

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

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



■ 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

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,郝国,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,蔡子颖,毕温凯,李鹏,杨宁,邓小文,戴运峰(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,叶林麟,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 ₁₀ 中重金属浓度、来源及健康风险评估	翟诗婷,王申博,张栋,赵孝因,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,刀谔,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,黄志烟,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疫情期间雄安新区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	李源速,吴爱华,童梦雪,栾胜基,李骞(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,黄焱,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,张研,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,张刘,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,赵华璋,高占欣,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)
百年以来北方湖泊沉积物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	胡愈忻,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,郝磊,汪华,朱文芳(1472)
天津市滨海河流N、O ₃ 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,胡佩,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,孙展翔,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	刘书准,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-农作物系统镉迁移转化特征及污染评价	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土壤中重金属的阻控效应	杨士,刘祖文,龙培,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,任成仲,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/钾锰改性生物炭对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 ₂ O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氮挥发的影响	赵政鑫,王晓云,田雅洁,王锐,赵青,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)

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^{1,2}, 孙丽¹, 刘方^{2*}, 任军^{1,2}, 郭金梅¹, 闫修民¹

(1. 贵州师范学院地理与资源学院, 贵阳 550018; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 通过盆栽试验,探讨植物生长调节剂 DA-6 和螯合剂 EDDS 施用对 Cd 污染土壤上龙葵生长、Cd 吸收及土壤细菌群落结构的影响,以此评估不同修复处理的实际应用效果. 结果表明,单独添加 DA-6、将 DA-6 和 EDDS 联合施用均能促进龙葵的生长,使其地上部鲜重较对照分别显著增加了 24.58% 和 19.57%,同时龙葵叶片的叶绿素含量和抗氧化酶活性也呈增加趋势,而丙二醛含量则有所降低. 施用 DA-6 和 EDDS 还显著提高了土壤有效态 Cd 含量,促进了龙葵对 Cd 的吸收. 与对照相比,龙葵地上部 Cd 提取量分别显著提高了 39.42% (DA-6)、30.17% (EDDS) 和 51.04% (DA-6 + EDDS). 结果还发现,单独施用 EDDS 一方面使土壤细菌群落 ACE 指数显著降低,而 Simpson 指数显著增加;另一方面使土壤 *Lysobacter* 菌属丰度显著降低. 将 DA-6 和 EDDS 联用后,土壤细菌群落的多样性以及分类学组成得到改善.

关键词: 龙葵; 乙二胺二琥珀酸 (EDDS); 胺鲜脂 (DA-6); 镉污染; 植物修复; 细菌群落

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2022) 03-1641-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202107259

Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by *Solanum nigrum* L. and on the Soil Bacterial Community Structure

LUO Yang^{1,2}, SUN Li¹, LIU Fang^{2*}, REN Jun^{1,2}, GUO Jin-mei¹, YAN Xiu-min¹

(1. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The effects of the plant growth regulator DA-6 and chelator EDDS on the growth, Cd absorption, and soil bacterial community structure of *Solanum nigrum* L. on Cd-polluted soil were examined through a pot experiment, so as to evaluate the practical application effects of different remediation treatments. The results showed that the addition of DA-6 alone and the combined application of DA-6 and EDDS could promote the growth of *S. nigrum* L., and the shoot fresh weight increased by 24.58% and 19.57%, respectively, compared with that in the control. At the same time, the chlorophyll content and antioxidant enzyme activity of *S. nigrum* L. leaves also increased, whereas the content of malondialdehyde decreased. The application of DA-6 and EDDS also significantly increased the content of soil available Cd and promoted the absorption of Cd by *S. nigrum* L. Compared with that in the control, the extraction amount of Cd from *S. nigrum* L. shoots was significantly increased by 39.42% (DA-6), 30.17% (EDDS), and 51.04% (DA-6 + EDDS), respectively. It was also found that the application of EDDS alone significantly reduced the ACE index of the soil bacterial community and significantly increased the Simpson index, and the abundance of the *Lysobacter* genus in the soil was significantly reduced. After the combination of DA-6 and EDDS, the diversity and taxonomic composition of the soil bacterial community were improved.

Key words: *Solanum nigrum* L.; EDDS; DA-6; Cd pollution; phytoremediation; bacterial community

镉 (Cd) 是公认的毒性较大的重金属元素之一,在土壤具有一定的迁移能力,被植物吸收后可通过食物链最终威胁人类的健康^[1]. 近年来,随着含 Cd “三废” 排放的日益增加,我国土壤 Cd 污染形势已较为严峻,如何对镉污染土壤进行有效治理成为了普遍关注的问题^[2]. 利用超积累植物对土壤重金属进行植物提取 (phytoextraction), 具有成本低、原位修复、环境友好和适宜大面积推广等特点,在土壤 Cd 污染领域具有较大的发展潜力^[3,4]. 但在实际应用中,超积累植物个体矮小、生长缓慢以及土壤 Cd 生物有效性低往往是导致修复效率低下的限制因素^[5~7]. 因此,生长调节剂和螯合剂常被用于强化植物提取修复之中. 植物生长调节剂主要是通过促进植株营养生长、增强植物的光合作用和抗逆性,进而提高植物的生物量,增加对 Cd 的提取量^[8]. 目

前使用得较多的生长素 (IAA)、赤霉素 (GA3)、乙稀利 (ETH) 和脱落酸 (ABA) 等植物生长调节剂都属于直接从植物里提取的植物天然激素,仍存在着提取方法复杂困难和含量少等问题^[9]. 螯合剂主要是通过土壤中 Cd 离子形成螯合物,增强其活性,进而促进植物的吸收和积累^[10,11]. 目前研究中使用得最为广泛的螯合剂 EDTA 存在着难降解、残留时间长和易对环境造成二次污染等问题^[12].

DA-6 (胺鲜脂) 是一种人工合成的细胞分裂素类植物生长调节剂,优点是低毒、安全而且价格低廉,使用也比较方便^[13]. 有研究表明,DA-6 处理能

收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2021-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502303); 贵州省科学技术基金项目 (黔科合基础 [2019] 1247 号)

作者简介: 罗洋 (1989 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: luoyang2007730@163.com

* 通信作者, E-mail: fliu@gzu.edu.cn

促进污染土壤中的超积累植物的生长,提高其对重金属的提取修复效率^[14,15].EDDS(乙二胺二琥珀酸),对土壤中重金属螯合能力极强,在土壤中残留时间短,可生物降解,其环境风险低于EDTA^[16].裘希雅等^[17]的研究结果表明,EDDS的添加在提高海洲香薷对Cu和Zn的吸收量的同时,渗滤液中的重金属浓度低于国家Ⅲ类地下水水质标准,淋滤风险较小.目前的研究中,无论是DA-6还是EDDS大多以单施为主,鲜见将两者联合起来强化植物修复Cd污染土壤的报道.

在利用植物生长调节剂和螯合剂强化植物提取效果的同时,其对土壤质量的影响也不容忽视^[18].因此,进行强化调控条件下的土壤生态风险评价研究也是十分必要的.细菌对土壤扰动或污染能够快速响应,是实时反映污染环境修复状态的最灵敏指标,在修复后土壤的生态功能评价方面得到诸多应用^[19].以高通量测序为代表的新一代测序技术凭借低成本、高通量和流程自动化的优势为研究微生物群落结构提供了新的技术平台,为探明植物修复土壤重金属污染过程中根际土壤细菌群落组成和功能提供帮助^[20].龙葵(*Solanum nigrum* L.)是茄科属一年生直立草本植物,因其对Cd具有较强的积累特性,是应用于土壤Cd污染植物提取的良好材料.基于此,本研究采用盆栽试验,通过测定EDDS与DA-6单施和联合施用条件下龙葵株高、鲜重、叶绿素含量、丙二醛含量、抗氧化酶活性和Cd含量等指标,并采用Illumina MiSeq高通量测序技术,研究修复后土壤细菌群落变化情况,探讨DA-6和EDDS对龙葵修复Cd污染土壤的强化效果,以期Cd污染土壤的治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自贵阳市乌当区贵州师范学院周边某污染地块,土壤类型为石灰土,其基本理化性质:pH为7.84, ω (有机质)为12.86 g·kg⁻¹, ω (碱解氮)为84.00 mg·kg⁻¹, ω (有效磷)为57.38 mg·kg⁻¹, ω (速效钾)为229.23 mg·kg⁻¹,土壤 ω (Cd)为5.25 mg·kg⁻¹.土壤风干后,挑出杂物磨碎过2 mm尼龙筛,充分混匀后置于高22 cm、上口径23 cm和底径18 cm的花盆中,每盆装土3 kg.

供试龙葵(*Solanum nigrum* L.)种子购于寿光市沃田农业科技有限公司.选取颗粒饱满的龙葵种子经75%的酒精浸泡30 s杀菌处理后,用蒸馏水清洗干净,播种于育苗钵中,待长出4片真叶后移栽长势一致的幼苗于花盆中培养,每盆2株.

1.2 试验设计

本试验于2020年4~8月在贵州师范学院温室大棚进行,共设计4个处理.①CK:对照,不添加EDDS和DA-6;②DA-6:施用10 μ mol·L⁻¹的DA-6;③EDDS:施用3 mmol·kg⁻¹的EDDS;④EDDS+DA-6:施用10 μ mol·L⁻¹的DA-6和3 mmol·kg⁻¹的EDDS.每个处理设置4次重复.DA-6溶液以叶面喷施形式每盆添加10 mL(移栽后第21、28、35和42 d喷施)^[21].EDDS溶液在收获前10 d均匀淋溶在土壤表面,每盆用量为100 mL^[22].龙葵生长期间均浇灌去离子水,根据天气情况把握浇水频率,保持土壤含水量为最大含水量的60%左右,移栽3个月收获.

将收获的龙葵分为地上部和根部两部分.分别用自来水、去离子水各洗涤2~3次,擦干后测量株高和鲜重,并留取一部分鲜样用于生理指标测定,剩余部分在105℃烘箱中杀青30 min,然后再调至70℃条件下烘干至恒重,取出粉碎装袋备用.同时将土壤样品充分混合后分为两部分:一部分迅速装入无菌袋中包扎密封,低温条件下带回实验室于-80℃冰箱保存,用于微生物高通量测序分析;另一部分在室内自然风干,剔除杂物研磨过筛后,用于土壤有效态Cd含量的测定.

1.3 测定项目及方法

龙葵的株高用卷尺测量,鲜重用万分之一天平称取.龙葵叶片叶绿素采用95%乙醇提取,分别于470 nm(类胡萝卜素)、649 nm(叶绿素b)和665 nm(叶绿素a)下测定吸光度并计算含量;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸显色法测定;龙葵叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法和双氧水法测定^[23,24].龙葵地上部Cd含量采用HNO₃:HClO₄(优级纯,3:2,体积比)的混合酸液消煮,火焰原子吸收光谱仪(novAA 350)测定.测试过程通过添加标准物质灌木枝叶GBW07603(GSV-2)进行质量控制,同时做空白试验,Cd检测的回收率为92.3%~103.5%.土壤有效态Cd含量采用0.1 mol·L⁻¹HCl浸提,火焰原子吸收光谱仪测定.

土壤DNA按E. Z. N. ATM Mag-Bind Soil DNA Kit的DNA提取试剂盒操作步骤提取,利用1%的琼脂糖电泳和紫外分光光度法检测质量.通过引物341F(5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3')和805R(5'-CTACHVGGGTATCTAATCC-3')对细菌16S rDNA V3-V4区进行扩增,通用引物上加有接头序列,其中341F引物接有Barcode标签.PCR反应体系如下:2

× Hieff® Robust PCR Master Mix 15 μL、Bar-PCR primer F 1 μL、Primer R 1 μL、基因组 DNA 10 ~ 20 ng, 补充无菌水至 30 μL. PCR 扩增条件为: 94℃ 预变性 3 min; 94℃ 变性 30 s, 45℃ 退火 20 s、65℃ 延伸 30 s, 共 5 个循环; 94℃ 变性 20 s, 55℃ 退火 20 s、72℃ 延伸 30 s, 共 20 个循环; 最后 72℃ 延伸 5 min. PCR 结束后, 对 PCR 产物进行琼脂糖电泳, 用琼脂糖回收试剂盒 (cat: SK8131) 对 DNA 进行回收. 回收产物用 Qubit 3.0 DNA 检测试剂盒定量, 根据测得的 DNA 浓度, 将所有样品按照 1:1 的比例进行混合, 混合后充分振荡均匀, 将混合样品送至生工 (上海) 生物工程有限公司, 利用 Illumina MiSeq 平台进行高通量测序^[25,26].

1.4 数据处理与分析

用 Excel 2019 进行数据的处理和作图, 运用 SPSS 26 进行单因素方差分析, 采用最小显著差异法 (LSD) 比较数据组间的差异. 利用 Uparse 软件在 97% 相似性下, 对样品有效数据进行 OTU 序列聚类. 采用 Mothur 软件计算土壤中细菌的 ACE 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数.

2 结果与分析

2.1 DA-6 和 EDDS 对龙葵株高、鲜重的影响

不同处理条件下龙葵的株高和鲜重情况见表 1. 对照组的平均株高为 46.20 cm, 添加 DA-6 后显著增加至 53.13 cm. 添加 EDDS 以及 DA-6 + EDDS 的处理组龙葵株高分别为 48.98 cm 和 49.85 cm, 与对照和 DA-6 处理组相比均无显著差异. 添加 DA-6 和 DA-6 + EDDS 处理组龙葵的地上部鲜重较对照分别显著增加了 24.58% 和 19.57% ($P < 0.05$), 也

显著高于 EDDS 处理组, 但两者之间差异不明显 ($P > 0.05$).

表 1 不同处理条件下龙葵的株高和鲜重¹⁾

Table 1 Plant height and fresh weight of <i>Solanum nigrum</i> L. under different treatments		
处理	株高/cm	地上部鲜重/g
CK	46.20 ± 4.56b	76.54 ± 6.69b
DA-6	53.13 ± 1.81a	95.35 ± 4.39a
EDDS	48.98 ± 2.53ab	79.24 ± 4.98b
DA-6 + EDDS	49.85 ± 4.11ab	91.52 ± 9.82a

1) 同列中不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同

2.2 DA-6 和 EDDS 对龙葵生理指标的影响

由表 2 可知, 不同条件下龙葵叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量大小顺序均为: DA-6 > DA-6 + EDDS > CK > EDDS, 其中 DA-6、DA-6 + EDDS 处理组龙葵叶绿素含量与 CK、EDDS 处理组的差异达显著水平 ($P < 0.05$). 与对照相比, 添加 EDDS 未引起龙葵叶片丙二醛含量改变, 而添加 DA-6 和 DA-6 + EDDS 则使该指标分别显著降低了 17.22% 和 12.32% (表 2). 此外, 本研究还发现, 施用 DA-6 和 EDDS 以后, 龙葵叶片的抗氧化酶活性也呈现不同变化趋势 (表 2). 其中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性表现为 DA-6 与 DA-6 + EDDS 处理组显著高于 CK 与 EDDS 处理组, 但前两者、后两者相互之间差异不显著; 过氧化物酶 (POD) 活性介于 100.06 ~ 110.13 $\text{U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 之间, 其余处理与对照均无显著差异, 但 DA-6 处理组显著高于 EDDS 处理组; 过氧化氢酶 (CAT) 活性以 DA-6 处理组最高, 与对照相比增幅达 21.58%, 也显著高于 EDDS 和 DA-6 + EDDS 处理组.

表 2 不同处理条件下龙葵叶片的生理指标

Table 2 Physiological indexes of <i>Solanum nigrum</i> L. leaves under different treatment							
处理	叶绿素 a / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素 b / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	总叶绿素 / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	丙二醛 / $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$	SOD / $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$	POD / $\text{U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$	CAT / $\text{U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$
CK	1.54 ± 0.36b	0.89 ± 0.16bc	2.42 ± 0.51b	9.58 ± 0.51a	728.53 ± 26.48b	104.34 ± 6.34ab	91.25 ± 5.50b
DA-6	2.23 ± 0.16a	1.10 ± 0.07a	3.34 ± 0.21a	7.93 ± 0.18b	829.75 ± 24.29a	110.13 ± 7.04a	110.94 ± 11.34a
EDDS	1.32 ± 0.17b	0.71 ± 0.12c	2.03 ± 0.29b	9.74 ± 0.80a	730.45 ± 45.56b	100.06 ± 6.06b	92.81 ± 8.92b
DA-6 + EDDS	1.99 ± 0.15a	1.07 ± 0.16ab	3.05 ± 0.27a	8.40 ± 0.28b	813.04 ± 35.32a	101.57 ± 7.76ab	95.00 ± 8.90b

2.3 DA-6 和 EDDS 对龙葵地上部镉吸收的影响

表 3 显示了各处理条件下龙葵地上部 Cd 含量和 Cd 吸收量情况. 添加 EDDS 和 DA-6 + EDDS 促进了龙葵地上部对 Cd 的积累, 使其 Cd 含量分别较对照显著提高了 26.95% 和 27.67%, 两者之间差异不显著. 相比之下, DA-6 处理组与另外 3 个处理组的龙葵地上部 Cd 含量无显著差异. 本研究还发现, 与对照相比, 无论单施 DA-6 或 EDDS 还是将两者联合施用, 均能显著增加龙葵地上部 Cd 吸收量 ($P <$

0.05), 其增幅分别为 39.42% (DA-6)、30.17% (EDDS) 和 51.04% (DA-6 + EDDS), 其中 DA-6 + EDDS 处理组龙葵地上部 Cd 吸收量还显著高于 EDDS 处理组.

2.4 DA-6 和 EDDS 对土壤 pH 和有效态镉含量的影响

各处理土壤 pH 值介于 7.45 ~ 7.74 之间 (表 4), 其中 DA-6 处理组土壤 pH 值显著低于其余 3 个处理. 此外, 添加生长调节剂 DA-6 和螯合剂 EDDS

后土壤 Cd 有效性呈增加趋势(表 4). 具体而言, DA-6 + EDDS、EDDS 和 DA-6 处理组土壤有效态 $\omega(\text{Cd})$ 为 3.06、3.04 和 2.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是对照组[土壤有效态 $\omega(\text{Cd})$ 为 2.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 的 1.42、1.41 和 1.25 倍($P<0.05$), 其中联合施用 DA-6 和 EDDS 处理组还显著高于单独添加 DA-6 处理组.

表 3 不同处理条件下龙葵地上部 Cd 含量和 Cd 提取量

Table 3 Cd concentration and extraction capacity in plant shoots of <i>Solanum nigrum</i> L. under different treatments		
处理	$\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd 提取量/ $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$
CK	41.60 $\pm$ 6.34b	352.43 $\pm$ 75.87c
DA-6	46.93 $\pm$ 2.30ab	491.37 $\pm$ 4.91ab
EDDS	52.81 $\pm$ 4.67a	458.76 $\pm$ 15.99b
DA-6 + EDDS	53.11 $\pm$ 3.12a	532.32 $\pm$ 31.72a

表 4 不同处理条件下土壤 pH 值和有效态 Cd 含量

Table 4 Soil pH and available Cd content under different treatments		
处理	pH	土壤有效态 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
CK	7.70 $\pm$ 0.11a	2.15 $\pm$ 0.33c
DA-6	7.45 $\pm$ 0.05b	2.69 $\pm$ 0.27b
EDDS	7.74 $\pm$ 0.17a	3.04 $\pm$ 0.13ab
DA-6 + EDDS	7.68 $\pm$ 0.16a	3.06 $\pm$ 0.15a

2.5 对土壤细菌群落结构的影响

2.5.1 土壤细菌群落多样性

本研究 16 个样品共获得有效序列 1 241 795 个, 平均长度为 415 bp, 平均测序覆盖率达到 99%. 样品 OTU 稀释性曲线趋于平坦, 表明测序深度包括了样品中的绝大多数细菌类型, 测序数据量合理, 比较真实地反映了修复后土壤中的细菌群落组成, 可以满足后续多样性及丰度功能分析. 运用 Shannon、ACE 和 Simpson 指数对各处理土壤细菌群落多样性进行分析(表 5). 结果表明, 土壤细菌的 Shannon 指数以 EDDS 处理组为最小, 显著低于 DA-6 处理组, 其余 3 个处理组之间无显著差异. 添加 DA-6 和 DA-6 + EDDS 使土壤细菌的 ACE 指数略有增加, 但差异并未达显著水平; 添加 EDDS 处理组土壤细菌群落的 ACE 指数则显著低于其余 3 个处理($P<0.05$). 与之相反的是, EDDS 处理组土壤细菌的 Simpson 指数为 0.011, 显著高于 CK(0.008)、DA-6(0.006)和 DA-6 + EDDS(0.007)处理组.

根据 OTU 聚类结果对样品进行均一化处理后, 用 Mothur 软件作 Venn 图, 比较不同处理条件下土壤细菌群落的相似性. 不同样本用不同的颜色表示, 且不同颜色图形间重叠部分为两样本组间共有的 OTU 数(图 1). 共检测到 4 154 个 OTU, 其中 CK、DA-6、EDDS 和 DA-6 + EDDS 处理组的 OTU 数分别为 3 655、3 723、3 649 和 3 668 个, 4 个处理的公有 OTU 为 3 074 个, 占 CK、DA-6、EDDS 和 DA-6 +

EDDS 总 OTU 的比例分别为 84.10%、82.57%、84.24% 和 83.81%, 而 CK、DA-6、EDDS 和 DA-6 + EDDS 各自特有的 OTU 数分别为 62、90、48 和 67 个, 占相应样本总 OTU 的比例分别为 1.70%、2.42%、1.32% 和 1.83%.

表 5 不同处理条件下土壤中细菌群落多样性指数

Table 5 Diversity index of bacterial community in soil under different treatments			
处理	Shannon 指数	ACE 指数	Simpson 指数
CK	6.36 $\pm$ 0.12ab	3 445.33 $\pm$ 35.57a	0.008 $\pm$ 0.001b
DA-6	6.41 $\pm$ 0.04a	3 473.13 $\pm$ 39.57a	0.006 $\pm$ 0.001b
EDDS	6.21 $\pm$ 0.05b	3 285.59 $\pm$ 56.21b	0.011 $\pm$ 0.002a
DA-6 + EDDS	6.32 $\pm$ 0.14ab	3 507.72 $\pm$ 87.93a	0.007 $\pm$ 0.001b

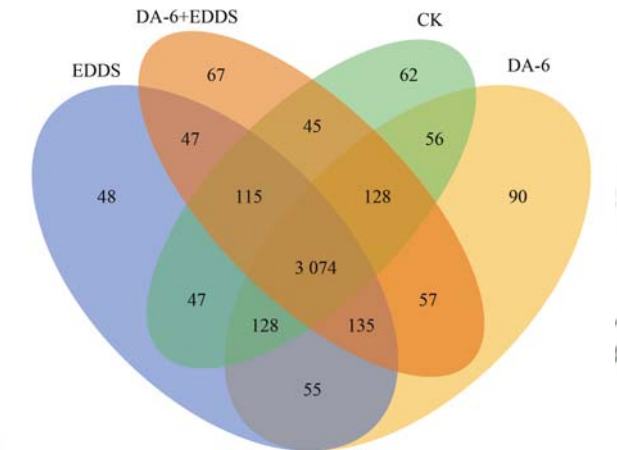


图 1 不同处理条件下土壤细菌 OTUs 的韦恩分析

Fig. 1 Venn diagram of bacteria in soil under different treatments

2.5.2 土壤细菌群落分类学组成

在门水平上, 土壤中的细菌主要分布在 10 个门类[图 2(a)]. 相对丰度最大的是变形菌门(Proteobacteria), 为 38.13%~43.80%, 各处理之间无显著差异($P>0.05$); 其次是拟杆菌门(Bacteroidetes), 相对丰度为 9.48%~12.97%, 其中 DA-6 处理组显著低于 EDDS 处理组. 此外, 放线菌门(Actinobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和酸杆菌门(Acidobacteria)相对丰度也较高, 分别为 8.06%~8.78%、5.75%~8.26% 和 5.60%~6.47%, 不同处理相对丰度不同, 但差异未达显著水平($P>0.05$). 此外, 在其他相对丰度较小的细菌门类中, 各处理间的差异不显著.

在属水平上, 土壤所有测序结果中 OTU 平均相对丰度 $>1\%$ 的属有 10 个. 除其他(other, 丰度小于 1% 的物种的集合)和未分类(unclassified, 数据库中未收录)的细菌类群外, 最优势属均为鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*) [图 2(b)], 其相对丰度为 7.30%~8.82%, 各处理之间无显著差异; 次优势属均为 *Ohtaekwangia* 属, 其相对丰度为 3.39%~

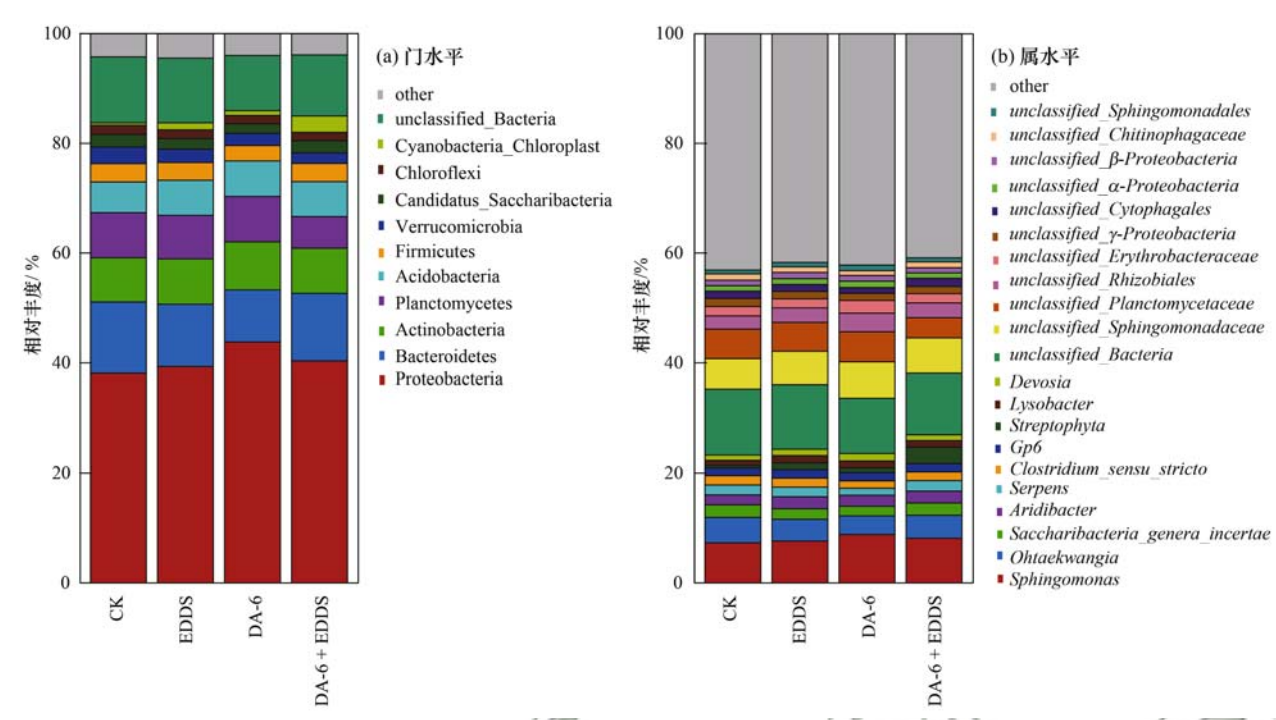


图 2 不同处理条件下土壤细菌门水平和属水平相对丰度

Fig. 2 Relative abundance of the taxonomic composition of the bacterial communities at the phylum level and genus level in soil under different treatments

4. 64%,各处理间差异也不显著.本研究还发现,DA-6 + EDDS 处理组土壤 *Streptophyta* 属和 DA-6 处理组土壤 *Devosia* 属相对丰度显著高于 EDDS 处理组,而添加 EDDS 使土壤 *Lysobacter* 属相对丰度显著低于其余 3 个处理($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 DA-6 和 EDDS 对龙葵生长的影响

龙葵的生长状况是决定其对土壤中 Cd 提取总量的一大因素,主要通过株高、鲜重和干重等指标来反映.刘金等^[27]的研究发现,施用 EDDS 会使植物在生长过程中出现茎秆细和叶片小等现象,进而不同程度地降低生物量.在本研究中,与对照相比,单独施用 EDDS 并未对龙葵生长产生明显影响,可能是因为本研究中所采用的螯合剂浓度较低,其本身对龙葵的毒害作用以及所活化的 Cd 对龙葵的胁迫作用不明显^[28].本研究还发现,单独添加 DA-6 后,龙葵的株高和鲜重较对照均有显著提高,这是因为喷施 DA-6 一方面提高了龙葵的叶绿素含量,促进了龙葵的光合作用^[29];另一方面增加了龙葵叶片的抗氧化酶活性,降低了丙二醛含量,使活性氧(ROS)对质膜的破坏作用得到抑制,进而增强了龙葵的抗逆性^[30~32].此外,DA-6 + EDDS 处理组龙葵地上部鲜重较对照显著增加了 19.57%,与单施 DA-6 处理组差异不显著,说明两者联用后并未对 DA-6 本身的促进效果产生明显影响.

3.2 DA-6 和 EDDS 对龙葵地上部 Cd 吸收的影响

龙葵地上部对 Cd 的吸收状况是影响其对土壤中 Cd 植物提取效率的另一大因素.施加适量 DA-6 或 EDDS 能显著提高土壤重金属有效性,促进植物的吸收,这已经在许多研究上得到证实^[33,34],本研究也得到了相似的结论.无论 DA-6 和 EDDS 单独或联合施用,土壤有效态 Cd 含量均显著高于对照.因此,添加 DA-6 和 EDDS 后,龙葵地上部 Cd 含量有不同程度的提高.其中 DA-6 的作用机制可能是因为促进了龙葵根系生长,分泌更多的有机酸,降低了土壤 pH,通过溶解作用和解吸作用使土壤有效态 Cd 含量得到增加^[35,36];而 EDDS 作为一种螯合剂,可以和土壤中的 Cd 离子结合形成配位基,增加土壤 Cd 的流动性,进而也提高了其生物有效性^[37,38].植物对重金属的提取量是综合考虑植物生长情况和重金属吸收情况后,用于评价植物修复效果的重要指标.在本研究中,单独施用 DA-6 和 EDDS 后龙葵地上部 Cd 提取量分别较对照显著增加了 39.42% 和 30.17%,将两者联用后,增幅达 51.04%.表明 DA-6 和 EDDS 发挥了协同效应,在促进龙葵生长的同时还提高了对 Cd 的富集,进而提高了对 Cd 污染土壤的修复效率.

3.3 DA-6 和 EDDS 对土壤细菌群落的影响

本研究采用 Shannon 指数、ACE 指数和 Simpson 指数来分别反映土壤中细菌群落的多样性、物种丰富度和优势度.结果显示与对照组相比,

EDDS 处理组土壤细菌群落的 ACE 指数显著降低,而 Simpson 指数显著增加.表明 EDDS 添加后,土壤细菌的丰富度和多样性有所下降.原因是细菌对 EDDS 的毒性具有较强的响应,再加上土壤 Cd 被活化以后,增加了对细菌的胁迫^[39].将 DA-6 和 EDDS 联用后,细菌群落 ACE 指数和 Simpson 指数又变化为和对照组差异不显著.说明两者联合施用后,土壤环境相对单独施用 EDDS 而言有所改善,细菌群落的多样性得到恢复.这点从 Venn 图上 EDDS 处理组 OTU 总数以及各自特有的 OTU 占总 OTU 的比例均低于对照组和 DA-6 + EDDS 处理组得以进一步证实.

对土壤中细菌群落物种分布进行了分析,结果表明在门水平上,变形菌门(Proteobacteria)在所有处理上丰度均为最高,这与相关学者的研究结果是相同的^[40,41].变形菌门外膜主要由脂多糖组成,保护内部遗传物质不受外部干扰,因此可以在大多数环境条件下生存并繁殖,成为优势菌^[42].拟杆菌门是有机碳的主要矿化者^[43],在退化土地生态恢复过程中可以增加有机碳的含量,并为其他微生物及土壤酶活性提供能量,影响其他养分的含量,是本研究中的第二大菌门.此外,放线菌门(Actinobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和酸杆菌门(Acidobacteria)相对丰度也较高,大于 5%.在属的水平上,各处理均以鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)丰度最高,表明该属具有繁殖速度快、对贫营养或污染环境的生长适应性强等特点^[44].溶杆菌属(*Lysobacter*)细菌具有很强的溶菌抑菌效果,对多种植物病原真菌、细菌及线虫等都具有较强的拮抗活性^[45].在本研究中,添加 EDDS 处理组土壤溶杆菌属相对丰度较对照显著下降,表明 EDDS 添加降低了土壤有益菌群的数量,对龙葵生长产生不利影响.而将 DA-6 和 EDDS 联用后,不仅使该菌属相对丰度恢复到和对照接近的水平,还使土壤中与有机质分解、固氮等功能相关的 *Streptophyta* 属细菌相对丰度显著增加^[46],是土壤生态环境逐步变健康的标志.

4 结论

(1)单独施用 DA-6 以及 DA-6 与 EDDS 联合施用可显著提高龙葵叶片叶绿素含量和抗氧化酶活性,进而促进龙葵的生长;

(2)添加 DA-6 或 EDDS 均能提高土壤 Cd 有效性,促进龙葵地上部对 Cd 的吸收.其中 DA-6 和 EDDS 联合施用条件下,龙葵地上部 Cd 提取量最高,较对照显著增加了 51.04%;

(3)单独施用 EDDS 会降低土壤细菌群落多样性,使有益菌属相对丰度减少.将 DA-6 与 EDDS 联用后,细菌群落多样性和分类学组成恢复到对照组水平.

参考文献:

- [1] 曾星,李伟亚,陈章,等.龙葵修复镉污染土壤的研究进展[J].草业科学,2019,36(5):1308-1316.
Zeng X, Li W Y, Chen Z, et al. *Solanum nigrum* mediated remediation of Cd contaminated soil[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1308-1316.
- [2] 陈颖,刘柿良,杨容子,等.镉胁迫对龙葵生长、质膜 ATP 酶活性及氮磷钾吸收的影响[J].应用与环境生物学报,2015,21(1):121-128.
Chen Y, Liu S L, Yang R J, et al. Effects of cadmium on growth, plasma membrane ATPase activity, and absorption of N, P and K in *Solanum nigrum* L. seedlings[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2015, 21(1): 121-128.
- [3] Cao X R, Wang X Z, Lu M, et al. The Cd phytoextraction potential of hyperaccumulator *Sedum alfredii*-oilseed rape intercropping system under different soil types and comprehensive benefits evaluation under field conditions[J]. Environmental Pollution, 2021, 285, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117504.
- [4] Sun S, Zhou X F, Cui X Y, et al. Exogenous plant growth regulators improved phytoextraction efficiency by *Amaranthus hypochondriacus* L. in cadmium contaminated soil[J]. Plant Growth Regulation, 2020, 90(1): 29-40.
- [5] 刘伟,张永波,贾亚敏.重金属污染农田植物修复及强化措施研究进展[J].环境工程,2019,37(5):29-33,44.
Liu W, Zhang Y B, Jia Y M. Research progress of phytoremediation and strengthening measures for heavy metals contaminated farmland[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5): 29-33, 44.
- [6] Guo J K, Lv X, Jia H L, et al. Effects of EDTA and plant growth-promoting rhizobacteria on plant growth and heavy metal uptake of hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 88: 361-369.
- [7] 吴广美,王青玲,胡鹏杰,等.镉污染中性土壤伴矿景天修复的硫酸化及其微生物效应[J].土壤,2020,52(5):920-926.
Wu G M, Wang Q L, Hu P J, et al. Sulfur assisted cadmium phytoextraction by *Sedum Plumbizincicola* and its effect on microbial community in neutral paddy soil[J]. Soils, 2020, 52(5): 920-926.
- [8] He S Y, Guo H H, He Z L, et al. Effects of a new-type cleaning agent and a plant growth regulator on phytoextraction of cadmium from a contaminated soil[J]. Pedosphere, 2019, 29(2): 161-169.
- [9] 符继红,孙晓红,王吉德,等.植物激素定量分析方法研究进展[J].科学通报,2010,55(33):3163-3176.
Fu J H, Sun X H, Wang J D, et al. Progress in quantitative analysis of plant hormones[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(4): 355-366.
- [10] 陈立,王丹,龙婵,等.3种螯合剂对向日葵修复镉污染土壤的影响[J].环境科学与技术,2017,40(11):22-29.
Chen L, Wang D, Long C, et al. Effects of three chelating agents on rehabilitation of Cd-contaminated soil with sunflower[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(11): 22-29.
- [11] 覃建军,唐盛爽,蒋凯,等.螯合剂 GLDA 对象草修复镉污

- 染农田的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3862-3869.
- Qin J J, Tang S S, Jiang K, *et al.* Effects of chelate GLDA on the remediation of cadmium contaminated farmland by *Pennisetum purpureum* Schum [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3862-3869.
- [12] 白薇扬, 高焕方, 赵清华. 生物螯合剂 EDDS 与非生物螯合剂 EDTA 联合施用下植物提取土壤重金属及潜在环境风险[J]. 地球与环境, 2013, **41**(6): 631-637.
- Bai W Y, Gao H F, Zhao Q H. Extraction of heavy metals in soils by plants in the case of joint application of biotic chelating agent EDDS and non-biotic chelating agent EDTA and potential environmental risk [J]. Earth and Environment, 2013, **41**(6): 631-637.
- [13] 王雷, 何闪英, 李阿南, 等. MGDA 与 DA-6 强化黑麦草对 Cd 污染土壤的修复作用[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(3): 134-140, 146.
- Wang L, He S Y, Li A N, *et al.* MGDA and DA-6 enhanced ryegrass to phytoextract Cd from contaminated soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(3): 134-140, 146.
- [14] Chen L, Long C, Wang D, *et al.* Phytoremediation of cadmium (Cd) and uranium (U) contaminated soils by *Brassica juncea* L. enhanced with exogenous application of plant growth regulators [J]. Chemosphere, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125112.
- [15] 肖艳辉, 李应文, 邹碧, 等. 不同浓度胺鲜酯对籽粒苋富集重金属镉的影响[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(12): 2433-2437.
- Xiao Y H, Li Y W, Zou B, *et al.* Effect of DA-6 at different concentrations on Cd and Zn accumulation by heavy metal hyperaccumulator *Amaranthus hypochondriacus* L. [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(12): 2433-2437.
- [16] 郑黎明, 张杰, 杨红飞, 等. EDDS 对 Cd、Pb 污染下藜生长、重金属积累及修复土壤能力的影响[J]. 河南农业科学, 2017, **46**(8): 61-66.
- Zheng L M, Zhang J, Yang H F, *et al.* Effects of EDDS on growth, heavy metals accumulation of *Miscanthus sacchiflorus* and its remediation capability to contaminated soils under Cd, Pb pollution [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, **46**(8): 61-66.
- [17] 裘希雅, 孙小峰, 何旭华, 等. 施用 EDDS 对海州香薷铜锌吸收的强化作用及淋溶风险[J]. 浙江农业学报, 2006, **18**(2): 86-89.
- Qiu X Y, Sun X F, He X H, *et al.* Enhancement of EDDS on Cu and Zn uptake by *Elsholtzia splendens* and its environmental risk [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2006, **18**(2): 86-89.
- [18] 刘梦娇, 邓清文, 胡丽, 等. 四种氮肥对海甘蓝 (*Crambe abyssinica*) 富集镉锌效应及根际土壤细菌群落特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(3): 1148-1154.
- Liu M J, Deng Y W, Hu L, *et al.* Effect of the 4 nitrogen fertilizers on the rhizospheric soil bacterial communities and the uptake of Ca and Zn by *Crambe abyssinica* [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, **17**(3): 1148-1154.
- [19] Zhang M Y, Wang J, Bai S H, *et al.* Assisted phytoremediation of a co-contaminated soil with biochar amendment: contaminant removals and bacterial community properties [J]. Geoderma, 2019, **348**: 115-123.
- [20] Visioli G, D'Egidio S, Sanangelantoni A M. The bacterial rhizobiome of hyperaccumulators: future perspectives based on omics analysis and advanced microscopy [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, **5**, doi: 10.3389/fpls.2014.00752.
- [21] He S Y, Wu Q L, He Z L. Growth-promoting hormone DA-6 assists phytoextraction and detoxification of Cd by ryegrass [J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, **17**(6): 597-603.
- [22] 张磊. 螯合剂强化棉花对镉污染土壤修复的初步研究[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(4): 321-326.
- Zhang L. Preliminary study on chelate-enhanced phytoremediation of cadmium-contaminated soil by cotton plants [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(4): 321-326.
- [23] Jiang Q Y, Tan S Y, Zhuo F, *et al.* Effect of *Funneliformis mosseae* on the growth, cadmium accumulation and antioxidant activities of *Solanum nigrum* [J]. Applied Soil Ecology, 2016, **98**: 112-120.
- [24] 陈刚, 李胜. 植物生理学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [25] Uroz S, Oger P, Tisserand E, *et al.* Specific impacts of beech and norway spruce on the structure and diversity of the rhizosphere and soil microbial communities [J]. Scientific Reports, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep27756.
- [26] Hou J Y, Liu W X, Wang B B, *et al.* PGPR enhanced phytoremediation of petroleum contaminated soil and rhizosphere microbial community response [J]. Chemosphere, 2015, **138**: 592-598.
- [27] 刘金, 殷宪强, 孙慧敏, 等. EDDS 与 EDTA 强化苧麻修复镉铅污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(7): 1293-1300.
- Liu J, Yin X Q, Sun H M, *et al.* EDTA and EDDS enhanced remediation of Cd and Pb contaminated soil by ramie (*Boehmeria nivea*) [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(7): 1293-1300.
- [28] Marques A P G C, Oliveira R S, Samardjieva K A, *et al.* EDDS and EDTA-enhanced zinc accumulation by *Solanum nigrum* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi grown in contaminated soil [J]. Chemosphere, 2008, **70**(6): 1002-1014.
- [29] 于彩莲, 刘波, 徐鑫. DA-6 强化龙葵修复高镉污染土壤的作用[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(16): 3485-3490.
- Yu C L, Liu B, Xu X. Effect of DA-6 on enhanced remediation efficiency of *Solanum nigrum* L. in serious cadmium polluted soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **44**(16): 3485-3490.
- [30] 于爽, 高剑, 于洋, 等. 混合盐碱胁迫对龙葵幼苗生理生化特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, **47**(18): 164-167.
- [31] Soares C, de Sousa A, Pinto A, *et al.* Effect of 24-epibrassinolide on ROS content, antioxidant system, lipid peroxidation and Ni uptake in *Solanum nigrum* L. under Ni stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, **122**: 115-125.
- [32] 周蛟, 韩盼盼, 潘远智, 等. Cd 胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(1): 26-34.
- Zhou J, Han P P, Pan Y Z, *et al.* Effects of cadmium stress on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence in *Solanum nigrum* and *Solanum americanum* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(1): 26-34.
- [33] 王正, 孙兆军, Mohamed S, 等. 胺鲜酯与螯合剂 GLDA 联合强化柳枝稷吸收积累镉效果[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5589-5599.
- Wang Z, Sun Z J, Mohamed S, *et al.* DA-6 and GLDA enhanced *Panicum virgatum* L. to phytoextract Cd from contaminated soils [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12):

- 5589-5599.
- [34] Attinti R, Barrett K R, Datta R, *et al.* Ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) enhances phytoextraction of lead by vetiver grass from contaminated residential soils in a panel study in the field[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 524-533.
- [35] 宋宇超. 复合型植物源活化剂强化植物提取修复重金属污染土壤及其效果评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Song Y C. The enhancement of compound plant-derived activator on phytoextraction and its effects evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [36] 曹雪莹, 谭长银, 谢雨呈, 等. 土壤 pH 和 Cd 全量对伴矿景天修复效率的影响[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(9): 1604-1612.
Cao X Y, Tan C Y, Xie Y C, *et al.* Effect of soil pH and total cadmium concentration of soil on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1604-1612.
- [37] Diarra I, Kotra K K, Prasad S. Assessment of biodegradable chelating agents in the phytoextraction of heavy metals from multi-metal contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128483.
- [38] 邢维芹, 陈小亚, 毛凯, 等. 石灰性污染土壤中重金属镉、铅的活化研究[J]. *土壤通报*, 2021, **52**(1): 185-191.
Xing W Q, Chen X Y, Mao K, *et al.* Activation of heavy metals Cd and Pb in contaminated calcareous soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(1): 185-191.
- [39] Yang L, Wang G P, Cheng Z N, *et al.* Influence of the application of chelant EDDS on soil enzymatic activity and microbial community structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 561-570.
- [40] Pradhan S K, Singh N R, Kumar U, *et al.* Illumina MiSeq based assessment of bacterial community structure and diversity along the heavy metal concentration gradient in Sukinda chromite mine area soils, India[J]. *Ecological Genetics and Genomics*, 2020, **15**, doi: 10.1016/j.egg.2020.100054.
- [41] Pei Y X, Yu Z S, Ji J, *et al.* Microbial community structure and function indicate the severity of chromium contamination of the yellow river[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.00038.
- [42] 邵宗圆, 王悦, 张菊, 等. 耐铜植物茵陈蒿根际细菌群落结构及影响因素[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7679-7688.
Shao Z Y, Wang Y, Zhang J, *et al.* The bacterial community structure associated with a copper-tolerant plant, *Artemisia capillaries* Thunb., and its influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7679-7688.
- [43] 戴雅婷, 闫志坚, 解继红, 等. 基于高通量测序的两种植被恢复类型根际土壤细菌多样性研究[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(3): 735-748.
Dai Y T, Yan Z J, Xie J H, *et al.* Soil bacteria diversity in rhizosphere under two types of vegetation restoration based on high throughput sequencing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(3): 735-748.
- [44] 张颖, 杨悦, 韦庆慧, 等. 鞘氨醇单胞菌的特性及应用研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2021, **38**(3): 6-13.
Zhang Y, Yang Y, Wei Q H, *et al.* Research progress in characteristic and application of *Sphingomonas*[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2021, **38**(3): 6-13.
- [45] Hayward A C, Fegan N, Fegan M, *et al.* *Stenotrophomonas* and *Lysobacter*: ubiquitous plant - associated *gamma* - proteobacteria of developing significance in applied microbiology [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, **108**(3): 756-770.
- [46] Karsten U, Holzinger A. Light, temperature, and desiccation effects on photosynthetic activity, and drought-induced ultrastructural changes in the green alga *Klebsormidium dissectum* (Streptophyta) from a high alpine soil crust [J]. *Microbial Ecology*, 2012, **63**(1): 51-63.

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, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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-ni, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qi, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)