

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第18期 Vol.32 No.18 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 18 期

2012 年 9 月 (半月刊)

## 目 次

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应.....	时启龙,江 洪,陈 健,等 (5621)
珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建.....	孙 武,王义明,王越雷,等 (5630)
粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态.....	区余端,苏志尧 (5637)
四种猎物对南方小花蝽生长发育和繁殖的影响.....	张昌容,鄧军锐,莫利锋 (5646)
普洱季风常绿阔叶林次生演替中木本植物幼苗更新特征.....	李帅锋,刘万德,苏建荣,等 (5653)
喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应.....	张忠华,胡 刚,祝介东,等 (5663)
格氏栲天然林土壤养分空间异质性.....	苏松锦,刘金福,何中声,等 (5673)
种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响.....	徐德聪,詹 婧,陈 政,等 (5683)
灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响.....	单立山,李 毅,张希明,等 (5692)
真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应.....	聂玲玲,冯娟娟,吕素莲,等 (5703)
鹿泉沟自然保护区寒温性针叶林演替优势种格局动态分析.....	张钦弟,毕润成,张金屯,等 (5713)
不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响.....	贺学礼,马 丽,孟静静,等 (5721)
垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸.....	上官宇先,师日鹏,韩 坤,等 (5729)
不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响.....	郭立月,刘雪梅,战丽杰,等 (5738)
基于大气沉降与径流的乌鲁木齐河源区氮素收支模拟.....	王圣杰,张明军,王飞腾,等 (5747)
基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例.....	钟珍梅,翁伯琦,黄勤楼,等 (5755)
低温暴露和恢复对棘胸蛙雌性亚成体生存力及能量物质消耗的影响.....	凌 云,邵 晨,颜志刚,等 (5763)
暗期干扰对棉铃虫两个不同地理种群滞育抑制作用的比较.....	陈元生,涂小云,陈 超,等 (5770)
水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响.....	张彦军,郭胜利,南雅芳,等 (5777)
不同管理主体对泸沽湖流域生态系统影响的比较分析.....	董仁才,苟亚青,李思远,等 (5786)
连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系.....	李 捷,李新辉,贾晓平,等 (5795)
溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响.....	张 伟,曹振东,付世建 (5806)
象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系.....	江志兵,陈全震,寿 鹿,等 (5813)
填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例.....	李睿倩,孟范平 (5825)
城市滨水景观的视觉环境质量评价——以合肥市为例.....	姚玉敏,朱晓东,徐迎碧,等 (5836)
<b>专论与综述</b>	
生态基因组学研究进展.....	施永彬,李钧敏,金则新 (5846)
海洋酸化生态学研究进展.....	汪思茹,殷克东,蔡卫君,等 (5859)
纺锤水蚤摄食生态学研究进展.....	胡思敏,刘 胜,李 涛,等 (5870)
河口生态系统氨氧化菌生态学研究进展.....	张秋芳,徐继荣,苏建强,等 (5878)
嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展.....	林超峰,龚 骏 (5889)
典型低纬度海区(南海、孟加拉湾)初级生产力比较.....	刘华雪,宋星宇,黄洪辉,等 (5900)
植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展.....	张彦敏,周广胜 (5907)
中国大陆鸟类栖息地选择研究十年.....	蒋爱伍,周 放,覃 玥,等 (5918)
<b>研究简报</b>	
孵化温度对赤链蛇胚胎代谢和幼体行为的影响.....	孙文佳,俞 霄,曹梦洁,等 (5924)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析.....	王利民,邱珊莲,林新坚,等 (5930)
施肥对两种莧菜吸收积累镉的影响.....	李凝玉,李志安,庄 萍,等 (5937)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 322 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 36 \* 2012-09



**封面图说:** 冬天低空飞翔的丹顶鹤——丹顶鹤是鹤类中的一种,因头顶有“红肉冠”而得名。是东亚地区特有的鸟种,因体态优雅、颜色分明,在这一地区的文化中具有吉祥、忠贞、长寿的象征,是传说中的仙鹤,国家一级保护动物。丹顶鹤具备鹤类的特征,即三长——嘴长、颈长、腿长。成鸟除颈部和飞羽后端为黑色外,全身洁白,头顶皮肤裸露,呈鲜红色。丹顶鹤每年要在繁殖地和越冬地之间进行迁徙,只有在日本北海道等地是留鸟,不进行迁徙,这可能与冬季当地人有组织地投喂食物,食物来源充足有关。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108041145

李凝玉, 李志安, 庄萍, 傅庆林, 郭彬. 施肥对两种苋菜吸收积累镉的影响. 生态学报, 2012, 32(18): 5937-5942.

Li N Y, Li Z A, Zhuang P, Fu Q L, Guo B. Effect of fertilizers on cd uptake of two edible amaranthus herbs. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5937-5942.

## 施肥对两种苋菜吸收积累镉的影响

李凝玉<sup>1,2</sup>, 李志安<sup>1,\*</sup>, 庄萍<sup>1</sup>, 傅庆林<sup>2</sup>, 郭彬<sup>2</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 浙江省农业科学院, 杭州 310021)

**摘要:**通过盆栽试验,研究了生长在 5 mg/kg 镉(Cd)污染土壤中的两种苋菜(红苋(*Amaranthus Paniculatus* L.)和绿苋(*Amaranthus Paniculatus* L.))在 3 种施肥处理下(N、NP 和 NPK)的生长状况和对 Cd 的吸收积累情况。结果表明,两种苋菜能够在污染土壤中正常生长,各器官中叶 Cd 含量最高,范围为 124.1—225.9 mg/kg;根中次之,范围为 57.1—100.6 mg/kg;茎中最低,范围为 56.2—87.6 mg/kg;富集系数高达 22.4—40.2。施加 N, NP, NPK 肥对两种苋菜器官中的 Cd 含量和生物量有显著影响。其中,施加 NPK 肥使红苋和绿苋的生物量分别达到不施肥(对照)处理的 3.5 和 3.2 倍,单株提取 Cd 的总量是对照 3.2 和 5.0 倍。综上表明,两种苋菜(红苋和绿苋)具有生物量大、易栽培、施加 NPK 肥能够大幅增加生物量的同时不减少器官对 Cd 的吸收等优点,作为 Cd 污染土壤的修复植物有巨大应用前景。

**关键词:**镉;重金属;植物修复;苋菜

## Effect of fertilizers on cd uptake of two edible amaranthus herbs

LI Ningyu<sup>1,2</sup>, LI Zhian<sup>1,\*</sup>, ZHUANG Ping<sup>1</sup>, FU Qingli<sup>2</sup>, GUO Bin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

<sup>2</sup> Institute of Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou, 310021, China

**Abstract:** We assessed the phytoextraction potential for Cd of two edible amaranthus herbs (red amaranth: *Amaranthus Paniculatus* L. and green amaranth: *Amaranthus Paniculatus* L.) and the effect of application of N, NP and NPK fertilizers on Cd uptake of the two cultivars from soil contaminated with 5 mg/kg Cd. Two edible amaranthus herbs had high levels of Cd concentration in their tissues, ranging from 124.1 to 225.9 mg/kg in leaves, from 56.2 to 87.6 mg/kg in stems, and from 57.1 to 100.6 mg/kg in roots, resulting in average Bioaccumulation Factors (BCF) ranging from 22.4 to 40.2. Application of N, NP or NPK fertilizers had significantly influenced Cd content in leaves, stems and roots. Fertilizers of NPK fertilizer greatly increased dry biomass, by a factor of 3.5 for red amaranth or 3.2 for green amaranth, resulting in a large increment of Cd uptake per plant. Two edible amaranthus herbs have great potential in phytoremediation of Cd contaminated soil. They have the merits of high Cd content in tissues, high biomass, easy cultivation, and little effect on Cd uptake by fertilization.

**Key Words:** cadmium; heavy metal; phytoremediation; amaranthus

植物修复是一种新型环境治理技术,因其具有低成本、环境友好等特点成为重金属污染土壤修复技术研究的热点<sup>[1]</sup>。植物修复技术是指将具有一定重金属富集能力的植物种植于污染土地上,生长一定时间后将植物地上部或整株收获并集中填埋或焚烧,通过多次种植富集植物后使土壤重金属含量降低到可接受的水

基金项目:国家自然科学基金项目(30630015,30670393);中国国家博士后基金(20100481446);广东省自然科学基金(5006760)

收稿日期:2011-08-04; 修订日期:2011-11-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizan@scbg.ac.cn



平<sup>[2]</sup>。与物理技术和化学技术相比,它具有成本低、易应用、无二次污染等优点。这一技术的关键是实现较高植物生物量以及较高的体内重金属浓度水平,从而实现可观的去除量。已有研究者在生物量大、富集水平高的农作物中筛选出一些重金属富集植物如,苏德纯等人<sup>[3]</sup>在十字花科中筛选出具有 Cd 超积累特性的油菜品种,结果显示,印度芥菜(*Brassica juncea*)所在的十字花科芸苔属植物中有多种或基因型具有较强的吸收 Cd 的特性。它们具有生长快、生物量大、易栽培、农耕习性清楚等优点,具有作为修复植物的潜力,与野外发现的一些超富集植物相比,在应用推广上具有明显的优势。

研究发现苋科植物籽粒苋(*Amaranth hypochondriacu* L.)具有超富集 Cd 的特性,在土壤 Cd 污染水平 5 mg/kg 情况下,其地上部分的 Cd 含量超过 100 mg/kg,达到超富集植物的临界值<sup>[4]</sup>。范洪黎等<sup>[5]</sup>研究显示,苋科植物中很多品种具有 Cd 富集特征,如,苋属植物天星米在土壤 Cd 浓度为 25 mg/kg 条件下,其地上部 Cd 含量达到 234 mg/kg。Chunilall 等<sup>[6]</sup>也发现食用红叶苋菜(*Amaranthus dubius* L.)和绿叶苋菜(*Amaranthus hybridus* L.)对 Cd 有极强的富集能力。显然,利用苋科植物修复 Cd 污染土壤是一个有前途的方向。

修复植物的生物量直接影响其修复效率,农业上一般通过施肥来提高作物的生物量。施肥不但可以给植物的生长提供养分,而且可以改变土壤中的重金属活性。Tsadilas 等<sup>[7]</sup>发现施加氮肥可以降低土壤的 pH 值 0.4 个单位并增加了烟草叶中 Cd 的含量。有研究表明增施 P 肥可以形成磷酸铅从而有效抑制土壤中 Pb 的活性<sup>[8]</sup>。另有实验证实了施加 K 肥可以提高土壤中重金属 Cd 的活性<sup>[9]</sup>。因此,不同的肥料对重金属的生物有效态的影响是不同的,本实验设计了 3 种常规施肥方法和两种苋菜品种的两因素实验,以期探讨施肥对两种苋菜生物量和富集 Cd 的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自中国科学院华南植物园实验田,为珠江三角洲典型沉积土,采集数百公斤表土(0—20 cm),室内风干、磨碎、混匀、过 1 cm 筛用于盆栽实验。土壤的基本理化性状见表 1。供试作物红苋(*A. paniculatus* L.)和绿苋(*A. paniculatus* L.)的种子由广东省农业科学院提供。

### 1.2 试验方法

试验在玻璃温室中进行,PVC 盆钵尺寸;直径 37 cm,高 35 cm 的,盆底垫 20 目尼龙网,装入 25 kg 干土。于每盆土壤中均匀添加 CdSO<sub>4</sub> 溶液,至含 Cd 5 mg/kg 水平,并加水至田间持水量的 80%,土壤平衡 6 个月后,每盆土壤倒出再次充分混合均匀后播种。3 个施肥水平分别为:只施尿素(N),施加尿素和过磷酸钙(NP)和施加尿素、过磷酸钙和氯化钾(NPK);(考虑到实验的规模和当地人们施肥的习惯没有选用 N,P,K 肥的所有组合来进行实验)。施肥效率是按

照大田尿素 500 kg/hm<sup>2</sup>,磷酸钙 100 kg/hm<sup>2</sup>和氯化钾 150 kg/hm<sup>2</sup>折算的(土壤深度 20 cm,密度 1.3 g/cm<sup>3</sup>)。不施肥的处理作对照,每处理 3 个重复,共 24 盆。

两个苋菜品种分别为:红苋和绿苋(广泛栽培的优良食用蔬菜品种)。种子直接播种到各个盆中,每隔 1—2d 给土壤浇水,保持土壤湿润,生长 10d 左右进行间苗,保留大小均一的苗 5 株,均匀分布于盆内。整个实验过程不作追肥处理。

### 1.3 测定方法

植物生长 60d 收获,将苋菜分为根、茎、叶 3 个部分。取下的样品分别用自来水冲洗后再用去离子水冲洗干净。植物样品在 75℃ 温度下烘干至恒重,分别测定根、茎、叶 3 个部分干重。烘干的样品用粉碎机全部粉碎、混匀并装袋备用。

表 1 土壤基本理化性状

Table 1 Physicochemical properties of the soil used in study

参数 Properties	值 Values
pH	7.1
有机质 Organic mater content (g/kg)	15.4
阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol/kg)	7.82
硝态氮 NO <sub>3</sub> -N (mg/kg)	2.25
氨态氮 NH <sub>4</sub> -N (mg/kg)	19.4
有效磷 Available P (mg/kg)	0.13
速效钾 Exchangeable K (mg/kg)	32.1
全镉 Total Cd concentration after amendment (mg/kg)	5

准确称取植物样品约 0.5 g 于三角瓶中,  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4(5:1)$  湿法消解。消煮液定容后在原子吸收光谱仪上 (FAAS, Hitachi-Z5300) 测定 Cd 含量。国家物质标准中心的进行质量控制 (GBW 07406 和 07602), 回收率为 95%—103%。每批消煮样品中均有 2 个空白样品。

收获植物时, 取每盆植物的根际土壤风干、研磨, 过 2 mm 筛备用。土壤 pH 测定法方法: 水土比 1:2.5, 用去除  $\text{CO}_2$  的蒸馏水, 有效态 Cd 的测定方法: 量取 20 mL 的 0.01 mol/L  $\text{CaCl}_2$  溶液和 2.00 g 风干过筛的土壤与 50 mL 塑料瓶中, 常温下震荡 2h (20℃, 180t/min), 静置后过滤, 取上清液备分析用。土壤全 Cd 的测定方法:  $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4\text{:HF}(3:1:1)$  混合酸进行消解。

土壤有效态 Cd 和土壤全 Cd 含量采用火焰原子吸收分光光度计 (FAAS, Hitachi Z-5300) 测定, 所有数据使用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对数据进行方差分析, 并用 LSD 法进行多重比较, 显著性水平取  $P=0.05$ 。

#### 1.4 相关系数

富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF) 可以作为一种植物是否对某种重金属具有超富集性的参考, 用以评价植物修复重金属污染的潜力<sup>[10]</sup>。计算方法如下:

$$\text{富集系数 (BCF)} = \text{地上部分 Cd 含量} / \text{土壤中 Cd 含量}$$

$$\text{转运系数 (TF)} = \text{地上部分 Cd 含量} / \text{地下部分 Cd 含量}$$

## 2 结果

### 2.1 施肥对苋菜生物量的影响

在实验过程中, 两种苋菜均未表现出叶片失绿或植株枯萎等明显毒害特征。图 1 表明, 在对照处理中, 两种苋菜的全株生物量分别为: 红苋 9.0 g/株, 绿苋 10.1 g/株。施加 N 肥处理两种苋菜与对照相比几乎没有差异, 施加 NP 肥促进了苋菜的生长, 与对照相比红苋增加 87.5%, 绿苋增加 58.8%。然而, 施加 NPK 肥处理使两种苋菜的生物量增加极为显著 ( $P<0.01$ ), 施 NPK 肥处理的红苋和绿苋生物量分别是对照的 3.5 和 3.2 倍。

### 2.2 施肥对两种苋菜器官中 Cd 含量的影响

两种苋菜器官中 Cd 含量见表 2, 由表可知, 不同施肥处理对两种苋菜不同部位 Cd 含量的影响不同。四种处理中, 两种苋菜叶中的 Cd 含量远大于茎和根中的 Cd 含量, 且所有处理下两种苋菜叶 Cd 含量均大于 100 mg/kg。施加 N 肥, 两种苋菜叶中的 Cd 含量与对照相比显著增加 ( $P<0.05$ ), 其中红苋叶 Cd 含量增加 22.5%, 绿苋叶 Cd 含量增加 82.0%。施加 N 肥, 促进了两种苋菜根部对 Cd 的吸收, 且达到显著水平, 但对苋菜茎中的 Cd 含量影响不显著。施加 NP 肥对两种苋菜各器官中 Cd 含量的影响与不施肥的效应相似。总的来说, 与对照相比施 NP 肥略降低叶、茎和根中 Cd 含量。仅有绿苋茎中 Cd 含量降幅达到显著水平 ( $P<0.05$ ), 从 72.9 mg/kg 到 56.2 mg/kg。施加 NPK 处理中两种苋菜叶中 Cd 含量仍然很高, 分别为: 红苋 155.5 mg/kg 和 215.4 mg/kg。与对照相比, NPK 处理叶和茎中 Cd 含量有所降低, 但没有达到显著水平。

### 2.3 两种苋菜的富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF)

由于施肥处理会影响两种苋菜各器官中的 Cd 含量, 其富集系数和转运系数均受施肥影响。两种苋菜的 BCF 值高达 22.4—40.4, 转运系数从 1.0 到 2.0 (表 3), 均达到超富集植物的要求。由表 3 可知, 施 N 肥能够

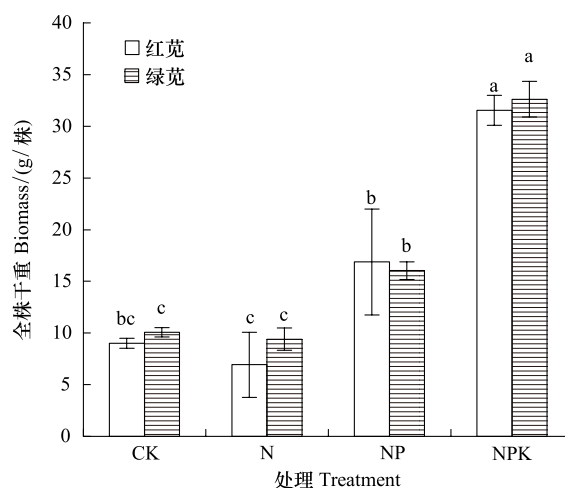


图 1 施肥对 2 种苋菜生物量的影响

Fig. 1 Root dry biomass and of two edible amaranthus herbs grown on contaminated soil

对照: 不施肥; N: 仅施尿素; NP: 施尿素和过磷酸钙; NPK: 施尿素, 过磷酸钙和氯化钾。图中字母表示同一苋菜品种不同施肥处理的差异性,  $P<0.05$ ; Mean $\pm$ SD,  $n=3$

显著增加两种苋菜的 BCF,施 NP 肥对两种苋菜的 BCF 值影响不大,施 NPK 肥能够显著提高绿苋的 BCF 值,但对红苋的 BCF 值影响却不显著。因为施肥处理影响了根中的 Cd 含量,使得两种苋菜的 TF 受施肥影响显著( $P<0.05$ ),尤其是施加 NPK 肥,红苋的 TF 由对照的 2.4 降低到 1.6,而绿苋由对照的 1.8 上升至 2.4。

表 2 施肥对 2 种苋菜各器官中 Cd 含量的影响 (mg/kg,平均值±标准差,n=3)

Table 2 Effect of fertilizers on Cd concentration in the tissues of two edible amaranthus herbs grown on contaminated soil (mg/kg, Mean±SD, n=3)

品种 Species		对照 Control	氮肥 N	氮磷肥 NP	氮磷钾肥 NPK
红苋 Red herb	叶 leaf	172.1±26.3 a	210.8±8.5 a	151.9±25.8 a	155.5±23.4 a
	茎 Stem	87.6±6.7 a	85.9±5.3 a	64.5±10.9 a	71.6±3.4 a
	根 Root	66.2±3.2 b	100.6±17.9 a	60.8±3.2 b	85.7±2.3 b
绿苋 Green herb	叶 leaf	124.1±4.4 b	225.9±19.3 a	129.5±7.4 b	215.4±2.7 a
	茎 Stem	72.9±1.6 a	74.7±4.4 a	56.2±1.7 b	70.6±2.4 a
	根 Root	61.2±1.7 b	83.0±8.1 a	57.1±4.4 b	72.8±1.9 a

对照:不施肥;N:仅施尿素;NP:施尿素和过磷酸钙;NPK:施尿素,过磷酸钙和氯化钾;表中数字后的字母表示同一苋菜品种不同施肥处理的差异性,  $P<0.05$

2.4 施肥对两种苋菜提取 Cd 总量的影响

两种苋菜提取 Cd 总量见图 2.,可见,施肥对两种苋菜提取 Cd 总量影响显著,但相同施肥处理对两种苋菜的影响效应是相似的。施加 N 和 NP 肥中,两种苋菜提取 Cd 总量与对照相似,但在 NPK 肥处理中,两种苋菜提取 Cd 的总量与对照相比及显著增加 ( $P<0.01$ ),红苋由对照中的 1.32 增加到 4.21mg/株,是对照的 3.2 倍;绿苋由对照中的 1.07 增加到 5.36mg/株,是对照的 5.0 倍。施加 N 肥和 NP 肥对两种苋菜提取的总 Cd 没有显著差异 ( $P>0.05$ )。NPK 肥处理中,绿苋提取 Cd 的总量为 5.36 mg/株,是红苋的 1.27 倍。

3 讨论

植物修复是指在污染土壤中种植具有吸收积累一种或几种重金属元素的植物,之后将植物地上部分或整株收获并集中处理,以达到去除土壤中重金属污染的办法<sup>[10]</sup>。因此,植物体内重金属含量和该种植物可收获部分的生物量决定了此种植物实际修复效率。除此之外,这种植物具有生长快、易栽培等特性,同时对某种重金属的富集系数和转运系数要求较高。苋菜在中国被广泛栽培,品种资源丰富,生长快且生物量大,且国内外已有苋科植物富集 Cd 的研究,如 Chuni1all 等<sup>[6]</sup>发现绿穗苋 (*Amaranthus hybridus*) 和一种红苋 (*Amaranthus dubius*)对重金属 Cd 有很强的富集能力。李凝玉等<sup>[11]</sup>的研究结果也表明,同为苋科的籽粒苋具有很强的 Cd 富集能力,在 Cd 污染为 3 mg/kg 污染的土壤上,籽粒苋的地上部分 Cd 的积累量可以达到 51.0 mg/kg 和 91.8 mg/kg,其地上部分的 Cd 的富集系数为 17.0,根为

表 3 施肥对 2 种苋菜富集系数 (BCF) 和转移系数 (TF) 的影响

Table 3 Bioconcentration factor (BCF) and transfer factor (TF) of Cd of two edible amaranthus herbs grown on contaminated soil (Mean±SD, n=3)

处理 Treatment	红苋 Red herb		绿苋 Green herb	
	BCF	TF	BCF	TF
对照 Control	31.9 b	2.4 a	22.6 b	1.8 b
氮肥 N	39.8 a	2.2 a	40.4 a	2.4 a
氮磷肥 NP	28.0 b	2.3 a	22.4 b	2.0 b
氮磷钾肥 NPK	28.0 b	1.6 b	34.9 a	2.4 a

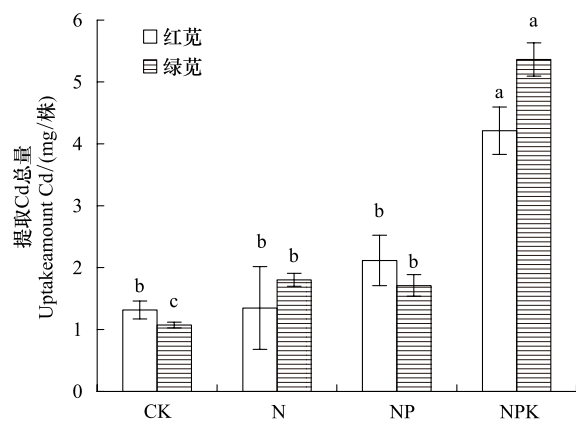


图 2 施肥对 2 种苋菜提取 Cd 总量的影响

Fig. 2 Total Cd uptake by two edible amaranthus herbs grown on contaminated soil (Mean±SD, n=3)

30.0。本实验四种处理中两种苋菜的叶 Cd 含量远超过 100 mg/kg,其富集系数>22,转移系数均>1,且苋菜的生物量远高于目前发现的 Cd 的超富集植物如:*Thlaspi caerulescens*<sup>[12]</sup>,*Viola baoshanensis*<sup>[13]</sup>,和 *Solanum nigrum* L.<sup>[14-15]</sup>。所以两种苋菜具有修复 Cd 污染土壤的潜力和超富集 Cd 的特征。

农业上一般通过施肥来提高作物的生物量,本研究表明,不同施肥处理对两种苋菜的生物量和各器官中 Cd 的含量均有显著影响。由图 1 可知,相同施肥处理下,两种苋菜的生物量是相似的,其中绿苋的生物量略高于红苋。不同施肥处理对两种苋菜的生物量影响很大,其中 N 肥对苋菜生物量的影响最小,NPK 肥处理中苋菜的生物量是对照的 3 倍以上。与对照或 N 肥处理或 NP 肥处理相比均达到显著水平( $P<0.05$ )。NPK 肥处理使苋菜生物量大幅增加的原因可能在于 K 肥的施入,也有可能是 NPK 肥的联合效应所致。

施肥对两种苋菜各器官中的 Cd 含量有影响。一般来说施肥后,两种苋菜叶 Cd 含量几乎没有变化,茎和根中 Cd 含量影响显著。施加 NPK 肥可以提高苋菜的生物量,因此,苋菜提取 Cd 的总量与对照相比成倍数增加,从而提高了修复效率。施肥提高苋菜生物量的同时,也会改变土壤中重金属的有效性,图 3A 表示施肥处理后土壤中有效态 Cd 与对照相比显著增加( $P<0.05$ )。土壤 pH 的降低可能直接导致 Cd 有效态的增加。Kayser 等<sup>[16]</sup>的研究发现当土壤 pH 从 7.2 降低到 6.9,NaNO<sub>3</sub> 提取态 Cd 和 Zn 分别增加了 35 和 8 倍。他们所报道的 pH 降低对 Cd 有效态影响效应比本实验所表现出来的大,这可能与土壤类型有关。由图 3 可知施肥使土壤 pH 降低约 1.5 个单位,NPK 肥处理中土壤的有效态 Cd 最高,是对照的 2.2 倍。很多研究者发现施肥可以降低土壤的 pH 值,不同肥料或不同肥料组合对 pH 的改变幅度是不同的。Gudmundsson 等<sup>[17]</sup>发现硝酸铵对土壤 pH 的改变就很小。Wang 等<sup>[18]</sup>发现硫酸铵可以使土壤 pH 降低,同时可以促进蔬菜对 Pb 的吸收,这个结论与 Lou 等<sup>[19]</sup>相同。本实验中,3 个肥料处理中均加入了尿素,其离解出的铵根离子可能是导致 pH 降低的主要原因。土壤中的有效态 Cd 的增加,并没有直接使得苋菜地上部分的 Cd 含量增加,说明文中研究的 2 种苋菜对 Cd 的吸收与土壤中有有效态 Cd 的含量不成正比关系,具体机理还需进一步研究。

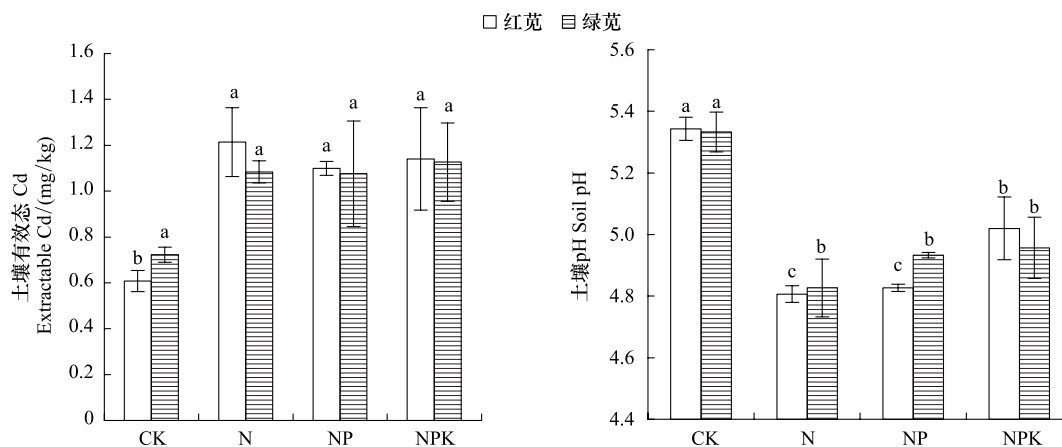


图 3 施肥对土壤有效态 Cd 和 pH 的影响

Fig. 3 CaCl<sub>2</sub>-extractable Cd and pH of rhizosphere soils in different treatment after harvest (Mean±SD, n=3)

#### 4 结论

本研究结果表明:(1)红苋和绿苋具有超富 Cd 的特性,在土壤 Cd 污染水平为 5 mg/kg 的条件下正常生长,富集系数大于 22,转运系数大于 1。而且,红苋和绿苋具有生物量大,易栽培,适应范围广等优点,可以作为修复土壤 Cd 污染的植物进一步研究,在施加 NPK 肥的情况下,绿苋(*A. Paniculatus* L.)的修复潜力大于红苋(*A. Paniculatus* L.)。

(2)施加 NPK 肥,两种苋菜的生物量达到对照的 3 倍以上,且没有显著降低叶和茎中 Cd 含量,因此,把苋菜作为修复 Cd 污染土壤的植物时,可以通过施加 NPK 肥来提高其修复效率。



## References:

- [ 1 ] Singh O V, Labana S, Pandey G, Budhiraja R, Jain R K. Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2003, 61(5/6): 405-412.
- [ 2 ] Nanda Kumar P B A, Dushenkov V, Motto H, Raskin I. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29(5): 1232-1238.
- [ 3 ] Su D C, Huang H Z. The phytoremediation potential of oilseed rape (*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil. *China Environmental Science*, 2002, 22(1): 48-51.
- [ 4 ] Li N Y, Fu Q L, Zhuang P, Guo B, Zou B, Li Z A. Effect of fertilizers on Cd uptake of *Amaranthus hypochondriacus*, a high biomass, fast growing and easily cultivated potential Cd hyperaccumulator. *International Journal of Phytoremediation*, doi: 10.1080/15226514.2011.587479.
- [ 5 ] Fan H L, Wang X, Zhou W. Low molecular weight organic acids in rhizosphere and their effects on cadmium accumulation in two cultivars of Amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(12): 2727-2733.
- [ 6 ] Chumilall V, Kindness A, Jonnalagadda S B. Heavy metal uptake by two edible *Amaranthus* herbs grown on soils contaminated with lead, mercury, cadmium, and nickel. *Journal of Environmental Science and Health Part B*, 2005, 40(2): 375-384.
- [ 7 ] Tsadilas C D, Karaivazoglou N A, Tsotsolis N C, Stamatiadis S, Samaras V. Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, N form, and year of cultivation. *Environmental Pollution*, 2005, 134(2): 239-246.
- [ 8 ] Cao X D, Ma L Q, Rhue D R, Appel C S. Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock. *Environmental Pollution*, 2004, 131(3): 435-444.
- [ 9 ] Sparrow L A, Salardini A A, Johnstone J. Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.): III. Response of cv. Russet Burbank to sources of banded potassium. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1994, 45(1): 243-249.
- [ 10 ] Ghosh M, Singh S P. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species. *Environmental Pollution*, 2005, 133(2): 365-371.
- [ 11 ] Li N Y, Li Z A, Ding Y Z, Zou B, Zhuang P. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1369-1373.
- [ 12 ] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae). *New Phytologist*, 1994, 127(1): 61-68.
- [ 13 ] Liu W, Shu W S, Lan C Y. *Viola baoshanensis*, a plant that hyperaccumulates cadmium. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1): 29-32.
- [ 14 ] Wei S H, Zhou Q X, Wang X, Zhang K S, Guo G L, Ma Lena Q Y. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(1): 33-38.
- [ 15 ] Wang M, Zou J H, Duan X C, Jiang W S, Liu D H. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 82-88.
- [ 16 ] Kayser A, Wenger K, Keller A, Attinger W, Felix H R, Gupta S K, Schulin R. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from calcareous soil: the use of NTA and sulphur amendments. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(9): 1778-1783.
- [ 17 ] Gudmundsson T, Björnsson H, Thorvaldsson G. Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland. *Catena*, 2004, 56(1/3): 213-224.
- [ 18 ] Wang Y H, Ai S Y, Li M J, Yang S H, Yao J W. Effects of using itrogen fertilizer on distribution of Pb in the soil. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(7): 39-42, 46-46.
- [ 19 ] Lou Y L, Zhang Y S, Lin X Y. Effects of forms of nitrogen fertilizer on the bioavailability of heavy metals in the soils amended with biosolids and their uptake by corn plant. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2005, 31(4): 392-398.

## 参考文献:

- [ 3 ] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力. *中国环境科学*, 2002, 22(1): 48-51.
- [ 5 ] 范洪黎, 王旭, 周卫. 不同镉积累型苋菜 (*Amaranthus mangostanus* L.) 根际低分子量有机酸与镉吸收的关系. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2727-2733.
- [ 11 ] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 邹碧, 庄萍. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1369-1373.



CONTENTS

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain .....	SHI Qilong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (5621)
Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta .....	SUN Wu, WANG Yiming, WANG Yuelei, et al (5630)
Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong .....	OU Yudian, SU Zhiyao (5637)
The influence of 4 species of preys on the development and fecundity of <i>Orius similis</i> Zheng .....	ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (5646)
Woody seedling regeneration in secondary succession of monsoon broad-leaved evergreen forest in Puer, Yunnan, Southwest China .....	LI Shuaifeng, LIU Wande, SU Jianrong, et al (5653)
Scale-dependent spatial variation of species abundance and richness in two mixed evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, Southwest China .....	ZHANG Zhonghua, HU Gang, ZHU Jiedong, et al (5663)
The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest .....	SU Songjin, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, et al (5673)
Effects of <i>Vetiveria zizanioides</i> L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands .....	XU Decong, ZHAN Jing, CHEN Zheng, et al (5683)
Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species .....	SHAN Lishan, LI Yi, ZHANG Ximing, et al (5692)
The response of euhalophyte <i>Salicornia europaea</i> L. to different nitrogen forms .....	NIE Lingling, FENG Juanjuan, LÜ Sulian, et al (5703)
Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve .....	ZHANG Qindi, BI Runcheng, ZHANG Jintun, et al (5713)
Effects of AM fungi on the growth and nutrients of <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge. under different soil water and fertilizer conditions .....	HE Xueli, MA Li, MENG Jingjing, et al (5721)
The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows .....	SHANGGUAN Yuxian, SHI Ripeng, HAN Kun, et al (5729)
Cattle dung composted by different methods had different effects on the growth and quality of soybean .....	GUO Liyue, LIU XueMei, ZHAN Lijie, et al (5738)
Nitrogen budget modelling at the headwaters of Urumqi River Based on the atmospheric deposition and runoff .....	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (5747)
Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the energy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian .....	ZHONG Zhenmei, WENG Boqi, HUANG Qinlou, et al (5755)
Effects of cold exposure and recovery on viability and energy consumption in the sub-adult female giant spiny frogs ( <i>Paa spinosa</i> ) .....	LING Yun, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (5763)
A comparison of night-interruption on diapause-averting among two populations of the cotton bollworm, <i>Helicoverpa armigera</i> .....	CHEN Yuansheng, TU Xiaoyun, CHEN Chao, et al (5770)
Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed .....	ZHANG Yanjun, GUO Shengli, NAN Yafang, et al (5777)
Comparative analysis of Lugu Lake watershed ecosystem function under different management authorities .....	DONG Rencai, GOU Yaqing, LI Siyuan, et al (5786)
Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China .....	LI Jie, LI Xinhui, JIA Xiaoping, et al (5795)
Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp .....	ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian (5806)
Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay .....	JIANG Zhibing, CHEN Quanzhen, SHOU Lu, et al (5813)
Emergency appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay .....	LI Ruiqian, MENG Fanping (5825)
Assessing the visual quality of urban waterfront landscapes: the case of Hefei, China .....	YAO Yumin, ZHU Xiaodong, XU Yingbi, et al (5836)
<b>Review and Monograph</b>	
Advances in ecological genomics .....	SHI Yongbin, LI Junmin, JIN Zexin (5846)
Advances in studies of ecological effects of ocean acidification .....	WANG Siru, YIN Kedong, CAI Weijun, et al (5859)
Advances in feeding ecology of <i>Acartia</i> .....	HU Simin, LIU Sheng, LI Tao, et al (5870)
Research progress on ammonia-oxidizing microorganisms in estuarine ecosystem .....	ZHANG Qiufang, XU Jirong, SU Jianqiang, et al (5878)
Recent progress in research on neutrophilic, microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria .....	LIN Chaofeng, GONG Jun (5889)
A comparison study on primary production in typical low-latitude seas (South China Sea and Bay of Bengal) .....	LIU Huaxue, SONG Xingyu, HUANG Honghui, et al (5900)
Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors .....	ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng (5907)
10-years of bird habitat selection studies in mainland China: a review .....	JIANG Aiwu, ZHOU Fang, QIN Yue, et al (5918)
<b>Scientific Note</b>	
The effects of incubation temperature on embryonic metabolism and hatchling behavior in the Red-banded Snake, <i>Dinodon rufonotatum</i> .....	SUN Wenjia, YU Xiao, CAO Mengjie, et al (5924)
Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices .....	WANG Limin, QIU Shanlian, LIN Xinxian, et al (5930)
Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs .....	LI Ningyu, LI Zhian, ZHUANG Ping, et al (5937)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 18 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 18 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元