ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第4期
2012年4月15日

目 次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO_2 的来源 …… 刘卫,位楠楠,王广华,姚剑,曾友石,范雪波,耿彦红,李燕(1041)
广州大气降水中稳定同位素对2008年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映…… 廖聪云,钟巍,马巧红,薛积彬,尹焕玲,龙昆(1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 …… 于兴娜,李新妹,登增然登,德庆央宗,袁帅(1057)
白马泉风景区夏季大气 $PM_{2.5}$ 中二次有机物的初步研究 …… 代东决,李黎,刘子芳,赵敏,冯加良,赖玮,曾燕梅,周宇,刘露云,邓仕槐(1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 …… 乔月珍,王红丽,黄成,陈长虹,苏雷燕,周敏,徐骅,张钢锋,陈宜然,李莉,陈明华,黄海英(1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究 …… 王燕丽,肖化云,肖红伟(1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨 …… 薛超,刘春颖,杨桂朋,祝陈坚,张洪海(1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价 …… 郭广慧,吴丰昌,何宏平,冯承莲,张瑞卿,李会仙(1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析 …… 黄金良,黄亚玲,李青生,周增荣,冯媛,张祯宇(1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究 …… 崔经国,单保庆,王帅(1108)
春季盘溪河水质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(1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究 …… 肖琼,沈立成,杨雷,伍坤宇,陈展图(1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价 …… 郭劲松,谢丹,李哲,陈园,孙志禹,陈永柏,龙曼(1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究 …… 徐春燕,杨洁,马明睿,胡雪芹,由文辉(1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验 …… 王建超,朱波,汪涛,易礼军(1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 …… 李振炜,于兴修,刘前进,井光花(1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性 …… 李如忠,周爱佳,童芳,李峰,钱家忠(1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 …… 张华俊,陈修康,韩博平,罗勇,杨浩文,曾艳,陈敬安(1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价 …… 敖亮,单保庆,张洪,唐文忠(1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价 …… 刘志杰,李培英,张晓龙,李萍,朱龙海(1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 …… 姜霞,王雯雯,王书航,金相灿(1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析 …… 赵利容,孙省利,柯盛(1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究 …… 潘苏红,张干,孙亚莉,解启来(1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征 …… 邹元春,于晓菲,霍莉莉,吕宪国,姜明(1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究 …… 田一梅,刘扬,赵鹏,单金林,杨所印,刘伟(1216)
新生态铁的混凝作用探索 …… 杨雪,张景成,关小红(1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究 …… 岳婵媛,缪恒锋,任洪艳,阮文权(1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究 …… 王懿萱,张娣,牛红云,孟昭福,蔡亚岐(1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究 …… 秦姝,邵嘉慧,何义亮,李雯玺(1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物 …… 张钰,顾彦,杨慧,何燕,李瑞萍,黄应平,张爱清(1247)
掺氮 Ta_2O_5 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究 …… 赵璐,邓一荣,杜瑛珣,傅翔(1252)
O_3/H_2O_2 降解水中扑灭通效能研究 …… 李绍峰,孙楚(1260)
Pr-N 共掺杂 TiO_2 光电催化降解孔雀石绿动力学 …… 沙爽,周少奇,张小娜,周晓(1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究 …… 张楠,陈天虎,周跃飞,黎少杰,金杰,王延明(1272)
聚合铝铁对 A^2/O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响 …… 温沁雪,刘爱翠,陈志强,施汉昌,吕炳南(1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响 …… 张婷婷,张建,杨芳,谢慧君,胡振,李一冉(1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响 …… 李祥,黄勇,郑宇慧,袁怡,李大鹏,潘杨,张春蕾(1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 …… 王硕,于水利,时文歆,暴瑞玲,衣雪松,李建政(1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析 …… 李志华,张玉蓉,杨帆,李胜,姬晓琴(1299)
利用氧化亚氮还原酶基因(*nosZ*)评价人工湿地系统中的反硝化菌 …… 王晓君,陈少华,张兆基,肖俊超(1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究 …… 于佳佳,陈浚,杨宣,陈建孟(1313)
1株异养硝化菌胞外聚合物的研究 …… 陈哲,张斌,谌志强,邱志刚,郭迎庆,李君文,王景峰(1318)
氨氮对稀有鮈鲃胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究 …… 王志坚,鲁增辉,石萍(1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 …… 孟德龙,杨扬,伍延正,吴敏娜,秦红灵,朱亦君,魏文学(1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响 …… 王廷廷,余向阳,沈燕,张超兰,刘贤进(1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究:^{14}C连续标记法 …… 聂三安,周萍,葛体达,童成立,肖和艾,吴金水,张杨珠(1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析 …… 王坚,张旭,李广贺(1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究 …… 孟凡勇,刘锐,小林刚,万梅,余素林,陈吕军(1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究 …… 黄锦孙,韦东普,郭雪雁,马义兵(1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响 …… 马敦超,胡山鹰,陈定江,李有润(1376)
基于3MRA模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究 …… 袁英,席北斗,何小松,魏自民,李鸣晓,姜永海,苏婧,安达(1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式 …… 兰吉武,詹良通,李育超,陈云敏(1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化 …… 方程冉,龙於洋,沈东升(1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析 …… 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,曹建华,罗为群,李文军,段晓芳(1404)
《环境科学》征订启事(1062) 《环境科学》征稿简则(1107) 信息(1135,1215,1396)

沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征

李振炜[1,2],于兴修[1*],刘前进[1],井光花[1,2]
(1. 临沂大学水土保持与环境保育研究所,山东省水土保持与环境保育重点实验室,临沂 276005; 2. 山东师范大学人口资源与环境学院,济南 250014)

摘要: 为揭示沂蒙山区不同降雨条件下的磷素流失规律,对当地孟良崮小流域 2010 年 13 场自然降雨径流量及磷素浓度的动态过程进行实地监测,研究了年内产生有效径流的首场和最大强度 2 场特殊降雨的径流、磷素输出负荷、初期冲刷效应及径流量同磷素负荷之间的关系. 结果表明,首场降雨径流中溶解态有机磷(DOP)、溶解态无机磷(DIP)、溶解态全磷(DP)、颗粒态全磷(PP)和总磷(TP)浓度明显高于最大强度降雨,而其输出负荷分别为最大强度降雨的 168%、54%、71%、48% 和 54%; 2 场降雨对小流域磷素年输出负荷有重要影响,DOP、DIP、DP、PP 和 TP 的输出总量分别占整个雨季输出的 48%、81%、70%、87% 和 81%,其中 DIP 占 DP 流失的 77%,PP 占 TP 流失的 71%; 2 场降雨均存在污染物的初期冲刷效应,最大强度降雨的初期冲刷效应较首场降雨强烈; 2 场降雨的各磷素累积输出负荷同累积径流量之间均呈线性关系,且拟合度较好,但首场降雨各形态磷素直线方程的斜率均大于最大强度降雨. 根据气象预报尽量减少在特殊降雨期间翻耕、施肥等农事活动,以及有针对性地建立沟渠、池塘等截污措施减少初期冲刷效应,是降低农业非点源污染的有效途径.

关键词: 非点源污染; 降雨径流; 磷; 初期冲刷效应; 流失规律; 沂蒙山区
中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)04-1152-07

Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall

LI Zhen-wei[1,2], YU Xing-xiu[1], LIU Qian-jin[1], JING Guang-hua[1,2]
(1. Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Environmental Protection of Shandong Province, Institute of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276005, China; 2. College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: The relationships between pollutant concentrations and precipitation-runoff combined with the first and maximum intensity natural rainfall events were monitored at the outlets of the Menglianggu watershed in 2010. The results showed that dissolved organic phosphorus (DOP), dissolved inorganic phosphorus (DIP), total dissolved phosphorus (DP), total particle phosphorus (PP) and total phosphorus (TP) concentrations in the first rainfall were higher than those in the maximum intensity rainfall which was the largest average rainfall intensity, but the output of phosphorusin the first rainfall was all higher than that in the maximum intensity rainfall except dissolved organic phosphorus. The DOP, DIP, DP, PP and TP in two special rainfall events contributed 48%, 81%, 70%, 87% and 81% of the total output of rainy season. DP and TP were mainly composed by DIP and PP respectively. The two special rainfalls have the first flush effect and the maximum intensity rainfall was stronger than the first rainfall, so the analysis of M (V) curve showed that the priority should be given to the interception of corresponding phosphorus under special events. The regression analysis results showed that a linear relation existed between runoff and nutrient output, but there were some differences which the slope of the linear equation of the first rainfall was higher than that of the maximum intensity rainfall. Reducing agricultural practices such as tillage and fertilization during special rainfall period and building canals, ponds are effective ways for mitigating agricultural non-point source pollution.

Key words: non-point source pollution; rainfall runoff; phosphorus; first flush effects; loss law; Yimeng mountainous area

降雨引起的农田氮、磷等养分流失导致土壤质量退化和水体富营养化,是农业非点源污染的主要表现形式[1]. 而磷作为水生生物的主要营养物质,是影响水体富营养化的关键因素[2],根据 OECD(经济合作与发展组织)的研究结果,80% 的水体富营养化受磷元素的制约[3]. 随着对农业非点源污染发生机制及控制等科学问题的重视,国外许多学者针对非点源氮、磷的排放规律及排放负荷开展了大量研究[4~7],国内许多学者也在芦溪流域[8]、太湖流域[9]、三峡库区[10]、四川盆地[11~15]以及丹江口库区[16]等典型地区针对小流域的非点源污染输出特征开展研究,探讨了典型降雨条件下小流域的氮、磷

收稿日期: 2011-06-03; **修订日期**: 2011-09-06
基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0877); 山东省科技攻关项目(2009GG10006015); 水利部淮委科技项目(SBJ2010003); 临沂市重大科技创新项目(201011019)
作者简介: 李振炜(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为水土保持与非点源污染, E-mail: lzw1986111@163.com
* 通讯联系人, E-mail: yuxingxiu@lyu.edu.cn

流失规律. 但对于年内能产生有效径流的首场和最大强度降雨的特殊降雨条件下，小流域不同形态磷的流失动态及迁移规律研究较少.

本研究以沂蒙山区沂河上游的孟良崮小流域为例，利用2010 年的自然降雨实地观测资料，分析能产生有效径流的首场和最大强度 2 场特殊降雨径流及磷素流失过程特征，建立径流量和非点源磷污染负荷之间的定量关系，揭示小流域特殊降雨下的磷素流失规律，以期为分析特殊降雨对流域水环境的影响提供科学依据，同时为沂蒙山区非点源污染的治理提供借鉴.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

孟良崮小流域位于沂河上游的蒙阴县垛庄镇(108°6′E，35°20′N)，地势东北高西南低，以丘陵为主，海拔高度 174 ~ 485 m (如图 1)，属暖温带大陆性季风气候，年平均气温 13.7℃，降水主要集中在 7 ~ 9 月，多年平均降水量 733.4 mm. 土壤以棕壤为主，土层浅薄，土质松散，极易被雨水冲刷和淋溶. 该小流域总面积为 102.86 hm^2，其中林地 57.34 hm^2，耕地 21.11 hm^2，果园 10.96 hm^2，荒山荒坡 9.49 hm^2，居民用地 3.45 hm^2，草地 0.21 hm^2 (如图 2)，为沂蒙山区典型小流域. 流域内无任何工业污染源，居住人口少，所有地表径流汇集后从一个出口流出，因此流域出口处的水质状况可以代表该流域的非点源污染状况.

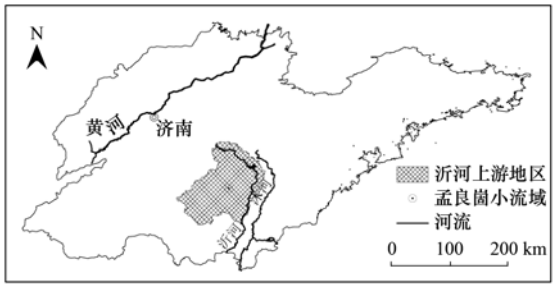

图 1　孟良崮小流域位置示意

Fig. 1　Locations of Menglianggu watershed area

1.2　样品采集与分析

降雨量的测定采用虹吸式雨量记录仪，仪器安装在孟良崮农户房顶，位置较高且周围无干扰物. 径流量的测定通过在流域出口处设有规则的三角堰与宽口堰，堰的底面和侧面平整、光滑，减少了对水流的影响. 流域调查与降雨径流监测于 2010 年能产生有效径流首场降雨(7 月 17 日)开始到 2010 年 10 月 31 日的整个雨季，该流域此期间降雨量 531.5 mm，占全年降水量的 71.82%，其中三角堰水位发生变化的有 13 场降雨，均进行监测与采样，三角堰水位开始变化后即开始采样，每 5 min 采样 1 次，雨量大时加密采样，用 500 mL 聚乙烯塑料瓶收集径流样品，降雨结束后每 30 min 采样 1 次.

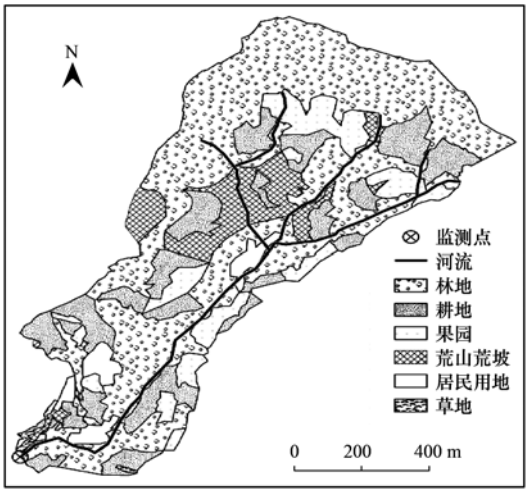

图 2　孟良崮小流域土地利用类型分布示意

Fig. 2　Land use of the Menglianggu watershed area

降雨结束后，全部径流样品经酸化后立即封存于 2 ~ 4℃ 的便携式冰柜中，并送往实验室进行分析. 分析项目包括溶解态无机磷(DIP)、溶解态有机磷(DOP)、溶解态总磷(DP)、颗粒态总磷(PP)、总磷(TP)等. 总磷用过硫酸钾氧化法测定，将水样经 0.45 μm 的滤膜过滤后再用过硫酸钾氧化测出 DP，DIP 采用钼蓝比色法测定. 径流中不同形态的磷的测定均采用分光光度法测定. 其中 DOP、PP 的测定用差减法：DOP = DP − DIP，PP = TP − DP.

1.3　数据处理与计算方法

径流量根据测得水位，利用三角堰和宽口堰“水位-流量”经验计算公式获得.

三角堰计算公式：$Q = 1.4H^{2.5}$　　(1)

宽口堰计算公式：$Q = 21.44H_a^{1.6}$　　(2)

式中，Q 为流量($m^3 \cdot s^{-1}$)，H 为三角堰水位(m)，H_a 为宽口堰水位(m). 三角堰计算公式用于测定水位较小时($H < 0.33$ m)的径流量，宽口堰计算公式用于测定水位较大时($H > 0.33$ m)的径流量.

降雨径流中的污染物平均浓度(EMCs)常用来评价降雨径流的污染状况[17,18]. 其值用污染物负荷同径流总量的比值来确定：

$$EMCs = M/Q$$

其中：

$$M = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i$$

$$Q = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i$$

式中，M 为污染物总负荷(g)，Q 为径流总量(m^3)，c_i 为污染物在样本 i 监测时的浓度($mg \cdot L^{-1}$)，Q_i 为样本 i 在监测时的流量($m^3 \cdot s^{-1}$)，Δt_i 是样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔(s).

降雨径流过程中的标准化累积污染物总量($M_{标}$)与标准化累积径流量($Q_{标}$)的 $M(V)$ 曲线($M_{标}/Q_{标}$)可以分析径流中污染物总量随流量变化的关系，是降雨径流初期冲刷效应的评估方法之一[19]. 其中，$M_{标}$ 和 $Q_{标}$ 由式(4)计算而得.

$$M_{标} = \frac{M(m)}{M} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t}{M}$$

$$Q_{标} = \frac{Q(m)}{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i}{Q} \quad (4)$$

式中，$M(m)$ 为到第 m 个($0 < m \leq$ 总样品个数 n)样品时的污染物累积负荷，$Q(m)$ 为到第 m 个样品时径流累积量，其中 $0 < M_{标} \leq 1$，$0 < Q_{标} \leq 1$.

采用 K-S 方法检验数据的正态分布性，以满足 Pearson 相关分析的数据统计假设，数据统计分析采用 SPSS 17.0 进行.

2 结果与讨论

2.1 降雨和径流量变化特征

在小流域 2010 年整个雨季监测的 13 场降雨中，选取特殊降雨 2 场，即年内产生有效径流的首场降雨和最大平均雨强降雨，其基本特征见表 1 和图 3. 首场降雨持续时间较长，初期降雨强度较小，后期降雨强度较大；最大强度降雨持续时间短，降雨强度较大.

首场降雨前流域土壤含水量很低，且初始阶段降雨强度较小，有利于雨水在土壤中下渗和保蓄，降雨量达到 36.9 mm 后三角堰水位才开始变化，之后约 320 min 才到达流量峰值，峰值流量为 0.34 $m^3 \cdot s^{-1}$，总流量为2 692.53 m^3[图 3(a)]. 首场降雨至最大强度降雨期间其它次降雨的降雨量为 51.3 mm，因此最大强度降雨前的土壤含水量相对增加，且初始阶段降雨强度较大，在降雨量 5 mm 时三角堰水位即开始变化，之后约 60 min 达到流量峰值，峰值流量为 1.2 $m^3 \cdot s^{-1}$，总流量为6 076.67 m^3[图 3(b)]. 首场降雨降雨量较最大强度降雨大，产流量却小，造成这种差异的主要原因是土壤前期含水量的不同. 2 场降雨径流量峰值均滞后于降雨强度峰值，但由于降雨前期下垫面不同以及降雨强度的差异，其滞后时间不同，滞后时间分别约 60 min 和 30 min.

表 1 2 场降雨特征值

Table 1 Characteristics of two rainfalls

降雨时间(年-月-日)	降雨量/mm	降雨历时/h	最大雨强/mm·min^{-1}	平均雨强/mm·min^{-1}	产生最大径流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	取样个数/个
2010-07-17	105.5	11	0.98	0.16	0.34	84
2010-08-12	83.5	3.25	1.96	0.43	1.2	46

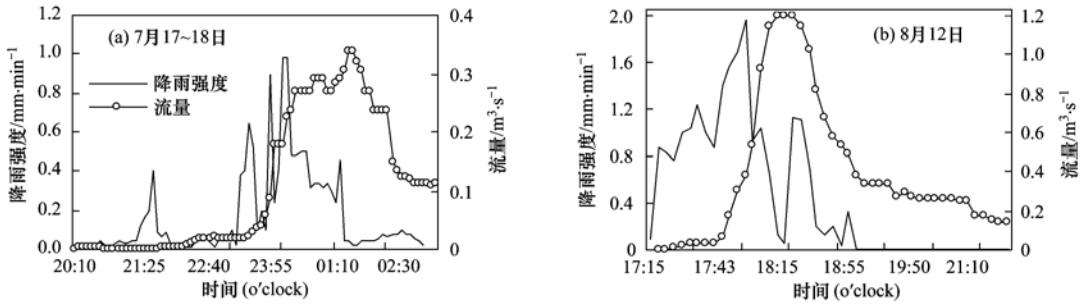

图 3 降雨强度及径流量变化

Fig. 3 Dynamic changes of rainfall intensity and flow volume

2.2 不同形态磷素浓度变化特征

2.2.1 不同形态磷素的浓度特征

表 2 给出了不同形态磷素的浓度变化范围及 EMCs. 国际上一般认为水体中总磷浓度 0.02 mg·L^{-1}

为富营养化警戒线[20],而首场降雨中 DOP、DIP、DP、PP、TP 浓度超过 0.02 mg·L^{-1}的样品数分别占总样品数(n=84)的 100%、93%、100%、95%和 100%,最大强度降雨各样品分别占总样品数(n=46)的 70%、93%、96%、91%和 100%,其中 DOP 的差异最大,原因是 DOP 受水环境的影响较小,主要受生物活动及下垫面条件差异的影响. 但从总体看首场降雨的富营养化程度大于最大强度降雨.

2 场降雨径流各形态磷素浓度最大值及 EMCs 值较大,其值均超过水体富营养化警戒线 0.02 mg·L^{-1},首场降雨产生这种现象的原因可能是 7 月 17 日降雨前期长时间无雨,以及农田施肥等导致流域内沉淀的污染物负荷增大; 最大强度降雨产生这种现象的原因是降雨强度较大,对地表冲刷强烈,从而磷素输出浓度较大. 但首场降雨各磷素浓度最大值及 EMCs 值均大于最大强度降雨,说明流域内土壤下垫面以及降雨时间间隔等对磷素浓度影响大于降雨强度对其影响.

表 2　降雨径流磷素浓度/mg·L^{-1}

Table 2　Phosphorus concentrations in rainfall runoff/mg·L^{-1}

项目	7 月 17 日					8 月 12 日				
	DOP	DIP	DP	PP	TP	DOP	DIP	DP	PP	TP
最大值	0.290	0.599	0.843	1.975	2.188	0.111	0.504	0.613	1.658	1.980
最小值	0.028	0.013	0.068	0.015	0.100	0.012	0.011	0.02	0.015	0.065
EMCs	0.146	0.274	0.42	0.802	1.222	0.034	0.222	0.256	0.743	0.999

对 2 场降雨的 DIP、DOP、DP、PP、TP 进行 K-S 检验,数据不成正态分布,因而分别对其取对数,K-S 检验结果满足正态分布条件,运用 Pearson 方法计算相关系数,见表 3. 虽然 2 场降雨径流的不同形态磷素浓度大小有一定差异,但各形态磷素却存在一定的相关性. 除 DIP 与 DOP 之间无显著相关外,其各种磷素在 P=0.01 下均为显著性相关. 其中 DIP 与 DP 相关系数为 0.853,PP 与 TP 的相关系数为 0.903,保持了较高的相关关系,这说明 DIP 与 DP、PP 与 TP 的共变趋势较好,由此进行回归分析可得 DP=1.104DIP+0.077(R^2=0.863,n=130); TP=1.131PP+0.173 (R^2=0.941,n=130). 因此只需要测定 DIP 和 PP 的浓度,就可以预测特殊降雨条件下 DOP、DP 和 TP 的浓度.

表 3　不同形态磷素之间的相关系数[1)]

Table 3　Correlative coefficients between different types of phosphorus

	DOP	DIP	DP	PP	TP
DOP	1.000	0.889	0.004	0.002	0.000
DIP	0.015	1.000	0.000	0.000	0.000
DP	0.310**	0.853**	1.000	0.000	0.000
PP	0.333**	0.409**	0.458**	1.000	0.000
TP	0.385**	0.631**	0.733**	0.903**	1.000

1) 对角线上方为 P 值,对角线下方为 r 值,n=130; ** 表示在 P=0.01 水平上显著

2.2.2　不同形态磷素的浓度变化过程

磷浓度峰值的出现较径流量峰值的出现早,但在不同的降雨条件下浓度与流量的变化趋势存在着一定的差异. 首场降雨中流量峰值成单峰态,而 DOP、DIP、DP 和 PP 具有多峰值[图 4(a)和 4(c)],出现多峰值的原因可能是由于流域内污染物沉积负荷较大,降雨初期冲刷出大量存积的污染物,污染物浓度率先达到峰值,而后随着降雨强度的增大,冲刷作用引发的水土流失引起新一轮的浓度高峰. 最大强度降雨流量峰值成单峰态,DOP 没有明显峰值,呈波浪形锯齿状变化,DIP、DP 和 PP 只有一个明显的峰值[图 4(b)和 4(d)],DOP 没有明显峰值的原因是该降雨前 5 d 出现过一次 22.3 mm 的降雨,地表受到一定程度的冲刷,流域内污染物累积负荷较小,而 DOP 的输出主要受下垫面污染物的影响; DIP、DP 和 PP 呈现单峰值是由降雨强度迅速变大,泥沙养分等携带能力变强单方面原因引起的,而这与在本区模拟典型降雨条件下磷素浓度变化过程的研究有所差异[21,22].

首场降雨中 DIP、DP 和 PP 到其峰值的过程缓慢,而最大强度降雨中到其峰值的过程迅速,这主要是由于降雨强度的差异造成的. 2 场降雨的 DIP、DP 和 PP 的变化同径流量的变化总体趋势具有一致性,浓度峰值出现在径流量峰值之前,但陈志良[23]、黄云凤等[24]在典型降雨条件下的研究也有同样结论,同时蒋锐等[25]研究表明此种情况下降雨对径流污染物可能存在初期冲刷效应.

2.3　不同形态磷素的输出特征

2.3.1　不同形态磷素的输出负荷

首场降雨的各磷素浓度大于最大强度降雨,而最大强度降雨产生的径流量远大于第一场降雨,因此 2 场降雨径流量及各磷素浓度的差异导致了各磷素输出负荷的不同. 由表 4 可以看出,首场降雨中

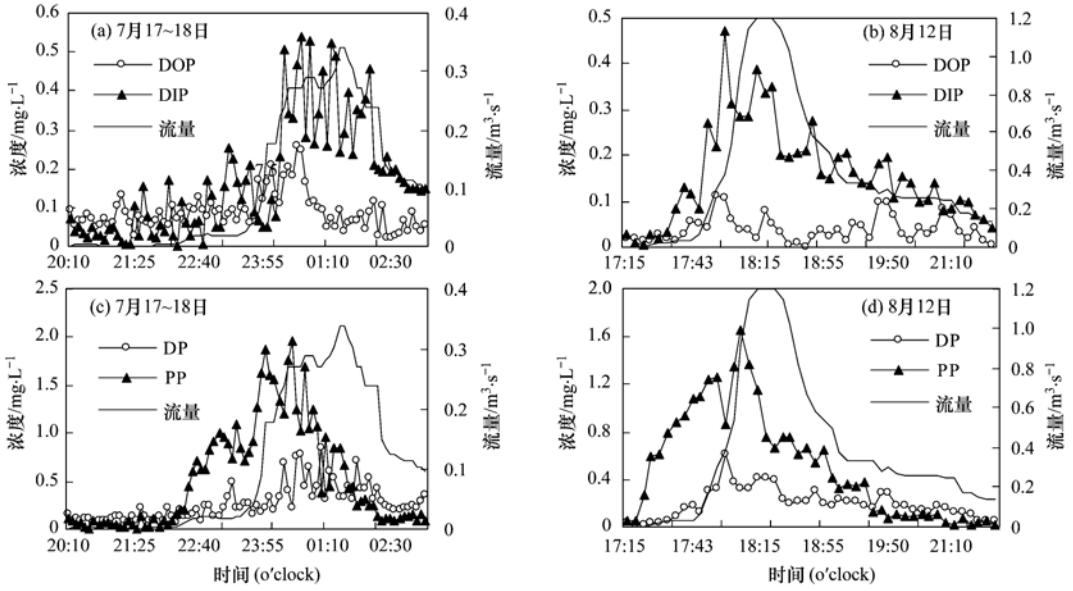

图 4 各磷素浓度随径流量变化

Fig. 4 Dynamic changes of phosphorus concentrations in runoff and flow volume

表 4 各形态磷素的输出负荷

Table 4 Output of different types of phosphorus

降雨事件	流量/m^3	负荷				
		DOP	DIP	DP	PP	TP
2010-07-17	2 692. 53	394. 46	736. 19	1 130. 65	2 158. 49	3 289. 14
2010-08-12	6 076. 67	235. 22	1 351. 51	1 586. 73	4 486. 97	6 073. 70
13 场总降雨	21 948. 48	1 306. 43	2 565. 41	3 871. 84	7 680. 50	11 552. 34

DIP、DP、PP 和 TP 的输出负荷远小于最大强度降雨,但 DOP 的输出负荷却呈现相反变化. 故此,径流量对 DIP、DP、PP 和 TP 输出负荷的影响要大于浓度差异对其影响,但浓度差异对 DOP 输出负荷的影响更大.

2 场降雨 DOP 的输出负荷分别占 DP 输出的 35% 和 17%,相应的 DIP 占 DP 负荷的 65% 和 83%,因此小流域 DP 主要是以 DIP 形式输出的,DIP 是生物可直接利用的无机磷酸盐,对地表水环境有着直接影响; 2 场降雨的 DP 输出分别占 TP 输出的 34% 和 26%,相应的 PP 分别占 TP 输出的 66% 和 74%,因此小流域 TP 主要是以 PP 的形式输出的.

根据 13 场降雨的监测数据,DIP 占 DP 输出负荷的 66%,PP 占 TP 输出负荷的 67%,因此整个雨季 DP 主要以 DIP,TP 主要以 PP 形式输出的. 2 场降雨的 DOP、DIP、DP、PP 和 TP 输出负荷之和分别占总降雨径流输出负荷的 48%、81%、70%、87% 和 81%,这与文献[1,26,27]对极端降雨下污染物输出负荷的研究结果相近. 因此对小流域首场和最大强度等降雨导致的磷素流失防治,值得进一步重视.

2.3.2 初期冲刷效应

已有不少学者在小流域非点源研究中指出,无论是在城市、工业区及高速公路等不透水下垫面[28],还是在农田、森林等透水下垫面[29],污染物浓度峰值出现在径流峰值之前,表明降雨对径流污染物可能存在初期冲刷效应. 为了更全面地理解特殊降雨下污染物的传输过程,用污染负荷累积曲线检验初期冲刷效应的存在(如图 5). 若所作的标准化累积污染物-径流量曲线位于二分线上方,表明降雨径流存在初期冲刷效应; 若重合表明污染物浓度在降雨径流中保持恒定; 若位于二分线下方则表明降雨径流污染物发生稀释.

首场降雨中 TP 和 PP 的初期冲刷效应明显,DIP 和 DOP 分别在总流量的 22% ~70% 和 50% ~100% 阶段位于二分线上方,DP 基本不存在初期冲刷效应; 而最大强度降雨 TP、PP、DP 和 DIP 均存在明显的初期冲刷效应,DOP 只有在前 54% 的径流中位于二分线上方. 2 场降雨初期冲刷效应的产生分别是由流域污染物负荷累积较大和降雨强度较大引起的,但最大强度降雨的初期冲刷效应较首场降雨

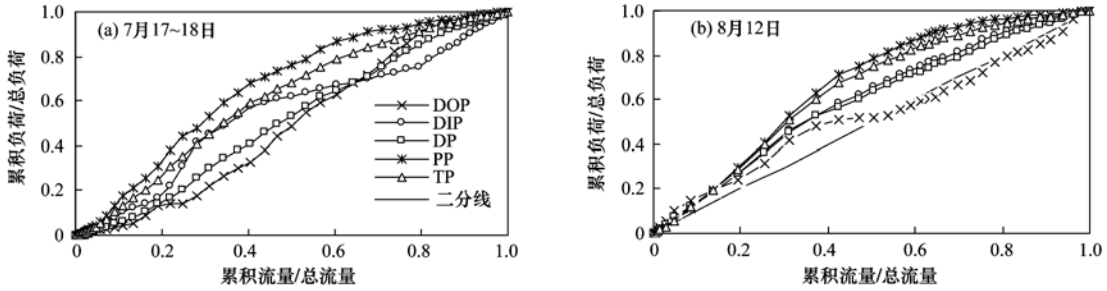

图 5　磷素负荷累积曲线

Fig. 5　Cumulative load curves of phosphorus

强烈,说明降雨强度是影响污染物排放的关键因子.

冲刷效应的量化结果可为制定截污方案提供参考. 以去除降雨径流中 50% 的 DOP 为例:首场降雨需要截获 51% 的径流量,同时此径流量中的 DIP、DP、PP 和 TP 含量分别为 62%、53%、76% 和 68%;而最大强度降雨需要截获 42% 的径流量,同时此径流量中的 DIP、DP、PP 和 TP 含量分别为 58%、57%、71% 和 67%. 所以,以含量最低的 DOP 为标准设计截污标准,可以保证其他污染指标截留更大的比例,同时有针对性地在小流域建立池塘、沟渠等截污措施可以有效地减少初期冲刷效应.

2.3.3　不同形态磷素输出负荷与径流量的分析

径流过程中径流量与污染物浓度随时间变化幅度大,污染物浓度与径流量之间并没有显著的规律可寻. 许其功[10]、Ye[30]等的研究表明氮、磷的排放负荷同径流量之间存在着非线性关系. 根据测得径流量及各磷素浓度数据,计算各磷素的累积负荷量及累积径流量,并对 2 场降雨分别进行回归分析结果见表 5.

表 5　不同形态磷素输出负荷同径流量的关系[1)]

Table 5　Relationship between different types of phosphorus output and runoff

磷素形态	首场降雨 ($n=84$)	R^2	最大强度降雨 ($n=46$)	R^2
TP	$M_{TP}=1.355Q+42.073$	0.980	$M_{TP}=1.121Q+311.270$	0.955
PP	$M_{PP}=0.914Q+55.921$	0.959	$M_{PP}=0.844Q+256.740$	0.943
DP	$M_{DP}=0.441Q-13.848$	0.997	$M_{DP}=0.276Q+54.534$	0.984
DIP	$M_{DIP}=0.293Q-16.972$	0.990	$M_{DIP}=0.240Q+48.314$	0.980
DOP	$M_{DOP}=0.149Q+3.1243$	0.982	$M_{DOP}=0.037Q+6.220$	0.989

1) 式中 M 为从降雨开始的各时段累积的污染物流失总量,Q 为对应 M 的降雨径流总量

2 场降雨的各形态磷素输出负荷同径流量均呈线性关系,且拟合程度较好. 但首场降雨各形态磷素直线方程的斜率均大于最大强度降雨,这可能是由于 2 场降雨的浓度及径流量差异造成的. 而张荣保[9]、许其功[10]等的研究,得出污染物负荷同径流量呈指数或多项式关系,产生这种差异的主要原因是不同研究区域的土地利用类型、流域管理措施、土壤理化性质不同造成的. 鉴于各形态磷素输出负荷与径流量的良好相关性,应用以上关系式可预测本流域首场降雨及最大强度降雨的各磷素输出负荷.

3　结论

(1)首场降雨到达流量峰值的过程较为缓慢,各磷素浓度具有多峰值,其 EMCs 值也明显大于最大强度降雨;而最大强度降雨 DOP 无明显峰值,其余磷素有明显的单峰值.

(2)2 场降雨的 DOP、DIP、DP、PP 和 TP 输出负荷分别占整个雨季输出的 48%、81%、70%、87% 和 81%,因此应尽量减少在特殊降雨期间进行耕作、施肥等农事活动.

(3)2 场降雨条件下均存在污染物的初期冲刷效应,通过以含量最低的 DOP 设计截污标准,截获一定比例的初期径流量可能是有效控制本区域非点源污染的有效手段.

(4)2 场降雨各磷素累积输出负荷与累积径流量均呈线性关系,但首场降雨磷素直线方程斜率均大于最大强度降雨. 该经验方程对沂蒙山区非点源污染的治理有一定的借鉴意义.

参考文献:

[1]　高超, 朱继业, 朱建国, 等. 极端降水事件对农业非点源污

染物迁移的影响[J]. 地理学报, 2005, **60**(6): 991-997.
[2] 方芳, 李哲, 田光, 等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3488-3493.
[3] 谢平. 论蓝藻水华的发生机制—从生物进化、生物地球化学和生态学观点[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 30-76.
[4] Kleinman P J A, Sharpley A N. Effect of broadcast manure on runoff phosphorus concentrations over successive rainfall events [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(3): 1072-1081.
[5] Franklin D, Truman C, Potter T, *et al*. Nitrogen and phosphorus runoff losses from variable and constant intensity rainfall simulations on loamy sand under conventional and strip tillage systems [J]. Journal of Environmental Quality, 2007, **36**(3): 846-854.
[6] Kato T, Kuroda H, Nakasone H. Runoff characteristics of nutrients from an agricultural watershed with intensive livestock production [J]. Journal of Hydrology, 2009, **368**(1-4): 79-87.
[7] Yoon S W, Chung S W, Oh D G, *et al*. Monitoring of non-point source pollutants load from a mixed forest land use [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 801-805.
[8] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 108-112.
[9] 张荣保, 姚琪, 计勇, 等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律——以宜兴梅林小流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(1): 94-98.
[10] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 326-331.
[11] 李庆召, 王定勇, 朱波. 自然降雨条件下紫色土区磷素的非点源输出规律[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(6): 1050-1052.
[12] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1353-1358.
[13] 罗专溪, 朱波, 王振华, 等. 川中丘陵区村镇降雨特征与径流污染物的相关关系[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(11): 1032-1036.
[14] 罗专溪, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土丘陵区农村集镇降雨径流污染特征[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9): 1823-1831.
[15] Yang J L, Zhang G L, Shi X Z, *et al*. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China [J]. Soil & Tillage Research, 2009, **105**(2): 292-299.
[16] 罗璇, 史志华, 尹炜, 等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 58-62.
[17] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(2): 134-143.
[18] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1781.
[19] Sansalone J J, Cristina C M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(11): 1301-1314.
[20] 张少源, 冯明磊, 林杉, 等. 三峡库区小流域河流可溶性硅、无机氮和磷的研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2716-2722.
[21] 于兴修, 马骞, 刘前进, 等. 横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 428-436.
[22] 马骞, 于兴修, 刘前进. 横坡耕作径流溶解态氮磷流失特征及其富营养化风险——以鲁中南山地丘陵区为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(3): 492-499.
[23] 陈志良, 程炯, 刘平, 等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(5): 30-33.
[24] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(4): 735-739.
[25] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J]. 水力学报, 2009, **40**(6): 659-666.
[26] Nash D M, Halliwell D J. Fertilizer and phosphorus loss from productive grazing systems [J]. Australian Journal of Soil Research, 1999, **37**(3): 403-429.
[27] Ramos M C, Martínez-Casasnovas J A. Nutrient losses from a vineyard soil in northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event [J]. Catena, 2004, **55**(1): 79-90.
[28] Maniquiz M C, Lee S, Kim L H. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 946-952.
[29] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 927-934.
[30] Ye W, Bates B C, Viney N R, *et al*. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments [J]. Water Resource Research, 1997, **33**(1): 153-166.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 4

Apr. 15, 2012

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO_2 by Carbon Isotope Composition ····· LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, *et al.* (1041)

Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation ····· LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, *et al.* (1050)

Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing ····· YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, *et al.* (1057)

Secondary Organic Tracers in Summer $PM_{2.5}$ Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province ····· DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, *et al.* (1063)

Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust ····· QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, *et al.* (1071)

Platanus orientalis Foliar N% and $\delta^{15}N$ Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area ····· WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)

Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters ····· XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, *et al.* (1086)

Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake ····· GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, *et al.* (1091)

Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed ····· HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, *et al.* (1098)

Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River ····· CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)

Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring ····· ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, *et al.* (1114)

Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China ····· XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, *et al.* (1122)

Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period ····· GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, *et al.* (1129)

Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms ····· XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, *et al.* (1136)

Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservior Area ····· WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, *et al.* (1144)

Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall ····· LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, *et al.* (1152)

Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City ····· LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, *et al.* (1159)

Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir ····· ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, *et al.* (1167)

Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir ····· AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, *et al.* (1176)

Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta ····· LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, *et al.* (1182)

Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake ····· JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, *et al.* (1189)

Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay ····· ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)

Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India ····· PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, *et al.* (1204)

Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain ····· ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, *et al.* (1209)

Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System ····· TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, *et al.* (1216)

Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant ····· YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)

Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation ····· YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, *et al.* (1227)

Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment ····· WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, *et al.* (1234)

Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process ····· QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, *et al.* (1241)

Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite ····· ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, *et al.* (1247)

Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta_2O_5 ····· ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, *et al.* (1252)

Degradation of Prometon by O_3/H_2O_2 ····· LI Shao-feng, SUN Chu (1260)

Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO_2 Photocatalyst ····· SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, *et al.* (1267)

Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China ····· ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, *et al.* (1272)

Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A^2/O System ····· WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, *et al.* (1278)

Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System ····· ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, *et al.* (1283)

Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor ····· LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, *et al.* (1288)

Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment ····· WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, *et al.* (1293)

Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal ····· LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, *et al.* (1299)

Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (*nosZ*) ····· WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, *et al.* (1306)

Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifer by Ultraviolet Mutagenesis ····· YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, *et al.* (1313)

Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain ····· CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, *et al.* (1318)

Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow ····· WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)

Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure ····· MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, *et al.* (1331)

Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils ····· WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, *et al.* (1339)

Quantifying Rice (*Oryza sativa* L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ^{14}C Labeling ····· NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, *et al.* (1346)

Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields ····· WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)

Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils ····· MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, *et al.* (1361)

Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils ····· HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, *et al.* (1369)

Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads ····· MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, *et al.* (1376)

Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste ····· YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, *et al.* (1383)

Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation ····· LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, *et al.* (1389)

Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill ····· FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)

Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area ····· YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, *et al.* (1404)

《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 4 月 15 日　33 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 4　Apr. 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