

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

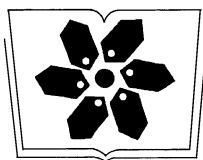
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 10 期 Vol.33 No.10 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 10 期 2013 年 5 月 (半月刊)

目次

福建长汀水土保持专题

- 福建省长汀县水土流失区的时空变化研究——“福建长汀水土保持”专题序言 徐涵秋 (2945)
- 福建省长汀县河田盆地近 35 年来地表裸土变化的遥感时空分析 徐涵秋 (2946)
- 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应 徐涵秋, 何 慧, 黄绍霖 (2954)
- 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态 何圣嘉, 谢锦升, 曾宏达, 等 (2964)
- 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究 杨冉冉, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2974)
- 南方红壤水土流失区土地利用动态变化——以长汀河田盆地为例 林 娜, 徐涵秋, 何 慧 (2983)
- 亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例 黄绍霖, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2992)
- 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例 陈志强, 陈志彪 (3002)

前沿理论与学科综述

- 土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展 沈征涛, 施 斌, 王宝军, 等 (3011)
- 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等 (3020)

个体与基础生态

- 岩溶区不同植被下土壤水溶解无机碳含量及其稳定碳同位素组成特征 梁 轩, 汪智军, 袁道先, 等 (3031)
- 黄脊雷鳉越冬卵的滞育发育特性 朱道弘, 陈艳艳, 赵 琴 (3039)
- 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等 (3047)

种群、群落和生态系统

- 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类群落结构与多样性 王 斌, 彭波涌, 李晶晶, 等 (3056)
- 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响 齐 麟, 于大炮, 周旺明, 等 (3065)
- 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性 徐宾铎, 曾慧慧, 薛 莹, 等 (3074)
- 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价 王耀平, 白军红, 肖 蓉, 等 (3083)
- 不同起始状态对草原群落恢复演替的影响 杨 晨, 王 炜, 汪诗平, 等 (3092)
- 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响 王长庭, 王根绪, 刘 伟, 等 (3103)
- 高寒退化草地狼毒种群株丛间格局控制机理 高福元, 赵成章 (3114)
- 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究 马和平, 郭其强, 刘合满, 等 (3122)
- 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶属性因子的相关性 王英姿 (3129)
- 西门岛人工秋茄林恢复对大型底栖生物的影响 黄 丽, 陈少波, 仇建标, 等 (3138)
- 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等 (3148)
- 青藏高原高寒草甸植被特征与温度、水分因子关系 徐满厚, 薛 娴 (3158)

景观、区域和全球生态

近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化..... 赵 亮,刘吉平,田学智 (3169)

基于系统动力学的雏菊世界模型气候控制敏感性分析..... 陈海滨,唐海萍 (3177)

资源与产业生态

主要气候因子对麦棉两熟棉花产量的影响..... 韩迎春,王国平,范正义,等 (3185)

低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应..... 姜丽娜,杨文斌,卢 琦,等 (3192)

不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素..... 蓝家程,傅瓦利,彭景涛,等 (3205)

农地保护的外部效益测算——选择实验法在武汉市的应用 陈 竹,鞠登平,张安录 (3213)

研究简报

温度、投饵频次对白色霞水母无性繁殖与螅状体生长的影响 孙 明,董 婧,柴 雨,等 (3222)

内蒙古达赉湖西岸地区大鸕巢穴特征和巢址选择..... 张洪海,王 明,陈 磊,等 (3233)

红外相机技术在鼠类密度估算中的应用..... 章书声,鲍毅新,王艳妮,等 (3241)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-05



封面图说: 色季拉山的长苞冷杉和高山杜鹃林——色季拉山高海拔处的植被主要有长苞冷杉、林芝云杉和高山杜鹃等,再高海拔地区则分布有高山灌丛、草甸等。长苞冷杉为我国特有种,属松科常绿乔木,分布于西藏东南部高山地带。树高可达 40m,树皮暗褐色,针叶较短;其球果圆柱形,直立。长苞冷杉的形态独特,与分布区内多种冷杉有密切的亲缘关系,和云杉、杜鹃的分布也彼此交叠。随着色季拉山体海拔的升高,区域气候对于山地土壤从黄壤至棕色森林土、直至高山草甸土的完整发育,以及对森林生态系统类型的形成都产生直接而深刻的影响。

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/stxb201202230246

王耀平, 白军红, 肖蓉, 高海峰, 黄来斌, 黄辰. 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价. 生态学报, 2013, 33(10): 3083-3091.

Wang Y P, Bai J H, Xiao R, Gao H F, Huang L B, Huang C. Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3083-3091.

黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价

王耀平, 白军红*, 肖蓉, 高海峰, 黄来斌, 黄辰

(北京师范大学环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:以黄河口盐地碱蓬湿地为例, 评价了淹水和非淹水区湿地表层土壤 As、Cd、Cu、Cr、Pb 和 Zn 6 种重金属的污染程度及其在土壤-植物系统中的迁移、富集特征, 分析了不同积水深度和土壤理化性质对研究区土壤重金属含量的影响。研究表明, 与土壤或沉积物质量标准相比, 黄河口盐地碱蓬湿地土壤受 As 和 Cd 污染最严重, 而其它重金属污染较轻; 非淹水土壤 Cd、Cr 和 Zn 含量高于淹水湿地, 而 As、Cu 和 Pb 则较低; 而且淹水土壤 As 含量随积水深度增加而呈下降趋势, 但积水深度对其他重金属含量的影响不明显。相关性分析结果表明, 按照受土壤关键影响因子的不同重金属 (除 As 外) 可以分为两类: 第一类为 Cd、Cr 和 Zn, 这些重金属含量受土壤 pH 值和盐分影响较大, 且相互间存在显著正相关关系, 表明它们可能有相同的来源; 第二类为 Pb 和 Cu, 它们受土壤 pH 值、盐分和有机质的影响, 且 Pb 和 Cu 之间存在显著正相关关系。除 Cr、Cu 和 Zn 外, 重金属在盐地碱蓬的根系内一般不发生显著富集, 但绝大多数重金属都表现出地上部分的含量比根系更高的现象。

关键词: 湿地土壤; 植物; 淹水; 非淹水; 重金属含量; 黄河口

Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary

WANG Yaoping, BAI Junhong*, XIAO Rong, GAO Haifeng, HUANG Laibin, HUANG Chen

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The contamination levels of heavy metals (i. e., As, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) and their transport and accumulation in the soil-plant system were assessed for wetland surface soils of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary, and the influences of water depth and soil physico-chemical properties on heavy metal concentrations were also investigated. Our results showed that both As and Cd contamination was more serious according to the guideline values of various soil and sediment quality standards, whereas the soil in this region was slightly contaminated by other heavy metals. The concentrations of Cd, Cr and Zn were higher in non-flooding wetland than those in flooding wetland, whereas the concentrations of As, Cu and Pb were lower. Moreover, As concentration increased with increasing stand water depth in the flooding wetland, while weak influences of stand water depth on other heavy metals were observed.

The relationships between metal concentrations and soil properties were identified using correlation analysis. Significant positive correlations were observed among the concentrations of Cd, Cr and Zn, indicating these three metals might come from similar sources. Moreover, these three metals were significantly positively correlated with soil salinity but negatively correlated with soil pH values. This was probably because ions in sea water affected the concentrations of Cd, Cr, and Zn. On the other hand, Pb and Cu were differently from these three metals, but similarly to each other. The concentration of Cu was negatively correlated with soil salinity and positively pH, while Pb concentration was significantly correlated with that of

基金项目: 国家重点基础研究计划 (2013CB430406); 国家自然科学基金项目 (51179006); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 ((NECT-10-0235); 霍英东教育基金项目 (132009)

收稿日期: 2012-02-23; 修订日期: 2012-09-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: junhongbai@163.com

organic matter.

Generally, these metals were not accumulated in the roots of *Suaeda salsa*, but its accumulation ability was still greater compared to another wetland species (*Spartina alterniflora*). Cu and Zn had the highest enrichment factors compared to other metals. There was medium Cu and Zn accumulation in flooding wetland, and great Cu accumulation in non-flooding wetland. The translocation factor indicated that *Suaeda salsa* had the strongest translocation ability for As and Cu. In general, the aboveground parts of the plant had higher metal concentrations than underground parts. Flooding could influence metal accumulation in plant organs, and it greatly decreased the enrichment factor of Cu and the translocation factor of Cr, whereas greatly increased the translocation factor of As.

Key Words: wetland soil; plants; flooding; non-flooding; heavy metal; Yellow River Estuary

黄河三角洲河口湿地是中国及至世界暖温带唯一一块保存最完整,最典型,最年轻的湿地生态系统;该湿地具有丰富的植物资源,同时也是多种珍稀濒危鸟类的栖息地,因此,黄河三角洲湿地保护和管理一直受到国内外学者的高度关注^[1]。近几十年来,大规模石油开发和农业开垦等高强度人类干扰和气候变化的综合作用已经导致黄河三角洲湿地生态系统出现了一定程度的退化,而重金属污染则是该区湿地退化的一个重要驱动因素^[2]。在河口环境中,污染源排放的重金属可能吸附在悬浮颗粒物上并发生沉积,另一方面,河口区咸淡水混合导致 pH 值和盐份等变化时,水体中的重金属也会通过混凝、絮凝、共沉淀等途径进入沉积物或湿地土壤^[3],湿地土壤/沉积物中累积的部分重金属可被植物根系吸收富集或转移到植物地上部分^[4],从而改变重金属在湿地沉积物中的含量和分布特征并对湿地生产力和生物栖息生境产生不利影响。因此,重金属在湿地土壤-植物系统的迁移转化能够直接影响湿地生态系统的健康及其稳定性。

已有研究表明重金属的迁移转化过程受土壤理化性质^[5]、水文条件^[6]、海水和河水的混合过程等^[7]多种因素的制约。国内学者对黄河三角洲湿地沉积物重金属污染特征进行了系列研究^[8-9],但很少研究涉及河口区沼泽湿地土壤和植物系统中的重金属污染的综合研究,尤其缺乏考虑不同湿地水文条件下湿地土壤-植物系统重金属污染特征方面的研究。本研究对黄河三角洲盐地碱蓬湿地的重金属污染程度进行了评价,对比研究了不同水文条件下(淹水和不淹水)湿地表层土壤中的重金属污染水平及其在土壤-植物系统中的迁移特征,该研究有利于深入剖析重金属在河口区沼泽湿地重金属的生物地球化学过程,可为河口湿地土壤重金属污染防治和退化湿地恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黄河三角洲国家级自然保护区地处北纬 37°40′—38°10′,东经 118°41′—119°16′,位于我国山东省东营市黄河入海口,总面积 15.3 万 hm^2 ,主要分为故道保护区和现行流路保护区两部分。该区属暖温带季风性气候区,具有明显的大陆性季风气候特点,四季分明,冷热干湿界限极明显。研究区年平均气温 12.1 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 196 d,年均降水量 551.6 mm,年均蒸发量为 1962 mm。区域内地势平坦,生态格局时空变异大,形成的湿地类型多样。黄河三角洲湿地土壤形成时间相对较短,机械组成以粉砂为主,土壤质地以轻壤土和中壤土为主,土壤类型以潮土和盐土为主。研究区地下水位较浅,水质矿化度高^[10]。该区天然湿地植被以草本为主,主要植物群落有芦苇 (*Phragmites australis*)、盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*)、荻 (*Triarrhena sacchariflora*) 和穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 等;普遍存在的灌木为柽柳 (*Tamarix chinensis*);天然乔木为旱柳 (*Salix matsudana*),仅在黄河河道两岸少量分布^[11]。

1.2 样品采集与分析

于 2007 年 8 月在黄河三角洲自然保护区内部的入海口附近区域(北纬 37°52′—38°11′,东经 118°41′—119°10′),根据淹水条件不同选择两个典型盐地碱蓬群落分布区:样区 1(非淹水区,主要受较浅的地下水补给)和样区 2(淹水区,受海水潮汐补给),在每个分布区内根据淹水条件划分为 3 个典型样地,样区 1 包括

1-1(干)、1-2(湿)、1-3(过湿);样地2主要包括2-1(淹水1—2 cm)、2-2(淹水5—6 cm)和2-3(淹水8—9 cm)。在每个样地按0—10 cm和10—20 cm两个层次采集土壤样品,每个土层采集3个重复样品并混合为一个混合样,同时利用环刀采集土壤样品用于测定土壤容重和含水量;所有土壤样品带回实验室后,放置阴凉处风干2—3周,去除植物残体和石块,磨碎后过0.149 mm的土样筛后装袋备用。在采集土壤样品时同步采集盐地碱蓬植物样品,3次重复,洗净后分地上和地下两部分,在105℃烘箱内杀青30分钟后再在60℃温度下烘至恒重,磨碎装袋待测备用。

植物和土壤样品在聚四氟乙烯罐内经 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3\text{-HF}$ 高温消解定容后采用原子吸收(法国, JY-ULTMA)进行测定 total phosphorous (TP)、As、Cd、Cu、Cr、Pb 和 Zn 含量;土壤 pH 值和盐分分别采用 pH 计和电导率仪测定(土:水=1:5);土壤含水量在105℃烘箱内烘24小时至恒重;土壤可溶性盐含量采用重量法测定;总氮(Total nitrogen, TN)采用碳氮自动分析仪;土壤有机质(Soil organic matter, SOM)使用重铬酸钾热容量法^[12]。实验土壤基本理化性质如表1。

表1 样地土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of soil in the experiment

样地 Sampling plot	含水率 Water content /%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	孔隙度 Porosity /%	pH 值 pH value	盐分 Salt content /‰	有机质 SOM /(g/kg)
非淹水区 Non-flooding area	26.39	1.83	30.94	8.10	3.07	5.73
淹水区 Flooding area	31.27	1.77	33.21	8.76	0.62	6.52

1.3 数据统计与分析

通过计算 Pearson 相关系数来分析土壤基本理化性质参数间的相关性;运用单因素 ANOVA 分析不同样地或不同土层土壤重金属含量差异的显著性;采用 SPSS12.0 和 Excel 2010 对数据进行数据处理、分析和绘图。

2 结果与讨论

2.1 黄河口盐地碱蓬湿地土壤重金属污染评价

表2表明了黄河口盐地碱蓬湿地两个样区内土壤重金属含量测定值和不同地区的土壤/沉积物质量标准值。由表2可知,非淹水区湿地土壤 Cr($P<0.05$)和 Zn($P<0.01$)含量显著高于淹水湿地土壤,Cu 含量则显著低于淹水湿地土壤($P<0.01$);而两样区间其它重金属含量差异不显著($P>0.05$)

根据国家土壤质量标准,黄河口非淹水区盐地碱蓬湿地土壤样品中 As 和 Cd 含量超过三级标准的分别占83%和67%,而 Cu、Cr、Pb 和 Zn 含量平均值均低于国家土壤质量一级标准,整体低于二级标准,表明非淹水湿地土壤 As 和 Cd 污染严重,而未受到 Cu、Cr、Pb 和 Zn 污染;这与 Bai 等^[2]研究黄河三角洲潮沟湿地土壤重金属污染时所得结论一致。对淹水区湿地而言,土壤样品的 As 含量超过或接近国家土壤质量三级标准,土壤 Cd 含量全部超过国家土壤质量二级标准但均低于三级标准,Cu 含量基本都超过国家土壤质量一级质量标准但低于二级标准,而 Cr、Pb、Zn 基本都低于国家土壤质量一级标准,表明淹水区湿地土壤 As 和 Cd 污染较为严重,Cu 次之,而 Cr、Pb 和 Zn 等未达到污染水平。

基于安大略湖沉积物标准,淹水和非淹水区湿地中50%以上的土壤样品超过了 As 的严重效应水平,而 Cd、Cr、Cu 均超过最低效应水平但未超过严重效应水平,Zn 则未超过最低效应水平。对于 Pb 而言,非淹水区湿地土壤 Pb 含量未超过最低效应水平,而淹水区湿地土壤 Pb 含量则超过最低效应水平但低于严重效应水平。这表明黄河口盐地碱蓬湿地土壤 As 污染严重,Pb、Cd、Cr 和 Cu 也呈现一定程度的污染,而 Zn 含量则未达到污染水平。根据加拿大沉积物质量标准,非淹水区和淹水区湿地中均有50%以上土壤样品超过 As 的阈值效应水平,甚至有个别样地 As 含量超过了可能效应水平。淹水和非淹水区湿地土壤 Cd、Cr、Cu 和 Pb 含量均介于阈值效应水平与可能效应水平之间,而 Zn 含量则都低于阈值效应水平。根据香港沉积物分类标准,淹

水和非淹水区湿地土壤 As 含量均处于化学物质低浓度值和化学物质高浓度值之间或是高于化学物质高浓度值,除非淹水区湿地中 67% 的土壤样品 Cr 含量超过化学物质低浓度值外,研究区湿地土壤所有样品的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量均未超过,表明该区湿地土壤受到一定程度的 As 污染,且非淹水区湿地出现一定程度的 Cr 累积。通过与不同地区的沉积物质量标准进行对比分析发现,非淹水区湿地土壤已经遭受严重的 As 污染和一定程度的 Cd 和 Cr 污染;而淹水区湿地土壤 As 和 Cd 污染严重,并呈现一定程度的 Cu 和 Pb 污染。

表 2 实测重金属含量与标准值对比
Table 2 Measured contents of heavy metals and soil/sediment quality guidelines in different regions

		As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
黄河口湿地土壤实测值/(mg/kg) Measured heavy metal contents in wetland soils of the Yellow River Estuary	非淹水区 Non-flooding wetland	34.09±8.00	1.06±0.19	85.65±13.43 *	24.00±4.34 **	27.74±6.76	87.63±16.18 **
	淹水区 Flooding wetland	36.42±14.12	0.88±0.04	67.94±3.38 *	37.43±2.33 **	33.75±1.85	29.99±2.60 **
国家土壤质量标准/(mg/kg) Chinese environmental quality standard for soils	一级 First class	15	0.2	90	35	35	100
	二级 Second class	20	0.6	350	100	350	300
	三级 Third class	30	1	400	400	500	500
安大略湖沉积物标准 ^[13] /(mg/kg) Ontario sediment quality Guidelines	最低效应水平 Low effect level	6	0.6	26	16	31	120
	严重效应水平 Serious effect level	33	10	110	110	250	820
加拿大沉积物质量标准 ^[14] /(mg/kg) Sediment quality guidelines of Canada	阈值效应水平 Threshold effect level	7.24	0.7	52.3	18.7	3.02	124
	可能效应水平 Potential effect level	41.6	4.2	160	108	112	271
香港沉积物分类标准/(mg/kg) Interim Sediment Quality Values (ISQV) of Hongkong	化学物质低浓度值 ISQV-low	12	1.5	80	65	75	200
	化学物质高浓度值 ISQV-high	42	4	160	110	110	270

* 显著性差异 ($P < 0.05$); ** 极显著性差异 ($P < 0.01$)

2.2 淹水和非淹水区湿地不同积水深度对重金属含量的影响

图 1 显示了黄河口淹水和非淹水区盐地碱蓬湿地土壤重金属含量随积水深度的变化特征。在非淹水区湿地中,除 As 外,较湿的样地 1-2 和 1-3 的土壤重金属含量高于较干的样地 1-1,表明该区积水可能导致重金属在土壤表层发生积累。该区土壤 As、Cd 和 Cr 含量呈表层(0—10 cm) < 亚表层(10—20 cm),而土壤 Cu、Pb 和 Zn 含量则呈表层 > 亚表层的趋势。淹水区湿地土壤 As 含量随积水深度增加而呈下降趋势,且样地 2-1 表层土壤 As 含量低于亚表层土壤,而积水相对较深的样地 2-2 和 2-3 表层土壤 As 含量高于亚表层土壤。但是 3 个样地间和各层土壤间 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu 含量均变化不大,表明除 As 外,淹水积水深度对湿地土壤重金属含量的影响不大。

湿地在淹水条件下形成还原状态,大多数重金属易形成硫化物沉淀,活动性小,从而更容易在表层累积,但是 As 的环境行为与其它重金属相反,不会形成硫沉淀,并且在强还原状态下,还可能被微生物活动转化为 AsH₃ 进入大气^[15],因此积水较深时湿地土壤 As 含量较低。相反,淹水区湿地土壤 pH 值较高(8.76,高于非淹水区 8.10),而 pH 值高于 8 时金属硫化物沉淀的稳定性减弱,因此氧化还原电位的影响减弱^[16],并且淹水区的氧化还原电位会因为涨退潮而发生变化,不会出现永久的还原性条件^[3]。此外,由于淹水区受到潮汐海水的影响,海水对表层沉积物的混合作用导致积水深度的影响不显著。

非淹水区和淹水区湿地土壤重金属含量存在差异(表 2,图 1),可能与湿地淹水状况密切相关。其中,As 含量在各样地间变化较大,受淹水和非淹水条件影响不显著。淹水区湿地土壤中 Cr、Cd 和 Zn 含量显著低于非淹水区湿地($P < 0.05$),但非淹水区湿地土壤中的 Cu、Pb 含量较低。重金属可以与海水中的 Cl⁻ 形成可溶性络合物,使其更容易发生迁移^[17],同时海水中的 Ca、Mg 等离子也会与重金属竞争吸附位点导致解吸^[18]。

Balls 等^[19]和 Gerringa 等^[20]对河口沉积物的研究均发现水体盐度增加时 Cd 会从沉积物和 CdS 沉淀中释放出来。尽管非淹水区湿地土壤盐分含量较高(表 1),但其水分补给主要来自浅层地下水,且地表无积水,限制了金属离子的迁移。因此海水中的离子和潮汐冲蚀可能是导致淹水区湿地土壤 Cd、Cr 和 Zn 含量偏低的原因。

海水中重金属可以被沉积物中的粘土矿物或有机质吸附并富集,或是生成硫化物、碳酸盐化合物等通过沉淀作用进入土壤^[15]。以往研究表明,Pb、Cu 与 Cd、Zn 相比具有更强的有机质的络合能力^[21-22],同时高 pH 值时,由于有机质呈现更强的电负性,也有利于有机质与金属离子结合。本研究中,非淹水区湿地土壤 pH 值和有机质分别为 8.10 和 5.73 g/kg,均低于淹水区湿地(8.76 和 6.52 g/kg)(表 1)。因此,较高的有机质和 pH 值可能是导致淹水区湿地土壤中 Pb、Cu 含量偏高的原因。

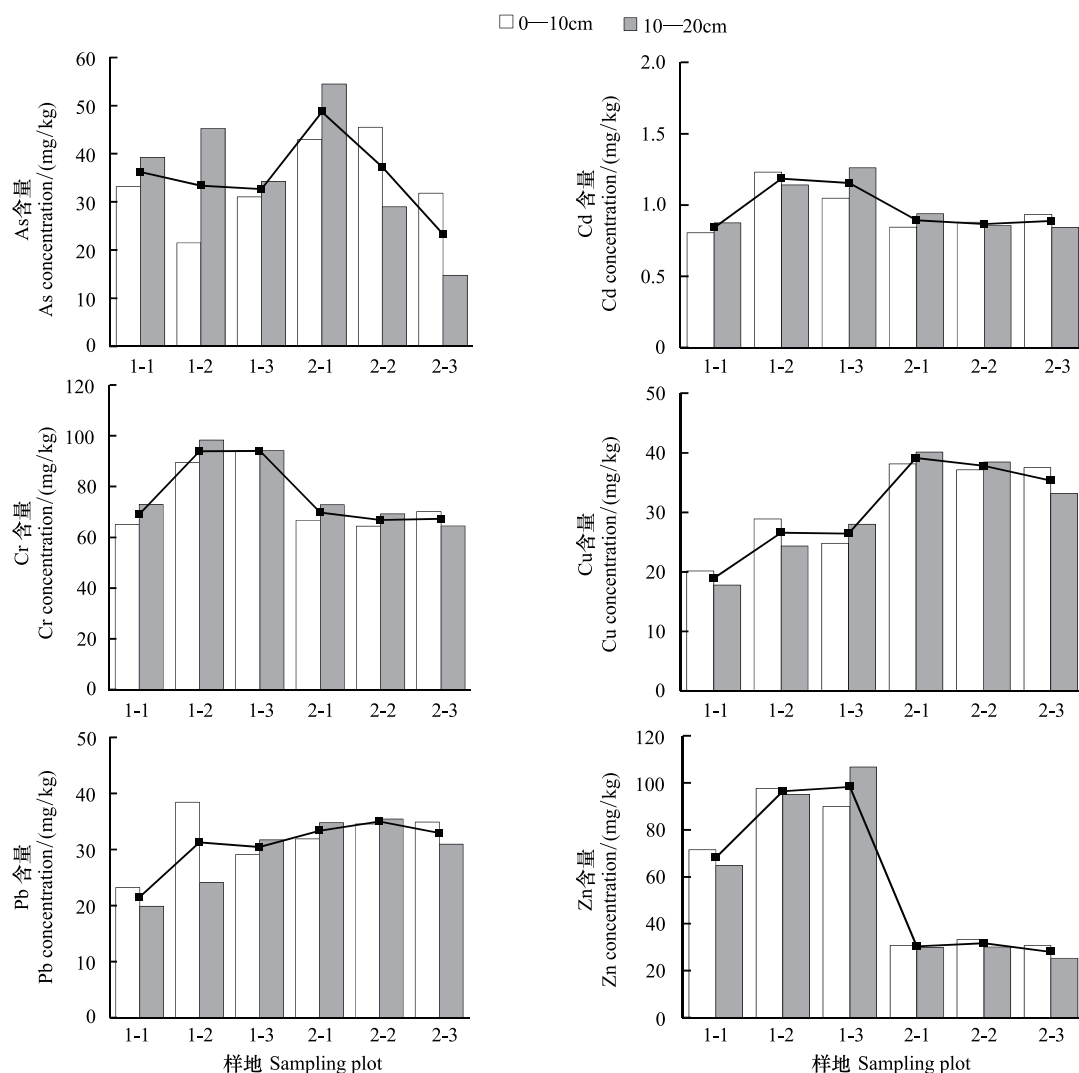


图1 黄河口非淹水区(样地 1-1,1-2,1-3)和淹水区(样地 2-1,2-2,2-3)盐地碱蓬湿地土壤重金属剖面分布(连线表示各样地 0—20cm 平均值)

Fig. 1 Profile distribution of heavy metals in the *Suaeda salsa* wetland in the non-flooding area (1-1,1-2,1-3) and flooding area (2-1,2-2,2-3) in the Yellow River Estuary

2.3 黄河口盐地碱蓬湿地土壤重金属含量与土壤理化性质之间的关系

由表 3 可知,盐地碱蓬湿地土壤盐分和 pH 值呈极显著负相关($P<0.01$),而 TN 和 SOM 呈极显著正相关($P<0.01$),这与丁秋祎等^[11]研究结论一致。Cr、Cd 和 Zn 含量之间具有极显著的相关关系($P<0.01$),说明三者来源和在土壤中的化学行为较为相似^[23]。土壤 Cr、Cd 和 Zn 含量与土壤盐分含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),而与土壤 pH 值呈极显著负相关关系($P<0.01$)。这主要是由于非淹水区湿地地表聚盐导致表层

土壤盐分含量高于淹水区湿地土壤,且限制了重金属的迁移;而在淹水区受海水潮汐的影响,这3种重金属易形成 Cl-络合物而发生迁移^[15]。但是 Lores 等^[24]发现盐度增加会显著降低沉积物有机质对 Cd、Cr 和 Zn 的吸附能力。这可能与淹水条件有关。而高 pH 值既可能导致金属迁移性降低,也可能由于强碱性条件下形成 OH 复合物而导致 Cd、Cr 和 Zn 等重金属的迁移性增加^[25]。Seaman 等^[26]发现碱性条件有利于使稳定的 Cr(Ⅲ)氧化为易迁移的 Cr(Ⅵ)。

除 As 外,有机质与其他重金属均呈正相关关系,但仅与 Pb 的相关性达到显著性水平($P<0.01$),表明该区有机质对重金属的影响不显著。As 与 SOM 呈现出弱的负相关性可能是由于 As 在非酸性土壤条件下,土壤有机质能够促使 As(V)转换为 As(Ⅲ),导致 As 发生迁移和淋滤^[25]。滕葳^[15]报道了 As 不易被土壤有机质吸附,而主要吸附在粘土矿物上。Cu 与土壤 pH 值呈显著的正相关关系($P<0.05$),这是由于 Cu 在弱碱性土壤条件下不易发生迁移,其迁移性随 pH 值下降而增加^[25]。Pb 和 Cu 之间具有显著的正相关关系($P<0.05$),表明二者之间也具有共同的来源和相似的化学行为,尤其是二者与有机质的相关性要明显高于其他重金属。

3.4 盐地碱蓬对湿地土壤重金属的富集和转移

通过植物体内茎叶部分重金属含量与土壤重金属含量之比,可以计算盐地碱蓬对各重金属的富集系数;根据植物地上部分与地下部分的重金属含量之比可计算出植物对重金属的转移系数^[27]。图2表明了黄河口淹水区和非淹水区盐地碱蓬对重金属的富集系数和转移系数。研究得出的河口区盐地碱蓬对重金属的 BCF 与 TF 值均低于高云芳等^[28]报道的黄河三角洲滨海湿地盐地碱蓬的富集系数和转移系数,同时与朱鸣鹤等^[29]报道的辽河潮滩盐地碱蓬对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的富集系数也存在明显的不一致。这可能是由于同一种湿地植物的富集系数和转移系数受采样时间、采样地点等环境因素的影响。

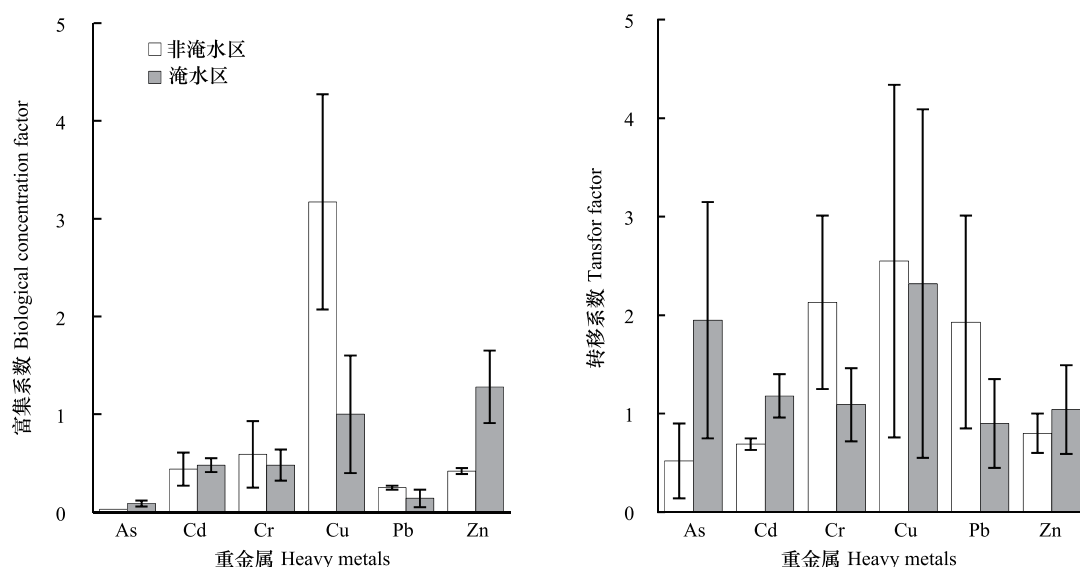


图2 淹水区和非淹水区盐地碱蓬对湿地土壤重金属的富集系数及转移系数

Fig. 2 The biological concentration factor and translocation factor of *Suaeda salsa* to six heavy metals in non-flooding and flooding areas

除非淹水区湿地中的 Cr、Cu 和淹水区湿地中 Zn 外,研究区盐地碱蓬对重金属的富集系数均小于 1,说明重金属未在盐地碱蓬植物体内显著富集。盐地碱蓬对 Cu、Zn 的富集系数高于其它重金属可能是由于 Cu 和 Zn 为生物体必须元素,植物需要大量吸收和消耗这些元素^[30]。

根据 BCF 的大小可以看出,淹水和非淹水区盐地碱蓬对 Cu 具有明显的富集作用,且非淹水区盐地碱蓬的富集作用更强($P<0.01$),这与 Gambrell^[31]的研究结果一致,说明在淹水深度较浅的情况下,湿地植物对 Cu 的吸收可能会增强。淹水区盐地碱蓬对 Zn 的富集作用要强于非淹水区湿地($P<0.01$),这可能与非淹水区湿

地土壤 Zn 含量较高有关(约是淹水区湿地土壤的 3 倍,表 1),因为植物对 Zn 的富集能力会受到土壤中 Zn 含量的影响^[4]。

非淹水区盐地碱蓬对 Cu、Cr 和 Pb 的转移系数大于 2,而对 As、Cd 和 Zn 的转移系数小于 1,表明该区盐地碱蓬对 Cu、Cr 和 Pb 的转移能力较强,能够在植物地上部分发生累积,并可能通过残落物的形式归还土壤^[4]。淹水区盐地碱蓬对 As 和 Cu 的转移系数较大,而对其他重金属的转移系数较小,表明该区盐地碱蓬对 As 和 Cu 具有较强的转移能力;而非淹水区盐地碱蓬对 Cr 和 Pb 的转移能力较强($P < 0.05$),但对 As 的转移能力较弱($P < 0.01$)。其原因在于植物对重金属的转移能力与植物种类、重金属种类和环境条件有关,有些植物在高盐分和低 pH 条件下对重金属的转移能力会增强^[4]。与淹水区湿地相比,非淹水区湿地土壤盐分较高、土壤 pH 较低可能有利于这两种金属从盐地碱蓬地下部分向地上部分转移。与另一种湿地植物互花米草(*Spartina alterniflora*)相比,盐地碱蓬对 Pb、Cr、Cu 和 Zn 重金属的转移系数均较高^[32]。

表 3 黄河口盐地碱蓬湿地土壤重金属和土壤属性的相关性分析

Table 3 Pearson coefficient matrix among heavy metals and selected soil properties of *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary

	含水率 Water content	容重 Bulk density	pH 值 pH value	盐分 Salt content	有机质 SOM	全磷 TP	
含水率 Water content	1						
容重 Bulk density	0.173	1					
pH 值 pH value	0.632 *	-0.210	1				
盐分 Salt content	-0.619 *	0.194	-0.891 **	1			
有机质 SOM	0.296	0.062	0.164	-0.182	1		
全磷 TP	-0.053	-0.233	0.067	0.105	-0.100	1	
全氮 TN	0.470	0.047	0.454	-0.498	0.915 **	-0.097	
As	-0.082	0.104	-0.155	0.102	-0.237	0.320	
Cd	-0.405	-0.074	-0.589 *	0.733 **	0.160	0.064	
Cr	-0.452	0.053	-0.786 **	0.8501 **	0.061	0.169	
Cu	0.352	-0.362	0.692 *	-0.594 *	0.453	0.467	
Pb	0.274	-0.320	0.480	-0.312	0.729 **	0.170	
Zn	-0.419	0.137	-0.795 **	0.827 **	0.056	-0.260	
	全氮 TN	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
含水率 Water content							
容重 Bulk density							
pH 值 pH value							
盐分 Salt content							
有机质 SOM							
全磷 TP							
全氮 TN	1						
As	-0.127	1					
Cd	-0.189	-0.079	1				
Cr	-0.282	0.002	0.905 **	1			
Cu	0.610 *	0.151	-0.228	-0.411	1		
Pb	0.720 **	-0.169	0.197	-0.081	0.809 *	1	
Zn	-0.390	-0.108	0.807 **	0.864 **	-0.719 **	-0.306	1

显著相关($P < 0.05$); * 极显著相关($P < 0.01$); $n = 12$

3 结论

黄河口盐地碱蓬湿地土壤重金属整体污染程度较轻,其中 As 为主要污染物,Cd、Cr、Cu 为次要污染物,Pb 和 Zn 未达到污染水平。淹水区和非淹水区湿地的不同水文条件对土壤和植物中重金属含量有一定的影响。无论是在非淹水区还是淹水区湿地,As 的行为都主要受水深影响,水深增加导致 As 含量下降。对于其它重金属(Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn)而言,在非淹水区土壤积水会导致重金属在土壤表层积累,而在淹水区淹水深

度对土壤表层重金属含量影响不大。研究区域土壤表层 Cr、Cu 和 Zn 含量主要受土壤盐分和 pH 值的影响;除 Pb 外,重金属受有机质含量影响较弱;重金属 Cr、Cu 和 Zn 之间具有显著的相关关系,表明存在共同来源。

盐地碱蓬对重金属的富集和转移受到重金属种类、淹水条件以及土壤重金属含量和理化性质等因素影响。淹水区盐地碱蓬对 Cu 和 Zn 具有相对较强的富集能力,而非淹水区盐地碱蓬只对 Cu 具有最强的富集能力;非淹水区盐地碱蓬对 Cu、Cr 和 Pb 的转移能力较强,而淹水区盐地碱蓬对 As 和 Cu 具有较强的转移能力。除 Cr、Cu 和 Zn 外,重金属在盐地碱蓬的根系内一般不存在显著富集,且绝大多数重金属都表现出地上部分的含量比根系高的现象。

References:

- [1] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y, Bu R C. Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2001, 37(1): 111-120.
- [2] Bai J H, Huang L B, Yan D H, Wang Q G, Gao H F, Xiao R, Huang C. Contamination characteristics of heavy metals in wetland soils along a tidal ditch of the Yellow River Estuary, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(5): 671-676.
- [3] Laing G D, Vandecasteele B, Grauwe P D, Moors W, Lesage E, Meers E, Tacka F M G, Verlooa M G. Factors affecting metal concentrations in the upper sediment layer of intertidal reedbeds along the river Scheldt. *Journal of Environmental Monitoring*, 2007, 9(5): 449-455.
- [4] Weis J S, Weis P. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment International*, 2004, 30(5): 685-700.
- [5] Laing G D, de Vos R, Vandecasteele B, Lesage E, Tack F M G, Verloo M G. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(4): 589-602.
- [6] van den Berg G A, Loch J P G, Winkels H J. Effect of fluctuating hydrological conditions on the mobility of heavy metals in soils of a freshwater estuary in the Netherlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, 102(3/4): 377-388.
- [7] Paucot H, Wollast R. Transport and transformation of trace metals in the Scheldt estuary. *Marine Chemistry*, 1997, 58(1/2): 229-244.
- [8] Guo D Y. Analysis on heavy metals distribution in the Yellow River Delta. *Journal of Environmental Management College of China*, 2007, 17(1): 88-89.
- [9] Ling M, Liu R H, Wang Y, Tang A K, Yu P, Luo X X. The spatial distribution of heavy metals in the soil of *Tamarix chinensis* forest farm in yellow river delta wetland and its ecological significance. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010, (4): 41-46.
- [10] Ding Q Y, Bai J H, Gao H F, Xiao R, Cui B S. Soil nutrient contents in Yellow River delta wetlands with different plant communities. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2092-2097.
- [11] He Q, Cui B S, Zhao X S, Fu H L. Niches of plant species in wetlands of the Yellow River Delta under gradients of water table depth and soil salinity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 969-976.
- [12] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987: 96-104, 132-136.
- [13] Ontario Ministry of Environment and Energy. Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario. (1993-8) [2011-9]. <http://www.ene.gov.on.ca/environ/gp/B1-3.pdf>.
- [14] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1): 20-31.
- [15] Teng W, Liu Q, Li Q, Liu Y B. *Hazards and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination for Agricultural Products*. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 261-297.
- [16] Environmental Protection Agency. Framework for metals risk assessment, Chapter 3. (2007-3-8) [2012-5-31]. <http://www.epa.gov/raf/metalsframework/pdfs/chaper3.pdf>.
- [17] Hahne H C H, Kroontje W. Significance of the pH and chloride concentration on the behavior of heavy metal pollutants Hg(II), Cd(II), Zn(II), Pb(II). *Journal of Environmental Quality*, 1973, 2: 444-450.
- [18] Tam N F Y, Wong Y S. Retention and distribution of heavy metals in mangrove soils receiving wastewater. *Environmental Pollution*, 1996, 94(3): 283-291.
- [19] Balls P W, Laslett R E, Price N B. Nutrient and trace metal distributions over a complete semi-diurnal tidal cycle in the Forth estuary, Scotland. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1994, 33(1): 1-17.
- [20] Gerringa L J A, de Baar H J W, Nolting R F, Paucot H. The influence of salinity on the solubility of Zn and Cd sulphides in the Scheldt estuary.

- Journal of Sea Research, 2001, 46(3/4): 201-211.
- [21] Baeyens W, Goeyens L, Monteny F, Elskens M. Effect of organic complexation on the behaviour of dissolved Cd, Cu and Zn in the Scheldt estuary. *Hydrobiologia*, 1998, 366: 81-90.
- [22] Muller F L L. Interactions of copper, lead and cadmium with the dissolved, colloidal and particulate components of estuarine and coastal waters. *Marine Chemistry*, 1996, 52(3/4): 245-268.
- [23] Callaway J C, Delaune R D, Patrick Jr W H. Heavy metal chronologies in selected coastal wetlands from Northern Europe. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, 36(1): 82-96.
- [24] Lores E M, Pennock J R. The effect of salinity on binding of Cd, Cr, Cu and Zn to dissolved organic matter. *Chemosphere*, 1998, 37(5): 861-874.
- [25] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-a review. *Waste Management*, 2008, 28(1): 215-225.
- [26] Seaman J C, Arey J S, Bertsch P M. Immobilization of nickel and other metals in contaminated sediments by hydroxyapatite addition. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 460-469.
- [27] McGrath S P, Zhao F. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3): 277-282.
- [28] Gao Y F, Li X Q, Dong G C, Liu F, Wang Y N, Ke H. Purification of several salt marsh plants to the coastal wetlands in the estuary of Yellow River. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, 1(10): 53-57.
- [29] Zhu M H, Ding Y S, Zheng D C, Tao P, Ji Y X, Gong W M, Ding D. Accumulation and absorption mechanism about the familiar heavy metals of *Suaeda salsa* in the intertidal zone. *Environmental Pollution and Control*, 2005, 27(2): 84-87.
- [30] Gambrell R P. Trace and toxic metals in wetlands-a review. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5): 883-891.
- [31] Zhu D T, Li M H, Li X. Cycle and enrichment characteristics of *Spartina alterniflora* community on heavy metal elements. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(3): 1203-1205.
- [32] Yang H, Shen Z, Zhu S, Wang W. Heavy metals in wetland plants and soil of lake Taihu, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(1): 38-42.

参考文献:

- [1] 许学工, 林辉平, 付在毅, 布仁仓. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(1): 111-120.
- [8] 郭德英. 黄河三角洲重金属分布状况及分析评价. *中国环境管理干部学院学报*, 2007, 17(1): 88-89.
- [9] 凌敏, 刘汝海, 王艳, 汤爱坤, 于萍, 罗先香. 黄河三角洲怪柳林场湿地土壤重金属空间分布特征及生态学意义. *海洋湖沼通报*, 2010, (4): 41-46.
- [10] 丁秋祎, 白军红, 高海峰, 肖蓉, 崔保山. 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 2092-2097.
- [11] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 付华龄. 水、盐梯度下黄河三角洲湿地植物种的生态位. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 969-976.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 96-104, 132-136.
- [15] 滕葭, 柳琪, 李倩, 柳亦博. 重金属污染对农产品的危害与风险评估. 北京: 化学工业出版社, 2010: 261-297.
- [29] 朱鸣鹤, 丁永生, 郑道昌, 陶平, 吉云秀, 公维民, 丁德文. 潮滩盐沼植物翅碱蓬对常见重金属的累积吸收及其机制. *环境污染与防治*, 2005, 27(2): 84-87.
- [31] 朱丹婷, 李铭红, 李侠. 互花米草群落对重金属元素的循环和富集特征. *安徽农业科学*, 2010, 38(3): 1203-1205.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 10 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Soil and Water Conservation of County Changting, Fujian Province

- Spatiotemporal dynamics of the bare soil cover in the Hetian basinal area of County Changting, China, during the past 35 years XU Hanqiu (2946)
- Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian basinal area of County Changting, Fujian Province, China XU Hanqiu, HE Hui, HUANG Shaolin (2954)
- Dynamic of soil organic carbon pool after restoration of *Pinus massoniana* in eroded red soil area HE Shengjia, XIE Jinsheng, ZENG Hongda, et al (2964)
- RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in County Changting, Fujian Province, China YANG Ranran, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2974)
- Land use changes in a reddish soil erosion region of Southern China: Hetian Basin, County Changting LIN Na, XU Hanqiu, HE Hui (2983)
- Remote-sensing estimate of the carbon storage of subtropical *Pinus massoniana* forest in the Hetian Basin of County Changting, China HUANG Shaolin, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2992)
- Mutation of soil fertility quality in the red eroded area of southern China: A case study in Changting County, Fujian Province CHEN Zhiqiang, CHEN Zhibiao (3002)

Frontiers and Comprehensive Review

- The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO₂ efflux: a review SHEN Zhengtao, SHI Bin, WANG Baojun, et al (3011)
- Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes MA Jianrong, DENG Jianming, QIN Boqiang, et al (3020)

Autecology & Fundamentals

- Characteristics of concentrations and carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon in soil water under varying vegetations in karst watershed LIANG Xuan, WANG Zhijun, YUAN Daoxian, et al (3031)
- The traits of diapause development of overwinter eggs in *Rammeacris kiangsu* Tsai (Orthoptera: Arcypteridae) ZHU Daohong, CHEN Yanyan, ZHAO Qin (3039)
- Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (3047)

Population, Community and Ecosystem

- Avifaunal community structure and species diversity in the Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China WANG Bin, PENG Boyong, LI Jingjing, et al (3056)
- Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains QI Lin, YU Dapao, ZHOU Wangming, et al (3065)
- Community structure and species diversity of fish assemblage in the coastal waters of Jiaozhou Bay XU Binduo, ZENG Huihui, XUE Ying, et al (3074)
- Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary WANG Yaoping, BAI Junhong, XIAO Rong, et al (3083)
- The effects of different original state on grassland community restoration succession YANG Chen, WANG Wei, WANG Shiping, et al (3092)
- Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow WANG Changting, WANG Genxu, LIU Wei, et al (3103)
- Pattern-controlling mechanics of different age classes of *Stellera chamaejasme* population in degraded alpine grassland GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (3114)

- Soil organic carbon pool at the western side of the sygera mountains, southeast Tibet, China MA Heping, GUO Qiqiang, LIU Heman, et al (3122)
- Correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park WANG Yingzi (3129)
- Influences of artificial *Kandelia obovata* mangrove forest rehabilitation on the macrobenthos in Ximen Island HUANG Li, CHEN Shaobo, CHOU Jianbiao, et al (3138)
- Responses of soil microbial properties in soil profile to typical vegetation pattern and slope in karst-cluster depression area FENG Shuzhen, SU Yirong, QIN Xinmin, et al (3148)
- Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (3158)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years ZHAO Liang, LIU Jiping, TIAN Xuezhi (3169)
- Sensitivity analysis of climate control in the Daisyworld model based on system dynamics CHEN Haibin, TANG Haiping (3177)

Resource and Industrial Ecology

- Analysis of key climatic factors influencing on seed cotton yield in cotton-wheat double cropping HAN Yingchun, WAN Guoping, FAN Zhengyi, et al (3185)
- The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation JIANG Lina, YANG Wenbin, LU Qi, et al (3192)
- Dissolution rate under soil in karst areas and the influencing factors of different land use patterns LAN Jiacheng, FU Wali, PENG Jingtao, et al (3205)
- Measuring external benefits of agricultural land preservation: an application of choice experiment in Wuhan, China CHEN Zhu, JU Dengping, ZHANG Anlu (3213)

Research Notes

- Effect of temperature and feeding frequency on asexual reproduction and polyp growth of the scyphozoan *Cyanea nozakii* Kishinouye SUN Ming, DONG Jing, CHAI Yu, LI Yulong (3222)
- The research on *Buteo hemilasius* nest-site selection on the west bank of Dalai Lake in Dalai Lake Natural Reserve ZHANG Honghai, WANG Ming, CHEN Lei, et al (3233)
- Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology ZHANG Shusheng, BAO Yixin, WANG Yanni, et al (3241)

《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

本期责任副主编 高玉葆

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 33 卷 第 10 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 10 (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	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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元