

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 11 期 Vol.32 No.11 **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 11 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子·····	蔡文华, 杨 健, 刘志华, 等 (3303)
基于 B-IBI 指数的温榆河生态健康评价·····	杨 柳, 李泳慧, 王俊才, 等 (3313)
川西亚高山暗针叶林不同恢复阶段红桦、岷江冷杉土壤种子损耗特征·····	马姜明, 刘世荣, 史作民, 等 (3323)
老龄阔叶红松林下层木空间分布的生境关联分析·····	丁胜建, 张春雨, 夏富才, 等 (3334)
内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较·····	张媛媛, 马成仓, 韩 磊, 等 (3343)
角果藜的生长动态及其生殖配置·····	全杜娟, 魏 岩, 周晓青, 等 (3352)
基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林灾害快速评估方法——以贵州省为例·····	侍 昊, 王 笑, 薛建辉, 等 (3359)
祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布·····	姜 林, 耿增超, 李珊珊, 等 (3368)
水分和温度对春玉米出苗速度和出苗率的影响·····	马树庆, 王 琪, 吕厚荃, 等 (3378)
施氮对水稻土 N ₂ O 释放及反硝化功能基因 (<i>narG/nosZ</i>) 丰度的影响·····	郑 燕, 侯海军, 秦红灵, 等 (3386)
中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因·····	曹 雯, 申双和, 段春峰 (3394)
基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究·····	杜加强, 舒俭民, 张林波 (3404)
异速生长法计算秋茄红树林生物量·····	金 川, 王金旺, 郑 坚, 等 (3414)
乌兰布和沙漠沙蒿与油蒿群落的物种组成与数量特征·····	马全林, 郑庆中, 贾举杰, 等 (3423)
不同光强下单叶蔓荆的光合蒸腾与离子累积的关系·····	张 萍, 刘林德, 柏新富, 等 (3432)
浑善达克沙地沙地榆种子雨的扩散规律·····	谷 伟, 岳永杰, 李钢铁, 等 (3440)
咸水灌溉对沙土土壤盐分和胡杨生理生长的影响·····	何新林, 陈书飞, 王振华, 等 (3449)
外源 NO 对 NaHCO ₃ 胁迫下黑麦草幼苗光合生理响应的调节·····	刘建新, 王金成, 王 鑫, 等 (3460)
呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化·····	丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等 (3467)
海南稻田土壤硒与重金属的含量、分布及其安全性·····	耿建梅, 王文斌, 温翠萍, 等 (3477)
江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价·····	陈京都, 戴其根, 许学宏, 等 (3487)
应用稳定同位素研究广西东方洞食物网结构和营养级关系·····	黎道洪, 苏晓梅 (3497)
利用细胞计数手段和 DGGE 技术分析松花江干流部分地区的细菌种群多样性·····	屠 腾, 李 蕾, 毛冠男, 等 (3505)
中国主要入海河流域河口集水区划分与分类·····	黄金良, 李青生, 黄 玲, 等 (3516)
基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力·····	殷 燕, 张运林, 时志强, 等 (3528)
低温胁迫下虎纹蛙的生存力及免疫和抗氧化能力·····	王 娜, 邵 晨, 颜志刚, 等 (3538)
转 Bt 水稻土壤跳虫群落组成及其数量变化·····	祝向钰, 李志毅, 常 亮, 等 (3546)
尼日利亚非洲蜂和安徽意大利蜜蜂及其杂交二代形态特征与微卫星 DNA 遗传多样性·····	余林生, 解文飞, 巫厚长, 等 (3555)
北京城市公园湿地休憩功能的利用及其社会人口学因素·····	李 芬, 孙然好, 陈利顶 (3565)
基于协整理论的经济增长与生态环境变化关系分析——以重庆市渝东南地区为例·····	肖 强, 胡 翀, 肖 洋, 等 (3577)
感潮河网区环境合作博弈模型及实证·····	刘红刚, 陈新庚, 彭晓春 (3586)
专论与综述	
国内外生态效率核算方法及其应用研究述评·····	尹 科, 王如松, 周传斌, 等 (3595)
全球变化背景下的现代生态学——第六届现代生态学讲座纪要·····	温 腾, 徐德琳, 徐 驰, 等 (3606)
问题讨论	
流域环境要素空间尺度特征及其与水生态分区尺度的关系——以辽河流域为例·····	刘星才, 徐宗学, 张淑荣, 等 (3613)
研究简报	
不同光照强度对兴安落叶松几种主要防御蛋白活力的影响·····	鲁艺芳, 石 蕾, 严善春 (3621)
木荷种源间光合作用参数分析·····	熊彩云, 曾 伟, 肖复明, 等 (3628)
基于能值分析的深圳市三个小型农业生态系统研究·····	杨卓翔, 高 阳, 赵志强, 等 (3635)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 342 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 37 * 2012-06



封面图说: 爬升樟木沟的暖湿气流——樟木沟是中国境内横切喜马拉雅山脉南坡的几条著名大沟之一,它位于我国西藏聂拉木县境内的希夏邦马峰东南侧,延绵 5400km 的 318 国道在此沟中到达其最西头。从聂拉木县城到樟木口岸短短的 30km 中,海拔从 4000m 急降至 2000m。在大气环流作用下,来自印度洋的暖湿气流沿樟木沟不断费力地往上爬升,给该沟谷留下了大量的降水。尤其是在雨季到来时,山间到处是流水及悬垂崖头的瀑布,翠峰直插云霄,森林茂密苍郁,溪流碧澄清澈,奇花异葩繁多,风景美如画卷,气势壮丽非凡。

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

DOI: 10.5846/stxb201105080598

陈京都,戴其根,许学宏,仲晓春,郭保卫,郑超,张洪程,许轲,霍中洋,魏海燕. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价. 生态学报, 2012, 32(11): 3487-3496.

Chen Jingdu¹, Dai Qigen^{1,*}, Xu X H, Zhong X C, Guo B W, Zheng C, Zhang H C, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3487-3496.

江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价

陈京都¹, 戴其根^{1,*}, 许学宏², 仲晓春¹, 郭保卫¹, 郑超¹,
张洪程¹, 许轲¹, 霍中洋¹, 魏海燕¹

(1. 扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室/农业部长江流域稻作技术创新中心, 扬州 225009;

2. 江苏省农产品质量检验检测中心, 南京 210036)

摘要: 为了研究江苏省典型区地震带农田土壤和小麦中重金属的污染, 在具有代表性的农田采集收获期小麦及耕层土壤, 分析和评价了土壤和小麦中重金属 Cu、Pb、Cd、Ni、Cr、Hg、As 和 Zn 的含量及污染程度。结果表明, 土壤样品中 Cd、Zn、Pb 的含量均超过江苏省土壤背景值, Cr、Cu、Ni 和 As 分别有 25.64%、97.44%、92.31% 和 92.31% 的土壤样品中超过江苏省土壤背景值, Hg 的含量均在背景值以下; 与国家土壤环境质量标准 (GB15618—1995) 中 II 级标准相比, Cd 的含量均超出标准限值, 其它 7 种重金属元素含量均在标准限值以下。土壤中重金属相关分析表明, Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn、As 具有相同的来源的可能性较大, 而 Hg 与 Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn、As 的来源均不相同。以 NY 861—2004 为评价标准, 小麦籽粒 Pb、Cr、Hg、Ni、As 样品超标率分别为 100%、58.97%、33.33%、10.26%、2.56%, Cu、Zn 和 Cd 没有样品超标, 由此可见小麦籽粒中 Pb 的污染最为严重。采用单因子污染指数法、综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态评价指数法以国家土壤环境质量标准 (GB15618—1995) 和江苏省土壤背景值为参比值, 对农田土壤重金属污染进行评价, 结果显示, 从单项污染指数来看只有 Cd 达到重度污染水平, 其它元素均在安全范围以内, 从综合污染指数来看土壤重金属污染达到中度污染水平, 从潜在生态评价指数法来看, 研究区域表现为很强的生态危害, 并以 Cd 为主要污染因子。

关键词: 典型区; 土壤; 小麦; 重金属; 污染评价

Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province

CHEN Jingdu¹, DAI Qigen^{1,*}, XU Xuehong², ZHONG Xiaochun¹, GUO Baowei¹, ZHENG Chao¹, ZHANG Hongcheng¹, XU Ke¹, HUO Zhongyang¹, WEI Haiyan¹

1 Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 Jiangsu Agro-product Quality Inspection and Testing Center, Nanjing 210036, China

Abstract: The farmland soil was the most main place of the agricultural production, and the quality of soil was the main determinant for the quality and safety of agricultural products, thus it was important to make the quality evaluation of farmland soil before the start of agriculture production. In order to investigate the pollution situation of heavy metals in farmland soil and wheat plants in a seismic belt of typical area in Jiangsu Province, the wheat and the soil of cultivation layer were collected from representative farmlands at harvest. The contents and pollution degree of Cu, Pb, Cd, Ni, Cr,

基金项目: 江苏省农产品质量安全产地适宜性评价; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ11_0983); 国家粮食丰产科技工程 (2011BAD16B03)

收稿日期: 2011-05-08; 修订日期: 2011-12-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qgdai@yzu.edu.cn

Hg, As, and Zn were analyzed and evaluated. The results showed that the contents of Cd, Zn, and Pb in all soil samples were higher than the background values of Jiangsu soil, and the contents of Cr in 25.64% soil samples, Cu in 97.44% soil samples, Ni in 92.31% soil samples, and As in 92.31% soil samples exceeded the background values of Jiangsu soil, while the content of Hg in all soil samples was under the background value of Jiangsu soil. Compared with the Grade II of environmental quality standard for soil (GB 15618—1995), among the elements tested, only the content of Cd in all of the samples exceeded the standard, while all the others were under the standard. Correlation analysis indicated that several heavy metal elements including Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn and As in soil had a greater possibility to have come from the same source, however, Hg rooted in a different source from those elements mentioned above. According to the standards on Foods and Products (NY861—2004), the proportion of wheat grain samples exceeding the standards were 100%, 58.97%, 33.33%, 10.26%, and 2.56% for Pb, Cr, Hg, Ni, and As, respectively, while Cu, Zn and Cd in samples did not exceed the standard, it was demonstrated that the element of Pb was the most serious contaminant in wheat grains. The contents of heavy metal in wheat grain were influenced by the soil heavy metal concentration and other physical and chemical properties of soil as well. It was difficult to assess the pollution situation of heavy metal in soil comprehensively using a single evaluate method. Therefore, in this study, the pollution situation of heavy metals in sampled farmland soil was evaluated against references of national standard limits and background values of Jiangsu province soil through single factor pollution index, synthesizing pollution index and Hakanson' potential ecological evaluation index respectively. The single pollution evaluation result showed that Cd reached severe pollution levels while the other heavy metals were in the security range. Moderate pollution occurred when the method of synthesizing pollution index was used. From the potential ecological evaluation index, we found strong ecological harm in the investigated region with Cd as the main pollution factor.

Key Words: typical area; soil; wheat; heavy metal; pollution evaluation

地震带是指地震集中分布的地带,地球上主要有三大地震带,我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位。台湾地区、西南地区、西北地区、华北地区和东南沿海地区是我国地震带主要分布地区,其中华北地区和东南沿海地区又是我国重要的农业生产地区。地震带地区不断发生的地震会引起地质异常活动从而导致土壤性状发生变化,表现出和其它地质正常地区不同的土壤特征^[1],对农业生产造成影响。

重金属元素是影响农业特别是种植业生产的重要因素之一,关于农业重金属污染国内外进行了大量研究,但研究多集中在重金属对土壤微生物及酶活性的影响^[2-3]、重金属毒害对作物生理生化的影响^[4-5]以及对因工业或交通等人为因素造成重金属污染地区土壤中重金属含量特征进行分析与风险评价^[6-10]等方面。针对地震带地区农田土壤和农作物重金属含量状况的调查主要集中在地震后人员安置,次生地质灾害等短期活动方面^[11-12],长期地震活动作用造成的影响的调查报道很少。因此,本研究选取江苏省历史上曾发生强烈地震,但最近几十年未发生具有破坏性地震的地震带地区作为研究取样地,以江苏省土壤重金属背景值和 GB15618—1995 中 II 级标准作为参考和比较的依据,调查研究地震带地区农田土壤、小麦重金属的含量,评价该区域土壤环境质量和小麦的食用安全性,为地震带地区土壤重金属污染治理以及农产品的合理规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域地处东经 119°2'50"—119°52'9",北纬 34°11'45"—34°38'50",位于江苏省东北部,总面积约 1840 km²。气候属暖温带季风气候,年平均气温为 15 ℃,年降水量 959.4 mm 左右,年均日照总时数 2456.2 h。地势由西向东倾斜,是苏北地区唯一的有山有水的地区,地质环境较为特殊。地貌以平原为主,土壤为近代河流冲击和海相沉积母质发育而成,土层深厚,土质粘重,大部分土壤含有机质,含氮偏低,缺磷、富钾。该地区是

华北地震区的郯城—营口强震带和长江下游—黄海地震带的中间地带,区域内地质构造复杂,历史上曾多次发生中强级以上地震,给该地区造成了严重损失和社会影响。自 1990 年以来,该地区一直是国务院确定的全国地震重点监视防御区,是江苏省中强地震活动频次较高的地区之一。

1.2 样品的采集与分析

本研究选取远离公路、工厂等污染源具有代表性的农田作为取样地点。于小麦收获时期采用 GPS 定位取样,取农田耕层 0—20 cm 处土样,每个取样点以 5 m 对角线采集 5 个点混匀,四分法取样约 1 kg,共采样 39 个。为防止采样过程导致样品污染,采集土壤样品时剔除与金属采样器接触的部分,放入内衬聚乙烯塑料袋的棉布专用样品袋,带回实验室。将土壤样品置于阴凉通风处自然风干,剔除样品中的有机残渣、植物根系及可见侵入体,用木制工具碾碎,过 100 目尼龙筛。在采集土壤同时采集相对应小麦运回实验室,用自来水和去离子水反复清洗,80 ℃ 烘干至恒重,粉碎后过 45 目筛备用,测定籽粒和小麦整株重金属含量。土壤和小麦重金属采用 CEM 密闭微波系统进行消解。Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 采用等离子原子发射光谱光度计测定^[13],As 和 Hg 采用原子荧光光度计测定^[14]。分析所用试剂均为优级纯,水为超纯水。分析过程中加入空白样、平行样和国家标准样品控制试验数据的精度和准确度。土壤 pH 值的测定采用雷兹 PXS-215 型离子酸度计,水土比为 2.5:1。

1.3 评价方法与标准

1.3.1 土壤重金属污染评价方法和标准

土壤重金属污染评价多采用单因子污染指数评价法或多因子综合污染指数评价法(内梅罗指数法)。这些方法考虑了重金属的污染现状,但没有考虑环境因子、土壤生物对重金属的响应特征,更不可能说明区域内重金属可能存在的生态危害效应^[15]。Hakanson 潜在生态评价指数法是根据重金属性质及环境行为特点,从沉积学角度提出来的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法。该方法不仅考虑土壤重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系起来。采用潜在生态评价指数法首先要确定重金属的毒性系数,但是一部分重金属的毒性系数尚未明确,不能全面评价环境重金属的污染状况。因此,本研究采用单因子污染指数法、综合污染指数法和潜在生态评价指数法相结合来评价土壤重金属污染,能更全面的了解和评价重金属污染状况。

采用单因子污染指数法和综合污染指数法^[16-17],以国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)中Ⅱ级标准^[18]为评价标准来评价农田土壤重金属环境污染现状。

单因子指数法是对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价。评价的依据是该污染物的单相污染指数,其计算公式为式:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度; S_i 为污染物的评价标准。

综合污染指数法全面反映了各污染物对土壤的不同作用,突出高浓度污染物对环境质量的影响,是目前国内采用的主要方法之一,计算公式为式:

$$P = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum P_i)^2 + P_{i\max}^2}{2}}$$

式中, P 为土壤污染综合指数; $\frac{1}{n} \sum P_i$ 为土壤中各污染指数平均值; $P_{i\max}$ 为土壤中各污染指数最大值。

单因子污染指数和综合污染指数评价法的分级标准见表 1。

重金属是具有潜在生态危害的污染物,它们能在生物体内富集,成为持久的污染物,造成严重的环境问题。参照 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法对重金属的潜在危害进行评价^[19],计算公式如下:

$$C_f^i = C_i/C_n^i, E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$$
$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot C_f^i$$

式中, C_f^i 、 T_r^i 和 E_r^i 分别为第 i 种重金属污染系数、毒性系数和潜在生态危害系数; C_i 为土壤重金属含量实测值; C_n^i 为参照值; RI 为多种重金属潜在危害指数。重金属参比值采用江苏省土壤重金属含量背景值^[20](表 3)。重金属毒性系数主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度,其评价指标见表 2^[21]。

表 1 土壤重金属污染等级划分标准

Table 1 The criterion of pollution grade of soil heavy metals

分级 Grade	单因子污染指数分级标准 Pollution index criterion of individual factor		综合污染指数分级标准 Comprehensive pollution index criterion	
	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade
1 级 Grade 1	$P_i \leq 1$	清洁	$P \leq 0.7$	安全
2 级 Grade 2	$1 < P_i \leq 2$	轻污染	$0.7 < P \leq 1$	警戒
3 级 Grade 3	$2 < P_i \leq 3$	中污染	$1 < P \leq 2$	轻污染
4 级 Grade 4	$P_i > 3$	重污染	$2 < P \leq 3$	中污染
5 级 Grade 5	—	—	$P > 3$	重污染

表 2 Hakanson 潜在生态危害分级标准

Table 2 Grade standard of Hakanson potential ecological risk

生态危害 Ecological risk	轻微 Slight	中等 Medium	强 Strong	很强 Very strong	极强 Greatly strong
E_r^i	<40	40—80	80—160	160—320	>320
RI	<90	90—180	180—360	360—720	>720

1.3.2 小麦重金属污染评价方法和标准

小麦重金属污染评价标准采用农业部制定的 NY861—2004 作为评价标准^[16](表 3)。

表 3 土壤、小麦重金属污染评价标准

Table 3 The standards for appraisal of soil and wheat heavy metal pollution

重金属 Heavy metal	农田土壤重金属限值/(mg/kg) Heavy metal limits of farmland soil			土壤背景值 Background values of soil /(mg/kg)	谷物重金属限值 Grain heavy metal containing limits /(mg/kg)	毒性系数 Toxicity coefficient
	pH<6.5	6.5—7.5	pH>7.5			
Cu	50	100	100	22.3	10	5
Zn	200	250	300	62.6	50	1
Pb	250	300	350	26.2	0.4	5
Cd	0.3	0.6	1.0	0.13	0.1	30
Cr	150	200	250	77.8	1	2
As	40	30	25	10	0.7	10
Hg	0.3	0.5	1.0	0.29	0.02	40
Ni	40	50	60	26.7	0.3 *	5

* NY861—2004 标准中没有关于镍的规定,因此采用《食品中污染物限量(GB2762—2005)》中关于镍的限制作为镍的评价标准

2 结果与讨论

2.1 农田土壤重金属含量与分析

2.1.1 农田土壤中重金属的含量

土壤样品的重金属含量测定结果的描述性统计分析见表 4。从表 4 可以看出,农田土壤重金属 Cd、Cr、

Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg 等 8 种重金属含量的平均值分别为 1.52、72.99、37.89、30.27、40.58、79.42、16.13、0.03 mg/kg。土壤重金属含量江苏省土壤重金属背景值相比,土壤 Cd、Zn、Pb 的含量均超过江苏省土壤背景值,Cr、Cu、Ni、As 分别有 25.64%、97.44%、92.31%、92.31% 的样品超过江苏省土壤背景值,Hg 的含量均在江苏省土壤背景值以下。可以看出农田土壤中重金属有累积的现象。与国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中Ⅱ级标准相比,只有 Cd 的含量超过标准限制,超标率为 100%,而其它重金属含量均未超过规定限值。

变异系数反映了总体样本中各采样点的平均变异程度,一定区域内重金属含量的变异大小,可以反映该区域内重金属元素的分布和污染程度的差异^[22]。由表 4 可以看出,土壤重金属含量变异系数最大的是 Hg,达到 100.82%,表明土壤中 Hg 的分布差别比较大,其它重金属元素的变异系数都很小,在 9.24%—27.20% 之间,表明土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、As 分布也比较均匀,存在相似的污染程度。

表 4 农田土壤重金属含量及超标率

Table 4 Heavy metal contents in soils and the ratio of samples exceeded standard							
重金属 Heavy metal	重金属含量/(mg/kg) Content of heavy metals			标准偏差 STD	变异系数/% CV	超标率 1 / % Over-limit ratio 1	超标率 2 / % Over-limit ratio 2
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean				
Cd	1.29	2.34	1.52	0.29	18.80	100	100.00
Cr	47.22	85.54	72.99	9.34	12.80	0	25.64
Cu	22.03	51.70	37.89	6.30	16.62	0	97.44
Ni	20.10	33.61	30.27	3.68	12.15	0	92.31
Pb	32.19	44.42	40.58	2.61	6.42	0	100.00
Zn	36.67	95.05	79.42	16.73	21.07	0	100.00
As	0.00	20.91	16.13	4.39	27.20	0	92.31
Hg	0.00	0.14	0.03	0.04	100.82	0	0.00

超标率 1 以国家二级标准为参比值;超标率 2 以江苏省土壤背景值为参比标准

2.1.2 土壤重金属相关分析

同一区域土壤重金属的来源可以是单一的,也可以是多种的,研究土壤重金属全量之间的相关性可以推测出重金属来源是否相同,如果重金属含量有显著的相关性,说明元素之间具有相同来源的可能性大,反之则表示来源不同^[14]。从表 5 可以看出,研究区域内农田土壤各种重金属含量之间普遍表现出正相关关系。Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn、As 相互之间存在极显著的相关性,由此可以初步推断 Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn、As 之间来源相同,可能源于成土母质。Hg 与 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 相关性不显著,表明 Hg 与 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Cd 的来源不同。

表 5 农田土壤重金属元素之间相关分析

Table 5 Correlation analysis between heavy metals in farmland soil								
	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Cd
Cr	1							
Cu	0.858 **	1						
Ni	0.900 **	0.881 **	1					
Pb	0.811 **	0.710 **	0.800 **	1				
Zn	0.902 **	0.912 **	0.928 **	0.709 **	1			
As	0.456 **	0.590 **	0.464 **	0.428 **	0.522 **	1		
Hg	0.221	0.264	0.185	0.174	0.247	0.180	1	
Cd	0.964 **	0.920 **	0.943 **	0.822 **	0.954 **	0.582 **	0.213	1

* 表示在 0.05 水平上相关, ** 表示在 0.01 水平上相关

2.2 小麦重金属含量与分析

2.2.1 小麦中重金属的含量

研究区域内所取得的 39 个小麦样品的重金属含量测定结果的描述性统计分析见表 6 和表 7。从表 6 和表 7 中可以看出,小麦植株和籽粒中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg 等 8 种重金属含量的平均值分别为 0.06 和 0.02 mg/kg、2.10 和 1.19 mg/kg、3.62 和 4.09 mg/kg、0.68 和 0.68 mg/kg、1.67 和 0.63 mg/kg、13.09 和 23.35 mg/kg、0.97 和 0.12 mg/kg、0.01 和 0.02 mg/kg。与植株中的重金属含量相比较,籽粒中的重金属 Cu、Zn 和 Hg 的含量比植株中含量高,其它元素籽粒含量均小于植株含量,表明这 3 种元素较其它元素容易向小麦籽粒中迁移。

表 6 小麦植株中重金属的含量
Table 6 Heavy metal contents in the plant of wheat

重金属 Heavy metal	重金属含量/(mg/kg)			标准偏差 STD	变异系数/% CV
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean		
Cd	0.03	0.10	0.06	0.02	28.73
Cr	0.52	4.83	2.10	0.93	44.46
Cu	2.56	6.89	3.62	0.94	25.83
Ni	0.77	5.32	0.68	1.86	273.63
Pb	1.10	3.21	1.67	0.49	29.11
Zn	9.77	18.33	13.09	1.90	14.54
As	0.00	3.92	0.97	1.25	128.71
Hg	0.00	0.05	0.01	0.01	158.22

2.2.2 小麦籽粒中重金属污染评价

以 NY 861—2004 作为评价标准,籽粒中 Pb 的含量均超过标准限值,Cr、Hg、Ni、As 分别有 58.97%、33.33%、10.26%、2.56% 样品超过标准限值,Cd、Cu、Zn 没有样品超过标准限值(表 7)(NY861—2004 标准中没有关于镍的规定,因此采用《食品中污限量(GB2762—2005)》中关于镍的限值作为镍的评价标准)。由此可见研究区域内小麦重金属污染问题突出,以 Pb 污染最为严重。

表 7 小麦籽粒中重金属的含量及超标率
Table 7 Heavy metal contents in the grain of wheat and the ratio of samples exceeded standard

重金属 Heavy metal	重金属含量/(mg/kg)			标准偏差 STD	变异系数/% CV	超标率/% Over-limit ratio
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean			
Cd	0.01	0.08	0.02	0.01	48.33	0.00
Cr	0.46	2.45	1.19	0.49	41.12	58.97
Cu	3.05	5.19	4.09	0.52	12.70	0.00
Ni	0.23	2.02	0.68	0.50	74.04	10.26
Pb	0.53	0.82	0.63	0.06	9.48	100.00
Zn	17.23	30.88	23.35	3.26	13.95	0.00
As	0.00	0.86	0.12	0.14	116.77	2.56
Hg	0.00	0.08	0.02	0.02	106.37	33.33

2.2.3 小麦中重金属相关分析

土壤酸碱度被认为是影响重金属的最重要因素^[23],影响作物对重金属元素的吸收。相关分析表明,土壤 pH 值和小麦籽粒中重金属 Cu、Ni、Zn、As、Hg 表现出负相关性,其中 Cu 和 pH 值表现出显著的负相关关系,相关系数为-0.365($P < 0.05$)。

从表 8 小麦籽粒与植株中重金属含量的相关分析可以看出,小麦籽粒中 Cd、Cu、Zn、Hg 的含量与植株的

含量表现出极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.744、0.456、0.594、0.455,说明小麦籽粒中重金属 Cd、Cu、Zn、Hg 含量与植株中的含量变化是一致的。小麦籽粒与土壤重金属相关分析可以看出,小麦籽粒中的 Hg 和 Ni 的含量与土壤中的 Hg 和 Ni 含量极显著正相关,相关系数分别为为 0.455 和 0.638,说明籽粒 Hg 和 Ni 的含量受土壤重金属含量影响大。其它重金属相关不显著,说明籽粒中其它重金属主要受土壤中其它因素的影响。籽粒与土壤重金属含量的相关性不同也说明了小麦籽粒对不同重金属的摄收能力不同。

表 8 小麦籽粒与植株、土壤重金属含量以及土壤 pH 的相关分析
Table 8 Correlation analysis between the contain heavy metals of plant and grain and the pH of farmland soil

项目 Project	籽粒重金属 Heavy metal of grain							
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
pH	0.076	0.013	-0.365 *	-0.119	0.055	-0.218	-0.201	-0.014
植株 Plant	0.744 **	0.030	0.456 **	-0.033	-0.276	0.594 **	-0.153	0.455 **
土壤 Soil	0.040	0.062	0.231	0.638 **	-0.046	0.012	-0.144	0.455 **

* 表示在 0.05 水平上相关,* * 表示在 0.01 水平上相关

2.3 农田土壤中重金属污染评价

2.3.1 农田土壤中重金属污染的单因子指数和综合指数

以国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)Ⅱ级标准值作为依据,计算研究区域所取 39 个土壤样品的单项污染指数和综合污染指数。

从表 9 可以看出,农田土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg 的单项污染指数平均值分别为 3.94、0.39、0.44、0.63、0.14、0.33、0.52、0.07。其中 Cd 的单因子污染指数平均值大于 3,属于重污染水平,其它重金属单因子污染指数均小于 1。以国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)中Ⅱ级标准为评价标准计算综合指数,结果显示江苏地质异常地区重金属污染的综合指数为 2.84,变异系数为 32.00%。根据评价标准此地区农田土壤已达到中度污染水平,以 Cd 为主要贡献因子。

表 9 农田重金属污染指数
Table 9 Pollution index of heavy metals in soils

项目 Project	单因子污染指数 Individual factor pollution index								综合指数 Composite index
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	
最小值 Minimum	2.16	0.24	0.23	0.41	0.11	0.15	0	0	1.56
最大值 Maximum	7.68	0.54	0.85	0.82	0.17	0.46	0.69	0.3	5.51
平均值 Mean	3.94	0.39	0.44	0.63	0.14	0.33	0.52	0.07	2.84
标准差 STD	1.27	0.06	0.15	0.09	0.01	0.07	0.15	0.08	0.91
变异系数/% CV	32.31	16.11	34.18	13.67	8.84	21.9	29.15	106.09	32.00

2.3.2 农田土壤中重金属潜在生态危害评价分析

从各个重金属潜在生态危害系数来看(表 10),镉的潜在生态危害系数最高,平均值为 475.78,表现出极强的生态危害程度,最高值为 540.00,最低值为 298.46,变异系数为 13.87%,可以看出镉的生态危害具有相似性。其它重金属 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg 的潜在生态危害系数平均值分别为 1.88、0.24、1.41、0.69、0.50、0.27、4.39、4.83,均表现为轻微生态危害程度,其中 Hg 的变异系数很大,为 100.82% 表明研究区域内农田土壤重金属 Hg 的生态危害变化幅度大。

从潜在生态危害指数来看(表 10),重金属的潜在生态危害指数平均值为 521.75,最大值为 599.60,最小值为 330.75,变异系数为 13.92%,表现为很强的生态危害程度,主要贡献因子是镉。从变异系数可以看出研究区域内生态危害具有相似性。

3 讨论

地震带地区地质异常,地质异常又是一个相当广泛的概念,它泛指在成分上、结构上、成因上以及演化上

与周围地质背景区有显著差异的局部地段^[24],地质异常活动会导致土壤发生变化,表现出和其它地质正常地区不同的土壤特征,杨思治等调查研究表明地震可以引起地震地区土壤的理化性质的改变^[1]。地震带农田土壤重金属含量分析表明,Cd、Zn、Pb、Cu、Ni、As 含量超出江苏省土壤重金属含量的背景值,地震带农田土壤重金属表现出积累的现象,其中以 Cd 的积累现象较为严重,其含量是江苏省土壤背景值 9.92—18.00 倍。

表 10 潜在生态危害系数和危害指数

Table 10 The potential ecological risk factor and index

项目 Project	潜在生态危害系数 E_r^i The potential ecological risk factor E_r^i								潜在生态危害指数 RI The potential ecological Risk index RI
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	
最大值 Maximum	540.00	2.20	11.59	6.29	8.48	1.52	20.91	19.74	599.60
最小值 Minimum	298.46	1.21	4.94	3.76	6.14	0.59	0.00	0.00	330.75
平均值 Mean	475.78	1.88	8.50	5.67	7.74	1.27	16.13	4.79	521.75
标准差 STD	65.98	0.24	1.41	0.69	0.50	0.27	4.39	4.83	72.62
变异系数/% CV	13.87	12.80	16.62	12.15	6.42	21.07	27.20	100.82	13.92

土壤中重金属的含量受成土母质和成土过程的双重影响。有研究表明,土壤中元素的自然含量水平主要取决于成土母质,不同母质中重金属元素含量差异显著^[25]。研究区域的土壤为近代河流冲击和海相沉积母质发育而成,一般研究认为海相沉积母质重金属丰度较其它母质高^[26],相关分析显示土壤重金属 Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn、As 之间存在极显著的相关性,表明重金属元素之间存在的同源性,可能来源于成土母质。因此地震带农田土壤重金属含量与江苏省土壤重金属含量背景值差异可能与成土母质密切相关。在外界重金属来源较多的情况下,包括大气沉降,污水灌溉,工业废渣,城市垃圾和农用化学品等,土壤重金属的含量受外界环境因素影响就会变大。研究区域工业欠发达,属于传统的农业生产区,在选择取样点的时避开了工业区和交通要道,因而重金属主要来源于农业生产中投入农药化肥等生产资料。

研究中发现,虽然土壤中的 Cd 含量超出了标准(GB 15618—1995)规定的限值,但是小麦籽粒中 Cd 的含量却没有超出标准值。土壤中 Pb、Cr 的含量低于标准(GB 15618—1995)限值,所取样品种小麦籽粒中重金属中 Pb 含量却超出标准限制,Cr 也有 58.97% 的样品超出标准限制。土壤中 Pb、Cr 迁移性较差,不易被植物吸收富集^[26],但是本研究区域内小麦籽粒的超标率远远高于易被富集的重金属 Cd,有可能在土壤环境重金属的胁迫下主动吸收,也有可能是土壤环境重金属在土壤其它因素诸如 pH 值、CEC 和有机质等的影响下导致容易被植物富集的有效态重金属含量升高或降低。作物对不同重金属的吸附累积能力也不相同,相关分析也说明了这一点。土壤中 Cr、Hg、Ni、As 含量没有超出标准(GB 15618—1995)限值,但是分别有 58.97%、33.33%、10.26%、2.56% 样品小麦籽粒超过标准限值,出现这种现象可能与小麦品种不同有关,不同小麦品种对重金属的吸收和富集能力不同,导致籽粒中重金属含量的差异^[27]。

4 结论

(1) 与江苏省土壤重金属含量背景值平均值相比,Cd、Zn、Pb 的含量超过江苏省土壤背景值,Cr、Cu、Ni、As 的含量分别有 25.64%、97.44%、92.31%、92.31% 的样品超过江苏省土壤背景值,Hg 的含量均在江苏省土壤背景值以下;与《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中Ⅱ级标准相比,Cd 的含量超过标准限制,其它重金属含量均未超过规定限值。Cd、Cu、Cr、Ni、Pb、Zn、As 之间存在极显著的相关性,表明这些元素之间可能存在同源性。

(2) 以 NY861—2004 作为评价标准,除了 Cd、Cu 和 Zn 以外其它重金属均有不同程度的超标。相关分析表明,籽粒中的 Hg 与土壤中的 Hg 显著正相关,籽粒 Ni 与土壤 Ni 显著负相关,表明研究区域内 Hg 较易从土壤向小麦迁移积累,而 Ni 较难向小麦迁移积累。

(3) 以江苏省土壤重金属含量背景值为评价标准计算综合指数为 228.24,达到重污染水平;以 GB15618—1995 中Ⅱ级标准为评价标准计算出江苏省地质异常地区农田土壤重金属综合污染指数为 2.84,

已达到了中度污染的程度;从潜在生态危害指数来看,重金属的潜在生态危害指数平均值为 521.75,表现为很强的生态危害程度,主要贡献因子是重金属 Cd。

References:

- [1] Yang S Z, Chu D H, Dong J X, Yang J C, Li R X. The influence of earthquakes of Xingtai and Tangshan on the soils in Hebei plain. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1990, 13(2): 83-87.
- [2] Chen Z Y, Min H, Zhang F D, Zhao B Q, Chen Y. Effect of four kinds of heavy metal contamination on denitrifying bacteria in paddy soils. *China Environmental Science*, 2004, 23(6): 1110-1114.
- [3] Lü Q, Chen Z Y, Min H. Effect of heavy metal contamination on the population of sulfate reducing bacteria and the sulfate reducing activity in paddy rice soils. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 399-405.
- [4] Andreu V, Gimeno-García E. Evolution of heavy metals in marsh areas under rice farming. *Environmental Pollution*, 1999, 104(2): 271-282.
- [5] Jung M C, Thornton I. Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea. *The Science of the Total Environment*, 1997, 198(2): 105-121.
- [6] Chen H M, Zheng C R, Zhou D M, Chen Y X. *Behavior of Chemicals in Soil and Environmental Quality*. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] Zhao Q G, Wu Z D. Carried Forward to Meet 21st Century Challenges of Soil Science. *Soils*, 1999, 31(5): 225-230, 243.
- [8] Rodriguez R R, Basta N T, Casteel S W, Armstrong F P, Ward D C. Chemical extraction methods to assess bioavailable Arsenic in soil and solid media. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3): 876-884.
- [9] Huo X N, Li H, Sun D F, Li B G, Zhou L D. Status assessment of heavy metals in Beijing agricultural soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 66-71.
- [10] Qu J, Ma Z Y, Cong Q, Yuan X, Wang L L. Analysis and assessment on the heavy metals pollution in vegetable soil around the transportation skeleton line in molybdenum ore areas. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 178-181.
- [11] Cai Y, Zhang Y, Zhang S H, Wang J B, Song X, Huang A P. Distribution characteristics of Cd, Pb and their influencing factors after earthquake-with example of a disaster area named Xinhuang Village. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(4): 796-801.
- [12] Zhang Y, Cai Y, Zhang S R, Li T, Huang A P. Distribution and evaluation of heavy metals of agricultural soil in typical earthquake disaster area. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2010, 28(3): 339-344.
- [13] Chen Y E, Wang L, Weng Z. Application of ICP-AES and AAS in measuring the contents of heavy metal in bryophytes. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2007, 44(1): 195-198.
- [14] Wang Z J, You H D, Wu Z G. Determination of heavy metals in the traditional Chinese medicines by microwave digestion atomic fluorescence spectrometry. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 2008, 25(5): 388-392.
- [15] Ren H L, Cui B S, Bai J H, Dong S K, Hu B, Zhao H. Distribution of heavy metal in paddy soil of Hani Terrace core zone and assessment on its potential ecological risk. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1625-1634.
- [16] Fu H B, Li Q S, Luo C C, Chen L Y. Heavy metals pollution in the reclaimed tidal flat soils and crops in the Pearl River delta. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1142-1146.
- [17] Wang H, Tian W, Yu M Q, Sun D W, Xu N. Pollution level analysis of heavy metal indexes in free-pollution vegetable producing areas of Changchun suburb. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(2): 190-193.
- [18] China National Environmental Monitoring Center. *The Background Concentrations of Soil Elements in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [19] Guo P, Xie Z L, Li J, Zhou L L. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun city. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 108-112.
- [20] GB 15618—1995 Environmental Quality Standard for Soil. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [21] Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, Zhang C J. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [22] Wang M Q, Zhang M K. Concentrations and chemical associations of heavy metals in urban and suburban soils of the Hangzhou City, Zhejiang Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 603-608.
- [23] Li Y T, Liu K X, Zhang C, Becquer T, Quantin C, Benedtti M, Lavelle P, Dai J. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1110-1114.
- [24] Zhao P D, Chi S D. A preliminary view on geological anomaly. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1991, 16(3):

241-248.

- [25] Zheng G Z. Theory and Practice of Research on Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [26] Kuo S, Lai M S, Lin C W. Influence of solution acidity and CaCl_2 concentration on the removal of heavy metals from metal-contaminated rice soils. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 918-925.
- [27] Adams M L, Zhao F J, McGrath S P, Nicholson F A, Chambers B J. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties. *Journal of Environment Quality*, 2004, 33(2): 532-541.

参考文献:

- [1] 杨思治, 褚达华, 董俊祥, 杨晋臣, 李瑞祥. 邢台、唐山地震对河北平原土壤的影响. *河北农业大学学报*, 1990, 13(2): 83-87.
- [2] 陈中云, 闵航, 张夫道, 赵秉强, 陈义. 4 种重金属污染对稻田土反硝化细菌的影响. *中国环境科学*, 2003, 23(3): 305-310.
- [3] 吕琴, 陈中云, 闵航. 重金属污染对水稻田土壤硫酸盐还原菌种群数量及其活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 399-405.
- [6] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 陈英旭. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 赵其国, 吴志东. 继往开来, 迎接 21 世纪对土壤科学的挑战. *土壤*, 1999, 31(5): 225-230, 243.
- [9] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 李保国, 周连第. 北京市农业土壤重金属状态评价. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 66-71.
- [10] 曲蛟, 马振宇, 丛俏, 袁星, 王莉莉. 钼矿区交通运输干线周边菜地土壤重金属污染分析与评价. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 178-181.
- [11] 蔡艳, 张毅, 张世熔, 汪继兵, 宋旭, 黄爱萍. 地震后土壤 Cd、Pb 分布特征及其影响因素分析——以地震灾区彭州市新黄村为例. *核农学报*, 2010, 24(4): 796-801.
- [12] 张毅, 蔡艳, 张世熔, 李婷, 黄爱萍. 典型地震灾区农业土壤重金属分布特征与评价. *四川农业大学学报*, 2010, 28(3): 339-344.
- [13] 陈洋尔, 王丽, 翁周. ICP-AES 和 AAS 法在苔藓植物重金属含量测定中的应用. *四川大学学报: 自然科学版*, 2007, 44(1): 195-198.
- [14] 王志嘉, 尤海丹, 吴志刚. 微波消解-原子荧光光谱法测定中药材中铅、镉、砷、汞、锑的含量. *沈阳药科大学学报*, 2008, 25(5): 388-392.
- [15] 任华丽, 崔保山, 白军红, 董世魁, 胡波, 赵慧. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险. *生态学报*, 2008, 28(4): 1625-1634.
- [16] 付红波, 李取生, 骆承程, 程连运. 珠三角滩涂围垦农田土壤和农作物重金属污染. *农业环境科学学报*, 2009, 8(6): 1142-1146.
- [17] 王宏, 田卫, 俞穆清, 孙道玮, 徐宁. 长春市城区无公害蔬菜产地土壤中重金属指标污染水平分析. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(2): 190-193.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 郭平, 谢忠雷, 李军, 周琳峰. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价. *地理科学*, 2005, 25(1): 108-112.
- [20] GB 15618—1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [22] 王美青, 章明奎. 杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究. *环境科学学报*, 2002, 22(5): 603-608.
- [23] 李永涛, 刘科学, 张池, Becquer T, Quantin C, Benedtti M, Lavelle P, 戴军. 广东大宝山区重金属污染水田土壤的 Cu、Pb、Zn、Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6): 1110-1114.
- [24] 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常. *地球科学-中国地质大学学报*, 1991, 16(3): 241-248.
- [25] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 11 June, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province	CAI Wenhua, YANG Jian, LIU Zhihua, et al (3303)
The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River	YANG Liu, LI Yonghui, WANG Juncai, et al (3313)
Consume of soil seeds of <i>Betula albo-sinensis</i> and <i>Abies faxoniana</i> in different natural successional stages of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China	MA Jiangming, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3323)
Habitat associations of understorey species spatial distribution in old growth broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) forest	DING Shengjian, ZHANG Chunyu, XIA Fucui, et al (3334)
Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant <i>Caragana</i> species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau	ZHANG Yuanyuan, MA Chengchang, HAN Lei, et al (3343)
Growth dynamics, biomass allocation and ecological adaptation in <i>Ceratocarpus arenarius</i> L.	QUAN Dujuan, WEI Yan, ZHOU Xiaoqing, et al (3352)
A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series; a case study from Guizhou Province	SHI Hao, WANG Xiao, XUE Jianhui, et al (3359)
Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains	JIANG Lin, GENG Zengchao, LI Shanshan, et al (3368)
Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate	MA Shuqing, WANG Qi, LÜ Houquan, et al (3378)
Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (<i>narG/nosZ</i>) and N ₂ O emission in paddy soil	ZHENG Yan, HOU Haijun, QIN Hongling, et al (3386)
Temporal-spatial variations of potential evapotranspiration and quantification of the causes in Northwest China	CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng (3394)
Analysis of ecosystem degradation and recovery using precipitation use efficiency and NDVI in the headwater catchment of the Yellow River basin	DU Jiaqiang, SHU Jianmin, ZHANG Linbo (3404)
An assessment method of <i>Kandelia obovata</i> population biomass	JIN Chuan, WANG Jinwang, ZHENG Jian, et al (3414)
Quantitative characteristics and species composition of <i>Artemisia sphaerocephala</i> and <i>A. ordosica</i> communities in the Ulanbuh Desert ...	MA Quanlin, ZHENG Qingzhong, JIA Jujie, et al (3423)
Photosynthesis and transpiration in relation to ion accumulation in <i>Vitex trifolia</i> under varied light intensity	ZHANG Ping, LIU Linde, BAI Xinfu, et al (3432)
Diffusion of elm seed rain in Otindag Sand Land	GU Wei, YUE Yongjie, LI Gangtie, et al (3440)
Effect of saline water irrigation on sand soil salt and the physiology and growth of <i>Populus euphratica</i> Oliv.	HE Xinlin, CHEN Shufei, WANG Zhenhua, et al (3449)
Regulation of exogenous nitric oxide on photosynthetic physiological response of <i>Lolium perenne</i> seedlings under NaHCO ₃ Stress	LIU Jianxin, WANG Jincheng, WANG Xin, et al (3460)
Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir	DING Xiaohui, LUO Shuzheng, LIU Jinwei, et al (3467)
Concentrations and distributions of selenium and heavy metals in Hainan paddy soil and assessment of ecological security	GENG Jianmei, WANG Wenbin, WEN Cuiping, et al (3477)
Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province	CHEN Jingdu, DAI Qigen, XU Xuehong, et al (3487)
The studies on the food web structures and trophic relationships in Guangxi Dongfang Cave by means of stable carbon and nitro- gen isotopes	LI Daohong, SU Xiaomei (3497)
Analysis of bacterial diversity in the Songhua River based on nested PCR and DGGE	TU Teng, LI Lei, MAO Guannan, et al (3505)

Preliminary delineation and classification of estuarine drainage areas for major coastal rivers in China	HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HUANG Ling, et al (3516)
Estimation of spatial and seasonal changes in phytoplankton primary production in Meiliang Bay, Lake Taihu, based on the Vertically Generalized Production Model and MODIS data	YIN Yan, ZHANG Yunlin, SHI Zhiqiang, et al (3528)
Viability and changes of physiological functions in the tiger frog (<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>) exposed to cold stress	WANG Na, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (3538)
Community structure and abundance dynamics of soil collembolans in transgenic Bt rice paddyfields	ZHU Xiangyu, LI Zhiyi, CHANG Liang, et al (3546)
Morphological characteristics and microsatellite DNA genetic diversity of Nigeria African honey bee, Anhui <i>Apis mellifera</i> and theirs hybrid generation II	YU Linsheng, XIE Wenfei, WU Houchang, et al (3555)
Effects of social-demographic factors on the recreational service of park wetlands in Beijing	LI Fen, SUN Ranhao, CHEN Liding (3565)
Co-integration theory-based analysis on relationships between economic growth and eco-environmental changes: taking the south-east district in Chongqing city as an example	XIAO Qiang, HU Dan, XIAO Yang, et al (3577)
The cooperative environmental game model in the Tidal River Network Regions and its empirical research	LIU Honggang, CHEN Xingeng, PENG Xiaochun (3586)

Review and Monograph

Review of eco-efficiency accounting method and its applications	YIN Ke, WANG Rusong, ZHOU Chuanbin, et al (3595)
Overview on the 6th international symposium on modern ecology series of 2011	WEN Teng, XU Delin, XU Chi, et al (3606)

Discussion

Scale analysis of environmental factors and their relationship with the size of hierarchical aquatic ecoregion: a case study in the Liao River basin	LIU Xingcai, XU Zongxue, ZHANG Shurong, et al (3613)
--	--

Scientific Note

Effects of different light intensities on activities of the primary defense proteins in needles of <i>Larix gmelinii</i>	LU Yifang, SHI Lei, YAN Shanchun (3621)
An analysis of photosynthetic parameters among <i>Schima superba</i> provenances	XIONG Caiyun, ZENG Wei, XIAO Fuming, et al (3628)
Research on three small-scale agricultural ecological-economic systems in Shenzhen City based on emergy analysis	YANG Zhuoxiang, GAO Yang, ZHAO Zhiqiang, et al (3635)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 11 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 11 (June, 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:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, 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:100071 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, 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