

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 2013

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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第9期 2013年5月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)
基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)

不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响

常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝萍, 罗志军, 等 (2761)
长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 藏润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许 妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李 璞,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响 梁佩筠,许 超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷的环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202050146

高宁大,耿丽平,赵全利,乔斌,刘文菊.外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响.生态学报,2013,33(9):2719-2727.

Gao N D, Geng L P, Zhao Q L, Qiao B, Liu W J. Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2719-2727.

外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响

高宁大, 耿丽平, 赵全利, 乔斌, 刘文菊*

(河北农业大学, 资源与环境科学学院, 保定 071000)

摘要:采用土壤培养方法,研究了不同含砷水平土壤中添加外源磷或有机质对砷在板蓝根地下部和地上部累积与分配的影响。结果表明,在外源添加磷或者有机质的情况下,与自然土相比含砷土对板蓝根的生长有一定的促进作用;在自然土(13.4 mg/kg)中,外源磷没有明显影响板蓝根地下部对砷的累积,却显著降低了砷由地下部向地上部的转运,并且添加200 mg P₂O₅/kg显著降低了砷在地上的累积。然而,在含砷土(33.4 mg/kg)中,100 mg P₂O₅/kg处理显著降低了砷在地下部的累积,但随磷用量的增加反而促进了地下部砷的累积;在添加有机质试验中,10 g/kg的有机质显著降低了自然土中板蓝根地下部和地上部对砷的累积,并且砷的吸收能力也明显下降。在含砷土(23.4 mg/kg)中,添加5 g/kg的有机质不仅降低了砷在板蓝根中的富集,而且降低了其对砷的吸收能力,提高了砷由地下部向地上部的转运,但是随着有机质施用量增至10 g/kg,地下部砷含量及其吸收砷的能力均有一定程度的增大。因此,在砷水平较低的自然土壤上种植板蓝根添加200 mg P₂O₅/kg和10 g/kg的有机质是控制砷在该草药体内积累的适宜用量,而在砷水平较高的土壤上100 mg P₂O₅/kg和5 g/kg的有机质是降低板蓝根体内砷累积的适宜用量。

关键词:板蓝根地下部和地上部;砷;磷;有机质;吸收和转运

Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica*

GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, QIAO Bin, LIU Wenju*

College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

Abstract: Rice and drinking water can be the important sources of arsenic (As) for human intake, while little is known about As accumulation in Chinese Herbal Medicines. Soil culture experiments were conducted to investigate the effects of phosphate (P) and organic matter (OM) applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica* (Chinese name: Ban Langen), the Chinese Herbal Medicines with roots and leaves, using natural soil and the soil contaminated with arsenic. The results showed that P₂₀₀ (add 200 mg P₂O₅/kg in soil) increased root dry weights of *Isatis indigotica* compared to control (P₀) in the natural soil or the soil with arsenic, but had no significant effect on the shoot biomass of *Isatis indigotica*. OM₁₀ (added organic matter at 10 g/kg) increased root dry weights of *Isatis indigotica* in the natural soil, but reduced the root and shoot dry weights of *Isatis indigotica* in the As-contaminated soil; In the natural soil, different P levels did not influence As accumulation in the roots of *Isatis indigotica*, but reduced As translocation from roots to shoots. Moreover, application of 200 mg P₂O₅/kg significantly decreased As concentrations in shoots. In the arsenic-contaminated soil, P application had no effect on As levels in the shoots, but the level of 100 mg P₂O₅/kg reduced the accumulation of arsenic in the roots of *Isatis indigotica* significantly. However, higher level of P application (200 mg P₂O₅/kg) increased

基金项目:河北省世纪优秀人才支持计划(CPRC028);河北省自然科学基金(C2009000590)

收稿日期:2012-02-05; 修订日期:2012-09-11

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuwj@hebau.edu.cn

As concentrations in the root of *Isatis indigotica*; For organic matter application experiment, OM₁₀ reduced the arsenic accumulation in the roots and shoots of *Isatis indigotica* and the specific arsenic uptake significantly, and did not influence arsenic translocation in plant grown in the natural soil. However, OM₅(added organic matter at 5 g/kg) decreased arsenic accumulation in the roots and shoots of *Isatis indigotica* and the specific uptake of arsenic, but increased arsenic transport from roots to shoots in *Isatis indigotica* grown in As-contaminated soil. When the level of organic matter increased up to 10 g/kg, the root-As level and the specific uptake of arsenic were higher than those of other treatments. Therefore, 200 mg P₂O₅/kg and 10 g/kg organic matter were suitable to decrease As accumulation in *Isatis indigotica* growing in natural soil, but 100 mg P₂O₅/kg and 5 g/kg organic matter were better to reduce arsenic concentrations in this herb medicine grown in As-contaminated soil with arsenic concentrations around 30—40 g/kg.

Key Words: root and shoot of *Isatis indigotica*; arsenic; phosphate; organic matter; uptake and translocation

中草药因其毒副作用小、疗效好且使用安全而并逐渐被国际社会所接受。然而,中草药在栽培、贮存和加工炮制过程中可能会受到不同程度的重金属污染而影响其安全性,并使其声誉在国际市场上受到很大影响。由此可见,砷等重金属在中草药中含量超标问题不容忽视。目前饮用水和食品已被确认为是砷进入人体的主要途径,且水体和食品中砷的人体健康风险受到关注^[1-4]。然而中草药作为饮水、食品之外砷经口摄入人体的另一途径,其中砷含量和减少中草药中砷累积的调控措施方面的研究不可忽视。前期的研究结果显示,尽管草药种植区土壤符合 GAP 标准,但一部分以根入药的白芷、知母、天花粉、紫菀和防风根部砷含量仍超过或接近我国绿色行业标准(《药用植物及制品进出口绿色行业标准》),这说明一些中草药对砷有较强的富集能力^[5]。

板蓝根,又名菘蓝(*Isatis indigotica* Fort.) ,主产于河北、河南及江浙等地,为十字花科(Cruciferae)菘蓝属2年生草本植物,其根在中药上称为板蓝根,地上部称大青叶,为同一植株的不同部位^[6],且二者均可入药。一般而言,砷作为重金属的一种,其在非超富集的普通植物中的分布往往是地上部小于根部^[5,7]。但是柳晓娟^[8]等调查河北省安国中草药种植区地产板蓝根中砷的分布,结果显示砷在地上部的含量要高于地下部(根系)。此外,从药店购买的板蓝根饮片中砷的含量及分布也存在相同的特点。因为板蓝根地下部和地上部均可入药,砷在植株体内的累积和分配直接关系到该两种草药的用药安全性,因此,如何控制土壤中的砷进入该中草药体内以及如何调控砷在其地下部和地上部中的分布值得进一步探索和研究。土壤中砷生物有效性受土壤 pH 值、Eh 值,土壤中磷硅等元素的供应水平和土壤有机质含量等多种因素的影响。其中,磷和砷属于同族元素,有着相似的物理化学特性,磷酸根和砷酸根是一对类似物,在土壤胶体吸附和植物吸收的过程中均表现出拮抗作用^[9-11]。此外,土壤中的小分子量有机化合物可以增强土壤中砷的有效性,但高分子量有机质则对土壤溶液中的砷有固定作用^[12-14]。

基于此,本研究拟采用土壤培养的方法,根据本小组的前期研究结果中板蓝根地上部和地下部对砷分布的特殊性以及地上部和地下部均可入药的特性,研究外源磷素或外源有机质的供应对砷在其地上部和地下部中的累积及其在地下部和地上部分配的调控机制,旨在通过采取一些农艺调控措施来减少砷在板蓝根中的累积,降低药材中砷的人体健康风险。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试草药 本试验所用的板蓝根品种为大叶板蓝根(*Isatis indigotica* Fort. 安国草药种植区常用品种)。种子购买于安国胜利药材秧苗种子站。

供试土壤 潮褐土,采自于保定市乐凯南大街农研所旁的农田。基本理化性质:碱解氮 67.1 mg/kg,速效磷 23.5 mg/kg,速效钾 228 mg/kg,有机质 20.0 g/kg,全砷 13.4 mg/kg,有效砷 0.94 mg/kg,pH 值为 7.64 (水土比为 2.5:1)。土壤经风干,磨碎,过 5 mm 筛后备用。

1.2 试验设计

1.2.1 添加外源磷的土培试验

本试验中采用的土壤中砷含量在国家土壤环境一级标准范围内,为了进一步了解在较高砷水平条件下外源磷素的影响效应,在自然土中采用均匀混入砷污染土(采自砷污染区,含砷 383.4 mg/kg)的方法,添加外源砷浓度为 20 mg/kg。也就是说砷有两个处理:自然土(含砷 13.4 mg/kg)和含砷土(含砷 33.4 mg/kg),全文表示方法相同。在砷处理的基础上设置 3 个外源磷的处理,分别为 P_0 , P_{100} , P_{200} , 即添加外源磷(以 P_2O_5 计)的浓度分别为 0 mg/kg, 100 mg/kg, 200 mg/kg, 以 $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ 的形式均匀充分地混入土壤;每个处理设 6 个重复,共 36 盆,培养钵随机排列。尿素和氯化钾来作为底肥,N 和 K_2O 添加浓度均为 0.2 g/kg。将底肥及其它外源添加物与土壤充分混匀后播种浇水。

1.2.2 添加外源有机质的土培试验

土壤中添加外源砷浓度为 10 mg/kg,砷的处理方法同上,在砷处理的基础上设置 3 个外源有机质的处理,分别为 OM_0 , OM_5 , OM_{10} , 即添加有机质的浓度分别为 0 g/kg, 5 g/kg, 10 g/kg, 以风化煤(含有机质 400 g/kg)的形式均匀充分地混入土壤;每个处理设 6 个重复,共 36 盆,培养钵随机排列。尿素、磷酸二氢钙和氯化钾来作为底肥,N, P_2O_5 和 K_2O 添加浓度分别为 0.2 g/kg, 0.15 g/kg, 0.2 g/kg。将底肥及其它外源添加物与土壤充分混匀浇水平衡 15 d 后播种。

1.2.3 植株培养

选取籽粒饱满、均匀的板蓝根种子若干,10% 的过氧化氢浸泡 15 min,用去离子水洗干净,播种,深度约 1 cm(根据药农的栽培经验),每盆装土 1.5 kg,两周后每盆定苗为 10 棵。本试验在人工光照培养室进行,昼夜室温 28 °C/20 °C,相对湿度 40%—50%,光照时间 14 h/d,光强为 (240±20) $\mu mol/m^2/s$,培养时间为 90 d。

1.3 分析方法

植物和土壤样品均采用闷罐消解法进行前处理^[15]。具体方法为:称取样品 0.2 g 左右放入聚四氟乙烯内胆中加入 5 mL 优级纯的浓硝酸后,放置过夜,次日装罐放入烘箱中进行消解。消解程序如下:升温到 100 °C,在此温度下保持 1 h 后,继续升温至 140 °C,保持 4 h,关闭烘箱使其自然冷却至室温。闷罐冷却后取出内胆,内胆中液体通过加热方法蒸发至 1 mL 后用超纯水转移至 10 mL 比色管中定容待测。空白和标准样品同时做,以确保消煮前处理及测定的准确度,其中标准物质 GBW07404(土样)和 GBW07603(植物样)购于国家标准物质中心。

土壤有效砷的提取^[16] 称 2 g 土放入三角瓶中,加入 10 mL 浓度为 0.05 mol/L 的 $NH_4H_2PO_4$ 溶液,室温下放入振荡机中振荡 16 h,在 6000 r/min 的转速下离心 15 min,用孔径为 0.45 μm 的滤膜抽滤到 10 mL 离心管中待测。

用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, 7500a, Agilent, USA) 测定板蓝根地下部和地上部以及土壤中全砷和有效砷的含量,用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 2000 DV, Perkin Elmer, USA) 测定其地下部和地上部中磷含量。试验中土壤有效磷含量^[17]和供试土壤基本理化性质按土壤农化常规分析法测定。

1.4 数据分析

砷的吸收能力 表示根系对砷的吸收能力,用草药吸收的砷总量除以草药的根干重来表示^[18]。

转移系数 草药地上部与根中砷浓度的比值,表示砷由根系被转运至地上部的能力。

富集系数 草药地上部和根系中砷浓度分别与土壤中砷浓度的比值,表示砷在草药体内的富集情况。

文中数据均采用 SAS 和 SPSS17.0 软件进行统计分析。

2 结果

2.1 外源磷或有机质作用下自然土和含砷土中板蓝根的生长状况

板蓝根地下部和地上部的干物重均指同一培养钵的 10 棵苗的干物重。如表 1 所示,不论自然土还是含

砷土,地下部的干物重随着施磷量的增加而增加,其中P₂₀₀处理的板蓝根地下部的干物重均显著高于对照,而P₁₀₀处理与其它两个处理差异不显著。说明磷作为植物必需的营养元素,显著促进了板蓝根地下部的生长,而对地上部的生长没有明显影响。自然土和含砷土中板蓝根生物量的差异显著性分析显示,外源添加磷的情况下,含砷土中板蓝根地下部和地上部的干物重均显著高于自然土($P<0.01$),这说明在一定磷水平下适当增加土壤中的砷浓度可以促进板蓝根的生长。

表1 自然土和含砷土中不同磷处理对板蓝根干物重的影响

Table 1 Effects of P application on biomass of shoots and roots of *Isatis indigotica*

土壤种类 Soil species	地下部干物重/g Biomass of roots of <i>Isatis indigotica</i>			地上部干物重/g Biomass of shoots of <i>Isatis indigotica</i>		
	P ₀	P ₁₀₀	P ₂₀₀	P ₀	P ₁₀₀	P ₂₀₀
	0.35±0.04b	0.43±0.04ab	0.48±0.05a	2.60±0.23A	2.66±0.19A	2.33±0.16A
自然土	0.45±0.05b	0.59±0.04ab	0.69±0.06a	2.99±0.22A	3.15±0.14A	3.21±0.17A
含砷土						

自然土 Natural soil; 含砷土 The soil contaminated with arsenic; 表中同行同一指标数据后不同字母表示不同磷水平之间差异显著($P<0.05$),小写字母用于板蓝根地下部,大写字母用于地上部

在有机质添加试验中(表2),生长在自然土中的板蓝根,其地下部的干物重随土壤中有机质含量的增加而增加,OM₁₀处理地下部的干物重显著高于对照(OM₀),OM₅处理与其它两个处理之间差异不显著;施用不同用量的有机质没有明显影响其地上部的干物重;在含砷土中,10 g/kg的有机质显著抑制了板蓝根地下部的生长,而对照和OM₅处理之间差异不显著。地上部的干物重随土壤中有机质含量的增加呈先增加后减小的趋势,OM₅处理显著高于OM₁₀处理,与OM₀处理之间差异不显著。即当土壤中砷含量较高时,有机质用量为10 g/kg可抑制板蓝根的生长。自然土和含砷土中板蓝根生物量的差异显著性分析表明,OM₁₀水平含砷土中板蓝根地下部和地上部的干物重均显著高于自然土($P<0.01$),这说明土壤中有机质水平较高时,含砷土对板蓝根生长有一定的刺激作用。

表2 自然土和含砷土中不同有机质处理板蓝根的干物重

Table 2 Effects of organic matter application on biomass of shoots and roots of *Isatis indigotica*

土壤种类 Soil species	地下部干物重/g Biomass of roots of <i>Isatis indigotica</i>			地上部干物重/g Biomass of shoots of <i>Isatis indigotica</i>		
	OM ₀	OM ₅	OM ₁₀	OM ₀	OM ₅	OM ₁₀
	0.53±0.05b	0.59±0.03ab	0.66±0.06a	2.91±0.17A	3.23±0.07A	3.23±0.15A
自然土	0.57±0.05a	0.69±0.05a	0.41±0.03b	3.05±0.23AB	3.39±0.12A	2.56±0.14B
含砷土						

2.2 外源磷对自然土和含砷土中板蓝根累积砷的影响

对于自然土而言,与对照相比添加外源磷并没有影响板蓝根地下部的砷含量,但100 mg P₂O₅/kg处理地上部砷含量显著低于P₀处理,为对照的81%,说明在砷浓度较低的自然土壤中增加磷浓度可以在一定程度上降低板蓝根地上部对砷的富集(图1)。在含砷土中,不同磷处理对地上部砷含量影响差异不显著,但对地下部中砷的累积却表现出不同的影响趋势:与P₀相比,P₁₀₀处理地下部中砷含量显著降低,为P₀处理的81%,与P₂₀₀处理相比差异不显著(图1)。说明在含砷较高的土壤中增加外源磷的适量供应可以在一定程度上降低板蓝根地下部对土壤中砷的富集作用。

显然,在自然土中添加磷为200 mg P₂O₅/kg的处理和污染土中的100 mg P₂O₅/kg的处理可以降低板蓝根对砷的富集且作用较显著,分别为不同含砷水平土壤的适宜施磷用量。由此也不难得出,选择适宜的外源磷添加量来最大限度地降低板蓝根中砷含量,与砷的土壤环境背景值有直接关系。

2.3 外源有机质对自然土和含砷土处理中板蓝根中砷累积的影响

在自然土的不同有机质用量中,OM₁₀处理板蓝根地下部和地上部砷含量均显著低于OM₀和OM₅处理,其中地下部和地上部砷含量分别为对照的79%和86%(图2),因此在自然土中,土壤有机质适宜添加量为

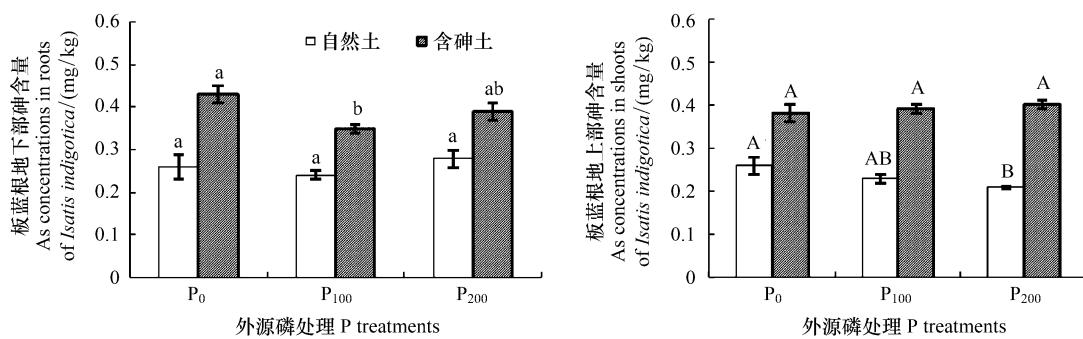


图1 自然土和含砷土中不同磷浓度处理对板蓝根地下部和地上部中砷含量的影响

Fig. 1 Effects of P application on As concentrations in roots and shoots of *Isatis indigofera* in the natural soil and the soil contaminated with arsenic

10 g/kg;在含砷土的不同有机质处理中,OM₅ 处理与 OM₀ 相比可以显著降低地下部和地上部砷含量,两部位的砷浓度分别为 OM₀ 处理的 61% 和 89%。而有机质的添加量增加到 10 mg/kg 时,地上部砷含量显著降低,为 OM₀ 处理的 84%,而地下部中砷的浓度与对照差异不大,与 OM₅ 处理相(图 2)。因此,对于含砷量较高的土壤而言,有机质的适宜添加量为 5 g/kg。

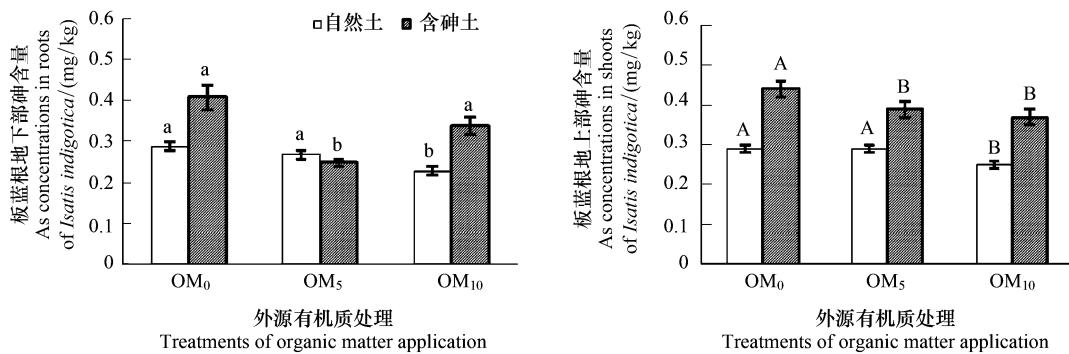


图2 自然土和含砷土中不同有机质浓度处理对板蓝根地下部和地上部中砷含量的影响

Fig. 2 Effects of organic matter application on As concentrations in roots and shoots of *Isatis indigofera* in the natural soil and the soil contaminated with arsenic

2.4 外源磷或有机质对自然土和含砷土中板蓝根砷吸收能力的影响

为了进一步评价根系对砷的吸收能力,采用 SAU 的指标对数据进行了深入分析,结果如图 3 所示。首先分析外源磷添加对板蓝根砷吸收能力的影响效应。对于自然土而言,与对照 P₀ 相比,P₁₀₀ 处理中板蓝根对砷的吸收能力虽有降低,但未达到显著水平,而 200 mg/kg 的 P₂₀₀ 的施用却显著降低了板蓝根对砷的吸收能力(图 3);对于含砷土而言,与对照和 P₂₀₀ 相比,100 mg/kg P₂₀₀ 的施用显著降低了板蓝根对砷的吸收能力。

外源添加有机质对板蓝根砷吸收能力的影响如图 3 所示。在自然土的各个处理中,施用有机质显著降低了砷的吸收能力,其中 OM₁₀ 降低的幅度最大,为 OM₀ 处理的 76%;对于含砷土,OM₅ 处理的板蓝根对砷的吸收能力最低,继续增加有机质的用量并没有使砷的吸收能力随之进一步降低。

综上所述,图 3 显示的板蓝根对砷的吸收能力进一步印证了砷在板蓝根地下部和地上部中的累积规律。

2.5 外源磷或有机质对自然土和含砷土中板蓝根砷富集系数的影响

为了明确该草药的两个入药部位板蓝根地下部和地上部对砷的富集能力,计算了两部位对砷的富集系数(表 3)。在自然土中,不同磷处理下地下部的砷富集系数差异不显著;地上部的砷富集系数随土壤中磷含量的升高而降低,P₁₀₀ 和 P₂₀₀ 处理地上部的砷富集系数显著低于对照 P₀,P₁₀₀ 和 P₂₀₀ 处理之间差异不显著。在含砷土中,外源磷并没有影响板蓝根地下部和地上部的砷富集系数。

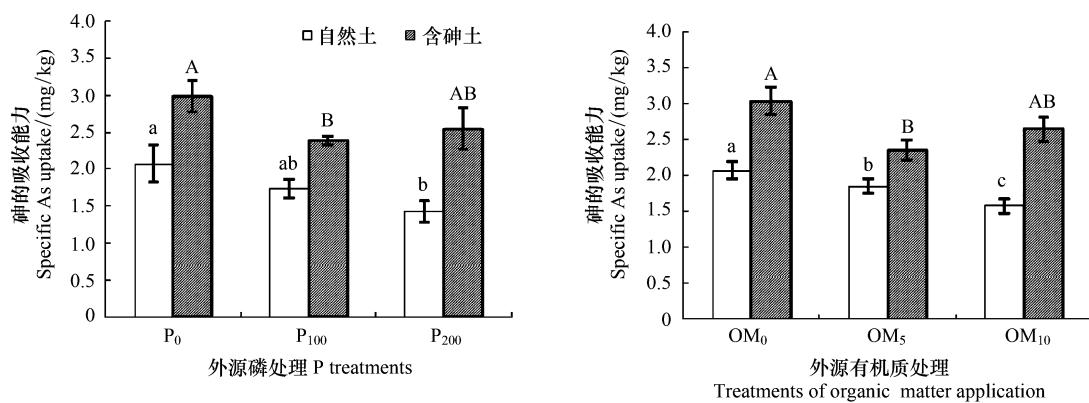


图3 外源磷处理和有机质处理的板蓝根对砷的吸收能力

Fig. 3 Effects of P and organic matter application on the specific As uptake by roots of *Isatis indigotica*

表3 不同磷处理下板蓝根对砷的富集系数

Table 3 Effects of P application on As bioaccumulation factors of shoots and roots of *Isatis indigotica*

土壤种类 Soil species	外源磷处理 P treatment	地下部砷富集系数 As bio-accumulating in roots of <i>Isatis indigotica</i>	地上部砷富集系数 As bio-accumulating in shoots of <i>Isatis indigotica</i>
自然土	P ₀	0.042±0.005a	0.041±0.004a
	P ₁₀₀	0.035±0.001a	0.033±0.001b
	P ₂₀₀	0.041±0.003a	0.030±0.001b
含砷土	P ₀	0.020±0.001a	0.018±0.001a
	P ₁₀₀	0.018±0.001a	0.018±0.001a
	P ₂₀₀	0.018±0.001a	0.018±0.000a

从表4可以看出,在自然土中,OM₁₀处理板蓝根地下部和地上部的砷富集系数均显著低于OM₀和OM₅处理,其中OM₀和OM₅处理之间差异不显著;在含砷土中,OM₅处理地下部的砷富集系数显著低于OM₀处理,与OM₁₀处理差异不显著;添加有机质没有影响地上部的砷富集系数。

表4 不同有机质处理下板蓝根对砷的富集系数

Table 4 Effects of organic matter application on As bioaccumulation factors of shoots and roots of *Isatis indigotica*

土壤种类 Soil species	外源有机质处理 Organic matter treatment	地下部砷富集系数 As bio-accumulating in roots of <i>Isatis indigotica</i>	地上部砷富集系数 As bio-accumulating in shoots of <i>Isatis indigotica</i>
自然土	OM ₀	0.039±0.002 a	0.039±0.001 a
	OM ₅	0.037±0.001 a	0.040±0.002 a
	OM ₁₀	0.032±0.002 b	0.035±0.001 b
含砷土	OM ₀	0.026±0.002 a	0.028±0.002 a
	OM ₅	0.017±0.001 b	0.027±0.001 a
	OM ₁₀	0.022±0.001 ab	0.025±0.001 a

2.6 外源磷和或有机质处理对自然土和含砷土中板蓝根砷转运系数的影响

转运系数能说明砷在植物地上部和根中的分配,那么外源磷和有机质的添加是否会影响砷在板蓝根地下部和地上部中的分布?结果如图4所示。自然土中板蓝根的砷转运系数随着施磷量的增加而下降,也就是说磷抑制了砷由地下部向地上部的转运。方差的显著性分析表明,P₂₀₀处理显著低于P₀处理($P<0.01$)。含砷土中板蓝根的砷转运系数以P₁₀₀处理最高,但与其它两处理差异不显著;自然土中板蓝根的砷转运系数随着土壤有机质含量的增加,差异变化很小($P>0.01$)。含砷土板蓝根的砷转运系数以OM₅处理最高,其它两处理之间不存在明显差异(图4)。

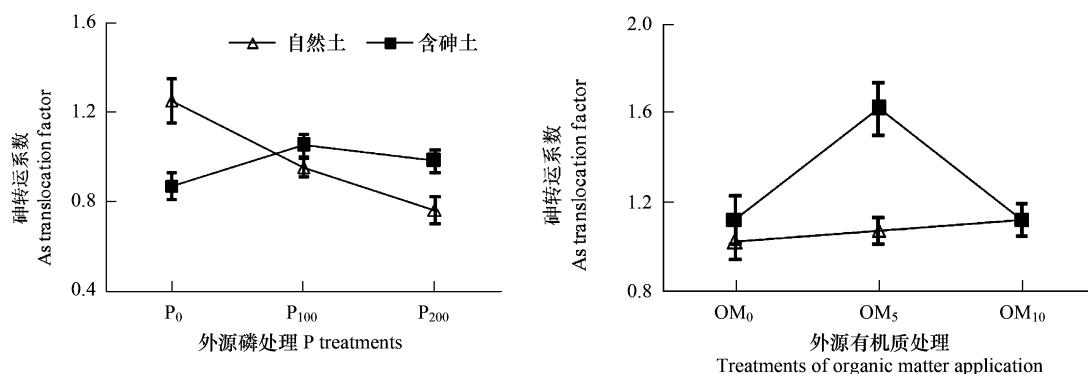


图 4 不同外源磷处理和有机质处理板蓝根的砷转运系数

Fig. 4 Effects of P and organic matter application on As translocation factors between shoots and roots of *Isatis indigotica*

3 讨论

磷和砷为同族元素,砷酸盐和磷酸盐具有相似的理化性质,二者不仅在土壤颗粒表面和根系的自由空间竞争吸附位点,而且竞争细胞膜上共同的吸收转运系统^[10,19-20],因此,磷肥的施用经常被用做控制土壤中砷生物有效性的主要农艺措施^[21-22]。本研究的结果也进一步印证了这一观点:在砷含量高低不同的土壤上,磷素用量是调控砷生物有效性的关键。在含砷量较低的自然土中,随着磷素施用量的增加,板蓝根对砷的富集量降低,尤其是高磷用量(200 mg/kg)还抑制了砷由地下部向地上部的转运;但是对砷水平较高的污染土而言,砷在该草药中的累积量并不是随着磷素施用量的增加而持续增大的,其中适宜磷的添加量(100 mg/kg)最大限度地降低了砷在其地下部和地上部中的累积,之后随着磷用量的增加反而促进了该草药对砷的吸收和累积。一般认为,磷肥施入土壤中,短时间内会增加土壤溶液中磷的浓度,由于磷酸盐与砷酸盐在被根系吸收时存在竞争作用,因此,在一定程度上会减少砷的吸收^[10]。然而,土壤溶液中的磷酸盐同样也可以竞争土壤颗粒表面砷酸盐的吸附位点^[23-24],从而使其代换下来进入土壤溶液,提高了根际土壤溶液中可供根系吸收的砷酸盐浓度,最终增加了根系对砷的吸收量。因此,如何调控磷肥的施用量使根际土壤固相-液相-植物体系中砷酸盐和磷酸盐的浓度达到一个良性平衡是调控砷在植物体内累积的关键,尤其是对板蓝根这种根系和地上部均可入药的中药材来说,适宜磷素的供应对于砷在植物体内的累积和转运更为重要。

有机质是普遍存在于土壤中的一种带负电荷的胶体,可以通过络合及吸附的作用方式和土壤溶液中的阴阳离子发生相互作用。腐殖质是土壤有机质的主要组成部分,一般占有有机质总量的50%—70%。腐殖质分子结构的特征,使其具有与重金属离子发生络合、螯合和吸附的性能^[25],而带正电荷的重金属阳离子又会和砷酸根这样的阴离子发生相互作用。有研究表明,当土壤砷含量低于19 mg/kg,土壤有机质含量与砷含量呈负相关,因此,通过提高有机质含量可以降低土壤中砷的有效性^[12]。在本研究中,对于砷含量较低的自然土,添加10 g/kg的有机质不仅显著降低了砷在其地下部和地上部中的累积(图2),并且该草药对砷的吸收能力明显下降(图3)。但是土壤砷含量水平不同,有机质对土壤砷生物有效性的影响也不同。对于含砷量较高的土壤而言,添加5 g/kg的有机质不仅降低了地下部和地上部中砷的富集(图2),而且显著降低了板蓝根对砷的吸收能力,提高了砷由地下部向地上部的转运,但是随着有机质施用量增至10 g/kg,其地下部中砷的含量有所升高,并且其吸收砷的能力也有一定程度的增大。分析了添加有机质对土壤中有效砷的影响,结果发现施用有机质后有效砷的浓度显著降低。与对照相比,5 g/kg和10 g/kg有机质的添加量土壤中有效砷含量为对照的85%和80%,但有机质用量不同并没有影响有效砷的水平。结合生物量的数据可以看出,10 g/kg有机质的施用降低了其地下部和地上部的干物重,也就是抑制了该草药的生长。这是因为随着有机质含量的增大,其对板蓝根根际土壤中其他以阳离子存在的养分离子的固定作用增强,使养分的生物有效性降低,使板蓝根吸收不到足够的营养,从而影响了该药材的生长。尽管两有机质用量的土壤中有效砷的浓度几乎是相同的,但是因为有机质的高用量抑制了植物的生长,从而导致了板蓝根中的砷含量增加(图2)。

综上所述,磷和有机质均可以调控砷在板蓝根地下部和地上部中的累积,但是调控的方向和程度不仅受土壤砷含量水平的影响,而且也受磷和有机质用量的影响。因此,在板蓝根的GAP种植区域要根据土壤中砷含量状况来调整磷肥和有机肥的施用量,从而最大限度地降低砷在板蓝根中的累积,实现其用药的安全性。

4 结论

- (1)在外源添加磷或者有机质的情况下,与自然土相比含砷土对板蓝根的生长有一定的促进作用。
- (2)在砷水平较低的自然土壤上种植板蓝根添加200 mg P₂O₅/kg 和10 g/kg 的有机质是控制砷在该草药体内积累的适宜用量。
- (3)在砷水平较高的土壤上添加100 mg P₂O₅/kg 和5 g/kg 的有机质是降低板蓝根体内砷累积的适宜用量。

References:

- [1] Guo H R. Arsenic level in drinking water and mortality of lung cancer. *Cancer Causes and Control*, 2004, 15(2): 171-177.
- [2] Williams P N, Price A H, Raab A, Hossain S A, Feldmann J, Meharg A A. Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(15): 5531-5540.
- [3] Williams P N, Islam M R, Adomako E E, Raab A, Hossain S A, Zhu Y G, Feldmann J, Meharg A A. Increase in rice grain arsenic for regions of Bangladesh irrigating paddies with elevated arsenic in groundwaters. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(16): 4903-4908.
- [4] Tsuji J S, Yost L J, Barraj L M, Scrafford C G, Mink P J. Use of background inorganic arsenic exposures to provide perspective on risk assessment results. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2007, 48(1): 59-68.
- [5] Chu Z D, Liu W J, Xiao Y B, Zhu Y G, Zheng W J, Duan Y H. Survey and assessment of heavy metals in soils and herbal medicines from Chinese Herbal Medicine cultivated regions. *Environmental Science*, 2010, 31(6): 1600-1607.
- [6] Liu D L. The primary study of absorption and accumulation characteristics of heavy metals between *Isatis Indigofera* fort and soil. *Chemical Research and Application*, 2010, 22(9): 1174-1178.
- [7] Raab A, Williams P N, Meharg A, Feldmann J. Uptake and translocation of inorganic and methylated arsenic species by plants. *Environmental Chemistry*, 2007, 4(3): 197-203.
- [8] Liu X J. Chemical Speciation and Bioaccessibility of Arsenic in Chinese Herbal Medicines [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2010.
- [9] Wang J R, Zhao F J, Meharg A A, Raab A, Feldmann J, McGrath S P. Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata* uptake kinetics, interactions with phosphate and arsenic speciation. *Plant Physiology*, 2002, 130(3): 1552-1561.
- [10] Meharg A A, Macnair M R. Suppression of the high affinity phosphate uptake system: a mechanism of arsenate tolerance on *Holcus Lanatus*. *Journal of Experimental Botany*, 1992, 43(4): 519-524.
- [11] Guo W, Zhu Y G, Liang Y C, Liu W J, Chen Z. Effect of application of silicon on arsenic uptake by rice seedlings in soil. *Environmental Sciences*, 2006, 27(7): 1393-1397.
- [12] Dong F, Lu Y, Zhang J G, Yan Q Y, Yin W, Chen C X, Zhang C. Soil arsenic concentration in paddy fields and its transfer to rice (*Oryza sativa* L.) grain in Pearl River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2137-2140.
- [13] Tao Y Q, Jiang W, Yuan C G, Zhang S Z. Effects of oxalate on the release of arsenic from arsenic-contaminated soils. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1232-1235.
- [14] Xu X X, Zhang S R, Li D Y, Li T, Li Y, Tang M Y. Spatial variability characteristics and Influencing factors of soil arsenic and mercury in the typical hilly region of central Sichuan, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1320-1325.
- [15] Wang Y, Zhao Q L, Hu Y, Du X, Ge W, Liu W J. Survey and contamination assessment of heavy metals in soil and plants around the Pb/Zn mine in Shangyu, Zhejiang province. *Environmental Chemistry*, 2006, 30(7): 1354-1360.
- [16] Song J, Zhao F J, McGrath S P, Luo Y M. Influence of soil properties and aging on arsenic phytotoxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(6): 1663-1670.
- [17] Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 81-83.
- [18] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A. Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite. *Plant and Soil*, 2005, 277(1/2): 127-138.
- [19] Asher C J, Reay P F. Arsenic uptake by barley seedlings. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1979, 6(4): 459-466.
- [20] Macnair M R, Cumbe Q. Evidence that arsenic tolerance in *Holcus lanatus* L. is caused by an altered phosphate uptake system. *New Phytologist*, 1987, 107(2): 387-394.

- [21] Quaghebeur M, Rengel Z. The distribution of arsenate and arsenite in shoots and roots of *Holcus lanatus* is influenced by arsenic tolerance and arsenate and phosphate supply. *Plant Physiology*, 2003, 132(3): 1600-1609.
- [22] Xue P Y, Liu W J, Duan G L, Liu Y X, Zhang G Y. Effects of exogenous phosphorus on arsenic fractions in the rhizosphere and their bioavailability to rice and wheat seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2027-2034.
- [23] Quaghebeur M, Rengel Z. Arsenic uptake, translocation and speciation in *pho1* and *pho2* mutants of *Arabidopsis thaliana*. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120(2): 280-286.
- [24] Zhou J J, Gao C, Li Z P, Wang D F. Effect of phosphorus addition on soil arsenic adsorption and mobilization. *Soils*, 2005, 37(6): 645-648.
- [25] Hou G J. *Soil Science*. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 45-45.

参考文献:

- [5] 褚卓栋, 刘文菊, 肖亚兵, 朱永官, 郑文杰, 段宇航. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价. *环境科学*, 2010, 31(6): 1600-1607.
- [6] 刘冬莲. 蓼蓝对土壤中重金属的吸收富集特征初步研究. *化学研究与应用*, 2010, 22(9): 1174-1178.
- [8] 柳晓娟. 中草药中砷的赋存形态及其生物可给性研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
- [11] 郭伟, 朱永官, 梁永超, 刘文菊, 陈正. 土壤施硅对水稻吸收砷的影响. *环境科学*, 2006, 27(7): 1393-1397.
- [12] 董飞, 卢瑛, 张建国, 闫秋艳, 尹伟, 陈春霞, 张朝. 珠江三角洲稻田土壤砷及其向水稻籽粒迁移特征. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2137-2140.
- [13] 陶玉强, 姜威, 苑春刚, 张淑贞. 草酸盐影响污染土壤中砷释放的研究. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1232-1235.
- [14] 徐小逊, 张世熔, 李丹阳, 李婷, 李云, 唐美英. 川中典型丘陵区土壤砷和汞空间变异特征及影响因素分析. *农业环境科学学报*, 2010, 29(7): 1320-1325.
- [15] 王莹, 赵全利, 胡莹, 杜心, 葛伟, 刘文菊. 上虞某铅锌矿区周边土壤植物重金属含量及其污染评价. *环境化学*, 2011, 30(7): 1354-1360.
- [17] 鲍士旦. *土壤农化分析* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 81-83.
- [22] 薛培英, 刘文菊, 段桂兰, 刘云霞, 张桂银. 外源磷对苗期小麦和水稻根际砷形态及其生物有效性的影响. *生态学报*, 2009, 29(4): 2027-2034.
- [24] 周娟娟, 高超, 李忠佩, 王登峰. 磷对土壤 As(V) 固定与活化的影响. *土壤*, 2005, 37(6): 645-648.
- [25] 侯光炯. *土壤学南方本* (第二版). 北京: 中国农业出版社, 1999: 45-45.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)

Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of *Alternanthera philoxeroides* stems CHE Xiuxia, CHEN Huijing, YAN Qiaodi, et al (2695)
Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain FENG Qiuhong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica* GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)
Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shibin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis* LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China CHENG Man, ZHU Qulian, LIU Lei, et al (2835)

Simulation of the carbon cycle of <i>Larix chinensis</i> forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China	LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region	CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
Age structure and point pattern of <i>Butula platyphylla</i> in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia	HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China	JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
Landscape, Regional and Global Ecology	
The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed	XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS	ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
Resource and Industrial Ecology	
Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions	LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
Research Notes	
Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid	ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO ₂ concentration	LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任编辑 欧阳志云

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第9期 (2013年5月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 2013)

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

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
行 书 学 出 版 社
地址:东黄城根北街16号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563

订 购 国外发行
E-mail:journal@cspg.net
全国各地邮局
中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱
邮政编码:100044

广 告 经 营 许 可 证
京海工商广字第8013号

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

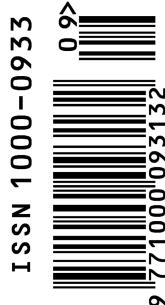
Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563

E-mail:journal@cspg.net
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



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 90.00 元