

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                         |                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM <sub>10</sub> 和 PM <sub>2.5</sub> 排放测量 .....                       | 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)              |
| 黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 .....                                                                | 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)         |
| 沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 .....                                                              | 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)                                |
| 南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 .....                                                           | 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)                                 |
| 太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 .....                                                              | 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)                    |
| 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 .....                                                     | 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)               |
| 机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 .....                                                                 | 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)                                |
| DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 .....                                                       | 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)                               |
| 紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 .....                                                             | 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)                       |
| 三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 .....                                                       | 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)                   |
| 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 .....                                                         | 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)                  |
| 高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 .....                                                     | 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093) |
| 不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 .....                                                       | 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)                     |
| 丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 .....                                                        | 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)                      |
| 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 .....                                                  | 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)                      |
| 粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 .....                                                              | 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)          |
| 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 .....                                                       | 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)                               |
| 周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 .....                                                              | 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)                    |
| 溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 .....                                                             | 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)                              |
| 微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 .....                                                               | 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)                                     |
| 城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 .....                                                            | 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)              |
| 两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 .....                                                  | 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)                         |
| 巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) .....                                                               | 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)                               |
| 改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 .....                                                               | 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)                           |
| UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 .....                                                            | 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)                            |
| 对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 .....                                                           | 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)                          |
| 高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 .....                                                             | 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)                               |
| 硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 .....                                                                  | 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)                          |
| 单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 .....                                                      | 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)                    |
| 钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 .....                                                          | 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)                         |
| 城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 .....                                                                | 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)                         |
| 低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 .....                                          | 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)                      |
| 微丝菌 ( <i>Microthrix parvicella</i> ) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 .....                      | 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)                     |
| 基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 .....                                                         | 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)                      |
| 1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 .....                                                           | 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)                               |
| 长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 .....                                                            | 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)                               |
| 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 .....                                                                 | 张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)                                   |
| 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 .....                                                            | 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)                 |
| 多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 .....                                                       | 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)                         |
| 苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 .....                                                                | 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)                               |
| 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 .....                                                            | 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)                      |
| 杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 .....                                                                  | 龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)                     |
| 土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 .....                                                             | 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)                                |
| 添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 .....                                                             | 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)                 |
| 应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 .....                                               | 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)               |
| 不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 .....                                                            | 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)                                     |
| 芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 .....                                                    | 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)                  |
| 维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 .....                                             | 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)                     |
| 苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 .....                                                              | 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)                                  |
| g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 复合物的制备及可见光催化降解 MO ..... | 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)   |
| 海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 .....                                                           | 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)                               |
| 《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)                                     |                                                        |

# 芑胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响

潘声旺<sup>1</sup>, 袁馨<sup>2</sup>, 刘灿<sup>1</sup>, 李亚兰<sup>1,3</sup>, 杨婷<sup>1,4</sup>, 唐海云<sup>1,3</sup>, 黄方玉<sup>1</sup>

(1. 成都大学城乡建设学院, 成都 610106; 2. 中国人民解放军后勤工程学院国防建筑与环境工程系, 重庆 401131; 3. 云南农业大学资源环境学院, 昆明 650201; 4. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 根系分泌物与有机污染物的植物修复过程密切相关, 研究胁迫条件下不同修复潜力植物根系分泌物的释放特征有助于揭示植物修复的内在机制。借助根际袋土培试验研究了芑胁迫 ( $10 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 下 5 种羊茅属植物在不同胁迫期 (30 ~ 70 d) 时根系分泌物中几种低分子量有机物的释放特征。结果表明: ① 芑胁迫促进了根系对可溶性糖的分泌; 随着胁迫水平的升高、胁迫期的延长, 其分泌量呈“先升后降”变化趋势, 胁迫水平为 C3 ( $40.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、胁迫期为 40 d 时达到最大值; 修复潜力越大, 趋势越明显。② 芑胁迫增强了根系对低分子量有机酸的释放, 修复潜力越大, 释放高峰值出现时的胁迫浓度越高, 且主要以草酸、乙酸、乳酸和苹果酸为主 (>98.15%), 但修复潜力较强物种的根系分泌物中也检测到微量反丁烯二酸。③ 芑胁迫对氨基酸的种类影响不大, 但对分泌量影响较大: 苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸的分泌量随着胁迫水平的升高而剧增; 脯氨酸、羟脯氨酸和天冬氨酸对芑胁迫的响应近乎以功能群的形式参与植物修复过程, 参与的组分越多, 修复潜力越强。可见, 芑胁迫下根系分泌物中可溶性糖、低分子量有机酸以及氨基酸的释放特征与植物自身的修复潜力有关; 修复潜力越强, 释放量越多且成分越复杂, 并表现出更强的环境适应性及生理可塑性。

**关键词:** 芑; 羊茅属; 根系分泌物; 低分子量有机物; 种间差异

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2368-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.047

## Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of *Festuca*

PAN Sheng-wang<sup>1</sup>, YUAN Xin<sup>2</sup>, LIU Can<sup>1</sup>, LI Yan-lan<sup>1,3</sup>, YANG Ting<sup>1,4</sup>, TANG Hai-yuan<sup>1,3</sup>, HUANG Fang-yu<sup>1</sup>

(1. Faculty of Urban and Rural Construction, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. Department of National Defense Architecture Planning & Environmental Engineering, Logistical Engineering University of the Chinese People's Liberation Army, Chongqing 401131, China; 3. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Phytoremediation is an important measure to remove organic pollutants from contaminated soil, and the root secretion of plant is considered to be closely related to the mechanisms of phytoremediation of organic pollutants. It is in favor of revealing the mechanisms of remediation by studying the characteristics of root exudates of plants with phytoremediation potential under the stress of pollutants. In the present research, pyrene and five species of *Festuca* which have been testified to be tolerant to pyrene stress were selected as studied objects. A soil-cultivating experiment with rhizobag technique was conducted to investigate the effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of plant species under five concentration levels of pyrene ( $10.19, 20.32, 40.36, 79.94$ , and  $160.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , denoted by C1, C2, C3, C4 and C5, respectively) on day 30, 40, 50, 60 and 70 of experiments. The results showed that the presence of vegetation significantly enhanced the dissipation of pyrene in the soil environment. This effect was especially marked with *Festuca arundinacea*, followed by those with *Festuca mazzetiana*, *Festuca pubiglumis*, and *Festuca longiglumis*, and that with *Festuca stapfii* was the lowest. During the whole experiments, the amounts of soluble sugar excreted by the five species of *Festuca* tested in root exudates were promoted with pyrene stress, then fluctuated with a stable trend along with the increase of stress concentration or the extension of stress period, which appeared to rise appreciably at relative low pyrene spiked (C1-C3) or earlier stress stage (30-40 d) and reduce at relative high pyrene spiked level (C3-C5) or later stress stage (40-70 d), and the highest amount of soluble sugars in root exudates occurred on day 50 of experiments with  $40.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  pyrene treatment. The greater the phytoremediation potential of the plant species tested, the more obvious this trend was. Compared with the control treatment (CK), pyrene stress promoted the root system of all five species of *Festuca* tested to release more low molecular weight organic acids, the stronger the restoration potential of plant species, the higher the concentration of pyrene stress under which the amount of organic acids in root exudates was increased to the peak value. Among the five species of *Festuca* tested, oxalic acid, acetic acid, lactic acid and malic acid were the main components of organic acids in root exudates, with a percentage of greater than 98.15% in all pyrene

收稿日期: 2015-11-18; 修订日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31300439); 四川省教育厅科研项目(16ZA0385)

作者简介: 潘声旺(1973 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: panwang@swu.edu.cn

stress treatments, but there were traces of fumaric acid in the roots secretion of plant species with the stronger restoration potential. Data also indicated that 19 types of amino acids were found in root exudates of *Festuca* and the composition of amino acids in root exudates of *Festuca* was stable under all pyrene stress treatments, but the amino acid amount was different in root exudates under pyrene stress. The amount of all amino acids in those root exudates increased with increasing pyrene concentration, especially, the amount of threonine, serine, glycine, and alanine increased significantly among the 19 types of amino acids and the differences were significant among different treatments with different pyrene concentrations ( $P < 0.05$ ). However, proline, hydroxy proline and aspartic acid were always released in the form of functional group as a response to the pyrene stress, their contents soared quickly with the increase of stress concentration in soils, and the difference was significant among different treatments with different pyrene concentrations ( $P < 0.05$ ); the more the components of functional group participated in stress response, the stronger the restoration potential of plant species. These results indicated secretion characteristics of soluble sugar, low molecular weight organic acids and amino acids in the root system were closely related to their phytoremediation potential under the pyrene stress, the greater the phytoremediation potential, the more the amount of these low molecular weight secretions and the more complex these components, and the stronger the adaptability to polluted environment and the physiological plasticity to adapt to these contaminants.

**Key words:** pyrene; *Festuca*; root exudates; low molecule weight organic compounds; interspecies difference

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是环境中普遍存在的持久性有机污染物<sup>[1]</sup>, 多数具有“三致”效应. 因 PAHs 性质稳定、水溶性差, 易于被土壤颗粒吸附, 环境含量日益攀升<sup>[2]</sup>, 严重威胁着环境质量及其生态安全; 土壤中 PAHs 的迁移、转化行为及其环境效应已成为环境修复领域的研究热点<sup>[3]</sup>.

植物的存在能加快土壤中 PAHs 的去除<sup>[4~6]</sup>, 根系分泌物 (root exudates) 营造的根际环境则是 PAHs 快速消解的重要原因<sup>[7, 8]</sup>. 植物修复过程中, 根系分泌物在改善土壤属性、缓解环境胁迫、提高 PAHs 生物可利用性等方面具有重要作用<sup>[9~11]</sup>; 分泌物中可溶性糖类、低分子量有机酸、氨基酸等物质易于被微生物利用或做为共代谢基质<sup>[12, 13]</sup>. 因不同植物间根系分泌物的主要组分及其释放特征常存在一定差异<sup>[14]</sup>, 对根际微生物的区系结构、代谢活性的影响也不一样, 进而表现出不同的修复潜力<sup>[15, 16]</sup>; 探讨 PAHs 胁迫下不同修复潜力植物间根系分泌物中主要组分的释放特征及其种间差异, 对于揭示植物修复过程中不同植物修复潜力的种间差异具有重要意义<sup>[17]</sup>. 据此, 本研究拟借助根际袋土培法, 对比研究芘胁迫下不同修复潜力的 5 种羊茅属 (*Festuca*) 植物在不同生长期根系分泌物中几种低分子量组分的释放特征, 以期对环境修复过程中科学筛选修复植物、提高修复效率提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 PAHs 代表物

芘 (Pyrene) 是环境中广泛存在的烃类代表物, 也是检测 PAHs 污染的指示物. 本研究选择芘为 PAHs 代表物 (Aldrich 公司产品, 纯度 > 98%).

#### 1.1.2 供试植物

选择 5 种羊茅属植物 [ 苇状羊茅 (*Festuca arundinacea* Schreb)、细芒羊茅 (*Festuca stapfii* E. Alexeev)、昆明羊茅 (*Festuca mazzetiana* E. Alexeev)、毛颖羊茅 (*Festuca pubiglumis* S. L. Lu)、长颖羊茅 (*Festuca longiglumis* S. L. Lu), 购于四川省草原研究所 ] 为供试植物. 将种子经 3%  $H_2O_2$  溶液消毒 20 min、蒸馏水冲洗干净后于烧杯中浸泡吸胀 24 h, 培养皿中恒温 (37℃) 催芽 15 h 后, 播种于根际袋.

#### 1.1.3 供试土壤

中性紫色土, 采自成都大学试验农场 (无污染史,  $47.62 \text{ pg} \cdot \text{L}^{-1}$  检出限下未检测到芘). 理化性质: pH 7.19, 有机质含量  $2.14 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , CEC  $20.43 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效 N、P、K 分别为 31.62、24.74、94.81  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 砂粒、粉粒和黏粒的质量分数分别为 71.27%、9.59% 和 19.14%. 土壤风干后过 2 mm 筛, 备用.

### 1.2 试验方法

土培试验采用根际袋试验装置在智能温室内进行. 试验涉及 3 个处理的 5 个水平 (5 种芘胁迫水平下 5 种植物的 5 个生长期)、重复 3 次. 具体如下: 按照  $150.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  和  $100.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$  比例补充底肥后, 取少量上述过 2 mm 筛后的土壤, 均匀加入芘的丙酮溶液; 待丙酮挥发后, 用未污染土不断稀释、搅拌, 过 2 mm 筛、混匀, 制得 5 个污染水平:  $10.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (C1)、 $20.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (C2)、 $40.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (C3)、 $79.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (C4)、 $160.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (C5). 取 2.00 kg 一定芘含量的上述土样装入 20 cm × 15 cm 的塑料盆钵中, 其中的 400 g 装在 300 目的尼龙网袋中;

尼龙网袋放在盆中央,四周及底部均为同质土样,保持袋内外土壤高度相同. 每种污染水平分装 75 盆, 50% 田间持水量 (water holding capacity, WHC) 于温室中平衡 5 d; 选取籽粒饱满、大小均匀的催芽后种子单播于袋内土壤中,每种植物播种 15 盆、每盆 10 颗,置于温室中;另设一组没有播种的污染土样作为对照,每个处理重复 3 次. 试验期间,日间室温为 25℃、夜间为 18℃,自然光照条件;每 2 d 随机交换盆钵在温室中的位置,WHC 维持在 50% (称重补水法). 播种日记为 0 d,在植物生长 30、40、50、60 和 70 d 时,分别对 5 种芘胁迫水平下的供试植物、土样破坏性取样:连同根际袋小心取出植物幼苗,抖落根际土壤后收集其根系分泌物;充分混匀根际土壤、非根际土壤后,四分法取样,装袋、冷冻干燥,过 1 mm 筛后低温 (-20℃) 保存、分析芘残留量.

### 1.3 根系分泌物收集

取出根际袋,用自来水将根洗净、去离子水冲洗 3 遍后,放入盛有 40 mL Milli-Q 超纯水的烧杯中,自然光照下收集 4 h,用少量高纯水 3 次冲洗根系,冲洗液合并并在根系分泌物中,慢速过滤 (0.45 μm 微孔滤膜)<sup>[18]</sup>. 将收集到的根系分泌物定容至 50 mL,贮于 -20℃ 以下,待分析. 取 10 mL 滤液真空冷冻干燥至干,加 1 mL Milli-Q 超纯水溶解,贮于 -20℃ 以下,用于分析低分子量有机酸. 取 20 mL 滤液真空冷冻干燥至干,加 2 mL Milli-Q 超纯水溶解,贮于 -20℃ 以下,用于分析氨基酸.

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 可溶性糖测定

蒽酮比色法<sup>[18]</sup>. 可溶性糖含量以每千克根(干重)分泌的可溶性糖计, mg·kg<sup>-1</sup>.

#### 1.4.2 低分子量有机酸测定

根系分泌物浓缩液过 0.45 μm 膜后, HPLC 测定,测试条件<sup>[19]</sup>: Agilent 1100 色谱仪, XB-C18 色谱柱,紫外检测器,检测波长为 210 nm,流动相为 0.025 mol·L<sup>-1</sup> 的 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 缓冲液 (pH 2.3),流速为 0.7 mL·min<sup>-1</sup>,进样量为 20 μL,柱温 30℃. 所有样品 3 个重复.

有机酸含量以每 kg 根(干重)分泌的有机酸量计, mg·kg<sup>-1</sup>.

#### 1.4.3 氨基酸测定

根系分泌物浓缩液过 0.45 μm 膜后,采用日立 L-8900 型氨基酸自动分析仪测定. 测试条件<sup>[18]</sup>: 离子交换柱规格 2.6 mm × 150 mm,交换树脂型号:

NO2619 (52051), 柱温 53℃, 泵流速 0.225 mL·min<sup>-1</sup>,进样量 50 μL,分析时间 72 min. 所用样品 3 个重复. 氨基酸含量以每 kg 根(干重)分泌的氨基酸组分计, mg·kg<sup>-1</sup>. 仪器检测波长 440 nm,检出限为 2.2 × 10<sup>-9</sup> mol,保留时间重现性 CV 1% 以下,峰面积重现性 CV 2% 以下.

#### 1.4.4 芘的测定

参照文献[7],略作改进:取 2.0 g 土样于离心管内,加入 2.0 g 无水硫酸钠,混匀;加入 10 mL 二氯甲烷,40℃ 下超声萃取 1 h;4000 r·min<sup>-1</sup> 下离心. 取 3 mL 上清液过 Fisher Pasteur 玻璃管硅胶柱,二氯甲烷和正己烷(1:1)洗脱,40℃ 下浓缩至干,用甲醇定容到 2 mL,过 0.22 μm 孔径滤膜后 HPLC (Waters600)分析. 检测条件: DAD 检测器, φ4.6 × 250 mm C18 反相色谱柱. 甲醇加水(83:17)为流动相,检测波长 λ = 235 nm. 在此条件下,土样中芘的检测限为 47.62 pg·L<sup>-1</sup>,加标回收率为 94.36% (n = 7, RSD < 6.58%).

### 1.5 数据分析

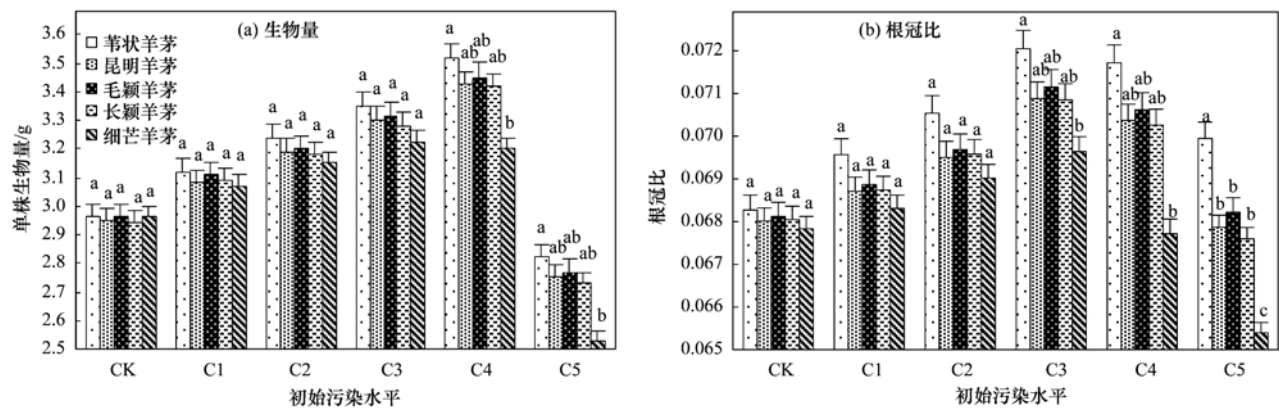
试验数据基本处理采用 Microsoft Excel 2003; 不同处理间的差异显著性借助 SPSS 11.5 软件 LSD 法分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 芘胁迫对待试植物生物量的影响

图 1 为芘胁迫下 5 种羊茅属植物在 50 日龄时的生长状况. 可以看出,轻度 (C1、C2)、中度 (C3、C4) 芘胁迫能刺激植物生长,其生物量(单株干重)表现为 C4 > C3 > C2 > C1 > CK,同种植物(细芒羊茅除外)间,除 C4 与 CK、C4 与 C1 外,不同胁迫水平间差异不显著 (P > 0.05); 重度 (C5) 芘胁迫则抑制植物生长,其生物量明显低于其它处理 (P < 0.05). 其间,根冠比变化与生物量类似,但其最大值出现在 C3 水平,之后则逐渐降低. 相同胁迫水平下,除 C4、C5 处理时的细芒羊茅外,待试植物的生物量间无不明显差异 (P > 0.05); 相比之下,芘胁迫对细芒羊茅的根系生长影响较大:其根冠比一直低于相同胁迫水平下其他植物,胁迫浓度越大,趋势越明显; C3 ~ C5 水平时,差异显著 (P < 0.05).

试验期间,芘胁迫在其它时段内对待试植物生长状态的影响与 50 d 时类似. 总体上,除生物量略有变化外,待试植物均无其他表现受害症状、呈现较强的芘胁迫耐受能力.



图中不同字母代表  $P < 0.05$  水平差异显著；图柱线 I 为误差线，下同

图 1 芘胁迫对待试植物生物量、根冠比的影响

Fig. 1 Biomass of tested plants growing in the soil contaminated with different contents of pyrene and their root/shoot ratio

2.2 待试植物修复潜力差异

图 2 显示了待试植物对芘污染土壤修复潜力的种间差异。试验期间,芘状羊茅呈现出较强的修复潜力,所在土壤中芘的去除率远高于其它土样( $n = 5, P < 0.05$ );昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅次

之,细芒羊茅最差。总体上,待试植物在试验前期(30~40 d)、后期(60~70 d)内的修复潜力均低于试验中期(40~60 d)( $P < 0.05$ ),土壤中芘的去除率变化呈现明显的“S”型曲线,拐点出现在修复期的第 50 d 前后。

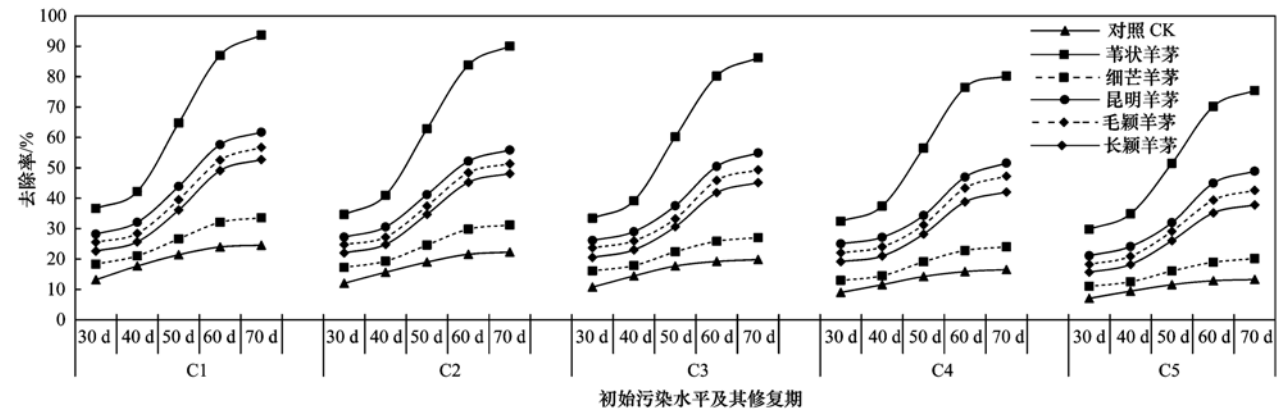


图 2 待试植物对芘污染土壤修复潜力的种间差异

Fig. 2 Interspecies difference of phytoremediation potential of five plant species tested for pyrene-contaminated soils

2.3 根系分泌物中几种低分子量组分的释放特征

2.3.1 可溶性糖的释放特征

图 3 显示,芘胁迫下,5 种羊茅属植物根系分泌物中可溶性糖呈现相同的释放特征:芘胁迫能不同程度地促进可溶性糖的分泌,并随着胁迫水平[图 3(a)]、胁迫期[图 3(b)]的变化呈“先升后降”趋势。相同胁迫期(50 d)内,植物根系对可溶性糖的分泌量均高于对照组(CK),其中 C3 处理时可溶性糖释放量显著高于其它各处理,C2、C3、C4 处理与 CK 组间差异显著( $P < 0.05$ ),但 C1、C5 处理与 CK 组差异不显著( $P > 0.05$ )[图 3(a)]。相同芘胁迫水平(C3)下,不同芘胁迫期内根系分泌的可溶性糖量也不一样,40 d 时最高,且明显高于其它时期( $P$

$< 0.05$ ),但在 30、60 和 70 d 时可溶性糖释放量差异不大( $P > 0.05$ )[图 3(b)]。可见,芘胁迫促进了根系分泌更多的可溶性糖,在一定胁迫水平、胁迫期内,可溶性糖分泌量随芘胁迫强度的增大而升高,但超越此胁迫范围,分泌量开始减少。

2.3.2 有机酸的释放特征

5 种羊茅属植物根系分泌物中,草酸( $84.27\% \pm 0.06\%$ )、乙酸( $6.43\% \pm 0.04\%$ )、乳酸( $5.13\% \pm 0.04\%$ )和苹果酸( $2.32\% \pm 0.03\%$ )的质量分数之和超过了有机酸总量的 98.15%,是低分子量有机酸的主要组分。其中,芘状羊茅根系分泌物中尚检测出微量的顺丁烯二酸( $0.24\% \pm 0.01\%$ )、反丁烯二酸( $0.19\% \pm 0.01\%$ ),昆明羊



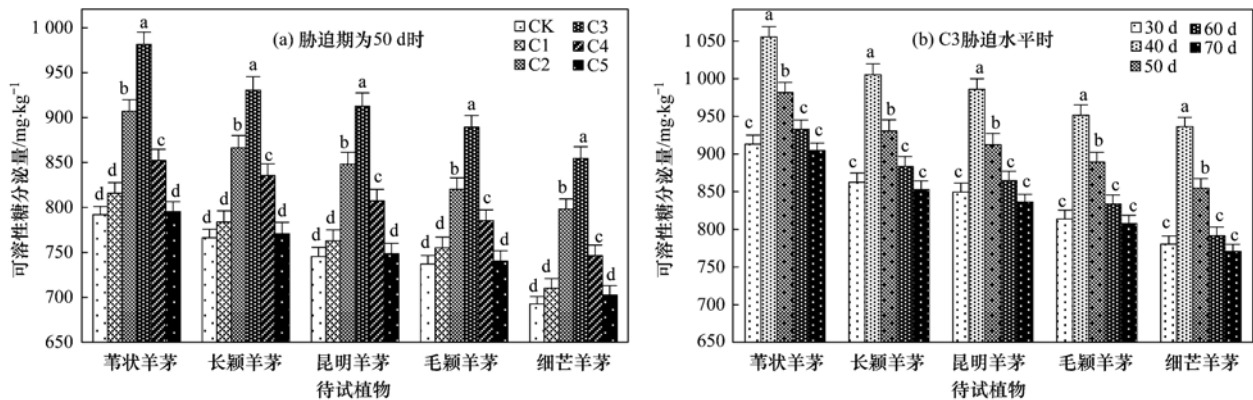


图3 不同茈胁迫水平、胁迫期内植物根系分泌的可溶性糖数量

Fig. 3 Amount of soluble sugar excreted by the root system of plant species growing in soil with different contents of pyrene and growth stage

葎、毛颖羊茅、长颖羊茅的根系分泌物中检测出反顺丁烯二酸(0.49% ± 0.02%),细芒羊茅的根系分泌物中仅检测出微量的顺丁烯二酸(0.13% ± 0.01%)。但同种植物在不同胁迫水平下的有机酸组成成分基本不变。图4为茈胁迫下,5种羊茅属植物根系分泌的低分子量有机酸总量的变化趋势。

图4(a)显示,相同胁迫期(50 d)内,单位干重葎状羊茅根系分泌的有机酸量总高于相同胁迫水平下的其它植物,胁迫水平越高、分泌量越多,呈现C5 ≥ C4 > C3 > C2 > C1 > CK趋势,除C4与C5间外,各胁迫水平间差异显著( $P < 0.05$ );昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅根系分泌的有机酸量以C4水平最高,呈现C4 > C3 ≥ C5 > C2 > C1 > CK趋势,除C3与C5间外,各胁迫水平间差异显著( $P < 0.05$ );细芒羊茅则以C3水平最高,呈现C3 > C4 ≥ C2 > C5 ≥ C1 > CK趋势,但C4与C2、C5与C1间差异不显著( $P > 0.05$ )。

图4(b)显示,不同胁迫期内,单位干重植物根系分泌的有机酸量也不一样,30 d时最高,且明显

高于其它时期( $P < 0.05$ )。相同胁迫水平(C3)下,修复潜力最强的葎状羊茅在胁迫早期释放的有机酸最多,之后逐渐减少,呈现30 d > 40 d > 50 d > 60 d ≥ 70 d趋势,除60 d、70 d外,其余各时期期间差异显著( $P < 0.05$ );修复潜力较强的昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅根系在胁迫早期(30 d)释放的有机酸量最高( $P < 0.05$ ),之后各时期期间差异不大( $P > 0.05$ );修复潜力最差的细芒羊茅在各个胁迫期内释放的有机酸量无明显差异( $P > 0.05$ )。

### 2.3.3 氨基酸的释放特征

除色氨酸外,其它19种常见氨基酸均在待试植物的根系分泌物中检测到。总体上,茈胁迫促进了植物根系对氨基酸的分泌,胁迫水平越高、分泌量越多。相同胁迫期(50 d)内[图5(a)],修复潜力较强的葎状羊茅根系分泌的氨基酸量总高于相同胁迫水平下的其它植物( $P < 0.05$ ),不同胁迫水平间差异显著( $P < 0.05$ );昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅根系分泌的氨基酸量呈现C5 ≥ C4 > C3 > C2 > C1 > CK趋势,但C5、C4间差异不显著( $P > 0.05$ );细芒羊茅根系分泌的氨基酸量虽随胁迫水平的升高

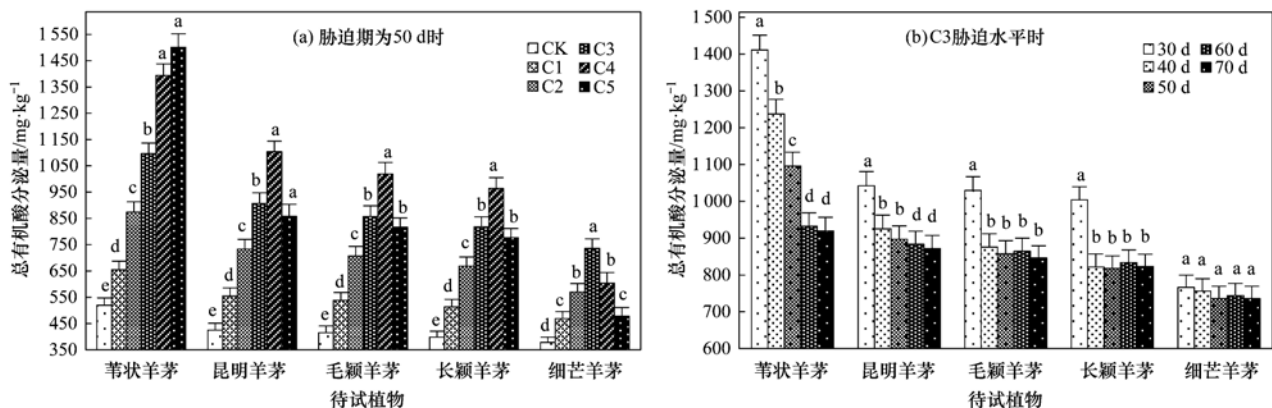


图4 不同茈胁迫水平、胁迫期内植物根系分泌的有机酸数量

Fig. 4 Amount of total organic acids excreted by the root system of plant species growing in soil with different contents of pyrene and growth stage

而增多,但 C5、C4、C3 间差异不显著 ( $P > 0.05$ ). 相同胁迫水平 [C3, 图 5(b)] 下,苇状羊茅根系分泌的氨基酸总多于相同胁迫期内的其它植物 ( $P < 0.05$ ),早期(30 d)释放量较低、且明显低于其它时期 ( $P < 0.05$ ),自 40 d 起趋于稳定,各时期释放量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 试验期间,昆明羊茅、毛

颖羊茅、长颖羊茅根系释放的氨基酸量呈现 30 d < 40 d < 50 d ≤ 60 d ≤ 70 d, 30 d、40 d、50 d 间差异显著 ( $P < 0.05$ ),自 50 d 起趋于稳定、各时期释放量差异不大 ( $P > 0.05$ ); 细芒羊茅释放的氨基酸量虽随胁迫期的延长而增多,但 60 d、70 d 间差异不显著 ( $P > 0.05$ ).

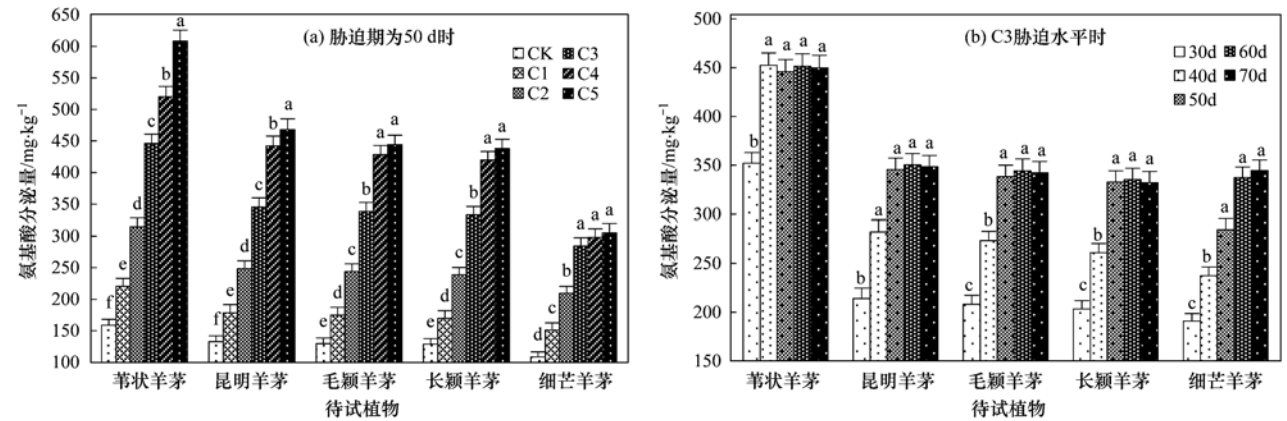


图 5 不同芘胁迫水平、胁迫期内植物根系分泌的氨基酸数量

Fig. 5 Amount of total amino acids excreted by the root system of plant species growing in soil with different contents of pyrene and growth stage

试验期间,芘胁迫对根系分泌物中氨基酸的种类影响不大,但对分泌量影响较大,程度不一、趋势紊乱. 但苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、羟脯氨酸及天冬氨酸所呈现的释放特征较为突出. 与 CK 组相比,芘胁迫促进了植物根系对苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸的分泌: 试验浓度 (C1 ~ C5) 范围内,其分泌量随着胁迫水平的升高而剧增,不同水平间差异显著 ( $P < 0.05$ ). 脯氨酸、羟脯氨酸和天冬氨酸在苇状羊茅根系也呈现类似的

释放特征,但在细芒羊茅根系的释放量却忽高忽低、杂乱无章 (表 1). 其间,昆明羊茅根系分泌的脯氨酸和天冬氨酸、毛颖羊茅根系分泌的脯氨酸和羟脯氨酸、长颖羊茅根系分泌的天冬氨酸均随着胁迫水平的升高而剧增,不同水平间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 但昆明羊茅根系分泌的羟脯氨酸、毛颖羊茅根系分泌的天冬氨酸,以及长颖羊茅根系分泌的脯氨酸、羟脯氨酸虽随芘胁迫水平的升高而增多,但不同水平间差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (表 1).

表 1 芘胁迫 50 d 时待试植物根系分泌的 7 种特殊氨基酸释放量<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>  
Table 1 Amount of seven special amino acids excreted by the root system of plant species tested on day  
50 of experiments under 40.36 mg·kg<sup>-1</sup> pyrene stress/mg·kg<sup>-1</sup>

| 氨基酸  | 苇状羊茅                           | 昆明羊茅                          | 毛颖羊茅                          | 长颖羊茅                          | 细芒羊茅                          |
|------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 苏氨酸  | 7.28, 21.30(10.34~31.56) ↑ *   | 5.86, 17.28(8.06~27.72) ↑ *   | 5.59, 18.54(7.73~25.05) ↑ *   | 5.73, 16.31(7.72~25.22) ↑ *   | 4.55, 13.74(6.50~22.08) ↑ *   |
| 丝氨酸  | 29.36, 79.97(40.98~116.45) ↑ * | 24.30, 64.60(32.97~83.81) ↑ * | 23.59, 69.23(32.02~88.46) ↑ * | 23.67, 61.44(31.33~89.49) ↑ * | 19.60, 49.64(27.51~67.95) ↑ * |
| 甘氨酸  | 3.72, 11.65(5.40~18.06) ↑ *    | 2.88, 9.71(4.26~16.76) ↑ *    | 2.68, 10.28(3.81~15.72) ↑ *   | 2.71, 10.55(4.09~17.16) ↑ *   | 2.12, 8.17(3.42~14.11) ↑ *    |
| 丙氨酸  | 5.63, 17.11(8.13~26.09) ↑ *    | 4.48, 14.36(6.66~23.22) ↑ *   | 4.24, 15.50(6.33~22.12) ↑ *   | 4.26, 12.76(5.85~20.23) ↑ *   | 3.42, 11.56(5.44~18.87) ↑ *   |
| 脯氨酸  | 10.73, 31.43(15.41~47.07) ↑ *  | 8.74, 26.62(12.99~40.08) ↑ *  | 5.53, 26.74(7.55~32.89) ↑ *   | 7.66, 20.13(8.53~31.04) ↑     | 6.90, 13.98(4.72~22.45) ↑ ↓   |
| 羟脯氨酸 | 12.50, 35.44(17.70~52.36) ↑ *  | 10.68, 11.14(10.74~11.75) ↑   | 9.84, 31.53(13.56~44.32) ↑ *  | 10.03, 22.64(9.89~32.38) ↑    | 8.10, 18.20(11.55~23.96) ↑ ↓  |
| 天冬氨酸 | 14.20, 39.34(19.99~57.83) ↑ *  | 9.64, 19.20(11.74~30.06) ↑ *  | 7.23, 9.42(8.48~10.44) ↑      | 9.92, 26.83(13.28~40.67) ↑ *  | 9.27, 21.23(7.92~27.85) ↑ ↓   |

1) 表中数据“A,B(C~D)”表示的氨基酸量分别为对照处理中含量(A)、C1~C5 处理的平均值(B)、最低值(C)及最高值(D); 上标“↑\*”表示该氨基酸的释放量随芘处理浓度升高而剧增,不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); “↑”表示该氨基酸释放量随芘处理浓度升高而增大,不同处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ); “↑↓”表示该氨基酸释放量与芘处理浓度无明显相关性

2.3.4 芘胁迫对低分子量根系分泌物释放特征的影响差异  
对比分析图 3~图 5 中芘胁迫对根系分泌物中可溶性糖、低分子量有机酸、氨基酸等组分的释放

特征的影响时发现,根系对 3 类低分子量组分的释放特征与植物自身的修复潜力有关. 相同胁迫条件 (胁迫水平、胁迫期) 下,修复潜力较强的植物 (如苇状羊茅) 所产生的可溶性糖、低分子量有机酸、



氨基酸总是多于其他几种植物;修复潜力越强,3类组分的释放量、组成成分的变化幅度就越大.胁迫环境中,修复潜力较强的植物对芘胁迫总表现出更强的环境适应性、生理活性的可塑性,修复潜力越强,趋势越明显.

### 3 讨论

近年来,PAHs污染土壤的植物修复研究得到很大发展.植物的存在能够加快土壤中PAHs的去除,但不同植物对PAHs污染的修复潜力可能会存在很大差异;植物修复过程中,植物直接吸收和积累作用在PAHs的修复中作用并不大,根系分泌物在加速PAHs的去除中可能发挥了很大作用.Yi等<sup>[20]</sup>利用43种植物根部组织研究其对PAHs的降解效应,结果表明,有些植物对PAHs降解有明显促进作用,有些则无作用或有抑制作用.本研究中,尽管5种羊茅属植物在无污染(CK)、C1~C4芘胁迫水平下的生物量(图1)、植物积累的芘含量(0.09%~0.22%,平均 $0.16\% \pm 0.02\%$ )无显著差异,但对芘污染的修复潜力却存在明显的种间差异(图2),说明在植物修复过程中,植物对PAHs污染修复潜力的种间差异可能是无法回避的,即使是遗传关系很近的植物间也不例外,而这种差异更可能源于植物根系的分泌活动.

根系分泌物中各种低分子量有机化合物为根际微生物的生长活动提供了大量易被利用的碳源及能源,有利于微生物生长和形成特殊区系、加速污染物消减<sup>[21,22]</sup>.本研究中,芘胁迫促进了根系分泌物中可溶性糖释放量普遍增多,并随着胁迫水平的升高呈现“先升后降”趋势[图3(a)].许超等<sup>[18]</sup>在研究芘胁迫对玉米根系分泌可溶性糖的影响时也得到相似结果.但在相同胁迫水平下,同种植物在不同生长期分泌的可溶性糖量并不相同,40 d时最高,之后逐渐降低[图3(b)],其机理尚不清楚.

植物受有害物质毒害时,根系分泌物组成成分将发生局部变化,并伴随着部分组分的产生和累积<sup>[23]</sup>.本研究发现,随着芘胁迫水平升高,根系分泌物中有机酸的分泌量显著增加(图4).但5种羊茅属植物对芘胁迫的应激反应却存在很大差异:修复潜力最强的苇状羊茅分泌的有机酸总量与芘胁迫强度有关,强度越大,有机酸释放量越多;修复潜力较强的昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅根系释放的有机酸总量以C4胁迫水平时最高;修复潜力较差的细芒羊茅则以C3水平最高,之后则逐渐降低

[图4(a)].不同胁迫期内,5种植物对芘胁迫的应激反应也不一样:修复潜力较强的苇状羊茅、昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅释放的有机酸在30 d时最多,之后逐渐减少,但修复潜力较差的细芒羊茅在各个生长期释放量却没有明显差异.可见,植物对芘胁迫的应激反应特点与其自身的修复潜力具有一定的相关性.

在有机酸的组成成分方面,修复潜力最强的苇状羊茅根系的分泌物中能同时检测出一定量的顺丁烯二酸、反丁烯二酸,修复潜力较强的昆明羊茅、毛颖羊茅、长颖羊茅的根系分泌物中仅检测出反丁烯二酸,修复潜力较差的细芒羊茅的根系分泌物中仅检测到微量的顺丁烯二酸.此结论暗示:羊茅属植物对芘污染的修复过程可能与根系分泌物中反丁烯二酸的存在有关;尽管这一现象在后期的平衡添加试验中也得到验证,但其机理尚待进一步研究.

任何影响植物生长和生理的过程均会影响根系分泌物的种类和数量,环境胁迫下的根际动态是植物对环境刺激响应的集中表现<sup>[24,25]</sup>.本研究中,芘胁迫促进了待试植物对苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸的释放,许超等<sup>[18]</sup>、谢晓梅等<sup>[19]</sup>在研究芘胁迫下玉米、黑麦草根分泌物时也得出类似结论.试验期间,根系分泌物中脯氨酸、羟脯氨酸和天冬氨酸对芘胁迫的响应更近乎以功能群的形式参与植物的修复过程,参与胁迫应激响应的功能群组分越多,修复潜力越强:修复潜力最强的苇状羊茅根际,3种功能群组分均随胁迫水平的升高而剧增;修复潜力次强的昆明羊茅、毛颖羊茅根际,2种功能群组分随胁迫水平的升高而剧增;修复潜力次差的长颖羊茅根际,仅1种功能群组分随胁迫水平的升高而剧增;修复潜力最差的细芒羊茅根际,3种功能群组分的分泌量与芘胁迫水平无直接联系.但这种响应模式是否具有普遍性,尚待进一步证实.

### 4 结论

(1)5种羊茅属植物对芘胁迫具有较强的耐受能力,试验浓度范围内仍生长良好;轻度(C1~C2)、中度(C3~C4)胁迫对生物量影响较小,重度(C5)胁迫虽抑制了部分生物量积累,但并无其它表观受害症状.

(2)芘胁迫促进了根系对可溶性糖的分泌,呈现“先升后降”波动:一定胁迫水平、胁迫时期内,单位干重根系分泌的可溶性糖随胁迫水平的升高而增大;超过此浓度、时间范围,可溶性糖分泌量反

而降低。

(3) 茈葜迫促进了根系对低分子量有机酸的释放。修复潜力越强, 有机酸高峰值出现的胁迫浓度越高、不同胁迫期间释放差异也越显著; 胁迫期越长, 释放量越低。其中, 草酸、乙酸、乳酸和苹果酸是主要组分, 其质量分数超过了有机酸总量的 98.15%, 修复潜力较强植物的分泌物中还检测到反丁烯二酸。

(4) 茈葜迫对根系分泌物中氨基酸的种类影响不大, 但对分泌量的影响较大。苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸的分泌量随着胁迫水平的升高而剧增; 脯氨酸、羟脯氨酸和天冬氨酸对茈葜迫的响应更近乎以功能群的形式参与植物修复过程, 参与的组分越多, 修复潜力越强。

(5) 总体上, 茈葜迫环境中, 5 种羊茅属植物根系分泌物中可溶性糖、低分子量有机酸以及氨基酸的释放特征与其自身的修复潜力有关, 修复潜力越强, 释放量越多且成分越复杂, 并表现出更强的环境适应性及生理可塑性。

#### 参考文献:

- [1] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 839-846.
- [2] 姚林林, 张彩香, 李佳乐, 等. 污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1553-1560.
- [3] Mueller K E, Shann J R. PAH dissipation in spiked soil: impacts of bioavailability, microbial activity, and trees [J]. Chemosphere, 2006, **64**(6): 1006-1014.
- [4] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(11): 2371-2375.
- [5] Kim Y B, Park K Y, Chung Y, *et al.* Phytoremediation of anthracene contaminated soils by different plant species [J]. Journal of Plant Biology, 2004, **47**(3): 174-178.
- [6] Gao Y Z, Ling W T, Wong M H. Plant-accelerated dissipation of phenanthrene and pyrene from water in the presence of a nonionic-surfactant [J]. Chemosphere, 2006, **63**(9): 1560-1567.
- [7] Wei S Q, Pan S W. Phytoremediation for soils contaminated by phenanthrene and pyrene with multiple plant species [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(5): 886-894.
- [8] 潘声旺, 魏世强, 袁馨, 等. 蚯蚓活动对金发草修复土壤菲茈污染的强化作用[J]. 土壤学报, 2011, **48**(1): 62-70.
- [9] Phillips L A, Greer C W, Farrell R E, *et al.* Plant root exudates impact the hydrocarbon degradation potential of a weathered-hydrocarbon contaminated soil [J]. Applied Soil Ecology, 2012, **52**: 56-64.
- [10] Bertin C, Yang X H, Weston L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere [J]. Plant and Soil, 2003, **256**(1): 67-83.
- [11] Marschner H, Römheld V, Cakmak I. Root-induced changes of nutrient availability in the rhizosphere [J]. Journal of Plant Nutrition, 1987, **10**(9-16): 1175-1184.
- [12] Susarla S, Medina V F, McCutcheon S C. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination [J]. Ecological Engineering, 2002, **18**(5): 647-658.
- [13] Gao Y Z, Ren L L, Ling W T, *et al.* Desorption of phenanthrene and pyrene in soils by root exudates [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(4): 1159-1165.
- [14] Zhu Y H, Zhang S Z, Huang H L, *et al.* Effects of maize root exudates and organic acids on the desorption of phenanthrene from soils [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(7): 920-926.
- [15] Luo L, Zhang S Z, Shan X Q, *et al.* Oxalate and root exudates enhance the desorption of *p,p'*-DDT from soils [J]. Chemosphere, 2006, **63**(8): 1273-1279.
- [16] Kirk J L, Klironomos J N, Lee H, *et al.* The effects of perennial ryegrass and alfalfa on microbial abundance and diversity in petroleum contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2005, **133**(3): 455-465.
- [17] Khan S, Afzal M, Iqbal S, *et al.* Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils [J]. Chemosphere, 2013, **90**(4): 1317-1332.
- [18] 许超, 林小方, 夏北成. 玉米幼苗根系分泌物对茈污染响应[J]. 生态学报, 2010, **30**(12): 3280-3288.
- [19] 谢晓梅, 廖敏, 杨静. 茈对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(24): 7564-7570.
- [20] Yi H, Crowley D E. Biostimulation of PAH degradation with plants containing high concentrations of linoleic acid [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(12): 4382-4388.
- [21] 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 等. 土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2825-2831.
- [22] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2014, **38**(3): 298-310.
- [23] Krumins J A, Goodey N M, Gallagher F. Plant-soil interactions in metal contaminated soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **80**: 224-231.
- [24] 沈宏, 严小龙, 郑少玲, 等. 铝毒胁迫诱导菜豆柠檬酸的分泌与累积[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(3): 307-310.
- [25] Shahzad T, Chenu C, Genet P, *et al.* Contribution of exudates, arbuscular mycorrhizal fungi and litter depositions to the rhizosphere priming effect induced by grassland species [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **80**: 146-155.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Emissions from Stationary Sources .....                                                         | JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)            |
| Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer .....                                                                                                    | CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)                |
| Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang .....                                                                                                          | MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)              |
| Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing .....                                                                         | QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)                    |
| Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan .....                                                                                         | CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)              |
| Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014 .....                                                                          | CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)       |
| Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust .....                                                                                                                         | YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)                |
| Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus .....                                                                                                 | LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)                 |
| Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation .....                                                                                                | LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)                  |
| Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters ..... | JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)                   |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas .....                                                       | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)                |
| High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan .....                                                   | SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)                     |
| Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities .....                                                                          | JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)                 |
| Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir .....                                                         | ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)                  |
| Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System .....                                | WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)           |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi .....                                                         | YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)           |
| Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake .....                                                                                                          | LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)                 |
| Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure .....                                                                                                 | GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)            |
| Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i> .....                                                                                              | WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)        |
| Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria .....                                                                                                               | LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)                                   |
| Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River .....                                                                                | TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)                   |
| Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling .....                                                                                             | MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)          |
| Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite .....                                                                                                                               | XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)       |
| Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar .....                                                                                                    | TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195) |
| Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater .....                                                                                                                                | REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)               |
| Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag .....                                                               | WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)             |
| Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite .....                                                                                                | NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)               |
| Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water .....                                                                                       | ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)             |
| Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor .....                                                               | MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)                     |
| Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs .....                                                     | WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)      |
| Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System .....                                                                                                                            | SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)           |
| Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition .....                                                | XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)                     |
| Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH) .....                                                                    | WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)               |
| Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology .....                                              | WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)              |
| Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency .....                                                                    | HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)            |
| Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments .....                                                                     | HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)                 |
| Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils .....                                                                                                         | ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)                          |
| Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation .....                                                                                                               | ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)           |
| Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope .....                                                                       | SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)            |
| Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu .....                                                                                               | CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)             |
| Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang .....                                                                                    | LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)               |
| Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou .....                                                                                                   | GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)           |
| Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu <sup>2+</sup> -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter .....                                                                         | TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)             |
| Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism .....                                                                                                  | CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)    |
| Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model .....                                                                                                  | YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)             |
| Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar .....                                                                                       | XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)                               |
| Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i> .....                                                                            | PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)                 |
| N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition .....       | XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)              |
| Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu .....                                                           | XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)                        |
| Preparation of Visible-light-induced g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange .....                           | ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)             |
| Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province .....                                                                 | GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)             |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行