

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究

董冰冰¹, 陈友媛^{1,2,3*}, 惠红霞¹, 陆维佳¹, 杨秀卿¹, 刘逸凡¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 3. 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 目前土壤中重金属铬(Cr)污染严重,有效筛选植物修复资源迫在眉睫. 本文通过盆栽试验分析了Cr(Ⅲ)和Cr(Ⅵ)胁迫下黑麦草(*Lolium perenne* L.)和牵牛花(*Pharibitis purpurea*(L.) Voigt)的生长、生理及Cr积累等指标,探究了两种植物对Cr耐受能力及积累效果. 结果表明,生长指标能直观反映出Cr胁迫下植物的受害程度. 低浓度Cr(Ⅲ)($<250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)促进植物生长,株高、根长和生物量显著升高($P<0.05$),而所有浓度Cr(Ⅵ)($\geq 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均损害植物生长,且植物根长对Cr毒害更为敏感. 植物生理指标既表征了Cr对植物的毒害程度,又可反映植物对Cr的耐受能力. Cr胁迫下,植物根系活力降低、丙二醛含量升高,对植物生理损害的表征具有代表性;而脯氨酸含量升高,既表征了植物的受害程度又提高了植物体内渗透平衡;SOD、POD活性升高,则增强了植物的抗氧化应激水平. Cr积累指标是筛选Cr积累植物的主要指标. 黑麦草和牵牛花对Cr(Ⅵ)积累浓度大于Cr(Ⅲ),两种植物根部Cr(Ⅵ)积累浓度最高分别可达 $957.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $743.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,地上部最高可达 $394.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $340.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;黑麦草根部富集能力优于牵牛花,最大富集系数可达15.55,但牵牛花对Cr的转运能力较好. 通过指标表征综合说明黑麦草和牵牛花可作为Cr污染土壤植物修复的备选植物.

关键词: 铬; 黑麦草; 牵牛花; 指标表征; 耐受能力; 积累

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-4044-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.048

Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt

DONG Bing-bing¹, CHEN You-yuan^{1,2,3*}, HUI Hong-xia¹, LU Wei-jia¹, YANG Xiu-qing¹, LIU Yi-fan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: Considering the serious pollution of heavy metal-chromium (Cr) in soil, there is an urgent need for effective selection of Cr-tolerant plant species. In order to gain fundamental insights into the tolerance and accumulation capabilities of *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt under Cr stress, a pot experiment was conducted to investigate their growth, physiology and accumulation characteristics under Cr(Ⅲ) and Cr(Ⅵ) stress. The results showed the growth parameters could intuitively reflect the toxicity levels of Cr for plants. For instance, a low-level Cr(Ⅲ) ($<250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in soil was good for plant growth as indicated by the significant elevation of plant height, root length and biomass in *L. perenne* ($P<0.05$). However, Cr(Ⅵ) at all concentrations ($\geq 25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in the soil inhibited the growth of both plant species, and the root length was particularly sensitive to the toxicity of Cr. The physiological parameters of plant represented both the toxicity of Cr and the tolerance of plants under Cr stress. A decrease of root activity and an increase of malonaldehyde content were observed under Cr stress, which indicated the physiological metabolism of plants was disturbed. In the presence of both Cr species, the proline content increased, which served as an indicator for both high Cr toxicity and increase of osmotic balance in plants. A rise in SOD and POD activity reflected the defense ability of plants against oxidative stress caused by Cr. In addition, the Cr-accumulation related parameters were the major standards for tolerant species selection. The Cr(Ⅵ) accumulation capacities of both plant species were greater than their Cr(Ⅲ) accumulation capacities. The maximum accumulation amounts of *L. perenne* and *P. purpurea* reached $957.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $743.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in roots and $394.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $340.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in shoots, respectively. In comparison with *P. purpurea*, *L. perenne* displayed a stronger Cr accumulation capacity in roots with a maximum bioaccumulation factor of 15.55. However, the transport ability of *P. purpurea* was superior to *L. perenne*. All of the parameters demonstrated that both *L. perenne* and *P. purpurea* could be used as alternative plants for phytoremediation of Cr-contaminated soil.

Key words: chromium; *Lolium perenne* L.; *Pharibitis purpurea*(L.) Voigt; characterization; tolerance; accumulation

收稿日期: 2016-04-01; 修订日期: 2016-05-09

作者简介: 董冰冰(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水土污染控制与修复技术,E-mail: wsdongbing@163.com

* 通讯联系人,E-mail: youyuan@ouc.edu.cn

重金属污染为环境和人类健康带来严重后果,已成为人们普遍关注的环境问题^[1]。铬(Cr)是对生物威胁最严重的重金属之一,工业制品全球年产量约为 10^7 t^[2],致使大量含Cr废物通过直接排放和间接大气沉降进入土壤,Cr污染土壤的修复与治理迫在眉睫。植物修复是一种绿色、生态友好型的原位修复技术。但Cr的超积累植物种类稀少,近年来筛选生长迅速、生物学产量高,且对Cr耐受能力强的植物成为低浓度Cr污染场地植物修复及已处理污染场地生态恢复的新方向^[3,4]。

目前,植物对Cr的积累含量是筛选修复植物种类的主要指标,已发现的对Cr具有一定耐受性的植物品种包括白花三叶草^[5]、高羊茅^[5]和四川黄籽^[6]等。而Cr在植物中的积累对植物的生长及生理造成毒性损害^[7],成为植物大量积累Cr的主要限制因素。Cr对植物的毒性作用主要表现为植物生物量下降、严重损害植物根部生长,并刺激活性氧(ROS)的产生、诱导膜脂过氧化^[8]。但植物也拥有自身防御机制,如脯氨酸、抗氧化酶、次级代谢产物等,保护植物不受重金属的氧化应激伤害,提高植物对重金属的耐受能力^[9,10]。不同植物对重金属耐受性能不同,如何进行评价、哪些指标能够综合反映植物对重金属污染场地的修复潜力,目前尚无明确界定。因此研究植物在重金属胁迫下的生长、生理响应,联合植物对金属的积累效果,完善重金属耐受型植物评价指标体系对重金属污染场地的修复具有重要现实意义。

土壤中的Cr主要以Cr(Ⅲ)和Cr(Ⅵ)形式存在,Cr(Ⅲ)是动植物生长必需的元素,在土壤中的含量普遍高于Cr(Ⅵ);而Cr(Ⅵ)对植物的毒性超过Cr(Ⅲ)的100倍^[11,12],且其更容易被植物吸收。Cr(Ⅵ)胁迫下耐受型植物的生理代谢及富集性能已有研究^[3-6],然而,对比Cr(Ⅲ)和Cr(Ⅵ)胁迫下植物的生长、生理表征指标及对Cr积累效果的研究仍较少。

本研究以青岛红星化工厂铬渣堆场及周边楼山河沿岸的土壤、植被铬污染调查为基础,选用调查区分布广泛、生长茂盛的土著草本植物黑麦草(*Lolium perenne* L.)和牵牛花[*Pharibitis purpurea* (L.) Voigt]为研究对象,分析Cr(Ⅲ)和Cr(Ⅵ)胁迫下两种植物生长、生理响应指标及对Cr的积累指标,探讨两种植物对不同价态Cr耐受能力及Cr积累效果,并以此为基础准确评价这两种植物对Cr污染土壤的修复潜能,以期科学地筛选Cr污染土壤

修复的植物资源提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 植物材料

黑麦草(*Lolium perenne* L.),禾本科黑麦草属,多年生草本植物。其生长迅速、根系发达、生物量大,对重金属具有较强的耐受能力。牵牛花[圆叶牵牛,*Pharibitis purpurea* (L.) Voigt],旋花科牵牛属,一年生蔓性缠绕草本。其有发达的直根,有较强的耐干旱、耐盐碱能力,观赏性强。植物种子购于尚品绿化工程苗木公司。

1.1.2 供试土壤

供试土壤采自青岛红星化工厂铬渣堆场上游2 km处的表层土壤(0~20 cm)。青岛红星化工厂从1958年建厂至2004年累计堆放的铬渣总量超过 2×10^5 t。2004年对铬渣进行烧结炼铁处置,但以铬渣堆场为中心,其毗邻的楼山河沿岸上游1 km至下游2.5 km处表层土壤均受到不同程度Cr污染。2015年8月,对铬渣堆场及周边楼山河沿岸表层土壤Cr污染状况进行调查,发现铬渣堆场表层土壤Cr(Ⅲ)最大值和平均值分别为 $15\,697.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3\,156.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cr(Ⅵ)分别为 $255.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $63.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与历史调查结果相比,污染程度有所降低^[13,14]。

土壤样品采回后自然风干、磨细后过2.5 mm筛,室温下保存。供试土壤的pH值、有机质和阳离子交换量(CEC)分别为7.32、10.47 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和16.48 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,总铬和六价铬含量分别为9.58 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

依据调查区表层土壤Cr含量进行预试验,确定Cr(Ⅲ)和Cr(Ⅵ)的最高含量分别为 $1\,500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用直径12 cm、高14 cm的塑料花盆进行室内盆栽试验,每盆土壤用量1 kg(以干土计)。供试土壤设置6个Cr(Ⅲ)浓度和6个Cr(Ⅵ)浓度(均以Cr计),浓度梯度分别为0(CK)、100、250、500、1 000、1 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及0(CK)、25、50、100、200、300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。按上述浓度将Cr以 $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的溶液形式均匀加入,充分混匀,于室内25℃下平衡一周后用于试验,各处理重复3次。

选择饱满度一致的种子用0.5%次氯酸钠溶液浸泡消毒10 min,用去离子水冲洗后播种于处理后

的土壤中,待种子出苗一周后间苗,每盆保留长势一致的幼苗15株.植物生长期根据土壤水分蒸发情况,不定期补充蒸馏水保持土壤含水量达饱和和水量的65%;整个生长期采用自然光源,温度保持在10~25℃.

植株生长30d后破坏性取样,测定植物各项生理指标,并收获植物.收获的植株用去离子水快速洗净,然后将地上部和根部分开.处理后的植物样品在105℃下杀青0.5h,70℃烘干至恒重.烘干样品粉碎过0.425mm筛,用于测定植物中Cr含量.

1.3 分析方法

1.3.1 植物生长、生理指标的测定

试验结束后,测量植物株高、根长、干重等生长指标.选取植物相同部位测定其各项生理指标,其中:

$$\text{植物含水率} = \frac{\text{植株鲜重} - \text{干重}}{\text{鲜重}} \times 100\%$$

叶绿素含量采用乙醇提取法^[15]测定,脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法^[16]测定,根系活力采用氯化三苯基四氮唑法^[16]测定.植物抗氧化系统中的丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[16]测定,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性分别采用氮蓝四唑还原法^[16]、愈创木酚比色法^[16]及紫外吸收法^[16]测定.

1.3.2 植物Cr含量的测定

称取粉碎的植物样品0.5g于锥形瓶中,加入20mL浓硝酸和4mL高氯酸低温加热消解^[5].体积减至2~5mL时,加入10mL去离子水,再加热10~15min后移入25mL比色管中,并用0.2%硝酸定容至刻度,使用原子吸收光谱分析其中Cr含量,并计算富集系数及转运系数.做空白试验作为对照,同时加入国家标准植物样品(GBW07602)进行质量控制,样品回收率为94%~103%.

富集系数(bioconcentration factor, BCF) =

$$\frac{\text{植物地上部或根部Cr含量}}{\text{土壤Cr含量}}$$

转运系数(translocation factor, TF) =

$$\frac{\text{植物地上部Cr含量}}{\text{植物根部Cr含量}}$$

1.4 试验仪器

TU-1810(普析,中国)紫外可见分光光度计. M6型(Thermo Solar, USA)原子吸收光谱仪.

1.5 数据分析

应用SPSS 16.0软件对数据进行方差分析

(ANOVA)和 $P=0.05$ 水平下的Tukey检验;相关分析采用Pearson相关系数,并用Two-tailed进行显著性检验.统计数据采用Origin 8.5软件绘图.

2 结果与分析

2.1 Cr(III)和Cr(VI)胁迫下黑麦草和牵牛花的生长指标

土壤中Cr(III)和Cr(VI)对黑麦草和牵牛花的株高、根长和生物量均产生影响(表1).100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cr(III)胁迫下,黑麦草的株高和根长分别高于对照组5.0%和15.3%,至1500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时仅为对照组的64.6%和43.7%.高浓度Cr(III)对牵牛花的生长抑制较为明显,1500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cr(III)胁迫下牵牛花株高和根长仅分别为对照组的26.0%和27.2%.Cr(VI)胁迫对两种植物的株高和根长均表现出显著的抑制作用($P<0.05$).例如Cr(VI)浓度为25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,黑麦草的株高和根长甚至低于1500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cr(III)处理下的相应值.

Cr(III)胁迫下,两种植物的生物量均呈先升高后下降的趋势;对比来看500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cr(III)胁迫下,黑麦草的生物量仍与对照组持平,而该浓度下牵牛花生物量仅为对照组的60.2%.Cr(VI)胁迫下,两种植物的生物量均显著下降($P<0.05$),且牵牛花的下降更为明显,在25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cr(VI)胁迫下牵牛花生物量与对照组相比下降了34.9%,而当浓度增加到50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,降幅增加至71.3%,明显高于相同处理下的黑麦草下降比率44.0%.综上所述,植物生物量对Cr(VI)敏感,而植物根长对Cr(III)和Cr(VI)胁迫的表征作用均较强.

2.2 Cr(III)和Cr(VI)胁迫下黑麦草和牵牛花的生理指标

2.2.1 一般生理指标

Cr胁迫还对植物叶绿素及脯氨酸合成、含水率和根系活力造成影响.两种植物在Cr(III)和Cr(VI)胁迫下的叶绿素含量见表2.Cr(III)胁迫下黑麦草和牵牛花叶绿素含量分别在250 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时开始降低,至1500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时总叶绿素含量分别仅为对照组的81.5%和20.5%.Cr(VI)胁迫使两种植物叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均呈下降趋势,且各处理组间差异更为显著($P<0.05$).Cr胁迫下黑麦草叶绿素a/b值呈下降趋势,而牵牛花则表现为下降后升高.因此,黑麦草叶绿素a对Cr较为敏感,而牵牛花总叶绿素含量对Cr毒害的指示作用更好.

表 1 Cr(III) 和 Cr(VI) 胁迫对黑麦草和牵牛花生长指标的影响¹⁾Table 1 Effect of Cr(III) and Cr(VI) stress on the growth parameters of *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea*(L.) Voigt

项目	Cr 含量 /mg·kg ⁻¹	黑麦草			牵牛花		
		株高 /cm	根长 /cm	生物量(DW) /mg·plant ⁻¹	株高 /cm	根长 /cm	生物量(DW) /mg·plant ⁻¹
Cr(III)	0	28.85 ± 1.57 ^{ab}	19.17 ± 0.75 ^b	17.85 ± 0.60 ^b	37.33 ± 1.25 ^b	15.70 ± 0.50 ^b	87.40 ± 2.43 ^a
	100	30.30 ± 1.52 ^a	22.11 ± 1.23 ^a	19.70 ± 1.01 ^a	37.37 ± 0.51 ^b	17.90 ± 0.66 ^a	88.39 ± 2.48 ^a
	250	25.84 ± 0.99 ^{bc}	20.53 ± 0.50 ^{ab}	16.16 ± 0.77 ^b	39.77 ± 1.32 ^a	17.97 ± 0.50 ^a	79.48 ± 4.61 ^b
	500	24.19 ± 1.26 ^c	10.60 ± 0.46 ^c	16.89 ± 0.35 ^b	13.07 ± 0.40 ^c	11.97 ± 0.57 ^c	52.60 ± 2.01 ^c
	1 000	23.51 ± 1.08 ^c	8.53 ± 0.51 ^d	10.17 ± 0.47 ^c	11.57 ± 0.47 ^{cd}	8.10 ± 0.35 ^d	34.14 ± 0.62 ^d
	1 500	18.65 ± 1.15 ^d	8.37 ± 0.64 ^d	11.27 ± 0.15 ^c	9.70 ± 0.46 ^d	4.27 ± 0.25 ^e	27.30 ± 1.50 ^d
Cr(VI)	0	28.70 ± 1.91 ^a	18.16 ± 0.57 ^a	17.23 ± 0.93 ^a	35.03 ± 1.02 ^a	20.07 ± 0.90 ^a	94.24 ± 6.45 ^a
	25	18.45 ± 0.76 ^b	3.83 ± 0.42 ^b	13.88 ± 0.18 ^b	19.60 ± 0.46 ^b	7.83 ± 0.35 ^b	61.23 ± 0.90 ^b
	50	10.41 ± 1.25 ^c	1.96 ± 0.25 ^c	9.64 ± 0.13 ^c	7.13 ± 0.31 ^c	3.50 ± 0.20 ^c	27.02 ± 0.55 ^c
	100	6.36 ± 0.56 ^d	1.03 ± 0.15 ^d	5.33 ± 0.33 ^d	5.53 ± 0.15 ^d	2.63 ± 0.15 ^{ed}	25.30 ± 0.62 ^{cd}
	200	3.07 ± 0.51 ^e	0.43 ± 0.06 ^d	3.28 ± 0.19 ^e	4.83 ± 0.15 ^d	2.40 ± 0.10 ^{ed}	20.17 ± 0.37 ^{cd}
	300	2.17 ± 0.31 ^e	0.27 ± 0.06 ^d	2.72 ± 0.10 ^e	4.43 ± 0.12 ^d	1.97 ± 0.12 ^d	18.79 ± 0.07 ^d

1) 数据为平均值 ± 标准偏差, 每个指标的同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

表 2 Cr(III) 和 Cr(VI) 胁迫对黑麦草和牵牛花的叶绿素含量的影响

Table 2 Effect of Cr(III) and Cr(VI) stress on chlorophyll content of *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea*(L.) Voigt

项目	Cr 含量 /mg·kg ⁻¹	黑麦草				牵牛花			
		叶绿素 a /mg·g ⁻¹	叶绿素 b /mg·g ⁻¹	总叶绿素 /mg·g ⁻¹	叶绿素 a/b	叶绿素 a /mg·g ⁻¹	叶绿素 b /mg·g ⁻¹	总叶绿素 /mg·g ⁻¹	叶绿素 a/b
Cr(III)	0	1.51 ± 0.08 ^a	0.21 ± 0.01 ^b	1.72 ± 0.08 ^a	7.23 ± 0.47 ^a	2.10 ± 0.09 ^a	0.35 ± 0.01 ^a	2.44 ± 0.10 ^a	6.06 ± 0.20 ^b
	100	1.51 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.01 ^b	1.71 ± 0.03 ^a	7.36 ± 0.25 ^a	1.74 ± 0.08 ^b	0.29 ± 0.02 ^b	2.02 ± 0.09 ^b	6.10 ± 0.24 ^b
	250	1.30 ± 0.02 ^b	0.20 ± 0.00 ^b	1.49 ± 0.03 ^b	6.66 ± 0.02 ^{ab}	1.47 ± 0.06 ^c	0.22 ± 0.00 ^c	1.68 ± 0.05 ^c	6.77 ± 0.37 ^a
	500	1.26 ± 0.04 ^b	0.21 ± 0.01 ^b	1.47 ± 0.03 ^b	6.03 ± 0.39 ^b	0.73 ± 0.04 ^d	0.21 ± 0.01 ^c	0.77 ± 0.02 ^d	3.44 ± 0.24 ^d
	1 000	1.24 ± 0.04 ^b	0.24 ± 0.01 ^a	1.48 ± 0.05 ^b	5.18 ± 0.05 ^c	0.56 ± 0.03 ^e	0.12 ± 0.00 ^d	0.56 ± 0.02 ^e	4.54 ± 0.10 ^c
	1 500	1.23 ± 0.02 ^b	0.24 ± 0.01 ^a	1.46 ± 0.02 ^b	5.17 ± 0.24 ^c	0.43 ± 0.02 ^e	0.09 ± 0.00 ^e	0.52 ± 0.03 ^e	5.07 ± 0.08 ^c
Cr(VI)	0	1.46 ± 0.04 ^a	0.22 ± 0.01 ^a	1.68 ± 0.04 ^a	6.54 ± 0.33 ^a	1.99 ± 0.04 ^a	0.31 ± 0.01 ^a	2.31 ± 0.05 ^a	6.34 ± 0.12 ^a
	25	1.18 ± 0.06 ^b	0.21 ± 0.01 ^{ab}	1.39 ± 0.06 ^b	5.59 ± 0.44 ^b	1.91 ± 0.09 ^a	0.46 ± 0.14 ^a	2.37 ± 0.22 ^a	4.40 ± 1.35 ^{bc}
	50	0.79 ± 0.03 ^c	0.21 ± 0.01 ^b	1.00 ± 0.03 ^c	3.87 ± 0.17 ^c	1.34 ± 0.06 ^b	0.36 ± 0.01 ^a	1.70 ± 0.07 ^b	3.66 ± 0.11 ^{bc}
	100	0.58 ± 0.03 ^d	0.17 ± 0.01 ^c	0.76 ± 0.03 ^d	3.37 ± 0.19 ^c	0.76 ± 0.04 ^c	0.13 ± 0.01 ^b	0.89 ± 0.04 ^c	5.93 ± 0.35 ^{ab}
	200	0.39 ± 0.01 ^e	0.12 ± 0.01 ^d	0.51 ± 0.02 ^e	3.38 ± 0.14 ^c	0.53 ± 0.03 ^d	0.09 ± 0.00 ^b	0.62 ± 0.02 ^d	5.90 ± 0.32 ^{ab}
	300	0.24 ± 0.01 ^f	0.09 ± 0.00 ^e	0.33 ± 0.02 ^f	2.60 ± 0.06 ^d	0.32 ± 0.02 ^e	0.06 ± 0.00 ^b	0.37 ± 0.01 ^d	5.69 ± 0.54 ^{ab}

Cr(III) 和 Cr(VI) 胁迫下两种植物的含水率、根系活力和脯氨酸含量如图 1。Cr(III) 胁迫下两种植物含水率均大于 80%, 且各处理组与对照组相差均维持在 6% 以内; 50 mg·kg⁻¹ Cr(VI) 胁迫下, 黑麦草和牵牛花的含水率均在 50 mg·kg⁻¹ 时开始降低, 并分别在 100 mg·kg⁻¹ 和 50 mg·kg⁻¹ Cr(VI) 时下降最为明显(与对照组相比分别下降了 44.8% 和 35.1%)。因此, 与 Cr(VI) 相比, 植物含水率对 Cr(III) 胁迫的指示作用并不明显。

Cr(III) 不超过 250 mg·kg⁻¹ 时黑麦草和牵牛花的根系活力分别可达对照组的 1.1 和 1.7 倍; 而仅在 25 mg·kg⁻¹ 的 Cr(VI) 胁迫下时, 两种植物的根系活力相对对照组分别下降了 54.4% 和 58.5%。因此, 根系活力对 Cr(VI) 和 Cr(III) 胁迫

下植物毒害具有较强表征作用, 且其对 Cr(VI) 胁迫更为敏感。

Cr(III) 胁迫下黑麦草和牵牛花脯氨酸含量分别在 500 mg·kg⁻¹ 和 250 mg·kg⁻¹ 时显著升高 ($P < 0.05$), 最高含量分别可达对照组的 4.7 倍和 7.7 倍; Cr(VI) 胁迫下两种植物各处理组脯氨酸含量差异显著 ($P < 0.05$), 最高含量与对照组相比分别增加了 6.3 倍和 8.2 倍。由此可知, 植物脯氨酸含量对 Cr 胁迫较为敏感。

综合生长和生理指标表明, Cr(III) 胁迫不超过 250 mg·kg⁻¹ 时, Cr(III) 对黑麦草和牵牛花的生长状况和生理代谢具有促进作用, 过量 Cr(III) (≥ 250 mg·kg⁻¹) 及所有浓度 Cr(VI) (≥ 25 mg·kg⁻¹) 对植物造成毒性伤害。

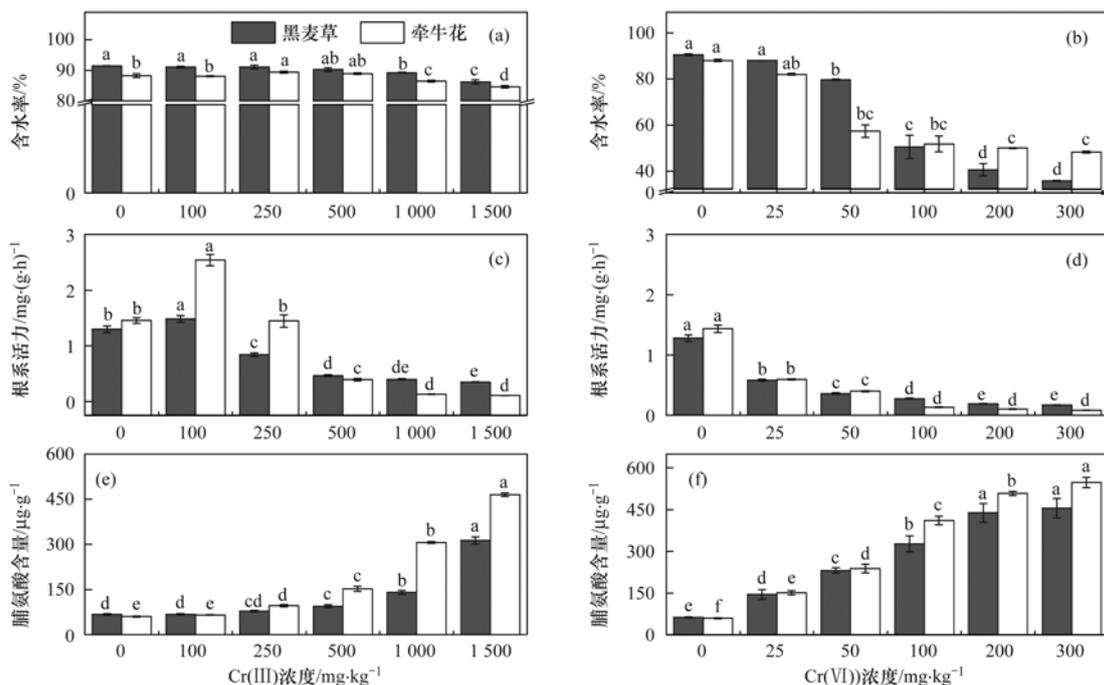


图 1 Cr(III)和Cr(VI)胁迫对黑麦草和牵牛花生理指标的影响

Fig. 1 Effect of Cr(III) and Cr(VI) stress on the physiological parameters of *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt

2.2.2 抗氧化酶系统指标

Cr(III)胁迫下植物超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性分别见图2(a)、图2(c)和图2(e). Cr(III)胁迫下黑麦草的3种抗氧化酶活性均表现出先升高后下降的趋势,其中SOD和POD活性最高值分别高出对照组的71.6%、161.9%,且两种酶活性仅在Cr(III)浓度超过1000 mg·kg⁻¹时低于对照组;而CAT活性在100 mg·kg⁻¹时最高,超过此浓度后CAT活性变化不显著($P > 0.05$). Cr(III)胁迫下牵牛花SOD活性变化趋势与黑麦草一致,但POD、CAT均随土壤中Cr(III)浓度的升高而降低. Cr(VI)胁迫下两种植物SOD和POD活性均呈先升高后下降的趋势[图2(b)和图2(d)],两种植物SOD和POD活性均在25 mg·kg⁻¹时显著升高($P < 0.05$);随Cr(VI)浓度升高,黑麦草和牵牛花的CAT活性均显著下降($P < 0.05$),Cr(VI)浓度在100 mg·kg⁻¹时约与对照持平. 由此可知,黑麦草和牵牛花的SOD和POD对Cr胁迫的抵抗性较强,Cr(III)和Cr(VI)分别不超过1000 mg·kg⁻¹和100 mg·kg⁻¹时两种植物对Cr的耐受能力较强.

Cr(III)胁迫下,两种植物的丙二醛(MDA)含量均在250 mg·kg⁻¹时开始显著升高($P < 0.05$),所有处理组黑麦草的MDA含量均不超过对照组的45%,而牵牛花最大MDA含量可达对照组的2.2

倍. Cr(VI)胁迫时两种植物MDA含量均显著增加($P < 0.05$),25 mg·kg⁻¹ Cr(VI)时的MDA含量甚至高于1500 mg·kg⁻¹ Cr(III)时的含量. 相比Cr(III),较低浓度Cr(VI)即可使植物的质膜系统受到伤害,干扰植物的正常生命活动. 对比根系活力、脯氨酸等生理指标表明,MDA可作为植物受Cr氧化胁迫的表征指标.

2.3 黑麦草和牵牛花对Cr(III)和Cr(VI)的有效积累

Cr(III)和Cr(VI)胁迫下两种植物地上部和根部Cr含量如图3所示. 两种植物根部Cr含量均高于地上部,且Cr(VI)含量均高于Cr(III). Cr(III)胁迫下黑麦草和牵牛花地上部Cr含量分别于500 mg·kg⁻¹和250 mg·kg⁻¹时开始显著升高($P < 0.05$);根部最高积累浓度分别可达427.8 mg·kg⁻¹和363.0 mg·kg⁻¹. Cr(VI)胁迫下,两种植物地上部Cr含量在50 mg·kg⁻¹时急剧增加,分别为25 mg·kg⁻¹处理组的3.4倍和3.0倍;根部最高积累浓度分别达957.4 mg·kg⁻¹和743.3 mg·kg⁻¹,地上部最高积累浓度分别达394.7 mg·kg⁻¹和340.4 mg·kg⁻¹. 由此可知,两种植物对Cr积累的部位主要位于植物根部.

随土壤Cr浓度升高,两种植物地上部和根部对Cr的富集系数(BCF)基本呈下降趋势,且根部对Cr的富集能力高于地上部(表3). Cr(III)胁迫下,黑麦草和牵牛花根部和地上部的富集系数均低于

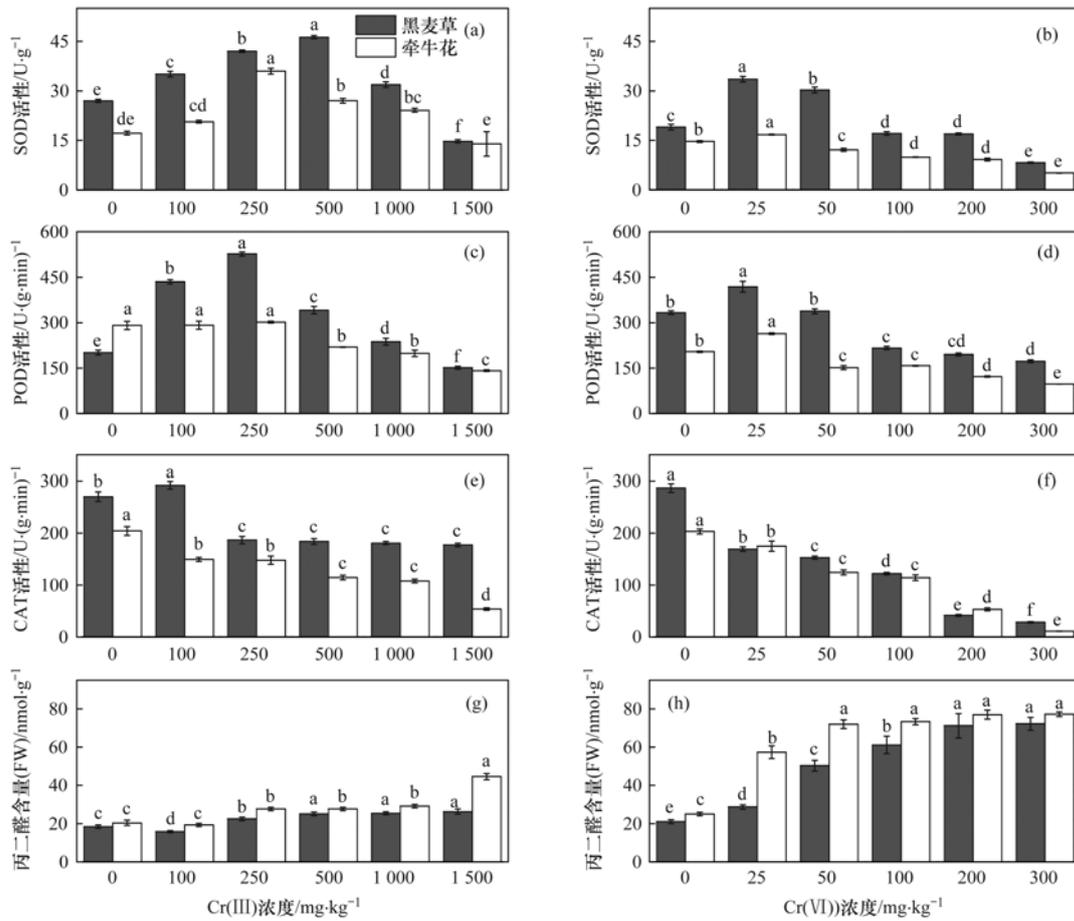


图2 Cr(III)和Cr(VI)胁迫对黑麦草和牵牛花抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effect of Cr(III) and Cr(VI) stress on antioxidant enzyme activities and malondialdehyde content of *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt

表3 Cr(III)和Cr(VI)胁迫下黑麦草和牵牛花对Cr的转运系数(TF)和富集系数(BCF)

Table 3 Cr bioconcentration factor (BCF) and transfer factor (TF) of *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt under Cr(III) and Cr(VI) stress

Cr(III) /mg·kg ⁻¹	黑麦草			牵牛花			Cr(VI) /mg·kg ⁻¹	黑麦草			牵牛花		
	TF	地上 BCF	根部 BCF	TF	地上 BCF	根部 BCF		TF	地上 BCF	根部 BCF	TF	地上 BCF	根部 BCF
100	0.14	0.09	0.62	0.16	0.07	0.43	25	0.24	3.74	15.55	0.37	4.27	11.41
250	0.07	0.04	0.50	0.10	0.06	0.63	50	0.49	6.40	12.96	1.05	6.48	6.15
500	0.09	0.05	0.59	0.25	0.08	0.34	100	0.44	3.57	8.14	0.67	3.33	5.01
1000	0.08	0.03	0.36	0.34	0.06	0.19	200	0.41	1.90	4.60	0.50	1.68	3.36
1500	0.10	0.03	0.29	0.18	0.04	0.24	300	0.41	1.32	3.19	0.46	1.13	2.48

0.1,浓度为250 mg·kg⁻¹时根部富集系数分别达地上部的13.9倍和10.1倍。Cr(VI)胁迫下植物的富集系数均大于Cr(III),黑麦草和牵牛花根部富集系数平均为地上部的2.7倍和1.9倍。黑麦草和牵牛花在Cr(VI)胁迫下的转运系数(TF)较高,最高分别可达0.49和1.05。

3 讨论

3.1 生长及生理指标表征植物对Cr胁迫的耐受能力
植物对Cr胁迫的耐受能力,一方面通过生长等

指标直观表现为植物受毒害的程度;另一方面间接表现在植物应对逆境胁迫的生理机制。植物应对Cr胁迫的生理响应主要为渗透调节和抗氧化机制。

3.1.1 根长、根系活力指标表征Cr胁迫下植物的受害程度

Cr损害植物的生长发育,直观表现为植株矮小、根系不发达及生物量下降^[17~20],而且影响叶片光合作用和根系代谢^[21]。本研究中,低浓度Cr(III)(<250 mg·kg⁻¹)对两种植物的生长有促进作用,但高浓度抑制植物生长,且根长和根系活力指标变

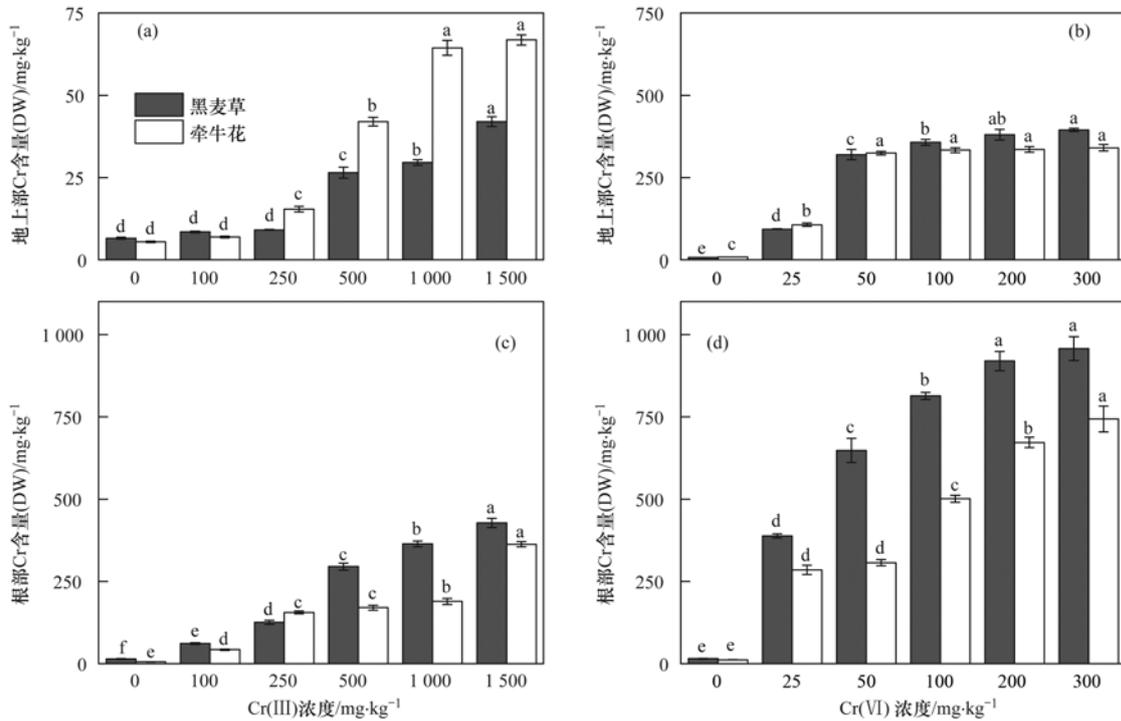


图3 Cr(III)和Cr(VI)胁迫下黑麦草和牵牛花对Cr的积累浓度

Fig. 3 Cr accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharbitis purpurea* (L.) Voigt under Cr(III) and Cr(VI) stress

化最为明显[表1、图1(c)、图1(d)]. 而Cr(VI)阴离子复合物可进入植物细胞膜^[22,23],对植物生长的毒性作用强,本研究中土壤Cr(VI)浓度仅为25 mg·kg⁻¹时黑麦草和牵牛花即产生明显毒性作用,且根长的减少最为显著,根系活力极低. Cr胁迫下根部生长的抑制及根系活力的降低可能与介质中的矿物营养有关^[24]. 有研究通过增加Cr(VI)胁迫介质中硫酸盐、磷酸盐及硝酸盐浓度,缓解了芥菜幼苗主根的生长抑制,且缓解率可达70%^[19]. 因此,根长可作为Cr毒害植物最直接的指标,根系活力是对高浓度Cr(III)与Cr(VI)胁迫较为敏感的生理指标.

3.1.2 丙二醛(MDA)含量表征Cr胁迫下植物氧化应激水平

Cr对植物的主要毒性作用还表现为植物体内ROS大量积累,细胞膜脂过氧化作用加大,MDA含量升高^[27]. Scoccianti等^[25]发现Cr(III)和Cr(VI)胁迫下猕猴桃花粉幼苗的膜脂过氧化作用均显著增加,且Cr(VI)胁迫下更为敏感. 本研究中,Cr(VI)胁迫和高浓度Cr(III)下植物的膜脂过氧化程度较严重,黑麦草MDA含量较高[图2(g)和图2(h)]. 高浓度Cr胁迫下MDA增加可能是植物组织细胞损伤的结果,金属耐受型植物比敏感植物的膜脂过氧化水平低^[26]. 综合可知,黑麦草抗氧化能力略好,

且MDA是衡量植物受Cr氧化毒害程度的主要指标.

3.1.3 脯氨酸含量表征Cr对植物的毒害程度及植物的渗透调节能力

非酶类渗透调节物质脯氨酸^[27]能够稳定亚细胞结构,缓冲细胞的氧化还原电势^[28,29],其含量的增加常被认为是植物适应逆境的表现. 但也有研究认为,植物体内脯氨酸含量的升高与电子传递活性的下降有关^[7],Cr胁迫下脯氨酸含量的升高更能反映植物的毒性症状. 本研究中,黑麦草脯氨酸含量略低于牵牛花,牵牛花需要合成更多的脯氨酸来平衡渗透势,中毒较深,耐受性较差. Cr(III)和Cr(VI)胁迫下黑麦草脯氨酸含量与株高均呈显著负相关(相关系数和显著水平分别为 $R^2 = -0.890, P < 0.05$; $R^2 = -0.942, P < 0.01$);而牵牛花脯氨酸含量与生物量均呈显著负相关($R^2 = -0.924, P < 0.01$; $R^2 = -0.877, P < 0.05$). 因此,脯氨酸含量指标既可调节植物渗透平衡,又在一定程度上反映了植物的受害程度.

3.1.4 抗氧化酶活力表征Cr胁迫下植物的耐受能力

重金属胁迫导致植物产生大量ROS,引起细胞毒害,而SOD能及时清除超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot -}$),POD和CAT则能有效清除SOD的歧化产物 H_2O_2 ,减缓细胞膜系统的伤害^[23],使植物适应逆

境环境. 研究发现, 抗氧化酶在超积累植物李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz) 应答 Cr 氧化胁迫中起到重要作用^[30]. 而且, 不同植物抗氧化系统对 Cr 胁迫的响应不同, 如 Cr(VI) 胁迫使洋甘菊抗氧化物含量降低^[20]; 低浓度 Cr (0.5 mmol·L⁻¹) 即可对银胶菊产生氧化损害, 而高浓度 Cr (1 mmol·L⁻¹) 仍可使龙葵叶片的 SOD、POD 含量升高^[24]; 而 Patel 等^[27] 则认为 POD 是罗勒抗氧化应激主要防御机制. 本研究中, Cr(III) 和 Cr(VI) 分别不超过 250 mg·kg⁻¹、25 mg·kg⁻¹ 时两种植物的 SOD、POD 活性均较高 [图 2(a)~2(f)]. 因此, 植物抗氧化酶活力是植物抵抗 Cr 胁迫的内在响应, SOD、POD 可用来表征黑麦草和牵牛花对 Cr 的耐受能力.

3.2 Cr 的积累指标表征植物对 Cr 的积累效果

植物体中 Cr 的积累含量是筛选植物修复资源的重要指标之一. 本研究中, 与 Cr(III) 相比, 植物根部更容易吸收 Cr(VI), Cr 浓度均为 100 mg·kg⁻¹ 时, 两种植物对 Cr(VI) 的积累浓度超过对 Cr(III) 积累浓度的 10 倍 (图 2). 这可能是由于土壤中 Cr(III) 更容易被土壤表面吸附或形成沉淀稳定存在, 植物可利用程度不高, 而 Cr(VI) 的酸根离子带负电荷, 吸附性能差, 溶解性和生物有效性较高^[31]; 并且有报道称 Cr(VI) 的吸收更快速, 其可利用与硫酸盐相同的运输系统渗透进入根部细胞^[32], 并在细胞内部被还原, 生成大量自由基影响植物正常代谢及生长. 一般植物叶片中 Cr 的临界含量大约仅为 10 mg·kg⁻¹ 左右^[7], 而 Cr 超积累植物的参考值为地上部分 Cr 积累浓度大于 1 000 mg·kg⁻¹^[33], 我国仅发现的 Cr 超级累植物李氏禾的叶片 Cr 含量平均高达 1 786.9 mg·kg⁻¹^[34]. 本研究发现黑麦草和牵牛花根部 Cr(VI) 最大积累浓度分别为 957.4 mg·kg⁻¹ 和 743.3 mg·kg⁻¹, 地上部分分别为 394.7 mg·kg⁻¹ 和 340.4 mg·kg⁻¹ (图 2). 其他耐 Cr 植物筛选研究的结果发现, 土壤条件下白花三叶草根部和地上部对 Cr 的积累含量分别为 414.04 mg·kg⁻¹ 和 352.05 mg·kg⁻¹, 高羊茅分别为 405.27 mg·kg⁻¹ 和 344.26 mg·kg⁻¹^[5]; 草炭泥和园土栽培条件下扁穗牛鞭草根部和地上部分别达 1 565.83 mg·kg⁻¹ 和 763.68 mg·kg⁻¹^[35]. 而 Vernay 等^[8] 在水培条件下研究了黑麦草根部和地上部对 Cr(VI) 的积累, 发现当 Cr(VI) 为 500 μmol·L⁻¹ 的营养介质中的积累浓度分别达到 2 450 mg·kg⁻¹ 和 210 mg·kg⁻¹, 产生这种差异的原因可能是植物生长介质中 Cr 的可利用形态与含量不同. 对比可知, 黑麦草和牵牛花对土壤中的 Cr

具有一定的富集潜力.

植物的富集系数和转运系数是统一量化植物提取和转运土壤重金属的重要指标. 虽然 Cr 胁迫下黑麦草对 Cr 的积累浓度高于牵牛花, 但其转运能力和叶片富集能力不及牵牛花, 且两种植物对 Cr 的转运系数均不超过 1.05 (表 3). Cr [尤其是 Cr(III)] 不易向地上部转运, 可能是由于 Cr(III) 与细胞壁的—COOH 官能团迅速形成复合物, 使之固定在根部细胞的液泡中^[7], 这也是植物耐受高浓度 Cr 的机制. 综上所述, 黑麦草和牵牛花对 Cr 有一定富集能力, 实际 Cr 污染土壤治理时需借助土壤改良等措施增强植物对 Cr 的积累和转运.

4 结论

(1) Cr 胁迫下黑麦草和牵牛花的生长、生理指标表明, 当土壤 Cr(III) 和 Cr(VI) 浓度分别在 250 mg·kg⁻¹ 和 25 mg·kg⁻¹ 时两种植物开始受到 Cr 的毒性损害, 且黑麦草对 Cr 的耐受能力优于牵牛花.

(2) 表征植物受 Cr 毒害程度较为有效的指标为根长和根系活力, MDA 可表征植物受到氧化伤害的程度, 而脯氨酸、SOD 及 POD 均可表征植物对 Cr 的耐受能力. 植物对 Cr 的积累指标是筛选植物修复资源的主要指标, 黑麦草根部分对 Cr 的积累浓度高于牵牛花, 且植物对 Cr(VI) 的富集能力高于 Cr(III).

致谢: 感谢中国海洋大学环境科学与工程学院水土污染分析实验室成员对采样及实验过程提供的帮助!

参考文献:

- [1] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, *et al.* Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils - To mobilize or to immobilize? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **266**: 141-166.
- [2] Dhal B, Thatoi H N, Das N N, *et al.* Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **250-251**: 271-291.
- [3] 胡鹏杰, 李柱, 钟道旭, 等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2014, **50**(5): 577-584. Hu P J, Li Z, Zhong D X, *et al.* Research progress on the phytoextraction of heavy metal contaminated soils in China [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, **50**(5): 577-584.
- [4] Qian Y, Gallagher F J, Feng H, *et al.* Vanadium uptake and translocation in dominant plant species on an urban coastal brownfield site [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 696-704.
- [5] 王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 等. 铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 2028-2037.

- Wang A Y, Huang S S, Zhong G F, *et al.* Effect of Cr(VI) stress on growth of three herbaceous plants and their Cr uptake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 2028-2037.
- [6] 王爱云, 钟国锋, 徐刚标, 等. 铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1717-1725.
- Wang A Y, Zhong G F, Xu G B, *et al.* Effects of Cr(VI) stress on physiological characteristics of *Brassica juncea* and its Cr uptake[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1717-1725.
- [7] Vernay P, Gauthier-Moussard C, Jean L, *et al.* Effect of chromium species on phytochemical and physiological parameters in *Datura innoxia*[J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(5): 763-771.
- [8] Vernay P, Gauthier-Moussard C, Hitmi A. Interaction of bioaccumulation of heavy metal chromium with water relation, mineral nutrition and photosynthesis in developed leaves of *Lolium perenne* L. [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(8): 1563-1575.
- [9] Tripathi D K, Singh V P, Prasad S M, *et al.* Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium(VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, **96**: 189-198.
- [10] Adrees M, Ail S, Iqbal M, *et al.* Mannitol alleviates chromium toxicity in wheat plants in relation to growth, yield, stimulation of anti-oxidative enzymes, oxidative stress and Cr uptake in sand and soil media [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **122**: 1-8.
- [11] 王晓楠, 刘征涛, 王婉华, 等. 重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3155-3161.
- Wang X N, Liu Z T, Wang W H, *et al.* Ecotoxicological effect and soil environmental criteria of the heavy metal chromium(VI) [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3155-3161.
- [12] Adamo P, Iavazzo P, Albanese S, *et al.* Bioavailability and soil-to-plant transfer factors as indicators of potentially toxic element contamination in agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **500-501**: 11-22.
- [13] 黄尧. 基于健康风险评估方法的青岛市某铬渣污染场地土壤修复目标值研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011. 14-29.
- Huang Y. Study on the health risk assessment-based soil repair target value for a chromium-contaminated site of Qingdao [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011. 14-29.
- [14] 骆传婷. 不同土壤质地对铬迁移转化及修复的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. 14-23.
- Luo C T. Study on different soil texture on the migration and transformation and remediation of chrome [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. 14-23.
- [15] 董树刚, 吴以平. 植物生理学实验技术[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006.
- [16] 蔡庆生. 植物生理学实验[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [17] Reale L, Ferranti F, Mantilacci S, *et al.* Cyto-histological and morpho-physiological responses of common duckweed (*Lemna minor* L.) to chromium [J]. *Chemosphere*, 2016, **145**: 98-105.
- [18] Qiu B Y, Zeng F R, Cai S G, *et al.* Alleviation of chromium toxicity in rice seedlings by applying exogenous glutathione [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, **170**(8): 772-779.
- [19] Martínez-Trujillo M, Carreón-Abud Y. Effect of mineral nutrients on the uptake of Cr(VI) by maize plants [J]. *New Biotechnology*, 2015, **32**(3): 396-402.
- [20] Kováčik J, Babula P, Hedbavny J, *et al.* Hexavalent chromium damages chamomile plants by alteration of antioxidants and its uptake is prevented by calcium [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **273**: 110-117.
- [21] Vajravel S, Saravanan P. Accumulation of chromium and its effects on physiological and biochemical parameters of *Alternanthera philoxeroides* seedlings [J]. *Journal of Pharmacy Research*, 2013, **7**(7): 633-639.
- [22] Ahemad M. Enhancing phytoremediation of chromium-stressed soils through plant-growth-promoting bacteria [J]. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 2015, **13**(1): 51-58.
- [23] Gill R A, Zang L L, Ail B, *et al.* Chromium-induced physicochemical and ultrastructural changes in four cultivars of *Brassica napus* L. [J]. *Chemosphere*, 2015, **120**: 154-164.
- [24] UdDin I, Bano A, Masood S. Chromium toxicity tolerance of *Solanum nigrum* L. and *Parthenium hysterophorus* L. plants with reference to ion pattern, antioxidation activity and root exudation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 271-278.
- [25] Scoccianti V, Crinelli R, Tirillini B, *et al.* Uptake and toxicity of Cr(III) in celery seedlings [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(10): 1695-1703.
- [26] Qing X J, Zhao X H, Hu C X, *et al.* Selenium alleviates chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *Pekinensis*) leaves [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **114**: 179-189.
- [27] Patel A, Pandey V, Patra D D. Influence of tannery sludge on oil yield, metal uptake and antioxidant activities of *Ocimum basilicum* L. grown in two different soils [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **83**: 422-430.
- [28] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **59**(2): 206-216.
- [29] Molinari H B C, Marur C J, Daros E, *et al.* Evaluation of the stress-inducible production of proline in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp.): osmotic adjustment, chlorophyll fluorescence and oxidative stress [J]. *Physiologia Plantarum*, 2007, **130**(2): 218-229.
- [30] 闫研, 李建平, 张学洪. 超富集植物李氏禾对铬诱导的氧化胁迫响应[J]. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1476-1482.
- Yan Y, Li J P, Zhang X H. Response of *Leersia hexandra* Swart to chromium-induced oxidative stress [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(4): 1476-1482.
- [31] Lilli M A, Moraetis D, Nikolaidis N P, *et al.* Characterization and mobility of geogenic chromium in soils and river bed sediments of Asopos basin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **281**: 12-19.
- [32] Shanker A K, Cervantes C, Loza-Tanvera H, *et al.* Chromium toxicity in plants [J]. *Environment International*, 2005, **31**(5): 739-753.
- [33] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, *et al.* Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre [J]. *Plant and Soil*, 1983, **73**(3): 377-385.
- [34] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生铬超积累植物——李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz) [J]. *生态学报*,

2006, 26(3): 950-953.

Zhang X H, Luo Y P, Huang H T, et al. *Leersia hexandra* Swartz: a newly discovered hygrophyte with chromium hyperaccumulator properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 950-953.

[35] 陈涛涛, 高洁, 刘志飞, 等. 扁穗牛鞭草对铬的吸收积累特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(12): 83-87.

Chen T T, Gao J, Liu Z F, et al. Characteristics of chromium bioaccumulation of *Hemarthria compressa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(12): 83-87.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行