

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应

郭怀成¹, 向男¹, 周丰^{2*}, 王永华², 李发荣³, 朱翔⁴, 毛国柱⁵, 于书霞⁶, 李娜¹, 盛虎¹, 杨永辉¹, 何成杰¹, 王翠榆¹

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 昆明市环境监测中心, 昆明 650028; 4. 云南省环境科学研究院, 昆明 650034; 5. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 6. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 为了有效理解滇池非点源入湖过程, 选择滇池流域宝象河开展暴雨径流初始冲刷效应的初步研究。2009年雨季, 在其干流沿程上、中、下游设置3个断面进行了初期3场暴雨及河道水量、水质同步观测, 并提出降雨净冲刷量、负荷净冲刷量以及净冲刷径流平均浓度 EMC_n 的定义与计算方法。结果表明, 宝象河 TSS、TN、TP、高锰酸盐指数的 EMC_n 、累积曲线 $M(V)$ 随着河道沿程不透水地面比例和人口规模的增加而提高, TSS、TP 负荷贡献率及其 $M(V)$ 与降雨强度的变化趋势一致, 而 TN 和高锰酸盐指数负荷贡献率则与降雨量表现正相关, 其中 TN 中 NO_3^- -N 所占比例随着降雨事件次数增加而逐渐降低; 此外, 提出的 EMC_n 也被证实能有效消除各点位的基流及其负荷影响, 相对冲刷径流平均浓度, 更为真实反映且能放大沿程断面间、不同降雨事件间的暴雨初始冲刷效应的差异。

关键词: 河流暴雨径流; 冲刷径流平均浓度; 富营养化; 非点源污染; 滇池

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1298-10

First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed

GUO Huai-cheng¹, XIANG Nan¹, ZHOU Feng², WANG Yong-hua², LI Fa-rong³, ZHU Xiang⁴, MAO Guo-zhu⁵, YU Shu-xia⁶, LI Na¹, SHENG Hu¹, YANG Yong-hui¹, HE Cheng-jie¹, WANG Cui-yu¹

(1. Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Laboratory for Earth Surface Process, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Kunming Environmental Monitoring Center, Kunming 650028, China; 4. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China; 5. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 6. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: To understand riverine process of non-point source effectively, first flush effects of storm events were investigated at Baoxiang River of Lake Dianchi Watershed. Three sampling stations were selected along Baoxiang River for observing the flow rate and pollutant concentrations of the first three storm events from June 2009 to August 2009. Net discharged volume, net discharged loading, and net event mean concentration (EMC_n) were proposed with their calculation methods. According to the analysis of three storm events at three stations, the following results could be extracted: ① the larger the percent of impervious land and population density were, the higher EMC_n of TSS, TN, TP, permanganate index and their cumulative curves [$M(V)$] were along the river; ② TSS, TP loadings as well as their $M(V)$ were positively correlated to the storm intensity, while TN and permanganate index loadings were consistent with the total rainfall of each storm event, where the percent of NO_3^- -N in total nitrogen decreased gradually when the number of storm events increased; ③ compared to tradition EMC, EMC_n was proven to be a better indicator to accurately uncover and magnify the differences in first flush effects of storm events among different stations or storm events.

Key words: riverine storm runoff; event mean concentration; eutrophication; non-point source; Lake Dianchi

滇池地处长江、红河、珠江三大水系分水岭地带(24°29'~25°28'N, 102°29'~103°01'E), 流域面积2 920 km², 湖泊面积为 309 km² (1 887.4 m 水位), 平均水深 5.3m, 库容 15.6 亿 m³。由于处于云南省昆明市下游, 每年城市排放的大量工业废水、生活污水、城市农业非点源、大气干湿沉降通过 29 条河流汇入滇池, 2010 年中国环境状况公报显

示^[1], 滇池已经是全国湖泊中富营养化程度最严重且唯一的重度富营养湖泊。滇池水专项研究成果表

收稿日期: 2012-06-14; 修订日期: 2012-09-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07102-006, 2013ZX07102-06); 国家自然科学基金项目(41201077)

作者简介: 郭怀成(1953~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水环境学、环境规划与管理, E-mail: hcguo@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhoulf@pku.edu.cn

明,滇池流域 TN、TP 的非点源(城市径流、农业径流、大气湿沉降)入湖负荷在 2009 年分别占到 40% 和 55%^[2]. 为了有效控制滇池非点源入湖负荷,有必要认识滇池流域河流暴雨径流及其污染特征.

暴雨径流是暴雨对集水区的大气、下垫面及合流制排水管道的冲刷而形成了地表径流及非点源迁移转化的过程,识别其初始冲刷效应(最初小部分径流携带整个降雨事件大部分污染负荷)对非点源污染控制具有重要的指导作用^[3~8]. Bertrand-Krajewski 等^[7]对 12 个合流制和分流制排水系统的 197 次降雨进行了数据分析,认为暴雨径流及其污染特征没有普适性的规律,各自有其独特性;李国斌等^[9]通过漳河镇汇水渠暴雨径流观测而发现暴雨径流前期 TSS 和 TP 浓度很高,有明显初始冲刷效应;在武汉的研究证实十里铺排水口径流的 TSS、TN、TP 及 COD 均有一定初始冲刷效应^[10~16],黄金良等^[17]对澳门 2 个分流制城市小流域进行监测,结果与前述李国斌等^[9]的研究结果类似,该区域 TSS、TP 浓度在前期径流浓度很高,表现出稳定的初始冲刷现象,但 TN 及 COD 却只在部分降雨中产生初始冲刷效应;Kim 等^[18]对合流制城市集水区的研究表明该区域暴雨径流中 TSS、TN、TP 及 COD 均具有明显初始冲刷效应, Lee 等^[19]对 2 个居民区及 1 个工业区的 13 个集水区出口进行的 38 场降雨监测结果与 Kim 等^[18]一致, Lee 等^[20]还对韩国 Taejon 和 Chongju 的 9 个不同类型支流径流进行 34 场降雨监测,结果表明各污染物初始冲刷效应强度不一,表现为 $\text{COD} > \text{SS} > \text{PO}_4^{3-} - \text{P} > \text{NO}_3^- - \text{N}$. 也正因为暴雨径流及其污染特征与当地降雨量、最大降雨强度、降雨历时、监测前未降雨天数(ADWP)、区域气候、污染物源特征、土地利用方式、排水系统等因素有关^[21~23],其他地区河流暴雨径流规律不适应滇池流域,尽管张荣社等^[24]、张宇等^[25]和黄俊等^[26]在滇池东岸大渔乡开展农业地块初期场暴雨监测,但还没有针对滇池流域入湖河流开展暴雨径流的初始冲刷效应研究.

作为滇池流域的前期探索性研究,选择滇池第二大入湖河流——宝象河开展暴雨径流初始冲刷效应的初步分析. 为了刻画河流流域不同人口、土地利用和污染源结构影响的差异性,在宝象河沿程上、中、下游设置 3 个断面进行了雨季初期 3 场暴雨径流长时间水量、水质同步观测. 此外,为了对比不同断面及不同降雨的暴雨径流特征,消除基流及其负荷的影响,还将提出降雨净冲刷量、负荷净冲刷

量以及净冲刷径流平均浓度的定义和计算方法;重点分析了宝象河不同断面、不同降雨的径流和污染物浓度过程线差异,计算了净冲刷负荷 M_n 、净冲刷径流平均浓度 EMC_n 及绘制 $M(V)$ 曲线以对比降雨的冲刷效应,并进一步分析了不同污染物间的相关性.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宝象河属昆明古六河之一,源于官渡区东南部老爷山,流经大板桥镇、阿拉乡、昆明市经济开发区、小板桥镇,在宝丰村汇入滇池(图 1),干流全长 36.2 km,高程落差 105 m. 宝象河流域位于滇池的东北部($24^\circ 58' \sim 25^\circ 03' \text{N}$, $102^\circ 41' \sim 102^\circ 56' \text{E}$),流域面积 302 km^2 ,约占滇池流域的 10.3%. 流域年均降雨量 953 mm ^[27],集中在 5~10 月,其降雨量占到多年(2005~2010 年)平均值的 88% 以上,年平均气温为 14.7°C . 从土地利用方式来看,宝象河流域属于典型的农业-城市混合型流域(图 1),以林地、耕地和建设用地为主,分别占到流域面积的 59.4%、18.1% 和 16.3%. 此外,宝象河水系也较为复杂,比如,流域上游的宝象河水库自 2003 年以来不再下泄水量,在干流中游(图 1 中 S2 处)则有 2 条支流(东、西鸳鸯沟)用于流域外的农业灌溉,而在干流下游(图 1 中 S3 处)则由洋浦分洪闸控制形成新、老宝象河 2 条支流,但最终都汇入滇池.

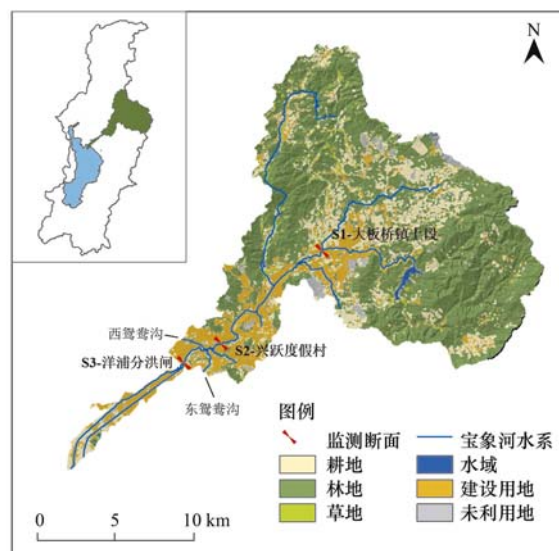


图 1 宝象河流域区位及暴雨径流监测断面分布示意

Fig. 1 Baixiang River Watershed and its sampling stations

1.2 监测方案

本次监测将大雨以上(12 h 内降雨量 $15.0 \sim$

29.9 mm 或 24 h 内降雨量 25.0 ~ 49.9 mm 的降雨) 的降雨事件列入有效降雨监测的范围^[28]. 2009 年, 对宝象河沿程 3 个断面进行了雨季初期 3 场暴雨径

流监测, 采样时间分别为 6 月 30 日 ~ 31 日、7 月 20 日 ~ 21 日、7 月 25 日 ~ 26 日, 连续采样历时分别 28、32 和 28 h(表 1).

表 1 宝象河暴雨径流监测时 3 场降雨过程特征

Table 1 Characteristics of three rainfall processes in Baoxiang River Watershed

日期(月-日)	降雨开始时间	降雨事件历时 /min	降雨量 /mm	平均降雨强度 /mm·h ⁻¹	最大降雨强度 /mm·h ⁻¹	与前次降雨间隔 /d	监测点位
06-30 ~ 06-31	4:15am	1 065	49.0	2.761	12.4	7	S1 ~ S3
07-20 ~ 07-21	12:00am	1 200	24.9	1.245	5.0	20	S3
07-25 ~ 07-26	11:30am	480	16.9	1.878	8.0	4	S3

为了反映河流沿程人口、土地利用和污染源结构的特征, 在宝象河设置了 3 个断面(图 1), 即大板桥镇上段(S1)、兴跃度假村(S2)、洋浦分洪闸上游(S3), 分别处于不同下垫面和污染排放特征的集水区(表 2). 其中, S1 断面对应的集水区以林地和耕地为主, 人口密度较小(184 人·km⁻²), 主要污染源为种植业农业面源和规模化畜禽养殖点源; S2 对

应的集水区包括 S1 集水区及 S1、S2 之间区域, 相应的集水区建设用地所占比例增加到 13.1%, 人口密度达到 317 人·km⁻², 城镇生活点源贡献则得以显现(TN 和 TP 所占比例分别为 32.6% 和 36.8%). S3 对应的集水区城市化特征再次加强, 人口密度、建设用地占总面积比例、生活污水负荷占总负荷比例都高于 S1 和 S2 所对应的集水区.

表 2 宝象河 3 个断面对应集水区人口和污染排放特征¹⁾

Table 2 Population and pollution emissions corresponding to three sampling stations along Baoxiang River

断面	对应集水区面积 /km ²	人口密度 /人·km ⁻²	用地类型分布/%		污染排放比例(TN)/%			污染排放比例(TP)/%		
			林地	建设用地	种植业	工业	城镇生活污水	种植业	畜禽养殖业	城镇生活污水
S1	162.9	184	67.9	7.9	50.5	11.8	11.8	26.2	50.6	22.1
S2	250.7	317	62.9	13.1	38.8	7.2	32.6	18.5	34.6	36.8
S3	260.4	358	61.5	14.7	35.0	6.4	36.8	16.9	32.3	39.7

1) 表中仅列出各类污染物各自贡献最大的 3 类污染源

监测指标包括降雨量、断面地形、水位、流速以及总悬浮颗粒物(TSS)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数等水质指标. 其中, 降雨量小时数据采用美国 HOBO® 的自动雨量计(RG3-M)测定, 断面地形采用美国 YSI® 的多普勒声学断面测流系统 RiverCat 测定, 瞬时断面水位观测采用美国 HOBO® 的水位温度自动记录仪(U20-001-01, 测量精度为 ± 0.5 cm), 瞬时流速观测采用美国 Global Water® 的 FP201 便携式流速仪, 水样采样、收集、保存和成分分析则参考文献[29], 其中, TSS 通过 103 ~ 105℃ 烘干称重测量, TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 采用气相分子吸收光谱法, TP 采用离子色谱法, 高锰酸盐指数采用酸性法.

为了实现暴雨径流的流量、浓度、负荷等过程线的质量控制, 整个监测过程严格按照如下操作规则进行: ① 每个监测断面由 3 名人员独立负责水位、流速监测及水样的同步采取; ② 在大雨或暴雨发生前, 多次进行监测并采水样, 直到降雨后断面水位出现上涨, 选择此前最近一次监测结果作为断面

基流; ③ 按水位每上涨 5 ~ 10 cm 进行水位、流速监测及水样的同步采取, 直到水位回落到基流水平.

④ 为了能反映不同径流和水质变化波动特征, 在所有水样中选择 7 ~ 8 个用于水质分析. ⑤ 在监测和分析的质量控制方面, 要求每次现场监测需在断面不同位置重复 3 次平均, 水样采样需 3 次混合且确保采样瓶采满, 同时, 在水样采样中选择 1 个水样分装 2 瓶, 作为密码样来检验实验分析质量.

1.3 计算方法

暴雨发生时自水位开始上涨到最后回落至基准水位为一次降雨事件, 为评价单场暴雨所产生的河道径流对滇池的影响, 计算单场降雨中通过河道断面的径流量(V)及污染物负荷通量(M), 两者比值得到降雨场次平均浓度(event mean concentration, EMC). 为了对比不同断面及同一断面的暴雨径流过程特征, 有必要消除基流及其负荷的影响, 因此, 本研究提出了消除基流影响的降雨净冲刷量 V_n 及负荷净冲刷量 M_n , 两者比值则定义为净冲刷径流平均浓度 EMC_n.

(1) EMC 在任意一场暴雨中, 污染物浓度随

时间起伏很大,因而需要一个指标对降雨径流过程水质进行整体评价,EMC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的计算公式为:

$$\text{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T c_i Q_i dt}{\int_0^T Q_i dt} \cong \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

式中, M 为整个降雨过程中总污染物浓度, g ; V 为相对应的总径流量, L ; t 为径流时间, min ; c_i 为随时间变化的污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q_i 为随时间变化的径流流量, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; T 为降雨事件历时, min ; n 指 t 时间段内径流取样次数; Q_i 指第 i 次取样时的流量, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; c_i 第 i 次取样时的污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2) EMC_n 由于各断面基准流速及污染物基准负荷受集水区社会、经济特征影响,同一断面不同时间的基准数值也会有波动,核算的河道总流量 V 和总负荷通量 M 并不能反映降雨冲刷的负荷量区别,在进行不同降雨事件污染特征对比时,将核算的河道总流量及总负荷通量减去基准量 V_0 及 M_0 , 得到 V_n 和 M_n , EMC_n 为两者比值:

$$\text{EMC}_n = \frac{M_n}{V_n} = \frac{M - c_0 Q_0 T}{V - Q_0 T} \quad (2)$$

式中, Q_0 为第 1 次监测的基准流量, $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; c_0 为第一次监测的污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(3) $M(V)$ 曲线及 FF_{40} 暴雨径流的变化特征可通过径流过程线及污染物浓度过程线表征,但由于上述两者受排水系统、降雨条件、集水区特点等多种因素影响,即便是在同一个区域,不同降雨的两个过程线相差也会很大,较难进行不同降雨事件的对比. Geiger^[30] 提出了 $M(V)$ 曲线对比不同降雨事件即基于累积径流量及污染物累积负荷量绘制的无量纲曲线. 污染物累积负荷比例 $L/\%$ 和暴雨径流累积比例 $F/\%$ 为:

$$L = \frac{m(t)}{M} = \frac{\int_0^t c_i Q_i dt}{M}, F = \frac{v(t)}{V} = \frac{\int_0^t Q_i dt}{V} \quad (3)$$

式中, $m(t)$ 为 $0 \sim t$ 时刻污染物累积负荷, kg ; M 为次降雨污染物负荷; $v(t)$ 为至 t 时刻累积径流量, m^3 ; V 为次降雨径流量, m^3 . 以 F 值作为横坐标值, 以 L 值作为纵坐标值作图即可得 $M(V)$ 曲线. 当曲线位于 45° 对角线上方时则表示发生了初始冲刷, 曲线与对角线垂向最远距离越大则初始冲刷效应越强, 根据宝象河 3 个断面 $M(V)$ 曲线特点(图 4 和图 5), 通过比较 $L = 40\%$ 所对应的 F 值(FF_{40})来判断

初始冲刷效应. 对于初始冲刷效应强的区域, 集中控制其暴雨前期径流即可有效控制暴雨径流入湖负荷量.

2 结果与分析

2.1 流量和污染物浓度过程线

图 2 为第 1 次降雨中 3 个河道断面的流量过程

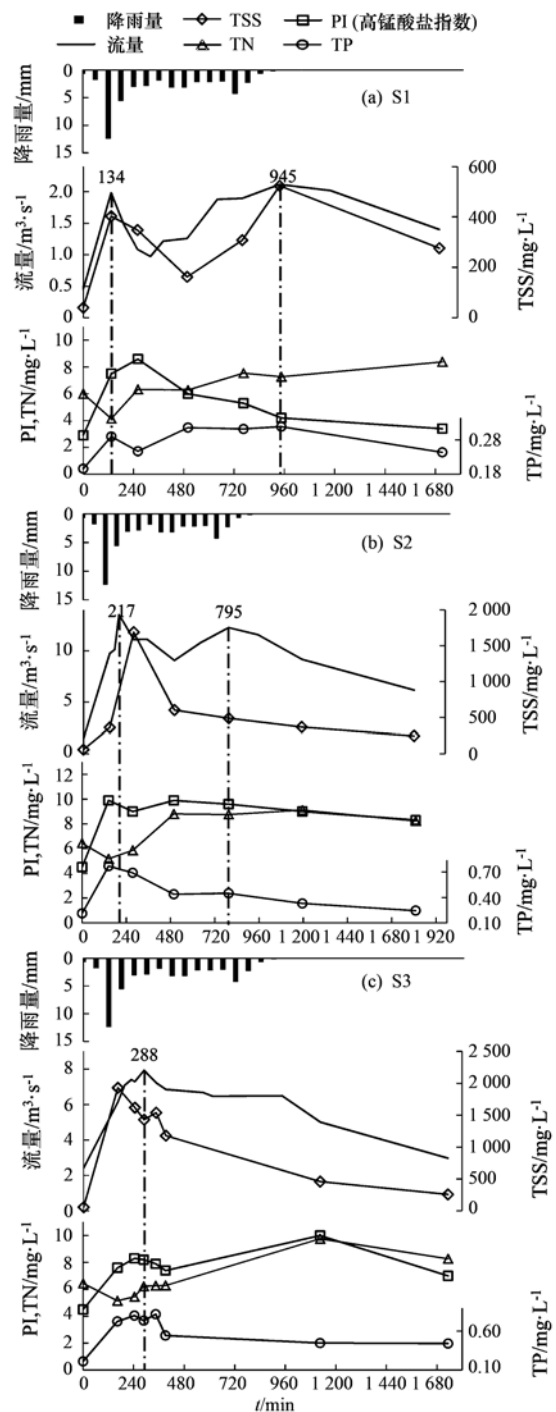


图 2 第 1 次降雨时 3 个断面径流及污染物浓度过程线

Fig. 2 Hydrographs and pollutographs at three sampling stations in the first storm event

线及污染物浓度过程线,该次降雨有2次峰值.从3个断面的流量过程线看,S1和S2的径流量对降雨的变化比断面3更敏感,2个断面对应集水区位于较上游部分,坡度较大,且2个断面均是集水区唯一径流出口,因而出现强降雨时,产流和汇流过程较快.由于S2下游存在东、西鸳鸯沟的分流,S3处流量反而低于S2,其流量波动也较小.从污染物浓度过程线来看,S2及S3的污染物浓度具有典型的城市场型径流变化特征,降雨初期将高浓度TSS与TP冲刷入河道后,后期河道径流中TSS与TP浓度便一直保持较低水平,而S1处径流TSS则在整场降雨中随降雨量的增加而升高.对比发现3个断面的径流TN浓度变化与流量呈反比,说明宝象河流域TN负荷可能主要以溶解态冲刷进入河道.

图3为S3的3次降雨流量及负荷浓度过程线,第1次降雨为长时间高强度降雨,第2次降雨为长时间低强度降雨,第3次降雨为短促强降雨,该次降雨由于太过急促,只捕捉到径流骤升的过程.能明显看出降雨强度对河道径流峰值影响很大,对径流中TSS最大浓度也起着决定性的作用.

2.2 不同点位同场暴雨的初始冲刷效应

2.2.1 沿程断面间EMC和 EMC_n 的对比分析

表3为沿程3个断面EMC和 EMC_n ,结果表明3个断面4种污染物的 EMC_n 均高于EMC,相比而言, EMC_n 更能真实反映且能放大沿程断面间暴雨初始冲刷效应的差异,尤其是S3,EMC的结果表明S2的高锰酸盐指数高于S3,但根据土地利用和污染源结构特征,S3的暴雨冲刷效应应该高于S2, EMC_n 有效地表达了这个特征.此外,以S3点位为例, EMC_n 与国家湖泊V类水标准对比,TN的 EMC_n 超标近4倍(标准为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),TP超标3.5倍(标准为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而高锰酸盐指数为 $13.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,略低于V类水浓度($15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),暴雨期间河道径流直接汇入,对滇池造成明显负荷冲击.从各污染物的 EMC_n 对比来看,各污染物的 EMC_n 自上游断面到下游断面均有显著升高,说明随着城市化程度的升高,地面及排水管道积累的可冲刷负荷逐渐增多,其中TSS与TP的变化最为明显,S2处的TSS与TP冲刷径流平均浓度 EMC_n 分别为 $608\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $0.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在S3处2种污染物的 EMC_n 都升高了1倍左右.而这个结果与Qin等^[31]研究一致,同样发现径流中TSS的EMC与居民区、工业区及道路的占地比例呈正相关.

2.2.2 沿程断面间 $M(V)$ 曲线对比分析

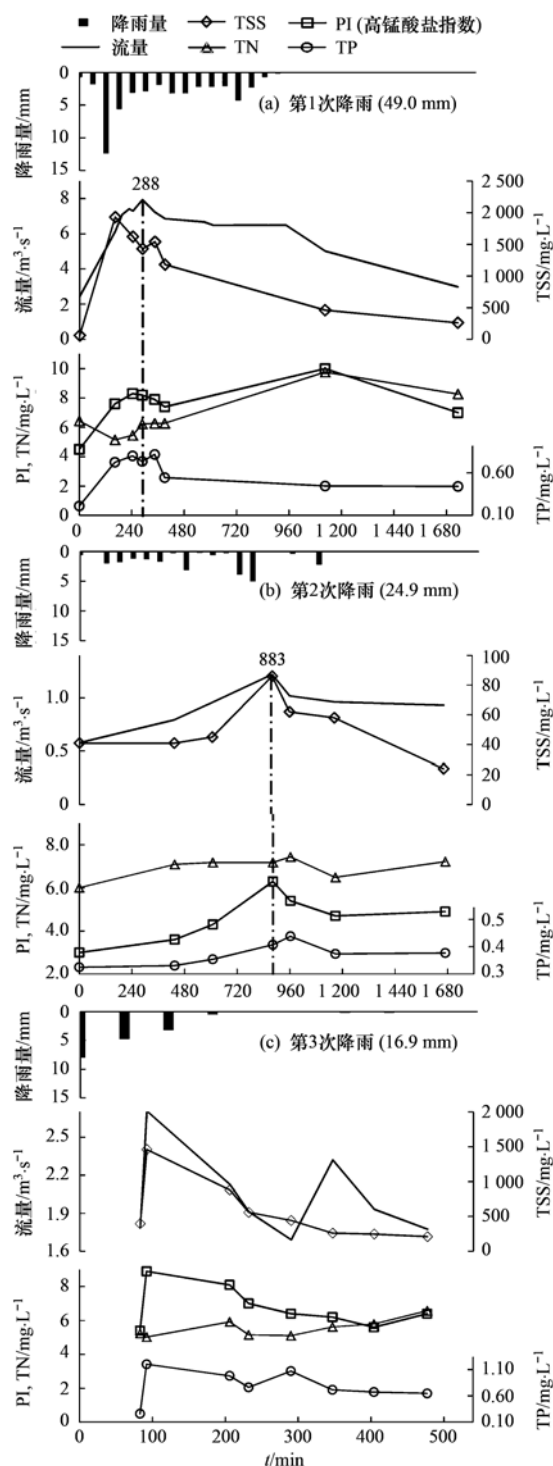


图3 断面3的3次监测径流及污染物浓度过程线

Fig. 3 Hydrographs and pollutographs at the third sampling station in different storm events

以第1次降雨事件的3个断面 $M(V)$ 曲线来看(图4),其TSS的 FF_{40} 分别为37%、60%、72%(图4中虚线处),TSS初始冲刷强度自上游到下游越来越明显, Lee等^[19]和Qin等^[31]也发现随着集水区不透水地面比例的增加,该区域的初始冲刷强度增强.高锰酸盐指数的初始冲刷效果仅S1

较明显,3 个断面的 TN 初始冲刷强度都较低,与 TN 大多以溶解态进入径流有关. S2 和 S3 的 TSS 及 TP 初始冲刷效果较明显,因而在进行雨季面源

控制时,通过河道径流截留对 TP 的控制效果会优于 TN. 如 S3,截留前 40% 径流分别能截留 50% TP 负荷及 32% TN 负荷.

表 3 第 1 次降雨时沿程 3 个断面 EMC 及 EMC_n 对比/mg·L⁻¹

断面	TSS		TN		TP		高锰酸盐指数	
	EMC	EMC _n	EMC	EMC _n	EMC	EMC _n	EMC	EMC _n
S1	321	438	7.31	7.84	0.28	0.32	4.84	5.65
S2	517	608	8.14	8.48	0.42	0.46	9.16	10.09
S3	804	1 598	8.09	9.85	0.54	0.89	8.63	13.05

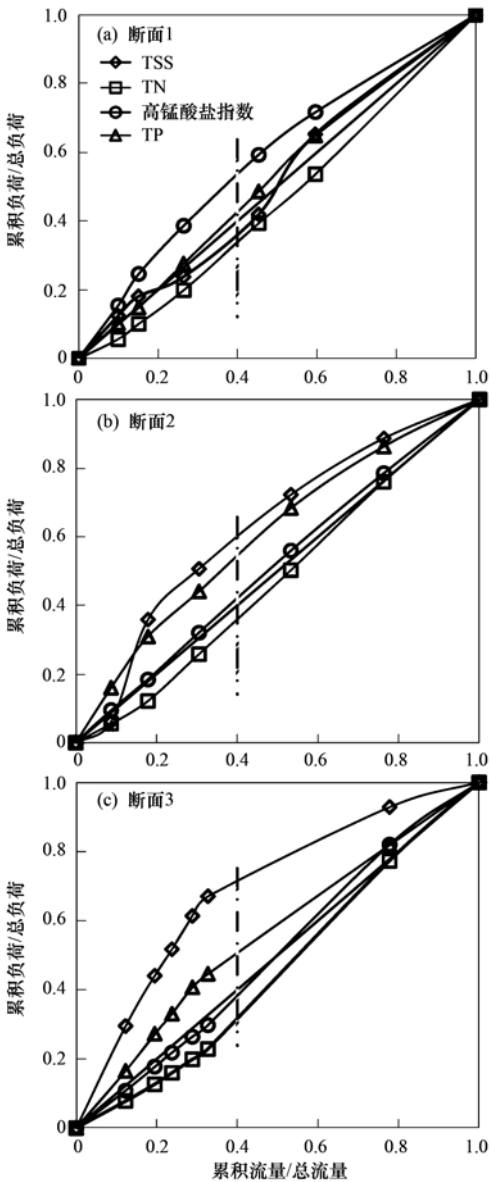


图 4 第 1 次降雨时 3 个断面河道径流 $M(V)$ 曲线
Fig. 4 Dimensionless cumulative curves at three sampling stations in the first storm event

2.3 同一点位不同暴雨的初始冲刷效应

2.3.1 不同暴雨事件间 M_n/M 和 EMC_n 对比分析

由于宝象河水位在雨季波动较大,在对断面 S3

进行不同场次降雨冲刷效应对比时,首先计算降雨净冲刷量对河道径流量的贡献率 V_n/V ,再计算冲刷负荷对河道负荷的贡献率 M_n/M ,通过对比 EMC_n 可知该次降雨中冲刷径流的污染程度. 结果表明(表 4),3 场降雨的 V_n 和 V_n/V 皆依次降低. 对比 M_n/M 发现,4 种污染物能分为 2 类,一类是 TSS 与 TP,其负荷贡献率与降雨强度的变化趋势一致,具有典型的都市型颗粒态负荷冲刷特点^[20];另一类为 TN 与高锰酸盐指数,两者的负荷贡献率与降雨量的变化趋势一致,更多地表现出溶解态污染物的特征,这之前滇池流域内其它研究结果一致^[24-26]. 对比污染物的 EMC_n 可发现,TSS 与 TP 的 EMC_n 变化特征与降雨强度相关较大,第 1 次监测的降雨强度虽然高于第 3 次,但在 EMC_n 上第 1 次降雨的 TSS、TP 浓度并没有明显高于第 3 次,主要是因为第 1 次降雨历时较长,后期冲刷径流负荷浓度低,因而整体上 EMC_n 并没有比第 3 次高很多. 值得注意的是,3 次降雨事件中仅第 1 次产生了大量的冲刷径流,后 2 次降雨的冲刷径流量对河道总流量的贡献率最高仅 31.9%. 以受降雨量影响较大的 TN 为例,计算得 3 次降雨产生的 TN 冲刷负荷量 M_n 分别为 2 332、254、124 kg,可见后 2 次降雨冲刷的 TN 负荷远不如第 1 次降雨,原因如下:① 由于第 1 场降雨将雨季前积累的大量地表沉积负荷冲刷掉,相对来说雨季中期地表沉积的负荷量就不多,张宇等^[25]、黄俊等^[26]对滇池地区的研究表明,在整个雨季,早期降雨径流中的 TN 浓度明显高于后期降雨,杨逢乐等^[32]对昆明典型合流制排水系统小区进行多场监测发现,各污染物的 EMC 在雨季前期最高,中期最低,后期稍微升高. ② 第 2 场降雨强度不足,第 3 场降雨雨量不足(表 1),产生的径流不能将集水区内的负荷冲刷至河道. 黄满湘等^[33]的研究表明在农业区域,降雨强度较低时产生的径流量远低于高强度降雨. 结合上述结果可知,对于宝象河流域,早期强降雨冲刷的负荷量很大,需进行有效控制.

表 4 S3 不同降雨 M_n/M 及 EMC_n 对比/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

降雨场次	冲刷径流量 V_n/m^3	V_n/V	Table 4 M_n/M and EMC_n at the third sampling station in different storm events/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							
			TSS		TN		TP		高锰酸盐指数	
			M_n/M	EMC_n	M_n/M	EMC_n	M_n/M	EMC_n	M_n/M	EMC_n
1	237	48.3%	96.1%	1598	58.9%	9.85	79.8%	0.89	73.1%	13.05
2	27	31.9%	46.6%	76	42.3%	9.38	42.1%	0.43	57.8%	8.77
3	16	14.1%	88.5%	1460	20.9%	7.70	55.8%	1.97	17.3%	8.04

2.3.2 不同暴雨事件间 $M(V)$ 曲线对比分析

S3 的 3 次降雨 TSS 的 FF_{40} 分别为 71%、40% 及 91% (图 5)。其中,第 2 次监测 TSS 后期冲刷效果明显,是因为该场监测前期降雨强度低,最强降雨发生在中期,而其他 2 次监测在早期降雨强度都较高,可以判断在达到一定降雨强度以后 TSS 和 TP 才会有明显的初始冲刷效果。第 3 次监测降雨量只有 16.9 mm,最大降雨强度为 $8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,都分别低于第 1 次监测的 49 mm 降雨量及 $12.4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 最大降雨强度,但污染物的初始冲刷效果却比第 1 次更强,可能的原因是第 3 次降雨与前一场降雨的间隔只有 4 d,而地面累积负荷量不多,造成该降雨事件径流量不大但负荷集中在前期的特征。

2.4 冲刷过程中污染物相关性分析

2.4.1 TSS、TP、高锰酸盐指数相关性

图 6 结果表明,5 次降雨事件 TSS 和 TP、TSS 和高锰酸盐指数之间的相关性较强,其 Pearson 相关系数分别为 0.58 ~ 0.92 和 0.36 ~ 0.88,这与 Qin 等^[31]的研究结果类似;张宇等^[25]、杨逢乐等^[32]、韩冰等^[34]等认为大部分 TP 是以颗粒态形式进入河道,且浓度变化趋势与 TSS 接近。因此,宝象河沿程 TP 很大部分附着在颗粒物中被冲刷进入河道,如果采用旁路系统截留、初级沉淀处理应该能有效降低 TP 负荷。而 TSS 和高锰酸盐指数的相关性则不同,在 S2 第 2 次监测中,TSS 浓度基本不变,但高锰酸盐指数浓度变化却很大,说明可能高锰酸盐指数只是与 TSS 来自同一污染源,在降雨过程中共同冲刷进入河道。

2.4.2 不同形态 N 相关性

3 次降雨 5 组数据 TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的相关性及 TN 形态组成如表 5,根据宝象河流域典型地块流失特征^[2],可以确定的是 NO_3^--N 主要来自种植业面源,而 NH_4^+-N 及有机氮则来自城市面源(道路、屋顶、生活污水及其沉积物)及有机肥,因而 NO_3^--N 占 TN 的比例变化能表征农业面源在降雨事件中对 TN 负荷的贡献。结果表明,在第 1 次降雨中,TN 和 NO_3^--N 相关性很强,且在该次降雨中 NO_3^--N 负荷量

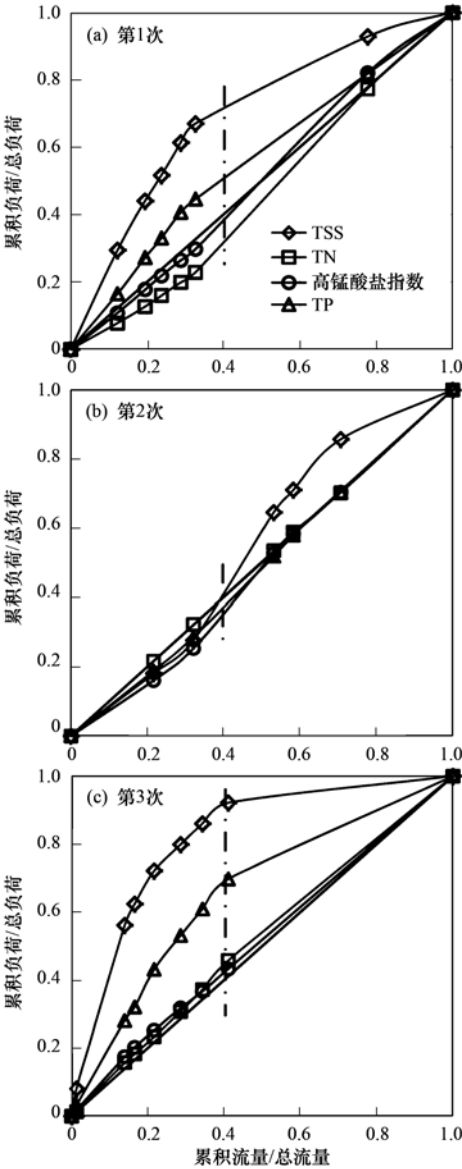


图 5 宝象河 S3 不同降雨河道径流 $M(V)$ 曲线

Fig. 5 Dimensionless cumulative curves at the third sampling station in different storm events

占 TN 量的 37.0% ~ 62.0%,其中 S1 的 NO_3^--N 比例最高。因此,上游 TN 控制应将重点放在农业面源污染削减上,下游的 NO_3^--N 所占比例降低,主要是因为城镇生活源负荷的比例显著提高(表 2)。在第 2、3 次降雨中,TN 和 NH_4^+-N 的 Pearson 相关系数处于 0.51 ~ 0.84, NH_4^+-N 占 TN 负荷量增加到 65.2% ~

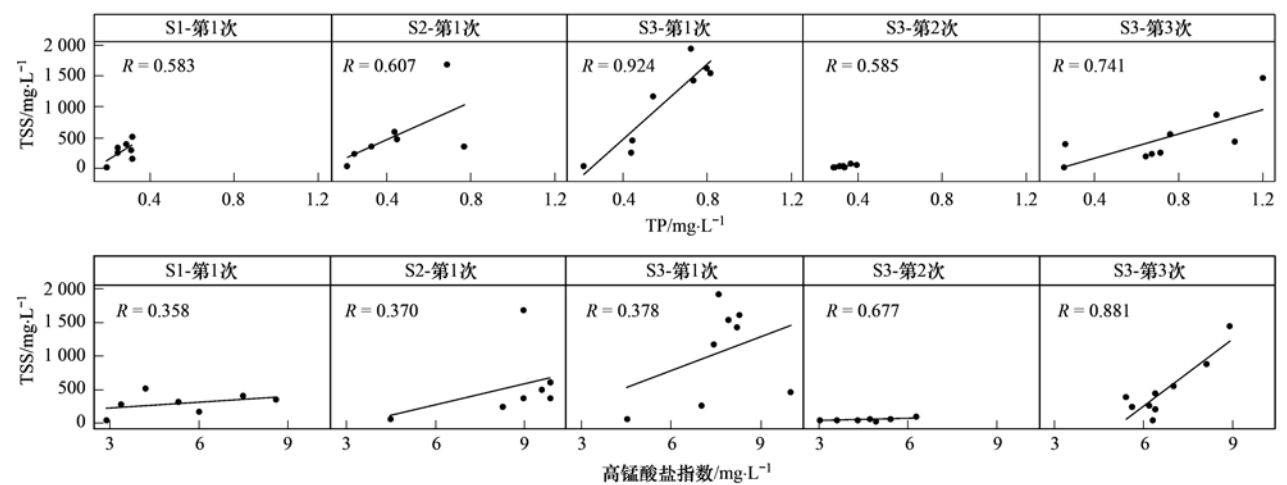


图6 宝象河暴雨径流 TSS、TP、高锰酸盐指数的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between TSS, TP and permanganate index of Baoxiang River Watershed in storm events

表5 暴雨径流 N 的形态及其相关性分析

Table 5 Nitrogen components and the correlation analysis results in storm events						
降雨场次	监测断面	Pearson 相关系数		各形态 N 占 TN 的质量分数(冲刷通量比重)/%		
		TN 与NH ₄ ⁺ -N	TN 与NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N/TN	NO ₃ ⁻ -N/TN	有机氮/TN
1	S1	-0.571	0.875	13.5	62.0	24.5
	S2	-0.836	0.839	15.5	44.6	39.9
	S3	-0.814	0.553	11.5	37.0	51.5
2	S3	0.839	-0.198	65.2	11.1	23.6
3	S3	0.509	-0.159	71.2	15.6	13.2

71.2%, NO₃⁻-N 比例相对第 1 次降雨大幅减少, 农业面源的贡献明显减少, 这 2 次降雨相对第 1 次降雨主要污染类型从城市农业混合型 TN 污染转变为城市型 TN 污染, 主要原因应该是后 2 次降雨强度不足以将上游农业负荷冲刷至下游。

3 讨论

ADWP(监测前未降雨天数)与地面累积负荷量直接相关, 很多研究也表明 ADWP 对降雨冲刷有很大影响, Gupta 等^[22]研究表明 ADWP 对 TSS 初始冲刷效果影响显著, 黄金良等^[17]、张宇^[25]等对滇池东岸研究得到与 Gupta 等^[22]相同的结果, Lee 等^[35]及 Li 等^[15]的研究也表明 ADWP 对集水区径流负荷有正向影响, 边博^[36]对其监测后得到较好的 ADWP 与污染物浓度间的相关关系, 但在韩国 Lee 等^[19]的研究中却未发现初始冲刷效应与 ADWP 的直接关系。本研究对 S3 的连续 3 场降雨监测结果表明, 后 2 次冲刷的负荷远远小于第 1 次, 且其冲刷径流为城市面源主导型, 第 1 次为城市-农业混合型, 由于后 2 次降雨在量和强度上都不及第 1 次监测, 未形成大量冲刷径流, 暂不能确定第 1 次强降雨对上游

农业负荷的冲刷程度。因此, 后续工作需要开展农业型流域在连续强降雨中负荷冲刷特点的监测, 同时也可对昆明主城区典型城市型河流进行暴雨观测, 研究其负荷冲刷特点与农业型河流的区别。

尽管本研究阐述了宝象河沿程断面各类污染物的初始冲刷效应, 但并未分析各污染源的相对贡献水平。暴雨径流的污染物存在 3 个来源: 大气湿沉降, 集水区透水与不透水地面非点源径流^[13, 37], 以及合流制管道中的沉积物和污水处理厂溢流量。而不同区域各污染源的相对贡献水平存在较大差异。比如, Gobel 等^[38]及侯培强等^[37, 39]对国内外大量城市面源研究进行对比表明, 城市下垫面径流 TN、TP 污染程度排序为: 排污口径流 > 道路 > 庭院 > 屋顶, 在赵磊等^[40]对昆明典型合流制排水小区各下垫面负荷贡献的研究中, 25% 的道路径流贡献了 40% ~ 80% 的负荷, 50% 的屋面径流仅贡献了 4% ~ 30% 负荷, 4 场监测中管道沉积物负荷对总负荷贡献率在 30% 以上。张千千等^[41]运用主成分分析区分出路面径流水质的潜在污染源为机动车交通损耗、大气干湿沉降及城市垃圾, 此外, Soonthornnonda 等^[42]引用大气研究领域的源解析方法解析了合流制排水

系统污染源贡献率. 在高密度居民区,合流制管道雨天溢流雨水 TSS 的浓度最高可接近 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[43],在部分区域集流制管道沉积物对暴雨径流各物质负荷的贡献甚至可以达到 54% ~ 64%^[44]. 李立青等^[11]研究发现在武汉汉阳城区有 44% ± 26% 悬浮物来源于生活污水沉积物. 因此,后续研究还需要开展各断面集水区污染源调查及其流失特征观测.

4 结论

(1) 从不同点位观测来看,宝象河的 TSS、TN、TP 和高锰酸盐指数的 EMC_n 和 FF_{40} 沿程自上而下逐渐增加,即随着不透水地面和人口规模增加而提高,其中 TSS 的差异最为明显, EMC_n 自 $438\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $1\,598\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, FF_{40} 自 37% 提升至 72%; 从不同降雨条件来看,TSS、TP 负荷贡献率及其 $M(V)$ 与降雨强度的变化趋势一致,具有典型的颗粒态负荷冲刷特点,而 TN 和高锰酸盐指数负荷贡献率则与降雨量的变化趋势一致,更多地表现为溶解态负荷冲刷特征.

(2) 5 次降雨事件结果表明,宝象河的 TSS 和 TP 浓度之间的相关性高,但与 TN 浓度相关性较差,TSS 和 TP 相关性高是由于 TP 附着在颗粒物上冲刷进入河道.

(3) 从 N 的形态来看,随着降雨事件次数增加,宝象河 NO_3^- -N 所占比例逐渐降低,但 NH_4^+ -N 所占比例则逐渐提高,暴雨径流初始冲刷效应也从城市农业混合型向城市单一型转变.

(4) 通过对比 3 个点位 4 种污染物的 EMC 和 EMC_n 数据,表明提出的 EMC_n 能有效消除各点位的基流及其负荷影响,可能更为真实反映且能放大沿程断面间暴雨初始冲刷效应的差异. 当然,本研究还只是滇池流域的前期探索性工作,场次不多,点位也不广,各污染源流失特征也不清晰,因此,上述规律还需要进一步论证,且还不能推广到其他入湖河流.

致谢:感谢华中农业大学的刘杰和胡苏军同学,以及天津大学的许涛、吴天彧和屈连松同学参与暴雨径流观测、样品整理和运输. 同时,感谢昆明市环境监测中心分析室张宇主任协助样品成分分析.

参考文献:

- [1] 环境保护部. 中国环境质量公报[R]. 北京: 环境保护部, 2010. 14-15.
- [2] 北京大学, 云南省环境科学研究院, 昆明市环境科学研究
- [3] Helsel D R, Kim J I, Grizzard T J, *et al.* Land use influences on metals in storm drainage[J]. Water Pollution Control Federation, 1979, **51**(4): 709-717.
- [4] Wanielista M P, Yousef Y A. Stormwater management[M]. New York: Wiley-Interscience, 1993. 570-579.
- [5] Stahre P, Urbanas B. Stormwater detention[M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
- [6] Walker D, Unidos C F E R. Manual: Combined sewer overflow control[R]. EPA Report nr EPA/625/R-93/007. USA: Environmental Protection Agency, 1993. 95.
- [7] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2341-2356.
- [8] Bach P M, McCarthy D T, Deletic A. Redefining the stormwater first flush phenomenon[J]. Water Research, 2010, **44**(8): 2487-2498.
- [9] 李国斌, 王焰新, 程胜高. 基于暴雨径流过程监测的非点源污染负荷定量研究[J]. 环境保护, 2002, (5): 46-48.
- [10] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 312-316.
- [11] 李立青, 尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 368-375.
- [12] 何庆慈, 李立青, 孔玲莉, 等. 武汉市汉阳区的暴雨径流污染特征[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(2): 101-103.
- [13] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J]. 水科学进展, 2006, **17**(2): 288-294.
- [14] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1057-1061.
- [15] Li L Q, Yin C Q, He Q C, *et al.* First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(3): 295-299.
- [16] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2287-2293.
- [17] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1753-1759.
- [18] Kim G, Yur J, Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in daejeon city, Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2007, **85**(1): 9-16.
- [19] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H, *et al.* First flush analysis of urban storm runoff[J]. Science of the Total Environment, 2002, **293**(1): 163-175.
- [20] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [21] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. Water

- Research, 1998, **32**(8): 2462-2470.
- [22] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Water Research, 1996, **30**(5): 1244-1252.
- [23] Gnecco I, Berretta C, Lanza L G, *et al.* Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy [J]. Atmospheric Research, 2005, **77**(1-4): 60-73.
- [24] 张荣社, 周琪, 史云鹏, 等. 滇池流域农业区的暴雨径流特征研究[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(2): 13-16.
- [25] 张宇, 张荣社. 滇池东岸暴雨径流特征分析[J]. 云南环境科学, 2004, **23**(2): 19-22.
- [26] 黄俊, 张旭, 彭炯, 等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(2): 255-258.
- [27] 赵磊, 袁国林, 张琰, 等. 基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持通报, 2007, **27**(3): 42-46.
- [28] 国家气象局. 2010. 降水强度等级划分标准 [EB/OL]. http://www.gov.cn/ztl/2008tffy/content_1113935.htm, 2010.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 105, 223-226, 243-246, 254-284.
- [30] Geiger W. Flushing effects in combined sewer systems[A]. In: Proc. 4th Int. Conf. on Urban Storm Drainage[C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
- [31] Qin H P, Khu S T, Yu X Y. Spatial variations of storm runoff pollution and their correlation with land-use in a rapidly urbanizing catchment in China [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(20): 4613-4623.
- [32] 杨逢乐, 赵磊. 合流制排水系统降雨径流污染物特征及初期冲刷效应[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1627-1632.
- [33] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. 地理学报, 2003, **58**(1): 147-154.
- [34] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 北京市城市非点源污染特征的研究[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(6): 63-65, 19.
- [35] Lee H, Lau S L, Kayhanian M, *et al.* Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges [J]. Water Research, 2004, **38**(19): 4153-4163.
- [36] 边博. 前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3522-3526.
- [37] 侯培强, 王效科, 郑飞翔, 等. 我国城市面源污染特征的研究现状[J]. 给水排水, 2009, **35**(z1): 188-193.
- [38] Göbel P, Dierkes C, Coldewey W C. Storm water runoff concentration matrix for urban areas[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2007, **91**(1-2): 26-42.
- [39] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 71-75.
- [40] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1561-1570.
- [41] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 76-82.
- [42] Soonthornnonda P, Christensen E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater[J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 1989-1998.
- [43] 李贺, 李田. 上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1565-1569.
- [44] Gromaire M C, Garraud S, Saad M, *et al.* Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001, **35**(2): 521-533.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行