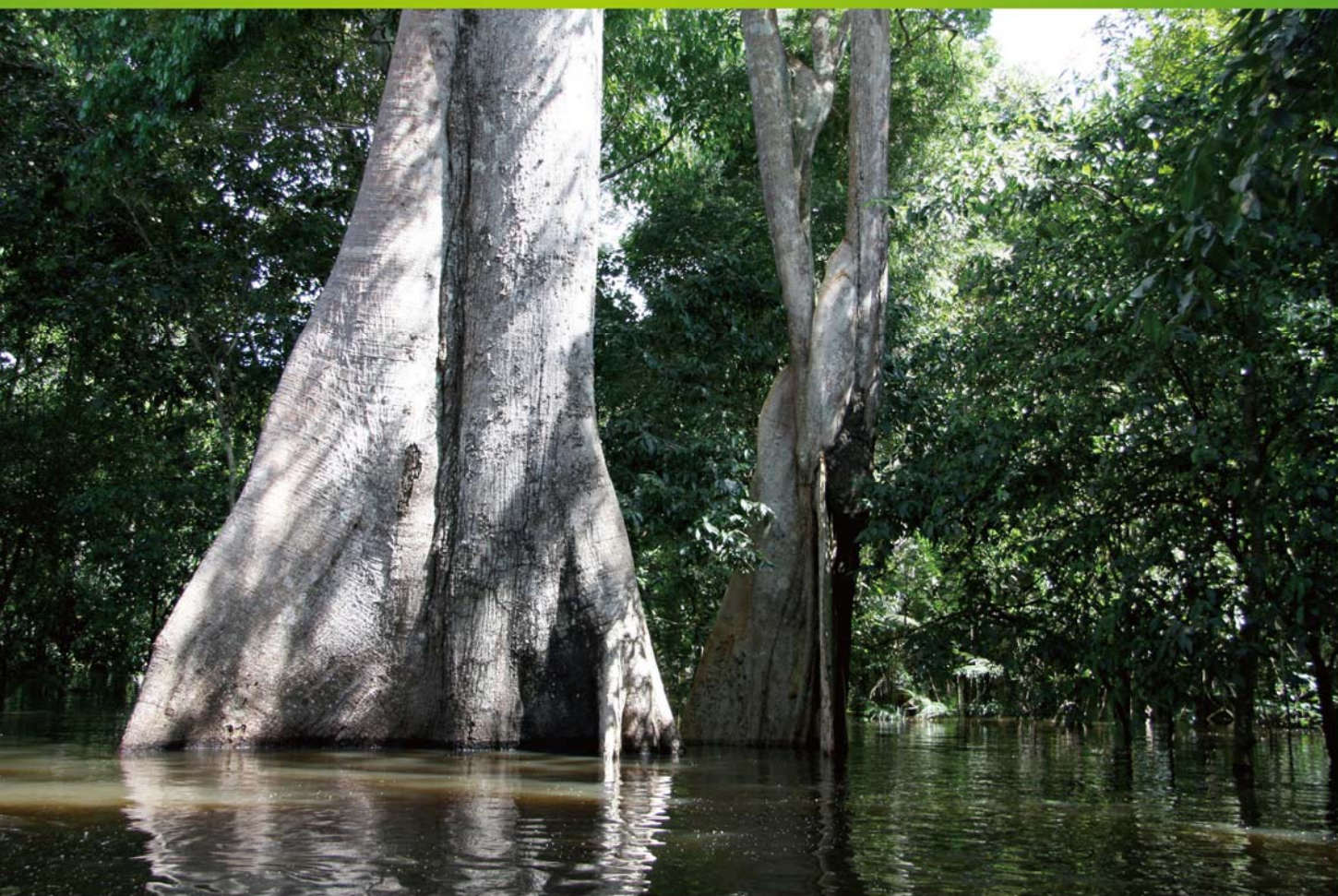


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

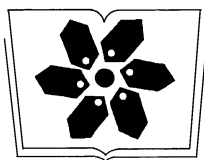
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第8期 Vol.31 No.8 **2011**

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 31 卷 第 8 期 2011 年 4 月 (半月刊)

目 次

塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系·····	安红燕,徐海量,叶 茂,等 (2053)
冲积平原区高程因子对土壤剖面质地构型的影响——以封丘县为例·····	檀满枝,密术晓,李开丽,等 (2060)
臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响·····	王俊力,王 岩,赵天宏,等 (2068)
重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响·····	张桂艳,温小斌,梁 芳,等 (2076)
北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应·····	程瑞梅,封晓辉,肖文发,等 (2086)
亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸·····	李熙波,杨玉盛,曾宏达,等 (2096)
UV-B 辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响·····	宋新章,张慧玲,江 洪,等 (2106)
干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响·····	韩 荣,李 夏,任安芝,等 (2115)
蜜环菌对锌的耐性和富集特性·····	朱 林,程显好,李维焕,等 (2124)
干旱荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛扩展对策·····	张建华,马成仓,刘志宏,等 (2132)
黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响·····	王春阳,周建斌,夏志敏,等 (2139)
内蒙古典型草原克氏针茅与冰草的生存策略·····	孙 建,刘 苗,李胜功,等 (2148)
荒漠沙柳根围 AM 真菌的空间分布·····	贺学礼,杨 静,赵丽莉 (2159)
开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究·····	董文军,邓艾兴,张 彬,等 (2169)
醉马草免培养内生细菌的多样性·····	张雪兵,史应武,曾 军,等 (2178)
河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策·····	贾俊松 (2188)
禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析·····	杨奇勇,杨劲松,余世鹏 (2196)
旋覆花提取物对朱砂叶螨的生物活性及酶活性的影响·····	段丹丹,王有年,成 军,等 (2203)
白洋淀湖滨湿地岸边带氨氧化古菌与氨氧化细菌的分布特性·····	叶 磊,祝贵兵,王 雨,等 (2209)
干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化·····	王 丁,姚 健,杨 雪,等 (2216)
桉树人工林物种多样性变化特征·····	刘 平,秦 晶,刘建昌,等 (2227)
海河流域湿地生态系统服务功能价值评价·····	江 波,欧阳志云,苗 鸿,等 (2236)
芦苇在微咸水河口湿地甲烷排放中的作用·····	马安娜,陆健健 (2245)
云南不同土壤铅背景值下大叶茶种群对铅的吸收积累特征及其遗传分化·····	刘声传,段昌群,李振华,等 (2253)
长江口和杭州湾凤鲚胃含物与海洋浮游动物的种类组成比较·····	刘守海,徐兆礼 (2263)
江西大岗山地区 7—9 月降水量的重建与分析·····	乔 磊,王 兵,郭 浩,等 (2272)
山核桃免耕经营的经济效益和生态效益·····	王正加,黄兴召,唐小华,等 (2281)
基于 GIS 的广州市中心城区城市森林可达性分析·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (2290)
专论与综述	
土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性·····	杨庆朋,徐 明,刘洪升,等 (2301)
植物代谢速率与个体生物量关系研究进展·····	程栋梁,钟全林,林茂兹,等 (2312)
耕地生态补偿实践与研究进展·····	马爱慧,蔡银莺,张安录 (2321)
问题讨论	
元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性·····	刘 洁,李贤伟,纪中华,等 (2331)
研究简报	
中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响·····	胡 坤,喻 华,冯文强,等 (2341)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-04



封面图说:巴西热带雨林——美丽的巴西北部玛瑙斯热带雨林景观。位于南美洲的亚马逊河是世界上流域最广、流量最大的河流,孕育了世界面积最大的热带雨林,雨林中蕴藏着极丰富的生物资源。

彩图提供:中国科学院生态环境研究中心徐卫华博士 E-mail:xuweihua@rcees.ac.cn

中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响

胡 坤^{1,2}, 喻 华¹, 冯文强¹, 秦鱼生¹, 蓝 兰^{1,2}, 廖鸣兰¹, 王昌全², 涂仕华^{1,*}

(1. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066; 2. 四川农业大学资源环境学院, 雅安 625014)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响。结果表明, 在所有测试的元素和施用方法中, 硅酸钠叶面喷施显著增加稻谷产量, 而碳酸钙、硼酸、硅酸钠土施和亚硒酸钠显著降低了稻谷产量。镁、锌、铁的盐酸盐形态对水稻籽粒的增产效果优于硫酸盐形态, 而钙、铜的硫酸盐形态增产效果略高于盐酸盐形态。在钙、镁、硫 3 种中量元素中, 钙增加了水稻籽粒中的 Cd 浓度和吸收量, 而镁和硫则降低了籽粒中的 Cd 浓度和吸收量, 以硫磺粉处理为最低。稻草中的 Cd 浓度和总量均以氯化镁处理为最高, 硫磺粉处理最低。镁能有效抑制 Cd 从秸秆向籽粒的转移, 其盐酸盐优于硫酸盐。在微量元素中, 锌对水稻 Cd 的吸收抑制作用最为显著, 其次是铜, 而有益元素肥料硅酸钠叶面喷施则显著增加了稻谷中的 Cd 浓度和吸收量。硫酸亚铁、氯化锰、氯化铜、硼酸和硼砂处理都能有效地抑制 Cd 从秸秆向籽粒的转移, 而硅酸钠叶面喷施和锌处理则促进了 Cd 的转移, 表明硅酸钠抑制水稻吸收 Cd 的机制很可能发生在土壤中, 而非在植株体内或地上部分。在 Cd 污染土壤上选用适宜的中微量和有益元素肥料及其施用方法, 能有效降低水稻对镉的吸收和稻米中的 Cd 含量。

关键词: 中量元素; 微量元素; 有益元素; 镉; 水稻; 土壤

Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake

HU Kun^{1,2}, YU Hua¹, FENG Wenqiang¹, QIN Yusheng¹, LAN Lan^{1,2}, LIAO Minglan¹, WANG Changquan², TU Shihua^{1,*}

1 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China

2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

Abstract: Cadmium (Cd) is one of the most toxic pollutants in the environment. Agricultural soils in several locations of Sichuan province in China are slightly to moderately contaminated by Cd that creates risk for animal and human health through food chains. Thus, how to minimize Cd uptake by crops and to produce safe agricultural products are highly concerned by the government and the society. Our previous work had examined the effects of macro-nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) on Cd uptake by wheat and rice. It indicated that different forms of these fertilizers do affect Cd uptake by wheat and rice in the ways of enhancement, reduction or no effect. The results encouraged the authors to further research the rest of the plant necessary nutrients and beneficial elements commonly used in agriculture. This study, therefore, aimed to continue examining effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and Cd uptake from a soil moderately contaminated with Cd in a pot experiment. The experiment consisted of twenty one treatments including both sulfate and chloride salts of calcium (Ca), magnesium (Mg), iron (Fe), manganese (Mn), zinc (Zn) and copper (Cu), and elemental sulfur (S), calcium carbonate as a third form of Ca carrier, borax and boric acid as two sources of boron (B), sodium selenite (Se) and sodium silicate (Si) applied into soil or as folia spray. All the treatments repeated four times. The results showed that folia application of sodium silicate significantly increased rice grain yield, while calcium carbonate, boric acid and sodium silicate incorporated into soil significantly reduced rice grain yield. The chloride salts of Mg, Zn and Fe were more favorable to enhance rice grain yield than the sulfate salts of the three elements,

基金项目: 四川省基金项目 (2008NG0002); 国家科技支撑计划项目 (2006BAD02A05)

收稿日期: 2010-04-01; 修订日期: 2010-09-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: stu@ipni.net

while the sulfate salts of Ca and Cu just behaved in an opposite manner. Among the three secondary elements of Ca, Mg and S, Ca enhanced but Mg and S in particular reduced the concentrations and uptake of Cd in grain. In straw, the concentrations and uptake of Cd were minimized by magnesium chloride and S in particular. It was found that Mg retarded transferring Cd from straw to grain, with magnesium chloride more effective than the magnesium sulfate. Among the micro-elements studied, Zn was most effective in blocking Cd uptake by rice, and followed by Cu, while folia application of the beneficial element of Si as sodium silicate topped the all the treatments in concentrations and uptake of Cd in grain. The treatments of ferrous sulfate, magnesium chloride, copper chloride, boric acid and borax effectively depressed but the treatments of Zn and folia application of sodium silicate promoted the transfer of Cd from straw to grain, indicating the mechanism of Si blocking Cd uptake by rice was most likely to occur in soil rather than within plant or in the aboveground portions of the plant. It implies that selecting appropriate forms of secondary, micro- and beneficial elements and using proper application methods could effectively reduce Cd uptake by and Cd content in grain in the Cd polluted soil.

Key Words: secondary element; microelement; beneficial element; cadmium; rice; soil

镉(Cd)是重要的环境污染物之一,它通过食物链进入人体而危害人体健康,严重时可导致高血压、骨痛病、肾功能紊乱、肝损害、肺水肿、贫血等疾病,甚至诱发癌症^[1]。日本的骨痛病就是因为消费者食用了被 Cd 污染的稻米所引起的^[2]。因此,土壤-作物系统中 Cd 污染与迁移已成为国内外环境污染研究的热点之一^[3-4]。土壤中 Cd 形态可分为水溶交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残留态^[5],其中水溶交换态 Cd 是植物吸收的主要来源,生物有效性最高。土壤中 Cd 的生物有效性主要受土壤 pH、有机质、共存离子、水分、温度、矿物组成等因素的影响^[6-11]。

施肥是农业生产中最常见的增产措施,肥料是土壤-植物系统中不可缺少的因素。施肥不仅能为植物提供养分,促进植物生长;同时,肥料进入土壤后改变土壤理化性质,以及与重金属本身发生一系列的作用,从而影响到重金属的生物有效性。适量的添加微肥有助于作物增产,提高作物品质。钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、铁(Fe)、锰(Mn)、硼(B)、锌(Zn)、钼(Mo)和铜(Cu)等元素是植物生长的必需营养元素,硅(Si)和硒(Se)等为植物生长的有益元素。施用这些元素的肥料后是否会影响土壤重金属的生物有效性或毒性,从而影响植物对 Cd 的吸收,除 Ca、Zn、Si、Se 外^[12-16],目前对其他元素的研究鲜见报道,特别是在淹水条件下。为此,本研究采用盆栽试验,探讨了不同中微量元素和有益元素肥料在淹水培养条件对水稻吸收 Cd 的影响,以期 Cd 污染农田区域的合理施肥提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1)供试土壤 采自四川省绵竹市兴隆镇由灰色冲积物发育而成的潜育型水稻土,前茬作物为大麦,采样深度 0—20 cm。土样经去除植物残体,风干、用木槌碎化混匀后作水稻盆栽使用;土壤基础分析样品研磨过 1 mm 筛。土壤基本理化性质分析采用以下方法:土壤 pH 用 pH 计(pHS-4C+)测定,有机质含量用重铬酸钾容量法-外加热法,CEC 采用醋酸铵法,全氮用半微量开氏法,碱解氮用碱解扩散法,土壤速效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃法,有效钾用冷的 2 mol/L HNO₃浸提-火焰光度法,全镉用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄消解,石墨炉原子吸收分光光度计法(novAA400-德国耶拿)测定^[5]。有效镉用 1 mol/L MgCl₂(pH=7)溶液浸提,石墨炉原子吸收分光光度计法(novAA400-德国耶拿)测定。供试土壤的基本理化性质见表 1。该土壤全 Cd 含量为 0.92 mg/kg,属于 Cd 中度污染土壤^[17]。因此,本研究试图探讨在 Cd 中度污染土壤条件下种植水稻的食品安全风险。

(2)供试作物 水稻,品种为 II 优 838,经前期研究筛选出的抗 Cd 污染品种,由四川省绵阳市农科所提供。

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验

试验设 21 个处理,包括不同金属中微量元素的硫酸盐、盐酸盐,非金属微量元素的硼砂和硼酸,硫磺粉、

碳酸钙及有益元素的亚硒酸钠和硅酸钠,每个处理重复 4 次。此外,除不施肥对照外的每一处理都添加了 0.2 g N/kg、0.15 g P₂O₅/kg 和 0.15 g K₂O/kg。氮肥为尿素,磷肥和钾肥分别用磷酸氢二钾和磷酸二氢钾调节用量平衡。所有加入的元素都为分析纯试剂,按照盆在试验的一般做法,肥料用量为一般大田施用量的 2 倍,具体处理及肥料用量见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Some of the selected basic properties of the soil in study

pH	CEC/ /(cmol/kg)	有机质/ OM /(g/kg)	全氮/ Total N /(g/kg)	碱解氮/ Alk-hydr N /(mg/kg)	有效磷/ Avail P /(mg/kg)	有效钾/ Avail K /(mg/kg)	全镉/ Total Cd /(mg/kg)	有效镉/ Avail Cd /(mg/kg)
6.43	15.9	43.3	0.25	166.9	14.4	99.6	0.92	0.36

表 2 不同中微量和有益元素肥料对水稻生长和吸收镉影响的试验设计

Table 2 Experiment design for effects of different fertilizers of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake

元素类别 Element type	处理 Treatment	肥料 Fertilizer used	元素用量*** Element rate/(g/盆)
对照 CK	无肥 (CK0)	0	0
	NPK (CK)	CO(NH ₂) ₂ +K ₂ HPO ₄ +KH ₂ PO ₄	0.2+0.15+0.15
中量元素 Secondary element	CaSO ₄	CK+CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.3
	CaCl ₂	CK+CaCl ₂	0.3
	CaCO ₃	CK+CaCO ₃	0.3
	MgSO ₄	CK+MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.3
	MgCl ₂	CK+MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.3
	S	CK+硫磺粉	2
微量元素 Microelement	FeSO ₄	CK+FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.3
	FeCl ₃	CK+FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.3
	H ₃ BO ₃	CK+H ₃ BO ₃	0.2
	Na ₂ B ₄ O ₇	CK+Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	0.2
	MnSO ₄	CK+MnSO ₄ ·H ₂ O	0.3
	MnCl ₂	CK+MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.3
	CuSO ₄	CK+CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.3
	CuCl ₂	CK+CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.3
	ZnSO ₄	CK+ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.3
	ZnCl ₂	CK+ZnCl ₂	0.3
有益元素 Beneficial element	Na ₂ SiO ₃ (土施 S*)	CK+Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	1.626
	Na ₂ SiO ₃ (叶施 F**)	CK+Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	1.16
	Na ₂ SeO ₃	CK+Na ₂ SeO ₃	0.046

* 土施指硅酸钠在水稻移栽前施入土壤; ** 叶施指硅酸钠在水稻分蘖期和抽穗期按 1.16 g/L 浓度叶面喷施两次; *** 元素用量中,所有中微量和有益元素的用量都施用了 N、P、K 肥用量

称取 8 kg 污染风干土样于盆钵中,按处理准确称取不同肥料,均匀混入土中。灌水并保持盆钵土面 2—3 cm 水层,1 d 后每盆移栽 3 株秧苗。

1.2.2 水稻生长调查和样品采集与测定

水稻生育期中调查水稻分蘖、植株高度,成熟后取样分析水稻有效穗、每穗籽粒数、千粒重、籽粒和秸秆生物量等。用于 Cd 分析的水稻籽粒和秸秆样品,经风干和烘干后,用不锈钢研磨仪研碎,混匀备用。植株样品用体积分数为 4:1 的混合酸 (HNO₃:HClO₄ = 4:1) 消解,然后用石墨炉原子吸收分光光度计法 (novAA400-德国耶拿) 测定镉含量。同时消煮空白和标准样品 (国家标准物质 GBW10010 (GSB-1) 大米成分分析标准物质 (地球物理地球化学勘察研究所 IGGE),回收率为 97.6%—102.8%) 进行质量控制和结果校正。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 DPS3.01 进行有关数据的计算和统计检验。

2 结果与讨论

2.1 不同中微量和有益元素肥料对水稻生长的影响

不同中微量元素和有益元素对水稻生长和产量的影响显著(表3)。除千粒重外,所有施肥处理都比无肥处理显著增加了水稻生长,有效改善了产量构成因素,提高了籽粒产量。在施肥处理中,不同肥料对水稻株高和籽粒千粒重有一定影响,但处理间差异不显著;不同肥料对有效穗、穗粒数、籽粒产量和稻草产量的影响差异明显,达到显著水平。在所有处理中,氯化锰处理的稻草产量为最高,并显著高于对照(CK)。

表3 不同中微量元素和有益元素对水稻生长和生物产量的影响

Table 3 Effects of different secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and yield

元素类别 Element type	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	有效穗 Effective panicles /(穗/盆)	穗粒数 Grains per panicle /(粒/穗)	千粒重 1000-grain weight/g	籽粒干重 Grains yield /(g/盆)	秸秆干重 Straw yield /(g/盆)
中量元素 Secondary element	CK0	99.6 b *	20.3 f	96.0 def	23.7 ab	45.9 g	61.3 e
	CK	101.3 ab	30.3 bc	104.4 abcde	23.1 ab	73.0 bcd	89.8 bc
	CaSO ₄	107.9 ab	30.3 bc	116.7 abc	22.7 ab	72.3 bcd	83.6 cd
	CaCl ₂	108.5 a	26.7 cde	105.8 abcde	24.2 a	67.9 cde	83.7 cd
	CaCO ₃	103.2 ab	21.7 ef	119.4 ab	23.7 ab	61.2 ef	72.5 de
	MgSO ₄	103.1 ab	24.7 def	119.1 ab	23.6 ab	68.4 cde	84.5 cd
	MgCl ₂	108.5 a	27.0 cd	122.1 a	22.9 ab	74.5 bc	94.0 abc
微量元素 Microelement	S	105.2 ab	28.0 cd	107.5 abcde	23.2 ab	69.4 cde	81.5 cd
	FeSO ₄	105.5 ab	28.3 cd	105.0 abcde	23.5 ab	70.0 cde	84.3 cd
	FeCl ₃	107.0 ab	27.0 cd	116.5 abc	23.8 ab	74.2 bc	88.8 bc
	MnSO ₄	106.8 ab	29.7 bcd	112.5 abcd	21.9 b	72.2 bcd	93.5 abc
	MnCl ₂	102.0 a	39.0 a	92.3 ef	22.4 ab	80.1 ab	105.3 a
	CuSO ₄	104.4 ab	27.7 cd	118.7 ab	23.2 ab	74.9 bc	92.5 abc
	CuCl ₂	105.7 ab	28.3 cd	94.8 def	24.2 a	65.2 cde	87.6 bc
	ZnSO ₄	109.4 ab	28.0 cd	101.8 bcde	23.8 ab	67.4 cde	81.7 cd
	ZnCl ₂	102.3 ab	25.7 cde	118.1 abc	22.9 ab	69.4 cde	84.7 cd
	H ₃ BO ₃	106.6 ab	26.0 cde	107.7 abcde	22.6 ab	63.4 def	87.9 bc
有益元素 Beneficial element	Na ₂ B ₄ O ₇	104.9 ab	29.7 bcd	105.9 abcde	23.0 ab	72.0 bcd	88.8 bc
	Na ₂ SiO ₃ (土施 ^①)	106.1 ab	27.3 cd	98.9 cdef	24.0 ab	63.7 def	85.6 cd
	Na ₂ SiO ₃ (叶施 ^②)	103.7 ab	34.0 ab	117.8 abc	22.1 ab	87.9 a	101.1 ab
	Na ₂ SeO ₃	104.2 ab	29. bcd	81.2 f	23.0 ab	54.2 fg	95.2 abc

同列不同小写字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著,①土施指硅酸钠在水稻移栽前施入土壤;②叶施指硅酸钠在水稻分蘖期和抽穗期按 1.16 g/L 浓度叶面喷施两次;元素用量中,所有中微量和有益元素的用量都施用了 N、P、K 肥用量

在中微量元素肥料处理中,氯化锰比 CK 显著增加了水稻有效穗,碳酸钙和硫酸镁则显著降低有效穗,其他处理与对照之间没有显著差异。氯化锰、氯化铜、硅酸钠土施和亚硒酸钠处理比 CK 明显降低了水稻穗粒数,以亚硒酸钠处理为最低,其差异达到显著水平,其余处理与 CK 之间的差异不显著;但硫酸钙、碳酸钙、硫酸镁、氯化镁、三氯化铁、氯化锰、硫酸铜、氯化锌和硅酸钠叶面喷施对增加穗粒数都有明显影响。在籽粒产量上,硅酸钠叶面喷施的增产效果最为显著,碳酸钙、硼酸、硅酸钠土施和亚硒酸钠的减产效果达到显著水平,以亚硒酸钠的产量为最低;其余处理的籽粒产量与 CK 差异不显著。稻草产量显著高于和低于 CK 的分别为氯化锰和碳酸钙处理,其余处理之间差异不显著。

总体来看,在本研究涉及的中微量元素中,镁、锌、铁的盐酸盐形态对水稻的增产效果优于硫酸盐形态,以氯化锰的效果最优;而钙、铜的硫酸盐形态对水稻的增产效果略高于盐酸盐形态;硅酸钠叶面喷施对水稻的增

产效果最佳,高于所有处理,也显著高于硅酸钠土施,这与唐永康和曹一平的研究结果^[18]一致,即叶面喷施硅能提高植物的光合能力,促进水稻的生长,增加水稻的生物量。与 CK 相比,只有 3 个钙盐处理提高了水稻籽粒产量,其中碳酸钙处理的增产效果达到显著水平。施用硫和镁没有增产效果,说明该土壤补缺这两种元素,这也在过去的研究和生产中得了到印证。亚硒酸钠的施用严重影响了水稻的生长和产量,也许是因为本试验的硒肥用量不适合水稻生长。

2.2 不同中微量和有益元素肥料对水稻吸收 Cd 的影响

2.2.1 中量元素对水稻吸收 Cd 的影响

从表 4 看出,中量元素肥料对水稻籽粒 Cd 浓度和吸收量的影响不同。与 CK 相比,仅有碳酸钙处理显著增加了水稻籽粒的 Cd 浓度;同时,碳酸钙比硫酸镁和硫磺粉处理显著增加了籽粒 Cd 吸收总量,CK 与其余施肥处理间差异不显著。在钙、镁、硫 3 种元素中,镁和硫磺粉处理籽粒中的 Cd 含量最低。稻草中的 Cd 浓度与 Cd 总量均以氯化镁为最高,其余处理间 Cd 浓度差异一般不显著;氯化镁处理的 Cd 吸收总量显著高于其他(硫酸镁除外)处理。从不同中量元素来看,籽粒中的 Cd 都是钙盐处理明显高于镁和硫,而稻草中却是镁肥处理高于钙和硫;籽粒和稻草中 Cd 的浓度与吸收总量都是硫磺粉处理最低。就硫酸盐与盐酸盐来看,盐酸盐处理水稻籽粒和稻草中的 Cd 明显高于其硫酸盐;从 Cd 在稻草和稻谷子粒中的分配来看,稻草中的 Cd 浓度和总量都远高于稻谷。这些结果说明,秸秆可能是水稻 Cd 的主要储存器官或过滤器,若能采取特定措施使 Cd 滞留/沉淀在秸秆中,就会有效减少 Cd 向稻米中的转移,降低籽粒的 Cd 吸收量。与无肥相比,施肥处理一般都显著增加了水稻秸秆中的 Cd 含量和吸收量,其中氯化镁增幅最大为 94.6% 和 103.5%。与 CK 相比,中量元素都能在一定程度上阻止 Cd 从秸秆向籽粒转移,以镁的效果最佳,其阻止效果为盐酸盐优于硫酸盐。

表 4 中量元素对水稻吸收 Cd 的影响

Table 4 Effects of secondary elements on cadmium uptake by rice

处理 Treatment	籽粒 Seed		秸秆 Straw		籽秆 Cd 比例 Cd in grain/ Cd in straw
	Cd 浓度 Cd content /(mg/kg)	Cd 吸收量 Cd uptake /(μg/盆)	Cd 浓度 Cd content /(mg/kg)	Cd 吸收量 Cd uptake /(μg/盆)	
CK0	0.0126 b	0.58 c	0.0471 b	2.89 c	0.20 a
CK	0.0131 b	0.96 ab	0.0502 b	4.51 bc	0.21 a
CaSO ₄	0.0141 ab	1.02 ab	0.0662 ab	5.53 bc	0.18 ab
CaCl ₂	0.0155 ab	1.05 ab	0.0732 ab	6.13 b	0.17 ab
CaCO ₃	0.0182 a	1.11 a	0.0771 ab	5.59 bc	0.20 a
MgSO ₄	0.0123 b	0.84 b	0.0753 ab	6.36 ab	0.13 ab
MgCl ₂	0.0125 b	0.93 ab	0.0977 a	9.18 a	0.10 b
S	0.0122 b	0.84 b	0.0620 ab	5.05 bc	0.17 ab

虽然该试验使用的土壤全 Cd 含量已达到中度 Cd 污染程度,但所有肥料处理水稻籽粒的 Cd 含量均低于国家规定的安全限量值(0.1mg/kg),这与本试验采用水稻品种为过去筛选出的抗 Cd 污染品种有关。淹水条件下硫在还原层被还原成 S²⁻并与 Cd²⁺形成 CdS 而降低 Cd 的有效性,其效果随用量增加而增加,这可能是本试验中的硫磺粉和硫酸盐都能在一定程度上降低水稻中 Cd 含量和吸收总量的原因。在通常情况下,土壤 Cd 的有效性与 pH 呈负相关,即 Cd 的有效性随土壤 pH 增加而降低。但本试验中出现了施用碳酸钙后水稻籽粒中 Cd 浓度和总量最高的情况,其原因有待研究。

2.2.2 微量元素和有益元素对水稻吸收镉的影响

不同微量和有益元素肥料对水稻籽粒 Cd 含量和吸收量的影响存在明显的差异(表 5)。与 CK 相比,硅酸钠叶面喷施明显增加了稻谷中的 Cd 浓度和吸收量,而硫酸锌、亚硒酸钠和硅酸钠土施则显著降低了稻谷中的 Cd 浓度和吸收量,其它处理之间差异不显著;无肥处理对稻谷的 Cd 浓度和吸收量没有显著影响。硫酸

亚铁处理稻草中的 Cd 浓度和吸收量最高,显著高于 CK,而两种锌肥,硅酸钠的两种施用方法和亚硒酸钠处理都比 CK 显著降低了稻草中 Cd 的浓度和吸收量,其他处理间的差异不显著。从 Cd 在籽粒和秸秆中的分配比例来看,硅酸钠叶面喷施处理 Cd 的籽/秆比值最大,硫酸亚铁和硼酸处理最小,其高低顺序依次为:硅酸钠叶施>氯化锌>硫酸锌>硅酸钠土施>亚硒酸钠>氯化铁>硫酸铜>硫酸锰>氯化铜>硼砂≈氯化锰>硫酸亚铁≈硼酸。这些结果说明了硫酸亚铁和硼酸处理在一定程度上抑制了 Cd 从秸秆向籽粒的转移,而硅酸钠叶面喷施和锌处理则促进了 Cd 的转移,硅酸钠叶面喷施对 Cd 从秸秆向籽粒的转移效率比土施约高 1 倍。

表 5 微量元素和有益元素对水稻吸收镉的影响

Table 5 Effect of micro- and beneficial elements on cadmium uptake by rice

处理 Treatment	籽粒 Seed		秸秆 Straw		籽秆 Cd 比例 Cd ratio: 籽/秆
	Cd 浓度 Cd content /(mg/kg)	Cd 吸收量 Cd uptake /(μg/盆)	Cd 浓度 Cd content /(mg/kg)	Cd 吸收量 Cd uptake /(μg/盆)	
CK0	0.0126 abcd	0.58 cdef	0.0471 be	2.89 e	0.20 cd
CK	0.0131 abc	0.96 abc	0.0502 bc	4.51 abcde	0.21 cd
FeSO ₄	0.0123 abcde	0.86 bcd	0.0727 a	6.13 a	0.14 cd
FeCl ₃	0.0138 ab	1.02 ab	0.0497 bc	4.42 bcde	0.23 cd
MnSO ₄	0.0128 abcd	0.93 abc	0.0488 bc	4.57 abcde	0.20 cd
MnCl ₂	0.0105 abcde	0.84 bcde	0.0520 abc	5.48 abc	0.15 d
CuSO ₄	0.0105 abcde	0.79 bcdef	0.0411 c	3.80 cde	0.21 cd
CuCl ₂	0.0088 bcde	0.57 cdef	0.0421 c	3.68 de	0.16 cd
ZnSO ₄	0.0078 de	0.52 def	0.0092 d	0.75 f	0.70 b
ZnCl ₂	0.0111 abcde	0.77 bcdef	0.0116 d	0.98 f	0.78 b
H ₃ BO ₃	0.0128 abcd	0.81 bcde	0.0643 ab	5.65 ab	0.14 d
Na ₂ B ₄ O ₇	0.0096 bcde	0.69 bcdef	0.0534 abc	4.74 abcd	0.15 cd
Na ₂ SiO ₃ (土施)	0.0074 e	0.47 ef	0.0085 d	0.73 f	0.65 b
Na ₂ SiO ₃ (叶施)	0.0150 a	0.81 a	0.0069 d	0.66 f	1.23 a
Na ₂ SeO ₃	0.0082 cde	0.44 f	0.0097 d	0.92 f	0.48 bc

与中量元素的硫酸盐和盐酸盐不同,由于微量元素用量较小,其硫酸盐没有表现出比盐酸盐降低水稻对 Cd 吸收的明显优势。在本试验使用的 4 种金属微量元素中,锌对水稻 Cd 的吸收抑制作用最为显著,其次是铜。这可能归因于 Zn 与 Cd 是化学性质相近的 2 个元素,在土壤化学反应和作物吸收方面具有一定的拮抗作用,特别是在土壤低 Cd 浓度时 Zn 与 Cd 拮抗作用更为明显^[19]。虽然旱作条件下土壤中的有效 Cd 含量随着铁锰氧化物加入量的增加而降低^[20],但在淹水条件下,土壤中大量的铁/锰氧化物被还原成 Mn²⁺和 Fe²⁺,因而加入的 Mn²⁺和 Fe²⁺对土壤 Cd 有效性的影响比 Zn²⁺和 Cu²⁺小。硅酸钠的 2 种施用方法对水稻吸收 Cd 的显著差异具有重要的意义。硅酸钠土施显著降低了水稻对 Cd 的吸收,而硅酸钠叶面喷施却显著增加了水稻对 Cd 的吸收,这揭示了硅对 Cd 吸收的拮抗机制主要发生在土壤中,即 Cd 进入水稻根系之前。一旦 Cd 进入植株体内,通过地上部分吸收的硅虽能显著增加水稻产量,但不影响 Cd 的吸收产生任何抑制作用,反而还促进水稻对 Cd 的吸收,并增加 Cd 从秸秆向籽粒的转移。因此,Cd 污染土壤上硅肥的正确使用方法应为土施。土壤施用硅肥比不施硅肥能增加铁锰氧化物结合的镉,并显著降低玉米木质部汁液中的 Cd 含量,从而降低玉米和水稻地上部分 Cd 的吸收量,硅抑制 Cd 的毒害^[21-24]。由于作物叶面喷施硅肥后,硅是通过叶面直接进入植物体内,既没有发生相应的土壤反应,也没有产生抑制 Cd 通过木质部向上转移的效果,这可能是叶面喷施硅肥增加了水稻产量,但促进了 Cd 吸收的原因。但这需要后续研究进一步证实。硼酸与四硼酸钠分别为硼的酸性和碱性化合物,两者都在一定程度上比 CK 降低了水稻籽粒中的 Cd 浓度和吸收量,但差异未达到显著水平;在抑制 Cd 从秸秆向籽粒转移上,二者的作用则非常明显。在旱作条件下,亚硒酸盐能降低对土壤 Cd 的有效性和作物吸收^[15-16],在本淹水培养试验中也观察到了这一现象。

3 结论

在本研究中,镁、锌、铁的盐酸盐形态对水稻籽粒的增产效果优于硫酸盐形态,以氯化锰的增产效果最优;而钙、铜的硫酸盐形态增产效果略高于盐酸盐形态;硅酸钠叶面喷施对水稻的增产效果最佳,高于所有处理;而碳酸钙、硼酸、硅酸钠土施和亚硒酸钠显著降低了籽粒产量,以亚硒酸钠处理的产量为最低。在钙、镁、硫 3 种中量元素中,钙增加了水稻籽粒中的 Cd 浓度和吸收量,而镁和硫则降低了籽粒中的 Cd 浓度和吸收量,以硫磺粉处理为最低。稻草中的 Cd 浓度和总量均以氯化镁处理为最高,硫磺粉处理最低。镁能有效抑制 Cd 从秸秆向籽粒的转移,盐酸盐优于硫酸盐。在微量元素中,锌对水稻 Cd 的吸收抑制作用最为显著,其次是铜,而有益元素肥料硅酸钠叶面喷施则显著增加了稻谷中的 Cd 浓度和吸收量。硫酸亚铁、氯化锰、氯化铜、硼酸和硼砂处理能有效地抑制 Cd 从秸秆向籽粒的转移,而硅酸钠叶面喷施和锌处理则促进了 Cd 的转移。该试验结果认为,硅酸钠抑制水稻吸收 Cd 的机制很可能发生在土壤中,而非在植株体内或地上部分。尽管土壤中 Cd 的全量(0.92 mg/kg)已达到中度污染程度,但稻米中的 Cd 含量均远远低于食品 Cd 污染限量标准,表明采用 Cd 抗性品种是解决稻米 Cd 污染的最有效的措施,优化的施肥技术也能有效降低稻米中的 Cd 含量。

References:

- [1] Basta N T, Raun W R, Gavi F. Wheat grain cadmium under long-term fertilization and continuous winter wheat production. *Better Crops*, 1998, 82(2): 14-15.
- [2] Chen H M. Yield and mineral concentration of rice as affected by the content of Cd, P and Zn in soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1985, 22(1): 85-92.
- [3] Wu Z H, Zhang Y F, Wang X R, Hu X. Application of gene technology in phytoremediation for contaminated soil by heavy metals. *Agroenvironmental Protection*, 2002, 21(1): 84-86.
- [4] Zhao Z Q, Zhu Y G, Cai Y L. Transport and transformation of cadmium in soil-plant systems and the influence factors. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 282-286.
- [5] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [6] Sukreayapongse O, Holm P E, Strobel B W, Panichsakpatana S, Magid J, Hansen H C. pH-dependent release of cadmium, copper, and lead from natural and sludge-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(6): 1901-1909.
- [7] Appel C, Ma L. Concentration, pH and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(2): 581-589.
- [8] Yang Z F, Chen Y L, Qian X, Guo L, Chu H Y. A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 252-260.
- [9] Zhang Y L, Shen Q R, Jiang Y. Effects of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 212-218.
- [10] Shuman L M. Effect of organic waste amendments on cadmium and lead in soil fractions of two soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29(19/20): 2939-2952.
- [11] Zhu Y G, Zhao Z Q, Li H Y, Smith S E, Smith F A. Effect of zinc-cadmium interactions on the uptake of zinc and cadmium by winter wheat (*Triticum aestivum*) grown in pot culture. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 71(6): 1289-1296.
- [12] Alvarez-Ayuso E. Cadmium in soil-plant systems: an overview. *International Journal of Environment and Pollution*, 2008, 33(2/3): 275-291.
- [13] Makino T, Kamiya T, Takano H, Itou T, Sekiya N, Sasaki K, Maejima Y, Sugahara K. Remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: Verification of on-site washing. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1): 112-119.
- [14] Landberg T, Greger M. Influence of selenium on uptake and toxicity of copper and cadmium in pea (*Pisum sativum*) and wheat (*Triticum aestivum*). *Physiologia Plantarum*, 1994, 90(4): 637-644.
- [15] Issa A, Adam M S. Influence of selenium on toxicity of some heavy metals in the green alga *Scenedesmus obliquus*. *Folia Microbiologica*, 1999, 44(4): 406-410.
- [16] Skopíková A, Králová K, Masarovicová E. Effect of cd-se interference on cadmium and selenium bioaccumulation in pea seedlings. *Proceedings of ECOpole*, 2008, 2(1): 135-139.

- [17] Nanjing Institute of Environment Science, the Ministry of Environmental Protection. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [18] Tang Y K, Cao Y P. Effects of spraying different forms of silicon(Si) on growth and stress resistance of rice plant. *Soils and Fertilizers*, 2003, (2): 16-22.
- [19] Zasoski R J, Burau R G. Sorption and sorptive interaction of cadmium and zinc on hydrous manganese oxide. *Soil Science Society of American Journal*, 1988, 52: 81-87.
- [20] Hou X, Wang Z W. Influence of Fe-Mn oxides in contaminated soil on bio-availability and effective form of Cd. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2313-2317.
- [21] Qin S Q, Huang Q H. Effect of silicon on rice absorbed cadmium. *Environmental Protection of Xinjiang*, 1997, 19(3): 51-53.
- [22] Yang C G, Dou H, Liang Y C, Lou Y S. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1): 116-121.
- [23] Liang Y, Wong J W, Wei L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, 2005, 58(4): 475-483.
- [24] Nwugo C C, Huerta A J. Silicon-induced cadmium resistance in rice (*Oryza sativa*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 841-848.

参考文献:

- [2] 陈怀满. 土壤中 Cd、P、Zn 含量对水稻产量和植株中矿物浓度的影响. *土壤学报*, 1985, 22(1): 85-92.
- [3] 武正华, 张宇峰, 王晓蓉, 胡忻. 土壤重金属污染植物修复及基因技术的应用. *农业环境保护*, 2002, 21(1): 84-86.
- [4] 赵中秋, 朱永官, 蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及影响因素. *生态环境*, 2005, 14(2): 282-286.
- [8] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鏺, 郭莉, 诸惠燕. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究. *地质前缘*, 2005, 12(1): 252-260.
- [9] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应. *土壤学报*, 2001, 38(2): 212-218.
- [17] 国家环境保护局南京环境科学研究. GB 15618—1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] 唐永康, 曹一平. 喷施不同形态硅对水稻生长与抗逆性的影响. *土壤肥料*, 2003, (2): 16-22.
- [20] 侯秀, 王祖伟. 铁锰氧化物添加对土壤镉有效态及生物效应的影响. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2313-2317.
- [21] 秦淑琴, 黄庆辉. 硅对水稻吸收镉的影响. *新疆环境保护*, 1997, 19(3): 51-53.
- [22] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 娄运生. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(1): 116-121.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 8 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The relationship between <i>Populus euphratica</i> 's radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (2053)
Influence of elevation factor on soil profile texture configuration: a case study of the alluvial plain of Fengqiu County	TAN Manzhi, MI Shuxiao, LI Kaili, et al (2060)
Effects of ozone on AsA-GSH cycle in soybean leaves	WANG Junli, WANG Yan, ZHAO Tianhong, et al (2068)
The effects of physical and chemical factors on the growth and lipid production of <i>Chlorella</i>	ZHANG Guiyan, WEN Xiaobin, LIANG Fang, et al (2076)
Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in North Subtropical Region	CHENG Ruimei, FENG Xiaohui, XIAO Wenfa, et al (2086)
Soil respiration of <i>Zoysia matrella</i> turfgrass in subtropics	LI Xibo, YANG Yusheng, ZENG Hongda, et al (2096)
Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of <i>Pinus massoniana</i>	SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, JIANG Hong, et al (2106)
Physiological ecological effect of endophyte infection on <i>Achnatherum sibiricum</i> under drought stress	HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, et al (2115)
Zinc Tolerance and Accumulation Characteristics of <i>Armillaria mellea</i>	ZHU Lin, CHENG Xianhao, LI Weihuan, et al (2124)
Expansion strategies of <i>Caragana stenophylla</i> in the arid desert region	ZHANG Jianhua, MA Chengchang, LIU Zhihong, et al (2132)
Effects of mixed plant residues from the Loess Plateau on microbial biomass carbon and nitrogen in soil	WANG Chunyang, ZHOU Jianbin, XIA Zhimin, et al (2139)
Survival strategy of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Agropyron cristatum</i> in typical steppe of Inner Mongolia	SUN Jian, LIU Miao, LI Shengdong, et al (2148)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in <i>Salix psammophila</i> root-zone soil in Inner Mongolia desert	HE Xueli, YANG Jing, ZHAO Lili (2159)
An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility	DONG Wenjun, DENG Aixin, ZHANG Bin, et al (2169)
Endophytic bacterial diversity in <i>Achnatherum inebrians</i> by culture-independent approach	ZHANG Xuebing, SHI Yingwu, ZENG Jun, et al (2178)
Hierarchical Partial Least Squares (Hi_PLS) model analysis of the driving factors of Henan's Ecological Footprint (EF) and its development strategy	JIA Junsong (2188)
Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City	YANG Qiyong, YANG Jinsong, YU Shipeng (2196)
The toxicity of lupeol of <i>Inula britannica</i> on <i>Tetranychus cinnabarinus</i> and its effects on mite enzyme activity	DUAN Dandan, WANG Younian, CHENG Jun, et al (2203)
Abundance and biodiversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in littoral wetland of Baiyangdian Lake, North China	YE Lei, ZHU Guibing, WANG Yu, et al (2209)
Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in karst Mountainous region for example	WANG Ding, YAO Jian, YANG Xue, et al (2216)
Comparison of structure and species diversity of <i>Eucalyptus</i> community	LIU Ping, QIN Jing, LIU Jianchang, et al (2227)
Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands	JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al (2236)
Effects of <i>Phragmites australis</i> on methane emission from a brackish estuarine wetland	MA Anna, LU Jianjian (2245)
Genetic differentiation and the characteristics of uptake and accumulation of lead among <i>Camellia sinensis</i> populations under different background lead concentrations of soils in Yunnan, China	LIU Shengchuan, DUAN Changqun, LI Zhenhua, et al (2253)
Comparison of zooplankton lists between <i>Coilia mystus</i> food contents and collections from the Yangtze River Estuary & Hangzhou Bay	LIU Shouhai, XU Zhaoli (2263)
Reconstruction and analysis of July-September precipitation in Mt. Dagangshan, China	QIAO Lei, WANG Bing, GUO Hao, et al (2272)
Analysis on economic and ecological benefits of no-tillage management of <i>Carya cathayensis</i>	WANG Zhengjia, HUANG Xingzhao, TANG Xiaohua, et al (2281)
GIS-based analysis of the accessibility of urban forests in the central city of Guangzhou, China	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (2290)
Review and Monograph	
Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration	YANG Qingpeng, XU Ming, LIU Hongsheng, et al (2301)
The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass	CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2312)
Practice and the research progress on eco-compensation for cultivated land	MA Aihui, CAI Yinying, ZHANG Anlu (2321)
Discussion	
Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou	LIU Jie, LI Xianwei, JI Zhonghua, et al (2331)
Scientific Note	
Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake	HU Kun, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (2341)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 8 期 (2011 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 8 2011

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 70.00 元