

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **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



# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

## 目 次

|                                                               |                         |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....                           | 华 尔, 李 佳, 董 洁, 等 (3975) |
| 植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系 .....                                    | 黎 磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)    |
| 基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....                                  | 李继峰, 李仁杰 (3998)         |
| 基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....                         | 杨 谨, 陈 彬, 刘耕源 (4007)    |
| 内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....                                    | 颜 亮, 周广胜, 张 峰, 等 (4017) |
| 典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....                                        | 裴 厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025) |
| 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....                                  | 巫 涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034) |
| 厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性 .....                               | 姜 攀, 王明元 (4043)         |
| Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系 .....               | 贾 夏, 董岁明, 周春娟 (4052)    |
| 凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构 .....                                 | 赵 丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062) |
| 盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....                              | 卢鑫萍, 杜 茜, 闫永利, 等 (4071) |
| 菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响..... | 张 林, 丁效东, 王 菲, 等 (4079) |
| 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....                               | 王维奇, 王 纯, 曾从盛, 等 (4087) |
| 高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....                                     | 武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094) |
| 模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响 .....                             | 吴 林, 苏延桂, 张元明 (4103)    |
| 铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化 .....                       | 濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114) |
| 不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....                               | 周 玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123) |
| 基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....                               | 张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132) |
| 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....                             | 李 志 (4139)              |
| 莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....                                      | 邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146) |
| 不同蚯蚓采样方法对比研究.....                                             | 范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154) |
| 亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....                                       | 涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160) |
| 黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....                                     | 赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166) |
| 苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....                                 | 骆 颖, 凌 冰, 谢杰峰, 等 (4173) |
| 长江口中国花鲈食性分析.....                                              | 洪巧巧, 庄 平, 杨 刚, 等 (4181) |
| 基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....                              | 苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191) |
| 镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理 .....                          | 曹 慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)    |
| 北方草地牛粪中金龟子的多样性.....                                           | 樊三龙, 方 红, 高传部, 等 (4207) |
| 合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....                               | 杨 林, 郭 骅, 毕守东, 等 (4215) |
| 植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....                     | 张 跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228) |
| 基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....                                    | 杨丽花, 佟连军 (4236)         |
| 基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....                         | 齐 静, 陈 彬, 戴 婧, 等 (4246) |
| <b>专论与综述</b>                                                  |                         |
| 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述 .....                                   | 章光新 (4254)              |
| 松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展 .....                                    | 马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261) |
| 一种新的景观扩张指数的定义与实现 .....                                        | 武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)    |
| <b>研究简报</b>                                                   |                         |
| 华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....                                        | 李 倩, 王 明, 王雯雯, 等 (4278) |
| 美丽海绵提取物防污损作用.....                                             | 曹文浩, 严 涛, 刘永宏, 等 (4285) |

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 306 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 37 \* 2012-07



**封面图说:** 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

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

DOI: 10.5846/stxb201106060756

贾夏, 董岁明, 周春娟. Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系. 生态学报, 2012, 32(13): 4052-4061.  
Jia X, Dong S M, Zhou C J. Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exudating from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4052-4061.

## Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系

贾 夏\*, 董岁明, 周春娟

(长安大学环境科学与工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 采用土壤盆栽试验法研究了 Cd、低于国家“土壤环境质量标准”规定的 II 类土壤环境基准值 300 mg/kg 干土时的 Pb 与 Cd 复合处理对冬小麦幼苗根系分泌物总酚酸和简单糖类及其与根际土壤微生物活性关系的影响特征。结果表明: 1) 冬小麦幼苗生长 3 周时, 随 Cd 浓度的升高, 根系简单糖类的分泌量表现为降低-增加-降低现象, 而酚酸分泌量主要表现为显著 ( $P < 0.05$ ) 增加; 幼苗生长 7 周时, 简单糖类分泌量极显著 ( $P < 0.01$ ) 降低, 酚酸分泌量表现为降低-增加-降低现象; 幼苗生长 12 周时, 简单糖类分泌量在  $Cd \leq 50.00$  mg/kg 干土时降低,  $Cd$  浓度为 70.00 mg/kg 干土时极显著 ( $P < 0.01$ ) 增加, 酚酸分泌量在  $Cd \leq 20.00$  mg/kg 干土时降低,  $Cd > 20.00$  mg/kg 干土时增加。2) 低于国家“土壤环境质量标准 (GB15618—1995)”规定的 II 类土壤环境基准值 (300 mg/kg) 时, Pb 的存在会对 Cd 胁迫下冬小麦根系酚酸和简单糖类分泌特征有明显影响, 主要表现为可使 Cd 处理下幼苗根系酚酸分泌量增加, 而简单糖类分泌量降低。3) 低 Pb/Cd 处理与 Cd 处理之间, 冬小麦幼苗根系酚酸和简单糖类分泌量与细菌、真菌和放线菌数量、脲酶、转化酶和脱氢酶活性、有机质和全氮含量、微生物量碳等根际土壤微生物生化活性之间的相关性特点明显不同。

**关键词:** 低浓度 Pb; Cd; 冬小麦; 根系分泌物; 根际土壤微生物活性

## Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exudating from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity

JIA Xia\*, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan

College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

**Abstract:** The study explored the effects of Cd and the combined pollution of the low dose of Pb ( $< 300$  mg/kg dry weight soil) and Cd on the content of phenolic acid and simple glucides exudating from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity. Five levels of Cd, five levels of the combined pollution of Pb and Cd, and the control without the addition of heavy metal (0.00 mg/kg dry weight soil) were selected to examine the response of them through pots experiments at the third, seventh, and twelfth weeks after seedlings emerged. The result indicated that: 1) Compared to the control, the content of simple glucides decreased-increased-decreased and it of phenolic acid significantly ( $P < 0.05$ ) increased when wheat seedlings had grown for three weeks with the increase of Cd concentration. And the content of simple glucides significantly ( $P < 0.01$ ) decreased and it of phenolic acid decreased-increased-decreased at the seventh week. The content of simple glucides decreased at  $Cd \leq 50.00$  mg/kg dry soil and significantly ( $P < 0.01$ ) increased at 70.0 mg/kg dry soil Cd. However, phenolic acid content decreased at  $Cd \leq 20.00$

**基金项目:** 国家自然科学基金 (31000222); 中央高校基金 (CHD2009JC144, CHD2012JC041)

**收稿日期:** 2011-06-06; **修订日期:** 2011-11-18

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

mg/kg dry soil and increased at  $\text{Cd} > 20.00 \text{ mg/kg dry soil}$ . 2) Low doses of  $\text{Pb}^{2+} (< 300 \text{ mg/kg})$  significantly affected the response character of simple glucides and phenolic acid contents to the stress of Cd. Furthermore, it mainly exhibited that the phenolic acid content increased and simple glucides content decreased under the stress of Pb/Cd. 3) Between Pb/Cd and Cd, the correlation character was different between contents of simple glucides and phenolic acid and rhizosphere soil microbial activities such as the number of soil bacterial, fungi, and actinomycetes, soil urease, invertase, and dehydrogenase activities, the content of soil organic matter and total nitrogen, and soil microbial biomass carbon.

**Key Words:** low concentration Pb; Cd; winter wheat; exudates; rhizosphere soil microbial activity

土壤重金属污染会直接影响植物根系生长发育行为,与其它重金属相比,Pb、Cd 是最严重而普遍且毒性很强的污染物,单纯的 Cd 或 Pb 较少见,二者常相伴存在<sup>[1]</sup>,全世界每年向环境释放的镉达 30000 吨左右,且 82%—94% 的镉会进入到土壤中,而我国每年由工业废弃物排放到环境中的 Cd 总量约 680 余吨<sup>[2]</sup>,截止 2005 年 Cd 污染耕地面积就已达 1.33 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>,对土壤生态功能、植物生长及其根际土壤生态系统的安全性和稳定性构成了极大威胁,目前单独 Pb、Cd 污染对土壤微生物活性、植物生长、根系分泌物等影响的研究较多<sup>[4-5]</sup>,此外,亦有诸多研究涉及到 Pb、Cd 共存时对植物生长特征及其在植物-土壤系统中迁移特征等<sup>[6]</sup>,但二者共存是否会影响植物根际土壤生态系统功能,目前的研究还未见或较少见。

小麦作为全世界最重要的粮食作物,其产量和品质直接影响到人类饮食水平的提高和健康安全。Pb、Cd 污染对小麦的影响首先可能会表现在对其根系生长及分泌物质行为等方面,而根系分泌物的变化直接影响到小麦根际土壤微生物种群数量特征及土壤酶活性的变化,进而影响到土壤有机质和矿质元素的转化,最终影响到小麦对营养元素的吸收利用和产品品质以及土壤可持续生产力等问题。目前有关 Pb、Cd 对小麦根系分泌物的研究较多,但多数研究采用水培法和沙培法收集根系分泌物<sup>[7-8]</sup>,而这种研究方法会使分泌物的分泌量和种类可能与原位土壤中存在很大差异,不能真实地反映根系在土壤中分泌物质的实际特征;此外,关于重金属 Pb 浓度的选择涉及的是高于国家“土壤环境质量标准”Ⅱ类标准的限量值(300 mg/kg 干土)时对作物根系分泌物质的影响特征,但依据目前的研究结果可以看出土壤 Pb 浓度在国家限量值范围内时会对 Cd 在小麦植株体内的积累有促进作用<sup>[9]</sup>,同时也发现低浓度 Pb 对小麦根的生长、根系 SOD 酶等具有明显的影响<sup>[10-11]</sup>,而低于 300 mg/kg 干土的 Pb 当与 Cd 共存时是否亦会对植物根系分泌物产生影响,对于植物根际土壤生态系统的安全性和稳定性具有重要意义。鉴于植物根系分泌物对根际土壤肥力状况及土壤生态功能的维持具有重要意义,本研究采用土培收集根系分泌物的方法探讨了在国家“土壤环境质量标准(GB 15618—1995)”Ⅱ级质量标准 Pb 限量值(300 mg/kg 干土)范围内而高于欧盟建议的“土壤环境质量建议标准”中铅污染标准临界值(50 mg/kg 干土)背景下,Cd、Pb/Cd 处理对冬小麦幼苗根系酚酸和简单糖类分泌量的影响及其与根际土壤微生物活性的关系特征,以期为正确评价土壤 Cd、PbCd 污染条件下冬小麦根际土壤生态系统的安全性和稳定性提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为小偃 22 号,幼苗半匍匐,分蘖力较强,叶色浅,叶片较长,株高 88cm,株型较紧凑。

供试土壤类型为棕壤,其基本理化性质采用常规方法进行测定<sup>[12]</sup>,测定结果见表 1。

### 1.2 盆栽试验设计

依据我国“土壤环境质量标准(GB 15618—1995)”和欧盟建议的“土壤环境质量建议标准”中铅污染标准的临界值(50 mg/kg 干土),土壤 Cd 处理设置浓度为 0.00、5.00、10.00、20.00、50.00、70.00 mg/kg 干土,依次编号 CK、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>,低 Pb/Cd 处理设置浓度为 0.00/0.00、50.00/5.00、80.00/10.00、120.00/20.00、

180.00/50.00、230.00/70.00 mg/kg 干土,依次编号 CK、T<sub>6</sub>、T<sub>7</sub>、T<sub>8</sub>、T<sub>9</sub>、T<sub>10</sub>。采用盆(盆高 46 cm,直径 36 cm)栽试验进行冬小麦幼苗的培育。采用多点混合采样法于陕西关中冬小麦产区采集盆栽土壤样品,分别于 8 处采集 0—20cm 层土壤,去掉大的根系等杂物后风干,过 1 mm 筛并充分混匀后备用。土壤污染处理采取向目标土壤中添加外源污染物形式,同时测定土壤含水量用以计算添加重金属的量和保持各处理土壤含水量一致,进行不同浓度梯度的土壤 Cd 和 Pb/Cd 复合处理,平衡半个月后装盆,每盆装土 15 kg,浇水使土壤含水量为田间最大持水量的 60%,于 2010 年 10 月 1 日种植冬小麦,每盆定植 200 棵冬小麦幼苗。整个幼苗生长期用自来水浇灌,使土壤水分含量达到田间最大持水量的 60%,盆栽小麦露天放置。每处理均设置 3 个重复。

表 1 供试土壤基本理化性质  
Table 1 Basic physical and chemistry properties of soil

| 土壤类型<br>Soil type | 有机质<br>Organic matter<br>/(g/kg) | 总 N<br>Total N/<br>/(g/kg) | 有效 P<br>Available P<br>/(mg/kg) | 可交换 K<br>Exchangeable K<br>/(mg/kg) | 可溶性盐<br>Soluble salt<br>/(g/kg) | pH   | Pb<br>/(mg/kg) | Cd<br>/(mg/kg) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------|----------------|----------------|
| 棕壤 Brown soil     | 17.17                            | 1.12                       | 71.17                           | 575.00                              | 0.74                            | 8.45 | 7.35           | 0.22           |

1.3 分析方法

1.3.1 土壤样品的采集

于冬小麦幼苗生长 3 周、7 周和 12 周采用多点混合法挖取整个冬小麦植株,抖掉根系外围土,剩余的即为根际土样<sup>[13]</sup>,用毛刷刷下根表土并充分混匀后拣去细根等杂物,1 mm 筛并分成两份,一份于 4℃ 保存用于土壤总酚酸含量、简单糖类含量、微生物生物量碳及土壤酶活性的测定,另一份风干用于土壤 C、N 含量的测定。

1.3.2 测定项目与方法

土壤含水量测定采用土壤烘干的方法<sup>[12]</sup>。

土壤总酚酸含量的测定采用福林酚比色法<sup>[14]</sup>。根系总酚酸分泌量以单位土重的对羟基苯甲酸的微克数表示。

土壤简单糖含量的测定采用 3,5-二硝基水杨法<sup>[15]</sup>。根系简单糖类分泌量以单位土重的葡萄糖的微克数表示。

土壤有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸氧化-外加热法测定,土壤全氮采用凯氏定氮法,土壤微生物量 C 采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法<sup>[16]</sup>,土壤呼吸采用改进后的碱液吸收滴定法<sup>[17]</sup>。

多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法,过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,脱氢酶活性采用 TTC(红四氮唑)比色法,碱性磷酸酶活性的测定采用苯磷酸二钠法,脲酶活性的测定采用苯酚钠比色法,转化酶活性采用 3,5-二硝基水杨法,每样重复 3 次,同时对水解酶做无土壤和无基质对照,氧化还原酶做无土壤对照<sup>[18]</sup>。

1.4 数据统计分析

实验数据均为 3 个平行的平均值,采用 SPSS15.0 结合 excel 软件进行显著性检验和相关性分析。

$$\text{根系分泌总酚酸含量} = \text{根际土壤总酚酸量} - \text{空白土壤总酚酸量}$$

$$\text{根系分泌简单糖类含量} = \text{根际土壤简单糖含量} - \text{空白土壤简单糖含量}$$

重金属对根分泌物的影响率可以定量表述为:

$$(\text{处理样品的分泌物含量} - \text{对照样品的分泌物含量}) / \text{对照样品的分泌物含量} \times 100\%$$

$$\text{微生物商} = \text{土壤微生物量 C} / \text{土壤有机质}$$

$$\text{微生物代谢商} = \text{土壤呼吸强度} / \text{土壤微生物量 C}$$

土壤生物肥力学指数 BIF(Biological index of fertility)计算:

$$\text{BIF} = (1.5 \times \text{DH} + k \times 100 \times \text{CA}) / 2$$

式中,  $k$  是系数, 通常取 0.01, 本研究即取 0.01, DH 为脱氢酶活性, CA 为过氧化氢酶活性<sup>[19-21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系酚酸分泌量变化

由表 2 可知, 冬小麦幼苗生长 3 周时, 不同浓度的 Cd 对根系酚酸分泌的影响主要表现为显著促进作用, 且 Cd 浓度为 5.00 mg/kg 时分泌量最高, 比对照增加 28.72%, 而 70.00 mg/kg 干土的 Cd 对根系酚酸分泌量表现为极显著 ( $P < 0.01$ ) 抑制现象; 幼苗生长 7 周时, 随着 Cd 浓度升高根系酚酸分泌量表现为降低-增加-降低现象, Cd 浓度为 5.00 和 50.00 mg/kg 干土时, 酚酸分泌量较对照极显著 ( $P < 0.01$ ) 降低, 且 5.00 mg/kg 干土时酚酸分泌量减少率达 12.49%; 幼苗生长 12 周时, Cd 对根系酚酸分泌在低浓度 ( $Cd \leq 20.00$  mg/kg 干土) 时表现为抑制作用, 高浓度时 ( $Cd > 20.00$  mg/kg 干土) 为促进作用, 其中酚酸分泌量增加率最高时 Cd 浓度为 70.00 mg/kg 干土。

幼苗生长 3 周时, Pb 浓度低于国家“土壤环境质量标准 (GB 15618—1995)” II 级质量标准 (300 mg/kg 干土) 时, 除 50.00 mg/kg 干土的 Pb 可极显著 ( $P < 0.01$ ) 缓减 Cd 对根系酚酸分泌的促进作用外, 其他浓度的 Pb 均显著 ( $P < 0.05$ ) 加强 Cd 对根系酚酸分泌的促进作用; 幼苗生长 7 周时, 除 230.00 mg/kg 的 Pb 和 Cd 复合处理可极显著 ( $P < 0.01$ ) 抑制根系酚酸分泌作用外, 其他浓度的 Pb 均加强 Cd 对酚酸分泌的促进效应; 幼苗生长 12 周时, 50.00 mg/kg 干土的 Pb 可缓减 5.00 mg/kg 干土的 Cd 对根系酚酸分泌的抑制作用, 180.00 mg/kg 干土的 Pb 表现出增强 50.00 mg/kg 干土的 Cd 对酚酸分泌的促进效应, 而其他浓度的 Pb 加强 Cd 对根系酚酸分泌的抑制效应。总体来看, 与同一浓度 Cd 处理相比, Pb 的存在会显著 ( $P < 0.05$ ) 影响 Cd 对冬小麦根系酚酸分泌的影响特征。

表 2 Cd、Pb/Cd 条件下冬小麦幼苗根系酚酸分泌量

Table 2 The content of phenolic acid exuding from winter wheat seedlings roots under the stress of Cd, Pb/Cd

| 样品<br>Samples   | 3 周 Three weeks                                      |                             | 7 周 Seven weeks                                      |                             | 12 周 Twelve weeks                                    |                             |
|-----------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                 | 酚酸含量<br>Phenolic acid<br>content/( $\mu\text{g/g}$ ) | 影响率<br>Influence<br>ratio/% | 酚酸含量<br>Phenolic acid<br>content/( $\mu\text{g/g}$ ) | 影响率<br>Influence<br>ratio/% | 酚酸含量<br>Phenolic acid<br>content/( $\mu\text{g/g}$ ) | 影响率<br>Influence<br>ratio/% |
| CK              | 6.59 $\pm$ 0.03Aa                                    |                             | 4.60 $\pm$ 0.03A                                     |                             | 10.84 $\pm$ 0.04A                                    |                             |
| T <sub>1</sub>  | 8.48 $\pm$ 0.01B                                     | +28.72                      | 4.02 $\pm$ 0.04B                                     | -12.49                      | 9.84 $\pm$ 0.02B                                     | -9.27                       |
| T <sub>2</sub>  | 6.64 $\pm$ 0.02Ab                                    | +0.71                       | 4.82 $\pm$ 0.03C                                     | +4.84                       | 9.95 $\pm$ 0.05C                                     | -8.25                       |
| T <sub>3</sub>  | 7.70 $\pm$ 0.04C                                     | +16.84                      | 5.06 $\pm$ 0.03D                                     | +9.99                       | 10.77 $\pm$ 0.03A                                    | -0.66                       |
| T <sub>4</sub>  | 7.52 $\pm$ 0.02D                                     | +14.07                      | 4.27 $\pm$ 0.06E                                     | -7.12                       | 10.89 $\pm$ 0.06A                                    | +0.46                       |
| T <sub>5</sub>  | 6.27 $\pm$ 0.01E                                     | -4.82                       | 4.72 $\pm$ 0.03F                                     | +2.76                       | 12.90 $\pm$ 0.05D                                    | +19.02                      |
| T <sub>6</sub>  | 7.06 $\pm$ 0.05F                                     | +7.11                       | 4.95 $\pm$ 0.01G                                     | +7.72                       | 10.15 $\pm$ 0.06E                                    | -6.43                       |
| T <sub>7</sub>  | 7.34 $\pm$ 0.01G                                     | +11.41                      | 5.88 $\pm$ 0.05H                                     | +27.99                      | 9.77 $\pm$ 0.04B                                     | -9.92                       |
| T <sub>8</sub>  | 9.18 $\pm$ 0.02H                                     | +39.23                      | 5.26 $\pm$ 0.02I                                     | +14.48                      | 10.38 $\pm$ 0.07F                                    | -4.28                       |
| T <sub>9</sub>  | 8.25 $\pm$ 0.04I                                     | +25.22                      | 4.64 $\pm$ 0.02J                                     | +0.97                       | 11.17 $\pm$ 0.05G                                    | +3.02                       |
| T <sub>10</sub> | 6.69 $\pm$ 0.03Ac                                    | +1.43                       | 3.65 $\pm$ 0.03K                                     | -20.60                      | 10.14 $\pm$ 0.06E                                    | -6.52                       |

“+”表示促进作用, “-”表示抑制作用; 表中同列不同小写字母表示 0.05 水平差异显著, 不同大写字母表示 0.01 水平差异显著

### 2.2 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系糖类分泌量变化

由表 3 可知, 幼苗生长 3 周时, 单一 Cd 处理下冬小麦幼苗根系简单糖类分泌量随着 Cd 浓度的增加表现为降低-增加-降低的趋势, 且影响极显著 ( $P < 0.01$ ), 其中 5.00 mg/kg 干土的 Cd 对根系简单糖类分泌的抑制性最强, 抑制率为 81.89%; 幼苗生长 7 周时, 不同浓度的 Cd 对根系简单糖类的分泌表现出极显著 ( $P < 0.01$ ) 抑制作用, 抑制率最高的 Cd 浓度为 50.00 mg/kg 干土; 幼苗生长 12 周时, Cd 对冬小麦根系简单糖类的分泌在低浓度 ( $Cd \leq 50.00$  mg/kg 干土) 时主要表现为抑制作用, 而 70.00 mg/kg 干土时却表现出极显著 ( $P < 0.01$ ) 促进作用。

幼苗生长 3 周时, 除 50.00 mg/kg 干土的 Pb 可极显著 ( $P < 0.01$ ) 缓减 Cd 对根系简单糖类分泌的抑制作

用外,其他浓度的 Pb/Cd 处理均极显著( $P<0.01$ )抑制简单糖类的分泌量;幼苗生长 7 周时,80.00 和 120.00 mg/kg 干土的 Pb 可极显著( $P<0.01$ )加强 Cd 对根系简单糖类分泌的抑制作用,而其他浓度的 Pb 极显著( $P<0.01$ )缓减 Cd 的影响效应;幼苗生长 12 周时,50.00 和 80.00 mg/kg 干土的 Pb 极显著( $P<0.01$ )缓减 5.00 和 10.00 mg/kg 干土的 Cd 对冬小麦根系简单糖类分泌的抑制作用,其他浓度的 Pb 可显著( $P<0.05$ )加重 Cd 的抑制效应。总体来看,与酚酸分泌特征相似,Pb 的存在会显著( $P<0.05$ )影响 Cd 对冬小麦根系简单糖类分泌的影响特征。

表 3 Cd、Pb/Cd 条件下冬小麦幼苗根系简单糖类分泌量  
Table 3 The content of simple glucides exudating from winter wheat seedlings roots under the stress of Cd,Pb/Cd

| 样品<br>Samples   | 3 周 Three weeks                                          |                             | 7 周 Seven weeks                                          |                             | 12 周 Twelve weeks                                        |                             |
|-----------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                 | 简单糖类含量<br>Simple glucides<br>content/( $\mu\text{g/g}$ ) | 影响率<br>Influence<br>ratio/% | 简单糖类含量<br>Simple glucides<br>content/( $\mu\text{g/g}$ ) | 影响率<br>Influence<br>ratio/% | 简单糖类含量<br>Simple glucides<br>content/( $\mu\text{g/g}$ ) | 影响率<br>Influence<br>ratio/% |
| CK              | 41.14 $\pm$ 0.09Aa                                       |                             | 33.93 $\pm$ 0.06Aa                                       |                             | 53.41 $\pm$ 0.04A                                        |                             |
| T <sub>1</sub>  | 7.45 $\pm$ 0.03B                                         | -81.89                      | 30.00 $\pm$ 0.03Ab                                       | -11.58                      | 21.74 $\pm$ 0.06B                                        | -145.69                     |
| T <sub>2</sub>  | 47.24 $\pm$ 0.05C                                        | +14.83                      | 22.21 $\pm$ 0.06Bc                                       | -34.52                      | 30.28 $\pm$ 0.03Ca                                       | -43.30                      |
| T <sub>3</sub>  | 53.31 $\pm$ 0.10D                                        | +29.59                      | 25.78 $\pm$ 0.05Bd                                       | -24.00                      | 53.60 $\pm$ 0.04A                                        | +0.49                       |
| T <sub>4</sub>  | 31.18 $\pm$ 0.09Eb                                       | -24.21                      | 9.62 $\pm$ 0.06C                                         | -71.65                      | 34.02 $\pm$ 0.02Cb                                       | -36.30                      |
| T <sub>5</sub>  | 28.01 $\pm$ 0.02Ec                                       | -31.91                      | 16.39 $\pm$ 0.05D                                        | -51.70                      | 91.77 $\pm$ 0.08D                                        | +71.81                      |
| T <sub>6</sub>  | 38.58 $\pm$ 0.08Ab                                       | -6.22                       | 74.59 $\pm$ 0.11E                                        | +119.86                     | 54.93 $\pm$ 0.05A                                        | +2.85                       |
| T <sub>7</sub>  | 26.80 $\pm$ 0.04Ec                                       | -34.86                      | 17.49 $\pm$ 0.05D                                        | -48.45                      | 35.52 $\pm$ 0.04Cb                                       | -33.50                      |
| T <sub>8</sub>  | 30.02 $\pm$ 0.03Eb                                       | -27.03                      | 17.92 $\pm$ 0.05D                                        | -47.19                      | 31.15 $\pm$ 0.06Ca                                       | -41.69                      |
| T <sub>9</sub>  | 16.52 $\pm$ 0.04Fc                                       | -59.83                      | 31.45 $\pm$ 0.06Ab                                       | -7.31                       | 15.72 $\pm$ 0.04E                                        | -70.56                      |
| T <sub>10</sub> | 19.77 $\pm$ 0.07Fd                                       | -51.94                      | 33.13 $\pm$ 0.03Aa                                       | -2.34                       | 28.97 $\pm$ 0.07Cc                                       | -45.76                      |

“+”表示促进作用,“-”表示抑制作用;表中同列不同小写字母表示 0.05 水平差异显著,不同大写字母表示 0.01 水平差异显著

2.3 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤微生物数量<sup>[22]</sup>的相关性

由表 4 可知,Cd 处理下,冬小麦根系总酚酸分泌量与根际土壤细菌、真菌和放线菌数量呈极显著( $P<0.01$ )负相关,在低 Pb/Cd 复合处理下根系总酚酸分泌量与根际土壤真菌和放线菌数量呈极显著( $P<0.05$ )负相关,但相关系数较 Cd 处理下降低。

Cd 处理下,冬小麦根系简单糖类分泌量与根际土壤细菌、真菌和放线菌数量显著( $P<0.05$ )负相关,而在低 Pb/Cd 复合处理下简单糖类分泌量与根际土壤细菌和真菌数量的相关方向与 Cd 处理下不同为正相关关系但不显著,与亚硝化菌数量由 Cd 处理下不显著正相关变为极显著( $P<0.01$ )正相关。上述结果表明低于 300.00 mg/kg 干土的 Pb 会影响 Cd 处理下冬小麦根系分泌物和根际土壤微生物种群数量之间的相关性特征。

表 4 Cd/PbCd 条件下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤微生物数量的相关性

Table 4 The correlation between the content of exudates from winter wheat seedlings roots and the number of microorganisms under the stress of Cd/PbCd

| 处理<br>Treatments | 项目<br>Items          | 细菌<br>Bacterial | 放线菌<br>Actinomycetes | 真菌<br>Fungi | 亚硝化菌<br>Nitrosob-acterial | 自生固氮菌<br>Nitrogen-fixing<br>bacterial |
|------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Cd               | 酚酸 Phenolic acid     | -0.624 **       | -0.687 **            | -0.714 **   | 0.294                     | -0.097                                |
|                  | 简单糖类 Simple glucides | -0.483 *        | -0.571 *             | -0.475 *    | 0.320                     | 0.170                                 |
| Pb/Cd            | 酚酸 Phenolic acid     | -0.427          | -0.642 **            | -0.607 **   | 0.061                     | -0.146                                |
|                  | 简单糖类 Simple glucides | 0.245           | 0.153                | -0.030      | 0.544 *                   | 0.037                                 |

“\* \*”表示  $P<0.01$  水平显著,“\*”表示  $P<0.05$  水平显著

## 2.4 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤酶活性的相关性

表 5 给的是 Cd/PbCd 条件下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤酶活性的相关性特点。由此可知, Cd 处理下, 冬小麦根系总酚酸分泌量与根际土壤脲酶、转化酶和脱氢酶活性之间呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 相关性, 其中与脲酶和脱氢酶活性之间呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 负相关, 而与转化酶活性之间呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 在低 Pb/Cd 复合处理下根系总酚酸分泌量与根际土壤酶活性的相关方向与单独 Cd 处理下相比未变, 但相关程度降低, 其中与脱氢酶活性由 Cd 处理下的极显著 ( $P < 0.01$ ) 负相关关系变为显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关。

Cd 处理下, 冬小麦根系简单糖类分泌量与根际土壤脲酶活性呈现显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 低 Pb/Cd 复合处理下简单糖类分泌量与根际土壤脲酶、脱氢酶和多酚氧化酶活性之间的相关方向由 Cd 处理下的负相关变为正相关关系。上述结果表明低于 300.00 mg/kg 干土的 Pb 会影响 Cd 处理下冬小麦根系分泌物和根际土壤酶活性之间的关系特征。

表 5 Cd、Pb/Cd 条件下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤酶活性的相关性

Table 5 The correlation between the content of exudates from winter wheat seedlings roots and the rhizosphere soil enzyme activity under the stress of Cd、Pb/Cd

| 处理<br>Treatments | 项目<br>Items             | 碱性磷酸酶<br>Alkaline<br>phosphatase | 脲酶<br>Urease | 转化酶<br>Invertase | 脱氢酶<br>Dehydrogenase | 多酚氧化酶<br>Polyphenol<br>oxidase | 过氧化氢酶<br>Catalase |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------|
| Cd               | 酚酸 Phenolic acid        | 0.455                            | -0.881 **    | 0.685 **         | -0.743 **            | -0.124                         | 0.422             |
|                  | 简单糖类<br>Simple glucides | 0.229                            | -0.480 *     | 0.361            | -0.449               | -0.147                         | 0.200             |
| Pb/Cd            | 酚酸 Phenolic acid        | 0.396                            | -0.851 **    | 0.673 **         | -0.573 *             | -0.107                         | 0.433             |
|                  | 简单糖类<br>Simple glucides | 0.372                            | 0.057        | 0.146            | 0.262                | 0.267                          | 0.276             |

“\*”表示  $P < 0.01$  水平显著, “\*”表示  $P < 0.05$  水平显著

## 2.5 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤生化性质的关系

由表 6 数据可知, Cd 处理下, 冬小麦根系总酚酸分泌量与根际土壤微生物量碳呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 与土壤有机质含量呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关, 与土壤肥力生物学指数 BIF 之间呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 负相关性; 与 Cd 处理下不同, Pb/Cd 复合处理下根系总酚酸分泌量与微生物量碳表现出显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 与根际土壤全氮和土壤肥力生物学指数 BIF 之间表现为显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关。

表 6 Cd、Pb/Cd 条件下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤生化活性的相关性

Table 6 The correlation between the content of exudates from winter wheat seedlings roots and the soil biochemical activity under the stress of Cd、Pb/Cd

| 处理<br>Treatments | 项目<br>Items             | 微生物量碳<br>Microbial<br>biomass<br>carbon | 土壤呼吸<br>Soil<br>respiration | 微生物<br>代谢商<br>Microbial<br>metabolic<br>quotient | 土壤微<br>生物商<br>Microbial<br>quotient | 全氮<br>Total<br>nitrogen | C/N 比<br>Ratio<br>of C/N | 有机质<br>Soil<br>organic<br>matter | 土壤肥力<br>生物学<br>指数 BIF |
|------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Cd               | 酚酸 Phenolic acid        | -0.579 *                                | 0.067                       | -0.158                                           | -0.045                              | 0.389                   | -0.076                   | 0.634 **                         | -0.729 **             |
|                  | 简单糖类<br>Simple glucides | -0.465                                  | 0.455                       | -0.256                                           | 0.155                               | 0.117                   | -0.038                   | 0.137                            | -0.436                |
| Pb/Cd            | 酚酸 Phenolic acid        | 0.526 *                                 | 0.243                       | -0.224                                           | 0.147                               | -0.524 *                | 0.432                    | 0.903 **                         | -0.560 *              |
|                  | 简单糖类<br>Simple glucides | 0.468 *                                 | -0.215                      | -0.278                                           | 0.140                               | 0.283                   | -0.009                   | 0.007                            | -0.127                |

“\*”表示  $P < 0.01$  水平显著, “\*”表示  $P < 0.05$  水平显著

Cd 处理下, 冬小麦根系简单糖类的分泌量与根际土壤各项生化指标间相关性不显著, 而在 Pb/Cd 复合处理下简单糖类含量与根际土壤微生物量碳却表现出显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关, 且相关方向与 Cd 处理下相反, 同时与土壤呼吸之间亦表现出了相关方向发生变化的特点。上述结果表明低于 300.00 mg/kg 干土的 Pb 会

影响 Cd 处理下冬小麦根系分泌物和根际土壤生化活性之间的关系特征。

### 3 讨论

#### 3.1 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系酚酸和简单糖类分泌特征

根系分泌物是根系对土壤环境生化适应的产物,在生物与生物、生物与环境的相互作用中充当着重要角色,是植物产生化感作用的重要途径,植物在生长过程中,根系从环境中摄取养分的同时,也向环境中分泌质子和离子,并释放大量有机物,任何影响植物生长和生理的因素均会影响根分泌物的数量和种类<sup>[7-8]</sup>。本研究表明,在幼苗生长 3 周时,冬小麦根系简单糖类的分泌量随 Cd 浓度的升高而表现为降低-增加-降低现象,而酚酸分泌量主要表现为显著( $P<0.05$ )增加,简单糖类的分泌特征可能与随着 Cd 浓度的升高冬小麦根系分泌简单糖类的种类可能不同有关,低浓度 Cd 处理下简单糖类分泌量降低可能与其种类可被根际微生物优先利用有关,而随着 Cd 浓度的增加根系分泌简单糖类的种类能被根际微生物利用的数量可能减少,从而导致根际土壤中简单糖类积累量的增加,当 Cd 浓度继续升高时,由于根系分泌简单糖类种类的可能变化引起根际微生物对其利用程度不同,进而又表现出了降低现象,此外,还可能与根际土壤 Cd 的存在状态有关,这与林琦等人的研究结果不同<sup>[8]</sup>;而酚酸分泌量显著( $P<0.05$ )升高的原因可能与其对根际土壤微生物主要起化感作用有关<sup>[23-24]</sup>,从而引起根际土壤中酚酸积累量增加。研究结果表明冬小麦幼苗根系分泌物对 Cd 浓度升高的响应规律未表现出简单的增加或降低现象,这与张玲<sup>[7]</sup>的研究结果不同;幼苗生长 7 周时,Cd 对根系简单糖类的分泌主要表现出极显著( $P<0.01$ )抑制作用,表明随着冬小麦生长时间的延长,根系简单糖类的分泌特征可能与幼苗生长 3 周时不同,其糖的种类易于被根际微生物分解利用,从而表现出降低现象,而对酚酸分泌表现出抑制-促进-抑制作用,与幼苗生长 3 周时存在明显不同,表明 Cd 胁迫下冬小麦幼苗根系分泌酚酸的机理除与根际微生物种群数量及相关土壤酶活性等有关外<sup>[24-25]</sup>,还与幼苗根系生长时间长短及根系氨基酸分泌情况等有关<sup>[26]</sup>;幼苗生长 12 周时,Cd 胁迫下冬小麦根系分泌酚酸和简单糖类的特点比较相似,但分泌行为发生显著变化时 Cd 阈值不同,酚酸分泌的 Cd 阈限值为 20.00 mg/kg 干土,而简单糖类分泌的 Cd 阈限值为 50.00 mg/kg 干土。在冬小麦幼苗生长的不同时期,Cd 对根系简单糖类和酚酸分泌的影响特征不同,可能是随着幼苗生长时间的延长,其根系累积 Cd 能力出现差异<sup>[27]</sup>,此外,随着冬小麦生长时间的延长,其根际土壤游离 Cd 浓度的可能不同亦会引起以根系分泌物为底物的根际微生物数量和种群结构的差异,从而在幼苗的 3 个生长阶段,表现出不同浓度的 Cd 对其根系简单糖类和酚酸分泌的影响差异性特征,而幼苗在不同生长时间其本身的生理状态也是引起根系酚酸和简单糖类分泌差异性的另一原因。总体来看,Cd 胁迫下冬小麦幼苗根系酚酸和简单糖类的分泌未表现出严格的浓度剂量效应,表明在类似于大田种植方式下 Cd 对冬小麦幼苗根系分泌物行为的影响较水培或沙培条件<sup>[7-8]</sup>复杂的多,因此将水培和沙培条件的研究结果直接用于重金属土壤污染的风险评估具有很大偏差的可能性。

尽管目前研究表明低剂量 Pb 对植物生长和生理生化特征未表现出明显的影响特征<sup>[14-15]</sup>,但当与 Cd 共存时却表现出影响植物生长的效应<sup>[13]</sup>,如本研究亦表明,低浓度 Pb (<300 mg/kg) 主要表现出显著增强 Cd 对酚酸和简单糖类分泌特征的影响,这可能与 Pb 对植物根系生长的影响有关,如有研究表明 Pb 可刺激艾叶草根系伸长和生物量增加及大量须根的形成<sup>[28]</sup>,这种现象亦可能出现在冬小麦根系中,从而表现出加强 Cd 的影响效应,此外低浓度 Pb 亦可能直接引起以根系分泌物为底物的根际土壤微生物种群结构及活性发生改变,这也是 Pb 加强 Cd 对根系酚酸分泌特征影响的另一因素,同时亦有采用水培法研究表明 Pb 的存在可使小麦根际 pH 值升高,而 Cd 处理使小麦根际 pH 值降低<sup>[8]</sup>,当二者复合后可能由于其浓度的差异性及土培法的复杂性亦是冬小麦根系酚酸、简单糖类的分泌对低 Pb/Cd 响应特征的一个可能原因。

#### 3.2 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系分泌物与根际土壤微生物活性关系

研究表明,Cd 处理下冬小麦根系酚酸分泌量和根际土壤细菌、真菌和放线菌数量呈极显著( $P<0.01$ )负相关关系,而其与有机碳的极显著( $P<0.01$ )正相关、与微生物量碳的显著( $P<0.05$ )负相关和与土壤生物学肥力指数的极显著( $P<0.01$ )负相关,表明 Cd 处理下根系分泌物酚酸对其根际土壤微生物主要起化感抑制作

用<sup>[29-30]</sup>,从而表现出这种关系,此外,分泌物中酚酸含量与根际土壤脲酶和脱氢酶活性呈极显著( $P < 0.01$ )负相关,而与转化酶活性呈极显著( $P < 0.01$ )正相关,同样表明 Cd 胁迫下酚酸主要起化感作用,而不是以微生物可利用碳源的种类而存在,由于脱氢酶是胞内酶,只有微生物数量丰富时其活性才高<sup>[31]</sup>,而转化酶的底物主要是能被微生物以优质碳源利用的蔗糖<sup>[32]</sup>,而微生物数量的降低即会有大量转化酶底物的剩余,从而表现出酚酸含量和转化酶之间极显著正相关关系。简单糖类与根际土壤细菌、真菌和放线菌数量之间的显著( $P < 0.05$ )负相关可能与根系分泌酚酸的种类有关,如果酚酸以化感抑制物而存在,则会掩盖简单糖类物质对根际微生物的碳源刺激作用<sup>[33]</sup>,即可能会表现出这种负相关关系。

此外,低 Pb( $< 300 \text{ mg/kg}$ )显著影响根系酚酸和简单糖类分泌量与根际土壤细菌、真菌和放线菌数量、土壤脲酶、转化酶和脱氢酶活性、有机质和全氮含量、微生物量碳等根际土壤微生物生化活性之间的相关性特征,表明 Pb 浓度在低于国家“土壤环境质量标准(GB15618—1995)”规定的Ⅱ类土壤环境基准值范围时,仍会明显影响 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤微生态系统功能的影响特征。尽管土壤重金属污染多以单一重金属为主,但当有低浓度的其它重金属离子共存时是否加重或减轻这一主要重金属离子污染对植物生长发育及相关土壤生化功能的影响是一亟需研究的问题,正如本研究结果显示即使低于国家限量值的 Pb 仍然会改变 Cd 对冬小麦幼苗根际土壤生态功能的影响特征,例如亦有研究表明低于环境标准的 Pb 对油麦菜、荆芥等的生长表现出一定的抑制作用<sup>[34]</sup>,因此在制定土壤环境质量关于重金属基准值或阈值时应该考虑复合污染和单污染对作物生物学功能及适用的作物种类等问题,即对于同一类作物分别应该有单一污染和复合污染时的基准值或阈值,此外还应该考虑土壤生态功能所能承载的最大污染量和最小污染量,以及地区降水量、土壤结构及类型和土壤理化特征等众多因素在重金属对土壤生态功能的影响特征中的作用,这些因素对于作物安全生产、土壤环境质量保护及维持良好的农田土壤生态系统和土壤可持续生产力具有重要意义,当然这项工作的进行还需要更多更细致的研究工作。

#### 4 结论

通过 Cd、Pb/Cd 处理下冬小麦幼苗根系总酚酸和简单糖类分泌量及其与根际土壤微生物活性关系的研究结果表明:

1) Cd 对冬小麦幼苗根系酚酸和简单糖类的分泌量影响显著( $P < 0.05$ ),且在幼苗的不同生长时期,根系酚酸和简单糖类分泌量对不同浓度 Cd 胁迫的响应特征不同。

2) Pb 浓度在低于国家“土壤环境质量标准(GB15618—1995)”规定的Ⅱ类土壤环境基准值( $300 \text{ mg/kg}$ )范围时会显著影响 Cd 对冬小麦幼苗根系分泌物行为的影响特征,且主要表现为加强效应。

3) 冬小麦幼苗根系酚酸和简单糖类分泌量与根际土壤细菌、真菌和放线菌数量、土壤脲酶、转化酶和脱氢酶活性、有机质和全氮含量、微生物量碳等根际土壤微生物生化活性之间的相关性特征在 Pb/Cd 处理与单独 Cd 处理之间明显不同。

#### References:

- [1] Meng Z Q. Environmental Toxicology. Beijing: China Environment Science Press, 2000, 128-139.
- [2] Zhang C. “Cadmium” life of the road-the cadmium pollution endangering China’s rice, Discover, 2010-88. [2011-06-07]. <http://discover.news.163.com/special/cadmium/>.
- [3] Cui Y S, Chen X C. Bioaccessibility of soil cadmium and its health risk assessment. Environmental Science, 2010, 31(2): 403-408.
- [4] Renella G, Mench M D, Lelie V D. Hydrolase activity, microbial biomass and community structure in long-term Cd-contaminated soils. Soil Biology & Biochemistry. 2004, 36: 443-451.
- [5] Liao Y C, Chang Chien S W, Wang M C, Shen Y, Hung P L, Das B. Effect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere. Chemosphere, 2006, 65(2): 343-351.
- [6] Xu Z J, Wu C H, Qiu X Y, Zhang H. Transfer and interaction of Pb, Zn and Cd in soil-mustard/cole systems under multi-pollution conditions. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 1-6.
- [7] Zhang L, Wang H X. Changes of root exudates to cadmium stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 496-502

- [ 8 ] Lin Q, Cheng Y X, Chen H M, Zheng C R. The ecological effects of Pb and Cd on the root activities of wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (4): 634-638.
- [ 9 ] Zhao F Y, Zhai L X, Chen Q, Zhang M Q, Zeng L F. Effect under combined treatment of cadmium and lead on their distribution of plants and physiological indications. *Acta botanica boreali-occidentalia Sinica*, 2002, 22(3): 595-601.
- [ 10 ] Du T Q, Yang J Z, Hao J P, Cui F Z. The pollution monitoring index system of wheat at different growth stages under the stress of Cd, Cr and Pb. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1845-1852.
- [ 11 ] Pang X, Wang D H, Peng A. Effect of lead stress on the activity of antioxidant enzymes in wheat seedling. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2001, 22(5): 108-111.
- [ 12 ] Bao S D. *Agricultural Soil Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [ 13 ] Zhang X H, Wang X X, Zhang E H. Allelopathic effect of phenol 2,4-bis(1,1-dimethylethyl) on microorganism of *Hamulus lupulus* L. (hops) rhizospheric soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1606-1608.
- [ 14 ] Wu E, Xu N, Wen M J. The measurement of total phenolic acids in soil by phosphomolybdic-phosphotungstic acid phenol reagent colorimetry. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(1): 67-72.
- [ 15 ] Feng W T. Soil simple sugars and Amino Acids in an evergreen forest of ailao mountains: effects of above-ground litterfall, below-ground carbon inputs and plant nutrient uptake. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences. Master's Thesis, 2007.
- [ 16 ] Lin Q M, Wu Y G, Liu H L. Modification of Furnigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 63-66.
- [ 17 ] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. The measurement of soil microbial biomass carbon and application. China Meteorological Press, 2006.
- [ 18 ] Guan Y S. *Research Method of Soil Enzyme*. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [ 19 ] Stefanic G, Eliade G, Chirnogeanu I. Researches concerning a biological index of fertility//Nemes M P, Kiss S, Papacostea P, et al. Proceedings of the fifth symposium on soil science. Bucharest, Rumania, 1984: 35-45.
- [ 20 ] Wang H, Huang Y, Wang S L, Zou D S. Soil quality assessment under several typical ecosystems in mid-subtropical region: II. Effects of several typical ecosystems on soil qualities. *Ecology and Environment*, 2009, 18(3): 1107-1111.
- [ 21 ] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-minzi R, Cardelli R. Niochemical properties of a mediterranean soil as affected by long-term crop management systems. *Soil Tillage and Research*, 2002, 67(1): 109-114.
- [ 22 ] Jia X, Zhou C J, Dong S M. Effects of Cd<sup>2+</sup> on the number of rhizospheric soil microbial from winter wheat seedlings. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 246-252.
- [ 23 ] Li S T, Zhou J M, Wang H Y, Chen X Q. Phenolic acids in plant-soil-microbe system: a review. *Pedosphere*, 2002, 12(1): 1-14.
- [ 24 ] Li P D, Wang X X, Li Y L, Wang H W, Liang F Y, Dai C C. The contents of phenolic acids in continuous cropping peanut and their allelopathy. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 2128-2134.
- [ 25 ] Borbely V, Radocz L. Changing of amounts of allelochemicals in Italian cocklebur (*Xanthium italicum* Mor.) during the growing season. *Allelopathy Journal*, 2006, 18(2): 397-403.
- [ 26 ] Wierzbicka M, Panufnik D. The adaptation of *Silene vulgaris* to growth on a calamine waste heap (*S. Poland*). *Environmental Pollution*, 1998, 101(3): 415-426.
- [ 27 ] Liu Q, Chen Y X, Chen H M, Yu Y L, Luo Y M, Wong M H. Chemical behavior of Cd in rice rhizosphere. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 755-761.
- [ 28 ] Batish D R, Singh H P, Pandher J K. Phytotoxic effect of Parthenium residues on the selected soil properties and growth of chickpea and radish. *Weed Biology and Management*, 2002, 2(2): 73-78.
- [ 29 ] Liang X L, Pan K W, Wang J C. Releasing dynamics of phenolic acid during *Zanthoxy lum bungeanum* litter decomposition and effects of its aqueous extract on soil chemical properties. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4676-4684.
- [ 30 ] Hu K H, Luo Q G, Wang S H, Lin X, Lin W X. Effects of allelopathic rice on rhizosphere microbial flora and enzyme activity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 1060-1064.
- [ 31 ] Yu G F, Jiang X, Zhao Z H, Bian Y R. Dehydrogenase activity of Cd and Pb-contaminated soil in the presence of humic substances. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(2): 168-170.
- [ 32 ] Yan Y, Yuan X, Fan H N. Influence of five pesticides on invertase activity in soil. *China Environmental Science*, 2004, 24(5): 588-591.
- [ 33 ] Mao J, Yang L Z, Shi Y M. Crude extract of a stragalus mongholicus root inhibits crop seed germination and soil nitrifying activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(2): 201-284.
- [ 34 ] Zhao Y, Li H J, Wei T T, Sun Z Q. Relationship between soil Pb pollution and Pb contents in vegetables and pollution threshold of soil Pb. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 843-847.

## 参考文献:

- [1] 孟紫强. 环境毒理学. 北京: 中国环境科学出版社, 2000, 128-139.
- [2] 张弛. “镉”命之路——危及中国稻米的镉污染, 发现者, 88 期, [http://discover. news. 163. com/special/cadmium/](http://discover.news.163.com/special/cadmium/)
- [3] 崔岩山, 陈晓晨. 土壤中镉的生物可给性及其对人体的健康风险评估. 环境科学, 2010, 31(2): 403-408.
- [6] 许中坚, 吴灿辉, 邱喜阳, 张华. 铅-锌-镉复合污染在土壤-芥菜/油菜系统中的迁移及交互作用. 水土保持学报, 2007, 21(6): 1-6.
- [7] 张玲, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物变化. 生态学报, 2002, 22(4): 496-502.
- [8] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 郑春荣. 小麦根际铅、镉的生态效应. 生态学报, 2000, 20(4): 634-638.
- [9] 赵菲佚, 翟禄新, 陈荃, 张明泉, 曾福礼. Cd、Pb 复合处理下 2 种离子在植物体内的分布及其对植物生理指标的影响. 西北植物学报, 2002, 22(3): 595-601.
- [10] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 崔福柱. 小麦不同生育时期 Cd、Cr、Pb 污染监测指标体系. 生态学报, 2010, 30(7): 1845-1852.
- [11] 庞欣, 王东红, 彭安. 铅胁迫对小麦幼苗抗氧化酶活性的影响. 环境科学, 2001, 22(5): 108-111.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 张新慧, 王霞霞, 张恩和. 2,4-二叔丁基苯酚对啤酒花根际土壤微生物数量的化感效应研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1606-1608.
- [14] 吴萼, 徐宁, 温美娟. 磷钼酸-磷钨酸盐比色法测定土壤中总酚酸含量. 环境化学, 2000, 19(1): 67-72.
- [15] 冯文婷. 哀牢山常绿阔叶林土壤简单糖类和氨基酸研究——地上凋落物、地下碳输入和植物养分吸收对其的影响. 中国科学院西双版纳热带植物园. 硕士论文, 2007.
- [16] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进. 生态学杂志, 1999, 18(2): 63-66.
- [17] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 气象出版社, 2006.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20] 王华, 黄宇, 汪思龙, 邹冬生. 中亚热带区域几种典型生态系统土壤质量评价 II. 不同生态系统对土壤质量的影响. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1107-1111.
- [22] 贾夏, 周春娟, 董黎明. 重金属 Cd<sup>2+</sup>对冬小麦幼苗根际微生物种群数量的影响. 中国农学通报, 2011, 27(21): 246-252.
- [24] 李培栋, 王兴祥, 李奕林, 王宏伟, 梁飞燕, 戴传超. 连作花生土壤中酚酸类物质的检测及其对花生的化感作用. 生态学报, 2010, 30(8): 2128-2134.
- [28] 梁晓兰, 潘开文, 王进闯. 花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)凋落物分解过程中酚酸的释放及其浸提液对土壤化学性质的影响. 生态学报, 2008, 28(10): 4676-4684.
- [29] 胡开辉, 罗庆国, 汪世华, 林旋, 林文雄. 化感水稻根际微生物类群及酶活性变化. 应用生态学报, 2006, 17(6): 1060-1064.
- [31] 余贵芬, 蒋新, 赵振华, 卞永荣. 腐殖酸存在下镉和铅对土壤脱氢酶活性的影响. 环境化学, 2006, 25(2): 168-170.
- [32] 闫颖, 袁星, 樊宏娜. 五种农药对土壤转化酶活性的影响. 中国环境科学, 2004, 24(5): 588-591.
- [34] 赵勇, 李红娟, 魏婷婷, 孙治强. 土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈值研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 843-847.

CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                      |                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments .....                                                                                                                                 | HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)                  |
| Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for <i>Fagopyrum esculentum</i> populations .....                                                              | LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)                |
| Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity .....                                                                                            | LI Jifeng, LI Renjie (3998)                             |
| Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem: a case study of Gongcheng county .....                                                                                                  | YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)                 |
| Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia .....                                                                                                        | YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)    |
| Soil conservation value flow processes of two typical grasslands .....                                                                                                                                               | PEI Sha, XIE Gadi, LI Shimei, et al (4025)              |
| Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old <i>Pinus massoniana</i> forest ecosystem in Changsha City, China .....                                                                                       | WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)         |
| Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen .....                                                                                                             | JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)                         |
| Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity ..... | JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)             |
| The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve .....                                                                                             | ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)           |
| Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils .....                                                                                  | LU Xiping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)            |
| The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria <i>Bacillus megaterium</i> C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake .....                          | ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)        |
| Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of <i>Phragmites australis</i> wetlands in different reaches in Minjiang River estuary .....                                                           | WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)     |
| Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region .....                                                                                                     | WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)       |
| Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China .....                                                           | WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)                |
| Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of <i>Dendrobium candidum</i> tissue culture seedlings during transplantation .....                                                              | PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)    |
| Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland .....                                                                                              | ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)         |
| Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model .....                                                                                                          | ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)  |
| Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009 .....                                                                                                       | LI Zhi (4139)                                           |
| Eco-physiological responses of <i>Phragmites australis</i> to different water-salt conditions in Momoge Wetland .....                                                                                                | DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146) |
| Comparative study of different earthworm sampling methods .....                                                                                                                                                      | FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)   |
| Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, <i>Ostrinia furnacalis</i> Guenée (Lepidoptera: Crambidae) .....                                                                            | TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinxin, et al (4160)    |
| Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe .....                                                                                                           | ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)      |
| Inhibition effects of ethyl acetate extracts of <i>Momordica charantia</i> leaves on the experimental population of <i>Spodoptera litura</i> .....                                                                   | LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)          |
| Feeding habits of <i>Lateolabrax maculatus</i> in Yangtze River estuary .....                                                                                                                                        | HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)     |
| Genetic structure of <i>Gymnodontichus pachycheilus</i> from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region .....                                                                       | SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)      |
| Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog <i>Rana nigromaculata</i> .....                                                                            | CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)                 |
| The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China .....                                                                                                                                      | FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)       |
| Spatial relationships among <i>Empoasca vitis</i> (Gothé) and <i>Toxoptera aurantii</i> (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban .....                                   | YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)            |
| Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve .....                                                      | ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)        |
| Research of typical EIPs based on the social network analysis .....                                                                                                                                                  | YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)                         |
| Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi .....                                                                                                              | QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)               |
| <b>Review and Monograph</b>                                                                                                                                                                                          |                                                         |
| The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review .....                                                                                                                    | ZHANG Guangxin (4254)                                   |
| Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain .....                                                                                                                           | MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261) |
| A new landscape expansion index: definition and quantification .....                                                                                                                                                 | WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)               |
| <b>Scientific Note</b>                                                                                                                                                                                               |                                                         |
| Response of photosynthetic characteristics of <i>Psathyrostachys huashanica</i> Keng to drought stress .....                                                                                                         | LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)           |
| The antifouling activities of <i>Callyspongia</i> sponge extracts .....                                                                                                                                              | CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)         |

## 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态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13期 (2012年7月)

**ACTA ECOLOGICA SINICA**  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 32 No. 13 (July, 2012)

|      |                            |                 |                                                           |
|------|----------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|
| 编辑   | 《生态学报》编辑部                  | Edited by       | Editorial board of                                        |
|      | 地址:北京海淀区双清路 18 号           |                 | ACTA ECOLOGICA SINICA                                     |
|      | 邮政编码:100085                |                 | Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China |
|      | 电话:(010)62941099           |                 | Tel:(010)62941099                                         |
|      | www.ecologica.cn           |                 | www.ecologica.cn                                          |
|      | shengtaixuebao@rcees.ac.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                    | Sponsored by    | Ecological Society of China                               |
|      | 中国科学院生态环境研究中心              |                 | Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS       |
|      | 地址:北京海淀区双清路 18 号           |                 | Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China |
|      | 邮政编码:100085                |                 |                                                           |
| 出版   | 科学出版社                      | Published by    | Science Press                                             |
|      | 地址:北京东黄城根北街 16 号           |                 | Add:16 Donghuangchenggen North Street,                    |
|      | 邮政编码:100071                |                 | Beijing 100071, China                                     |
| 印刷   | 北京北林印刷厂                    | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,                           |
| 发行   | 科学出版社                      |                 | Beijing 100083, China                                     |
|      | 地址:东黄城根北街 16 号             | Distributed by  | Science Press                                             |
|      | 邮政编码:100717                |                 | Add:16 Donghuangchenggen North                            |
|      | 电话:(010)64034563           |                 | Street, Beijing 100717, China                             |
|      | E-mail:journal@cspg.net    |                 | Tel:(010)64034563                                         |
| 订购   | 全国各地邮局                     |                 | E-mail:journal@cspg.net                                   |
| 国外发行 | 中国国际图书贸易总公司                | Domestic        | All Local Post Offices in China                           |
|      | 地址:北京 399 信箱               | Foreign         | China International Book Trading                          |
|      | 邮政编码:100044                |                 | Corporation                                               |
| 广告经营 | 京海工商广字第 8013 号             |                 | Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                   |
| 许可证  |                            |                 |                                                           |

ISSN 1000-0933

9 771000 093125

1 3>

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