

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.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 小莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)
《环境科学》征订启事(553)	
《环境科学》征稿简则(655)	
信息(664, 755, 885)	

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制

卞建林¹, 郭俊梅^{2,3}, 王学东¹, 杨俊兴^{2,3*}, 杨军^{2,3}, 陈同斌^{2,3}, 曹柳⁴, 成永霞⁴, 任战红⁴, 王杰⁵, 周小勇⁶

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 河南省土壤污染监测与修复重点实验室, 济源 459000; 5. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 6. 北京瑞美德环境修复有限公司, 北京 100015)

摘要: 利用水培试验研究了不同浓度镉(cadmium, Cd)胁迫条件下(0、2和5 mg·L⁻¹)两种Cd富集能力油菜品种[秦油1号(QY-1)和三月黄(SYH)]生长状况与Cd富集特征的差异,并从Cd亚细胞区隔化和抗氧化酶活性等角度探索了两种油菜Cd富集能力的差异机制,并通过田间试验进行验证。结果表明,水培条件下,这两种油菜在Cd胁迫下生长均未受到明显的抑制。在低浓度Cd(2 mg·L⁻¹)处理下,两种油菜地上部Cd含量无显著差异,在高浓度Cd(5 mg·L⁻¹)胁迫下SYH的地上部和根部Cd含量均显著高于QY-1,分别提高32.05%和99.57%,同时其根部生物富集系数(BCF)也较QY-1显著提高。对两种油菜叶片中Cd亚细胞区隔化研究结果表明,随着Cd处理浓度的增加,QY-1和SYH叶片中Cd在热稳定蛋白和镉富集颗粒组分的分布分别提高了143.69%、118.91%和63.34%、118.91%,由此可见将Cd区隔在热稳定蛋白和镉富集颗粒体等重金属解毒组分是油菜在亚细胞水平上的重要解毒机制。同时,高浓度Cd胁迫下SYH叶中Cd在细胞碎屑组分的含量达QY-1的4.41倍,可知Cd在细胞碎屑组分中的分布是导致两种油菜Cd富集能力差异的重要机制。结合对两种油菜抗氧化酶活性研究结果,发现抗氧化酶系统可能是QY-1应对高浓度Cd胁迫的重要解毒机制,而SYH则更多地通过将Cd区隔在金属低活性的亚细胞组分来减轻其毒性。田间试验结果验证表明,SYH地上部和地下部Cd含量均显著高于QY-1,分别是QY-1的2.34和1.43倍。综上所述,SYH具有更高的Cd提取量和富集能力,具有应用于中轻度Cd污染农田修复的潜力。

关键词: 油菜; 镉; 耐性; 亚细胞; 吸收

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0970-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906175

Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two *Brassica napus* L. Cultivars

BIAN Jian-lin¹, GUO Jun-mei^{2,3}, WANG Xue-dong¹, YANG Jun-xing^{2,3*}, YANG Jun^{2,3}, CHEN Tong-bin^{2,3}, CAO Liu⁴, CHENG Yong-xia⁴, REN Zhan-hong⁴, WANG Jie⁵, ZHOU Xiao-yong⁶

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory for Monitor and Remediation of Heavy Metal Polluted Soils of Henan Province, Jiyuan 459000, China; 5. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 6. Beijing Ruimeide Environmental Restoration Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to explore the differences in growth status and Cd accumulation characteristics of two *Brassica napus* L. cultivars (QY-1 and SYH) under different concentrations of cadmium (Cd) stress (0, 2, and 5 mg·L⁻¹). The Cd subcellular compartmentalization and antioxidant enzyme activities were determined to elucidate the intrinsic mechanism of the differences in the Cd accumulation capacity between the two cultivars of *Brassica napus* L. Furthermore, field trials were conducted to further verify the differences in phytoremediation of the two cultivars. Results show that neither of the cultivars exhibited obvious growth inhibition under Cd stress. Under the 2 mg·L⁻¹ Cd condition, there were no significant differences in shoot Cd concentrations between the two cultivars. Under 5 mg·L⁻¹ Cd condition, however, the Cd concentrations in both shoot and root of SYH were significantly higher than that of QY-1, which increased by 32.05% and 99.57%, respectively. In addition, the bioconcentration factor (BCF) of the root in SYH is significantly higher than that of QY-1. The subcellular Cd distribution in leaves of the two cultivars of *Brassica napus* L. showed that, with an increase of Cd stress, Cd concentrations of heat stable protein (HSP) and metal-rich granule (MRG) fractions in leaves significantly increased by 143.69% and 118.91% for QY-1, and by 63.34% and 118.91% for SYH. Thus, the segregation of Cd in HSP and MRG, which was reported to be biological detoxified metal fractions (BDM), might play an important role in the detoxification of *Brassica napus* L. at a subcellular level under Cd stress. Moreover, the distribution of Cd in the cellular

收稿日期: 2019-06-23; 修订日期: 2019-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802604, 2018YFD0800601); 国家自然科学基金项目(41771509, 41771510, 41907125, 41201312, 41271478); 重金属污染农田土壤防治技术集成及应用示范项目(桂科 AA17204047-4)

作者简介: 卞建林(1996~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤重金属污染控制与修复, E-mail: bianjlwj@163.com

* 通信作者, E-mail: yangjx@126.com

debris fraction might be another important factor contributing to the differences in Cd accumulation of the two *Brassica napus* L. cultivars, which was 4.41 times higher in SYH than in QY-1 under Cd stress. The results of the antioxidant enzyme activities of two *Brassica napus* L. cultivars showed that, under the $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd condition, the antioxidant enzyme system may represent an important detoxification mechanism for QY-1 to cope with stress induced by high concentrations of Cd, while SYH is more effective in reducing the toxicity of Cd by separation of Cd into BDM fractions. The results of the field trial confirmed that the Cd concentrations in the above- and underground parts of SYH were 2.34 and 1.43 times higher than in QY-1, respectively. Therefore, SYH possess a higher Cd phytoextraction capacity than QY-1, and might be a good candidate for the remediation of moderate and mildly Cd-contaminated farmland.

Key words: *Brassica napus* L.; cadmium(Cd); tolerance; subcellular; adsorption

土壤是人类赖以生存和发展的重要自然资源,随着经济的快速发展,大量矿产资源被开发、各种化肥以及农药的施用,致使重金属污染物通过各种途径进入并存留在土壤中,导致土壤重金属污染日益严重,已经成为危害我国土壤环境质量和粮食食品安全的主要问题之一^[1~3]. 目前,我国农田土壤受重金属污染严重,据 2014 年环保部与国土部联合公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤中重金属污染点位超标率达 19.4%,其中镉(Cd)的点位超标率高达 7.0%. 我国目前受重金属污染的农田达 2 500 万 hm^2 ,而土壤中的重金属等污染物可通过食物链等途径进入人体,从而产生严重的环境健康风险^[4],因此针对土壤中 Cd 等重金属污染的治理刻不容缓.

重金属污染土壤的植物修复技术因其环境友好、成本较低而受到国内外学者的广泛关注^[5]. 研究和发掘重金属超富集植物是该技术的核心,然而目前发现的重金属超富集植物一般存在植物矮小、生长缓慢、对环境适应性较差等特性,这使得超富集植物修复重金属污染土壤存在着周期长,经济效益低等问题,严重限制了其实际应用. 因此,利用大生物量的植物修复重金属污染土壤成为该领域研究的重点^[6]. 油菜(*Brassica napus* L.)是十字花科芸薹属的一年生草本植物,是我国重要的油料作物之一,在全国各地被广泛种植. 有研究表明,油菜具有很强的 Cd 富集能力,而且 Cd 易于积累在油菜根部,而籽粒中累积量很低^[7]. 因此,利用油菜修复 Cd 污染土壤在修复效果和经济价值方面均具有一定的优势. 目前应用植物进行土壤修复的案例很多,然而对不同油菜品种的 Cd 富集能力和耐性差异机制的研究仍较少,因此对不同品种油菜 Cd 耐性机制进行探索,有助于更好地筛选和改良开发适合 Cd 污染土壤修复的油菜品种.

植物对重金属的耐性机制有亚细胞区隔化、植物抗氧化相关的活性氧代谢、与解毒螯合相关的硫代谢以及金属硫蛋白(metallothionein, MT)和膜金属转运蛋白基因的表达和调控等,其中植物亚细胞区隔化是植物对重金属耐性的重要机制. 植物中重

金属在不同亚细胞组分的分布代表着不同的毒理学特性^[8],国内外许多学者发现不同 Cd 富集植物表现出不同的亚细胞分布特征^[9]. 在 Cd 胁迫条件下,美洲商陆(*Phytolacca Americana* L.)和柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii*)等植物可通过将 Cd 区隔在液泡中以减轻其毒害^[10],而将 Cd 区隔在热稳定蛋白和细胞壁组分则可能是蓖麻(*Ricinus communis* L.)Cd 耐性和解毒的主要机制^[11]. 尽管一些植物通过亚细胞区隔化等机制能够耐受一定浓度的重金属 Cd,但当植物体内 Cd 累积水平过高则会导致活性氧(reactive oxygen species, ROS)过量产生,包括超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)、羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和过氧化氢(H_2O_2),这将严重损伤植物细胞,如蛋白质氧化、酶活性受抑制和脂质过氧化等^[12,13];而抗氧化酶系统是植物应对重金属胁迫的重要防御机制. 研究发现马铃薯在 Cd 胁迫下抗氧化酶活性显著提高,但是不同植物体内对抗氧化胁迫的响应方式存在差异^[14,15]. 鉴于油菜修复 Cd 轻中度污染土壤具有良好地应用前景,因此深入研究油菜对 Cd 的耐性机制有助于进一步开发高效、安全的油菜修复品种.

本文以两种不同 Cd 富集能力的油菜品种秦油 1 号(QY-1)和三月黄(SYH)为研究对象,这两种油菜品种已在我国北方某典型中低度 Cd 污染农田进行了小试和中试示范,并取得一定的修复效果. 本研究通过研究这两种油菜 Cd 的耐性和富集能力的差异以及在 Cd 胁迫下体内抗氧化酶活性与亚细胞区隔化特征的变化规律,明晰油菜 Cd 耐性及相关解毒机制,以期对油菜广泛应用于 Cd 污染土壤修复提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

水培试验:以前期在田间中轻度 Cd 污染土壤上油菜的生长试验数据为依据,筛选出两种 Cd 富集能力较强的油菜品种秦油 1 号(QY-1)和三月黄(SYH)作为供试植物. 油菜种子最初在无污染的基质上培养 2~3 周,直到幼苗发育出两片健康的嫩

叶,然后选取长势均匀的健壮幼苗用于水培试验.水培溶液采用 50% 霍格兰营养液,其成分为:2.5 mmol·L⁻¹ Ca(NO₃)₂、2.5 mmol·L⁻¹ KCl、0.5 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄、0.5 mmol·L⁻¹ MgSO₄、25 μmol·L⁻¹ H₃BO₃、2.25 μmol·L⁻¹ MnSO₄、1.9 μmol·L⁻¹ ZnSO₄、0.15 μmol·L⁻¹ CuSO₄、0.05 mmol·L⁻¹ (NH₄)₆Mo₇O₂₄和 5 μmol·L⁻¹ Fe-EDTA.用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 调节溶液 pH 值至 6.0 ± 0.1.通过外源添加 CdCl₂·2.5H₂O(优级纯)设置 0、2 和 5 mg·L⁻¹这 3 个 Cd 处理浓度,每个处理设置 4 个重复.将长势一致的油菜幼苗移栽到含有不同 Cd 处理溶液的塑料培养盆中,培养盆上放置定植筐,每盆培养 4 株幼苗,其中 2 株用于测定油菜生物量和 Cd 浓度,剩余 2 株用于分析油菜叶片中 Cd 的亚细胞分布以及抗氧化酶活性.本试验于中国科学院地理科学与自然资源研究所环境修复中心温室开展,培养温度为 25℃/15℃(昼/夜)、光周期为 16 h、光照强度约为 300 mmol·(m²·s)⁻¹、平均相对湿度为 60%,培养期间持续通气,每隔 3 d 更换一次营养液,培养 16 d 后收获.

大田试验:试验于 2017 年 10 月~2018 年 5 月在华北平原某市进行,试验地属温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 14.6℃,全年日照时长为 1727.6h,年降水量为 860 mm.土壤类型为褐土,其基本理化性质为有机质 19.4 g·kg⁻¹、全氮 1.18 g·kg⁻¹、全磷 0.86 g·kg⁻¹、全钾 26.6 g·kg⁻¹、速效氮 83.7 mg·kg⁻¹、速效磷 23.0 mg·kg⁻¹、速效钾 140.0 mg·kg⁻¹,pH 为 7.7.试验地土壤主要重金属污染物为镉(Cd:2.22 mg·kg⁻¹),超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)风险筛选值(0.6 mg·kg⁻¹,pH > 7.5)近 3 倍,属 Cd 中度污染土壤.将田块划分为 2 个 10.0 m × 10.0 m 的试验区域,选取籽粒饱满的秦油 1 号(QY-1)和三月黄(SYH)的种子,分别沟施条播在试验区域中.于成熟期按五点法采集油菜根、茎和叶,用于制备样品;采用与水培样品一致的消解方法来测定 Cd 含量.

1.2 植物样品采集与制备

油菜收获后区分根、茎和叶后用自来水冲洗,然后在 10 mmol·L⁻¹ EDTA 溶液中浸泡 5 min,去除植株表面附着的 Cd 离子,最后用去离子水彻底冲洗干净.用于测定生物量和 Cd 含量的样品在 80℃ 烘干,然后分别记录根、茎和叶的重量;用于分析亚细胞分布和抗氧化酶活性的新鲜叶片保存在 -80℃ 冰箱中待测.

1.3 测定指标与方法

1.3.1 Cd 含量检测方法

植物中 Cd 含量采用浓 HNO₃ 和 HClO₄(5:1,体积比)进行消解,消解完全后过滤、定容至 50 mL,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,Elan DRC-e,Perkin Elmer,USA)测定 Cd 浓度.采用标准物质 GBW07603(GSV-2)用于监控样品中 Cd 的回收率(90% ± 10%).

1.3.2 Cd 亚细胞提取

基于差速离心的原理,通过不同离心力可将植物细胞中不同亚细胞组分分离出来^[11],包括:细胞碎屑(cellular debris)、细胞器组分(organelle)、金属富集颗粒体(metal-rich granule,MRG)、热敏感蛋白(heat denatured protein,HDP)和热稳定蛋白(heat stable protein,HSP).首先在液氮下用研钵和研杵将冷冻的新鲜叶子(0.2 g)研碎,置于 10 mL 离心管中,然后加入 10 mL 含有 0.25 mol·L⁻¹蔗糖,50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl(pH 7.5)和 1.0 mmol·L⁻¹二硫赤藓糖醇的缓冲溶液(pH 7.5).将匀浆以 15000g 离心 15 min,然后上清液在 100000g 条件下离心 1 h,沉积物即为细胞器组分.然后将 100000g 离心后的上清液在 80℃ 加热 10 min 后用冰冷却 1 h,再以 50000g 离心 15 min,离心后的上清液和沉积物分别为热稳定蛋白组分和热敏感蛋白组分.向 15000g 离心后的沉积物中加入 2.0 mL 1.0 mol·L⁻¹ NaOH,在 70℃ 下水浴 1 h,然后在 10000g 离心 15 min,所获得的上清液和沉积物分别为细胞碎屑组分和金属富集颗粒组分,所有操作均在 4℃ 下完成.所获得的 5 个组分的消解及 Cd 含量测定方法与植物样相同,所得到的数据取 4 个重复的平均值.

1.3.3 抗氧化酶的测定

取新鲜油菜叶 1.00 g 打碎成匀浆,加入 9 mL 0.05 mol·L⁻¹磷酸盐缓冲液(pH 7.4)进行提取,将匀浆以 4000 r·min⁻¹离心 10 min,所得上清液采用抗氧化酶测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)分析抗氧化酶活性.

采用总超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)测定试剂盒(WST-1 法,南京建成生物工程研究所)测定提取液中 SOD 活性;采用过氧化物酶(peroxidase,POD)测试盒(比色法,南京建成生物工程研究所)测定提取液中 POD 活性;采用过氧化氢酶(catalase,CAT)测定试剂盒(可见光法)测定提取液中 CAT 活性.

1.3.4 耐性指数、生物富集系数和转运系数

利用耐性指数(tolerance index, TI)表征不同油菜品种对 Cd 胁迫的生长响应,表示为油菜在 Cd 胁

迫下与对照条件下地上部生物量的比值. 利用生物富集系数(bioconcentration factor, BCF)评价不同油菜品种对 Cd 的富集效率,表示为油菜地上/地下部分的 Cd 浓度与生长介质中 Cd 浓度的比值. 利用转运系数(translocation factor, TF)来评价不同油菜品种 Cd 由根部向地上部的转运能力,表示为油菜地上部分 Cd 浓度与根部 Cd 浓度的比值. 具体公式如下:

$$Q = \frac{C_1}{C_2}$$

式中,当 Q 代表 TI 时,C₁/C₂ 分别表示镉胁迫下与对照条件下油菜地上部的生物量(g·plant⁻¹);当 Q 代表 BCF 时,C₁/C₂ 分别表示植物地上部 Cd 含量和生长基质中 Cd 浓度(mg·kg⁻¹);当 Q 代表 TF 时,C₁/C₂ 分别表示植物地上部和根部 Cd 含量(mg·kg⁻¹).

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据相关计算,试验结果采用 SPSS Statistics 19 软件进行数据统计分析,不同处理间采用最小显著差数法(LSD 法)进行差异显著性检验(P<0.05);图表制作采用 Origin pro 2018 完成.

2 结果与分析

2.1 油菜水培试验

2.1.1 Cd 胁迫对油菜生物量的影响

油菜的生长状况是反映其受到 Cd 胁迫程度最直观的指标. 表 1 为 3 个浓度 Cd 处理下两种油菜地上部和根部的生物量以及耐性指数 TI 值. 从中可知,与对照相比,Cd 胁迫下两个品种油菜地上部和地下部的生长均未受到明显的抑制,甚至有增加的趋势. 在 Cd 处理浓度分别为 2 mg·L⁻¹和 5 mg·L⁻¹时,SYH 地上部生物量相较于对照显著提高(P<

0.05),分别提高了 18.84%和 26.01%,这表明 SYH 地上部对 Cd 胁迫作用有一定的补偿-调节机制,与肖旭峰等^[16]研究镉、铅对芹菜生长的结果一致,而 QY-1 地上部生物量没有显著地变化. SYH 地下部生物量随 Cd 浓度增加呈下降趋势,尤其在 Cd 处理浓度为 5 mg·L⁻¹时地下部生物量显著降低,较对照处理降低了 47.63%(P<0.05),而 QY-1 在两个 Cd 处理下地下部生物量均未有显著变化. 其原因可能是 SYH 根系对重金属 Cd 的吸收能力较强,由根部从介质中吸收 Cd 远超 QY-1(表 2),抑制了根系的生长. 在两个 Cd 处理浓度下,QY-1 和 SYH 地上部都具有较高的耐性指数(TI),SYH 地上部耐性指数(TI)明显高于 QY-1,两个 Cd 浓度下分别是 QY-1 的 1.28 和 1.37 倍. 综上可知,两种油菜均可在较高浓度 Cd 胁迫下正常生长发育,其中 SYH 相较 QY-1 根部能吸收更高量的 Cd,尽管在高浓度 Cd 胁迫下根系生长受到一定抑制,但其地上部具有更高的生物量和耐性指数,在修复 Cd 污染土壤方面的效率更高.

2.1.2 Cd 胁迫对不同富集能力油菜 Cd 吸收、转运的影响

由表 2 可见,随着 Cd 处理浓度的增加,两种富集型油菜地上部和地下部 Cd 含量均显著增加. 在 Cd 处理浓度为 2 mg·L⁻¹和 5 mg·L⁻¹时,QY-1 地上部 Cd 含量分别较对照处理提高了 13.47 和 33.12 倍,SYH 提高了 16.63 和 56.11 倍;QY-1 地下部 Cd 含量分别是对照组的 208.79 和 284.81 倍,SYH 分别是 152.89 和 265.39 倍. 两种油菜地下部 Cd 含量均显著高于地上部,2 和 5 mg·L⁻¹ Cd 浓度下,QY-1 地下部 Cd 含量分别是地上部的 12.74 和 7.37 倍,SYH 分别是 20.52 和 11.01 倍. 本研究油菜地上部和地下部 Cd 含量的差异与 Guo 等^[17]在水培条件下研究八宝景天对 Cd 胁迫的结果趋势一致. 在

表 1 Cd 胁迫对两种油菜生物量和耐性指数的影响¹⁾

Table 1 Effect of Cd stress on biomass and tolerance index of two of *Brassica napus* L. cultivars

品种	处理/mg·L ⁻¹	生物量/g·plant ⁻¹		耐性指数 TI/%	
		地上部	地下部	地上部	地下部
秦油 1 号(QY-1)	0	0.20±0.01Aa	0.09±0.01Ba		
	2	0.18±0.01Ba	0.10±0.02Aa	93.12	112.16
	5	0.18±0.01Ba	0.10±0.02Aa	91.91	109.06
三月黄(SYH)	0	0.18±0.01Bb	0.11±0.01Aa		
	2	0.21±0.01Aa	0.11±0.02Aab	118.84	98.41
	5	0.22±0.01Aa	0.08±0.02Ab	126.01	69.61
双因素方差分析	品种	10.793**	0.584		
	处理	3.322	2.111		
	品种×处理	14.874***	2.976		

1) TI 为耐性指数;不同大写字母表示品种间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示品种内不同 Cd 处理的差异显著(P<0.05);*表示 P<0.05,**表示 P<0.01,***表示 P<0.001,下同

表 2 两种油菜地上部和地下部 Cd 的含量

Table 2 Cd concentrations in shoots and roots of two of *Brassica napus* L. cultivars

品种	处理 /mg·L ⁻¹	Cd 含量/mg·kg ⁻¹		生物富集系数(BCF)		转运系数 TF/%
		地上部	地下部	地上部	地下部	
秦油 1 号(QY-1)	0	6.5 ± 0.2 Ac	5.7 ± 1.0 Bc			
	2	93.9 ± 23.3 Ab	1196.4 ± 193.1 Bb	47.0	598.2	7.9
	5	221.4 ± 44.0 Aa	1632.0 ± 83.3 Ba	44.3	326.4	13.6
三月黄(SYH)	0	5.1 ± 0.4 Bc	12.1 ± 1.5 Ac			
	2	90.3 ± 35.2 Ab	1853.0 ± 121.2 Ab	45.2	926.5	4.9
	5	292.4 ± 47.8 Aa	3216.6 ± 196.7 Aa	58.5	643.3	9.1
双因素方差分析	品种	2.172	155.231 ***			
	处理	97.534 ***	549.454 ***			
	品种 × 处理	2.697	57.996 ***			

2 mg·L⁻¹ Cd 胁迫下,两个品种地上部 Cd 含量没有表现出差异,随着 Cd 胁迫浓度的增加,两品种地上部 Cd 含量差异进一步增大,在 5 mg·L⁻¹ Cd 胁迫下,SYH 品种地上部 Cd 含量较秦油 1 号提高 32.1%. 与地上部相比,两品种油菜地下部 Cd 含量表现出更为显著的差异,3 个 Cd 浓度处理(0、2 和 5 mg·L⁻¹),SYH 地下部 Cd 含量均显著高于 QY-1,分别是 QY-1 的 2.12、1.55 和 1.97 倍.由此可见,两种油菜对 Cd 均具有较强的累积能力,但 SYH 的累积能力更高.

重金属生物富集系数(BCF)和转运系数(TF)是反映植物对重金属富集能力强弱的重要指数.由表 2 可知,除 SYH 地上部,QY-1 与 SYH 地下部 BCF 都随 Cd 处理浓度的增加呈下降趋势.当 Cd 处理浓度为 2 mg·L⁻¹和 5 mg·L⁻¹时,QY-1 地上部 BCF 分别为 47.0 和 44.3,差异不明显,而地下部 BCF 分别为 598.2 和 326.4,远高于地上部,但随浓度增加地上部和地下部的 BCF 都有减小的趋势.SYH 地上部和地下部的 BCF 随 Cd 胁迫变化趋势和 QY-1 相似.在相同 Cd 处理条件下,两种油菜地上部 BCF 差异不大,但 SYH 地下部 BCF 远高于 QY-1,在 Cd 处理浓度为 2 mg·L⁻¹和 5 mg·L⁻¹时分别是 QY-1 的 1.55 和 1.97 倍.这两种油菜转运系数(TF)都随 Cd 胁迫的增加而增加,这与 Zhang 等^[11]在水培条件下对蓖麻 Cd 转运的研究结果一致.综上可知,两种富集型油菜在受 Cd 胁迫时,都倾向于将部分 Cd 转移到地上部来缓解 Cd 的毒性.而 SYH 具有更高的生物富集系数,且根部具有更强的 Cd 吸收和累积能力.

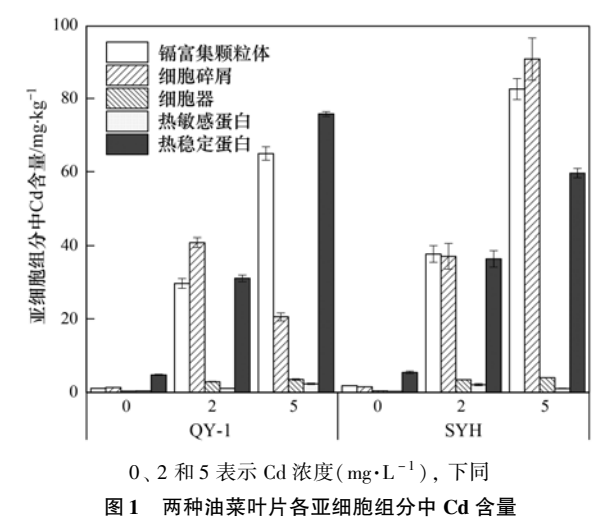
2.1.3 不同富集能力油菜叶片中 Cd 亚细胞分布差异

亚细胞区隔化是植物对重金属耐性的重要机制,重金属 Cd 进入植物体内后,在细胞中与不同的亚细胞组分结合,可表现出不同的生物学毒性^[18].

因此,通过研究油菜叶片中不同亚细胞组分内 Cd 的含量,有助于阐明不同 Cd 富集能力油菜品种对 Cd 的耐性及其解毒机制^[19].

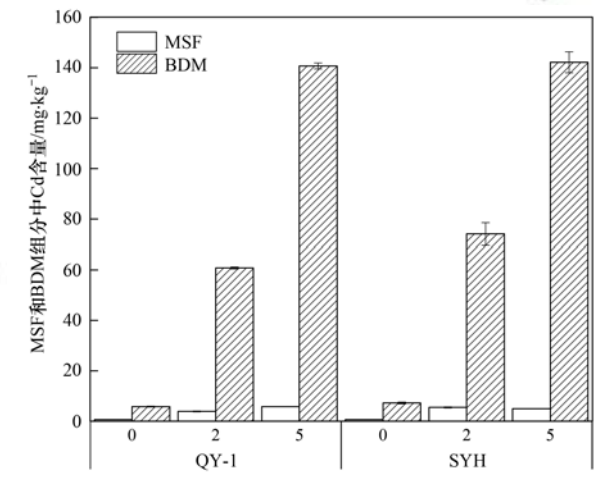
在两个 Cd 处理浓度下,Cd 主要富集在两种油菜叶片中的金属富集颗粒、热稳定蛋白和细胞碎屑组分中,在 QY-1 和 SYH 叶片中这 3 种组分 Cd 含量占叶片总 Cd 含量的 95.31%~97.90%;随着 Cd 处理浓度的增加,QY-1 和 SYH 叶片中金属富集颗粒和热稳定蛋白组分中的 Cd 含量均明显增加(图 1).金属富集颗粒组分为 Cd 进入植物叶片内形成不溶性沉淀物从而减轻其毒性^[20],热稳定蛋白主要包括植物螯合态以及金属硫蛋白等,可与 Cd 形成络合物,从而减轻 Cd 的毒害作用,因此,这两种亚细胞组分可表示为生物解毒组分(biological detoxified metal,BDM);细胞器组分与热敏感蛋白分别为细胞质内具有特定形态结构和功能的质体以及对细胞新陈代谢具有重要影响的酶,由于这两种亚细胞组分均对重金属胁迫十分敏感,因此可表示为金属敏感组分(metal sensitive factions,MSF)^[21].两种富集型油菜叶中 Cd 在 BDM 中的含量明显高于 MSF,在 2 mg·L⁻¹浓度 Cd 处理下,QY-1 和 SYH 叶 BDM 中的 Cd 含量分别是 MSF 中的 15.59 和 13.54 倍,在 5 mg·L⁻¹浓度 Cd 处理下,分别是 24.37 和 28.46 倍(图 2).这表明将 Cd 区隔在金属富集颗粒和热稳定蛋白组分中是油菜的主要解毒机制之一,这与曹柳等^[22]对 3 种不同 Cd 富集能力的向日葵 Cd 亚细胞分布的研究结果一致.

本研究发现这两种油菜在亚细胞累积的 Cd 有显著差异,在 5 mg·L⁻¹ Cd 浓度下 SYH 细胞碎屑组分中累积的 Cd 远高于 QY-1,超出 341.20%.细胞碎屑组分主要为细胞壁和细胞膜脱落物,而细胞壁是 Cd 进入植物细胞内的第一道屏障,并提供了大量的离子结合点位,从而对重金属产生固定作用^[23,24].此外,前面研究也发现 SYH 地上部叶片具



0、2 和 5 表示 Cd 浓度 (mg·L⁻¹), 下同
图 1 两种油菜叶片各亚细胞组分中 Cd 含量
Fig. 1 Cd concentrations in each subcellular component of leaves of two *Brassica napus* L. cultivars

有更高的生物量(表 1), 这表明 SYH 地上部可能对 Cd 具有更高的“容量”, 进一步说明 SYH 具有更大的 Cd 修复潜能。

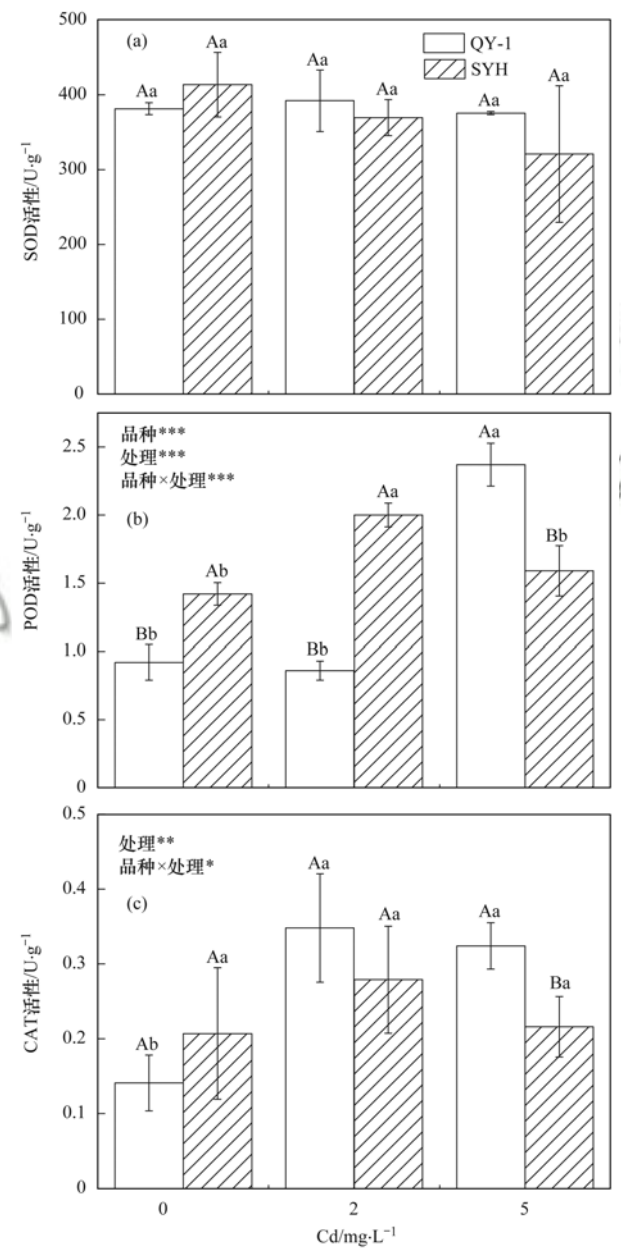


MSF 表示为金属敏感组分(细胞器 + 热敏感蛋白);
BDM 表示为生物解毒组分(金属富集颗粒体 + 热稳定蛋白)
图 2 两种油菜叶片中金属敏感组分 (MSF)、生物解毒组分 (BDM) 中 Cd 含量
Fig. 2 Cd concentrations in metal-sensitive components (MSF) and biodegradation components (BDM) in leaves of two of *Brassica napus* L. cultivars

2.1.4 Cd 胁迫对油菜抗氧化酶活性的影响

重金属胁迫会阻碍植物正常的新陈代谢并诱导活性氧(reactive oxygen species, ROS)的大量产生, 引起脂膜过氧化, 导致细胞膜透性增强, 膜结构遭到破坏, 影响植物的正常生长发育, 而植物体内抗氧化系统的存在有助于清除植物体内过多的超氧自由基($\cdot O_2^-$)^[25]. 因此, 在受到 Cd 胁迫的情况下, 抗氧化酶被认为是许多 Cd 富集植物或耐性植物体内过氧化胁迫的重要保护机制和超氧自由基的主要“清道夫”^[26]. 图 3 是不同 Cd 处理下两种油菜 SOD、CAT 和 POD 活性的变化, 由图可见, 两种富集能力油菜

叶片中 SOD 和 CAT 活性并未受到 Cd 处理浓度的显著影响. QY-1 叶中 POD 活性(以 FW 计)在 Cd 浓度 2 mg·L⁻¹下是 0.86 U·g⁻¹, 在 Cd 浓度 5 mg·L⁻¹下是 2.37 U·g⁻¹, 显著提高了 175.58% ($P < 0.05$). 与 QY-1 不同的是, SYH 叶中 POD 活性随 Cd 处理浓度的增加呈现先上升后下降的趋势, 2 mg·L⁻¹ Cd 浓度下 SYH 叶中 POD 活性是 5 mg·L⁻¹ Cd 浓度时的 1.26 倍[图 3(b)]. 而相同 Cd 处理浓度下, 两种富集型油菜叶中 POD 活性存在显著性差异 ($P < 0.001$).



SOD、POD 和 CAT 分别为超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶; 不同大写字母表示品种间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示品种内不同 Cd 处理的差异显著 ($P < 0.05$); * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 3 两种油菜叶片 SOD、POD 和 CAT 活性水平

Fig. 3 Activity levels of SOD, POD, and CAT in leaves of two of *Brassica napus* L. cultivars

在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 浓度下, SYH 叶中 POD 活性显著高于 QY-1, 是 QY-1 的 2.33 倍; $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 浓度下 SYH 叶中 POD 活性仅为 QY-1 的三分之二. 由此可见, 在低 Cd 胁迫下, SYH 体内存在着较 QY-1 更有效的应对 Cd 胁迫的抗氧化酶机制, 而随 Cd 胁迫浓度的提高, 油菜体内 Cd 含量增加, SYH 抗氧化酶系统可能已不足以应对 Cd 胁迫, 但油菜并未表现出毒害效应, 可知这一时期 SYH 体内 Cd 的主要解毒机制已非抗氧化系统, 而是主要通过亚细胞区隔化将 Cd 区隔在活性较低的组分来减轻其毒害作用.

2.2 田间条件下油菜 Cd 富集能力

由图 4 可知, 田间条件下, 除 QY-1 豆荚外, 两种油菜地上部各器官中 Cd 含量均明显高于根部, 这与廉梅花等^[27]研究镉超富集植物东南景天体内镉分布的趋势一致. 同时, SYH 豆荚、叶、茎和根部 Cd 含量也均高于 QY-1, 分别是 QY-1 的 2.68、1.99、1.46 和 1.43 倍. 由此可知, 在大田试验条件下, SYH 比 QY-1 能去除更高量的 Cd, 具有更高的 Cd 提取量和累积能力. 此外, 本研究比较了两种富集能力油菜与其他 4 种植物(经验证的 Cd 超累积植物或富集植物)^[28-31]对 Cd 污染土壤的植物修复效果(表 3). 由表 3 可知, 在土壤 Cd 浓度($1.55 \sim 2.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 pH(5.14~7.9)范围内, 两种富集型油菜与 4 种富集植物的生物量由大到小为龙葵(*Solanum nigrum* L.) > 秦油 1 号(QY-1) > 八宝景天(*S. spectabile*) > 三月黄(SYH) > 东南景天(*S. alfredii*) > 伴矿景天(*S. plumbizincicola*); 地上部 Cd

含量由高到低为东南景天(*S. alfredii*) > 伴矿景天(*S. plumbizincicola*) > 八宝景天(*S. spectabile*) > 龙葵(*Solanum nigrum* L.) > 三月黄(SYH) > 秦油 1 号(QY-1). 从 6 种植物地上部 Cd 含量比较而言, 2 种油菜均明显低于表 3 中 4 种已报道的 Cd 超富集植物, 但油菜生物量相对高于东南景天与伴矿景天等植物, 同时, 本研究的油菜品种为冬油菜, 可利用冬季进行规模化种植, 便于田间管理. 而且油菜花期较长, 极具观赏价值; 油菜籽还可以用来工业榨油, 有一定的经济产出, 因此具有潜在的推广应用空间. 此外, SYH 生物量虽低于 QY-1, 但其拥有更高的地上部 Cd 含量; 同时, SYH 的 Cd 提取量也明显高于 QY-1, 是 QY-1 的 1.91 倍. 因此同等条件下, SYH 具有更大的品种优势, 能去除更高量的 Cd.

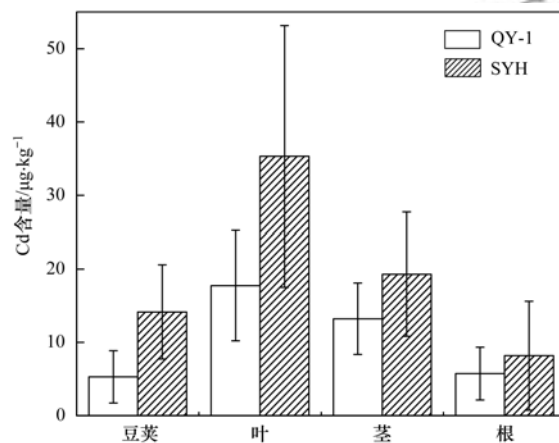


图 4 两种富集型油菜地上部和根部 Cd 含量

Fig. 4 Cadmium concentrations of shoots and roots of two *Brassica napus* L. cultivars

表 3 两种油菜与其他超富集植物对 Cd 污染土壤的植物修复效果比较

Table 3 Comparison of phytoremediation effects of two *Brassica napus* L. cultivars and other

(超)富集植物	土壤中 Cd 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	生物量 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	地上部 Cd 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 提取量 / $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	文献
八宝景天(<i>S. spectabile</i>)	2.22	7.7	2 517	13.11	33.00	[29]
东南景天(<i>S. alfredii</i>)	1.55	5.14	2 098	162.6	341.13	[28]
伴矿景天(<i>S. plumbizincicola</i>)	2.65	7.9	1 147	23.40	26.84	[30]
龙葵(<i>S. nigrum</i>)	1.91	6.26	17 284	9.72	168	[31]
秦油 1 号(QY-1)	2.22	7.7	2 894.7	2.26	6.53	本研究
三月黄(SYH)	2.22	7.7	2 359.6	5.28	12.46	本研究

3 结论

本研究通过水培和田间试验验证, 三月黄油菜(SYH)在耐性指数、地上和地下部 Cd 含量以及生物富集系数上均高于秦油 1 号(QY-1), 具有较高的 Cd 耐性和富集能力. 此外, 这两个油菜品种在对 Cd 的耐性和解毒机制上也存在一定的差异, 其叶片中 Cd 均主要区隔在热稳定蛋白(HSP)和金属富集颗

粒(MRG)组分中, 这是两种油菜在亚细胞水平上的重要解毒机制, 在水培高浓度 Cd 胁迫下 SYH 叶中 Cd 在细胞碎屑组分的含量达 QY-1 的 4.41 倍, 由此可知, Cd 在细胞碎屑组分中的分布是导致高浓度 Cd 胁迫下两种油菜 Cd 富集能力差异的重要机制. 此外, 在水培 Cd 胁迫条件下, SYH 叶中 POD 活性和响应速度远高于 QY-1, 具有更高的抗氧化和耐 Cd 胁迫的能力. 在大田试验条件下, SYH 的地上部 Cd

累积能力和 Cd 去除量都要高于 QY-1。综上所述, SYH 品种油菜对 Cd 胁迫具有更强的耐性和更高效的解毒机制;本研究为油菜应用于我国中轻度 Cd 污染农田修复提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 409-417.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 409-417.
- [2] 李婧, 周艳文, 陈森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农学通报, 2015, **21**(24): 104-107.
Li J, Zhou Y W, Chen S, *et al.* Actualities, damage and management of soil cadmium pollution in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, **21**(24): 104-107.
- [3] 陈同斌, 雷梅, 杨军, 等. 关于重金属污染土壤风险控制区划的研究与建议[J]. 中国科学院院刊, 2014, **29**(3): 321-326.
Chen T B, Lei M, Yang J, *et al.* Discussion on zoning of soil environmental risk control and remediation contaminated by heavy metals on regional scale [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2014, **29**(3): 321-326.
- [4] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [5] Huang Y F, Chen G F, Xiong L M, *et al.* Current situation of heavy metal pollution in farmland soil and phytoremediation application [J]. Asian Agricultural Research, 2016, **8**(1): 22-24.
- [6] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 366-370.
Cui D J, Zhang Y L. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, **35**(3): 366-370.
- [7] 武琳霞, 丁小霞, 李培武, 等. 我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估[J]. 农产品质量与安全, 2016, **14**(1): 41-46.
Wu L X, Ding X X, Li P W, *et al.* Assessment on contamination of rape seeds and safety of rapeseed oil in China [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2016, **14**(1): 41-46.
- [8] 陈同斌, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 蜈蚣草中砷的亚细胞分布与区隔化作用[J]. 科学通报, 2005, **50**(24): 2739-2744.
Chen T B, Yan X L, Liao X Y, *et al.* Subcellular and compartmentalization of arsenic in *Pteris vittata* L. [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, **50**(24): 2739-2744.
- [9] 杨登, 张昊, 邹慧玲, 等. 镉在水生植物中的富集与亚细胞分布及其化学形态特征[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(4): 682-689.
Yang D, Zhang H, Zou H L, *et al.* Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of Cadmium in aquatic plants [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, **38**(4): 682-689.
- [10] 周小勇, 仇荣亮, 胡鹏杰, 等. 表面活性剂对长柔毛委陵菜 (*Potentilla griffithii* var. *velutina*) 修复重金属污染的促进作用[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 283-290.
Zhou X Y, Qiu R L, Hu P J, *et al.* Surfactants enhance phytoremediation of heavy metal contamination by *Potentilla griffithii* var. *velutina* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(1): 283-290.
- [11] Zhang H Z, Guo Q J, Yang J X, *et al.* Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of two castor (*Ricinus communis* L.) cultivars exhibit differences in Cd accumulation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **120**: 184-192.
- [12] 何俊瑜, 任艳芳, 朱诚期, 等. 镉胁迫对镉敏感水稻突变体活性氧代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(3): 1004-1008.
He J Y, Ren Y F, Zhu C Q, *et al.* Effects of cadmium stress on reactive oxygen species metabolism and antioxidant enzyme activities in Cd-sensitive mutant rice seedlings [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(3): 1004-1008.
- [13] 张玉秀, 张红梅, 黄智博, 等. 商陆耐重金属 Cd 关键酶抗氧化酶的研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 896-900.
Zhang Y X, Zhang H M, Huang Z B, *et al.* Antioxidative enzymes play key roles in cadmium tolerance of *Phytolacca americana* [J]. Chinese Journal of Environmental Sciences, 2011, **32**(3): 896-900.
- [14] Li P H, Liu X W, Pan T, *et al.* Effect of Pb and Cd stress on the growth of potato and its antioxidant system [J]. Plant Diseases and Pests, 2015, **6**(2): 30-33, 37.
- [15] 汤叶涛, 关丽捷, 仇荣亮, 等. 镉对超富集植物滇苦菜抗氧化系统的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(2): 324-332.
Tang Y T, Guan L J, Qiu R L, *et al.* Antioxidative defense to cadmium in hyperaccumulator *Picris divaricata* V. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(2): 324-332.
- [16] 肖旭峰, 解庆妮, 范淑英, 等. 镉、铅胁迫对芹菜生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2015, **37**(5): 793-797.
Xiao X F, Xie Q W, Fan S Y, *et al.* Effect of Cd, Pb stress on growth and the activity of antioxidant enzymes in *Apium graveolens* [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2015, **37**(5): 793-797.
- [17] Guo J M, Yang J, Yang J X, *et al.* Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of four *Hylotelephium spectabile* populations exhibit differences in phytoextraction potential [J]. International Journal of Phytoremediation, 2019, **21**(3): 209-216.
- [18] 翁南燕, 周东美, 武敬, 等. 铜镉复合胁迫下温度对小麦幼苗生长及其对铜、镉和矿质营养元素吸收与各元素在亚细胞分布的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 607-616.
Weng N Y, Zhou D M, Wu J, *et al.* Uptake, subcellular distributions of Cu, Cd and mineral elements, and plant growth for wheat seedlings under stress of Cu and Cd as affected by temperature [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, **6**(6): 607-616.
- [19] Lavoie M, Le Faucheur S, Fortin C, *et al.* Cadmium detoxification strategies in two phytoplankton species: Metal binding by newly synthesized thiolated peptides and metal sequestration in granules [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **92**(2): 65-75.
- [20] Zeng J, Wang W X. Temperature and irradiance influences on cadmium and zinc uptake and toxicity in a freshwater cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 922-929.
- [21] Wallace W G, Lee B G, Luoma S N. Subcellular compartmentalization of Cd and Zn in two bivalves. I. Significance of metal-sensitive fractions (MSF) and biologically

- detoxified metal (BDM) [J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, **249**(249): 183-197.
- [22] 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.
- [23] 倪天华, 魏幼璋. 镉在东南景天中的亚细胞分配[J]. 植物学报, 2003, **45**(8): 925-928.
- Ni T H, Wei Y Z. Subcellular distribution of Cadmium in mining ecotype *Sedum alfredii* [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, **45**(8): 925-928.
- [24] 彭秋, 李桃, 徐卫红, 等. 不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3347-3354.
- Peng Q, Li T, Xu W H, *et al.* Differences in the Cadmium-enrichment capacity and subcellular distribution and chemical form of Cadmium in different varieties of pepper [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3347-3354.
- [25] Wang Y B, Yan A L, Dai J, *et al.* Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in *Chlorophytum comosum*: a popular ornamental plant and potential Cd hyperaccumulator [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, **184**(2): 929-937.
- [26] Wu Z C, Zhao X H, Sun X C, *et al.* Antioxidant enzyme systems and the ascorbate-glutathione cycle as contributing factors to cadmium accumulation and tolerance in two oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.) under moderate cadmium stress [J]. Chemosphere, 2015, **138**: 526-536.
- [27] 廉梅花, 孙丽娜, 胡筱敏, 等. 土壤 pH 对东南景天修复镉和锌污染土壤的影响[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(11): 3068-3074.
- Lian M H, Sun L N, Hu X M, *et al.* Effect of soil pH on phytoremediation of *Sedum alfredii* Hance in Cd and Zn contaminated soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(11): 3068-3074.
- [28] 朱鳳榕, 周良华, 阳峰, 等. 两种景天修复 Cd/Zn 污染土壤效果的比较[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(2): 403-410.
- Zhu H R, Zhou L H, Yang F, *et al.* Phytoremediation effects and contrast of *Sedum alfredii* and *Sedum plumbizincicola* on Cd/Zn contaminated soil [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, **28**(2): 403-410.
- [29] Guo J M, Lei M, Yang J X, *et al.* Effect of fertilizers on the Cd uptake of two sedum species (*Sedum spectabile* Boreau and *Sedum aizoon* L.) as potential Cd accumulators [J]. Ecological Engineering, 2017, **106**: 409-414.
- [30] 李立平, 田会阳, 卢一富, 等. 添加剂对伴矿景天修复石灰性铅冶炼污染土壤的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1858-1865.
- Li L P, Tian H Y, Lu Y F, *et al.* Influence of amendments on *Sedum plumbizincicola* phytoextraction of metals from a lead-smelting polluted calcareous soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1858-1865.
- [31] Ji P H, Sun T H, Song Y F, *et al.* Strategies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated agricultural soils by *Solanum nigrum* L. [J]. Environmental Pollution, 2010, **159**(3): 762-768.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)