

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 ..... 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)

河北张家口市大气污染观测研究 ..... 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)

大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 ..... 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)

膜生物反应器处理甲苯性能及机制 ..... 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)

厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 ..... 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 ..... 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)

枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 ..... 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)

三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 ..... 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 ..... 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 ..... 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 ..... 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)

江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 ..... 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁骥, 沈新强 (2607)

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 ..... 李大鹏, 黄勇 (2614)

干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 ..... 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)

常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 ..... 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)

温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 ..... 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 ..... 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)

城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 ..... 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 ..... 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)

基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 ..... 白凤姣, 李天宏 (2667)

黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 ..... 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 ..... 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)

九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 ..... 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)

布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 ..... 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 ..... 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 ..... 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)

IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 ..... 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)

原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 ..... 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 ..... 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)

蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 ..... 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)

“Fe<sup>0</sup>/优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 ..... 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)

树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 ..... 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)

TiO<sub>2</sub>/PS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 ..... 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)

微波加热下苯的催化氧化性能研究 ..... 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)

纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 ..... 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)

好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 ..... 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊 (2773)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 ..... 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 ..... 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 ..... 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)

西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 ..... 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)

典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 ..... 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)

土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 ..... 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)

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 ..... 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 ..... 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)

广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 ..... 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)

北京市近郊区土壤砷累积特征 ..... 戚浩, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)

抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 ..... 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)

臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 ..... 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)

尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 ..... 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)

铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 ..... 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)

pH 和 Ni<sup>2+</sup> 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 ..... 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 ..... 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)

环丙沙星在潮土中的吸附特性 ..... 崔皓, 王淑平 (2895)

中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 ..... 洪塗, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)

H<sub>2</sub>S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 ..... 郝郑平, 姜广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)

《环境科学》征稿简则 (2550)      《环境科学》征订启事 (2568)      信息 (2684, 2714, 2848, 2916)

# 黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应

卫伟<sup>1</sup>, 贾福岩<sup>1,2</sup>, 陈利顶<sup>1</sup>, 吴东平<sup>3</sup>, 陈瑾<sup>3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 甘肃省定西市水土保持科学研究所, 定西 743000)

**摘要:** 黄土高原严重的土壤侵蚀是降雨和复杂脆弱的下垫面共同作用的结果. 以微型小区尺度上(1.2 m × 1.2 m; 2 m × 1.2 m)模拟降雨技术为基本研究手段, 定量刻画了降雨量和降雨强度等基本降雨特征值对定西安家沟自然坡面上荒草、沙棘中位、沙棘下位、沙棘上位、结皮裸地和裸地等不同植株微观格局及其处理下的水蚀过程的影响. 主要取得以下结果: ①雨强和雨量对水蚀的发生均能产生显著影响, 但以雨强的影响力更大; ②前期土壤含水量与产流时间显著负相关, 而与径流量和侵蚀量显著正相关. 前期含水量相同时, 不同植株微景观格局对产流时间发挥了关键作用; ③不同植株及其微观格局遏制地表径流的能力迥异. 在50~60 mm·h<sup>-1</sup>的大雨强作用下, 有沙棘覆盖的小区径流系数仅为5%~8%, 荒草地为25%, 结皮裸地为45%, 而裸地则高达63%; ④有沙棘覆盖的小区中, 沙棘在小区中所处的具体位置对于水土流失效应又极为重要, 以沙棘下位的水土保持效果最好.

**关键词:** 微型小区; 水蚀过程; 降雨; 下垫面; 植株; 前期水分; 格局

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2674-06

## Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area

WEI Wei<sup>1</sup>, JIA Fu-yan<sup>1,2</sup>, CHEN Li-ding<sup>1</sup>, WU Dong-ping<sup>3</sup>, CHEN Jin<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi 743000, China)

**Abstract:** Severe water erosion in the key loess hilly area is affected by the coupling role of rainfall and earth surface features. In this study, rainfall simulation techniques at the micro-plot scale (1.2 m × 1.2 m; 2 m × 1.2 m) was used as the basic measures, the relations between rainfall depth, intensity and runoff-erosion under different plant morphology features as well as micro-landscape positions were quantified and analyzed. Several key findings were captured. Firstly, rainfall depth and intensity both affected water erosion significantly, while the role of the rainfall intensity was more important than that of the depth. Secondly, a strong negative correlation was found between the antecedent soil moisture content and the generation timing of surface runoff, while water erosion had a positive relation with the antecedent soil moisture. Thirdly, different plant morphology and micro-landscape positions of shrub plant (seabuckthorn) played different roles leading to different rates of surface runoff and soil erosion. Dominated by a rainfall intensity ranging from 50 to 60 mm·h<sup>-1</sup>, runoff coefficient in those micro-plots covered by seabuckthorn was about 5%-8%, and changed into 25%, 45% and 63% in grassland-plots, bared plots covered by biological-crust and bared plots without any coverage, respectively. Fourthly, the specific landscape position of seabuckthorn in the plots was also found to play a key role in affecting water erosion processes, and seabuckthorn at the lower landscape position, rather than the upper and middle position, played a better buffering role in reducing runoff and soil loss.

**Key words:** micro-plot; water erosion process; rainfall; earth surface; plant morphology; antecedent soil moisture; pattern

长期以来,严重的土壤侵蚀成为制约黄土高原地区社会经济发展和生态环境改善的瓶颈,也是导致当地人民生活困苦的重要根源之一<sup>[1,2]</sup>. 由于土壤侵蚀的成因和运动方式复杂多变,不同环境因子之间又存在显著的交互作用,为现实中定量刻画相关尺度上影响因子之间的贡献率,进而采取有针对性的调控和管理措施设置了巨大障碍. 大量研究表明,降雨和下垫面特性是影响不同尺度土壤侵蚀运动过程及其危害程度的两大核心要素<sup>[3]</sup>. 降雨的特征值、脉冲事件的发生与演化规律以及时空分布格

局都与不同尺度地表水蚀过程存在复杂而非线性的响应关系<sup>[4]</sup>. 而植被形态学特征、空间位置格局和地表湿润度(前期土壤水分含量)等因子作为表征下垫面的重要指标,对于促进或者抑制水土流失“源-汇”功能的转化过程发挥着难以取代的作用<sup>[5]</sup>. 因此,系统分析地表水蚀过程对降雨和下垫

收稿日期: 2011-12-31; 修订日期: 2012-02-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(40925003); 国家自然科学基金项目(40801041)

作者简介: 卫伟(1978~),男,博士,副研究员,主要研究方向为生态水文学, E-mail: weiwei@cees.ac.cn

面属性之间的内在定量关系,对于科学诠释和甄别水土流失的关键贡献因子并开展行之有效的防治具有重要的理论和实践价值。

事实上,围绕降雨和植被的水土流失效应这一重要科学课题,国内外相关研究已经很多。截至目前,不少学者从标准或近标准径流小区、坡面、小流域乃至区域等多个尺度上分别开展了降雨实验、模型模拟、定位监测和区域评价,为水土流失机制研究和区域水土保持宏观决策提供了重要信息和科学依据,做出了应有的学术贡献<sup>[6,7]</sup>。但是,如前所述,由于影响因素的复杂性和多变性,不同尺度水蚀过程发生演变的深层次机制尚不完全清楚<sup>[8]</sup>。特别是在小区尺度上,学者们大多依赖传统的标准小区重点关注植被类型及其配置的水蚀效应,而微观尺度上单一植株、其所在的空间位置以及不同人为抚育处理措施等如何进一步深刻影响水土流失过程,则是目前国内外研究中相对薄弱的环节而亟待加强<sup>[9]</sup>。

降雨定量模拟技术对于开展水土流失机制研究、积累科研数据和构建水蚀模型具有重要推动作用<sup>[10]</sup>。降雨模拟发生器是小尺度研究的常用设备,可以精准便捷测定水蚀过程随着降雨特征值、坡度和地表覆被等下垫面微景观的变化。同时,人工模拟降雨的方法可以弥补短期内自然降雨条件下无法获取的研究结果,并可以有效验证自然环境状况下得出的一些结论,目前已经在国内外相关研究中广泛采用<sup>[11]</sup>。

本研究选择甘肃定西典型自然坡面,基于微创和无干扰理念布设不同植株格局的微型径流小区,依托下喷式模拟降雨技术,系统开展降雨、前期土壤含水量和单一植株及其微观空间格局对水蚀过程的影响,研究结果对于定量探讨植被格局和水土流失过程关系具有极为重要的现实意义,可以为黄土高原微观尺度植被格局设计和水土流失防治提供参考依据。

## 1 区域选择与概况

研究区位于甘肃省陇中地区的定西市安家沟小流域(35°35'N,104°39'E),该地区属于典型的半干旱黄土丘陵沟壑区。流域内多年年平均气温 6.3℃,≥5℃年积温 2 933.5℃,≥10℃年积温 2 239.1℃,极端最高气温 34.3℃,极端最低气温 -27.1℃。年均降水量 427.0 mm,其中 60%以上集中在 7~9 月,且多暴雨。年蒸发量 1 510 mm,空气相对湿度

65.8%,干燥度为 1.15,太阳辐射 591.1 J·cm<sup>-2</sup>,年日照时数 2 409 h,无霜期 141 d,干燥度 1.15,属于中温带半干旱气候。

小流域属典型梁峁状黄土丘陵沟壑区,水土保持区划隶属于第五副区。流域沟壑密度为 3.14 km·km<sup>-2</sup>,该地区土壤主要是在黄土母质基础上发育起来的灰钙土和盐渍土,平均厚度为 40~60 m。土壤黏粒介于 33.12%~42.17%,有机质含量介于 0.37%~1.34%之间,2 m 土层内的土壤容重介于 1.09~1.36 g·m<sup>-3</sup>,平均 1.2 g·m<sup>-3</sup>,孔隙率在 50%~55%之间。土壤具有垂直节理,土质疏松,湿陷性强,极易发生土壤侵蚀。侵蚀模数可高达 1.0 万 t·(km<sup>2</sup>·a)<sup>-1</sup>,这几年经过连续治理,情况虽有所好转,但侵蚀依然严重。流域内自然植被覆盖度低。自然覆盖度阳坡一般在 25%~35%,阴坡及部分梁顶在 50%~60%之间。植被带属于森林草原带干草原区。乔木种主要有油松(*Pinus tabulaeformis* arr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)、山杏(*Prunus armeniaca* L.)等,灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、柠条(*Caragana* ssp.),草本植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、红豆草(*Onobrychis vichfolia* Scop.)、针茅(*Stipa bungeana* Trin.)。主要的农作物有马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、春小麦(*Triticum aestivum* L. cv Leguan)、玉米(*Zea mays* L.)、胡麻(*Linum usitatissimum* L.)及豌豆(*Caragana kansuensis* Pojark.)等。

## 2 实验设计与方法

### 2.1 实验小区布设

在安家沟流域内,选择一个典型的自然坡面,于 2009 年根据微创(即最小限度干扰小区内的土壤和植被)原则和配套操作技术布设了微型径流小区,小区两边及上端用薄铁皮板围成,下端为 V 型铁皮导流挡板,并留有导流孔,接橡皮导管将水导入径流桶。铁皮板高 40 cm,埋入土中 20 cm,外露 20 cm。

在植被微景观类型上,为了突出微观尺度上单一植株及其空间位置对水蚀过程的影响,重点设置了 4 类微观植被格局和配置模式,自 2010 年起系统开展了小区原位观测与模拟降雨实验。4 类主要的微观格局分别是:荒草微型小区、单株沙棘(居中)微型小区、沙棘下位微型小区和沙棘上位微型小区,每一类小区分别设置 3 个重复。同时,在研究中辅助以剪除沙棘、荒草后的结皮裸地和完全裸地(去除结皮)等作为降雨模拟实验的结果对照,以凸

现微观植被格局等下垫面特征对水土流失的影响效果. 由于小区坡度近似, 故本研究不再考虑坡度对水

蚀过程造成的影响. 微型实验小区布设的基本情况见表 1.

表 1 微型小区实验设计

Table 1 Experimental design of micro-plots

小区编号	植株微景观格局	主要物种	尺寸(长×宽)	坡度/(°)	覆盖度/%
1-1	荒草	赖草、长芒草、苔藓	1.2 m×1.2 m	11	77
1-2	荒草	赖草、长芒草、苔藓	1.2 m×1.2 m	13	68
1-3	荒草	赖草、长芒草、苔藓	1.2 m×1.2 m	9	71
2-1	沙棘居中	沙棘、赖草、苔藓	1.2 m×1.2 m	11	75
2-2	沙棘居中	沙棘、赖草、苔藓	1.2 m×1.2 m	14	76
2-3	沙棘居中	沙棘、赖草、苔藓	1.2 m×1.2 m	12	83
3-1	沙棘下位	沙棘、赖草、苔藓	2.0 m×1.2 m	10	74
3-2	沙棘下位	沙棘、赖草、苔藓	2.0 m×1.2 m	11	78
3-3	沙棘下位	沙棘、赖草、苔藓	2.0 m×1.2 m	9	82
4-1	沙棘上位	沙棘、赖草、苔藓	2.0 m×1.2 m	10	83
4-2	沙棘上位	沙棘、赖草、苔藓	2.0 m×1.2 m	11	82
4-3	沙棘下位	沙棘、赖草、苔藓	2.0 m×1.2 m	10	84

## 2.2 模拟降雨实验

所用下喷式模拟降雨机由加拿大引进, 采用美国进口的 SPRACO 锥形喷头开展实验<sup>[12]</sup>. 降雨高度为 4.5 m, 利用安装在模拟机下部的压力表与水阀开关调控水压和雨强. 当水压为 0.07 MPa 时, 单台降雨器可产生 30 mm·h<sup>-1</sup> 左右的雨强, 两台降雨模拟机同时对喷实验时, 可产生 50 ~ 60 mm·h<sup>-1</sup> 的平均降雨强度, 并且在模拟降雨期间, 降雨强度保持恒定.

在模拟降雨真正发生之前, 对降雨模拟发生器所产生的降雨特征值进行雨强测算和均匀度率定. 具体操作是: 在每次模拟降雨开始时, 在小区四周分别摆设四个翻斗式自计雨量筒, 同时于小区内密集设置小量杯(见图 1), 测量实际降雨量, 计算平均降雨强度和均匀度. 降雨率定的实验结果表明, 历场次模拟降雨实验的均匀度均能达到 80% 以上, 满足模拟实验对降雨特征值的客观要求.

分别于 2010 年和 2011 年的生长季(6 ~ 9 月) 进行野外模拟降雨实验, 以单台模拟机(小雨强 30 mm·h<sup>-1</sup>) 和两台模拟机对喷(大雨强 50 ~ 60 mm·h<sup>-1</sup>) 对 12 个微型小区实施模拟降雨, 累计降雨 100 余场. 同时, 为了便于对比分析, 每次降雨历时均定为 45 min. 经数据校正和仔细筛选, 确定了其中的 75 场典型降雨实验作为进一步分析的基础数据.

## 2.3 降雨径流测定

在模拟降雨发生前, 利用 TDR 实测土壤表层 20 cm 内的含水量, 作为探讨前期土壤水分含量与地表径流和侵蚀定量关系的重要依据. 模拟降雨发生后, 用雨量筒和降雨记录仪记录自计次降雨过程和次降

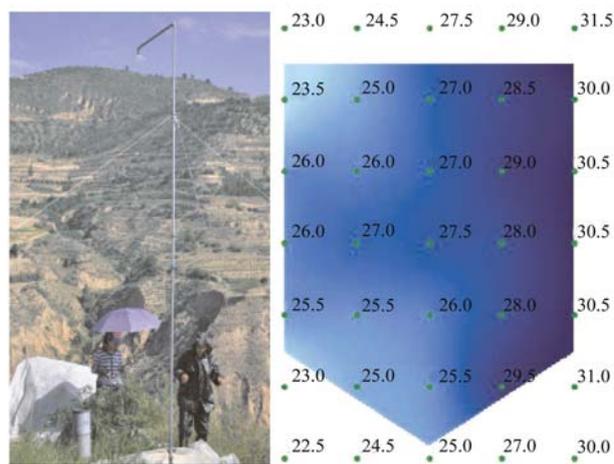


图 1 单台模拟机野外实验及降雨强度率定示意  
Fig. 1 A sketch map of rain intensity determination  
*in situ* by a rainfall simulator

雨总量, 并记录次降雨事件的持续时间, 计算降雨强度. 同时仔细观察各小区出口的地表径流发生情况, 记录每个小区对应的产流时间和具体径流过程, 以及相应的泥沙产量.

## 2.4 数据处理分析

采用相关、趋势性检验、散点图分析以及回归分析等基本统计学分析方法, 定量刻画降雨特性和下垫面因子(前期含水量、植株及其微观格局等)对水蚀过程的影响. 所有的分析均在 SPSS 13.0 和 Excel 2003 等软件中完成.

## 3 结果与分析

### 3.1 降雨特征值与水蚀过程的关系

基于大量实测的降雨模拟实验数据, 利用相关

和回归分析的统计学方法, 深入探讨了降雨特征值(降雨强度和降雨量)与地表径流量和土壤侵蚀量的内在定量关系. 相应结果如图 2 所示.

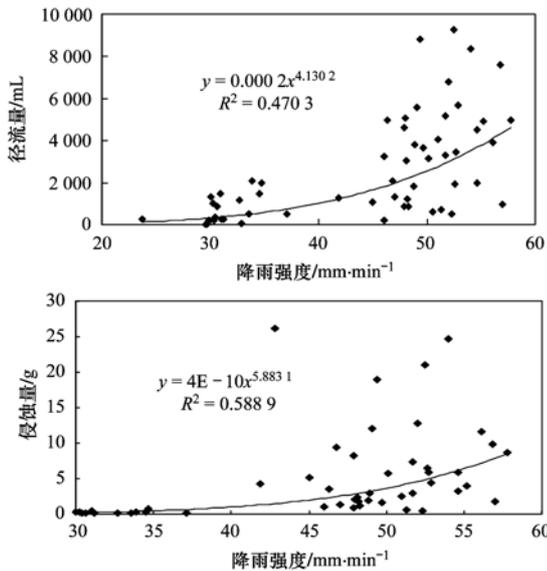


图 2 雨强和水蚀过程的回归分析

Fig. 2 Regression analysis between rain intensity and water erosion

散点图和趋势分析结果显示, 微型小区尺度上, 不具体考虑下垫面的细微差别, 降雨强度对径流过程和侵蚀过程均能产生显著影响. 而从决定系数  $R^2$  值的大小来看, 降雨强度对侵蚀量的影响要稍微高于其对径流量的影响.

对于降雨特征值而言, 除了降雨强度显著影响水蚀过程之外, 还发现降雨量和径流量与侵蚀量也同时存在显著的相关关系. 但从相关系数来看, 这种相关关系没有降雨强度与二者的相关系数高, 结果见表 2.

表 2 降雨特征值与产流产沙量的 Pearson 相关分析<sup>1)</sup>

Table 2 Pearson correlation between water erosion and rainfall variables

	雨量	雨强
径流量	0.518 **	0.535 **
侵蚀量	0.607 **	0.647 **

1) \*\* 相关性在 0.01 水平上显著

由表 2 可知, 降雨量和降雨强度对微型小区尺度上的水土流失过程均能产生显著影响. 事实上, 很多研究已经表明, 降雨强度对水蚀的影响具有尺度普适性, 无论点位、径流小区还是小流域乃至区域尺度, 降雨强度都是诱导水土流失的关键驱动力<sup>[13]</sup>, 而有关不同尺度上降雨量对径流和侵蚀量的影响的相关研究结论则不太一致. 如有的研究认为,

降雨量更多地影响了径流, 而降雨强度则更多地直接影响了侵蚀程度<sup>[14]</sup>.

进一步分析了径流量和侵蚀量的定量关系(见图 3). 结果发现, 二者之间存在显著的线性关系( $R^2 = 0.7262$ ). 这充分表明, 由于降雨产生的汇流作用携带不同程度的泥沙量, 能够显著增加土壤侵蚀和土壤颗粒流失的风险, 导致水蚀程度加剧.

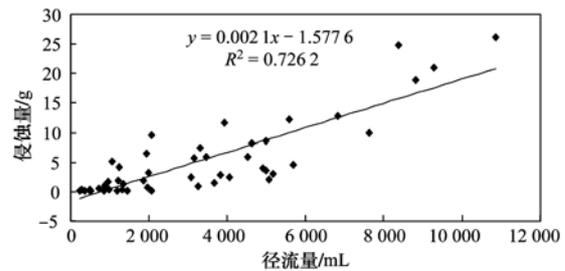


图 3 径流量和侵蚀量的定量关系分析

Fig. 3 Relation between runoff volume and sediment yield

### 3.2 前期土壤含水量对水蚀的影响

从微观尺度上看, 除了降雨驱动之外, 前期土壤含水量作为影响水蚀的一个关键下垫面因子, 对于地表径流的发生和启动发挥着重要作用<sup>[15]</sup>. 基于 TDR 速测方式, 在每场模拟降雨发生前, 测定了土壤表层 20 cm 的含水量. 在此基础上, 分析了 75 场模拟降雨前期土壤含水量和产流时间的相关关系, 结果见表 3.

表 3 前期含水量与产流时间的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation between antecedent soil moisture and timing of runoff generation

	前期土壤含水量	
	相关系数	P 值
产流时间	-0.41	0.000 ***
径流量	0.35	0.009 **
侵蚀量	0.28	0.042 *

1) 样本量  $N = 77$ , \*\*\* 相关性在 0.001 水平上显著

由表 3 可知, 前期土壤含水量与产流时间存在显著的负相关关系. 即当土壤含水量较低、土壤表层干燥时, 地表径流激发与启动的时间较长, 产流时间会相应滞后; 而当土壤含水量较高、土壤表层湿润的情况下, 产流将变得更加容易、产流时间将大大缩短. 同时, 前期土壤含水量和水土流失量又呈较为显著的正相关关系, 高的前期水分含量水土流失风险稍高, 反之亦然. 而基于野外长期定位监测发现, 水蚀过程主要与表层 20 cm 的前期土壤含水量呈显著正相关, 较少受到 20 cm 以下的土壤含水量影响<sup>[16]</sup>, 这在一定程度上呼应了本研究的相关结果.

进一步的深入分析发现,在相同前期土壤含水量和降雨强度的前提下,不同植株微景观类型对产流时间也有明显影响,差异性较大,相应结果见图 4.

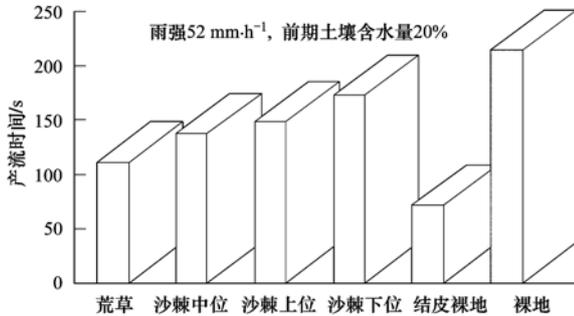


图 4 不同植株微景观格局下的产流时间对比

Fig. 4 Timing of runoff generation in different plant micro-patterns

由图 4 可知,在  $52 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的大雨强下,当前期土壤含水量同为 20% 时,最易产生径流的是去除灌草后的结皮裸地小区(用时 71 s);其次是荒草小区(111 s);再次是有沙棘植株分布的小区,其中而又以沙棘下位延迟径流的能力最强(173 s);完全去除植被和结皮覆盖的裸地,产生径流所需要的时间最长(214 s),可能与人为干扰后土壤松弛、入渗量大直接的关系。

### 3.3 植株及其微观格局对水蚀的影响

进一步分析了多场模拟降雨条件下,微型小区内不同植株及其微观格局对水土流失过程的综合影响,结果见图 5.

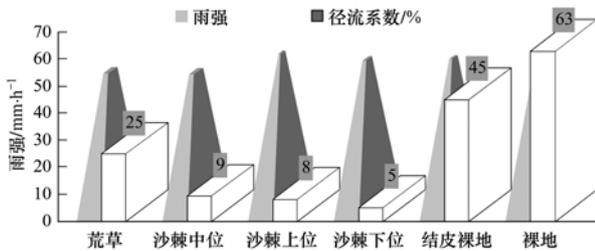


图 5 相近的大雨强条件下植株微观格局的地表径流效应

Fig. 5 Runoff effects of different plant micro-patterns under similar high rain intensities

由图 5 可知,通过对比大雨强条件下 ( $50 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 各微型景观相应径流系数的大小,取得了以下发现.第一,有沙棘覆盖的微型小区径流系数显著低于没有沙棘生长的荒草地、处理过的有结皮覆盖的裸地和无结皮覆盖的裸地,其径流系数比荒草、结皮裸地和裸地分别降低了 3~5 倍、5~9 倍和 7~13 倍左右;水土保持效果依次为沙棘 > 荒草 > 结皮裸地 > 裸地.这一研究结果和本研究基于长期

连续监测而得到的结论相吻合<sup>[17]</sup>,也与国际上类似地区的结论相一致<sup>[18,19]</sup>.去除植株和苔藓结皮覆盖后的裸地,尽管产流时间相对滞后,但一旦产流,其径流量和径流系数依然是最高的,这也从反面证实了在灌草结构和地表结皮综合作用下,能够有效降低水蚀风险的事实.第二,从植被微观格局来看,沙棘所在小区的景观位置又显著影响了其水土保持效果.沙棘下位时,其所发挥出的水土截流(buffering role)能力最强,径流系数最低,仅有 5%,而沙棘上位和单株沙棘居中时次之,分别达到 8% 和 9%.第三,坡长对水蚀的可能影响和不确定性.坡长是决定坡面水流能量沿程变化,影响坡面水蚀“源-汇”转化过程,得到了广泛研究,但所得结论却大相径庭<sup>[20]</sup>.本研究中,沙棘中位所在的微型小区为 1.2 m 长,其径流系数最大,而沙棘上位及下位均为 2 m 长.因此,除了植株微景观位置所造成的水土流失分异外,坡长作为对水蚀的“源-汇”消长过程的贡献如何,有待进一步深入探讨.

## 4 结论

(1) 微型小区尺度上,单株灌木植株(如沙棘)、荒草及其微观格局在消减径流、降低侵蚀方面发挥着极为重要的作用.有沙棘覆盖的径流系数远低于荒草地,尤其当沙棘处于小区下部时,水土保持效果最佳.而荒草地水保能力又远高于有苔藓结皮覆盖的裸地;去除灌草和结皮覆盖的裸地尽管产流滞后,但总径流量和径流系数最高,水蚀风险和危害最大.

(2) 微景观尺度上,降雨强度和降雨量等关键降雨特征值是影响水蚀的重要驱动力,而以前者的贡献率更大.同时,因降雨激发而带来的地表径流也是诱发大量土壤流失的重要因素和附加驱动,需要在实践中予以高度重视.

(3) 前期土壤含水量和产流时间显著负相关.但在前期含水量相近或一致时,植被形态学及其微观格局又显著影响到产流时间.这一结论对于根据前期土壤湿度预测预报可能的滑坡和侵蚀风险有一定参考价值.

### 参考文献:

- [1] Chen L, Wei W, Fu B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective[J]. Progress in Physical Geography, 2007, 31(4): 389-403.
- [2] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
- [3] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. 生态学报,

- 2006, **26**(11): 3847-3853.
- [ 4 ] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, **22**(3): 242-250.
- [ 5 ] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J]. 水科学进展, 2011, **22**(2): 229-234.
- [ 6 ] 冷疏影, 宋长青. 中国地理学面临的挑战与发展[J]. 地理学报, 2005, **60**(4): 553-558.
- [ 7 ] 史志华, 蔡崇法, 蔡强国, 等. GIS 支持下土壤侵蚀潜在危险度的分级研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, **11**(2): 190-193.
- [ 8 ] 冷疏影, 冯仁国, 李锐, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, **18**(1): 1-6.
- [ 9 ] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Arnau-Rosalén E, *et al.* Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, **78**(3-4): 267-285.
- [ 10 ] 陈正发, 夏清, 史东梅, 等. 基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(4): 6-11.
- [ 11 ] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, *et al.* Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation[J]. *Catena*, 2008, **75**(2): 191-199.
- [ 12 ] 蔡强国, 赵宏夫, 王忠科, 等. 永定河上游张家口市水土流失规律与坡地改良利用[M]. 北京: 环境科学出版社, 1995. 50-57.
- [ 13 ] Hancock G R. A catchment scale assessment of increased rainfall and storm intensity on erosion and sediment transport for Northern Australia[J]. *Geoderma*, 2009, **152**(3-4): 350-360.
- [ 14 ] Van Dijk A I J M, Meesters A G C A, Schellekens J, *et al.* A two-parameter exponential rainfall depth-intensity distribution applied to runoff and erosion modelling [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2005, **300**(1-4): 155-171.
- [ 15 ] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, *et al.* Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **398**(3-4): 191-201.
- [ 16 ] 卫伟, 陈利顶, 吕一河, 等. 黄土丘陵沟壑区前期降雨指数构建及其径流效应研究[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(4): 368-371.
- [ 17 ] 黄志霖, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异[J]. 中国水土保持科学, 2005, **3**(4): 11-18, 26.
- [ 18 ] Xu X L, Ma K M, Fu B J, *et al.* Influence of three plant species with different morphologies on water runoff and soil loss in a dry-warm river valley, SW China [ J ]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **256**(4): 656-663.
- [ 19 ] Imeson A C, Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain [ J ]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, **104**(2): 333-342.
- [ 20 ] Lal R. Effects of slope length on erosion of some alfisols in Western Nigeria[J]. *Geoderma*, 1984, **33**(3): 181-189.

## CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea .....	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei .....	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane .....	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors .....	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting .....	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water .....	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods .....	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir .....	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake .....	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River .....	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province .....	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake .....	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay .....	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir .....	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City .....	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area .....	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions .....	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS .....	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen .....	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area .....	WEI Wei, JIA Fu-yang, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal .....	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River .....	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season .....	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter .....	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch .....	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater .....	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization .....	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Process .....	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment .....	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe <sup>0</sup> /Enriched-Bacteria" System .....	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green .....	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO <sub>2</sub> /PS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery .....	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating .....	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge .....	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge .....	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment .....	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching .....	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions .....	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China .....	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils .....	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil .....	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs .....	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i> .....	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China .....	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing .....	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks .....	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat .....	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption .....	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb <sup>2+</sup> and Cu <sup>2+</sup> on Nano-HAP Surfaces .....	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni <sup>2+</sup> on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica .....	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite .....	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols .....	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO <sub>x</sub> Removal at Moderate to High Temperatures .....	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H <sub>2</sub> S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts .....	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 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)

2012年8月15日 33卷 第8期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行