

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第14期 Vol.33 No.14 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 14 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

石鸡属鸟类研究现状..... 宋 森,刘迺发 (4215)

个体与基础生态

不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响.....
..... 闫 慧,吴 茜,丁 佳,等 (4226)

低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响..... 邵怡若,许建新,薛 立,等 (4237)

不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性..... 蔡 苗,董燕婕,李佰军,等 (4248)

不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应.....
..... 张智猛,宋文武,丁 红,等 (4257)

天山中部天山云杉林土壤种子库年际变化..... 李华东,潘存德,王 兵,等 (4266)

不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应..... 李伶俐,郭红霞,黄耿华,等 (4278)

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响..... 周相玉,冯文强,秦鱼生,等 (4289)

CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 庄明浩,陈双林,李迎春,等 (4297)

pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响 刘丹青,陈 雪,杨亚洲,等 (4306)

弱光胁迫对不同耐荫型玉米果穗发育及内源激素含量的影响..... 周卫霞,李潮海,刘天学,等 (4315)

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响..... 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等 (4324)

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型..... 黄晶晶,井家林,曹德昌,等 (4331)

植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究..... 陈 浩,曾晓东 (4343)

蝇蛹金小蜂的交配行为及雄蜂交配次数对雌蜂繁殖的影响..... 孙 芳,陈中正,段毕升,等 (4354)

西藏飞蝗虫粪粗提物的成分分析及其活性测定..... 王海建,李彝利,李 庆,等 (4361)

不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响..... 李 霞,徐秀秀,韩兰芝,等 (4370)

种群、群落和生态系统

基于 *mtCOII* 基因对山东省越冬代亚洲玉米螟不同种群的遗传结构分析
..... 李丽莉,于 毅,国 栋,等 (4377)

太湖湿地昆虫群落结构及多样性..... 韩争伟,马 玲,曹传旺,等 (4387)

西江下游浮游植物群落周年变化模式..... 王 超,赖子尼,李新辉,等 (4398)

环境和扩散对草地群落构建的影响..... 王 丹,王孝安,郭 华,等 (4409)

黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮中蓝藻的多样性..... 杨丽娜,赵允格,明 姣,等 (4416)

景观、区域和全球生态

基于景观安全格局的建设用地管制分区..... 王思易,欧名豪 (4425)

黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析..... 赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等 (4436)

2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析 骆成凤,许长军,游浩妍,等 (4450)

基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究 李海防,卫 伟,陈 瑾,等 (4460)

农业景观格局与麦蚜密度对其初寄生蜂与重寄生蜂种群及寄生率的影响 ... 关晓庆,刘军和,赵紫华 (4468)

CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响..... 石耀辉,周广胜,蒋延玲,等 (4478)

资源与产业生态

城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例..... 阳文锐,李 锋,王如松,等 (4486)

城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例..... 王慧娜,赵小锋,唐立娜,等 (4495)

研究简报

间套作种植提升农田生态系统服务功能..... 苏本营,陈圣宾,李永庚,等 (4505)

矿区生态产业评价指标体系 王广成,王欢欢,谭玲玲 (4515)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-07



封面图说: 古田山常绿阔叶林景观——亚热带常绿阔叶林是我国独特的植被类型,生物多样性仅次于热带雨林。古田山地处中亚热带东部,浙、赣、皖三省交界处,由于其特殊复杂的地理环境位置,分布着典型的中亚热带常绿阔叶林,是生物繁衍栖息的理想场所,生物多样性十分突出。中国科学院在这里建立了古田山森林生物多样性与气候变化研究站,主要定位于研究和探索中国亚热带森林植物群落物种共存机制,阐释生物多样性对森林生态系统功能的影响,以及监测气候变化对于亚热带森林及其碳库和碳通量的影响。

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/stxb201204120517

周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 喻华, 廖鸣兰, 刘禹池, 王昌全, 涂仕华. 镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响. 生态学报, 2013, 33(14): 4289-4296.

Zhou X Y, Feng W Q, Qin Y S, Yu H, Liao M L, Liu Y C, Wang C Q, Tu S H. Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4289-4296.

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用 对小麦镉吸收的影响

周相玉^{1,2}, 冯文强¹, 秦鱼生¹, 喻华¹, 廖鸣兰¹, 刘禹池^{1,2}, 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, 成都 611130)

摘要: 采用盆栽试验, 研究了在镉污染土壤上施用石灰、硫酸镁、硫酸锰和活性炭不同用量以及交互作用对小麦生长和吸收重金属镉的影响。研究表明, 在试验条件下施用适量的硫酸镁、硫酸锰或与石灰配合能明显提高小麦籽粒产量, 单施石灰或与活性炭配合施用降低了小麦籽粒产量; 与对照(CK)相比, 所有处理秸秆产量均下降。施用硫酸镁能显著降低小麦籽粒和秸秆中 Cd 浓度, 且随用量的增加而增大。低量硫酸锰能有效降低小麦籽粒和秸秆中 Cd 浓度, 高量反而增加小麦对 Cd 的吸收。石灰、活性炭单独施用或配合施用都能明显减少小麦对 Cd 的吸收, 但籽/秆中 Cd 比却随石灰用量的增加呈明显的上升趋势。叶面喷施硫酸镁对降低小麦吸收镉的效果与土施相当, 但叶面喷施硫酸锰却比土施硫酸锰显著降低了小麦籽粒中的镉浓度与吸收量。硫酸镁与硫酸锰, 或石灰、硫酸镁和硫酸锰 3 种物质配合施用, 对小麦籽粒镉浓度和吸收量的降低表现出明显的正交互作用, 对抑制小麦体内镉从秸秆向籽粒的转移具有显著效果。

关键词: 镁; 锰; 活性炭; 石灰; 镉; 小麦

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat

ZHOU Xiangyu^{1,2}, FENG Wenqiang¹, QIN Yusheng¹, YU Hua¹, LIAO Minglan¹, LIU Yuchi^{1,2}, 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, Chengdu 611130, China

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate impact of magnesium (Mg), manganese (Mn), activated carbon and lime and their interactions on wheat growth and cadmium (Cd) uptake from a Cd polluted agricultural soil. Results showed that application of appropriate amounts of magnesium sulfate (Mg), manganese sulfate (Mn) or in combination with lime could promote wheat growth and seed yields, while addition of lime alone or in combination with activated carbon significantly reduced wheat seed yield. Application of Mg significantly reduced concentrations and uptake of Cd in wheat seeds and straw and positively related to Mg rates. Concentrations and uptake of Cd in wheat seeds and straw were effectively decreased by the lower rates of Mn but increased by the higher rates. Lime and activated carbon, no matter it was used alone or together, remarkably restricted Cd uptake by wheat, while Cd ratio of seed/straw tended to increase with lime rates. Folia spray of Mg was equally effective as incorporating Mg into soil on restricting Cd uptake by wheat but a significant depressing effect on Cd uptake by folia spray of Mn over soil application of Mn was observed. Whether Mg and

基金项目: 四川省基金项目(2008NG0002); 公益性行业(农业)科研专项(201003016)

收稿日期: 2012-04-12; 修订日期: 2012-10-23

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

Mn or lime, Mg and Mn were used together produced pronounced positive interactions on depressing Cd concentrations and uptake in wheat seeds and significant restrictive effect on Cd transfer from straw to seeds as well.

Key Words: magnesium; manganese; activated carbon; lime; interaction; cadmium uptake

重金属是一类不能降解且具有潜在危害的重要污染物,能在生物体内富集,并转化为毒性更强的金属有机化合物。重金属在植物体内积累到一定程度时,就会影响植物对营养元素的吸收、蒸腾作用、光合作用、呼吸作用等正常生理活动,改变植物细胞的超微结构,对植物造成伤害甚至导致死亡^[1]。镉不仅危及植物的生长发育,而且通过粮、油、水果、蔬菜等农产品进入食物链危害人类健康。镉进入人体后,会在体内积蓄。当累积达到致病剂量后,便会引起人体器官/组织的致畸、致癌、突变等^[2]。

植物对重金属的吸收和累积受诸多因素的影响,如土壤质地、水分、有机质、pH 值、共存元素^[3-6]等。在镉污染土壤上,肥际土壤理化性状的变化会影响镉的形态变化和作物对镉的吸收。例如,施用铁、镁、锰肥能明显降低旱作土壤中镉的活性和小麦对镉的吸收^[7];施用石灰能显著降低土壤有效镉浓度,但石灰过量则会使小麦显著减产^[8-9]。这些研究主要探讨了不同物质单因素处理对小麦吸收镉的影响,对复合因子的研究较少。因此,本试验旨在探讨镁、锰、活性炭和石灰不同用量和交互作用,以及镁、锰肥的两种施用方式(土壤施用和叶面喷施)对小麦吸收镉的影响,从而为镉污染土壤上使用镁、锰、活性炭和石灰等物质抑制作物吸收镉的合理施用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验盆栽用土壤采自绵竹市富新镇镉污染水稻土 0—20cm 耕层。样品风干后,除去沙砾及植物残体,用木槌捣碎后供小麦盆栽使用,部分土样经磨碎过筛后用于基本理化性质以及全镉和有效镉含量测定。土壤 pH 用 pH 计(pHS-4C⁺)测定(土水比 1:2.5),全氮用开氏法,有机质用重铬酸钾外加热法,碱解氮用碱解扩散法,有效钾用 NH₄OAc 浸提火焰光度法,有效磷用 Olsen-NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法,CEC 用醋酸铵法,全镉采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消煮,火焰原子吸收光谱法(石墨炉 novAA400-德国耶拿)测定,有效镉采用 Tessier (1979) 五步连续提取法第一步:即 1mol/L 1MgCl₂ (pH = 7) 溶液浸提^[10],石墨炉原子吸收光谱法测定。供试土壤 pH6.8,有机质 4.26%,碱解氮 156.9mg/kg,有效磷 18.3 mg/kg,有效钾 75.3 mg/kg,阳离子交换量(CEC)14.9cmol/kg,全镉 0.489 mg/kg,有效镉 0.125mg/kg。供试作物为川麦 42,由四川省农业科学院作物研究所提供。

1.2 试验设计

盆栽试验设计共 22 个处理,每个处理重复 3 次。添加的物料包括硫酸镁,硫酸锰,活性炭(粉状),熟石灰(Ca(OH)₂),试验设一个无肥对照(CK0)处理和只添加氮、磷、钾肥料的对照处理(CK)。除 CK0 处理外,其余处理每千克风干土壤分别添加 0.20g N、0.15g P₂O₅ 和 0.15g K₂O。氮肥为尿素,磷肥为磷酸二氢钙,钾肥为硝酸钾,活性炭为重庆钟山活性炭制造有限公司生产的环保专用炭(经 Na₂S 溶液浸渍处理,对重金属有更强吸附能力),添加的其它试剂均为分析纯。各元素用量参考一般大田试验中施用量,据其养分用量计算出对应的肥料用量。为了比较 Mg 和 Mn 对小麦吸收 Cd 的影响机理是发生在土壤还是植株体内,除土施硫酸镁和硫酸锰处理外,另外设置叶面喷施硫酸镁和硫酸锰处理(分别在小麦苗期、拔节孕穗期各喷 1 次)。试验各处理的添加物和肥料用量见表 1。

称取 7kg 风干土于干净塑料盆中,按照表 1 称取每个处理所需肥料与称好土壤混合均匀。按 100% 田间持水量加水入陶瓷盆中,然后将塑料盆中混匀的土壤倒入陶瓷盆中,利用毛细作用湿润上层土体,15d 后施肥。将称好的氮、磷、钾肥料均匀洒施在离土表 5cm 深处,放置 2d 后播种。小麦种子经表面消毒后,用去离子水冲洗 5 次,恒温箱 25℃ 培养 12 h,将吐出芽嘴的健康种子播入土中,每盆 10 颗,三叶期定苗至 7 株,生长

期间定量浇水。

表 1 镁、锰、活性炭和石灰对小麦生长和吸收镉影响的试验设计

Table 1 Experiment design for effect of magnesium, manganese, activated carbon and lime on wheat grow and cadmium uptake			
元素/物料类别 Element type	处理 Treatment	物料组合 Materials used	物料用量 Rate used *
对照	CK0	—	—
	CK	CO(NH ₂) ₂ +KH ₂ PO ₄ +KNO ₃	0.2+0.15+0.15
Mg	镁 1	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O	1
	镁 2	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O	2
	镁 4	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O	4
	镁 8	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O	8
	镁(叶施)	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.1
石灰	石灰 1	CK + Ca(OH) ₂	0.34
	石灰 2	CK + Ca(OH) ₂	0.67
	石灰 3	CK + Ca(OH) ₂	1.34
	石灰 4	CK + Ca(OH) ₂	2.68
Mn	锰 0.2	CK + MnSO ₄ · 7H ₂ O	0.2
	石灰 2+锰 0.1	CK +Ca(OH) ₂ +MnSO ₄ · H ₂ O	0.67+0.1
	石灰 2+锰 0.2	CK +Ca(OH) ₂ +MnSO ₄ · H ₂ O	0.67+0.2
	石灰 2+锰 0.4	CK +Ca(OH) ₂ +MnSO ₄ · H ₂ O	0.67+0.4
	石灰 2+锰 0.8	CK +Ca(OH) ₂ +MnSO ₄ · H ₂ O	0.67+0.8
	锰(叶施)	CK + MnSO ₄ · 7H ₂ O	0.05
活性炭	石灰 2+炭 1	CK +Ca(OH) ₂ +活性炭	0.67+0.67
	石灰 2+炭 2	CK +Ca(OH) ₂ +活性炭	0.67+1.34
Mg + Mn	镁 2+ 0.2	CK +MgSO ₄ · 7H ₂ O+MnSO ₄ · H ₂ O	2+0.2
石灰+Mg	石灰 2+镁 2	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O+Ca(OH) ₂	0.67+2
石灰+Mg+Mn	石灰 2+镁 2+锰 0.2	CK + MgSO ₄ · 7H ₂ O+MnSO ₄ · H ₂ O+Ca(OH) ₂	0.67+2+0.2

* 石灰和活性炭用量为 g/kg 土壤; Mg 和 Mn 土施用量为 mmol/kg 土壤, 叶面喷施为% (分别在小麦苗期、拔节孕穗期喷 1 次,共喷 3 次)

1.3 测定项目与方法

小麦成熟后收获地上部分,干燥后测定小麦基本生物性状。将秸秆样品和籽粒样品置于烘箱 65℃ 烘干至恒重,磨碎后过 40 目尼龙筛,然后用 HNO₃-HClO₄ 消解法进行分析测定,试验中采用消煮空白和标准样品进行质量控制和回收率校正,火焰原子吸收光谱法测定小麦秸秆和籽粒 Cd 含量。小麦植株 Cd 吸收量(μg/盆)=植株生物量(g/pot)×植株 Cd 浓度(mg/kg)。试验数据采用 DPS 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 镁、锰、活性炭和石灰对小麦产量及构成因素的影响

镁、锰、活性炭和石灰对小麦产量及构成因素的影响见表 2。与无肥处理(CK0)相比所有施肥处理均显著提高小麦籽粒产量、秸秆产量及产量构成因素数值。在施肥处理中,以镁 2,石灰 2+锰 0.8,石灰 2+镁 2+锰 0.2 三个处理的小麦有效穗数最高,但与 CK 差异不显著;镁 4、镁 8、锰(叶施)、镁 2+锰 0.2、石灰 2+炭 1、石灰 3 和石灰 4 都显著降低了小麦的有效穗。在 NPK 处理的基础上添加其他物料显著降低了小麦穗粒数和千粒重,其中以石灰 2+炭 2 处理的有效穗数最低;使千粒重降低幅度最大的为石灰 2+炭 2 处理,其降幅达到显著水平。小麦籽粒产量以石灰 2+镁 2+锰 0.2 处理为最高,为 24.22g/盆,但与 CK 处理的差异不显著;镁 2+锰 0.2、石灰 2+炭 1、石灰 2+炭 2、石灰 2、石灰 3 和石灰 4 的小麦籽粒产量均显著低于 CK 处理;其余处理与 CK 差异不显著。小麦秸秆产量以 CK 为最高,其中以镁 2+锰 0.2 处理降低幅度最大,为 8.68g/盆,达到了显著水平。

表 2 镁、锰、活性炭和石灰对小麦生长的影响

Table 2 Effect of magnesium, manganese, activated carbon and lime on wheat growth					
处理 Treatment	有效穗数 Effective ear	穗粒数 Grain/ear	千粒重 Wt/g /1000-grain	籽粒产量/(g/盆) Grain yield	秸秆产量/(g/盆) Straw yield
CK0	12f	17.92g	42.91d	14.07h	14.30h
CK	21abc	28.22a	53.66a	22.37abc	29.74a
镁 1	20abcde	21.04bcdefg	50.25abc	20.67abcdef	24.42bcdef
镁 2	22ab	21.41bcdefg	52.09ab	24.15a	22.35efg
镁 4	18de	24.56abc	47.72abcd	20.79abcdef	24.42bcdef
镁 8	18e	23.97bcd	48.29abcd	20.31abcdefg	26.86abcde
镁(叶施)	19abcde	23.99bcd	47.30bcd	21.90abcd	25.67abcdef
石灰 1	20abcde	22.48bcdef	51.53ab	20.09abcdefg	27.30abcd
石灰 2	20abcde	21.93bcdrfg	49.40abc	19.03cdefg	25.47abcdef
石灰 3	18e	18.87fg	49.68abc	18.46cdefg	22.82defg
石灰 4	18de	18.29g	48.52abcd	17.06fgh	22.01fg
锰 0.2	19abcde	24.63ab	49.62abc	22.31abc	26.04abcde
石灰 2+锰 0.1	19bcde	22.94bcde	51.22ab	22.38abc	24.46bcdef
石灰 2+锰 0.2	21abcd	20.66cdefg	51.64ab	22.32abc	25.19abcdef
石灰 2+锰 0.4	19abcde	23.16bcde	47.6abcd	21.28abcde	27.11abcd
石灰 2+锰 0.8	22a	20.59defg	51.03ab	23.22ab	27.74abc
锰(叶施)	18e	24.81ab	47.68abcd	20.87abcdef	25.78abcdef
石灰 2+炭 1	18cde	18.74fg	50.87ab	17.61efgh	27.16abcd
石灰 2+炭 2	20abcde	18.04g	44.32cd	16.43gh	28.85ab
镁 2+ 0.2	18cde	19.33efg	50.91ab	18.10defg	21.06g
石灰 2+镁 2	20abcde	21.67bcdefg	49.75abc	21.56abcd	23.60cdefg
石灰 2+镁 2+锰 0.2	22ab	22.52bcdef	49.71abc	24.22a	29.56a

同列平均值后的不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),相同字母则差异不显著

2.2 镁、锰、活性炭和石灰对小麦吸收镉的影响

2.2.1 不同用量的石灰对小麦吸收镉的影响

从表 3 看出,施用氮磷钾肥较无肥处理明显促进了小麦对 Cd 的吸收,但降低了 Cd 从秸秆向籽粒的转移。施用石灰能显著降低小麦籽粒和秸秆中 Cd 浓度和吸收量,对 Cd 浓度降低的效果随石灰用量增加而增加,最高量的石灰处理籽粒 Cd 浓度为 0.071mg/kg,比 CK 降低了 43%;最高石灰用量处理的秸秆 Cd 浓度为 1.74 $\mu\text{g}/\text{盆}$,较 CK 下降了 75%。就 Cd 吸收量而言,不同用量石灰处理间的差异不显著;当石灰用量 $\geq 0.66\text{g}/\text{kg}$ 时,即石灰 2 及其以后的高用量处理,籽粒吸收的 Cd 无明显变化。秸秆中的 Cd 吸收量随石灰用量增加而显著降低。从 Cd 在小麦体内的分配比例来看,表观上显示出高量石灰促进了 Cd 从秸秆向籽粒的转移,但实际上却是因为籽粒 Cd 含量保持相对稳定而秸秆 Cd 含量显著降低之故。石灰对小麦吸收 Cd 的抑制作用大致可归咎于两个方面的原因,一是石灰施入土壤后能升高土壤 pH,增加土壤表面的可变电荷量和对 Cd^{2+} 的吸附能力;二是促进 Cd^{2+} 水解为吸附作用更强的 $\text{Cd}(\text{OH})^+$,使得土壤中的交换性 Cd 浓度降低^[11]。

表 3 不同石灰用量对小麦镉吸收的影响

Table 3 Cd uptake by wheat as affected by different rates of lime					
处理 Treatment	籽粒镉浓度 Cd conc. in seed /(mg/kg)	籽粒镉含量 Cd content in seed /($\mu\text{g}/\text{盆}$)	秸秆镉浓度 Cd conc. in straw /(mg/kg)	秸秆镉含量 Cd content in straw /($\mu\text{g}/\text{盆}$)	籽/秆 Cd 比例 Cd ratio of seed/straw
CK0	0.1148a	1.62b	0.1741bc	2.49d	0.65
CK	0.124a	2.79a	0.236a	6.99a	0.40
石灰 1	0.083b	1.59b		3.14b	0.51
石灰 2	0.082b	1.39b	0.102cd		0.54
石灰 3	0.076bc	1.40b	0.09de	2.05cd	0.68
石灰 4		1.41b	0.078e	1.74d	0.81

2.2.2 不同用量的硫酸镁对小麦吸收镉的影响

不同用量的硫酸镁对小麦籽粒和秸秆的 Cd 浓度影响差异显著(表 4)。所有的硫酸镁处理都比 CK 显著降低了小麦籽粒的 Cd 浓度和吸收量。当硫酸镁用量从 1mmol/kg 增至 8mmol/kg 时,小麦籽粒 Cd 浓度下降了 34%—60%,Cd 吸收量的变化趋势也基本一致。叶面喷施 0.1% 硫酸镁后,小麦籽粒中的 Cd 浓度与镁 1 处理相当。不同硫酸锰用量和施用方式处理的小麦秸秆 Cd 浓度与吸收量都高于籽粒,其变化趋势也与上述的籽粒 Cd 一致。从籽/秆 Cd 比例来看,镁 2 和镁(叶施)处理高于 CK,最高量硫酸镁处理籽秆 Cd 比例最小。当硫酸镁与石灰配合施用时,小麦籽粒 Cd 浓度与单施硫酸镁相比没有变化,但籽粒 Cd 含量、秸秆 Cd 浓度和含量都比单施硫酸镁显著降低,表现出一定的正交互作用。

表 4 不同硫酸镁用量(1, 2, 4, 8 mmol/kg)对小麦吸收镉的影响

Table 4 Cd uptake by wheat as affected by different rates (1, 2, 4, 8 mmol/kg) of manganese

处理 Treatment	籽粒镉浓度 Cd conc. in seed /(mg/kg)	籽粒镉含量 Cd content in seed /(μg/盆)	秸秆镉浓度 Cd conc. in straw /(mg/kg)	秸秆镉含量 Cd content in straw /(μg/盆)	籽/秆 Cd 比例 Cd ratio of seed/straw
CK	0.124a	2.79a	0.236a	6.99a	0.40
镁 1	0.082b	1.69b	0.196b	4.79b	0.35
镁 2	0.065c	1.57b	0.159cd	3.56c	0.44
镁 4	0.057cd	1.18c	0.144d	3.47c	0.34
镁 8	0.050d	1.02c	0.119e	3.23cd	0.32
镁(叶施)	0.080b	1.74b	0.156cd	3.95bc	0.44
石灰 2+镁 2	0.065c	1.39bc	0.122e	2.93d	0.48

总体来看,所有硫酸镁处理小麦籽粒和秸秆中的镉的浓度和吸收量都低于 CK,Cd 在小麦体内的分配为秸秆>籽粒,说明镁抑制了小麦对 Cd 的吸收,并减少了镉从秸秆向籽粒的转移,这与蓝兰^[7]等人的研究结果一致。在其它作物上,一些研究小组 Kashem 和 Kawai^[12]报道了施用 Mg 肥能解除日本芸苔属菠菜 Cd 的毒害,增加菠菜产量。Hermans 等人^[13]发现了 Mg 解除 Cd 对植物毒害的几个基因,指出 Mg 对 Cd 的解毒作用部分归咎于 Mg 能维持植物体内的 Fe 浓度,提高植物抗氧化能力,从而解除毒害和/或保护光合作用器官。此外,在动物上,Mg 也发挥了卓越的解除 Cd 毒害的作用^[14-16]。

2.2.3 不同用量的硫酸锰与石灰配合施用对小麦吸收镉的影响

在石灰的基础上施用硫酸锰或在硫酸锰的基础上施用石灰都进一步降低了秸秆籽粒中的 Cd 浓度与含量(石灰 2+锰 0.8 处理除外)(表 5)。在石灰的基础上施用硫酸锰对小麦籽粒 Cd 的降低幅度为 4%—23%,并随硫酸锰用量的增加而降低;在硫酸锰的基础上添加石灰,比单施硫酸锰降低了 19% 的籽粒 Cd 浓度和 18% 的吸收量。小麦叶面喷施硫酸锰对籽粒 Cd 浓度降低的效果与石灰 2+锰 0.4 处理相当,表明叶面喷施锰比土施锰更能有效降低小麦籽粒的 Cd 浓度和吸收量。当硫酸镁与硫酸锰配合施用或当硫酸镁、硫酸锰与石灰一起施用时,对籽粒 Cd 浓度和吸收量的降低达到最低值。硫酸镁+硫酸锰比单施其中任何一种物质都能进一步降低小麦籽粒的 Cd 浓度,并且能够明显的降低籽秆 Cd 的比例,表现出正交互作用。石灰、硫酸镁和硫酸锰三种物质同时施用时,小麦籽粒 Cd 浓度和吸收量显著或明显低于单施任何一种物质,说明了这些物质配合施用对降低小麦吸收 Cd 具有显著正交互作用。

不同处理对秸秆中 Cd 浓度和含量的影响与籽粒的情况有所不同。就不同硫酸锰用量而言,两个低量硫酸锰处理(石灰 2+锰 0.1 和石灰 2+锰 0.2)比单独使用硫酸锰降低了小麦秸秆中的 Cd 浓度和吸收量,比单施石灰增加了秸秆中的 Cd 浓度和吸收量。在石灰 2+锰 0.2 处理基础上继续增加硫酸锰用量,秸秆中的 Cd 浓度与吸收量却显著增加。叶面喷施硫酸锰对秸秆的 Cd 浓度和吸收量的影响与单独土施硫酸锰相当。镁与锰,石灰、镁与锰的配合施用对小麦秸秆中的 Cd 浓度和吸收量的影响与籽粒的情况相反。镁与锰配合施用比单独施用硫酸锰或石灰增加了秸秆中的 Cd 浓度和吸收量;石灰 2+镁 2 +锰 0.2 处理比镁 2+锰 0.2、石灰 2

+锰 0.2 或石灰 2+镁 2 处理进一步增加了秸秆中的 Cd 浓度和吸收量。这些结果显示,几种物质的配合施用有利于显著降低小麦籽粒中的 Cd 浓度与吸收量,但显著增加秸秆中的 Cd,阻止了 Cd 从秸秆向籽粒的转移,产生最低的籽/秆 Cd 比例,以石灰 2+镁 2 +锰 0.2 处理籽/秆 Cd 比例为最小(0.24),其次为石灰+锰 0.4 处理(0.27)。

表 5 不同用量的硫酸锰与石灰配合施用对小麦吸收镉的影响

Table 5 Cd uptake by wheat as affected by different rates of manganese and lime

处理 Treatment	籽粒镉浓度 Cd conc. in seed /(mg/kg)	籽粒镉含量 Cd content in seed /(μg/盆)	秸秆镉浓度 Cd conc. in straw /(mg/kg)	秸秆镉含量 Cd content in straw /(μg/盆)	籽/秆 Cd 比例 Cd ratio of seed/straw
石灰 2	0.082b	1.39b	0.102cd		0.54
锰 0.2		1.92b	0.126de	3.28cd	0.59
石灰 2+锰 0.1	0.079bc	1.77bc	0.119c	2.89c	0.61
石灰 2+锰 0.2	0.070cd	1.57bcd	0.112c	2.83c	0.56
石灰 2+锰 0.4	0.063d	1.33d	0.183b	4.95b	0.27
石灰 2+锰 0.8	0.069cd	1.59bcd	0.163b	4.52b	0.35
锰(叶施)	0.064d	1.34cd	0.126c	3.22c	0.41
镁 2+锰 0.2	0.060ef	1.11d	0.147cd	3.08cd	0.36
石灰 2+镁 2 +锰 0.2		1.25cd	0.172bc	5.09b	0.24

硫酸锰对小麦吸收 Cd 的抑制作用,可能归因于 Mn^{2+} 施入土壤后,在好气条件下被氧化成氧化锰 (MnO_2),在氧化锰的形成过程中土壤中的一些金属离子被共沉淀,形成的锰氧化物对金属离子如 Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Mn^{2+} 等具有很强的吸附能力^[17-20]。这些被锰氧化物持留的 Cd^{2+} ,难以被 NH_4OAc 置换出来^[17],从而降低土壤 Cd 的有效性。小麦叶面喷施硫酸锰也能有效降低小麦对 Cd 的吸收,抑制 Cd 向籽粒的转移,表明 Mn 抑制小麦对 Cd 吸收机理可能同时发生在土壤和植株体内。

2.2.4 不同用量的活性炭与石灰配合施用对小麦吸收镉的影响

在施用石灰的基础上添加不同用量的环保专用活性炭,能够显著降低小麦籽粒和秸秆的 Cd 浓度和吸收量(表 6)。从籽粒镉浓度来看,单施石灰和活性炭+石灰处理间的差异不显著,但高量活性炭处理籽粒 Cd 浓度最低。小麦籽粒的 Cd 吸收量变化趋势与 Cd 浓度一致,并且 3 个处理间的差异不显著,但都显著低于 CK。施用活性炭降低了小麦籽/秆 Cd 的比例,高量活性炭处理优于低量处理。活性炭因具有巨大的比表面积、较高的孔隙结构及丰富的表面官能团,对金属离子吸附速率快、容量大而广泛用于废水处理,对镉的最大吸附量可高达 38.03 mg/g ^[21] 和 47.85 mg/g ^[22]。通常认为,对镉的吸附起决定作用的是其表面化学性质,离子交换在吸附过程中发挥了重要的作用。本试验所用活性炭为环保专用碳经 Na_2S 处理,对土壤 Cd 的吸附和钝化效果应优于普通活性炭。

表 6 不同用量的活性炭与石灰配合施用对小麦吸收镉的影响

Table 6 Cd uptake by wheat as affected by different rates (0.67, 1.34g/kg) of activated carbon and lime

处理 Treatment	籽粒镉浓度 Cd conc. in seed /(mg/kg)	籽粒镉含量 Cd content in seed /(μg/盆)	秸秆镉浓度 Cd conc. in straw /(mg/kg)	秸秆镉含量 Cd content in straw /(μg/盆)	籽/秆 Cd 比例 Cd ratio of seed/straw
CK	0.125a	2.79a	0.236a	6.99a	0.4
石灰 2	0.082bc	1.39b	0.102cd	2.58bc	0.54
石灰 2+炭 1	0.061c	1.14b	0.111c	2.99b	0.38
石灰 2+炭 2	0.051c	0.85b	0.092d	2.66bc	0.32

3 结论

单独或配合施用适量石灰、硫酸镁、硫酸锰、环保专用活性炭都能有效降低小麦对 Cd 的吸收,使小麦籽

粒镉浓度低于国家限量指标。施用硫酸镁能显著降低小麦籽粒和秸秆 Cd 浓度和吸收量,其效果随用量增加而增加。低量硫酸锰能有效降低小麦籽粒和秸秆 Cd 浓度,高量反而增加小麦对 Cd 的吸收。石灰、活性炭单独施用或配合施用都能抑制小麦对 Cd 的吸收和 Cd 向籽粒的转移,但籽/秆 Cd 比例却随石灰用量呈明显的上升趋势。施用硫酸镁能同时减少小麦籽粒和秸秆中的 Cd,而硫酸锰能明显增加小麦秸秆中 Cd 的含量,却抑制了 Cd 向籽粒的转移。叶面喷施硫酸镁降低小麦吸收镉的效果与土施硫酸镁相当,但叶面喷施硫酸锰却比土施硫酸锰显著降低了小麦籽粒中的镉浓度与吸收量。硫酸镁与硫酸锰,或石灰、硫酸镁和硫酸锰 3 种物质配合施用,对小麦籽粒镉浓度和吸收量的降低表现出明显的正交互作用,对抑制小麦体内镉从秸秆向籽粒的转移具有显著效果。

References:

- [1] Wang L Z. Study on the effects of cadmium on the seedling growth and the physiological indexes of wheat in seedling stage. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(9): 3529-3530.
- [2] Zhu Z Y, Hao Y F, Li Y J, Liu Y J, Duan Y Q, Li Q, Guo J. Effects of Cd^{2+} on chlorophyll content in flag leaf and grain yield of wheats. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2011, 25(5): 1010-1016.
- [3] Renella G, Landi L, Nannipieri P. Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil. *Geoderma*, 2004, 122(2/4): 311-315.
- [4] Strawn D G, Sparks D L. Effects of soil organic matter on the kinetics and mechanisms of Pb (II) sorption and desorption in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1): 144-156.
- [5] Li Y, Zhang G Y, Hi H J, Wei J. Effects of organic acids on speciation of lead in rhizosphere and their phytotoxicity. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 164-166.
- [6] 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.
- [7] Lan L, Yu H, Feng W Q, Qin Y S, Hu K, Liao M L, Wang C Q, Tu S H. Effects of secondary, micro-and beneficial elements on wheat growth and cadmium uptake. *Journal of Soil and water Conservation*, 2010, 24(5): 54-58.
- [8] Zhu Q H, Huang D Y, Liu G S, Zhu G X, Zhu H H, Liu S P. Effects and mechanism of lime and sepiolite on remediation of Cd contaminated soils. *Journal of Soil and water Conservation*, 2009, 23(1): 111-116.
- [9] Zhan S J, Yu H, Feng W Q, Qin Y S, Liao M L, Wang C Q, Tu S H. Effects of different organic material and lime on wheat grow and cadmium uptake. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 214-217, 231-231.
- [10] 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.
- [11] Xiong M L. Cadmium adsorption and availability as affected by soil liming. *Research of Environmental Sciences*, 1994, 7(1): 35-38.
- [12] Kashem A, Kawai S. Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(3): 246-251.
- [13] Hermans C, Chen J, Coppens F, Inzé D, Verbruggen N. Low magnesium status in plants enhances tolerance to cadmium exposure. *New Phytologist*, 2011, 92(2): 428-436.
- [14] Matović V, Plamenac Bulat Z, Djukić-Cosić D, Soldatović D. Antagonism between cadmium and magnesium: a possible role of magnesium in therapy of cadmium intoxication. *Magnesium Research*, 2010, 23(1): 19-26.
- [15] Matović V, Buha A, Bulat Z, Dukić-Cosić D. Cadmium toxicity revisited: focus on oxidative stress induction and interactions with zinc and magnesium. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 2011, 62(1): 65-76.
- [16] Matović V, Buha A, Bulat Z, Dukić-Cosić D, Miljković M, Ivanišević J, Kotur-Stevuljević J. Route-dependent effects of cadmium/cadmium and magnesium acute treatment on parameters of oxidative stress in rat liver. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(3/4): 552-557.
- [17] Tu S H, Racz G J, Goh T B. Transformation of synthetic birnessite as affected by pH and manganese concentration. *Clay and Clay Minerals*, 1994, 42(3): 321-330.
- [18] Koyanaka H, Koyanaka S, Liang R, Uchida A. Manganese oxide (Mn_2O_3) as adsorbent for cadmium. *Journal of Japan Society on Water Environment*, 2000, 23(2): 116-121.
- [19] Turner A, Le Rouxa S M, Millward G E. Adsorption of cadmium to iron and manganese oxides during estuarine mixing. *Marine Chemistry*, 2008, 108(1/2): 77-84.

- [20] Fu G M, Allen H E, Cowan C E. Adsorption of cadmium and copper by manganese oxide. *Soil Science*, 1991, 152(2): 72-81.
- [21] Rao M R, Ramesh A, Rao G P C, Seshiah K. Removal of copper and cadmium from the aqueous solutions by activated carbon derived from *Ceiba pentandra* hulls. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 129(1/3): 123-129.
- [22] Wang Z F, Zheng Z, Luo X Z, Zhang J B, Nie E, Pu J M. Adsorption of cadmium from aqueous solutions on activated carbon prepared from *S. Alterniflora*. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(6): 1081-1086.

参考文献:

- [1] 王连臻. 镉对小麦苗期生长及生理指标的影响. *安徽农业科学*, 2008, 36(9): 3529-3530.
- [2] 朱志勇, 郝玉芬, 李友军, 刘英杰, 段有强, 李强, 郭甲. 镉对小麦旗叶叶绿素含量及籽粒产量的影响. *核农学报*, 2011, 25(5): 1010-1016.
- [5] 李瑛, 张桂银, 李洪军, 魏静. 有机酸对根际土壤中铅形态及其生物毒性的影响. *生态环境*, 2004, 13(2): 164-166.
- [7] 蓝兰, 喻华, 冯文强, 秦鱼生, 胡坤, 廖鸣兰, 王昌全, 涂仕华. 不同中微量及有益元素对小麦吸收镉的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 54-58.
- [8] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 朱光旭, 朱捍华, 刘胜平. 石灰和海泡石对镉污染土壤的修复效应与机理研究. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 111-116.
- [9] 詹绍军, 喻华, 冯文强, 秦鱼生, 廖鸣兰, 王昌全, 涂仕华. 不同有机物料与石灰对小麦吸收镉的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 214-217, 231-231.
- [11] 熊明礼. 石灰对土壤吸附镉行为及有效性的影响. *环境科学研究*, 1994, 7(1): 35-38.
- [22] 王正芳, 郑正, 罗兴章, 张继彪, 聂耳, 浦君梅. 互花米草活性炭对镉的吸附. *环境化学*, 2011, 30(6): 1081-1086.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 14 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

A review of the researches on *Alectoris* partridge SONG Sen, LIU Naifa (4215)

Autecology & Fundamentals

Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China YAN Hui, WU Qian, DING Jia, et al (4226)

Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al (4237)

Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions CAI Miao, DONG Yanjie, LI Baijun, et al (4248)

The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al (4257)

Interannual variation of soil seed bank in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the Tianshan Mountains LI Huadong, PAN Cunde, WANG Bing, et al (4266)

Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole LI Lingli, GUO Hongxia, HUANG Genghua, et al (4278)

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat ZHOU Xiangyu, FENG Wenqiang, QIN Yusheng, et al (4289)

Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin, LI Yingchun, et al (4297)

Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice LIU Danqing, CHEN Xue, YANG Yazhou, et al (4306)

Effects of low-light stress on maize ear development and endogenous hormones content of two maize hybrids (*Zea mays* L.) with different shade-tolerance ZHOU Weixia, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (4315)

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize JIAO Nianyuan, NING Tangyuan, YANG Mengke, et al (4324)

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis HUANG Jingjing, JING Jialin, CAO Dechang, et al (4331)

Impact of vegetation interannual variability on evapotranspiration CHEN Hao, ZENG Xiaodong (4343)

Mating behavior of *Pachycrepoides vindemmiae* and the effects of male mating times on the production of females SUN Fang, CHEN Zhongzheng, DUAN Bisheng, et al (4354)

Component analysis and bioactivity determination of fecal extract of *Locusta migratoria tibetensis* (Chen) WANG Haijian, LI Yili, LI Qing, et al (4361)

Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) LI Xia, XU Xiuxiu, HAN Lanzhi, et al (4370)

Population, Community and Ecosystem

Genetic structure of the overwintering Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) collections in Shandong of China based on *mtCOII* gene sequences LI Lili, YU Yi, GUO Dong, TAO Yunli, et al (4377)

The structure and diversity of insect community in Taihu Wetland HAN Zhengwei, MA Ling, CAO Chuanwang, et al (4387)

Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River WANG Chao, LAI Zini, LI Xinhui, et al (4398)

Effect of species dispersal and environmental factors on species assemblages in grassland communities WANG Dan, WANG Xiao'an, GUO Hua, et al (4409)

- Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: a preliminary result YANG Lina, ZHAO Yunge, MING Jiao, et al (4416)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern WANG Siyi, OU Minghao (4425)
- Fragmentation process of wetlands landscape in the middle reaches of the Heihe River and its driving forces analysis ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, ZHAO Haili, et al (4436)
- Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000—2010 LUO Chengfeng, XU Changjun, YOU Haoyan, et al (4450)
- Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province LI Haifang, WEI Wei, CHEN Jin, et al (4460)
- Effects of host density on parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids in different agricultural landscapes GUAN Xiaoqing, LIU Junhe, ZHAO Zihua (4468)
- Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora* SHI Yaohui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (4478)
- Resource and Industrial Ecology**
- Eco-service efficiency assessment method of urban land use: a case study of Changzhou City, China YANG Wenrui, LI Feng, WANG Rusong, et al (4486)
- Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City WANG Huina, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (4495)
- Research Notes**
- Intercropping enhances the farmland ecosystem services SU Benying, CHEN Shengbin, LI Yonggeng, et al (4505)
- Assessment indicator system of eco-industry in mining area WANG Guangcheng, WANG Huanhuan, TAN Lingling (4515)

《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,探索生态学奥秘,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 骆世明

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 14 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 14 (July, 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