

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.11  
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 ..... 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 ..... 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 ..... 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM<sub>2.5</sub> 化学组分的季节变化特征及来源解析 ..... 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征、来源及健康风险评估 ..... 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征 ..... 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 ..... 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 ..... 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 ..... 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 ..... 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 ..... 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 ..... 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 ..... 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 ..... 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 ..... 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价 ..... 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 ..... 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 ..... 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 ..... 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评价 ..... 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市城区河段淡水生物中微塑料累积的影响 ..... 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 ..... 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 ..... 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 ..... 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 ..... 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 ..... 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 ..... 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 ..... 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N<sub>2</sub>O 释放的影响 ..... 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A<sup>2</sup>/O 污染物去除特性 ..... 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 ..... 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 ..... 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 ..... 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 ..... 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因素 ..... 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉迁移的影响 ..... 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 ..... 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 ..... 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 ..... 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及其细菌群落结构的变化 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 ..... 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 ..... 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 ..... (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

## 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响

连心桥<sup>1,2</sup>, 朱广伟<sup>2</sup>, 杨文斌<sup>1\*</sup>, 朱梦圆<sup>2</sup>, 许海<sup>2</sup>

(1. 安徽师范大学生态与环境学院, 芜湖 241003; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008)

**摘要:** 为定量揭示强降雨对平原河网河道氮、磷污染的影响, 本文以太湖西岸大浦河和殷村港为例, 基于两周年逐日高频人工监测和降雨量自动监测数据集, 以及台风“利奇马”过程中的加密监测, 分析了强降雨过程中河道各形态氮、磷浓度的变化特征及其环境效应。结果发现, 强降雨两年内共观察到 16 次 (19 d), 且 50% 发生在夏季; 此外, 强降雨占年内总降水量的比重高达 41.33%。强降雨发生之后, 两条河道水体中各形态氮、磷浓度在强降雨之后有所增加, 其中颗粒态磷的响应最快, 一般在强降雨当天就出现峰值; 而总氮峰值的出现存在 2~5 d 的延迟; 强降雨引发的河道营养盐浓度增高持续时间短, 通常 1~2 d, 甚至低于雨前浓度。流域面积大和河道流程长的大浦河水体氮、磷浓度对强降雨过程的响应速度较殷村港慢。河道各形态氮、磷浓度对强降雨过程的响应特征还受河道两岸局地土地利用状况的影响, 农业面源污染的河段比城镇污染的河段对营养盐的拦截、净化和缓冲能力弱, 因此农业面源污染的河段对强降雨的响应强于城镇污染的河段; 农业面源影响河段氮的增加量以颗粒态氮为主, 城市面源影响河段氮的增加量以溶解态氮为主, 而磷的增加全程均为颗粒态磷为主。平原河网地区强降雨带来的河道水体氮、磷浓度波动小, 各形态氮、磷响应过程受局地环境背景影响大, 水质总体趋于稳定。然而, 由于强降雨带来的河道入湖水量占比大, 因此入湖负荷也处于很高水平, 加之强降雨的发生偶然性大, 强降雨对平原河网地区河道入湖氮、磷负荷的突发影响很大, 需要重点关注。

**关键词:** 暴雨; 平原河网; 湖泊; 氮、磷; 面源污染

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-4970-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003183

## Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain

LIAN Xin-qiao<sup>1,2</sup>, ZHU Guang-wei<sup>2</sup>, YANG Wen-bin<sup>1\*</sup>, ZHU Meng-yuan<sup>2</sup>, XU Hai<sup>2</sup>

(1. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** To understand the quantitative effect of heavy rain on nitrogen and phosphorus pollution in river-net plain, daily observations of nutrient concentrations in two rivers, flowing into Lake Taihu, were conducted from 1<sup>st</sup> September, 2017 to 31<sup>st</sup> August, 2019. The daily rainfall was recorded by auto-recording meteorological stations located on the two rivers and the Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research. Intensive sampling in different sections of the two rivers during Super Typhoon Lekima was also conducted in August 2019. Using these datasets, the influence of heavy rainfall on various forms of nitrogen and phosphorus concentrations in the rivers, and its environmental effects, were analyzed. The results showed that 16 heavy rainfall events (19 d) were observed in two years, 50% of which occurred in the summer season. In addition, heavy rainfall accounted for as much as 41.33% of the total rainfall over the entire year. After the period of heavy rainfall, the concentrations of various forms of nitrogen and phosphorus increased, and the particulate P generally exhibited the fastest response, usually peaking on the day of heavy rainfall. In contrast, the peaks of N were delayed for 2-5 days with the occurrence of heavy rain. In general, the duration of the increase in the concentration of nutrients in the study river caused by heavy rainfall was short (usually 1-2 days), and sometimes was lower than the concentration before the rains. The Dapu River exhibited a slower response to heavy rains than the Yincun River because it has a larger and longer catchment area than the Dapu River. In addition, the effect of heavy rain on N and P concentrations was also strongly influenced by the land-use situation around the river basin. The increase of nitrogen in the reach, affected by agricultural non-point sources, was dominated by granular nitrogen, and the increase of nitrogen in the reach affected by urban non-point sources was dominated by dissolved nitrogen. The increase of phosphorus was dominated by granular phosphorus in the entire process. The conclusions of this study are as follows: In the plain river network area, the fluctuations of nitrogen and phosphorus concentrations in the river water body caused by heavy rainfall are small, and the response of various forms of nitrogen and phosphorus are significantly affected by the local environmental background. Therefore, the water quality generally exhibited limited variation. Due to the large proportion of water entering the lake during heavy rainfall events, a high level of the nutrient loading was also observed, and the occurrence of heavy rainfall was occasional. The short-term effect of heavy rainfall on the nitrogen and phosphorus loading entering the lake in the river channel in the plain river network area is therefore, also significant, and requires further investigation.

收稿日期: 2020-03-17; 修订日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671494, 41830757)

作者简介: 连心桥(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河湖面源污染机理与控制, E-mail: lianxinqiao28@163.com

\* 通信作者, E-mail: ywb1968@mail.ahnu.edu.cn

**Key words:** heavy rain; river-net plain; lake; nitrogen and phosphorus; non-point pollution

富营养化是当今我国湖库尤其是浅水湖泊面临的主要生态问题,也是全球性的湖泊环境保护难点<sup>[1-4]</sup>,而流域面源营养盐入湖是造成湖库富营养化的主要原因<sup>[5]</sup>.强降雨的产汇流携带是营养盐面源形成的主要过程,氮、磷浓度大幅升高,且强降雨事件往往主导河道营养盐入湖负荷.如李发荣等<sup>[6]</sup>的研究发现强降雨对滇池东南岸河道入湖磷负荷影响明显,并且 Zhang 等<sup>[7]</sup>的研究发现 2013 年 10 月 6~8 日太湖流域的一场强降雨导致太湖苕溪入湖区形成 302.8 km<sup>2</sup> 的高悬浮浑浊区,占全湖面积的 14%,浑浊带 10 d 后才逐渐散去,也凸显出强降雨对入湖水水质和入湖负荷的显著影响.而强降雨在影响水质与负荷方面会因水体污染类型的不同存在差异.刘忠翰等<sup>[8]</sup>的调查发现降雨对滇池不同污染类型水体影响复杂,典型城市纳污河流、城乡结合型河道和农业重污染区河道的营养盐携带状况与特征有较大差异.高超等<sup>[9]</sup>调查太湖地区水稻田在典型自然降雨下氮磷输出特征,发现水稻田氮磷污染物冲刷特点具有双重属性与其他地表类型不同<sup>[10,11]</sup>.

虽然降雨这一气候因素在湖库外源污染中扮演的重要角色受到了愈来愈多的关注,但在平原河网地区,降雨的营养盐面源效应可能会得到较大的缓冲.平原河网地区因地势平坦、面积宽广、水网交错、污染复杂和产汇流滞后等原因,河道营养盐浓度随降雨强度的变化不大<sup>[12]</sup>.但是,关于平原河网地区强降雨的河道营养盐效应研究总体还比较少,目前的报道多基于月尺度、年尺度或者仅限于当日,对整个降雨过程中营养盐的变化特征刻画还不够.有必要通过高频同步观测进一步探讨强降雨过程的环境效应,以期为平原河网地区河道水污染防治提供科学依据.

太湖是我国五大淡水湖泊之一,其富营养化和蓝藻水华问题已持续了几十年<sup>[13]</sup>,且有日益加重的趋势<sup>[14]</sup>.太湖流域的绝大部分是平原河网地区,河网密度高达 3.2 km·km<sup>-2</sup><sup>[15]</sup>,营养盐经河道入湖是太湖流域的主要特征<sup>[16-18]</sup>,经统计 80% 以上的外源营养负荷来自周边河道,是蓝藻水华频繁暴发的物质基础<sup>[19,20]</sup>.近 10 年在太湖流域对生活、工业和农业等人为因素方面进行严格治理与管控<sup>[21-23]</sup>,但外源负荷及河道氮磷浓度下降却很缓慢<sup>[13,24]</sup>,有必要加强降雨等气候因子对营养盐面源污染的影响机制研究.

本研究选取太湖西北部平原河网地区两条污染重、水量大和负荷重的河道大浦河和殷村港作为研

究对象,开展了 2 周年的逐日河道各形态氮、磷浓度监测,并于 2019 年 8 月 10 日台风“利奇马”形成暴雨之后,开展河道不同断面的营养盐浓度变化过程监测.结合同期降雨量逐日监测数据,分析强降雨对两条河道水体氮、磷的浓度影响特征,以期为平原湖泊面源污染控制提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 调查采样方案

太湖是我国第三大淡水湖泊,水域面积 2 338 km<sup>2</sup>,地处东经 119°52′~120°36′E,北纬 30°55′~31°32′N.太湖流域面积 36 950 km<sup>2</sup>,其中平原约占流域总面积的 75%,平原区河网纵横,是典型的平原河网地区.大浦河和殷村港等西北地区是太湖来水量较大的河道,也是氮、磷的主要入湖河道<sup>[18,25]</sup>.

大浦港和殷村港逐日监测点位如图 1.自 2017 年 3 月 1 日开始,在大浦河和殷村港靠近入湖河口(D0 和 Y0)处布设气象与流量自动监测系统,每日中午用采水器在采样点处采集水下 0.5~1.0 m 水样 500 mL,立即放置在观测点附近的冰箱中冷冻保存,每 15 d 左右将冷冻样品取回实验室进行各形态氮、磷浓度测定.

为获得暴雨期间河道氮、磷浓度的空间差异特征,于 2019 年 8 月 10 日台风“利奇马”形成大暴雨开始,分别于 8 月的 10 日(暴雨当日)、12 日(径流明显)、15 日(入湖水流趋缓)和 23 日(暴雨径流过程之后)在大浦河的河口以上 35 km 的河段、殷村港河口以上 20 km 的河段分别布设 4 个采样点位(图 1),各代表河道经过不同的土地利用区.其中大浦河从上游到下游的 D1~D4 河段分别代表:D1 为农村河段(河段周边是几个小村庄与农田围绕着)、D2 为经过有 4.56 万人口的徐舍镇河段、D3 为经过常住人口为 125.61 万人的宜兴市河段和 D4 为入湖口综合污染河段;殷村港从上游到下游的 Y1~Y4 河段分别代表:Y1 为位于距离漏湖约 950 m 的漏湖污染河段、Y2 为经过几个小村庄的农村河段、Y3 为经过总人口约 7 万、3.27 万人的和桥镇、万石镇两个大镇污染河段和 Y4 为入湖口综合污染河段,以期获得平原河网的不同河段河道水质差别.

### 1.2 水质分析

在各个采样断面的桥上,利用 YSI 公司的 EXO 多参数水质仪现场测定浊度(NTU),采用 UWITEC 地表水采水器采集河道水下 0.5~1.0 m 深度的表层水样,当场用手动泵过滤部分水样,滤膜为

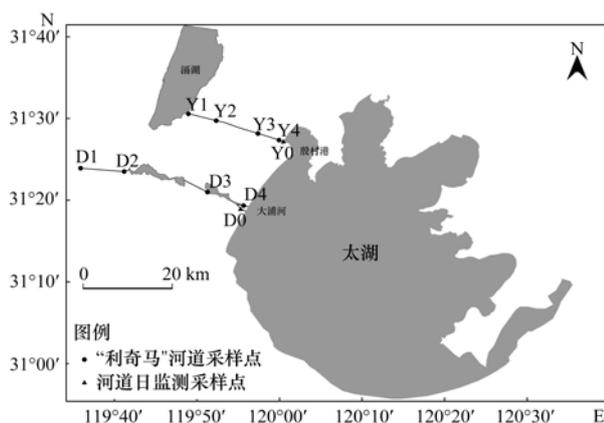


图1 太湖入湖河道观测点位置示意

Fig. 1 Monitoring sites at the inflow rivers of Lake Taihu

Whatman 公司的 GF/F 膜 (孔径约  $0.7 \mu\text{m}$ ), 过滤体积  $100 \sim 500 \text{ mL}$ , 因水体泥沙含量不同而定. 过滤后滤膜立即用铝箔包裹后冷藏, 带回实验室用于水体浮游植物叶绿素 a (Chla) 及悬浮颗粒物 (SS) 测定. 分装滤前水样、滤后水样各  $100 \text{ mL}$  左右冷藏保存, 带回实验室分别用于水体总氮 (TN)、总磷 (TP) 及溶解性总氮 (DTN)、溶解性总磷 (DTP)、氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝态氮 ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、亚硝态氮 ( $\text{NO}_2^--\text{N}$ ) 和溶解性反应活性磷 (DRP) 等指标测定.

TN、DTN 采用碱性过硫酸钾消解、紫外分光光度法测定<sup>[26]</sup>, 测定波长为  $210 \text{ nm}$ . TP 和 DTP 采用碱性过硫酸钾消解、钼锑抗显色分光光度法测定<sup>[26]</sup>, 测定波长为  $700 \text{ nm}$ , 测定仪器均为津岛 UV-2600 型分光光度计. TN 与 DTN 之差定义为颗粒态氮 (PN), TP 与 DTP 之差则定义为颗粒态磷 (PP).  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$  和 DRP 浓度采用荷兰 Skalar 公司的 SAN++ 流动注射分析仪光度法测定. DTN 与 3 种离子态氮浓度的差值定义为溶解态有机氮 (DON), DTP 与 DRP 之差则定义为溶

解态有机磷 (DOP). Chla 测定采用热乙醇提取、分光光度法测定<sup>[27]</sup>. SS 含量测定采用重量法, 将 GF/F 玻璃纤维滤膜于  $103 \sim 105^\circ\text{C}$  烘干后称重计算而得.

### 1.3 数据处理

降雨量数据分别来自两个入湖河口自动监测站上的雨量计, 缺失的数据由太湖湖泊生态观测站位于太湖湖边的气象站数据补充. 根据气象部门常用的降雨等级划分标准,  $24 \text{ h}$  降雨在  $25 \sim 50 \text{ mm}$  的降雨称为大雨,  $50 \sim 100 \text{ mm}$  的称为暴雨,  $100 \sim 200 \text{ mm}$  的称为大暴雨. 参照 Qian 等<sup>[28]</sup> 对我国降雨事件的长期变化分析结果, 以及 Zhang 等<sup>[7]</sup> 对太湖暴雨事件引发水体悬浮物变化的研究, 并结合对水量的影响, 本文将大雨及以上降雨 (日降雨量  $\geq 25 \text{ mm}$  的降雨事件) 定义为强降雨.

数据处理采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 25.0 及 Origin 9.1 完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 强降雨事件发生频次与强度

观察期内, 研究区日降雨量在  $0.00 \sim 143.72 \text{ mm}$  波动, 最大值出现在 2019 年 8 月 10 日 (图 2). 累积降雨量  $2218.71 \text{ mm}$ , 年降雨量为  $1109.35 \text{ mm}$ . 累积降雨天数  $341 \text{ d}$ , 其中小雨、中雨、强降雨分别出现  $280$ 、 $42$  和  $19 \text{ d}$ , 分别占降雨天数的  $82.11\%$ 、 $12.32\%$  和  $5.57\%$ . 而相对应的累积降雨量分别为  $649.38$ 、 $652.44$  和  $916.89 \text{ mm}$ , 分别占总雨量的  $29.27\%$ 、 $28.19\%$  和  $41.33\%$ . 强降雨在总降雨上的占比十分重要.

月累积降雨量介于  $17.02 \sim 251.61 \text{ mm}$  之间. 最低值出现在 2017 年 12 月, 最大值出现在 2018 年

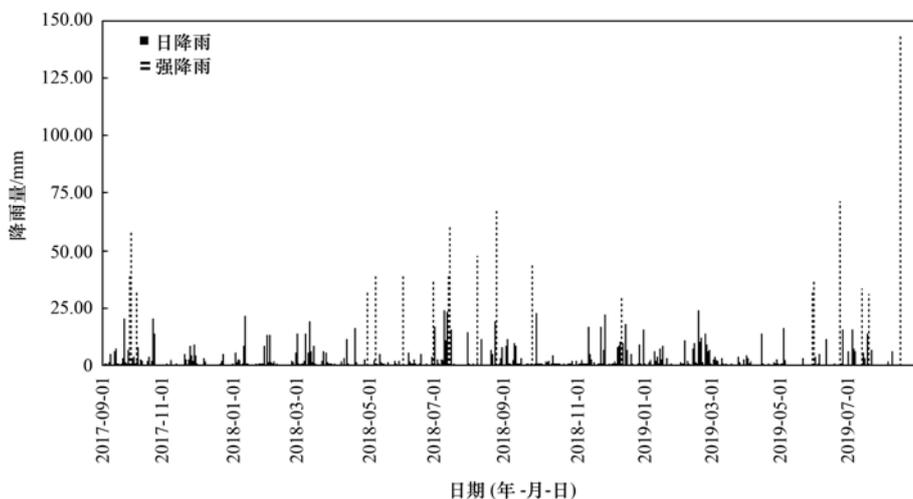


图2 大浦河和殷村港逐日降雨量变化

Fig. 2 Daily rainfall at Dapu River and Yincun River

7月. 从季节看, 冬季(12月~2月)月均降雨量为73.45 mm, 春季(3~5月)月均降雨量为63.26 mm, 夏季(6~8月)月均降雨量为148.47 mm, 秋季(9~11月)84.61 mm. 传统雨季4~9月的月均降雨量为123.87 mm, 其余月份的降雨量月均值为61.02 mm, 相差1倍.

观测期内, 由于有3次强降雨日前后相连, 故19 d的强降雨可以划分为16次强降雨事件, 分别发生在2017年的9月24~25日和9月30日, 2018年的4月23日、5月1日、5月25日、6月21日、7月5~6日、7月30日、8月17日、9月17日和12月6日, 以及2019年的5月25~26日、6月18日、7月7日、7月13日和8月10日. 发生在夏季8次, 占50%, 秋季3次、春季4次和冬季1次. 传统雨季

共计15次, 其余月份1次. 雨强最大的是2019年8月10日, 也即超强台风利奇马过境期间, 单日降雨量为143.72 mm.

## 2.2 河道氮、磷浓度高频变化特征

两河道水体氮、磷浓度高频日变化情况见图3. 流量大、流程长的大浦河氮磷浓度总体低于殷村港且峰谷切换更为平缓. TN出现多次异常峰值(图3), 比如2017年12月20日, TN突然升高至 $9.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 2019年1月19日, 达到 $7.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 2018年8月14日, 达到 $4.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 2018年12月2日, 达到 $5.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 以及2019年6月24日, 达到 $4.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 而殷村港的波动性更大, 频繁出现异常值. 而在强降雨过程中, TN与TP也会出现短暂峰值.

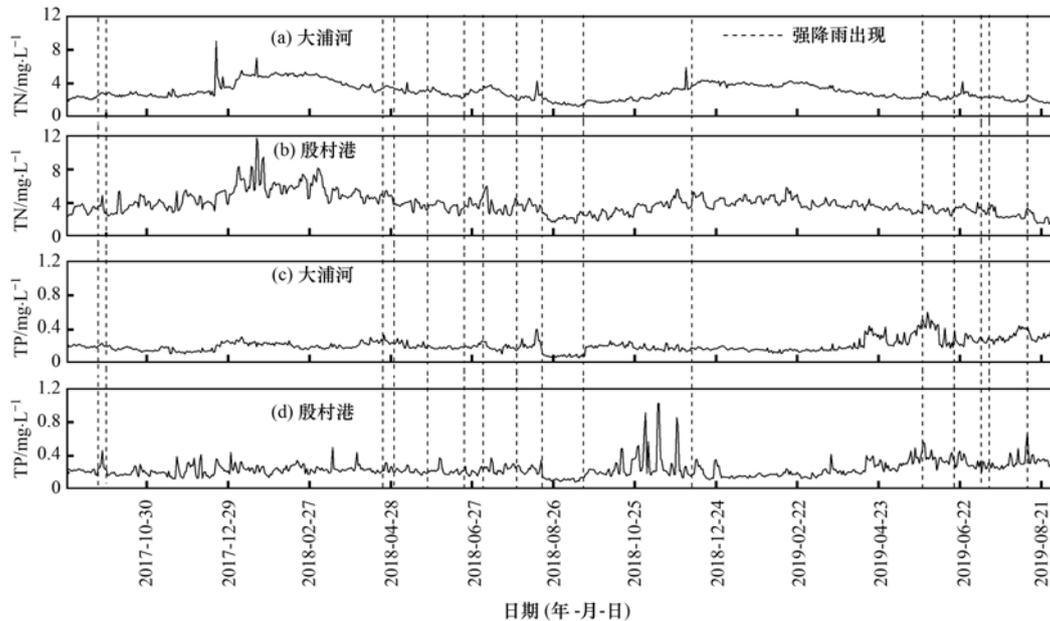


图3 大浦河和殷村港水体 TN、TP 浓度逐日变化

Fig. 3 Daily variation of TN and TP concentrations at Dapu River and Yincun River

大浦河和殷村港水体 TN 日浓度变化分别介于  $1.26 \sim 9.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间及  $1.44 \sim 11.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $3.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $3.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 这与早些年份相关调查如查慧铭等<sup>[29]</sup>报道的2016年月监测大浦河和殷村港的 TN 均值分别为  $3.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  及  $4.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  相比, 分别下降了15%和13%. DTN的变化趋势与 TN 一致, 大浦河与殷村港的均值分别为  $2.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  及  $3.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 分别占 TN 的84.64%及87.67%, 与前期报道<sup>[29]</sup>相比其浓度也是下降的. 相应地, 观测期间大浦河的  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 均值分别为  $1.63$ 、 $0.57$  和  $0.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 殷村港的  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 均值分别为  $2.05$ 、 $0.75$  和  $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 由 DTN 与3种离子态氮之和的差值可以推算出大浦河和殷村

港水体中溶解性有机氮(DON)的浓度均值分别为  $0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .  $\text{NO}_3^-$ -N 是 DTN 的主要存在形式, 占 DTN 的61.79%, 明显高于  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N 占 DTN 的22.10%; 再次为 DON, 占 DTN 的比例为13.13%, 而  $\text{NO}_2^-$ -N 仅占 DTN 的2.98%.

由图4可知, 两河道水体 TN 浓度在9月到次年2月均呈现出逐渐升高的趋势, 在强降雨事件出现频次较多的3~8月有逐渐下降的趋势, 使其浓度呈现冬春季高、夏秋季低的明显特征(图5), 这种季节变化规律与太湖水体总氮及上游天目湖沙河水库水体总氮的季节变化规律一致<sup>[30,31]</sup>. 经计算, 大浦河和殷村港在传统雨季的 TN 浓度( $2.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $3.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 明显低于其他月份( $3.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $4.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 形态上 DTN 浓度的下降幅度与 TN

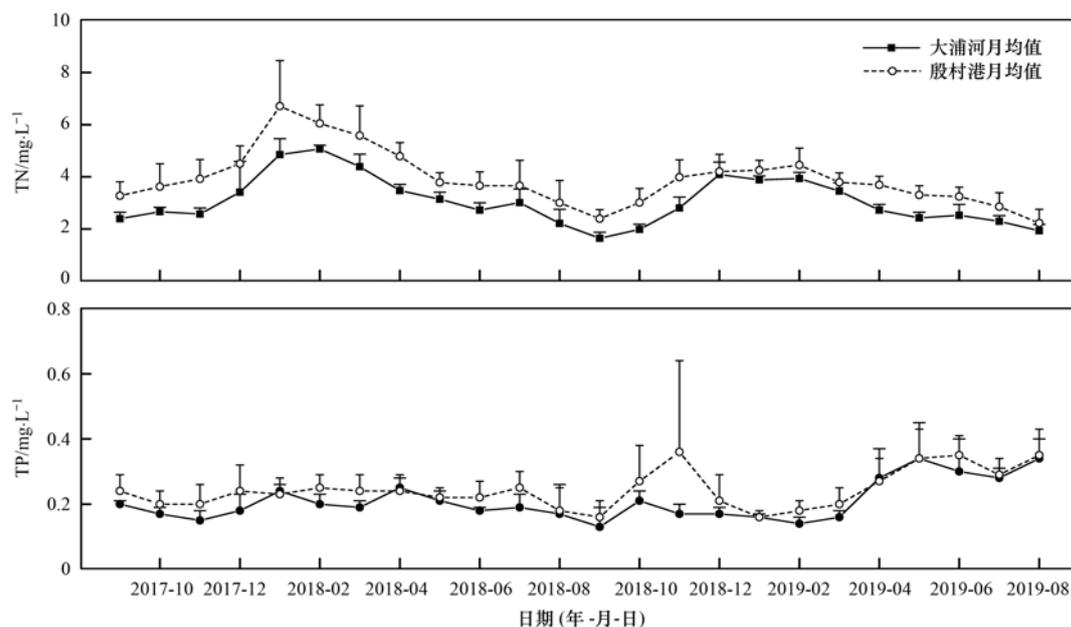


图 4 大浦河和殷村港水体 TN 和 TP 浓度月变化

Fig. 4 Monthly variation of TN and TP concentrations at Dapu River and Yincun River

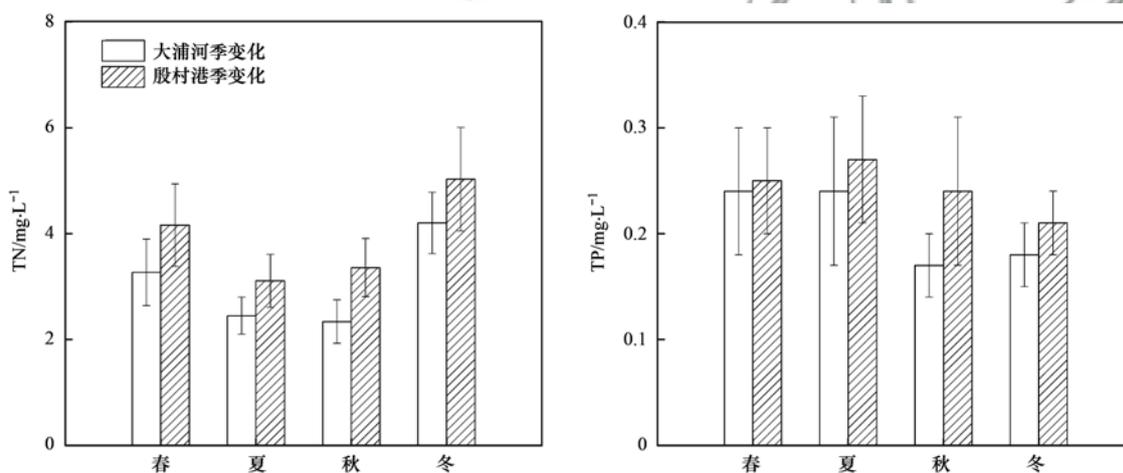


图 5 大浦河和殷村港水体 TN 和 TP 浓度季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of TN and TP concentrations at Dapu River and Yincun River

几乎一致约为 27.64%。

大浦河和殷村港河道水体 TP 日浓度变化分别介于  $0.06 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间及  $0.09 \sim 1.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (图 3)。大浦河及殷村港水体 DTP 的浓度分别介于  $0.03 \sim 0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间和  $0.02 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 均值分别为  $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  及  $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 PP 的均值分别为  $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  及  $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TP 中 PP 的占比高于 DTP。大浦河及殷村港两年观测中 DTP 平均占 TP 的 48.78%, PP 占 51.22%。

河道中各形态磷的年变化不如氮有规律, 没有特别明显的季节差异。虽然在观测期间 TP、DTP 都多次出现明显的峰值变化, 但这些变化的季节性特征不够明显。图 5 可以看出, 强降雨出现频次最高的

夏季河道 TP 浓度高于其他 3 季, 而其他各形态磷的季节差值不明显。大浦河和殷村港水体中 TP 浓度却在传统雨季 ( $0.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 高于非雨季 ( $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), PP 浓度上升幅度稍大于 DTP, 与氮不同。

### 2.3 强降雨事件中河道氮、磷浓度的变化

将 16 次强降雨事件中水体氮、磷浓度的逐日增减量平均, 获得强降雨当日及雨后 1~5 d 的各形态氮、磷与降雨前一日 (固定) 相比的日均增减量, 如图 6。表 1 为两河道 16 次强降雨过程中氮、磷峰值出现的时间。

大浦河各形态氮浓度的最大日均增量与 TN 浓度的日变化峰值出现时间一样, 往往出现在雨后 2~5 d。TN 日均最高增量为  $0.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 相对浓度比雨前增加了 13.50%。而 DTN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和

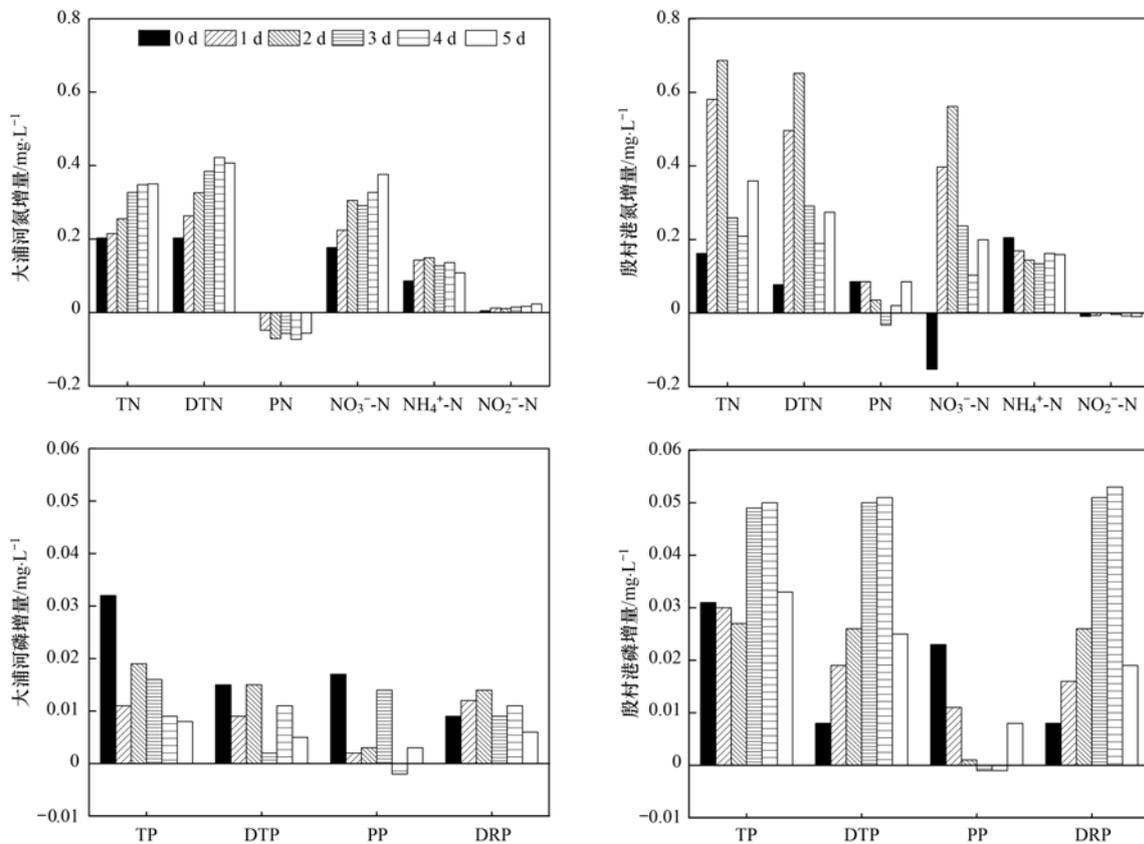


图6 强降雨当日及后续5 d内大浦河和殷村港水体各形态氮、磷浓度增量变化

Fig. 6 Changes of N and P concentrations after heavy rain events at Dapu River and Yincun River

表1 大浦河和殷村港16次强降雨过程中TN和TP峰值出现时间

Table 1 Dates of TN and TP peaks during 16 heavy rainfall events at Dapu River and Yincun River

项目	位置	雨前	降雨当日	雨后1 d	雨后2 d	雨后3 d	雨后4 d	雨后5 d
TN	大浦河	1次	1次	0次	4次	3次	3次	4次
	殷村港	3次	3次	3次	3次	1次	1次	2次
TP	大浦河	1次	6次	1次	3次	2次	2次	1次
	殷村港	1次	3次	4次	3次	1次	2次	2次

$\text{NO}_2^-$ -N浓度日均增量范围分别为0.20~0.42、0.18~0.38、0.09~0.15和0.01~0.02  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,与雨前浓度相比,增幅分别为9.79%~20.33%、17.48%~37.21%、19.90%~32.51%和5.00%~24.18%。殷村港TN浓度在雨后2 d就已基本达到峰值(表1)时,氮的增量也在雨后1~2 d达到最大(图6),比大浦河快。殷村港在强降雨当日及之后5 d内TN、DTN、PN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N日均增量分别为0.16~0.69、0.08~0.65、-0.03~0.09、-0.15~0.56和0.13~0.21  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,相对与雨前浓度,其增幅分别为4.71%~20.02%、2.63%~22.29%、-6.64%~16.95%和-8.96%~33.00%,增幅与大浦河基本相同。

两河道磷浓度的峰值集中出现在降雨当日到雨后2 d的时间段里,比氮分散,但从峰值出现的时间上看,比氮响应迅速(表1)。大浦河TP浓度的最大

日均增量出现在降雨当日,TP、DTP和PP浓度增量分别为0.03、0.02和0.02  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,增幅分别为13.98%、13.80%和14.14%。此外,DRP浓度则在雨后第2日最大,为0.01  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,增幅为18.91%。殷村港总磷的日均增量值在雨后第3 d和第4 d较大。PP在降雨当日浓度增量最大,TP、DTP和DRP均在雨后第4日增量最大,增量分别为0.05、0.05和0.05  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,增幅分别为20.27%、45.40%和72.84%。此外,与大浦河相比,殷村港的单日磷浓度增量更大。

#### 2.4 强降雨期间河道氮、磷浓度的空间变化

利用台风“利奇马”期间,对大浦河和殷村港河道不同河段的4次监测,能够看出强降雨过程中不同河段的氮、磷浓度响应变化,如图7。

大暴雨过程期间,两河道水体总氮与总磷均出现先升高后降低的趋势,与周年观测结果一致,表明

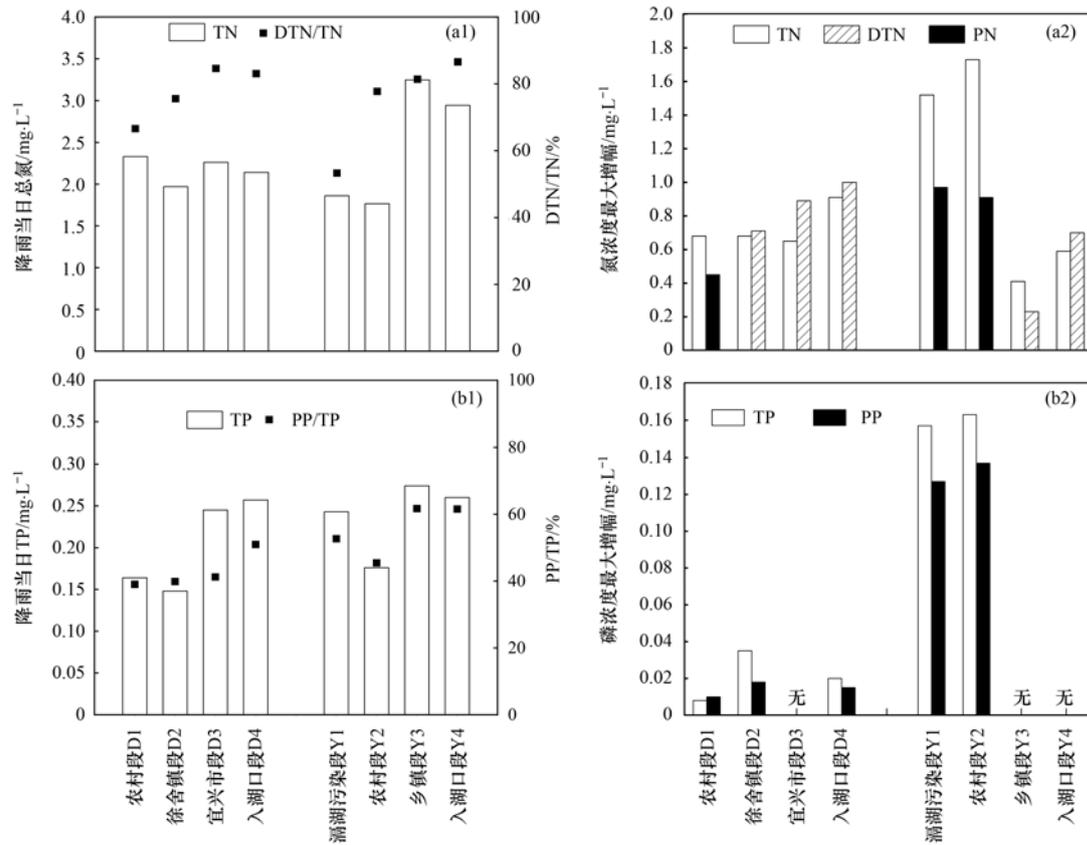


图7 “利奇马”大暴雨期间大浦河和殷村港水体氮、磷浓度空间变化

Fig. 7 Spatial variation of N and P concentrations at Dapu River and Yincun River after super typhoon Lekima

强降雨促进河道氮、磷浓度的短暂升高。

降雨当日,流域面积大、水量大和流程长的大浦河不同河段 TN 浓度几乎无差别,而殷村港则表现出较为明显的在上游受溧湖与农村污染的水体氮素低于下游受乡镇生活污水污染的现象[图 7 (a1)]. 并且经过东沅、团沅与西沅湿地系统宜兴市与入湖口河段水体(D3 与 D4)的氮素低于殷村港的受乡镇生活污水污染的河段(Y3). 大暴雨期间,从河段氮浓度的最大增幅量上看,大浦河不同河段 TN 增量也几乎无差别,而殷村港上游低浓度河段增量却最大[图 7 (a2)]. 从增量的形态上看,大浦河的农村段、殷村港受溧湖污染的河段与农村河段水体(D1、Y1 与 Y2)主要增加 PN,受城镇污染的河段主要增加 DTN.

空间上,磷浓度具有更多的变化.大暴雨当日,大浦河下游(D3 与 D4)、殷村港的下游(Y3 与 Y4)与受溧湖污染的河段(Y1)水体较为浑浊,利用 YSI 公司的 EXO 多参数水质仪现场测定的浊度(NTU)比其他河段高,分别为 54.11、64.16、65.38、38.51 和 44.45 NTU;并且这些河段的 TP 浓度与 PP/TP 较高[图 7 (b1)]. TP 浓度的最大增幅值上,大浦河 TP 浓度的增量与氮一样幅度不大且几乎无差别,而殷村港在上游受农田面源污染与农村面源污染的河

段水体(Y1 与 Y2)的 TP 浓度增幅较大[图 7 (b2)].形态上,所有河段 TP 浓度的大幅度升高都主要升高 PP 浓度.

### 3 讨论

已有研究表明,山区的大暴雨、施肥后的首场强降雨对地表氮、磷的冲刷效应明显<sup>[32,33]</sup>;强降雨对水库的营养盐输入有决定性影响<sup>[34,35]</sup>.基于单次观测发现,太湖流域的强降雨过程中农田径流氮、磷浓度明显升高<sup>[36,37]</sup>.这都说明强降雨在氮、磷的面源发生中作用很大.然而,陈洁等<sup>[12]</sup>的初步分析发现,太湖平原河网区的雨强高低对入湖河道营养盐浓度影响不大,甚至对入湖河道氮浓度有一定的稀释作用<sup>[38]</sup>.

本研究的两周年观测结果表明,平原河网地区强降雨较集中的月份里氮浓度确实不高(图 4).一方面可能因为太湖降雨总氮浓度低于西北太湖的入湖河道,所以降雨对入湖河道氮浓度有一定稀释作用<sup>[38]</sup>,另一方面可能是春耕已逐渐结束,农业面源污染明显减弱,从而带入河道的氮素也随之减少,其次,暴雨产生明显的地表径流,对地表有较强的冲刷作用,导致流域氮素的平均流失速率上升,因此导致河道氮素浓度下降<sup>[29]</sup>.但是,这种月尺度的推测研

究,只能说明强降雨在较长时间反应后的结果,并未从强降雨短时高负荷的特征,来真实说明短时间内日尺度上的河道营养盐变化。虽然陈洁等<sup>[12]</sup>基于日尺度上做了初步分析,但对太湖平原河网区产汇流滞后的特征只做了降雨单日的研究,也无法说明降雨过程对河道氮、磷浓度影响的情况。

强降雨过程能够引发营养盐的增高效应。由于增加时间短,日变化大,一般的低频调查中既不容易捕捉到,统计分析中也不容易发现<sup>[39]</sup>。在本研究 19 d 共计 16 次的强降雨过程中观察发现,强降雨出现后的几日内,氮、磷浓度比雨前高并出现短暂峰值(图 3),大浦河和殷村港 TN 浓度单日最大升高  $1.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,峰值可达到  $4.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $6.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; TP 浓度单日最大升高分别为  $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,峰值可达到  $0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,浓度值已经接近污水处理厂磷的一级 A 排放标准。而通过计算降雨量与河道氮、磷浓度的 Pearson 相关性发现,不论是强降雨当日还是雨后,氮、磷浓度变化都与雨量存在一定的相关性。说明降雨量与降雨过程中的氮、磷的浓度存在一定关系。因降雨对氮磷营养盐的影响不同,所以降雨量与氮、磷浓度的统计关系也存在差异<sup>[34]</sup>。降雨当日与大浦河 DTN/TN 存在显著负相关为  $r = 0.83$  ( $P < 0.05$ ),与殷村港 TP、PP 存在极显著正相关, $r$  分别为  $0.868$ 、 $0.841$  ( $P < 0.01$ ),并且强降雨过程中河道氮、磷浓度的波动与雨量存在显著正相关性,与大浦河 DTN 的相关性为  $r = 0.50$  ( $P < 0.05$ ),与殷村港 TP、PP 浓度的波动相关性分别为  $r = 0.79$ 、 $r = 0.77$  ( $P < 0.01$ )。以上均说明强降雨过程会在短时间内促进河道氮、磷浓度的升高。

但强降雨对太湖平原河网区河道水体氮、磷浓度的增幅不明显。16 次强降雨过程,大浦河和殷村港 TN 浓度的最大日均增量分别为  $0.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,TP 浓度的最大日均增量为  $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,远不及强降雨对山区、农田的单日浓度增幅影响<sup>[32,36]</sup>。平原河网地区的河道水体营养盐浓度对强降雨过程的响应明显较弱,反映出太湖平原河网区河道水流滞缓以及对面源污染物截留、缓冲能力大的特征。

台风雨“利奇马”期间,不论是降雨当日的 TN 浓度还是降雨过程中的增幅,大浦河的不同河段表现几乎相同,而且在大浦河的宜兴市河段(D3)的 TN 浓度与增幅量竟然比殷村港的大镇河段(Y3)低(图 7)。一方面可能因为大浦河发达的水系、宽广的流域面积以及较长的流程对氮素有较强的消耗与缓冲能力使其日常水体的氮浓度不高,另一方面大浦

河经过了宜兴市的东氾与团氾两个湿地系统才到达的宜兴市下游,湿地系统对氮有较高的截留、净化及缓冲能力<sup>[40]</sup>。缓冲区对水质产生了一定的影响<sup>[41]</sup>,所以经过西氾湿地系统后的大浦河入湖口处的氮浓度不高。而降雨当日殷村港在两个大镇污染与入湖口处的河段水体的氮素明显高于上游(图 7),则说明了太湖平原河网区河道水体日常氮素受人类活动污染较大<sup>[42]</sup>,需加强管理日常产排污达标情况。大暴雨带来的极大径流与强有力的冲刷作用是影响河道面源污染重要因子<sup>[7]</sup>。上游受漏湖与农村污染的河段总氮增幅明显较大,且形态上还以 PN/TN 较低的 PN 大幅度升高为主。说明强降雨对农业面源污染的影响强于城镇污染的河段,可能由于河道周边农田对营养盐截留、净化与缓冲作用<sup>[37]</sup>不如城镇完善的给排水系统的作用能力强,但其影响却是可防可控的,可以进一步加强农业等管理与治理,如进行生态拦截与降解,对河道农田周围设置生态沟渠和缓冲带等<sup>[43]</sup>。强降雨下的太湖河道的磷素,展现出了有别于氮素的特征。首先是磷对强降雨的响应速度要快于氮,一般在降雨当日就有明显变化,可能是因为磷的形态导致的。强降雨当日,风浪扰动及强降雨对径流的水动力扰动等因素的影响下,可能引起沉积物的再悬浮,底泥释放 PP 从而 TP 浓度在降雨当日就达到较高值。现场调研时也发现,台风雨期间径流水体大面积浑浊,利用 YSI 公司的 EXO 多参数水质仪现场测定的浊度(NTU)值也较高。而暴雨期间,河道水体 TP 浓度增加,主要是 PP 浓度的升高。

虽然强降雨对平原河网地区水体氮、磷浓度增高效应幅度不大,但强降雨带来入湖氮、磷负荷很可观<sup>[7]</sup>。强降雨产生明显的地表径流,对地表有强大的冲刷作用<sup>[29]</sup>,使得河道氮、磷浓度短暂升高。随着强降雨携带的较大水量,累积雨量为  $916.89 \text{ mm}$ ,达到总雨量的  $41.33\%$ ,与营养盐输入速率的明显增大<sup>[5]</sup>,强降雨在短时间内会携带大量氮、磷入湖,带来较高负荷的营养盐。观测期间两周年发生了 19 d 强降雨,年均强降雨天数不足 10 d,但其携带入湖的营养盐负荷可能超过全年的  $50\%$ 。因湖泊出水的营养盐浓度一般远低于来水<sup>[29]</sup>,在这种情况下,来水营养盐负荷的增加就意味着湖泊滞留营养盐的增加,特别是磷这种相对保守的元素,在浅水湖泊的滞留系数高,易于在湖泊中累积<sup>[44]</sup>。通常来水量越大,滞留量越多。而在 4~8 月湖体藻类大量增加、磷浓度大幅度升高的情况下,强降雨也较为集中,这样会在短时间内促进更多磷素入湖,而强降雨带来洪流的突发性和偶然性特征使得难以及时控制,所以可能成为太湖蓝藻水华大暴发的关键一步<sup>[45]</sup>。朱伟

等<sup>[46]</sup>在分析太湖2010~2017年水质变化趋势及异常原因中发现,2016年的6月底至7月初强降雨引发的洪水,水量大、冲刷作用强,对太湖当年的磷收支产生决定性的影响,并可能是造成太湖2017年蓝藻水华异常的原因。因此,强降雨的频次、强度以及发生季节,均会对平原河网区湖泊的面源污染过程产生决定性的影响。

#### 4 结论

(1) 两周年观测期间太湖流域的强降雨次数年均不足10日,但雨量占总降雨量的41.33%,多集中在夏季,说明强降雨带来的人湖水量负荷较高。

(2) 强降雨影响下,太湖平原河网地区河道各形态氮、磷浓度会有短暂但快速地升高趋势,响应时间可能有2~5 d的滞后,虽然增加幅度不大,但是由于强降雨带来的人湖流量占比高,强降雨事件带来的氮、磷入湖负荷依然相当可观,在湖泊面源污染控制中应予以高度重视。

(3) 台风“利奇马”带来的大暴雨促使太湖河道水体氮、磷浓度升高,河道流程长、流域面积大,缓冲能力大。农业面源污染的河段不如城镇污染的河段对营养盐的拦截、净化、缓冲能力强,使得强降雨对农业面源污染的河段的影响强于城镇污染的河段。农业面源影响较大的河段氮浓度主要是颗粒态氮浓度发生变化,城市面源影响较大的河段则是溶解性氮变化为主,而河道中磷浓度的增加则以颗粒态磷为主。

#### 参考文献:

- [1] Paerl H W, Otten T G. Blooms bite the hand that feeds them [J]. *Science*, 2013, **342**(6157): 433-434.
- [2] Qu M Z, Lefebvre D D, Wang Y X, *et al.* Algal blooms: proactive strategy [J]. *Science*, 2014, **346**(6206): 175-176.
- [3] Qin B Q, Li W, Zhu G W, *et al.* Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **287**: 356-363.
- [4] Qin B Q, Gao G, Zhu G W, *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(9): 961-970.
- [5] 朱金格, 刘鑫, 邓建才, 等. 太湖西部环湖河道污染物输移速率变化特征 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1509-1517.  
Zhu J G, Liu X, Deng J C, *et al.* Pollutant transport rates in the rivers around western Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1509-1517.
- [6] 李发荣, 邱学礼, 周璟, 等. 滇池东南岸农业和富磷区入湖河流地表径流及污染特征 [J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(6): 93-101.  
Li F R, Qiu X L, Zhou J, *et al.* Surface runoff and pollutants characteristics of inflowing rivers in the agricultural and phosphorus-rich region on the southeast coast of the Lake Dianchi [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(6): 93-101.
- [7] Zhang Y L, Shi K, Zhou Y Q, *et al.* Monitoring the river plume induced by heavy rainfall events in large, shallow, Lake Taihu using MODIS 250 m imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **173**: 109-121.
- [8] 刘忠翰, 贺彬, 王宜明, 等. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响 [J]. *地理研究*, 2004, **23**(5): 593-604.  
Liu Z H, He B, Wang Y M, *et al.* Effects of rainfall runoff on total nitrogen and phosphorus flux in different catchments of Dianchi Lake, Yunnan, China [J]. *Geographical Research*, 2004, **23**(5): 593-604.
- [9] 高超, 李阳, 于海明, 等. 典型自然降雨条件下太湖地区水稻田氮磷输出特点 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(5): 845-852.  
Gao C, Li Y, Yu H M, *et al.* The output characters of nitrogen and phosphorus from typical natural rainfall runoff of paddy fields in Tai Lake region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 845-852.
- [10] 李国栋, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型菜地土壤氮磷向水体径流输出与生态草带拦截控制 [J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(8): 905-910.  
Li G D, Hu Z Y, Yang L Z, *et al.* Soil nitrogen and phosphorus losses with surface runoff from typical vegetable field of Taihu Lake region and their control with grass buffer strip [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(8): 905-910.
- [11] 李凯, 曾凡棠, 胡应成, 等. 广州番禺区不同地类的非点源污染排放特征 [J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(6): 26-31.  
Li K, Zeng F T, Hu Y C, *et al.* Characteristics of non-point source pollution discharge under different land use conditions in Panyu district of Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(6): 26-31.
- [12] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4924-4931.  
Chen J, Zhu G W, Xu H, *et al.* Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from an inflowing river in the plain river network of the Taihu catchment [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4924-4931.
- [13] Qin B Q, Paerl H W, Brookes J D, *et al.* Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts [J]. *Science Bulletin*, 2019, **64**(6): 354-356.
- [14] 朱广伟, 邹伟, 国超旋, 等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005-2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(1): 21-35.  
Zhu G W, Zou W, Guo C X, *et al.* Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005 - 2018: implications for future phosphorus reduction target management [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(1): 21-35.
- [15] 卢少勇, 远野, 金相灿, 等. 7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1497-1502.  
Lu S Y, Yuan Y, Jin X C, *et al.* Speciation distribution of nitrogen in sediments of 7 rivers around Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1497-1502.
- [16] 许朋柱, 秦伯强. 2001-2002水文年环太湖河道的水量及污染物通量 [J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(3): 213-218.  
Xu P Z, Qin B Q. Water quantity and pollutant fluxes of the surrounding rivers of Lake Taihu during the hydrological year of 2001-2002 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(3): 213-218.
- [17] 翟淑华, 张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000-

- 2002年)[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 225-230.
- Zhai S H, Zhang H J. Water quantity and waste load variation of rivers around Lake Taihu from 2000 to 2002[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(3): 225-230.
- [18] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009年环太湖入湖河流水量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.
- Yan S W, Yu H, Zhang L L, *et al.* Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009 [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(6): 855-862.
- [19] 赵林林, 朱广伟, 许海. 太湖梅梁湾理化指标分层的空间分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(7): 721-727.
- Zhao L L, Zhu G W, Xu H. Spatial distribution of the physicochemical parameter stratification in Meiliang Bay, Lake Taihu, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(7): 721-727.
- [20] 倪兆奎, 李跃进, 王圣瑞, 等. 太湖沉积物有机碳与氮的来源[J]. 生态学报, 2011, **31**(16): 4661-4670.
- Ni Z K, Li Y J, Wang S R, *et al.* The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(16): 4661-4670.
- [21] 何伶俐, 汪勇, 黄皓, 等. 江苏太湖流域污水处理厂一级A提标改造技术总结[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(10): 33-39.
- He L J, Wang Y, Huang H, *et al.* Summary of technical innovations for upgrading and retrofitting of MWWTPs for first level A criteria in Taihu Lake basin of Jiangsu Province [J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(10): 33-39.
- [22] 闫丽珍, 石敏俊, 王磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(1): 99-107.
- Yan L Z, Shi M J, Wang L. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, **20**(1): 99-107.
- [23] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, **26**(3): 87-90.
- Zhang H J, Chen F. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu basin [J]. Water Resources Protection, 2010, **26**(3): 87-90.
- [24] 刘俊杰, 陆隽, 朱广伟, 等. 2009-2017年太湖湖泛发生特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1196-1205.
- Liu J J, Lu J, Zhu G W, *et al.* Occurrence characteristics of black patch events and their influencing factors in lake Taihu during 2009 and 2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(5): 1196-1205.
- [25] 张红举. 太湖氮磷营养盐自净能力研究[D]. 南京: 中国科学院大学, 2014. 17-38.
- [26] 钱君龙, 府灵敏. 用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷[J]. 环境科学, 1987, **8**(1): 81-84.
- [27] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K Y, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(5): 550-552.
- [28] Qian W H, Fu J L, Yan Z W. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961-2005 [J]. Geophysical Research Letters, 2007, **34**(11): L11705.
- [29] 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- Zha H M, Zhu M Y, Zhu G W, *et al.* Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1102-1112.
- [30] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.
- [31] Zhu G W, Cui Y, Han X X, *et al.* Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2015, **30**(1): 41-58.
- [32] 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.
- Jiang R, Zhu B, Tang J L, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall-runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1353-1358.
- [33] 李振炜, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1152-1158.
- Li Z W, Yu X X, Liu Q J, *et al.* Output characteristics of non-point phosphorus from a typical small watershed in Yimeng Mountainous area under the special rainfall [J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1152-1158.
- [34] 笪文怡, 黎云祥, 朱广伟, 等. 水文气象过程对千岛湖氮磷变化的影响[J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(5): 9-19.
- Da W Y, Li Y X, Zhu G W, *et al.* Influence of hydrometeorological processes on nutrient dynamics in Qiandao Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2019, **40**(5): 9-19.
- [35] 罗献宝, 文军, 骆东奇, 等. 洪水胁迫因子对千岛湖水质的影响与风险评估研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(3): 118-121.
- Luo X B, Wen J, Luo D Q, *et al.* Effect and risk assessment of flood stress on the water quality of Qian-dao Lake [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, **14**(3): 118-121.
- [36] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(1): 59-63.
- Liang X Q, Tian G M, Li H, *et al.* Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(1): 59-63.
- [37] 曾远, 张永春, 范学平. 太湖流域典型平原河网区降雨径流氮磷流失特征分析[J]. 水资源保护, 2007, **23**(1): 25-27.
- Zeng Y, Zhang Y C, Fan X P. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss of rainfall runoff in typical plain river-net area of Taihu Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2007, **23**(1): 25-27.
- [38] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(5): 439-445.
- Zhu G W. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, **18**(5): 439-445.
- [39] 盛海艳, 吴至旭, 刘明亮, 等. 新安江水库近10年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 118-127.
- Sheng H Y, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(1): 118-127.

- [40] Audet J, Zak D, Bidstrup J, *et al.* Nitrogen and phosphorus retention in Danish restored wetlands [J]. *Ambio*, 2020, **49** (1): 324-336.
- [41] Rixon S, Levison J, Binns A, *et al.* Spatiotemporal variations of nitrogen and phosphorus in a clay plain hydrological system in the Great Lakes Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**: 136328.
- [42] 朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(6): 1510-1524.  
Zhu G W, Xu H, Zhu M Y, *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(6): 1510-1524.
- [43] 甘曼琴, 刘佩诗, 黄瑜, 等. 稻田氮磷流失控制技术研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, **32**(2): 8-11, 21.  
Gan M Q, Liu P S, Huang Y, *et al.* Study on control technology of nitrogen and phosphorus loss in paddy field [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2020, **32**(2): 8-11, 21.
- [44] 翟淑华, 韩涛, 陈方. 基于质量平衡的太湖氮、磷自净能力计算 [J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 185-190.  
Zhai S H, Han T, Chen F. Self-purification capacity of nitrogen and phosphorus of Lake Taihu on the basis of mass balance [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(2): 185-190.
- [45] Tiehm A, Hollert H, Yin D Q, *et al.* Tai Hu (China): water quality and processes-From the source to the tap [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**: 135559.
- [46] 朱伟, 谈永琴, 王若辰, 等. 太湖典型区2010-2017年间水质变化趋势及异常分析 [J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 296-305.  
Zhu W, Tan Y Q, Wang R C, *et al.* The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 296-305.



## CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China .....	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM <sub>2.5</sub> : A Case Study of the Yangtze River Delta .....	..... ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area .....	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM <sub>2.5</sub> in Shanxi University Town .....	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM <sub>2.5</sub> Concentration During 2000-2019 in China .....	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing .....	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background .....	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification .....	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data .....	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu .....	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir .....	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer .....	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018 .....	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula .....	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes .....	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve .....	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain .....	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin .....	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network .....	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section .....	..... XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns .....	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter .....	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier .....	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta .....	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China .....	..... GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree .....	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism .....	..... PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N <sub>2</sub> O Release of ANAMMOX Process .....	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A <sup>2</sup> /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source .....	..... RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules .....	..... ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge .....	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics .....	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites .....	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors .....	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System .....	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants .....	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides .....	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation .....	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China .....	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure .....	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area .....	..... JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems .....	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)