

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 ..... 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 ..... 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 ..... 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 ..... 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 ..... 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 ..... 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 ..... 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 ..... 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 ..... 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 ..... 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 ..... 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 ..... 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及p53的诱导效应 ..... 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 ..... 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 ..... 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 ..... 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 ..... 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 ..... 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 ..... 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 ..... 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 ..... 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 ..... 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 ..... 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 ..... 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 ..... 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 ..... 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 ..... 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中PM<sub>2.5</sub>的特征分析 ..... 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 ..... 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>低温催化还原NO性能研究 ..... 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的CO<sub>2</sub>吸收和再生特性 ..... 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 ..... 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 ..... 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 ..... 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 ..... 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 ..... 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 ..... 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 ..... 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施CO<sub>2</sub>对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 ..... 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 ..... 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 ..... 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 ..... 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 ..... 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 ..... 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell生物传感器在Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>冲击活性污泥系统分析中的应用 ..... 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 ..... 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 ..... 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 ..... 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 ..... 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 ..... 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 ..... 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 ..... 陈操操,张妍,刘春兰,王海波,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

## 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响

王爱云<sup>1</sup>, 黄姗姗<sup>1</sup>, 钟国锋<sup>2</sup>, 徐刚标<sup>1</sup>, 刘志祥<sup>1</sup>, 申响保<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 昆山市中宇景观工程有限公司, 昆山 512300)

**摘要:** 为了阐明铬胁迫对白花三叶草(*Trifolium repens*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)3种草本植物的毒害机制, 为铬污染土壤植物修复提供理论依据, 采用盆栽试验, 在土壤中添加不同浓度的铬[Cr(VI)]( $K_2Cr_2O_7$ 为0、100、200、300和400  $mg \cdot kg^{-1}$ ), 研究重金属铬对3种草本植物生长、生理特性、重金属铬累积与分布的影响。结果表明, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿的平均耐性指数分别为62.5、48.3和36.33。在铬浓度为400  $mg \cdot kg^{-1}$ 处理条件下, 白花三叶草和高羊茅叶绿素含量、SOD和POD活性分别为对照的57.14%、51.51%、35.76%和63.27%、52.96%、41.36%, 而紫花苜蓿无法生存。在铬胁迫下, 3种草本植物的株高、根长、地上(下)部干重均表现降低, 其降低大小顺序为紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草, 但MDA含量增加, 并且紫花苜蓿增加幅度最大, 高羊茅次之, 白花三叶草最小。三者对铬的耐受性表现为白花三叶草 > 高羊茅 > 紫花苜蓿。3种草本植物叶片积累的铬主要贮存于细胞壁, 其次是细胞质, 而在叶绿体和线粒体中含量较低。叶绿体和线粒体中铬含量与叶绿素、MDA含量、SOD和POD活性存在明显的相关性。随着铬浓度增加, 3种草本植物叶片亚细胞组分中铬含量增加, 并且总是紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草。当铬处理浓度为300  $mg \cdot kg^{-1}$ 时, 与白花三叶草、高羊茅相比, 紫花苜蓿叶片富集铬浓度最高, 达51.44  $mg \cdot kg^{-1}$ , 其中分配于叶绿体(19.09%)和线粒体(18.04%)中铬的比例也明显较高。白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿地上部和地下部富集系数平均值分别为1.22、1.54; 1.16、1.44和1.26、1.62, 转运系数平均值分别为0.78、0.78和0.74。在重金属铬污染土壤治理中, 白花三叶草和高羊茅有一定的潜在应用价值。

**关键词:** 铬; 胁迫; 草本植物; 生长; 积累

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2028-10

## Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake

WANG Ai-yun<sup>1</sup>, HUANG Shan-shan<sup>1</sup>, ZHONG Guo-feng<sup>2</sup>, XU Gang-biao<sup>1</sup>, LIU Zhi-xiang<sup>1</sup>, SHEN Xiang-bao<sup>1</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Kunshan Zhongyu Landscape Engineering Co. Ltd., Kunshan 512300, China)

**Abstract:** In order to elucidate the toxic mechanisms of *Trifolium repens*, *Festuca arundinacea* and *Medicago sativa* under chromium [Cr(VI)] stress, provide a theoretic foundation for phytoremediation of Cr-contaminated soil, pot experiment was conducted to investigate the effects of Cr(VI) on plant growth, physiological characteristics, Cr accumulation and distribution in three herbaceous plants. Soil sample was treated by adding  $K_2Cr_2O_7$  with the Cr(VI) concentration of 0, 100, 200, 300 and 400  $mg \cdot kg^{-1}$ , respectively. The results indicated that the average tolerance indices of *T. repens*, *F. arundinacea* and *M. sativa* were 62.5, 48.3 and 36.33, respectively. Compared with control group, contents of chlorophyll, the activity of superoxide dismutase(SOD) and peroxidase (POD) were 57.14%, 51.51%, 35.76% and 63.27%, 52.96%, 41.36% in *T. repens*, and *F. arundinacea*, respectively, but *M. sativa* died in 400  $mg \cdot kg^{-1}$  Cr(VI) treatment. The plant height, root length, dry mass of roots and shoots decreased under Cr(VI) stress in three herbaceous plants, and *M. sativa* > *F. arundinacea* > *T. repens*, however, the content of malonyldialdehyde (MDA) increased compared to the control, and the variation range of *M. sativa* was the highest, while *T. repens* was the smallest among them. The tolerance of Cr(VI) was *T. repens* > *F. arundinacea* > *M. sativa*. Cr mainly distributed in cell wall and then in the cytoplasm, and less distributed in the mitochondrion and chloroplast in leaves of three herbaceous plants, whereas the content of chlorophyll, MDA, the activity of SOD and POD correlated well with Cr accumulation in the mitochondrion and chloroplast. Cr concentration in the subcellular of leaves increased with the adding Cr(VI) concentration, and *M. sativa* > *F. arundinacea* > *T. repens*. In comparison with *T. repens*, *F. arundinacea*, Cr concentration in the leaves of *M. sativa* was the maximal, i. e. 51.44  $mg \cdot kg^{-1}$ , and the proportions in the mitochondrion(18.04%) and chloroplast(19.09%) were also higher in 300  $mg \cdot kg^{-1}$  Cr(VI). The average accumulation factors of shoots/roots were 1.22/1.54, 1.16/1.44 and 1.26/1.62, while the average translocation factors were 0.78, 0.78 and 0.74 in *T. repens*, *F. arundinacea* and *M. sativa*, respectively. The results suggest that *T. repens* and *F. arundinacea* are promising for the phytoremediation of Cr-contaminated soil.

**Key words:** Cr(VI); stress; herbaceous plant; growth; accumulation

收稿日期: 2011-07-30; 修订日期: 2011-12-14

基金项目: 湖南省科技厅项目(2011NK3037); 湖南省发改委项目(湘发改高技[2011]1318号); 中南林业科技大学引进人才科研启动基金项目(104-0128); 中南林业科技大学林木遗传育种学科建设

作者简介: 王爱云(1964~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为植物遗传育种, E-mail: wangaiyun12@yahoo.com.cn

铬广泛存在于环境中,三价铬[Cr(Ⅲ)]是人体必需的微量元素,而六价铬[Cr(Ⅵ)]具有严重的毒害作用. 在环境中,与 Cr(Ⅲ)比较,Cr(Ⅵ)具有化学活性强、移动性大、生物毒性强且持久,易被植物吸收等特点,能在植物体内残留对植物产生毒害<sup>[1-5]</sup>,并通过食物链的富集危害人类健康<sup>[6]</sup>. 随着工业化的迅速发展,铬在化工行业中的广泛应用,导致铬向环境中释放的速度加快,使人类生活环境中铬总量提高,土壤铬污染日益严重. 据不完全统计,我国受铬严重污染的土壤已达 1 250 多万 t,主要来源于电镀和制革的废水、铬渣. 土壤铬污染的治理已迫在眉睫.

近年来,选用超富集植物修复重金属污染土壤成为植物修复的热点,但超富集植物通常植株矮小、生长缓慢、生物量低、生长周期长,重金属迁移总量相对不高,并且种植这类植物一般经济效益低,因而导致其在植物修复工程中应用较少. 在自然环境中存在一些对重金属耐性较强的植物,尽管其体内重金属含量不能达到超积累植物的量,但其重金属迁移总量仍较可观,这些植物对重金属污染地的修复作用不可忽视<sup>[7]</sup>. 到目前为止,只有李氏禾<sup>[8,9]</sup>、*Dicoma niccolifera* Wild 和 *Sutera fodina* Wild<sup>[10]</sup> 这 3 种植物被确认为铬超积累植物,但紫狼尾草<sup>[11]</sup>、芦竹<sup>[12]</sup>、野苋菜<sup>[13]</sup> 和四川黄籽<sup>[14]</sup> 对铬具有一定的耐

受性. 因此,继续筛选非食用且具有经济价值的普通植物修复重金属铬污染土壤具有十分重要的意义.

草本植物可作为观赏植物,经济效益高,生长快,生物学产量高,一年可收获多茬. 收获的地上部分集中处理,也不会进入食物链危及人类健康. 白花三叶草 (*Trifolium repens*)、高羊茅 (*Festuca arundinacea*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是广泛应用于园林绿化中的草本植物,适应性广,抗逆性强,对 Zn、Pb、Cu 和 Cd 等重金属具有一定的耐性,结合相关改良措施,这 3 种草本植物应用于 Zn、Pb、Cu 和 Cd 重金属污染土壤修复具有一定的可行性<sup>[15-18]</sup>,但是这 3 种草本对重金属铬的耐受性及积累特征还未见报道. 为此,本研究采用盆栽试验,分析白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物在铬胁迫下的生长情况、生理生化反应,以及其对铬的耐受和积累特征,以期探索 3 种草本植物在铬污染土壤修复中的应用效果.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物和土壤

供试植物白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿种子购于长沙红星花卉市场. 土壤采自中南林业科技大学花卉苗圃. 土壤基本性质(表 1)采用常规分析方法测定<sup>[19]</sup>.

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil

土壤类型	pH	CEC/cmol·kg <sup>-1</sup>	有机质/g·kg <sup>-1</sup>	全 N/g·kg <sup>-1</sup>	全铬/mg·kg <sup>-1</sup>
红壤	4.32	18.96	17.74	1.513	0.62

### 1.2 试验方法

土壤样品采回后自然风干、锤碎、磨细后过 4 mm 筛,使用塑料花盆每盆装入 2.5 kg 干土,统一加入等量花卉复合肥,并按不同处理加入 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 水溶液,使土壤成粘稠状,充分混匀. 试验设置 0 (CK)、100、200、300、400 mg·kg<sup>-1</sup> 这 5 个 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 处理浓度(以 Cr<sup>6+</sup> 计). 室内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 30 min,用去离子水冲洗干净后,播种于花盆土壤中,每盆播种 20 粒. 待种子出苗后 20 d,选择均匀一致的幼苗保留,每盆保留 5 株. 根据土壤水分蒸发情况,不定期浇灌蒸馏水,以保持土壤持水量达 70%. 植株生长 40 d 后,取植株第 2~3 叶(从上至下),每处理采集 6 株共 6 片叶混匀,测定各项生理生化指标和铬的亚细胞分布. 植株

生长 90 d 后,收获植物,并测定株高、根长、地上(下)部干重及铬含量,并计算耐性指数. 将收获的植株用蒸馏水洗净,整个洗涤时间不超过 2 min,用滤纸吸去根外部水分,称量单株鲜重. 用不锈钢剪刀把清洗后的样品地上部和地下部分开,在 105℃ 下杀青 0.5 h,70℃ 烘干至恒重,用电子天平称取各部分重量. 烘干样品粉碎过 0.425 mm 筛,用于测定重金属铬含量,同时计算富集系数、转运系数和单株地上(下)部铬含量.

耐性指数(%) = 各处理组根的平均长度/对照组根系平均长度 × 100%

富集系数 = 植物地上或地下部分铬含量/土壤中铬含量

转运系数 = 地上部分铬含量/根中铬含量

单株地上(下)部铬含量 = 单株地上(下)部铬

浓度 × 单株地上(下)部干重。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 生理指标的测定

采用丙酮法测定叶绿素含量<sup>[20]</sup>, 硫代巴比妥酸法测丙二醛含量<sup>[21]</sup>, 邻苯三酚法测定超氧化物歧化酶(SOD)<sup>[22]</sup>, 愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)<sup>[23]</sup>活性。

#### 1.3.2 铬的亚细胞分布

参照文献[24]的方法提取各细胞器和细胞质组分。取各处理嫩叶 2 g, 按 1:10 的比例, 加入预冷的匀浆液 [250 mmol·L<sup>-1</sup> 蔗糖, 50 mmol·L<sup>-1</sup> Tris-HCl (pH 7.4), 1 mmol·L<sup>-1</sup> 二硫赤藓糖醇(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>S<sub>2</sub>)] 在 4℃ 下研磨匀浆。匀浆液依次在 600 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min, 1 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 10 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 20 min, 依次得沉淀为细胞壁、叶绿体、线粒体组分, 最后上清液为细胞质组分(含液泡及核糖和蛋白等)。各组分供铬含量测定。

#### 1.3.3 植物样品中重金属铬含量的测定

称取粉碎的植物样品 2.0 g 置于锥形瓶中, 加入 20 mL 浓硝酸和 4 mL 高氯酸后低温加热消解。在体积减至 2~5 mL 时, 加入 10 mL 去离子水, 再加热 10~15 min, 最后移入 25 mL 比色管中, 并用 0.2% 的硝酸稀释至刻度, 使用原子吸收分析仪(日立 18070)分析其中铬含量<sup>[25]</sup>。同时做空白试验 1 份作为对照。分析过程分别加入国家标准土壤样品(GSS-1)和国家标准植物样品(GSV-3)进行分析质量控制。

### 1.4 数据分析

利用 SPSS 13.0 软件进行试验数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属铬胁迫对 3 种草本植物生长的影响

铬胁迫对白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物的生长均表现抑制效应(表 2)。随着土壤中外源铬含量的增加, 3 种草本植物的株高和根长均逐渐降低, 并且各处理间差异显著( $P < 0.05$ )。当土壤中外源铬含量达 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 紫花苜蓿生长大约 2 周后就枯萎死亡。当铬浓度为 300 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿的株高分别比对照降低了 34.81%、42.66% 和 82.26%; 而根长分别比对照下降了 41.64%、56.49% 和 74.30%。由此可见, 外源铬对于 3 种植物的生长均有不同程度的抑制作用, 并且对根的影响更明显。其抑制程度表现为: 紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草。在收获时发现, 铬胁迫导致 3

种植物根部生长严重受抑制, 侧根明显较对照少, 而且根尖发黄坏死, 出现断根等现象。

植物根系是最先接触重金属的部位。在重金属胁迫环境下, 植物根系可以吸收或排斥重金属。对于敏感植物而言, 重金属胁迫会抑制根系的生长, 导致植物生长缓慢、生物量小, 而耐性植物则没有影响或影响较小, 因此, 根系耐性指数可以作为植物体对重金属耐性大小的一个非常重要的指标。通过计算 3 种草本植物在不同铬浓度下的耐性指数发现: 随着铬浓度的增加, 3 种草本植物的耐性指数都表现为下降, 相关系数分别为: -0.992 8\*\*、-0.975 0\*\* 和 -0.922 0\* (\* 表示显著相关, \*\* 表示极显著相关, 下同), 呈显著负相关。其中白花三叶草耐性指数下降相对较低, 而紫花苜蓿则下降较快。当铬浓度为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 与对照相比, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿的耐性指数分别下降 15.23%、31.85% 和 51.12%, 说明低浓度铬对紫花苜蓿耐性指数影响非常明显, 从这方面也反映了紫花苜蓿对铬的耐受性较差。3 种草本植物耐性指数的大小顺序为白花三叶草 > 高羊茅 > 紫花苜蓿。

重金属在植物体内积累过多, 可严重阻碍水分和矿质元素的正常运转, 增加植物叶绿素酶的活性, 促进叶绿素分解, 叶片变黄, 光合作用下降而造成植株生长缓慢和生物量降低。外源铬对 3 种草本植物的地上部和地下部干重积累有明显的抑制作用。随着土壤中外源铬含量的增加, 3 种草本植物的地上部和地下部干重均呈下降的趋势。除铬浓度为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 时白花三叶草地上部干重与对照、以及铬浓度为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 与 300 mg·kg<sup>-1</sup> 时紫花苜蓿地下部干重之间差异不显著( $P > 0.05$ ) 外, 其余各处理间差异显著( $P < 0.05$ )。与对照相比, 铬胁迫导致白花三叶草和高羊茅地下部干重下降的百分比明显比地上部的高, 但紫花苜蓿则表现相反, 地上部分下降更多。对于这 3 种植物, 无论是地上部还是地下部干重其下降趋势均表现为: 紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草。这正好与其耐性指数结果相吻合。在 300 mg·kg<sup>-1</sup> 铬胁迫下, 白花三叶草和高羊茅地上部、地下部干重分别比对照下降 37.44%、34.10% 和 45.71%、51.64%, 而紫花苜蓿地上部、地下部干重下降分别达 80.82%、63.93%。综合以上结果, 可以确定铬胁迫对 3 种草本植物生长抑制作用的强弱为: 紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草; 重金属铬主要是通过影响其根系生长, 抑制植株生长, 导致地上部和地下部干重降低。

表 2 Cr(VI) 胁迫对 3 种草本植物生长的影响<sup>1)</sup>  
Table 2 Effects of Cr(VI) stress on growth of three herbaceous plants

项目		Cr(VI) 浓度/mg·kg <sup>-1</sup>				
		0	100	200	300	400
株高/cm	白花三叶草	18.79 ± 0.68 <sup>a</sup>	17.22 ± 0.40 <sup>b</sup>	15.01 ± 0.48 <sup>c</sup>	12.25 ± 0.40 <sup>d</sup>	9.16 ± 0.46 <sup>e</sup>
	高羊茅	92.11 ± 0.78 <sup>a</sup>	86.91 ± 0.71 <sup>b</sup>	79.33 ± 0.54 <sup>c</sup>	52.83 ± 0.88 <sup>d</sup>	31.41 ± 1.15 <sup>e</sup>
	紫花苜蓿	85.83 ± 0.88 <sup>a</sup>	50.76 ± 0.78 <sup>b</sup>	42.25 ± 1.20 <sup>c</sup>	15.23 ± 0.64 <sup>d</sup>	—
根长/cm	白花三叶草	12.08 ± 0.54 <sup>a</sup>	10.24 ± 0.38 <sup>b</sup>	8.68 ± 0.28 <sup>c</sup>	7.05 ± 0.27 <sup>d</sup>	4.23 ± 0.37 <sup>e</sup>
	高羊茅	18.18 ± 0.88 <sup>a</sup>	12.39 ± 0.50 <sup>b</sup>	9.76 ± 0.53 <sup>c</sup>	7.91 ± 0.35 <sup>d</sup>	5.06 ± 0.38 <sup>e</sup>
	紫花苜蓿	17.43 ± 0.44 <sup>a</sup>	8.52 ± 0.48 <sup>b</sup>	6.00 ± 0.323 <sup>c</sup>	4.48 ± 0.33 <sup>d</sup>	—
耐性指数/%	白花三叶草	100	84.77	71.85	58.36	35.02
	高羊茅	100	68.15	53.69	43.51	27.83
	紫花苜蓿	100	48.88	34.42	25.70	—
地上部干重/g·plant <sup>-1</sup>	白花三叶草	8.44 ± 0.32 <sup>a</sup>	7.95 ± 0.33 <sup>a</sup>	6.34 ± 0.29 <sup>b</sup>	5.28 ± 0.0.19 <sup>c</sup>	4.10 ± 0.21 <sup>d</sup>
	高羊茅	5.71 ± 0.23 <sup>a</sup>	5.10 ± 0.15 <sup>b</sup>	4.15 ± 0.23 <sup>c</sup>	3.10 ± 0.08 <sup>d</sup>	2.22 ± 0.10 <sup>e</sup>
	紫花苜蓿	3.18 ± 0.14 <sup>a</sup>	1.97 ± 0.09 <sup>b</sup>	1.45 ± 0.06 <sup>c</sup>	0.61 ± 0.05 <sup>d</sup>	—
地下部干重/g·plant <sup>-1</sup>	白花三叶草	4.34 ± 0.07 <sup>a</sup>	3.78 ± 0.10 <sup>b</sup>	3.28 ± 0.07 <sup>c</sup>	2.86 ± 0.05 <sup>d</sup>	2.30 ± 0.08 <sup>e</sup>
	高羊茅	3.66 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.05 ± 0.05 <sup>b</sup>	2.70 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.77 ± 0.04 <sup>d</sup>	1.12 ± 0.06 <sup>e</sup>
	紫花苜蓿	1.22 ± 0.06 <sup>a</sup>	0.91 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.73 ± 0.06 <sup>c</sup>	0.44 ± 0.03 <sup>c</sup>	—

1) 同行具有不同字母上标者为差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

2.2 铬胁迫对 3 种草本植物叶绿素含量的影响

叶绿素是植物光合作用的物质基础, 其含量高是判定植物光合作用强弱的一个重要生理指标. 叶绿素含量降低, 光合作用减弱, 导致植物生长受抑制, 生物学产量下降. 从表 3 可以看出, 随着铬胁迫浓度的增加, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物叶绿素含量降低, 并且各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 叶绿素含量与铬浓度之间呈极显著负相关, 其相关系数分别为:  $-0.9926^{**}$ 、 $-0.9610^{**}$  和  $-0.9804^{**}$ . 在最小铬胁迫浓度  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物叶绿素含量分别为对照的 86.61%、92.42% 和 87.89%, 但在最大铬胁迫浓度  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 白花三叶草和高羊茅叶绿素含量分别为对照的 57.14% 和 63.27%, 并且外部形态也发生了明显变化, 表现为植株变矮, 叶片变小、变窄, 叶色变淡甚至出现黄化现象, 而紫花苜蓿则完全不能生长, 凋亡. 紫花苜蓿

表 3 Cr(VI) 胁迫对 3 种草本植物叶绿素含量的影响<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of Cr(VI) stress on chlorophyll content in leaves of three herbaceous plants

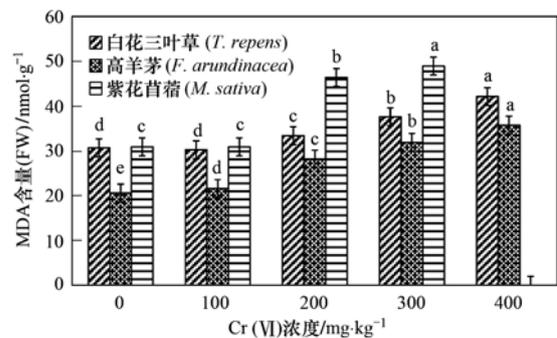
Cr(VI) 浓度 /mg·kg <sup>-1</sup>	白花三叶草	高羊茅	紫花苜蓿
0	2.24 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.43 ± 0.00 <sup>a</sup>	1.90 ± 0.01 <sup>a</sup>
100	1.94 ± 0.02 <sup>b</sup>	3.17 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.67 ± 0.01 <sup>b</sup>
200	1.65 ± 0.01 <sup>c</sup>	2.96 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.51 ± 0.02 <sup>c</sup>
300	1.48 ± 0.04 <sup>d</sup>	2.81 ± 0.02 <sup>d</sup>	1.10 ± 0.02 <sup>d</sup>
400	1.28 ± 0.05 <sup>e</sup>	2.17 ± 0.05 <sup>e</sup>	—

1) 同列具有不同字母上标者为差异显著 ( $P < 0.05$ )

的叶绿素含量受铬胁迫的影响最大, 白花三叶草次之, 高羊茅的叶绿素含量受铬胁迫的影响最小.

2.3 铬胁迫对 3 种草本植物丙二醛 (MDA) 含量的影响

植物在逆境中, 细胞原生质膜中的不饱和脂肪酸会发生过氧化作用产生 MDA, MDA 可与蛋白质, 核酸, 氨基酸等活性物质交联, 形成脂褐素, 使质膜系统受到伤害, 选择透性增强, 干扰细胞的正常生命活动, 因而 MDA 含量是反映膜脂过氧化水平的一个指标. 从图 1 可以看出, 除白花三叶草和紫花苜蓿在铬浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 其 MDA 含量有轻微下降外, 其余各处理条件下, 3 种草本植物的 MDA 含量均随着铬浓度的上升而表现出上升的趋势, 且各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ). 白花三叶草、高羊茅



同一植物标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著

图 1 Cr(VI) 胁迫对 3 种草本植物丙二醛含量的影响

Fig. 1 Effect of Cr(VI) stress on MDA content in leaves of three herbaceous plants

和紫花苜蓿 MDA 含量与铬浓度呈正相关, 相关系数分别为 0.950 8<sup>\*</sup>、0.983 9<sup>\*\*</sup>和 0.922 7。铬胁迫条件下, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿的 MDA 含量分别平均比对照增加 17.08%、42.53% 和 36.11%。在 200~300 mg·kg<sup>-1</sup> 铬处理浓度范围内, MDA 的上升幅度总是紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草。MDA 含量增加表示细胞膜脂过氧化水平高, 膜结构受损伤程度加深, 植物的抗逆性减弱。在同一时期抗逆性强的植物 MDA 积累量低、变幅小; 反之, 抗逆性弱的植物 MDA 积累量高, 变幅大。因此, 从 MDA 方面来看, 白花三叶草对重金属铬的耐受性最高, 高羊茅次之, 紫花苜蓿对重金属铬的耐受性最低。

叶绿素含量和 MDA 含量相关分析表明, 铬胁迫, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物叶片叶绿素含量与 MDA 含量之间都呈现负相关, 相关系数分别为 -0.91<sup>\*</sup>、-0.94<sup>\*</sup>和 -0.87, 趋势线公式分别为:  $y = -12.07x + 55.57$ ;  $y = -12.60x + 65.31$ ;  $y = -25.14x + 78.14$ 。因此, 在铬胁迫下, 从植物叶绿素含量变化, 即植物叶片颜色的改变, 可以判断植株受铬胁迫的强弱程度。

#### 2.4 铬胁迫对 3 种草本植物超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性的影响

SOD 是重要的活性氧清除酶。当逆境胁迫导致大量活性氧产生时, SOD 能及时有效地清除自由基, 保护细胞免受活性氧胁迫的伤害。SOD 活性的变化可以较好地反映植物遭受逆境胁迫的状况。从图 2 可以看出, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿在正常的生长条件下, SOD 活性存在一定的差异。随着

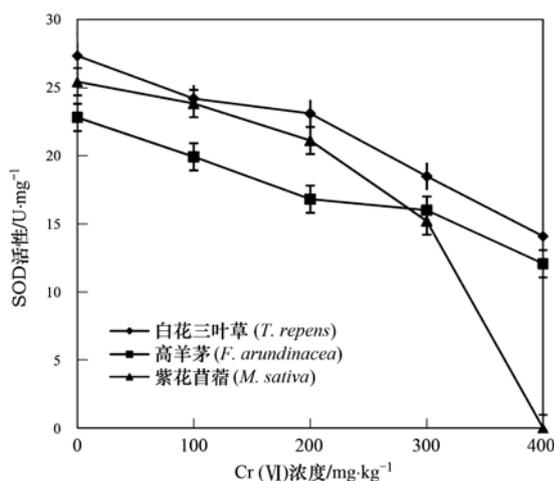


图 2 Cr(VI) 胁迫对 3 种草本植物 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of Cr(VI) stress on activities of SOD in leaves of three herbaceous plants

土壤中外源铬浓度增加, 3 种草本植物 SOD 活性逐渐降低, 并且各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其 SOD 活性与铬浓度呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.980 4<sup>\*\*</sup>、-0.986 8<sup>\*\*</sup>和 -0.959 1<sup>\*</sup>。在铬浓度低于 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 SOD 活性分别平均比对照降低 13.50%、19.46% 和 11.63%。当铬浓度达到 300 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 紫花苜蓿 SOD 活性急剧下降, 比对照降低 40.18%, 但对于白花三叶草和高羊茅在铬浓度达到 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 其 SOD 活性才表现急剧下降, 分别比对照降低 48.48% 和 47.04%。这说明在铬胁迫浓度较低时, 植物体内 SOD 活性降低较慢, 而当铬浓度增加到一定水平时, SOD 迅速降低。在白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种植物中, 当铬浓度超过 300 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 紫花苜蓿的 SOD 活性降低最快, 而白花三叶草和高羊茅则相对较慢。

POD 是植物体内重要的抗氧化剂, 能有效地清除 SOD 的歧化产物 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。严重的逆境可能诱使植物产生更多的过氧化物, 增强 POD 的活性。因此, 较高的 POD 活性反映了植物组织受到严重的损伤和破坏。与 SOD 一样, 随着土壤中外源铬浓度的增加, 3 种草本植物 POD 活性逐渐降低, 并且各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 见图 3。白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 POD 活性与外源铬浓度呈负相关, 相关系数分别为 -0.830 8、-0.975 9<sup>\*</sup>和 -0.959 2<sup>\*</sup>。当土壤中外源铬浓度为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 时, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物的 POD 活性分别比对照降低 51.01%、26.59% 和 37.58%, 而当土壤中外源铬浓度为 300 mg·kg<sup>-1</sup> 时, POD 活性分别比对照降低 58.33%、50.58% 和 63.77%, 说明低浓度铬对白花三

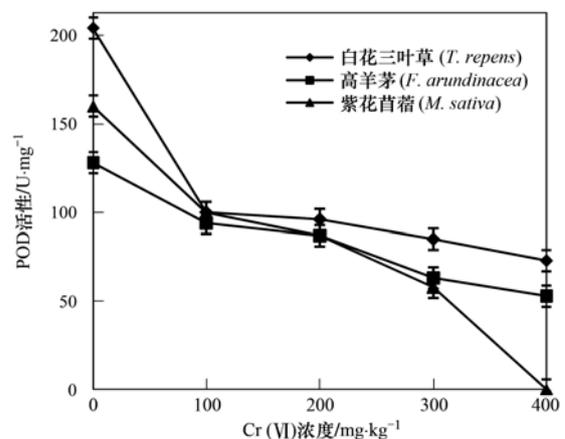


图 3 Cr(VI) 胁迫对 3 种草本植物 POD 活性的影响

Fig. 3 Effects of Cr(VI) stress on activities of POD in leaves of three herbaceous plants

叶草 POD 活性影响明显,但随着铬处理浓度的增加,铬对紫花苜蓿 POD 活性影响最大,白花三叶草次之,而高羊茅 POD 活性受铬污染的影响最小。

### 2.5 铬在 3 种草本植物叶片内的亚细胞分布

白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物生长在铬污染土壤中,其亚细胞组分中均含有一定量的铬,只是其分配并不均衡,其中在细胞壁的分配比例最高,其次是细胞质,而在叶绿体和线粒体中则相对较低(表 4)。随着铬处理浓度增加,叶片铬总量以及铬在细胞质、叶绿体和线粒体中的分配比例逐渐提高,但铬在细胞壁中的分配比例则表现出相反的现象,其中以紫花苜蓿表现最明显。与铬浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理比较,紫花苜蓿在铬浓度为  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理条件下,其叶片细胞壁铬含量降低  $16.32\%$ ,而叶绿体、线粒体和细胞质铬含量分别增加  $8.06\%$ 、 $5.85\%$  和  $2.98\%$ 。在相同铬浓度处理条件下,3 种草本植物叶片细胞壁、叶绿体、线粒体、细胞质和叶片总铬含量的增加总是紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草。当土壤中外源铬为  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,紫花苜蓿叶片细胞壁、叶绿体、线粒体、细胞质和叶片总铬含量分别是白花三叶草和高羊茅的  $1.04$ 、 $2.74$ 、 $3.14$ 、 $1.27$ 、 $1.29$  倍和  $1.10$ 、 $1.65$ 、 $1.46$ 、 $1.37$ 、 $1.32$  倍。从 3 种草本植物叶片叶绿体、线粒体和细胞质铬含量来看,间接反映了铬胁迫对紫花苜蓿生长影响最大,高羊茅次之,而铬胁迫对白花三叶草生长影响最小。

表 4 Cr(VI) 胁迫对 3 种草本植物叶片亚细胞 Cr 含量及其分配率的影响<sup>1)</sup>/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 4 Effect of Cr(VI) stress on contents and percentage of Cr in subcellular of leaves of three herbaceous plants/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Cr(VI) 浓度	白花三叶草叶片 Cr 含量				
	细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质	总量
0	$0.41 \pm 0.02^d$ (35.04)	$0.12 \pm 0.02^d$ (10.26)	$0.12 \pm 0.03^c$ (10.26)	$0.52 \pm 0.03^e$ (44.44)	$1.17 \pm 0.07^e$ (100)
100	$14.23 \pm 0.19^c$ (57.85)	$1.14 \pm 0.06^c$ (4.63)	$1.06 \pm 0.05^d$ (4.31)	$8.17 \pm 0.14^d$ (33.21)	$24.60 \pm 0.28^d$ (100)
200	$15.26 \pm 0.21^b$ (54.83)	$1.37 \pm 0.06^c$ (4.92)	$1.55 \pm 0.04^c$ (5.57)	$9.65 \pm 0.23^c$ (34.67)	$27.83 \pm 0.36^c$ (100)
300	$16.16 \pm 0.21^a$ (46.25)	$3.58 \pm 0.17^b$ (10.25)	$2.96 \pm 0.10^b$ (8.47)	$12.25 \pm 0.13^b$ (35.06)	$34.94 \pm 0.20^b$ (100)
400	$16.38 \pm 0.31^a$ (38.84)	$5.95 \pm 0.05^a$ (14.11)	$5.12 \pm 0.08^a$ (12.14)	$14.72 \pm 0.12^a$ (34.91)	$42.17 \pm 0.38^a$ (100)
Cr(VI) 浓度	高羊茅叶片 Cr 含量				
	细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质	总量
0	$0.38 \pm 0.02^d$ (43.68)	$0.08 \pm 0.00^e$ (9.20)	$0.07 \pm 0.01^e$ (8.05)	$0.34 \pm 0.02^e$ (39.08)	$0.87 \pm 0.01^e$ (100)
100	$13.36 \pm 0.25^c$ (50.99)	$2.65 \pm 0.11^d$ (10.11)	$2.35 \pm 0.05^d$ (8.97)	$7.85 \pm 0.12^d$ (29.96)	$26.20 \pm 0.10^d$ (100)
200	$14.80 \pm 0.15^b$ (47.94)	$3.71 \pm 0.05^c$ (12.02)	$3.23 \pm 0.06^c$ (10.46)	$9.12 \pm 0.08^c$ (29.54)	$30.87 \pm 0.10^c$ (100)
300	$15.22 \pm 0.05^b$ (39.17)	$5.94 \pm 0.08^b$ (15.29)	$6.34 \pm 0.04^b$ (16.34)	$11.36 \pm 0.05^b$ (29.23)	$38.86 \pm 0.04^b$ (100)
400	$15.86 \pm 0.06^a$ (35.07)	$7.96 \pm 0.05^a$ (17.60)	$8.20 \pm 0.02^a$ (18.13)	$13.21 \pm 0.06^a$ (29.21)	$45.23 \pm 0.03^a$ (100)
Cr(VI) 浓度	紫花苜蓿叶片 Cr 含量				
	细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质	总量
0	$0.30 \pm 0.03^d$ (40.00)	$0.07 \pm 0.01^d$ (9.33)	$0.05 \pm 0.00^d$ (6.67)	$0.32 \pm 0.02^d$ (42.67)	$0.75 \pm 0.04^d$ (100)
100	$13.35 \pm 0.05^c$ (48.88)	$3.15 \pm 0.04^c$ (11.53)	$3.33 \pm 0.06^c$ (12.19)	$7.47 \pm 0.06^c$ (27.35)	$27.31 \pm 0.13^c$ (100)
200	$15.54 \pm 0.04^b$ (35.58)	$7.71 \pm 0.10^b$ (17.65)	$7.19 \pm 0.06^b$ (16.46)	$13.24 \pm 0.03^b$ (30.31)	$43.68 \pm 0.15^b$ (100)
300	$16.75 \pm 0.18^a$ (32.56)	$9.82 \pm 0.26^a$ (19.09)	$9.28 \pm 0.18^a$ (18.04)	$15.60 \pm 0.17^a$ (30.33)	$51.44 \pm 0.31^a$ (100)
400	—	—	—	—	—

1) 同列具有不同字母上标者为差异显著 ( $P < 0.05$ ); 括号中的数据为分配比例 (%)

白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物叶片细胞壁、叶绿体、线粒体和细胞质铬含量与其对应的叶绿素、MDA 含量、SOD 和 POD 活性相关分析表明:各亚细胞组分铬含量与 MDA 含量呈正相关,

而与叶绿素含量、SOD 和 POD 活性均呈负相关,并且细胞壁铬含量与各生理指标相关程度较低,叶绿体和线粒体铬含量与各生理指标相关性较高(表 5)。

表 5 3 种草本植物叶片亚细胞 Cr 含量与生理指标相关性分析

Table 5 Correlation analysis between Cr subcellular contents and physiological indexes of leaves of three herbaceous plants

项目	三叶草				高羊茅				紫花苜蓿			
	细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质	细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质	细胞壁	叶绿体	线粒体	细胞质
叶绿素含量	-0.8417	-0.9132*	-0.9335*	-0.9704**	-0.7065	-0.9629**	-0.9545*	-0.9798**	-0.8109	-0.9479	-0.9623*	-0.915
MDA 含量	0.5609	0.9767**	0.9761**	0.819	0.7063	0.9612**	0.9621**	0.8573	0.7111	0.9534*	0.9385	0.8733
SOD 活性	-0.7162	-0.9933**	-0.9945**	-0.9183*	-0.8114	-0.9795**	-0.9617**	-0.9177*	-0.7265	-0.9263	-0.9255	-0.8641
POD 活性	-0.9948**	-0.7071	-0.7355	-0.9599**	-0.8846*	-0.9871**	-0.978**	-0.8385	-0.9674*	-0.9422	-0.9566*	-0.9831*

## 2.6 铬在3种草本植物体内的积累和分布情况

随着外源铬浓度的增大,白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿3种草本植物地上部和地下部分铬累积浓度明显升高,且各处理间差异显著( $P < 0.05$ ),见表6.其中白花三叶草体内累积铬的浓度最高,在铬浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其地上部和地下部铬累积浓度分别为 $152.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $227.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,比高羊茅和紫花苜蓿分别高11.52、21.70和6.90、 $16.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .当铬达到最高胁迫浓度 $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,白花三叶草地上部和地下部铬累积浓度分别为 $352.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $414.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高羊茅分别为 $344.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $405.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而紫花苜蓿在此浓度下根本无法生存.从3种草本植物地上部和地下部分铬累积浓度分析可知:其累积铬浓度大小顺序为白花三叶草>高羊茅>紫花苜蓿.这也许是由于铬胁迫抑制紫花苜蓿生长,从而影响其对外源铬的吸收累积.相关分析表明,白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿这3种草本植物地上部、地下部铬累积浓度与土壤中外源铬浓度呈正相关,相关系数分别为 $0.9507^*$ 、 $0.9366^*$ ;  $0.96^{**}$ 、 $0.9484^*$ 和 $0.9567^*$ 、 $0.9332$ .但无论外源铬浓度高或低,3

种草本植物的地上部铬浓度均低于地下部,说明根部富集的铬只有部分转移到地上部分.

植物对重金属的吸收分布情况是耐性物种选择的重要指标,富集系数反映植物对重金属的富集能力,而转运系数反映重金属在植物体内的运输和分配情况.白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿3种草本植物转运系数平均值分别为0.78、0.78和0.74,这表明白花三叶草和高羊茅相对能较快地将吸收的铬向地上部位运输,而紫花苜蓿转运铬的能力相对较低.白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿地上部和地下部富集系数平均值分别为1.22、1.54; 1.16、1.44和1.26、1.62,说明这3种植物对铬的富集能力的大小顺序为紫花苜蓿>白花三叶草>高羊茅.在铬污染土壤上,白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿单株地上部和地下部含铬量平均值分别为1.53、0.99; 0.89、0.63和0.29、0.19,紫花苜蓿单株含铬量明显偏低,可能是由于其耐铬性差,铬污染严重抑制其生长的原因.因此,在铬污染土壤上种植白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿,白花三叶草的修复效果较好,高羊茅次之,而紫花苜蓿在铬浓度为 $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤上不能生存.

表6 Cr(VI)在3种草本植物体内的积累和分布情况<sup>1)</sup>

Table 6 Cr concentration and distribution in three herbaceous plants under Cr(VI) stress

项目	Cr(VI)浓度 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部 Cr 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地下部 Cr 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	转运系数	富集系数		单株 Cr 含量/ $\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$	
					地上部	地下部	地上部	地下部
白花三叶草	0	$1.85 \pm 0.07^e$	$2.77 \pm 0.09^e$	0.67	—	—	$0.02 \pm 0.00^d$	$0.01 \pm 0.00^d$
	100	$152.75 \pm 2.26^d$	$227.46 \pm 2.15^d$	0.67	1.53	2.27	$1.21 \pm 0.05^c$	$0.86 \pm 0.02^c$
	200	$281.17 \pm 3.47^c$	$318.19 \pm 1.79^c$	0.88	1.41	1.59	$1.79 \pm 0.10^a$	$1.04 \pm 0.02^a$
	300	$321.60 \pm 1.75^b$	$381.86 \pm 3.20^b$	0.84	1.07	1.27	$1.69 \pm 0.07^a$	$1.09 \pm 0.02^a$
	400	$352.05 \pm 2.36^a$	$414.04 \pm 2.82^a$	0.85	0.88	1.04	$1.44 \pm 0.07^b$	$0.95 \pm 0.03^b$
高羊茅	0	$1.62 \pm 0.05^e$	$2.76 \pm 0.04^e$	0.59	—	—	$0.01 \pm 0.00^d$	$0.01 \pm 0.00^d$
	100	$141.23 \pm 1.02^d$	$205.76 \pm 2.42^d$	0.69	1.41	2.06	$0.72 \pm 0.02^c$	$0.63 \pm 0.01^b$
	200	$264.32 \pm 2.07^c$	$305.70 \pm 2.79^c$	0.86	1.32	1.53	$1.10 \pm 0.07^a$	$0.82 \pm 0.01^a$
	300	$313.30 \pm 1.86^b$	$352.44 \pm 2.18^b$	0.89	1.04	1.17	$0.97 \pm 0.02^b$	$0.62 \pm 0.01^b$
	400	$344.26 \pm 2.43^a$	$405.27 \pm 2.88^a$	0.85	0.86	1.01	$0.77 \pm 0.03^c$	$0.45 \pm 0.02^d$
紫花苜蓿	0	$1.57 \pm 0.03^d$	$2.64 \pm 0.03^d$	0.59	—	—	$0.01 \pm 0.00^d$	$0.003 \pm 0.00^d$
	100	$145.85 \pm 3.03^c$	$211.04 \pm 1.11^c$	0.69	1.46	2.11	$0.29 \pm 0.01^b$	$0.19 \pm 0.01^b$
	200	$272.64 \pm 1.78^b$	$323.19 \pm 2.79^b$	0.84	1.36	1.62	$0.40 \pm 0.02^a$	$0.24 \pm 0.02^a$
	300	$288.89 \pm 1.69^a$	$338.7 \pm 1.25^a$	0.85	0.96	1.13	$0.18 \pm 0.01^c$	$0.15 \pm 0.01^c$

1) 同列具有不同字母上标者为差异显著( $P < 0.05$ )

## 3 讨论

铬影响植物的生长发育.高浓度铬抑制植物根细胞分化,阻碍水分吸收,从而导致植株矮小,叶片泛黄,叶面积明显减少,生物量降低,对植物产生毒害作用;低浓度铬促进根、根毛生长,增加根中髓质和外皮组织层的比例,促进植物的生长<sup>[14,26-28]</sup>.本研究表明,土壤中添加外源铬抑制白花三叶草、高羊

茅和紫花苜蓿3种草本植物生长,具体表现在株高、根长、地上部和地下部干重均降低,紫花苜蓿表现尤为突出.在铬浓度达 $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的污染土壤上,紫花苜蓿无法生存,这体现了不同植物对铬的耐受性不同,紫花苜蓿对铬胁迫非常敏感.王新等<sup>[17]</sup>研究发现,土壤中低剂量重金属(Cd、Pb、Cu、Zn),刺激紫花苜蓿生长,但高剂量抑制其生长.王瑞刚等<sup>[18]</sup>认为Cu胁迫抑制紫花苜蓿生长,说明同种植物对

不同的重金属胁迫表现出不同的反应. 袁敏等<sup>[15]</sup>在 4 种草对铅锌尾矿污染土壤重金属的抗性与吸收特性研究中发现, 紫花苜蓿对重金属 Zn、Pb、Cu、Cd 的抗性低于高羊茅. 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿这 3 种植物对重金属铬的耐性指数分析, 同样也证明了紫花苜蓿对铬的耐受性较差, 其次是高羊茅, 而白花三叶草相对较耐铬胁迫.

叶绿素是光合作用的主要色素, 其含量的高低在一定程度上反映了植物光合作用的强弱, 直接标志着植物生长的能力. 低浓度铬胁迫促进叶绿素形成, 而高浓度则抑制叶绿素的形成<sup>[3, 26, 29-31]</sup>. 在本试验中, 即使在最低铬胁迫浓度  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  条件下, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿这 3 种植物叶绿素含量却均比对照低. 这也许是不同植物对铬的敏感性不同. 在铬胁迫下, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种植物叶绿素含量均有不同程度的下降, 受破坏的程度为紫花苜蓿 > 白花三叶草 > 高羊茅, 并且叶绿素含量与土壤中添加的外源铬浓度之间呈现极显著负相关. 在铬胁迫条件下, 叶绿素 a 含量降低是导致 3 种草本植物叶绿素含量下降的主要原因<sup>[32]</sup>. 在光合作用过程中, 叶绿素 b 主要进行光能的收集, 而叶绿素 a 主要负责光能转化, 因此, 铬胁迫导致 3 种草本植物对光能的利用效率降低. 植物细胞膜系统是植物细胞和外界环境进行物质交换和信息交流的界面和屏障, 其稳定性是细胞进行正常生理功能的基础. MDA 是一种高活性的膜脂过氧化产物, 反映组织细胞膜损伤程度的灵敏指标, 逆境引起组织中 MDA 含量的增加量与细胞膜损伤程度呈正相关, 而与叶绿素含量呈显著负相关<sup>[33]</sup>. 本试验结果与前人的研究结果一致. 在铬胁迫下, 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿这 3 种草本植物叶片叶绿素含量显著降低, MDA 含量增加, 二者呈负相关. 由于 MDA 为高活性的脂过氧化物, 可与脂类、核酸、糖类及蛋白质发生交联作用而影响质膜和叶绿体片层膜的结构和功能, 影响膜的流动性及其与酶的结合力, 因此, MDA 含量可影响位于片层上的叶绿素含量<sup>[34]</sup>.

重金属胁迫直接或间接诱导次生氧化胁迫进而对植物细胞产生伤害效应, 而植物本身则通过产生各种防御性反应, 将伤害降低至最低程度. SOD 和 POD 是植物抗氧化酶系统中的关键酶, 其活性直接影响到活性氧的生成和代谢. 高活性抗氧化酶有利于提高植物对各种生物及非生物胁迫的耐受性<sup>[35]</sup>. 王爱云等<sup>[14]</sup>研究显示, 当土壤中外源铬浓度  $\leq 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 铬胁迫导致芥菜型油菜叶片中 SOD 和

POD 活性增加, 但是当铬浓度  $> 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 铬抑制叶片中 SOD 和 POD 活性. 张昌存等<sup>[36]</sup>在研究铬胁迫对薄荷生理特性的影响试验中发现, SOD 和 POD 活性随外源铬浓度的增加呈先升后降的趋势, 当铬浓度超过  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 薄荷的抗氧化酶系统受到损害, SOD 和 POD 活性急剧下降. 本研究表明, SOD 和 POD 活性均与土壤中外源铬含量呈负相关. 在铬胁迫下, 随着铬浓度的增加, 紫花苜蓿 POD 和 SOD 活性迅速降低, 但白花三叶草和高羊茅则相对比较平稳. 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿这 3 种植物 POD 和 SOD 活性降低大小顺序为紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草. 这可能是紫花苜蓿对铬耐受性差的一个主要原因.

重金属在亚细胞中定位有助于确定该元素对细胞活动的影响. 细胞壁是重金属进入细胞内部的第一道屏障, 细胞壁中的多糖分子和蛋白质分子可与金属离子结合而贮藏部分金属, 降低重金属对植物的毒害. 植物耐重金属胁迫能力与其细胞壁和该金属的结合能力有一定的相关性<sup>[37]</sup>. 杨德等<sup>[38]</sup>研究富铬南瓜和普通南瓜富集铬的亚细胞分布发现, 前者主要富集在细胞壁及残渣和可溶部分, 具有生命活性的细胞器及膜部分含量较低, 后者细胞器及膜部分铬的量较高, 所占比例比富铬南瓜的高. 王爱云等<sup>[14]</sup>研究发现芥菜型油菜四川黄籽叶片细胞质富集铬的比例较高, 其次为细胞壁, 而在叶绿体和线粒体中较低, 四川黄籽表现出对铬的耐受性较高. 本研究表明, 3 种草本植物体内铬的主要贮存部位也是细胞壁和细胞质, 而在叶绿体和线粒体中含量较低, 这与前人的研究结果一致. 随着土壤中外源铬含量增加, 铬在白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物细胞质、叶绿体和线粒体中的分配比例逐渐提高, 但在细胞壁中分配比例逐渐降低. 其中以紫花苜蓿细胞壁铬含量降低最多, 而其叶绿体和线粒体铬含量增加最大. 相关分析表明, 3 种草本植物叶片各亚细胞组分铬含量与 MDA 含量呈正相关, 而与叶绿素含量、SOD 和 POD 活性均呈负相关, 并且细胞壁铬含量与各生理指标相关程度较低, 但叶绿体和线粒体铬含量与各生理指标相关性较高. 叶绿体和线粒体是植物细胞生命活动的主要部位, 高浓度铬累积于其中, 增加了具有生命活性的原生质部分与铬接触机率, 使进行生命活动所需要的酶的活性受到影响, 导致叶绿素含量、SOD 和 POD 活性降低, MDA 含量增加. 这也许是紫花苜蓿比白花三叶草和高羊茅对铬胁迫更为敏感的一个重要原因.

重金属累积能力的大小是修复物种选择的一个重要指标. 依据 Baker 等<sup>[39]</sup>提出的参考值, 铬超积累植株地上部铬含量必须在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上. 有关铬超积累植物报道很少, 在国外, 曾报道 2 种超积累植物, 即在津巴布韦发现的 *Dicoma niccolifera* Wild 和 *Sutera fodina* Wild, 其铬的含量分别为 $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2\ 400\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[10]</sup>, 但在国内仅发现李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)对铬具有明显的超积累特性. 李氏禾生长在铬平均含量为 $114.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的淤泥中, 其叶片、根茎平均铬含量达 $1\ 786.9$ 、 $282.9\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>. 在耐铬物种筛选中发现大多数植物累积铬量均较低, 这与本研究结果一致. 王爱云等<sup>[14]</sup>在铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和铬富集的影响研究发现, 在外源铬浓度为 $500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中生长的四川黄籽, 其根和地上部分累积铬浓度分别为 $483.73\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $541.37\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 管铭等<sup>[9]</sup>研究发现, 生长在铬浓度为 $40\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的培养液中的假稻(*Lee rsiajaponica*), 其根茎和叶中铬的累积浓度分别为 $2\ 292\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $12.92\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 韩志萍<sup>[12]</sup>发现在铬浓度为 $20.4\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $55.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污染湿地中, 芦竹(*Arundo donax* L.)根和地上部分中重金属铬的累积浓度分别为: 根 $13.86\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $15.29\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 地上部 $7.74\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.81\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 在本研究中, 当铬胁迫浓度为 $400\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 白花三叶草地上部和地下部铬累积浓度分别为 $352.05\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $414.04\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 高羊茅分别为 $344.26\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $405.27\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而紫花苜蓿在此浓度下无法生存. 说明白花三叶草和高羊茅对重金属铬具有一定的累积能力, 紫花苜蓿耐铬性相当差. 3 种草本植物对铬累积能力大小顺序为白花三叶草 > 高羊茅 > 紫花苜蓿. 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿这 3 种草本植物转运系数平均值分别为 $0.78$ 、 $0.78$ 和 $0.74$ , 表明白花三叶草和高羊茅将铬转移到地上部分的能力相当, 而紫花苜蓿则相对较弱. 综上所述, 在重金属铬污染土壤治理中, 结合环境绿化, 白花三叶草和高羊茅有一定的潜在应用价值.

#### 4 结论

(1) 铬胁迫, 导致白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物 SOD 和 POD 活性、根系耐性指数、株高、根长、地上(下)部干重降低, 其降低大小顺序为紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草; 叶绿素含量降低大小顺序为紫花苜蓿 > 白花三叶草 > 高羊茅; 但

MDA 含量增加, 其增加大小顺序也表现为紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草.

(2) 白花三叶草、高羊茅和紫花苜蓿 3 种草本植物叶片富集的铬主要贮存于细胞壁, 其次是细胞质, 而在叶绿体和线粒体中含量较低, 其亚细胞组分中铬含量的增加总是紫花苜蓿 > 高羊茅 > 白花三叶草.

(3) 白花三叶草受铬胁迫影响最小, 耐性最强, 其次是高羊茅, 紫花苜蓿耐铬性较差. 3 种草本植物累积铬浓度大小顺序为白花三叶草 > 高羊茅 > 紫花苜蓿, 但白花三叶草和高羊茅二者将铬转移到地上部分的能力相当.

#### 参考文献:

- [1] Sharma D C, Sharma C P, Tripathi R D. Phytotoxic lesions of chromium in maize [J]. Chemosphere, 2003, **51**(1): 63-68.
- [2] Choudhury S, Panda S K. Toxic effects, oxidative stress and ultrastructural changes in moss *Taxithelium nepalense* (Schwaegr.) Broth. under chromium and lead phytotoxicity [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2005, **167**(1-4): 73-90.
- [3] Pandey V, Dixit V, Shyam R. Antioxidative responses in relation to growth of mustard (*Brassica juncea* cv. Pusa Jaikisan) plants exposed to hexavalent chromium [J]. Chemosphere, 2005, **61**(1): 40-47.
- [4] Sinha S, Gupta A K, Bhatt K. Uptake and translocation of metals in fenugreek grown on soil amended with tannery sludge: involvement of antioxidants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **67**(2): 267-277.
- [5] 郑爱珍. 重金属  $\text{Cr}^{6+}$  污染对辣椒幼苗生理生化特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1343-1346.
- [6] Bini C, Maleci L, Romanin A. The chromium issue in soils of the leather tannery district in Italy [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, **96**(2-3): 194-202.
- [7] Wang Q R, Cui Y S, Dong Y T. Phytoremediation—An effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, **21**(2): 326-327.
- [8] 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.
- [9] 管铭, 裴立, 郭水良, 等. 假稻对铬的富集作用及其耐受能力研究 [J]. 环境科学与管理, 2010, **35**(3): 125-130.
- [10] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展 [J]. 生态学报, 2001, **21**(7): 1196-1203.
- [11] 李志刚, 梅利民, 万雪芹, 等. 低浓度重金属  $\text{Cr}^{6+}$  对紫狼尾草生理生化特性的影响 [J]. 广西农业科学, 2009, **40**(5): 478-481.
- [12] 韩志萍. 铬铜镍在芦竹中的富集与分布 [J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(5): 106-108.
- [13] 卢立晃, 余建明, 叶永和, 等. 野苋菜植物修复皮革工业铬污染土壤的研究 [J]. 食品工业科技, 2010, **31**(1): 105-106.

- [14] 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.
- [15] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍, 等. 4 种草对铅锌尾矿污染土壤重金属的抗性与吸收特性 [J]. 生态环境, 2005, **14**(1): 43-47.
- [16] 李德明, 张秀娟, 李改华, 等. 几种重金属离子对高羊茅种子萌发及生理活性的响应 [J]. 草业科学, 2008, **25**(6): 98-102.
- [17] 王新, 贾永锋. 紫花苜蓿对土壤重金属富集及污染修复的潜力 [J]. 土壤通报, 2009, **40**(4): 932-935.
- [18] 王瑞刚, 唐世荣, 郭军康, 等. 铜胁迫对高丹草和紫花苜蓿生长和光合特性的影响 [J]. 生态环境学报, 2010, **19**(12): 2922-2928.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 67-70.
- [21] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进 [J]. 植物生理学通讯, 1994, **30**(3): 207-210.
- [22] 袁晓华, 杨中汉. 植物生理生化实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 128-133.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 164-167.
- [24] 汤惠华, 杨涛, 胡宏友, 等. 镉对花椰菜光合作用的影响及其在亚细胞中的分布 [J]. 园艺学报, 2008, **35**(9): 1291-1296.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. 263-278, 394-398.
- [26] Gupta S, Srivastava S, Saradhi P P. Chromium increases photosystem 2 activity in *Brassica juncea* [J]. *Biologia Plantarum*, 2009, **53**(1): 100-104.
- [27] Suseela M R, Sinha S, Singh S, *et al.* Accumulation of chromium and scanning electron microscopic studies in *Scirpus lacustris* L. treated with metal and tannery effluent [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, **68**(4): 540-548.
- [28] Shanker A K, Djanaguiraman M, Sudhagar R, *et al.* Differential antioxidative response of ascorbate glutathione pathway enzymes and metabolites to chromium speciation stress in green gram (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek. Cv CO 4) roots [J]. *Plant Science*, 2004, **166**(4): 1035-1043.
- [29] 黄辉, 童雷, 苗芑, 等. 铬污染地区芦苇 (*Phragmites australis* L.) 生理特征分析 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1273-1276.
- [30] Samantary S. Biochemical responses of Cr-tolerant and Cr-sensitive mung bean cultivars grown on varying levels of chromium [J]. *Chemosphere*, 2002, **47**(10): 1065-1072.
- [31] Ali S. 大麦铬与盐、铝的互作和减轻铬毒害的化学途径研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [32] 王爱云, 黄姗姗. 草本植物对铬污染的响应 [J]. 西北农业学报, 2010, **19**(7): 164-167.
- [33] 严明理, 冯涛, 向言词, 等. 铀尾沙对油菜幼苗生长和生理特征的影响 [J]. 生态学报, 2009, **29**(8): 4215-4222.
- [34] 徐振柱, 于振文, 董庆裕, 等. 水分胁迫对冬小麦旗叶细胞质膜及叶肉细胞超微结构的影响 [J]. 作物学报, 1997, **23**(3): 370-375.
- [35] Vannini C, Iriti M, Bracale M, *et al.* The ectopic expression of the rice *Osm5b4* gene in *Arabidopsis* increases tolerance to abiotic, environmental and biotic stresses [J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2006, **69**(1-3): 26-42.
- [36] 张昌存, 高洁. 铬诱导下薄荷的氧化胁迫响应和铬分布 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2011, **33**(2): 64-69.
- [37] Krämer U, Pickering I J, Prince R C, *et al.* Subcellular localization and speciation of nickel in hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species [J]. *Plant Physiology*, 2000, **122**(4): 1343-1353.
- [38] 杨德, 吕金印, 程永安, 等. 铬在南瓜中的亚细胞分布及对某些酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1352-1355.
- [39] 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.

## CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China .....	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China .....	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed .....	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline .....	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone .....	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River .....	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland .....	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China .....	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea .....	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current .....	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System .....	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu .....	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow ( <i>Gobiocypris rarus</i> ) .....	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish ( <i>Brachydanio rerio</i> ) .....	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter .....	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM .....	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions .....	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater .....	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process .....	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process .....	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor .....	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters .....	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment .....	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition .....	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability .....	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City .....	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in the Suburb of Shenzhen .....	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission .....	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO <sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt .....	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil .....	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows .....	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers .....	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production .....	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil .....	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain .....	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings .....	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake .....	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi .....	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO <sub>2</sub> Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant .....	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis .....	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR .....	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil .....	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City .....	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose .....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor .....	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples .....	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma .....	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis .....	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill .....	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate .....	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis .....	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis .....	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 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)

2012年6月15日 33卷 第6期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行