

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳芩湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律

吴凤至^{1,2}, 史志华^{1,2*}, 方怒放², 岳本江^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 以2种典型黄土为研究对象, 在模拟降雨条件下, 研究了不同雨强和坡度条件下侵蚀过程中黏粒含量的变化规律, 比较了泥沙侵蚀颗粒(未分散)和泥沙原始颗粒(分散后)大小分布特征, 分析了团聚率和富集率。结果表明, 泥沙侵蚀黏粒含量随着坡长和雨强的增大而增加, 黄绵土变化明显, 增加了8.77%和2.43%; 而壤土只增加了2.76%和0.4%。随坡度的增大而减小, 分别减少了4.91%和3.93%。黏粒团聚率<1, 富集率>1, 在侵蚀搬运过程中作为黏粒团被搬运, 导致黏粒的富集。研究结果有助于深入了解泥沙颗粒在坡面侵蚀过程中的变化规律, 深入理解土壤侵蚀机制, 也能为面源污染模型的建立提供重要基础。

关键词: 人工模拟降雨; 坡面侵蚀; 黏粒含量; 团聚率; 富集率

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2497-06

Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition

WU Feng-zhi^{1,2}, SHI Zhi-hua^{1,2}, FANG Nu-fang², YUE Ben-jiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Erosion and sediment characteristics were measured using simulated rainfall on two cultivated soils from the Loess Plateau, China. The size distribution of eroded sediment (non-dispersed) was compared with equivalent measurements of the same samples after chemical and mechanical dispersion (dispersed) to investigate the aggregation ratio (AR) and enrichment ratio (ER). Results show that clay content is increasing with the length and rainfall intensity. The loessial soil increased by 8.77% and 2.43%, but the Lou soil increased by only 2.76% and 0.4%. With the increase of slope, the clay content of the two loess reduced by 4.91% and 3.93%, respectively. AR values were less than 1 and ER values were greater than 1. These indicated that relatively slight clay dispersion occurred and that most of the clay in the sediments was in the form of aggregates. The results will improve understanding of erosion and sedimentation processes, which in turn will improve erosion modeling. Knowledge of temporal variations of clay in sediment can also provide the basis for understanding and modeling the transfer of nutrients on hillslope.

Key words: simulated rainfall; soil erosion; clay content; aggregation ratio; enrichment ratio

坡面侵蚀过程包括降雨击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程^[1,2]。降雨过程中, 由于表土团聚体的崩解、分散等水土间的相互作用, 改变了土壤表面结构使土壤颗粒更紧密地堆积, 入渗率降低、径流量增加。黄土高原土壤侵蚀不仅导致土地退化, 而且随泥沙颗粒携带的土壤细颗粒和养分的流失使土壤质地变粗和质量退化, 同时侵蚀泥沙挟带的养分和农药及其它化学物质造成水资源污染和生态环境恶化, 导致面源污染。土壤中黏粒随着径流的流失不但导致土壤质量砂化, 更重要的是使土壤团聚体减少, 结构性变差, 对水分、养分的保蓄性能降低。所以为了研究黄土高原的土壤侵蚀机制, 对侵蚀泥沙颗粒尤其是对黏粒的研究尤为重要。

有关侵蚀泥沙颗粒组成的研究, 国外的结果表

明, 受土壤团聚体的影响, 未分散与分散的泥沙颗粒大小分布不同, 泥沙颗粒组成主要受土壤性能和土地利用的影响, 而降雨强度和地形因子等对泥沙颗粒大小分布的影响不甚明显。Massey 等^[3]提出富集率(enrichment ratio)的概念, Martínez-Mena 等^[4]在此基础上运用团聚率(aggregation ratio)对泥沙颗粒进行分析, 结果表明降雨动能是决定泥沙颗粒是否被作为原始颗粒或团聚体搬运的重要因素; Warrington 等^[5]在欧洲土壤科学杂志上着重研究了重度侵蚀和轻度侵蚀下泥沙颗粒组成的变化, 研究表明黏粒含量分布主要取决于降雨对土壤表面团聚

收稿日期: 2011-09-21; 修订日期: 2011-12-06

基金项目: 中国科学院“百人计划”择优支持项目; 国家自然科学基金项目(41071190)

作者简介: 吴凤至(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀机制, E-mail: wuyang.426@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pengshi@mail.hzau.edu.cn

体的破坏程度; Berger 等^[6]在研究细沟发展与土壤侵蚀的关系中提出与坡度相比,雨强对泥沙颗粒分布影响较大. 国内在土壤颗粒流失对土壤质地影响的研究方面取得了一定进展,但关于降雨强度、产沙产流强度、侵蚀发育等对泥沙颗粒组成变化的研究很少^[7~9].

本研究选取 2 种典型黄土作为对象,通过人工模拟降雨,定量研究坡面侵蚀过程中原始的和最终的泥沙颗粒特征,探讨坡面侵蚀机制,以期为面源污

染模型的建立提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样品

实验选择了陕西省有代表性的 2 种坡耕地土壤(塬土和黄绵土),采集表层(0 ~ 15 cm)原状土用作土壤性质分析. 分析采用常规方法,即有机质采用重铬酸钾外加热法,容重采用环刀法,机械组成采用激光粒度分析法,土壤样品的各种性质见表 1.

表 1 土壤基本性质

Table 1 Basic soil properties

样品	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	机械组成/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
				砂粒	粉粒	黏粒
黄绵土	1. 101	0. 18	8. 40	20. 54	65. 29	14. 17
塬土	1. 155	0. 60	8. 76	5. 46	63. 76	30. 78

1.2 人工模拟降雨

本实验在中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅利用可移动式土槽进行,采用下喷式降雨系统,纯净水作为降雨水源. 室温为 10℃ 时,其电导率为 $4. 81 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 国际上采取纯净水作为水源进行室内模拟降雨实验的方法已经被广泛应用. 根据 Shainberg 等^[10]的实验结果可知,与自来水相比,使用纯净水进行降雨减少不同水质的影响,从而更有利于对坡面土壤侵蚀过程的观察及研究.

供试土样风干过 10 mm 筛,实验土槽尺寸为 $5 \text{ m}\times 1 \text{ m}\times 0. 4 \text{ m}$ 和 $10 \text{ m}\times 1. 5 \text{ m}\times 0. 4 \text{ m}$ (长×宽×深),最下层装填 10 cm 细沙并用纱布覆盖,以保证良好的透水性,其上依次装填 30 cm 的供试土样,每层装土深度 5 cm,使下垫面土壤条件的变异性达到最小. 每次降雨前,采用环刀法测取坡面土壤容重及含水量. 每场降雨实验统计结果显示塬土平均容重为 $1. 14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,标准差为 0. 014; 黄绵土平均容重为 $1. 21 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,标准差为 0. 034. 由此可见数据集集中程度较高,故可认为每场降雨实验的土壤初始条件达到一致.

依据黄土高原侵蚀性降雨的分布规律,确定实验设计雨强为 $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $120 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,降雨历时分别为 60 min 和 45 min,保证其降雨量一致,坡度为 10°、15°、20°、25°. 每一场降雨事件中,待坡面开始产流,每 1 min 采集 1 次径流样,用烘干法测定泥沙量,同时记录径流体积. 用染色剂法测定坡面流速,并结合摄像机持续摄像对侵蚀过程进行动态监测.

1.3 泥沙颗粒分析及因子计算

泥沙颗粒分析采用 MS2000 型激光粒度分析仪(0. 01 ~ 2 000 μm)测定,按美国制分级:黏粒(< 2 μm),粉粒(2 ~ 50 μm),细砂(50 ~ 200 μm),粗砂(200 ~ 2 000 μm),分别测定泥沙侵蚀颗粒和超声波分散之后的原始颗粒含量. 待坡面产流后,每 3 min 采集 1 次泥沙样,带到实验室内进行测定. 首先,将泥沙样搅拌均匀,舀取 1 ~ 2 mL 的样品加到盛有 800 mL 蒸馏水的烧杯中,控制其折光率在 20% ~ 30% 之间,然后测量侵蚀泥沙颗粒含量历时 2 min. 测量分散后的原始颗粒含量之前要对样品进行 60 s 的超声波分散,控制折光率在规定范围内,之后再再进行测量. 每一个样品都重复同样的步骤,最后导出数据进行分析.

降雨是土壤流失的主要动力来源,降雨特征因子包括降雨侵蚀力、降雨动能等,并且都与雨强呈正相关^[11~13]. 侵蚀因子包括侵蚀速率(Er)、径流强度(Ri)和含沙量(Cs)都是衡量坡面侵蚀过程的重要指标. 团聚率(AR)用来描述坡面侵蚀过程中不同粒级泥沙颗粒的团聚能力. $\text{AR} = \text{泥沙侵蚀颗粒含量} / \text{泥沙原始颗粒含量}$. 富集率(ER)用来表述土壤流失过程中泥沙颗粒的富集现象. $\text{ER} = \text{侵蚀泥沙颗粒含量} / \text{原状土样颗粒含量}$.

以上的数据处理都在 SPSS 13. 0 中完成.

2 结果与讨论

2.1 总的径流和泥沙分析

黄土区地形破碎,坡长坡度都是影响土壤侵蚀的重要地形因子,而降雨强度则是影响侵蚀产沙最重要的动力因素. 选择 2 种坡长(5 m 和 10 m)、2

种坡度 (10° 和 20°)、2 种雨强 ($90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 分析 Cs、Er 和 Ri 在侵蚀过程中的变化规律。

从总体趋势上看, 壤土 Cs、Ri、Er 三者的含量均高于黄绵土 (图 1)。随着坡度坡长的增大, 2 种土样的 Cs、Ri、Er 值都增大。相同的降雨条件下, 随着坡度的增大, 降雨侵蚀力增大, 使坡面逐渐产生细沟, 物体固有重力使细沟中的泥沙颗粒和溅散土粒向下坡运动, 导致泥沙量增加。从刚开始土壤的入渗到饱和, 坡面径流量随降雨时间的延长呈增大的趋势。随着侵蚀产沙量的增加, 侵蚀速率也增加 (图 1)。由于侵蚀量是由降雨侵蚀力和土壤抗侵蚀力共同决定的, 所以当坡度增大到一定程度时, 侵蚀量反而会减小。随着坡长的增大, 坡面汇水面积增加引起下坡的侵蚀产沙量随坡长的增大而增加, 蔡强国等^[11]认为当坡度相同时,

坡长 (即径流线的长度) 愈长, 径流速度就愈大, 汇集的径流也愈大, 侵蚀力也愈强。水体能量主要为泥沙负荷和消耗, 侵蚀又会减弱, 二者相互消长的结果, 使侵蚀从上坡向下坡基本保持不变。

随着雨强的增大, 雨滴动能与降雨侵蚀力也增大, 导致壤土抗侵蚀能力减弱, 所以壤土侵蚀因子总体趋势都是增大的 (图 1), 而黄绵土只有 Ri 值略有增加, Cs 和 Er 值都是减小的。黄绵土出现这一现象的原因是, 在降雨刚开始时, 随着土体吸水湿润, 土壤含水量增加, 土壤吸收的能量趋于减小, 湿润作用后土壤黏结力减小。随着雨强增大, 湿润土壤更容易被分离和溅散, 含沙量增加。随着降雨时间的延长, 地面漫流水层深度也随之增大, 使雨滴对水层以下的土壤表面的打击作用减小, 含沙量也相应减小, 所以黄绵土含沙量和侵蚀速率都是减小的趋势^[14]。

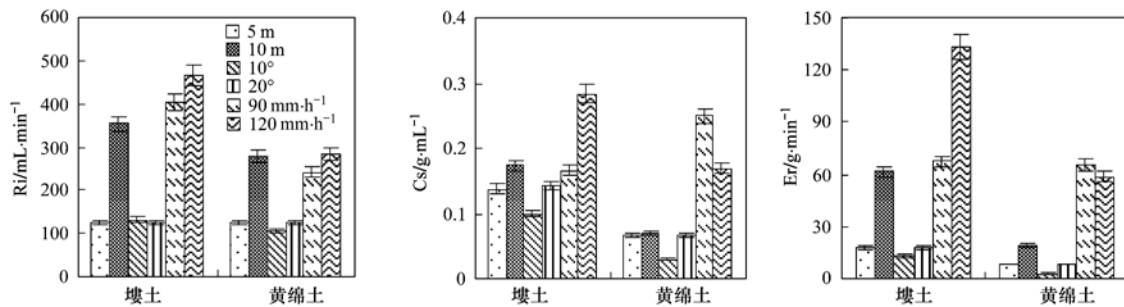


图 1 径流强度、含沙量、侵蚀速率的变化

Fig. 1 Changes of runoff intensity, sediment concentration and erosion rate

2.2 黏粒含量变化规律分析

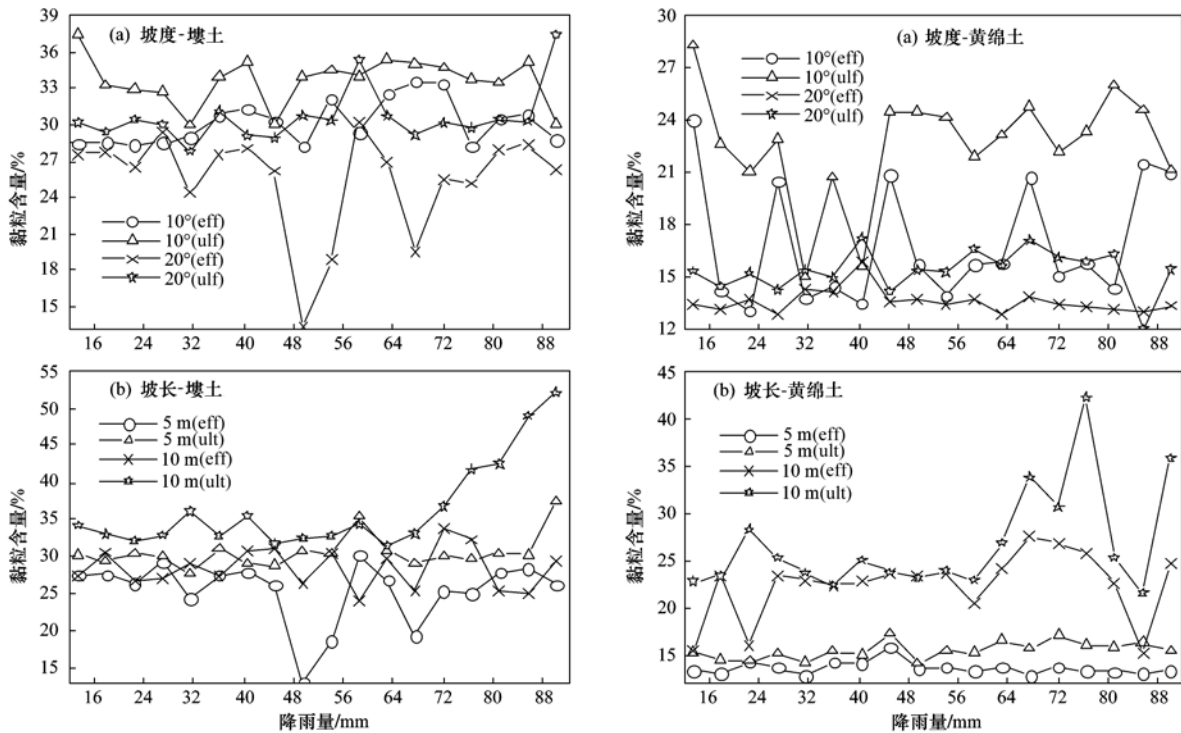
土壤颗粒组成状况是影响土壤抗蚀性的重要因素。颗粒组成越细的土壤, 黏结力越强, 在一定程度上使土壤形成团状结构体, 其抗打击的能力也越高^[15,16]。湿土层的抗分散能力明显随黏粒含量的增大而加强。黏粒含量超过 30% ~ 50% 的土壤, 凝聚力较大, 并形成稳定的土壤团粒结构, 这种团粒结构对雨滴打击溅蚀的阻力较大。黏粒含量与土壤结构系数的变化具有极显著的线性相关性, 黏粒含量对土壤微团聚体结构的形成有重要的意义^[17], 本研究就不同地形和降雨条件下, 分析降雨过程中黏粒含量的变化。

2.2.1 坡度坡长变化对黏粒含量的影响

从总体趋势上看, 随着坡度坡长的增大, 2 种土样的黏粒含量都增加。坡度为 20° 时壤土和黄绵土泥沙侵蚀黏粒含量分别增加了 4.91% 和 3.93%。将 2 种土壤颗粒分散前后颗粒之差相比较, 随着坡度的增大, 壤土增加了 1.91%, 黄绵土减少了 3.93%。壤土在 10° 时曲线变化幅度小, 在 20° 时波动非常明显在 10% ~ 30% 之间。而黄绵土刚好相

反, 在 10° 时波动非常明显在 12% ~ 25% 之间; 在 20° 时曲线比较平缓, 这主要是因为 2 种土样的基本性质不同。坡度小的径流容易汇集, 不容易搬运大颗粒 ($> 50 \mu\text{m}$), 更容易起动和搬运大量小颗粒, 尤其是黏粒 [图 2(a)]。在相同降雨条件下, 坡度增大会导致降雨期间表土含水量稍减少, 于是大坡度土壤黏结力大于小坡度, 即抗侵蚀能力增强, 所以被径流冲出的黏粒含量也减少。

随着坡长的增大, 壤土和黄绵土泥沙侵蚀黏粒含量分别增加了 2.76% 和 8.77%, 泥沙颗粒分散前后黏粒含量之差增加了 3.05% 和 2.58%。5 m 土槽的降雨中, 黄绵土从降雨开始到结束黏粒含量几乎没有变化, 而当坡长增大到 10 m 时黏粒含量波动较大, 变化范围在 15% ~ 25% 之间。说明黄绵土的黏粒含量受坡长的影响较大。壤土在 5 m 和 10 m 土槽降雨时曲线波动都很明显, 但两者黏粒含量的平均值近似相等 [图 2(b)]。综上所述, 黄绵土主要受坡长的影响, 而壤土受坡长的影响不大, 主要受土壤本身性质的影响。



eff 和 ult 分别表示泥沙侵蚀黏粒含量和泥沙原始黏粒含量,下同

图 2 黏粒含量在降雨过程中的变化

Fig. 2 Changes of clay content in rainfall process

2.2.2 雨强变化对黏粒含量的影响

不同雨强条件对黄绵土泥沙侵蚀颗粒的影响较大,即雨强增大黏粒含量增加,增加了 2.43%;而对壤土泥沙侵蚀黏粒的影响很小,只增加了 0.4%。将黄绵土和壤土 2 种雨强分散后黏粒含量之差相比较,随着雨强的增大,泥沙原始黏粒含量分别减少了 1.41% 和 5.14%,说明雨强为 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,由于雨滴动能增强,将很多黏粒团或复粒击散成小颗粒,导致泥沙单粒含量增多,超声波只分散了少数的复粒或黏粒团,所以 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的黏粒含量增加值 $< 90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。壤土在 2 种雨强条件下黏粒含量随着

降雨量的增大波动比较明显(图 3)。黄绵土泥沙侵蚀黏粒变化在 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时近似一条直线,而在 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 波动非常明显,整体呈不断上升的趋势(图 3)。综上所述雨强对泥沙颗粒分布,尤其对黏粒是最重要的影响因素^[18~21]。侵蚀泥沙中黏粒含量随降雨强度增加而增加的原因一是颗粒起动所需的拽引力与颗粒大小成反比,二是黄土高原黄土降沉中,细颗粒到达较湿润地区后,相互凝结成细粒团,小颗粒黏在一起变成了大颗粒而“凝结降落”。这一规律对黄绵土更为适用,经过激光粒度仪的分散之后,很多大颗粒又被分散为它原始的形态小颗粒,导致黏

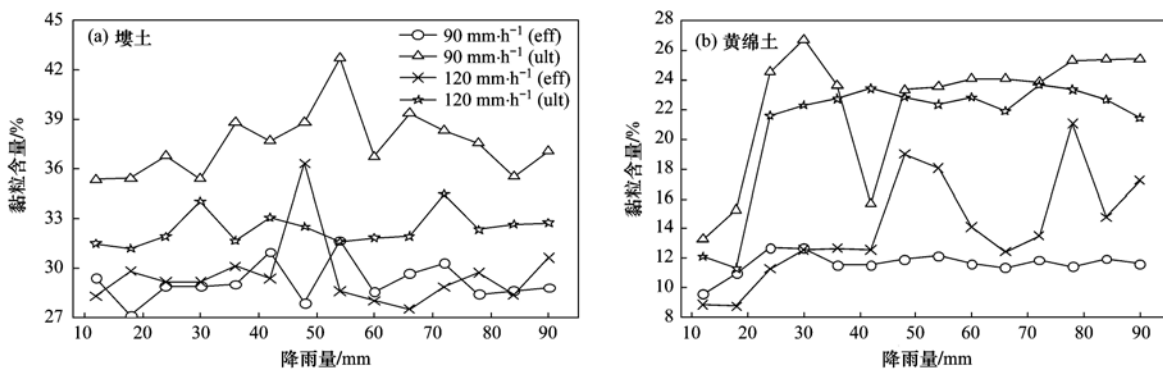


图 3 雨强变化对黏粒含量的影响

Fig. 3 Changes in rainfall intensity effects on the clay content

粒含量增加.

2.3 影响黏粒变化规律的因子

2.3.1 团聚率

团聚率(AR)说明在坡面侵蚀过程中不同粒级的泥沙颗粒被径流的搬运情况.当 $AR \geq 1$ 时,说明侵蚀泥沙作为原始颗粒被搬运,当 $AR < 1$ 时,说明它们作为团聚体或者黏粒团被搬运.塬土全部的黏粒和90%以上的粉粒 $AR < 1$,说明泥沙颗粒是作为黏粒团被搬运,原始粗颗粒($> 50\ \mu\text{m}$) $AR > 1$,被作为原始颗粒被搬运.黄绵土随着降雨动能的增大,黏粒和部分粉粒 $AR < 1$,说明全部的黏

粒作为黏粒团被搬运,少数的粉粒作为原始颗粒被搬运,剩余的粗颗粒跟塬土类似(图4).黏粒 $AR < 1$ 是由于在黄土沉积过程中,黏粒不是以单个颗粒的形式存在于土体中,而是以黏粒团或凝聚体的形式存在于土体中,黏粒团或凝聚体是作为一个独立个体与粉粒和砂粒组成“点棱接触多孔结构”的土体,在地面径流较小时,水流只能搬运粉砂粒,而不能搬运黏粒团或砂粒.但是随着降雨动能和坡面径流强度的增大,一些黏粒团或砂粒就被挟带到坡面下方或被径流搬运到出水口面导致侵蚀泥沙黏粒含量的富集^[22,23].

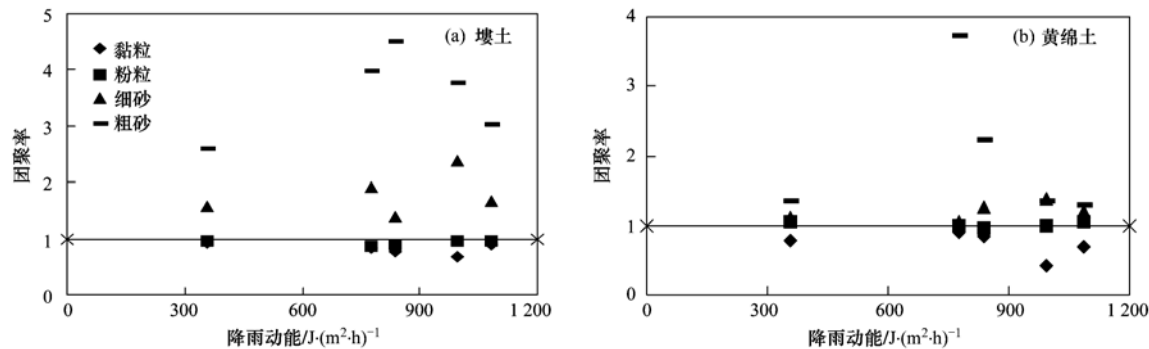


图4 2种土样团聚率的分布情况
Fig. 4 Two kinds of soil aggregation ratio of distribution

2.3.2 富集率

坡耕地土壤侵蚀引起土壤黏粒和养分的流失,土壤细颗粒在径流中传输,其结果往往导致泥沙黏粒养分的富集,导致土壤生产力降低^[24,25].当 $ER > 1$ 时,与原状土相比,泥沙侵蚀颗粒含量显著增加,导致它们的富集.当 $ER < 1$ 时,说明降雨过程中主要消耗富集的是泥沙原始颗粒而不是泥沙侵蚀颗粒.

塬土和黄绵土的黏粒 $ER > 1$,说明2种土样侵蚀泥沙颗粒的富集主要以 $< 2\ \mu\text{m}$ 黏粒富集为主,当坡面水分入渗速率小于降雨强度时产生径流.径流

是坡面土壤泥沙流失的动力和载体,径流在坡面传递过程实际上是径流与坡面泥沙颗粒相互作用的过程,在这个过程中,径流首先选择性地携带土壤细颗粒.因此,与原状土壤相比,泥沙中细颗粒特别是黏粒含量显著增加,导致泥沙黏粒的富集(图5).粉砂粒($> 2\ \mu\text{m}$) $ER < 1$,说明侵蚀泥沙颗粒分散后的粉砂粒含量比原状土壤含量少,这主要是因为黄土特殊的“凝结降落”降尘方式导致在一定水流条件下,粉砂粒较黏粒优先起动和搬运,这样大颗粒被最先流失,但是最终消耗最多的是原状土壤.2种土样粗砂富集率差别较大,塬土粗砂 $ER > 1$,这是由于塬土

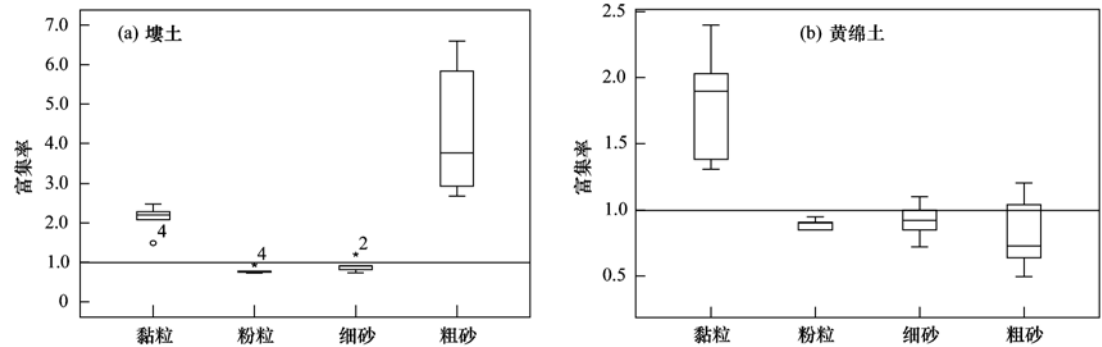


图5 2种土样富集率的分布情况
Fig. 5 Two kinds of soil enrichment ratio of distribution

本身的性质所决定的,小颗粒容易凝聚成大颗粒,所以也产生富集现象.土样颗粒的富集最终会导致养分、有机质和氮的流失,从而影响土壤质量.

3 结论

(1)在不同坡度、坡长、雨强条件下,随着坡度、坡长的增大,2种土样的 Er 、 Ri 、 Cs 值都增大.随着雨强的增大,壤土的 Er 、 Ri 、 Cs 值都增大,黄绵土只有 Ri 值是增大,这说明雨强对黄绵土的影响较小,它的抗侵蚀能力较强.

(2)随着坡度的增加,壤土的黏粒含量增加了 1.91%,黄绵土降低了 3.93%.黏粒含量随着坡长雨强的增大而增加,壤土增加了 3.05% 和 0.4%,黄绵土增加了 8.77% 和 2.43%.从降雨过程中黏粒含量的变化趋势得出,坡长是影响壤土黏粒含量的主要因素,而坡度坡长和雨强都是影响黄绵土的主要因素,从而说明壤土土壤结构比黄绵土稳定.

(3)2种土样 $<50\ \mu\text{m}$ 的细颗粒 AR 值都小于 1,说明侵蚀泥沙作为团聚体或黏粒团被搬运,所以分散后黏粒含量增多.而 $>50\ \mu\text{m}$ 的细砂和粗砂,则是作为原始颗粒被搬运.2种土样黏粒 ER 值都大于 1,由于径流的搬运作用,与原状土壤相比,泥沙颗粒中的黏粒含量显著增加,导致黏粒的富集.

(4)黏粒是土壤的重要组成部分,它与有机物的相互作用直接影响着土壤团粒结构的稳定性;黏粒的凝聚可增加土壤的通透能力,加快土壤中污染物的向下迁移,导致地下水污染,同时也是环境中污染物的有效载体.土壤侵蚀会造成田间黏粒含量降低,养分含量减少,从而导致土壤质地的沙化与土壤肥沃度的下降,土壤侵蚀泥沙黏粒导致养分流失所引起的土壤质量退化等环境问题将越来越严重,所以采取各种措施减少侵蚀泥沙黏粒的流失,是防治或减轻土壤养分流失和面源污染的一项重要手段.

参考文献:

- [1] 张科利,唐克丽.黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J].土壤学报,2000,37(1):9-15.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [3] Massey H F, Jackson M L. Selective erosion of soil fertility constituents[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1952, 16(4): 353-356.
- [4] Martínez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain [J]. Geomorphology, 2002, 45(3-4): 261-275.
- [5] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. Primary aggregate slaking and seal development[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(1): 84-93.
- [6] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [7] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J].泥沙研究,2003,(5):64-68.
- [8] 赵辉,郭索彦,解明曙,等.湖南武水流域泥沙颗粒特性及分形规律研究[J].水土保持学报,2010,24(3):45-49.
- [9] 彭怡,王玉宽,傅斌,等.紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J].水土保持通报,2010,30(2):142-144.
- [10] Shainberg I, Warrington D, Laflen J M. Soil dispersibility, rain properties, and slope interaction in rill formation and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(1): 278-283.
- [11] 蔡强国.黄土坡耕地上坡长对径流侵蚀产沙过程的影响[A].见:水土流失规律与坡地改良利用[M].北京:中国环境科学出版社,1995.50-58.
- [12] 鲁克新,李占斌,张霞,等.室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J].水土保持学报,2011,25(2):6-14.
- [13] 郑子成,吴发启,何淑勤,等.片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J].土壤学报,2011,48(5):931-937.
- [14] 柳玉梅,张兆辉,韩艳峰.坡面流土壤分离速率与输沙率耦合关系研究[J].水土保持学报,2008,22(3):24-28.
- [15] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].土壤学报,1989,26(2):109-116.
- [16] 赵西宁,吴普特,冯浩,等.坡面土壤侵蚀产沙的神经网络模拟[J].土壤学报,2006,43(2):324-327.
- [17] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. Catena, 2006, 66(3): 211-220.
- [18] Mamedov A I, Shainberg I, Levy G J. Rainfall energy effects on runoff and interrill erosion in effluent irrigated soils [J]. Soil Science, 2000, 165(7): 535-544.
- [19] 闫丽娟,余新晓,雷廷武,等.坡面流输沙能力与土壤可蚀性参数对细沟土壤侵蚀过程影响的有限元计算模型研究[J].土壤学报,2009,46(2):194-200.
- [20] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope[J]. Geomorphology, 2000, 32(3-4): 385-415.
- [21] Beuselinck L, Steegen A, Govers G, et al. Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt[J]. Geomorphology, 2000, 32(1-2): 69-82.
- [22] Huang C, Well L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion processes: model concepts and reality [J]. Earth Surface Processes and Landform, 1999, 24(6): 503-516.
- [23] 孔刚,王全九,樊军.坡度对黄土坡面养分流失的影响实验研究[J].水土保持研究,2007,21(3):14-18.
- [24] Eshel G, Levy G J, Mingelgrin U, et al. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 736-743.
- [25] 赵护兵,刘国彬,曹清玉,等.黄土丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):20-24.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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