cd 含量测定

土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 浸提剂浸提；植株 Cd 含量采用硝酸-盐酸-氢氟酸消解，使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP 6300，Thermo Fisher，USA)测定土壤溶液和植物消解液中 Cd 含量. 设置空白对照并使用国家标准物质(植物标准物质为 GBW 07604，土壤标准物质为 GSS-21，Cd 标准物质为 GBS-04-1721-2004)进行质量控制，测定样品回收率均在 95% ~105% 之间.

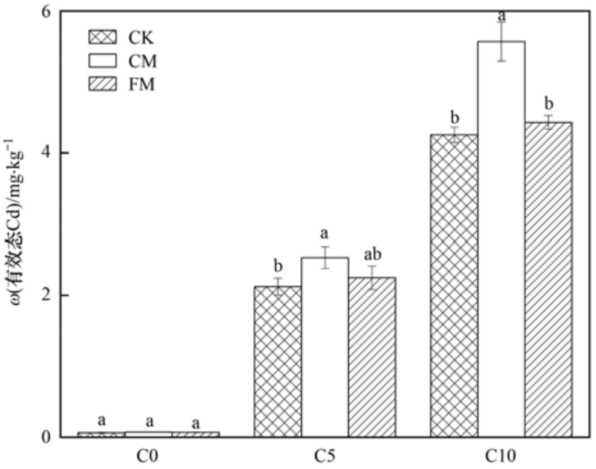
1.5　数据处理与分析

用 Excel 2016、SPSS 21 和 Origin 2019 进行数据处理和作图,以 Duncan 检验法检验处理间差异显著性, $P<0.05$ 为差异显著.

2　结果与分析

2.1　DOM 对土壤有效态 Cd 含量的影响

图 1 为 DOM 对土壤有效态 Cd 的影响. 在不添加外源 Cd 时,与 CK 组相比,添加 CM 和 FM 对土壤有效态 Cd 无显著影响. 在 Cd 胁迫处理下(C5 和 C10),与 CK 相比,加入 CM 处理的土壤有效态 Cd 含量显著提高,其中在 C10 胁迫下达到最大,提高了 30.9%; 但加入 FM 处理的土壤有效态 Cd 含量并未表现出显著差异.



不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$)

图 1　DOM 对土壤有效态 Cd 含量的影响

Fig. 1　Effects of DOM on available Cd content in soils

2.2　DOM 对棉花生物量的影响

由表 2 可知,随外源 Cd 添加量增大,棉花生物量积累的抑制程度逐渐提高. CK 处理下,与 C0 相比,C5 和 C10 处理分别使棉花总生物量降低 5.04% 和 12.87%. 不添加外源 Cd 时,与 CK 处理相比,CM 处理和 FM 处理使棉花总生物量增加 3.14% 和 8.46%,其中铃壳部分生物量增加显著高于 CK; 存在外源 Cd 时,与 CK 相比,施用 CM 和 FM 对棉花生物量(除根系)总体呈现不同程度的抑制效果,其中 CM 处理的总生物量最低,并且在 C10 水平下表现得更为明显.

表 2　DOM 对 Cd 胁迫下棉花生物量的影响[1)]/g·pot⁻¹

Table 2　Effects of DOM on the biomass of cotton under Cd stress/g·pot⁻¹

Cd 胁迫	处理	根	茎	叶	铃壳	棉纤维	棉籽	总生物量
C0	CK	4.53 ± 0.23b	18.13 ± 2.06a	12.35 ± 0.40a	12.61 ± 0.23b	2.26 ± 0.35a	2.73 ± 0.18a	52.61 ± 2.55b
	CM	4.77 ± 0.46ab	18.82 ± 2.52a	12.17 ± 0.92a	13.68 ± 0.47a	1.87 ± 0.06a	2.94 ± 0.06a	54.26 ± 2.26ab
	FM	5.44 ± 0.39a	19.37 ± 1.31a	12.86 ± 1.10a	14.32 ± 0.49a	1.98 ± 0.22a	3.10 ± 0.33a	57.06 ± 1.94a
C5	CK	3.93 ± 0.35b	18.23 ± 0.45a	12.22 ± 0.85a	11.44 ± 1.17a	1.71 ± 0.09ab	2.43 ± 0.15b	49.96 ± 1.22a
	CM	4.82 ± 0.34a	16.31 ± 2.50a	8.66 ± 0.82b	12.39 ± 0.75a	1.51 ± 0.05b	2.33 ± 0.11b	46.03 ± 3.89a
	FM	4.61 ± 0.17a	16.07 ± 0.88a	11.14 ± 1.07a	11.12 ± 1.66a	1.82 ± 0.14a	2.83 ± 0.22a	47.59 ± 2.97a
C10	CK	3.29 ± 0.16b	18.43 ± 1.34a	9.09 ± 0.11ab	11.10 ± 1.23a	1.61 ± 0.13a	2.32 ± 0.25a	45.84 ± 1.65ab
	CM	3.98 ± 0.23a	14.21 ± 2.03b	8.36 ± 0.68b	11.90 ± 0.78a	1.49 ± 0.18a	2.03 ± 0.19a	41.97 ± 2.58b
	FM	4.29 ± 0.22a	17.02 ± 0.84a	9.42 ± 0.34a	11.22 ± 0.86a	1.58 ± 0.19a	2.26 ± 0.25a	45.78 ± 0.59a

1) 数据表示为平均值 ± 标准差($n=3$),不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$),下同

2.3　DOM 对棉花叶片光合作用影响

由表 3 可知,叶片 P_n 和 G_s 随 Cd 胁迫的增加而降低, C_i 和 T_r 表现为相反趋势. 在 3 种不同外源 Cd 添加水平(C0、C5 和 C10)下,施加 CM 和 FM 能改变叶片光合作用能力. 不添加外源 Cd 时,与 CK 相比,CM 处理对叶片 P_n、G_s 和 C_i 无显著差异,但显著提高了叶片 T_r; 外源 Cd 为 C5 水平时,施用 CM 使叶片 G_s、C_i 和 T_r 提高 6.90%、6.94% 和 52.97%; 外源 Cd 为 C10 水平时,施用 CM 使叶片 G_s、C_i 和 T_r 分别增加了 0.94%、7.80% 和 51.44%,

表 3　DOM 对 Cd 胁迫下叶片光合作用的影响

Table 3　Effects of DOM on leaf photosynthesis under Cd stress

Cd 胁迫	处理	P_n/μmol·(m²·s)⁻¹	G_s/mol·(m²·s)⁻¹	C_i/μmol·mol⁻¹	T_r/mmol·(m²·s)⁻¹
C0	CK	4.29 ± 0.31a	0.131 ± 0.008a	312.58 ± 19.72a	1.77 ± 0.14b
	CM	4.73 ± 0.25a	0.134 ± 0.015a	296.37 ± 29.16a	2.85 ± 0.35a
	FM	4.43 ± 0.27a	0.138 ± 0.002a	318.25 ± 7.04a	2.73 ± 0.47a
C5	CK	3.53 ± 0.31a	0.116 ± 0.013ab	329.82 ± 9.33a	2.19 ± 0.15b
	CM	3.48 ± 0.03a	0.124 ± 0.008a	352.72 ± 22.35a	3.35 ± 0.27a
	FM	3.42 ± 0.18a	0.102 ± 0.010b	347.55 ± 5.59a	3.04 ± 0.47a
C10	CK	3.46 ± 0.13a	0.106 ± 0.004a	338.93 ± 6.45b	2.78 ± 0.26c
	CM	3.14 ± 0.12b	0.107 ± 0.005a	365.36 ± 12.65a	4.21 ± 0.26a
	FM	3.18 ± 0.16b	0.092 ± 0.016a	347.86 ± 9.65ab	3.56 ± 0.36b

但 P_n 显著低于 CK. 施加 FM 则表现出相同趋势.

2.4 DOM 棉花各部位 Cd 含量的影响

由表 4 可知,随着外源 Cd 添加水平(C0、C5 和 C10)的增加,棉花各部位 Cd 含量总体呈上升趋势,在外源 Cd 添加水平为 10 mg·kg^{-1}时达到较高水平. 在 C0 水平下,各处理根系 Cd 含量最高,其次是茎和叶,铃壳、棉纤维和棉籽 Cd 含量保持在较低水平. 在 C5 和 C10 水平下,各处理不同部位 Cd 含量高低表现为:根系 > 叶片 > 棉籽 > 铃壳 > 茎 > 棉纤维.

不添加外源 Cd 时,与 CK 相比,CM 和 FM 处理除根系和茎 Cd 含量有显著差异外,其余部位 Cd 含量无显著差异; 外源 Cd 为 C5 水平时,与 CK 相比,CM 和 FM 棉纤维 Cd 含量分别降低 32.26% 和 19.35%,而其余部位 Cd 含量有不同程度地提高; 外源 Cd 为 C10 水平时,与 CK 相比,CM 各部位 Cd 含量达到显著差异,但 FM 除根系 Cd 含量显著高于 CK 外,其余部分 Cd 含量未达到显著差异.

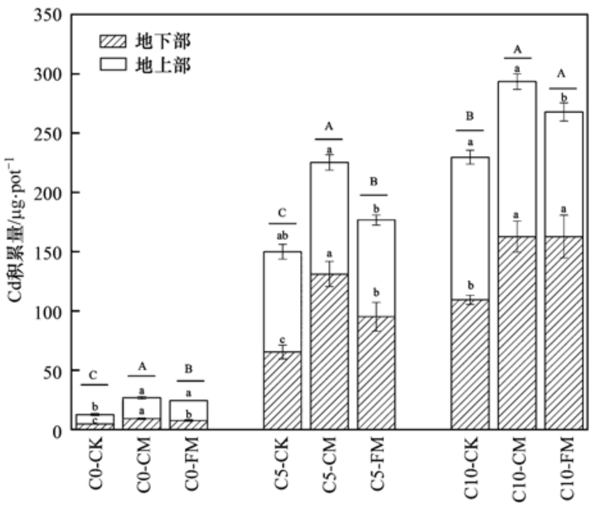
表 4 DOM 对 Cd 胁迫下棉花各部位 Cd 含量的影响/mg·kg^{-1}

Table 4 Effects of DOM on Cd content in different parts of cotton under Cd stress/mg·kg^{-1}

Cd 胁迫	处理	根	茎	叶	铃壳	棉纤维	棉籽
C0	CK	1.03 ±0.08c	0.26 ±0.03b	0.19 ±0.04a	0.06 ±0.00a	0.07 ±0.01a	0.10 ±0.01a
	CM	1.91 ±0.04a	0.74 ±0.07a	0.17 ±0.04a	0.07 ±0.01a	0.09 ±0.01a	0.10 ±0.00a
	FM	1.40 ±0.03b	0.66 ±0.09a	0.21 ±0.03a	0.06 ±0.00a	0.07 ±0.01a	0.10 ±0.00a
C5	CK	16.66 ±1.01c	1.28 ±0.07b	2.57 ±0.69b	1.74 ±0.26b	1.24 ±0.29a	2.68 ±0.07b
	CM	27.22 ±1.47a	1.68 ±0.10a	3.65 ±0.59a	2.19 ±0.11a	0.84 ±0.09b	3.07 ±0.19a
	FM	20.62 ±2.15b	1.62 ±0.08a	2.75 ±0.36ab	1.73 ±0.24b	0.97 ±0.16ab	2.72 ±0.35ab
C10	CK	33.36 ±2.50b	2.08 ±0.12ab	4.27 ±0.21b	2.53 ±0.40b	1.53 ±0.16a	4.55 ±0.61b
	CM	40.85 ±0.92a	2.67 ±0.45a	5.58 ±0.83a	3.86 ±0.50a	1.65 ±0.28a	5.26 ±0.53a
	FM	37.83 ±2.25a	1.73 ±0.50b	4.86 ±0.28ab	2.03 ±0.28b	1.38 ±0.09a	4.20 ±0.21b

2.5 DOM 对棉花 Cd 积累量的影响

如图 2 可知,棉花 Cd 积累量随 Cd 胁迫梯度的增加呈现出升高趋势. 在相同 Cd 胁迫梯度下(C0、C5 和 C10),与 CK 相比,施加 CM 和 FM 均能提高棉花 Cd 积累总量,Cd 积累总量增幅范围分别为 27.76%~113.05% 和 17.77%~93.79%. 此外,施加 CM 对棉花地上部和地下部均有提高作用,但施加 FM 主要体现在增加根系 Cd 积累量,因此 CM 处理对棉花 Cd 积累总量的提升能力强于 FM.



地上部和地下部 Cd 积累量用不同小写字母表示存在显著差异(P<0.05); 总 Cd 积累量用大写字母表示存在显著差异(P<0.05)

图 2 DOM 对棉花 Cd 积累量的影响

Fig. 2 Effects of DOM on Cd accumulation in cotton

3 讨论

3.1 DOM 对土壤有效态 Cd 含量的影响

土壤中的有效态 Cd 能够直接被植物吸收[18]. 有研究表明,DOM 可以促进土壤(矿区附近)颗粒吸附态 Cd 向土壤溶液中释放并提高了 Cd 的有效性[19]; Zhang 等[20] 的研究也发现 DOM 使土壤[ω(总 Cd)为 17.14 mg·kg^{-1})]中的 ω(活性 Cd)从 16.2% 提高到 28.7%. 在本研究中,施用 DOM 提高了土壤有效态 Cd 含量(图 1). 其原因一方面可能是 DOM 中存在大量活性官能团组分,可以通过氢键、配体交换和络合作用等途径与 Cd^{2+} 直接作用[21],改变土壤对 Cd 的吸附和解吸能力[22],提高土壤有效态 Cd 的含量; 另一方面,植物分泌的根系分泌物同样对重金属有效性有直接影响. 有研究表明,根系分泌物能增加重金属活性并促进黑麦草对重金属的吸收和积累[23],根系生物量越大通常越有助于根系分泌物的合成和分泌[24]. 在本研究中,CM 和 FM 的根系生物量均高于 CK(表 2),这可能会导致土壤有效态 Cd 含量的增加.

不同来源 DOM 对土壤有效态 Cd 含量存在差异. DOM 中的低分子量亲水化合物容易与重金属形成络合物,使重金属更容易溶解[25,26]. 芳香性也是影响土壤 Cd 有效性的重要因素,低芳香性的 DOM 更容易促进 Cd 向土壤中释放[19]. 紫外可见光光谱分析中 SUVA254、SUVA260 和 SUVA280 用来表征

DOM 芳香性、疏水性和相对分子质量,其值与芳香化程度、疏水组分和相对分子质量大小成正比[27,28]. 在本试验中,紫外可见光光谱表明 CM 具有更多低分子量、低芳香性亲水化合物(表 1),这可能是 CM 处理中土壤有效态 Cd 含量高于 FM 的原因.

3.2　DOM 对 Cd 胁迫下棉花生长的影响

生物量是反映植物抗逆性和修复能力的重要指标[29]. 在本研究中,DOM 的应用对棉花总生物量的影响取决于土壤 Cd 含量,这表现为:不添加外源 Cd 时,施加 CM 和 FM 能显著提高棉花生物量; 在外源 Cd 添加下,棉花总生物量表现为低于同水平 CK. 原因可能是:DOM 作为有机质的一类可以直接或间接为棉花提供养分[30],促进棉花生物量积累; 但在 Cd 污染情况下,DOM 由于其结构特点会提高土壤 Cd 的生物有效性[31,32],促进了棉花对 Cd 的吸收(表 4),使棉花总生物量表现出降低趋势. 并且 CM 具有更多的低分子量和低芳香性的亲水有机物组分(表 1),导致在 C5 或 C10 水平中 CM 处理使 Cd 对棉花生物量积累的抑制作用均强于 FM.

光合作用是植物生物量积累的重要生理过程,但 Cd 胁迫能通过干扰叶绿素合成和引起叶绿体降解等途径抑制植物光合作用[33,34]. 在本研究中,在 C0 水平下加入 DOM 能提高叶片光合能力,其原因可能是:施入 CM 和 FM 能提高根系对养分的吸收能力、提高养分的运输能力从而使光合作用强度提高[35]; 但在 C5 和 C10 水平下,DOM 施用在提高根系与土壤养分接触面积的同时也增加了根系与土壤 Cd 的接触面积. 与此同时,DOM 施用让土壤 Cd 的有效性提高(图 1),使 CM 和 FM 处理下棉花在同一 Cd 水平下的胁迫程度提高,导致叶绿素合成受阻,净光合速率降低. 此外,Cd 胁迫条件下细胞产生的活性氧(ROS)还可能使细胞中的叶绿体和线粒体等细胞器受到氧化损伤导致其无法发挥正常功能[36~38],从而光合作用受到抑制. 因此,同一 Cd 水平(C5 和 C10)下施加 CM 和 FM 表现出净光合速率比 CK 更低.

3.3　DOM 对 Cd 污染下棉花 Cd 吸收和积累的影响

植物体内 Cd 含量决定了 Cd 污染土壤的植物修复效率[39]. 徐轶群等[40]的研究发现,DOM 提高了土壤重金属的活性,促进了生菜对重金属的吸收和积累. 在本试验中,CM 和 FM 的施入总体上提高了棉花各部位的 Cd 含量(除棉纤维)并提高了棉花的 Cd 积累总量,原因可能在于:其一,施入 CM 和 FM 提高了土壤 Cd 的有效性(图 1),使根系暴露在 Cd 有效性更高的土壤中; 其二,施用 CM 和 FM 提高了根系生物量(表 2),增加了根系与土壤的接触面积从而提高了根系对 Cd 的吸收量; 其三,根系中 Cd 经木质部通过蒸腾作用向上运输并在其他器官实现再分配[41],CM 和 FM 的施用显著提高了叶片的蒸腾速率(表 3),使更多的 Cd 向地上部运输和积累.

棉纤维中的 Cd 含量影响到棉花的安全利用. 在本研究中,各处理下棉纤维 Cd 含量符合国家标准[42]中总 Cd 含量的限量要求. 此外,DOM 施入对棉纤维的 Cd 含量表现为降低或无显著差异,这可能是由于 DOM 的施入能促进植物产生 GSH 合成酶,提高叶片 GSH 活性[43],使 GSH 与 Cd 螯合后被拦截在叶片的液泡中[44],限制了其向棉纤维中的转移. 但 DOM 的应用对棉纤维的生物量存在一定程度的降低作用. 因此,在具体应用过程中需采取合理的田间管理措施来提高生物量和产量[45,46],以保障经济效益.

4　结论

施加棉花秸秆 DOM 和农家肥 DOM 均能提高土壤 Cd 的生物有效性,且在外源添加量为 0 ~ 10 $mg\cdot kg^{-1}$ 的条件下,均为秸秆 DOM 高于农家肥 DOM. DOM 施入对棉花总生物量和净光合速率的影响取决于土壤中的 Cd 含量,无外源 Cd 添加时表现为促进作用,随着外源 ω(Cd)的增加(5 ~ 10 $mg\cdot kg^{-1}$)逐渐表现为抑制作用. 在 3 种 Cd 水平下,棉花秸秆 DOM 和农家肥 DOM 施加对棉纤维的安全利用无影响,并且均使棉花 Cd 积累总量显著提高,其中,秸秆 DOM 处理对棉花 Cd 积累总量均高于农家肥 DOM. 因此,推荐施用棉花秸秆 DOM 来修复 Cd 污染土壤.

参考文献:

[1] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.

[2] Hamid Y, Tang L, Yaseen M, *et al*. Comparative efficacy of organic and inorganic amendments for cadmium and lead immobilization in contaminated soil under rice-wheat cropping system[J]. Chemosphere, 2019, **214**: 259-268.

[3] Shao M M, Zhu Y, Hao R, *et al*. The health hazards of potentially toxic metals in the daily diets of adults and children from a mining and smelting region (Hezhang County) in southwestern China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190**(7), doi: 10.1007/s10661-018-6816-y.

[4] Ashraf S, Ali Q, Zahir Z A, *et al*. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **174**: 714-727.

[5] 从辉, 张有军, 曲为贵, 等. 农田土壤Cd污染的植物修复及强化措施研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, **49**(8): 21-25.
Cong H, Zhang Y J, Qu W G, *et al*. Research progress on

phytoremediation and strengthening measures of cadmium pollution in farmland soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, **49**(8): 21-25.

[6] Chen Z F, Zhao Y, Fan L D, *et al*. Cadmium (Cd) localization in tissues of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), and its phytoremediation potential for Cd-contaminated soils [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **95**(6): 784-789.

[7] Lwin C S, Seo B H, Kim H U, *et al*. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality-a critical review[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, **64**(2): 156-167.

[8] Borggaard O K, Holm P E, Strobel B W. Potential of dissolved organic matter (DOM) to extract As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn from polluted soils: a review[J]. Geoderma, 2019, **343**: 235-246.

[9] 高忠坡, 倪嘉波, 李宁宁. 我国农作物秸秆资源量及利用问题研究[J]. 农机化研究, 2022, **44**(4): 1-6, 25.
Gao Z P, Ni J B, Li N N. Research on the quantity and utilization of crop straw resources in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, **44**(4): 1-6, 25.

[10] 杜为研, 唐杉, 汪洪. 我国有机肥资源及产业发展现状[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (3): 210-219.
Du W Y, Tang S, Wang H. The status of organic fertilizer industry and organic fertilizer resources in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (3): 210-219.

[11] Liu H F, Yang X M, Liu G B, *et al*. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil[J]. Chemosphere, 2017, **185**: 907-917.

[12] 何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 等. 不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3833-3839.
He P J, Zhang H H, Qiu J J, *et al*. Leaching behavior of dissolved organic matter in biochar with different extracting agents [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3833-3839.

[13] 丁翔, 李忠武, 徐卫华, 等. DOM对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3837-3846.
Ding X, Li Z W, Xu W H, *et al*. Promotion and mechanisms of DOM on copper adsorption by suspended sediment particles[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3837-3846.

[14] 吕本春, 付利波, 湛方栋, 等. 绿肥作物矿化分解对土壤镉有效性的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, **38**(3): 431-441.
Lü B C, Fu L B, Zhan F D, *et al*. Research advance on the effect of mineralization and decomposition of green manure crops on soil cadmium availability[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, **38**(3): 431-441.

[15] Tian Y Y, Wu Y, Peng Y Y, *et al*. Study on the complexation of heavy metals onto biogas slurry DOM using two-dimensional correlation spectroscopy combined with the log-transformed synchronous fluorescence spectroscopy [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(18): 22878-22885.

[16] Wang P C, Peng H, Liu J L, *et al*. Effects of exogenous dissolved organic matter on the adsorption-desorption behaviors and bioavailabilities of Cd and Hg in a plant-soil system[J]. Science of the Total Environment, 2020, **728**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138252.

[17] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化背景下河流DOM的吸收及荧光光谱特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5309-5317.
Chen Z Y, Li S Y. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the Three Gorges Reservoir area under the background of urbanization[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5309-5317.

[18] 庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 等. 重金属钝化剂阻控生菜Cd吸收的功能稳定性和适用性[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2502-2511.
Pang F H, Wu X J, Kong X F, *et al*. Functional stability and applicability of heavy metal passivators in reducing Cd uptake by lettuce[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2502-2511.

[19] Xie J, Dong A Q, Liu J, *et al*. Relevance of dissolved organic matter generated from green manuring of Chinese milk vetch in relation to water-soluble cadmium[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(16): 16409-16421.

[20] Zhang X Y, Su C, Liu X Y, *et al*. Periodical changes of dissolved organic matter (DOM) properties induced by biochar application and its impact on downward migration of heavy metals under flood conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **275**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123787.

[21] 方小满, 施雯, 李非里, 等. 溶解性有机质对水中重金属生物有效性的影响研究[J]. 环境科技, 2016, **29**(2): 59-63.
Fang X M, Shi W, Li F L, *et al*. A review for effect of dissolved organic matter on the bioavailability of heavy metals in aquatic environment[J]. Environmental Science and Technology, 2016, **29**(2): 59-63.

[22] 林媛, 弓晓峰, 熊婕仟, 等. 外源DOM对湿地土壤吸附重金属Pb^{2+}、Cd^{2+}的影响[J]. 南昌大学学报(理科版), 2021, **45**(1): 71-78.
Lin Y, Gong X F, Xiong J Q, *et al*. Effects of DOM on wetland soil adsorption of heavy metals Pb^{2+} and Cd^{2+}[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2021, **45**(1): 71-78.

[23] 乔冬梅. 基于黑麦草根系分泌有机酸的铅污染修复机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
Qiao D M. Phytoremediation mechanism of leaf pollution base on organic acid exudation from ryegrass root[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.

[24] Zhu X C, Skoneczny D, Weidenhamer J D, *et al*. Identification and localization of bioactive naphthoquinones in the roots and rhizosphere of Paterson's curse (*Echium plantagineum*), a noxious invader[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, **67**(12): 3777-3788.

[25] Liu X L, Zhang S Z, Wu W Y, *et al*. Metal sorption on soils as affected by the dissolved organic matter in sewage sludge and the relative calculation of sewage sludge application[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **149**(2): 399-407.

[26] Schneider A R, Ponthieu M, Cancès B, *et al*. Influence of dissolved organic matter and manganese oxides on metal speciation in soil solution: a modelling approach [J]. Environmental Pollution, 2016, **213**: 618-627.

[27] 常单娜, 曹卫东, 白金顺, 等. 绿肥对华北潮土土壤可溶性有机物的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, **37**(1): 221-226.
Chang D N, Cao W D, Bai J S, *et al*. Effects of green manures on soil dissolved organic matter in moisture soil in North China [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, **37**(1): 221-226.

[28] 何杰, 朱学惠, 魏彬, 等. 基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1889-1900.
He J, Zhu X H, Wei B, *et al*. Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter from landscape river during flood season in Suzhou based on EEMs and UV-vis[J].

Environmental Science, 2021, **42**(4): 1889-1900.

[29] 陈迪, 李伯群, 杨永平, 等. 4 种草本植物对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 960-966.
Chen D, Li B Q, Yang Y P, *et al*. Cadmium accumulation characteristics of four herbs[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 960-966.

[30] 孙颖, 高颖, 陈惠, 等. 亚热带米槠林不同更新方式对土壤可溶性有机质降解性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1073-1082.
Sun Y, Gao Y, Chen H, *et al*. Effects of different regeneration patterns on soil dissolved organic matter degradation in *Castanopsis carlesii* forests of subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(4): 1073-1082.

[31] 贺前锋, 桂娟, 刘代欢, 等. 淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤镉活性影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2260-2268.
He Q F, Gui J, Liu D H, *et al*. Research progress of soil property's changes and its impacts on soil cadmium activity in flooded paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2260-2268.

[32] 梁明欣, 寇莹莹, 王京刚, 等. 不同生态混凝土坡岸中溶解性有机质与镉的相互作用机理研究[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(8): 1857-1868.
Liang M X, Kou Y Y, Wang J G, *et al*. Interaction mechanism of dissolved organic matter and cadmium in different ecological concrete slopes[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(8): 1857-1868.

[33] Yang S L, Zhang J, Chen L H. Growth and physiological responses of *Pennisetum* sp. to cadmium stress under three different soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(12): 14867-14881.

[34] Haider F U, Cai L Q, Coulter J A, *et al*. Cadmium toxicity in plants: impacts and remediation strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **211**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111887.

[35] 马宜林, 吴广海, 申洪涛, 等. 羊粪有机肥与化肥配施对烤烟生长及土壤肥力特性的影响[J]. 核农学报, 2021, **35**(10): 2423-2430.
Ma Y L, Wu G H, Shen H T, *et al*. Effects of combined application of sheep manure-derived organic fertilizer and chemical fertilizer on tobacco growth and soil fertility[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, **35**(10): 2423-2430.

[36] Wang Y Y, Wang Y, Li G Z, *et al*. Salicylic acid-altering Arabidopsis plant response to cadmium exposure: underlying mechanisms affecting antioxidation and photosynthesis-related processes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **169**: 645-653.

[37] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, **48**(12): 909-930.

[38] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, *et al*. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, **171**: 710-721.

[39] 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 等. 施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5189-5197.
Cao L, Yang J X, Guo J J, *et al*. Effect of fertilizers on cadmium uptake and accumulation by sunflowers[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5189-5197.

[40] 徐铁群, 王振兴, 李莎莎, 等. 外源水溶性有机物对生菜积累重金属 Pb、Cd 的影响[J]. 环境工程, 2016, **34**(8): 125-129.
Xu Y Q, Wang Z X, Li S S, *et al*. Effects of exogenous dissolved organic matter on Pb and Cd accumulation by lettuce[J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(8): 125-129.

[41] Lux A, Martinka M, Vaculík M, *et al*. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, **62**(1): 21-37.

[42] GB/T 18885-2020, 生态纺织品技术要求[S].

[43] 章绍康. 三种土壤改良剂强化黑麦草修复铜镉污染红壤研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
Zhang S K. Study on three soil amendments enhanced ryegrass remediation of copper and cadmium contaminated red soil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

[44] 范旭杪, 秦丽, 王吉秀, 等. 植物谷胱甘肽代谢与镉耐性研究进展[J]. 西部林业科学, 2019, **48**(4): 50-56.
Fan X M, Qin L, Wang J X, *et al*. A review of glutathione metabolism and cadmium tolerance in plants[J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, **48**(4): 50-56.

[45] 哈丽哈什·依巴提, 李传龙, 刘欢, 等. 基于产量反应的棉花推荐施肥效应[J]. 新疆农业科学, 2021, **58**(1): 72-79.
Yibati H, Li C L, Liu H, *et al*. Study on the recommended fertilization effect of cotton based on yield response[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, **58**(1): 72-79.

[46] 娄善伟, 董合忠, 田晓莉, 等. 新疆棉花"矮、密、早"栽培历史、现状和展望[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(4): 720-732.
Lou S W, Dong H Z, Tian X L, *et al*. The "short, dense and early" cultivation of cotton in Xinjiang: history, current situation and prospect[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(4): 720-732.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2022

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of $PM_{2.5}$ Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020 ······ CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, *et al.* (1129)
Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin ······ XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, *et al.* (1140)
Source Analysis of Ambient $PM_{2.5}$ in Wuhan City Based on Random Forest Model ······ ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, *et al.* (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China ······ REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, *et al.* (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan ······ WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, *et al.* (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM_1 Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou ······ ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, *et al.* (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt ······ WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, *et al.* (1190)
Spatial Heterogeneity of $PM_{2.5}$ Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region ······ ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, *et al.* (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities ······ ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, *et al.* (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ in Shanxi Province Based on Wavelet Transform ······ ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, *et al.* (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China ······ ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province ······ LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, *et al.* (1246)
Temporal and Spatial Variation in O_3 Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas ······ LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-rui, *et al.* (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an ······ LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, *et al.* (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City ······ WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, *et al.* (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo ······ QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, *et al.* (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province ······ QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, *et al.* (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking ······ LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, *et al.* (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants ······ YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, *et al.* (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China ······ LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, *et al.* (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin ······ LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing ······ WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, *et al.* (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment ······ HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, *et al.* (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries ······ ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, *et al.* (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors ······ CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers ······ GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, *et al.* (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia ······ LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, *et al.* (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years ······ GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, *et al.* (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin ······ HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, *et al.* (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangsu Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain ······ SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, *et al.* (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River ······ SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, *et al.* (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the *Grus leucogeranus* Reserve of Poyang Lake ······ LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, *et al.* (1447)
Influence of Microplastics on the Development of Proteus Biofilm ······ TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, *et al.* (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangsu Lake ······ LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, *et al.* (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics ······ SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, *et al.* (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N_2O from Coastal Rivers in Tianjin City ······ TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, *et al.* (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland ······ CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, *et al.* (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level ······ QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, *et al.* (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network ······ JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, *et al.* (1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism ······ ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qiang, *et al.* (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge ······ ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District ······ LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, *et al.* (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas ······ WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province ······ ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, *et al.* (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide ······ YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, *et al.* (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM ······ MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, *et al.* (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ) ······ LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, *et al.* (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionomic Traits Among Different Winter Wheat Varieties ······ LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, *et al.* (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress ······ REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, *et al.* (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River ······ LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, *et al.* (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil ······ SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, *et al.* (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by *Solanum nigrum* L. and on the Soil Bacterial Community Structure ······ LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, *et al.* (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland ······ HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, *et al.* (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions ······ WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, *et al.* (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N_2O and N_2 Emission in a Winter Wheat Field ······ PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, *et al.* (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis ······ ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, *et al.* (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis ······ RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, *et al.* (1688)