

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单	梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国 (4767)
中国水泥排放清单及分布特征	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞 (4776)
环境空气 PM _{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立: 以长三角地区为例	张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹 (4786)
南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征	张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程 (4803)
郑州市 PM _{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析	张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹 (4813)
山西大学城 PM _{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估	李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇 (4825)
2000~2019 年中国 PM _{2.5} 时空演化特征	夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富 (4832)
北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异	尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军 (4844)
基于天气背景天津大气污染输送特征分析	蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐 (4855)
基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠 (4864)
基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源	孙佳宁, 谢绍东 (4874)
芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析	高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜 (4885)
密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应	张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双 (4895)
北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探	陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫 (4905)
2009~2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素	辛华荣, 朱广伟, 王雪松, 李骏, 陆隽 (4914)
雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征	张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆 (4924)
基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪	孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强 (4936)
会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价	李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一 (4948)
太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征	张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程 (4958)
强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海 (4970)
长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序	苏超, 崔严 (4981)
嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价	杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷 (4989)
污水处理厂对漓江桂林市城区河段淡水生物中微塑料累积的影响	谢元汕, 张清科, 张滴杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳 (4999)
村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律	卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送 (5008)
冬季小流域水体微生物多样性及影响因素	朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌 (5016)
水库热分层沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响	王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇 (5027)
长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析	韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣 (5037)
类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响	郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟 (5050)
基于决策树的城市黑臭水体遥感分级	李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰 (5060)
纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制	潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金鑫, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英 (5073)
温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N ₂ O 释放的影响	王丝可, 于恒, 左剑恶 (5082)
以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A ² /O 污染物去除特性	荣懿, 邵劲博, 于优城, 石炬, 金鹏康 (5089)
不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (5097)
中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响	田中科, 王芬, 闫钊 (5106)
基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价	韩琳, 徐夕博 (5114)
再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险	沈城, 刘馥雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛 (5125)
有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因子	侯静雯, 施维林, 高娟 (5133)
硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英 (5143)
叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响	闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰 (5151)
重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应	王晓宇, 韩辉 (5160)
油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响	赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君 (5168)
氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响	张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔 (5176)
生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及其细菌群落结构的变化	曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋 (5185)
铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响	贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰 (5193)
典型水环境微生物源异嗅物研究进展	张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥 (5201)
广告: 国家微生物科学数据中心	(前插)
《环境科学》征订启事 (4785) 《环境科学》征稿简则 (4947) 信息 (5015, 5124, 5132)	

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响

闫秀秀^{1,2}, 徐应明^{1,2}, 王林^{1,2*}, 陶雪莹^{1,2}, 孙约兵^{1,2}, 梁学峰^{1,2}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部产地环境污染防治重点实验室, 天津 300191)

摘要: 为揭示镉(Cd)低积累作物与超富集植物间作对Cd污染土壤安全利用和提取修复的作用,通过盆栽试验,将两种Cd累积能力不同的叶用油菜(*Brassica chinensis* L., 低积累油菜华骏和普通油菜寒绿)与4种孔雀草(*Tagetes patula* L., 矮秆红花、矮秆黄花、高秆红花和高秆黄花)间作,研究间作措施对两类植物生长、光合作用参数、Cd累积以及土壤有效态Cd和可溶性有机碳(DOC)含量的影响。结果表明,与单作相比,间作后油菜生物量显著降低,孔雀草生物量显著升高。间作处理中油菜叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率较单作均显著降低。华骏与矮秆红花间作时,华骏地上部Cd含量较单作显著降低14.5%,矮秆红花地上部Cd含量显著增加36.5%;其余间作处理下油菜地上部Cd含量均显著升高或无显著变化,而孔雀草地上部Cd含量无显著变化。间作处理下,油菜地上部Cd累积量较单作处理显著降低,孔雀草地上部Cd累积量显著升高。间作处理下土壤Cd提取率与孔雀草单作处理无显著差异。油菜地上部Cd含量与土壤有效态Cd以及DOC含量分别呈极显著和显著的正相关关系。总之,Cd低积累油菜华骏与孔雀草矮秆红花间作组合表现最佳,在Cd污染菜地土壤的修复和安全利用中有较好的应用价值。

关键词: 镉(Cd); 间作; 孔雀草; 叶用油菜; 植物提取修复

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5151-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004245

Effects of Intercropping of *Brassica chinensis* L. and *Tagetes patula* L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants

YAN Xiu-xiu^{1,2}, XU Ying-ming^{1,2}, WANG Lin^{1,2*}, TAO Xue-ying^{1,2}, SUN Yue-bing^{1,2}, LIANG Xue-feng^{1,2}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China, 2. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to reveal the effects of intercropping a low-cadmium (Cd) accumulating cultivar and a Cd hyperaccumulator on the safe utilization and phytoextraction of Cd-polluted soils. Two cultivars of *Brassica chinensis* L. (the low-Cd accumulating cultivar Huajun, and the common cultivar Hanli), were intercropped with four cultivars of *Tagetes patula* L. (Dwarf Red, Dwarf Yellow, Tall Red, and Tall Yellow). We examined the biomass, photosynthetic characteristics, and Cd accumulation in the plants and available Cd content and dissolved organic carbon (DOC) content in the soils. The results show that under the intercropping treatments, the biomass of *B. chinensis* decreased significantly and those of *T. patula* increased significantly, compared with the monoculture treatments. When intercropped with *T. patula*, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate in the leaves of *B. chinensis* decreased significantly, compared with the monoculture treatments. When Huajun was intercropped with Dwarf Red, the shoot Cd content of Huajun significantly decreased by 14.5%, and that of Dwarf Red increased significantly by 36.5% compared with the monoculture. Under the other intercropping treatments, the shoot Cd content of *B. chinensis* increased significantly, or showed no significant change, and that of *T. patula* showed no significant change. Under the intercropping treatments, the total amount of Cd in the shoot of *B. chinensis* decreased significantly, and that of *T. patula* increased significantly, compared with the monoculture. There were no significant differences in the Cd extraction ratios between the intercropping treatments and the monoculture of *T. patula*. The shoot Cd content of *B. chinensis* was significantly correlated with soil available Cd content and DOC content ($P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively). In conclusion, the intercropping treatment of Huajun and Dwarf Red significantly reduced shoot Cd content in *B. chinensis* and increased that in *T. patula*, and it did not affect the Cd extraction ratio. This is suitable for the safe utilization and phytoextraction of Cd-polluted soils.

Key words: cadmium (Cd); intercropping; *Tagetes patula*; *Brassica chinensis*; phytoextraction

各种人类活动引起的土壤重金属镉(Cd)污染已成为一个严重的环境问题^[1,2]。据调查,我国土壤Cd污染点位超标率高达7.0%,其中轻微和轻度污染点位占比达6.0%^[3]。土壤中的镉具有迁移性强、毒性高和难以清除的特点,易通过食物链危害动物和人体健康^[4,5]。因此加强对土壤Cd污染,特别是农田Cd污染的修复研究具有重要的现实意义。近年来,采用植物提取修复技术,即种植重金属超富集/富集植物来修复中低污染水平的土壤引起人们

的关注。该方法具有易实施、环境友好以及可改良土壤等优点,已成为修复农田重金属污染的有效方法之一^[6]。然而由于修复周期较长,在修复过程中休

收稿日期: 2020-04-28; 修订日期: 2020-05-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800203); 天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC34000); 国家自然科学基金项目(41571322)

作者简介: 闫秀秀(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属修复,E-mail: yxiuxiu2019@163.com

* 通信作者,E-mail: wanglin2017@caas.cn

耕导致收益降低,单一开展植物提取修复无法适应我国人多地少的国情。

近年来,通过重金属富集/超富集植物与农作物间作,利用二者在根际和地上部的交互作用,在提取土壤中重金属的同时降低作物重金属累积,可以实现对重金属污染农田的边生产边修复,已发展成为一种极具潜力的重金属污染农田修复和安全生产的方法^[7~9]。张佳等^[10]的研究表明,将黑麦草(*Lolium perenne*)与小麦(*Triticum aestivum*)间作,在收获期黑麦草根 Cd 含量较单作提高 26%,而小麦茎、叶及籽粒 Cd 含量则降低 13%~36%。谭建波等^[11]也发现,续断菊(*Sonchus asper*)与玉米(*Zea mays*)间作后,续断菊根部 Cd 含量增加 16.88%,玉米籽粒中的 Cd 含量显著降低。然而有研究表明,在富集植物小花南芥(*Arabis alpina*)与蚕豆(*Vicia faba*)间作时,蚕豆的地上部和根部 Cd 含量比单作时显著升高^[12]。Deng 等^[13]的研究发现,酸枣(*Ziziphus acidojuba*)与白花鬼针草(*Bidens pilosa*)间作后,酸枣地上部 Cd 含量比单作时增加 62.2%。综上可知,在间作体系中,不同的植物组合对二者累积重金属有不同的影响,要确保植物提取修复效率不降低,同时减少作物重金属累积,选择合适的富集/超富集植物与农作物组合较为重要。

近年来的研究发现,观赏植物在重金属污染土壤的植物修复方面具有较大应用潜力,而且利用观赏植物治理土壤污染同时可美化环境,易于被公众接受^[14,15]。孔雀草(*Tagetes patula*)是一种菊科草本花卉,常用作景观和道路美化,环境适应性较强。有研究表明,孔雀草对镉有较强的耐性和累积能力,是一种镉超富集植物^[16,17]。Sun 等^[18]的研究发现,不同品种的孔雀草对镉的累积能力存在显著差异。鉴于此,本研究选择 4 个不同品种的孔雀草与两种镉累积能力不同的叶用油菜(*Brassica chinensis*)间作,考察间作措施对两类植物生长、光合作用、镉累积以及土壤 Cd 提取效果的影响,筛选能够兼顾植物提取修复和 Cd 污染土壤安全利用的最佳间作组合,并通过分析土壤有效态 Cd 和可溶性有机碳(DOC)含量的变化规律,探究间作处理影响两类植物 Cd 累积的作用机制,以期为 Cd 污染农田的边生产边修复提供方法参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与植物

供试土壤取自河南济源市某 Cd 污染农田,土壤类型为潮土。其基本理化性质如下: pH 值为 7.53,阳离子交换量为 13.13 cmol·kg⁻¹,总 Cd 含量

为 2.59 mg·kg⁻¹,有效态 Cd 含量(DTPA 法浸提)为 1.32 mg·kg⁻¹,有机质含量为 7.05 g·kg⁻¹,碱解氮含量为 81.26 mg·kg⁻¹,有效磷含量为 23.32 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 92.53 mg·kg⁻¹。供试叶用油菜为前期研究筛选的镉低积累品种华骏和普通品种寒绿^[19],种子由天津市农业科学院提供。供试镉超富集植物孔雀草选择 4 个栽培种:矮杆红花、矮杆黄花、高杆红花和高杆黄花(分别记作:Tp1、Tp2、Tp3 和 Tp4),其种子购自沈阳东亚种业有限公司。

1.2 实验设计

本实验设置叶用油菜单作处理 2 个(记作 Mono),孔雀草单作处理 4 个,以及 2 种油菜与 4 种孔雀草间作处理 8 个(分别记作:B-In-1、B-In-2、B-In-3 和 B-In-4),因此本实验共设有 14 个处理,每个处理设置 3 个重复。

盆栽试验于 2019 年 4~7 月在日光玻璃温室中进行,室内温度为 20~35℃,光照为自然光,盆栽器皿按照随机区组排列。供试土壤风干后过 5 mm 筛,然后装入塑料盆(长、宽和高分别为:40、20 和 15 cm)中,每盆装土 7.0 kg,同时施入分析纯的 CO(NH₂)₂(N 150 mg·kg⁻¹)和 K₂HPO₄(P₂O₅ 206 mg·kg⁻¹、K₂O 277 mg·kg⁻¹)作为底肥。每盆浇 1 000 mL 去离子水,稳定培养 7 d,然后播种。由于孔雀草发芽和出苗较慢,先播种孔雀草,待其出苗后再播种油菜。待植株长出 4 片真叶后进行间苗定植。油菜和孔雀草单作处理为每盆 2 行苗,每行 4 株,行距和行内株距都为 10 cm;间作处理为油菜和孔雀草各 1 行苗,每行各 4 株,行距和株距与单作相同。在植物生长过程中不定期浇去离子水,使土壤含水率保持在田间持水量的 70% 左右。在孔雀草播种 70 d 后收获全部植株。

1.3 测定指标和方法

收样前,选取油菜顶叶以下第 3 片完全展开的健康叶片,采用 Li-6400XT 光合仪(LI-COR Inc., USA)于晴天 09:00~11:00 测定叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(c_i)等指标。每盆取 5 片叶测定,测定位置为叶片中心。

收获的植物样分为地上部和根部,用去离子水和超纯水冲洗干净,自然晾干后在 105℃ 杀青 30 min,70℃ 烘干至恒重,称量干重,粉碎混匀。采用抖根法收集植物根际土样,自然风干,磨碎分别过 20 目和 100 目筛,备用。

植物样加入优级纯 HNO₃,土样加入优级纯 HNO₃ 和 HF,在电热消解仪(Digi-Block ED54,北京莱伯泰科仪器股份有限公司)上消解^[20]。土壤有效

态 Cd 采用 DTPA 法浸提^[21]. 植物和土壤样品消解液以及土壤有效态提取液中 Cd 含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICAPQc, Thermo Fisher Scientific, Germany)测定. 植物和土壤样品 Cd 含量分析的质量控制分别采用美国国家标准与技术研究院提供的菠菜叶标样 SRM1570a 和土壤标样 SRM2586, 测定结果显示 Cd 回收率均在 95%~105% 范围内. 土壤 DOC 含量测定方法为: 将 20 mL 超纯水加入到 4 g 土样中, 25℃ 下振荡浸提 2 h, 离心 20 min (4 000 r·min⁻¹), 取上清液过 0.45 μm 膜, 用总有机碳分析仪(multi N/C 3100, Jena, Germany)测定. 土壤基本理化性质按照土壤农化常规分析方法测定^[22].

1.4 数据计算与分析

为定量评价间作对油菜地上部生长的影响, 引入产量增加率(yield increase ratio, YIR), 即间作处理与单作处理油菜地上部生物量的比值, 由公式(1)计算; 为定量评价间作对油菜镉累积的影响, 引入重金属减少率(metal decrease ratio, MDR), 即间作处理与单作处理油菜地上部 Cd 含量的比值, 由公式(2)计算^[23]. 另外引入镉提取率(cadmium extraction ratio, CER)来反映植物对盆中土壤镉的提取修复效果, 采用公式(3)计算.

$$YIR = Y_{BI}/Y_{BM} \quad (1)$$

式中, Y_{BI} 为间作地上部单株生物量(g), Y_{BM} 为单作地上部单株生物量(g).

$$MDR = C_{BI}/C_{BM} \quad (2)$$

式中, C_{BI} 为间作地上部 Cd 含量(mg·kg⁻¹), C_{BM} 为单作地上部 Cd 含量(mg·kg⁻¹).

$$CER = \frac{C_{shoot} \times M_{shoot}}{C_{soil} \times M_{soil} \times 1000} \times 100\% \quad (3)$$

式中, C_{soil} 为土壤中 Cd 含量(mg·kg⁻¹), M_{soil} 为土壤质量(kg), C_{shoot} 为植物地上部 Cd 含量(mg·kg⁻¹), M_{shoot} 为植物地上部生物量(g).

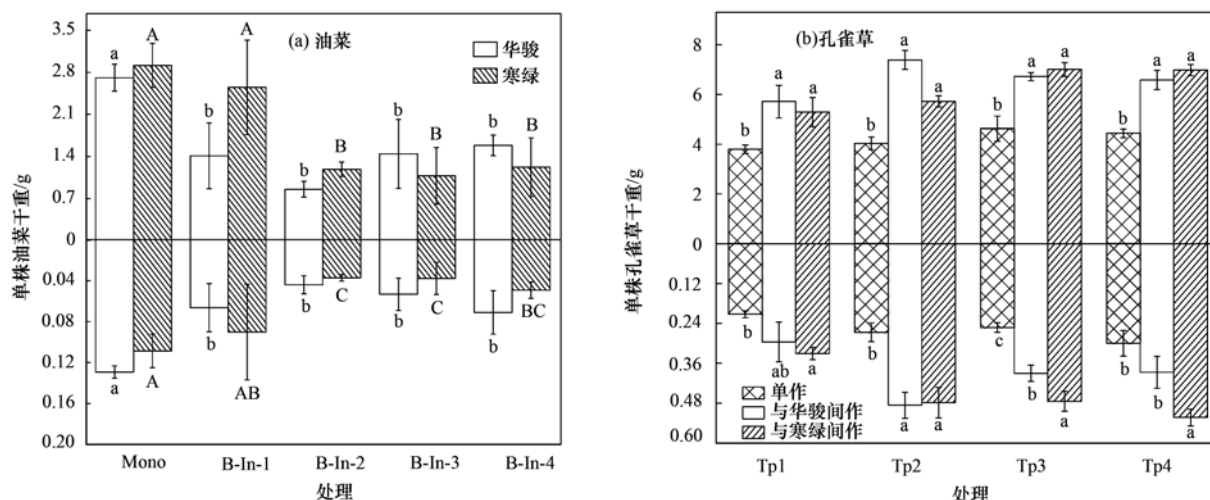
本实验数据采用 SPSS20 软件进行统计分析. 采用单因素方差分析和新复极差法(Duncan 法)分析不同处理间相关指标的差异显著性, 采用 Pearson 相关系数法分析不同参数间的相关性.

2 结果与分析

2.1 不同处理下孔雀草和油菜生物量

间作处理对两类植物的生长有不同影响. 由图 1(a)可知, 和单作处理相比, 与孔雀草间作后 Cd 低积累油菜华骏的地上部和根部生物量均显著降低($P < 0.05$), 降低幅度分别为 41.6%~68.5% 以及 45.3%~66.1%, 各间作处理间没有显著差异. 普通油菜寒绿在与孔雀草 Tp2、Tp3 以及 Tp4 间作后, 与单作处理相比, 地上部和根部生物量也显著降低($P < 0.05$), 降幅分别为 58.2%~63.0% 以及 55.1%~66.1%; 寒绿与 Tp1 间作后地上部和根部生物量则没有显著变化. 另外, 由表 1 可知, 华骏在不同间作处理下 YIR 无显著性差异, 寒绿与 Tp2、Tp3 和 Tp4 间作时 YIR 显著低于 Tp1 间作处理($P < 0.05$).

由图 1(b)可知, 不同品种的孔雀草与华骏间作后, 孔雀草地上部生物量与单作处理相比均显著升高($P < 0.05$), 增幅为 45.4%~83.2%, 其中 Tp2 增幅最大. 而孔雀草与寒绿间作后地上部生物量同样显著增加($P < 0.05$), 增幅为 39.2%~57.5%, 其中 Tp4 增幅最大. 与单作相比, Tp2 与 Tp3 的根部生物量在与华骏间作后显著增加($P < 0.05$), 增幅分别为 81.5% 和 56.1%, 而 Tp1 和 Tp4 在与华骏间作后



图中上半部分为地上部, 下部分为根部; (a) 中不同小写字母表示华骏不同处理间显著差异($P < 0.05$), 不同大写字母表示寒绿不同处理间显著差异($P < 0.05$); (b) 中不同小写字母表示同一品种孔雀草不同处理间显著差异($P < 0.05$)

图 1 不同处理下叶用油菜和孔雀草的干生物量

Fig. 1 Dry biomass of *Brassica chinensis* and *Tagetes patula* under different treatments

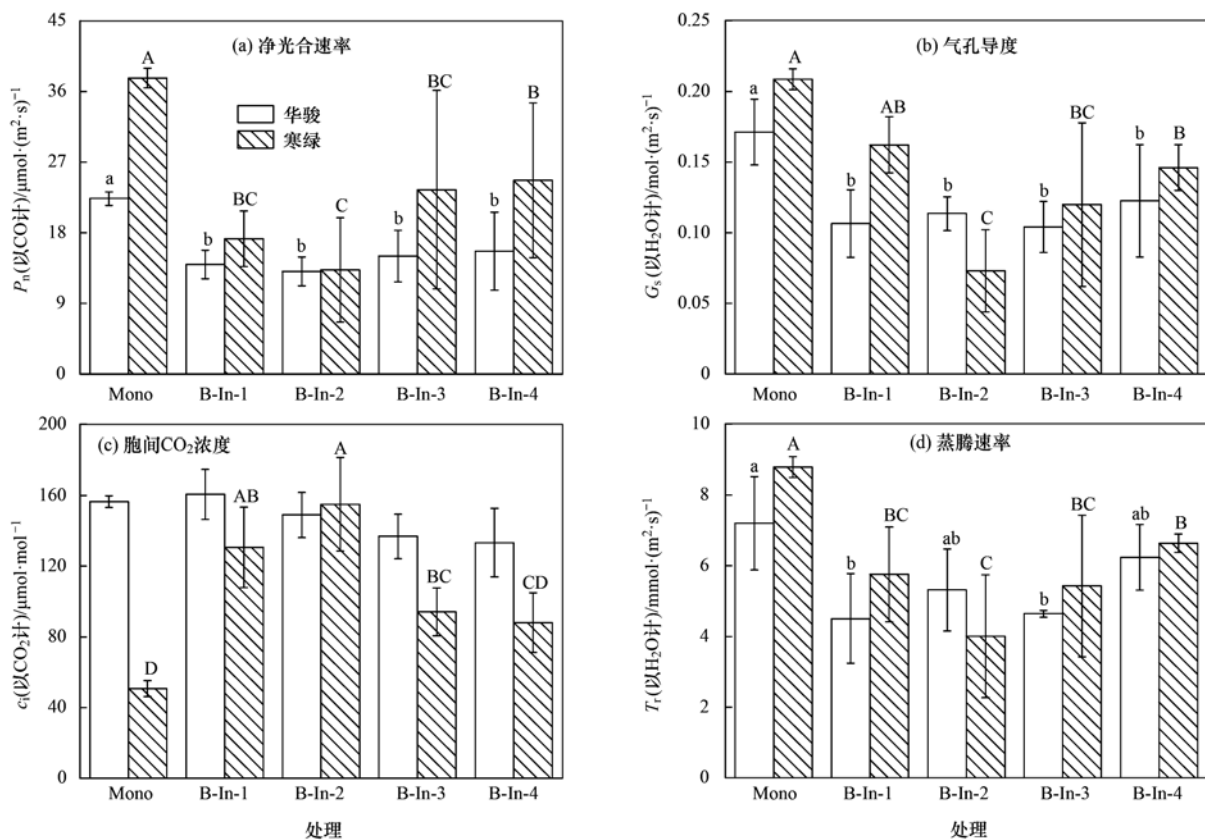
根部生物量虽有所增加,但是差异并不显著. 4 种孔雀草与寒绿间作后根部生物量均显著增加,增幅为 57.4%~89.9%.

总体上,孔雀草与油菜间作显著抑制油菜生长,同时明显促进孔雀草生长.

2.2 不同处理对油菜光合作用的影响

由图 2 可知,在与孔雀草间作后,华骏和寒绿的叶片 P_n 均显著低于单作处理,降幅分别为 30.0%~41.5% 和 34.6%~64.9%. 在间作处理中华骏叶片 G_s 显著降低,降幅为 28.3%~39.1%;而对于寒绿,

与 Tp1 间作时其叶片 G_s 无显著变化,其他间作处理中其 G_s 显著降低,降幅为 30.1%~65.1%. 在间作处理中华骏叶片 c_i 总体呈现降低趋势,但是变化并不显著;而寒绿在间作处理中 c_i 却呈现升高趋势,与 Tp1、Tp2 和 Tp3 间作后其 c_i 显著升高,增幅为单作处理的 0.74~2.06 倍. 华骏与 Tp1 和 Tp3 间作后叶片 T_r 显著降低,降幅分别为 37.4% 和 35.5%,而与 Tp2 与 Tp4 间作时虽有所降低,但是变化并不显著;而寒绿与 4 种孔雀草间作后,其叶片 T_r 均显著降低,降幅为 24.6%~54.5%.



图中不同小写字母表示华骏不同处理间显著差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示寒绿不同处理间显著差异 ($P < 0.05$)

图 2 不同处理下油菜光合作用参数

Fig. 2 Photosynthetic characteristics of *Brassica chinensis* under different treatments

综上可知,在间作处理中两种油菜的 P_n 、 G_s 以及 T_r 均明显降低,光合作用受到明显抑制. 寒绿叶片的 c_i 增加,这说明间作处理对其光合速率影响主要是由非气孔因素导致;而华骏在间作处理中 c_i 有所降低,这说明其光合速率降低主要由气孔导度降低引起^[24,25].

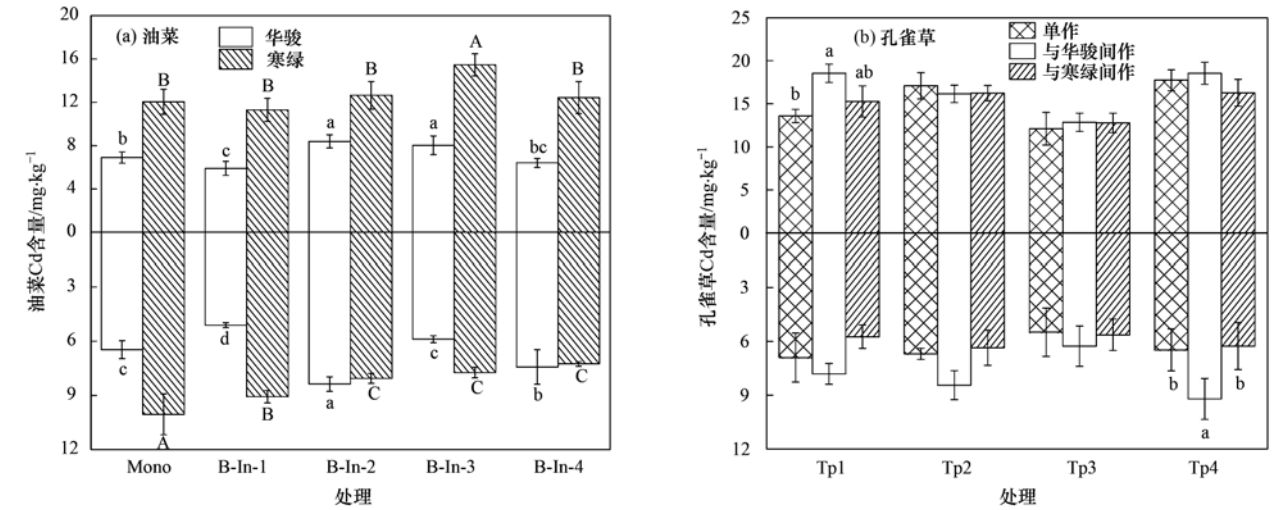
2.3 不同处理下油菜与孔雀草 Cd 含量

间作处理对两种油菜的镉累积有不同影响. 由图 3(a) 可知,对于华骏,与 Tp1 间作后其地上部 Cd 含量显著降低,降幅为 14.5%;而与 Tp2 和 Tp3 间作后其地上部 Cd 含量则显著升高,增幅分别为 23.3% 和 16.5%;与地上部相似,在与 Tp1

间作后华骏根部 Cd 含量较单作显著降低了 20.9%,而与 Tp2 和 Tp4 间作后华骏根部 Cd 含量则显著提高,增幅分别为 29.5% 和 14.8%. 对于寒绿,与 Tp3 间作后其地上部 Cd 含量较单作显著增加了 28.4%,而在其他 3 个间作处理中其地上部 Cd 含量均无显著变化;与地上部不同,间作处理下寒绿的根部 Cd 含量较单作均显著降低,降幅为 9.7%~27.8%. 另外,由表 1 可知,华骏与 Tp1 和 Tp4 间作后,其 MDR 显著低于与 Tp2 和 Tp3 间作处理,其中与 Tp1 间作时 MDR 最小,这与其地上部 Cd 含量的变化规律一致;而间作处理下寒绿的 MDR 无显著差异.

与油菜不同,间作处理对孔雀草体内镉含量影响较小[图3(b)].只有Tp1与华骏间作后,其地上部Cd含量较单作显著增加了36.5%,另外Tp4与华骏间作后,其根部Cd含量较单作显著增加42.8%,

其余间作处理下孔雀草体内镉含量均无显著变化.另外,双因素方差分析表明,4个孔雀草品种的地上部Cd含量存在显著差异,其大小顺序为:Tp4 > Tp2 > Tp1 > Tp3.



图中上半部分为地上部,下部分为根部;(a)中不同小写字母表示华骏不同处理间显著差异($P < 0.05$),不同大写字母表示寒绿不同处理间显著差异($P < 0.05$);(b)中不同小写字母表示同一品种孔雀草不同处理间显著差异($P < 0.05$)

图3 不同处理下叶用油菜和孔雀草的Cd含量

Fig. 3 Cd concentrations of *Brassica chinensis* and *Tagetes patula* under different treatments

表1 不同间作处理下油菜的产量增加率和重金属减少率¹⁾

Table 1 Yield increase ratio (YIR) and metal decrease ratio (MDR) for *Brassica chinensis* under different intercropping treatments

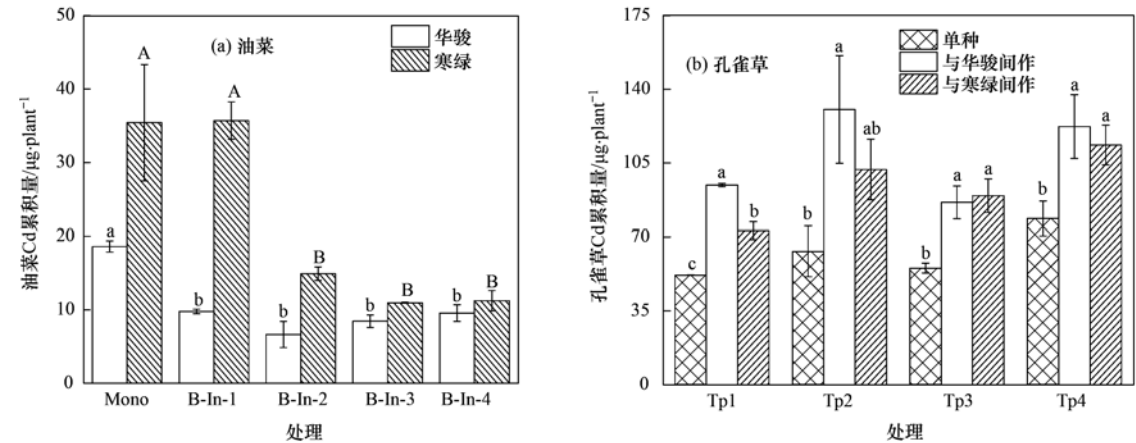
油菜品种	间作处理	YIR	MDR
华骏	B-In-1	0.521 ± 0.083	0.855 ± 0.093b
	B-In-2	0.315 ± 0.048	1.234 ± 0.069a
	B-In-3	0.533 ± 0.211	1.165 ± 0.124a
	B-In-4	0.584 ± 0.063	0.926 ± 0.042b
寒绿	B-In-1	0.874 ± 0.270a	0.937 ± 0.088
	B-In-2	0.407 ± 0.042b	1.050 ± 0.106
	B-In-3	0.371 ± 0.161b	1.283 ± 0.207
	B-In-4	0.419 ± 0.168b	1.031 ± 0.123

1) 表中数据为平均值 ± 标准差($n = 3$),同一列不同小写字母表示同一品种各处理间差异显著($P < 0.05$)

2.4 不同处理下油菜和孔雀草Cd累积量及镉提取率

由图4(a)可知,与孔雀草间作后华骏的地上部Cd累积量较单作显著降低,降幅为47.4%~64.3%;寒绿与Tp1间作后地上部Cd累积量无显著变化,在其他间作处理下,其地上部镉累积量均显著降低,降低幅度为57.8%~67.0%.

由图4(b)可知,4种孔雀草与华骏间作后,其地上部Cd累积量均显著升高($P < 0.05$),增幅为55.2%~106.3%.而在孔雀草与寒绿间作处理中,除了Tp2以外,其他3个品种地上部Cd累积量均显



(a)中不同小写字母表示华骏不同处理间显著差异($P < 0.05$),不同大写字母表示寒绿不同处理间显著差异($P < 0.05$);(b)中不同小写字母表示同一品种孔雀草不同处理间显著差异($P < 0.05$)

图4 不同处理下叶用油菜和孔雀草的地上部Cd累积量

Fig. 4 Cd accumulation in the shoots of *Brassica chinensis* and *Tagetes patula* under different treatments

著升高 ($P < 0.05$), 增幅为 40.4% ~ 61.6%.

本研究采用 Cd 提取率 (CER) 对不同处理的植物提取修复效果进行评价 (见表 2). 双因素方差分析结果显示, 不同孔雀草品种对 CER 有显著影响 ($P < 0.05$), 其大小顺序为: Tp4 > Tp2 > Tp1 > Tp3; 而不同种植处理对 CER 没有显著影响, 这表明间作处理和孔雀草单作处理的提取修复效率没有显著差异.

表 2 不同处理下植物 Cd 提取率¹⁾ / %

孔雀草品种	单作	与华骏间作	与寒绿间作	各品种均值
Tp1	2.66 ± 0.92	2.07 ± 0.19	2.39 ± 0.08	2.37 ± 0.54bc
Tp2	2.79 ± 0.63	2.95 ± 0.42	2.62 ± 0.29	2.79 ± 0.43ab
Tp3	2.38 ± 0.27	1.97 ± 0.18	2.42 ± 0.42	2.26 ± 0.34c
Tp4	3.28 ± 0.59	2.99 ± 0.32	2.80 ± 0.10	3.02 ± 0.40a

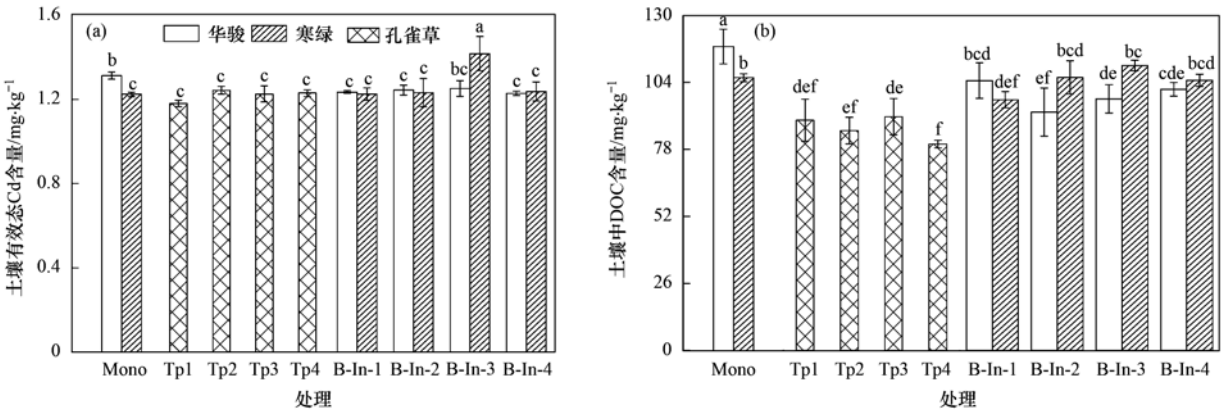
1) 不同小写字母表示各品种间差异显著 ($P < 0.05$); 方差分析结果 (P 值), 孔雀草品种、种植处理和二者交互作用分别为 0.003 3、0.276 5 和 0.604 5

2.5 不同处理下土壤中有效态 Cd 含量及 DOC 含量

图 5 (a) 给出了单作和间作处理下土壤有效态 Cd 含量. 对于华骏, 除与 Tp3 间作处理外, 其单作处理下土壤有效态 Cd 含量显著高于孔雀草单作和间作处理 ($P < 0.05$), 而其余处理间均无显著差异; 对于寒绿, 与 Tp3 间作处理下土壤有效态 Cd 含量显著高于单作处理, 而其他处理间也没有显著性差异.

由图 5 (b) 可知, 对于华骏, 单作处理下土壤

DOC 含量显著高于孔雀草单作和间作处理 ($P < 0.05$); 而与 Tp4 间作处理下 DOC 含量显著高于 Tp4 单作处理 ($P < 0.05$), 其余间作处理和孔雀草单作处理则无显著性差异. 对于寒绿, 单作处理下土壤 DOC 含量显著高于孔雀草单作处理 ($P < 0.05$); 与 Tp1 间作处理下 DOC 含量与 Tp1 单作处理没有显著差异, 而其余间作处理下 DOC 含量则显著高于对应孔雀草单作处理.



图中不同小写字母表示不同处理间显著差异 ($P < 0.05$)

图 5 不同处理下土壤中有效态 Cd 含量和可溶性有机碳 (DOC) 含量

Fig. 5 Available Cd content and dissolved organic carbon content (DOC) in soils under different treatments

3 讨论

3.1 间作处理对植物生长的影响

在间作系统中, 不同植物的地上部会竞争利用光照和热量, 这种竞争作用可能影响植物生长^[26]. 在本研究中, 绝大部分间作处理下, 两种油菜的地上部和根部生物量均比单作处理显著降低, 而 4 种孔雀草的生物量则显著升高. 相关性分析也发现 (表 3), 孔雀草的生物量和油菜的生物量以及 YIR 都呈极显著的负相关关系 ($P < 0.01$), 这表明在间作处理中, 孔雀草和油菜生长有明显的竞争关系, 这种竞争显著抑制油菜生长. 本研究同时发现, 在间作处理

中油菜叶片光合作用受到明显抑制, P_n 、 G_s 以及 T_r 均显著降低. 因此, 间作处理下, 孔雀草主要通过抑制油菜的光合作用影响其生长. 在本实验中孔雀草植株比油菜高大, 而且孔雀草播种早于油菜, 这就造成在生长的中后期孔雀草对油菜有明显的遮阴作用, 而光照强度直接影响了植物光合作用的强弱, 因此间作处理下油菜的光合作用和生长受到明显抑制. Lin 等^[27]的研究发现, 在镉胁迫条件下, 混种少花龙葵 (*Solanum photeino-carpum*) 和牛膝菊 (*Galinsoga parviflora*) 使树番茄 (*Cyphomandra betacea*) 幼苗的生物量和光合色素含量显著降低; 黄佳璟等^[28]在研究中也发现, 混种 4 种鬼针草属

(*Bidens* ssp.) 植物使葡萄(*Vitis vinifera*) 幼苗生物量和光合色素含量明显降低. 由此可知, 在间作系统中合理安排不同植物的种植时间和空间布局, 减少种间竞争, 是间作系统获得最佳收益的关键.

3.2 间作处理对植物 Cd 吸收的影响

在间作体系中, 超富集植物对普通作物 Cd 吸收的影响一方面表现为超富集植物活化土壤中的 Cd, 利于普通作物吸收; 另一方面由于超富集植物本身吸收 Cd 能力强, 会对土壤特别是根际区域的活性态 Cd 产生耗竭作用, 或者通过根系分泌有机酸或化感作用物质, 进而抑制普通作物吸收 Cd^[27]. 这两种作用在不同间作体系中强弱不同, 最终体现的效果也有所差异. 理想的间作组合不仅能有效降低普通作物对 Cd 的吸收累积, 同时也能提高超富集植物对 Cd 的吸收和提取, 从而实现 Cd 污染土壤上提取修复和安全生产双赢^[29,30]. 在本研究中, 仅在 Tp1 和华骏间作后, Tp1 的地上部 Cd 含量显著升高, 而华骏 Cd 含量显著降低, 因此该间作处理表现最佳. 另外, 相关性分析结果显示(表 3), 油菜地上

部 Cd 含量和孔雀草地上部与根部 Cd 含量, 油菜地上部 Cd 累积量与孔雀草 Cd 累积量, MDR 与孔雀草地上部 Cd 含量, 都呈现显著或极显著的负相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 这表明, 在间作处理中孔雀草可能通过根际互作显著抑制油菜对 Cd 的吸收累积.

超富集植物提取修复土壤 Cd 污染的效率主要取决于植物地上部的 Cd 含量、生物量以及生长速率^[31]. 相关性分析结果显示(表 3), 间作处理下 CER 与孔雀草地上部干重、地上部 Cd 含量以及地上部 Cd 累积量存在极显著的正相关关系($P < 0.01$), 而与油菜的生物量和 Cd 含量等指标无显著相关性, 这表明在间作处理中土壤 Cd 去除主要依靠孔雀草对 Cd 的吸收累积. 然而, 本研究也发现, 与孔雀草单作相比, 间作处理并没有显著降低 CER, 出现这一结果主要是在间作体系中, 孔雀草地上部生物量显著提高, 导致其 Cd 累积量显著增加, 从而弥补了一半植株变成油菜带来的 Cd 累积量降低.

表 3 间作处理中油菜和孔雀草生长和镉累积参数的相关系数¹⁾
Table 3 Correlation coefficients for the indexes of plant growth and Cd accumulation
in *Brassica chinensis* and *Tagetes patula* under intercropping treatments

	油菜地上部干重	油菜根部干重	油菜地上部 Cd 含量	油菜根部 Cd 含量	油菜地上部 Cd 累积量	YIR	MDR	CER	土壤有效态 Cd 含量	土壤 DOC 含量
孔雀草地上部干重	-0.636 **	-0.636 **	0.203	0.286	-0.393	-0.641 **	0.574 **	0.519 **	0.309	-0.155
孔雀草根部干重	-0.588 **	-0.638 **	0.521 **	0.524 **	-0.217	-0.628 **	0.475 *	0.543 **	0.214	0.018
孔雀草地上部 Cd 含量	-0.150	0.084	-0.503 *	-0.020	-0.339	-0.125	-0.425 *	0.523 **	-0.554 **	-0.116
孔雀草根部 Cd 含量	-0.189	0.122	-0.665 **	-0.136	-0.467 *	-0.138	-0.238	0.330	-0.368	-0.282
孔雀草地上部 Cd 累积量	-0.480 *	-0.325	-0.166	0.307	-0.440 *	-0.466 *	0.156	0.864 **	-0.213	-0.192
CER	-0.160	-0.130	0.078	0.373	-0.027	-0.172	0.071	1.000	-0.096	-0.065
土壤有效态 Cd 含量	-0.098	-0.170	0.545 **	-0.006	0.153	-0.116	0.532 **	-0.096	1.000	0.400
土壤 DOC 含量	0.061	0.007	0.406 *	-0.085	0.184	0.045	-0.019	-0.065	0.400	1.000

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.3 间作处理对土壤有效态 Cd 和 DOC 含量的影响

在间作体系中, 植物通过根际互作改变根系分泌物的组成和数量, 特别是小分子有机酸, 会直接影响土壤重金属的有效性^[32,33]; 另外, 植物也会通过影响土壤理化性质, 诸如 pH 值、酶活性以及养分有效性等, 来间接影响土壤重金属的有效性^[34,35]. 在本研究中, Tp1 与华骏间作后, 土壤有效态 Cd 含量显著降低, Tp3 与寒绿间作处理下土壤有效态 Cd 显著升高, 这与油菜地上部 Cd 含量的变化规律吻合. 相关性分析也显示(表 3), 土壤有效态 Cd 含量与油菜地上部 Cd 含量呈极显著的正相关关系($P < 0.01$). 由此可知, 在间作处理中, 孔雀草可能通过根际互作影响土壤 Cd 有效性, 进而影响油菜 Cd 累积. 另外, 相关性分析发现, 土壤有效态 Cd 含量与

孔雀草地上部 Cd 含量呈极显著的负相关关系($P < 0.01$), 这表明, 孔雀草作为一种 Cd 超富集植物, 对土壤 Cd 有较强的吸收提取作用, 会造成根际区域出现“Cd 耗竭”现象. Wan 等^[23] 在研究蜈蚣草与桑树间作修复 As 污染土壤时也发现, 在蜈蚣草近根区域土壤总 As 及有效态 As 含量显著低于其他区域, 表现出明显的“As 耗竭”现象. 然而, 土壤有效态 Cd 与油菜地上部 Cd 的变化规律并不完全吻合, 例如, 华骏与 Tp2 和 Tp3 间作时地上部 Cd 含量显著升高, 而土壤有效态 Cd 则显著降低或无显著变化, 这说明除了土壤有效态 Cd 含量以外还有其他因素会影响油菜 Cd 吸收, 相关作用机制有待进一步研究.

DOC 是土壤有机质的重要组成部分, 它含有大量的活性官能基团, 可以与土壤中的重金属发生络合和整合反应, 形成重金属-有机配合物, 影响其在

土壤中的有效性^[36,37]. 在间作体系中,不同植物通过根际交互作用影响各自根系生长和分泌物质^[38],而根系及其分泌物是土壤 DOC 的重要组分^[39],因而间作处理可能会影响根际土壤 DOC 含量^[40]. 在本研究中,华骏与孔雀草间作后土壤 DOC 含量显著低于油菜单作处理,也证实了这一点. 另外,间作处理中土壤 DOC 含量与油菜地上部 Cd 含量呈显著的正相关关系($P < 0.05$,见表3),这表明,在间作体系中孔雀草可能通过改变根系分泌物的量,进而改变土壤 DOC 含量,最终影响油菜镉累积. 就具体处理来看,华骏与 Tp1 间作处理、寒绿与 Tp2 及 Tp4 间作处理下,土壤 DOC 含量与油菜地上部 Cd 含量的变化规律是吻合的,其他间作处理则不吻合. 由此可知,要阐明间作体系中根际互作对植物吸收 Cd 的影响,单纯分析 DOC 含量还不够,需要从 DOC 具体组分入手开展进一步深入研究.

4 结论

(1) 间作处理下孔雀草生物量显著升高,油菜地上部生物量以及叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率较单作处理均显著降低.

(2) 镉低积累油菜华骏与孔雀草矮秆红花间作后,华骏地上部 Cd 含量较单作显著降低 14.5%,矮秆红花地上部 Cd 含量显著增加 36.5%. 间作处理下,油菜地上部 Cd 累积量较单作处理显著降低,孔雀草地上部 Cd 累积量则显著升高. 间作处理和孔雀草单作处理的 CER 无显著差异.

(3) 油菜地上部 Cd 含量与土壤有效态 Cd 以及 DOC 含量分别呈极显著和显著的正相关关系.

(4) 总体上看,孔雀草矮秆红花与镉低积累油菜华骏间作后,油菜地上部 Cd 含量显著降低,孔雀草地上部 Cd 含量和 Cd 累积量显著增加, CER 与孔雀草单作相比无显著变化,因此该组合是最佳间作组合.

参考文献:

- [1] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **207**: 159-168.
- [2] Pan L B, Wang Y, Ma J, *et al.* A review of heavy metal pollution levels and health risk assessment of urban soils in Chinese cities [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(2): 1055-1069.
- [3] 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014, (5): 10-11.
- [4] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review [J]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 515-532.
- [5] Liu B L, Ai S W, Zhang W Y, *et al.* Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**: 822-829.
- [6] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(7): 869-881.
- [7] Kidd P, Mench M, Álvarez-López V, *et al.* Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, **17**(11): 1005-1037.
- [8] Tang Y, He J, Yu X N, *et al.* Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum photeinocarpum* from two ecoclimatic regions promotes growth and reduces cadmium uptake of eggplant seedlings [J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(3): 638-644.
- [9] Wan X M, Lei M, Chen T B. Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **563-564**: 796-802.
- [10] 张佳, 孙传宇, 何晓满, 等. 黑麦草间作对镉在小麦中积累和转运的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(5): 505-509, 514.
- [11] 谭建波, 陈兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd、Pb 分配特征 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(4): 700-707.
- [12] 陈兴, 郭先华, 祖艳群, 等. 蚕豆与小花南芥间作体系中 Cd、Pb 在植物中的累积特征 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2016, **31**(1): 167-172.
- [13] 张佳, 孙传宇, 何晓满, 等. 黑麦草间作对镉在小麦中积累和转运的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(5): 505-509, 514.
- [14] 谭建波, 陈兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd、Pb 分配特征 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(4): 700-707.
- [15] Tan J B, Chen X, Guo X H, *et al.* Distribution characteristics of Pb and Cd in different parts of *Sonchus asper* and *Zea mays* in an intercropping system [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(4): 700-707.
- [16] 陈兴, 郭先华, 祖艳群, 等. 蚕豆与小花南芥间作体系中 Cd、Pb 在植物中的累积特征 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2016, **31**(1): 167-172.
- [17] Chen X, Guo X H, Zu Y Q, *et al.* Accumulation characteristics of Cd and Pb in Broad Bean/*Arabis alpina* intercropping system [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2016, **31**(1): 167-172.
- [18] Deng Q, Deng Q X, Wang Y, *et al.* Effects of intercropping with *Bidens* species plants on the growth and cadmium accumulation of *Ziziphus acidujuba* seedlings [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, **191**(6): 342.
- [19] Chen H Q, Lin L J, Liao M A, *et al.* Effects of intercropping with floricultural accumulator plants on cadmium accumulation in grapevine [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(24): 24474-24481.
- [20] 王珪, 李江遐, 王冬良, 等. 花卉修复土壤重金属污染研究进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(5): 1-5.
- [21] Wang Y, Li J X, Wang D L, *et al.* Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil by flowers [J]. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(5): 1-5.
- [22] 王林. 超积累观赏植物筛选及生态修复强化技术研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2008.
- [23] Wei J L, Lai H Y, Chen Z S. Chelator effects on bioconcentration and translocation of cadmium by hyperaccumulators, *Tagetes patula* and *Impatiens walleriana* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **84**: 173-178.
- [24] Sun R L, Sun Q Q, Wang R Q, *et al.* Cadmium accumulation

- and main rhizosphere characteristics of seven French marigold (*Tagetes patula* L.) cultivars [J]. International Journal of Phytoremediation, 2018, **20**(12): 1171-1178.
- [19] Wang L, Xu Y M, Sun Y B, *et al.* Identification of pakchoi cultivars with low cadmium accumulation and soil factors that affect their cadmium uptake and translocation[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, **8**(6): 877-887.
- [20] Liang X F, Qin X, Huang Q Q, *et al.* Remediation mechanisms of mercapto-grafted polygorskite for cadmium pollutant in paddy soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(30): 23783-23793.
- [21] Liang X F, Li N, He L Z, *et al.* Inhibition of Cd accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in alkaline soil using mercapto-modified attapulgite [J]. Science of the Total Environment, 2019, **688**: 818-826.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] Wan X M, Lei M. Intercropping efficiency of four arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* populations as intercrops with *Morus alba*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(13): 12600-12611.
- [24] 杨涛, 段志平, 石岩松, 等. 新疆枣棉间作下棉花光合特性及产量变化[J]. 干旱地区农业研究, 2019, **37**(1): 89-94.
- Yang T, Dan Z P, Shi Y S, *et al.* Analysis of photosynthetic characteristics and yield of cotton intercropping with Jujube in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, **37**(1): 89-94.
- [25] 段志平, 刘天煜, 张永强, 等. 枣棉间作系统棉花产量的形成与影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 2018, **36**(3): 93-100.
- Duan Z P, Liu T Y, Zang Y Q, *et al.* Formation and influencing factors of cotton yield in jujube-cotton intercropping system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, **36**(3): 93-100.
- [26] 王钰云, 王宏富, 李智, 等. 间作遮阴对花生生长发育及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, **48**(2): 218-221.
- Wang Y Y, Wang H F, Li Z, *et al.* Effect of intercropping shading on growth and yield of peanut [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, **48**(2): 218-221.
- [27] Lin L J, Chen F B, Wang J, *et al.* Effects of living hyperaccumulator plants and their straws on the growth and cadmium accumulation of *Cyphomandra betacea* seedlings [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **155**: 109-116.
- [28] 黄佳璟, 林立金, 陈发波, 等. 混种鬼针草属植物对葡萄幼苗生长及镉积累的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, **36**(4): 481-487.
- Huang J J, Lin L J, Chen F B, *et al.* Effects of intercropping *Bidens* L. species on growth and cadmium accumulation of grape seedlings[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, **36**(4): 481-487.
- [29] 万家悦, 贺希格都楞, 彭位华, 等. 玉米与番茄间作对土壤镉吸收的影响[J]. 生物工程学报, 2020, **36**(3): 518-528.
- Wan J Y, Bao H X G D L, Peng W H, *et al.* Effects of intercropping on cadmium uptake by maize and tomato [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2020, **36**(3): 518-528.
- [30] 霍文敏, 赵中秋, 王丽, 等. 不同超富集、富集植物玉米间作模式对玉米中镉吸收、转运的影响研究[J]. 地学前缘, 2019, **26**(6): 118-127.
- Huo W M, Zhao Z Q, Wang L, *et al.* Study of the effects of intercropping different hyperaccumulator and accumulator plants on Cd uptake and transportation by maize [J]. Earth Science Frontiers, 2019, **26**(6): 118-127.
- [31] 孟楠, 王萌, 陈莉, 等. 不同草本植物间作对 Cd 污染土壤的修复效果[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2618-2624.
- Meng N, Wang M, Chen L, *et al.* Remediation efficiency of Cd polluted soil by intercropping with herbaceous plants[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2618-2624.
- [32] Zhan F D, Qin L, Guo X H, *et al.* Cadmium and lead accumulation and low-molecular-weight organic acids secreted by roots in an intercropping of a cadmium accumulator *Sonchus asper* L. with *Vicia faba* L.[J]. RSC Advances, 2016, **6**(40): 33240-33248.
- [33] Li Z R, Wang J X, An L Z, *et al.* Effect of root exudates of intercropping *Vicia faba* and *Arabidopsis thaliana* on accumulation and sub-cellular distribution of lead and cadmium[J]. International Journal of Phytoremediation, 2019, **21**(1): 4-13.
- [34] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 53-60.
- Tan J B, Zhan F D, Liu N N, *et al.* Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(1): 53-60.
- [35] 杨代宇, 林立金, 张潇, 等. 镉胁迫下不同生态型富集植物混种樱桃幼苗对土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(4): 73-78.
- Yang D Y, Lin L J, Zhang X, *et al.* Effects of different ecotypes of accumulator plant intercropping with cherry seedlings on soil enzyme activity under cadmium stress[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, **35**(4): 73-78.
- [36] 李长欣, 吕严风, 张梦迪, 等. 热解条件对茶叶渣生物炭特性及镉污染土壤钝化效果的影响[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(12): 6504-6510.
- Li C X, Lyu Y F, Zhang M D, *et al.* Influence of pyrolysis conditions on properties of tea residue biochar and its passivation effect in Cd contaminated soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(12): 6504-6510.
- [37] 刘桂华, 敖明, 柴冠群, 等. 低分子有机酸对贵州黄壤中镉释放及形态的影响[J]. 土壤通报, 2018, **49**(6): 1473-1479.
- Liu G H, Ao M, Chai G Q, *et al.* Effects of organic acids with low molecular weight on the extraction and fractionations of cadmium in yellow soil of Guizhou [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(6): 1473-1479.
- [38] Zu Y Q, Qin L, Zhan F D, *et al.* Intercropping of *Sonchus asper* and *Vicia faba* affects plant cadmium accumulation and root responses[J]. Pedosphere, 2020, **30**(4): 457-465.
- [39] 杨景清, 王铮, 元晓春, 等. 不同森林更新方式下亚热带土壤可溶性有机质的数量及质量[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2017, **45**(3): 16-25.
- Yang J Q, Wang Z, Yuan X C, *et al.* The quantity and quality of dissolved organic matter under different regeneration modes in subtropical soil [J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2017, **45**(3): 16-25.
- [40] 黑亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 852-858.
- Hei L, Wu Q T, Long X X, *et al.* Effect of Co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-Contaminated sewage sludge [J]. Environmental Science, 2007, **28**(4): 852-858.

CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta	 ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir ...	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section	 XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China	 GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism	 PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source	 RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules	 ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bathriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area	 JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)