

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



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琄(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	《环境科学》征稿简则(5039)
信息(4782, 4979, 5056)	

不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响

陈洁^{1,2}, 朱广伟^{1*}, 许海¹, 詹旭², 朱梦圆¹, 笪文怡³, 黄亚文¹

(1. 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; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 3. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637009)

摘要:为揭示太湖河网区不同雨强下入湖河道面源污染规律,以太湖入湖负荷最大的河道大浦河为例,通过一周年逐日高频监测水体各形态氮、磷及溶解性有机碳等营养盐情况,结合河道流量及降雨量的自动监测资料,分析了大雨、中雨、小雨及无雨等4种降雨强度下太湖河网区典型河道的流量和营养盐负荷特征。结果表明,作为太湖河网区的典型入湖河道,大浦河时常发生往复流现象,观测的365 d内,有60 d日均流量为负值,占16%;河道流量对雨强的响应较为迟缓,仅强降雨事件($>25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)下,降雨当日河道流量才显著增加;中雨期平均流量仅比无雨期高了29%,在统计上不显著。河道水体营养盐浓度在不同降雨强度下差异不显著,大雨、中雨、小雨及无雨事件下河道总氮浓度分别为 (3.00 ± 0.58) 、 (3.34 ± 0.93) 、 (3.55 ± 1.05) 和 $(3.37 \pm 1.14) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,小雨事件当天水体总氮浓度均值最高,而4种类型降雨事件下河道总磷含量分别为 (0.228 ± 0.068) 、 (0.258 ± 0.121) 、 (0.219 ± 0.083) 和 $(0.225 \pm 0.121) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,差异性也不显著,就平均值而言,中雨时河道总磷浓度最高。夏季典型降雨过程分析表明,不同雨强发生之后河道溶解性有机碳和各形态氮的浓度变化不大,但大雨之后次日河道各形态磷浓度有明显增高,持续时间为2 d,中雨后次日河道总磷和颗粒态磷有明显增高,持续时间仅为1 d,小雨后磷浓度基本无变化。大雨、中雨、小雨和无雨时总氮日负荷分别为7.64、3.19、3.21和 $2.62 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,总磷日负荷分别为0.59、0.26、0.22和 $0.20 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,受入湖流量影响,大雨期营养盐日负荷显著高于中雨及以下强度的降雨;然而,由于一年内大雨出现频次较少,大雨期氮和磷总入湖负荷占年负荷的比重不大,大雨期总氮和总磷分别入湖61.11 t和4.72 t,占观测周年的5.6%和5.8%,这与山区河道降雨负荷间的关系有着显著区别。本高频观测表明,太湖流域平原河网区河道面源污染汇集过程复杂,入湖负荷受降雨强度的影响相对较小,入湖水量是营养盐负荷的重要影响因素。本研究结果对太湖流域平原河网区湖泊的面源污染的估算及控制对策的制定具有参考价值。

关键词:平原河网区;面源污染;营养盐;降雨强度;湖泊;外源负荷;太湖

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4924-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201905103

Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment

CHEN Jie^{1,2}, ZHU Guang-wei^{1*}, XU Hai¹, ZHAN Xu², ZHU Meng-yuan¹, DA Wen-yi³, HUANG Ya-wen¹

(1. 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; 2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: To reveal the law of external pollution in the plain river network of the Taihu catchment, we investigated nitrogen, phosphorus, and dissolved organic carbon daily, as well as automatic recording data for flow rate and rainfall in Dapu River from 1st March, 2017 to 28th February, 2018. Dapu River, a typical inflowing river of Lake Taihu, usually has a reciprocating flow. A reciprocating flow is a common condition in the plain river network located in the Yangtze Delta. The response flow rate in the river was relatively slow to different intensities of rainfall. Flow rate significantly increased only when the rainfall intensity reached heavy rain ($>25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$). The concentrations were statistically non-significant under different rainfall intensities, and the concentrations of total nitrogen averaged 3.00 ± 0.58 , 3.34 ± 0.93 , 3.55 ± 1.05 , and $3.37 \pm 1.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ under heavy rain ($>25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$), medium rain ($10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \sim 25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$), light rain ($<10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$), and no rain. The concentrations of total phosphorus averaged 0.228 ± 0.068 , 0.258 ± 0.121 , 0.219 ± 0.083 , and $0.225 \pm 0.121 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The concentration of dissolved organic carbon and nitrogen in the Dapu River changed little during the 3 typical rainfall processes, but the concentration of phosphorus increased significantly after heavy rain when the duration was 2 days. The concentration of total phosphorus and particulate phosphorus increased significantly after medium rain when the duration was 1 day. The concentration of phosphorus did not show an obvious change after light rain. The concentration of total nitrogen was the highest under light rain, and the concentration of total phosphorus was the highest under medium rain. The daily loadings of total nitrogen from the Dapu River to Lake Taihu were 7.64, 3.19, 3.21, and $2.62 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ under conditions of heavy rain, medium rain, light rain, and no rain, respectively. The daily loadings of total phosphorus were

收稿日期: 2018-05-14; 修订日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671494, 41501532); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008); 中国科学院南京地理与湖泊研究所一三五项目(NIGLAS2017GH04); 山东省重大科技创新工程项目(2018YFJH0902)

作者简介: 陈洁(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为营养盐迁移转化过程与生态效应, E-mail: chen95jie@163.com

* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

0.59, 0.26, 0.22, and 0.20 t·d⁻¹ under conditions of heavy rain, medium rain, light rain, and no rain, respectively. Although the daily loading of nutrients under heavy rain conditions was the highest, the contribution of annual nutrient loading was small during heavy rain days. The reason was that the percentage of heavy rain during the entire year was small. The total nitrogen loading in heavy rain days was 61.11 tons in the observatory year, which was only 5.6% of annual loading. The total phosphorus loading in heavy rain days was 4.72 tons, which was only 5.8% of the annual loading. These low percentages of nutrient loading under heavy rainfall are quite different from situations in mountain catchments. This research showed that the transport processes of nutrients in the plain river network was complicated and its influence on nutrient concentrations and loadings in connected rivers was slow and indirect. The amount of inflow water was an important source of external nutrient loading in the plain river network. These conclusions have reference value for estimating the external loading and deciding non-point control policy of lakes in plain river network of the Taihu catchment.

Key words: plain river network; diffuse pollution; nutrients; rainfall intensity; lake; external loading; Lake Taihu

外源营养盐控制是富营养化湖泊生态修复的基本前提^[1]. 因此, 在太湖等富营养化湖泊治理过程中提出了“治湖先治河, 治河先治污”等外源控制策略. 然而, 在经历了初期的点源污染治理后, 面源污染成为湖泊富营养化控制的难点. 比如较早开展流域营养盐控制工作的北美五大湖之一的伊利湖, 在治理 20 a 之后入湖河道的反应性活性磷(SRP)浓度不再下降, 近年来甚至开始增加^[2], 面源污染过程及流域磷累积效应开始显现. 太湖流域在经历了 10 a 的高强度富营养化治理后, 至 2017 年, 蓝藻水华问题依然严峻, 而外源负荷下降缓慢是其中一项重要原因^[3,4]. 因此, 了解湖泊流域的面源污染特征对于湖泊富营养化治理策略及湖泊修复路径的制定具有重要意义.

降雨强度对面源产生及其入湖贡献有着重要影响. Carpenter 等^[5]通过观测与模拟估算, 发现 29 d 强降雨带入 Mendota 湖的总磷负荷占全年的 74%, 凸显出强降雨对入湖负荷的显著影响. 近年来随着极端降雨事件增多, 加大了对流域面源磷输移的影响, 导致伊利湖重新出现大面积蓝藻水华^[6]. 太湖流域地处东南季风区, 降雨量季节差异大, 台风等极端天气常常引发较强的降雨. 如 2013 年 10 月 6~8 日的“菲特”台风期, 台风雨引起太湖水位上涨 0.60 m^[7], 且太湖水体大面积浑浊^[8], 对太湖水质的影响较大. 近年来随着强降雨频次的增加^[9,10], 对太湖面源污染过程可能会产生相应的影响, 因此探究不同降雨强度下太湖河网区河道入湖负荷的特征显得尤为必要.

太湖流域平原河网区地势平坦, 水网交错, 河网密度高达 3.2 km·km⁻²^[11], 这对降雨的产汇流过程有一定的影响. 太湖流域土地开发强度大, 农业、工业、城镇和景观用地比例高, 氮磷面源污染严重. 如曾远等^[12]调查发现太湖流域农田降雨径流总氮平均浓度高达 14.991 mg·L⁻¹, 总磷高达 0.635 mg·L⁻¹, 明显高于山区河道; 李治源等^[13]调查发现苏州市不同景观类型的城市径流总磷浓度介于 0.38~3.47 mg·L⁻¹, 径流过程对磷浓度的影响

很大. 然而, 平原河网区水系特征独特, 即便是月尺度的水文巡测资料都难以客观准确地反映入湖河道的实际负荷情况^[14]. 因此, 有必要通过同步高频观测典型入湖的河道流量及水质情况, 探讨径流过程对河道水质及负荷的影响, 量化不同类型降雨下河道流量、水质和负荷的差异, 为流域水质调查和开展水环境综合整治提供科学依据.

位于太湖西岸的大浦河(陈东港), 是氮和磷负荷较大的一条入湖河道^[15]. 本研究利用布设在大浦河的自动监测系统监测流量及降雨情况, 结合河道碳、氮和磷等指标的逐日监测数据, 分析不同强度降雨下河道流量、营养盐浓度及入湖负荷的特征, 以期对太湖流域平原河网区面源污染负荷的估算及其综合整治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 监测方案

太湖地处长江三角洲中心, 有进出口河道 219 条, 流域内地势平坦, 水网纵横交错, 湖荡星罗密布^[16]. 西岸作为太湖主要来水区, 包括苕溪水系、南河水系、洮滆水系及运河水系等^[16]. 其中发源于西部山区, 途经溧阳、宜兴等主要城市的大浦河是其中来水量较大、污染负荷较高的一条入湖河道. 自 2017 年 3 月 1 日开始, 在靠近大浦河入湖河口的陈东港布设气象与流量自动监测系统各一套, 将 Sontek SL500 流量仪固定在河岸一侧, 于水面下 1 m 下侧向观测断面流量, 5 min 一次高频地记录大浦河流量(m³·s⁻¹)情况. 同时在数据箱上同时固定 Vaisala WXT530 雨量计一套, 实时记录降雨情况(mm). 观测期至 2018 年 2 月 28 日, 共计 365 d.

每天中午在流量站附近桥中央用采水器采集表层水样 500 mL(水面下 0.5 m), 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, 解冻后测定总氮(TN)、颗粒态氮(PN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)、颗粒态磷(PP)、溶解性总磷(DTP)和溶解性有机碳(DOC)等水质指标. TN 用碱性过硫酸钾消解后, 采用紫外分光光

度法测定; TP 用过硫酸钾消解后, 用钼锑抗分光光度法测定. DTN、DTP 用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤 ($\Phi \approx 0.7 \mu\text{m}$) 的滤后水, 按 TN、TP 的分析方法测定. PN、PP 用 TN 与 DTN、TP 与 DTP 的差值计算. DOC 用岛津 TOC 分析仪测定滤后水.

1.2 数据处理与统计

根据气象部门常用的降雨等级划分标准, 降雨量小于 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时归为小雨, 降雨量 $10 \sim 25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时归为中雨, 降雨量大于 $25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时归为大雨, 没有降雨则定义为无雨. 利用 5 min 一次的高频流量数据估算各时段的平均流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 进而估算对应时段的入湖水量 (m^3), 其中流量正值代表水由大浦河流入太湖, 负值代表水由太湖涌向大浦河. 各形态营养盐的日负荷 (LD) 用当天营养盐浓度与当日入湖水量

的乘积估算.

数据处理采用 Microsoft Excel 2016、SPSS 23.0 及 Origin 9.1 完成. 其中, 不同雨强下各指标数据通过方差齐次性检验及正态分布检验后采用 95% 置信区间的 ANOVA 检验判别.

2 结果与分析

2.1 河道流量与雨强的关系

观测期内河道日均流量及日降雨情况如图 1 所示. 观测周年累积降雨 1 016.96 mm, 属平水年, 具有一定的降雨代表性. 其中, 仅有 1 d 日降雨量超过 50 mm (暴雨), 发生在 2017 年 6 月 10 日, 这与多年情况相比, 总体偏少. 观测周年中, 共出现 8 d 大雨 (含 1 d 暴雨), 28 d 中雨, 139 d 小雨 (含 77 d 日降雨量小于 1 mm 的情况), 190 d 无雨.

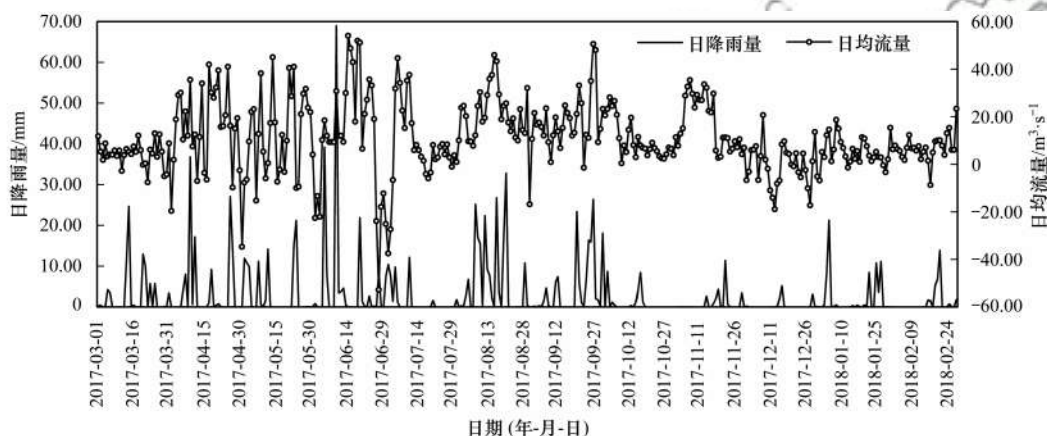


图 1 大浦河 2017-03-01 至 2018-02-28 期间日降雨量及日均流量情况

Fig. 1 Daily rainfall and flow rate at the Dapu River, western region of Lake Taihu from 1st March, 2017 to 28th February, 2018

观测周年中, 日均流量最大值为 $54.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值为 $-52.75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 年均值为 $10.87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 年均流量与相关报道值接近^[17], 表明流量自动观测系统的监测结果较为可靠. 总体而言, 大浦河大流量的情形不多, 体现了太湖平原河网区水流滞缓的特点; 年内日均流量介于 $-20 \sim 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的天数有 270 d, 占观测年的 74%. 此外, 从图 1 也可以看出, 观测周年内有 60 d 大浦河的日均流量为负值, 占观测年的 16%, 可见太湖流域平原河网区入湖河道往复流现象频繁发生.

观测期间经由大浦河进入太湖的水量约为 $94 \times 10^4 \text{ m}^3$, 年总入湖水量约为 $3.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这与文献^[17]的报道值接近.

4 种雨强下大浦河流量差异如图 2 所示, 可见不同雨强当日流量的变幅很宽, 反映了太湖平原河网区降雨产流的滞后性. 大雨、中雨、小雨和无雨期大浦河的平均流量分别为 27.11 、 12.24 、 11.29 和 $9.47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均流量总体上随降雨强度的增

大而增大. 在统计上, 仅大雨期的平均流量显著高于其他雨强时, 其余 3 种雨强的平均流量不存在显著差异. 也就是说, 日降雨量小于 25 mm 的降雨事件, 一般不会引起大浦河流量的显著增加.

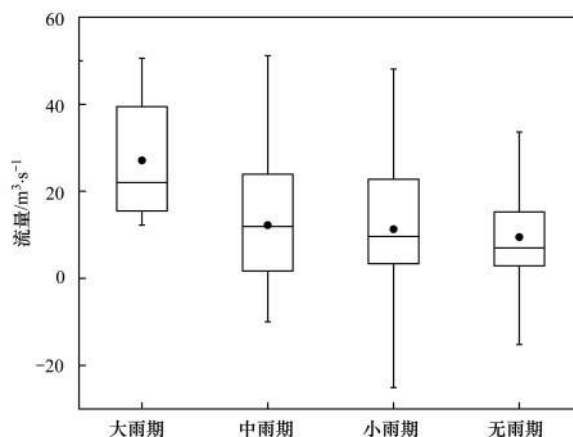


图 2 不同雨强下大浦河平均流量特征

Fig. 2 Average flow rate in the Dapu River under different rainfall intensities

2.2 河道水体营养盐浓度与雨强的关系

2.2.1 不同雨强下河道营养盐浓度差异

4 种雨强下大浦河水体碳、氮和磷的浓度区间如图 3 所示. DOC 年均浓度为 $(5.20 \pm 1.52) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 大雨、中雨、小雨及无雨期的浓度均值分别为 (5.47 ± 1.58) 、 (5.21 ± 1.35) 、 (5.15 ± 1.39) 和 $(5.22 \pm 1.64) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在统计上无显著差异.

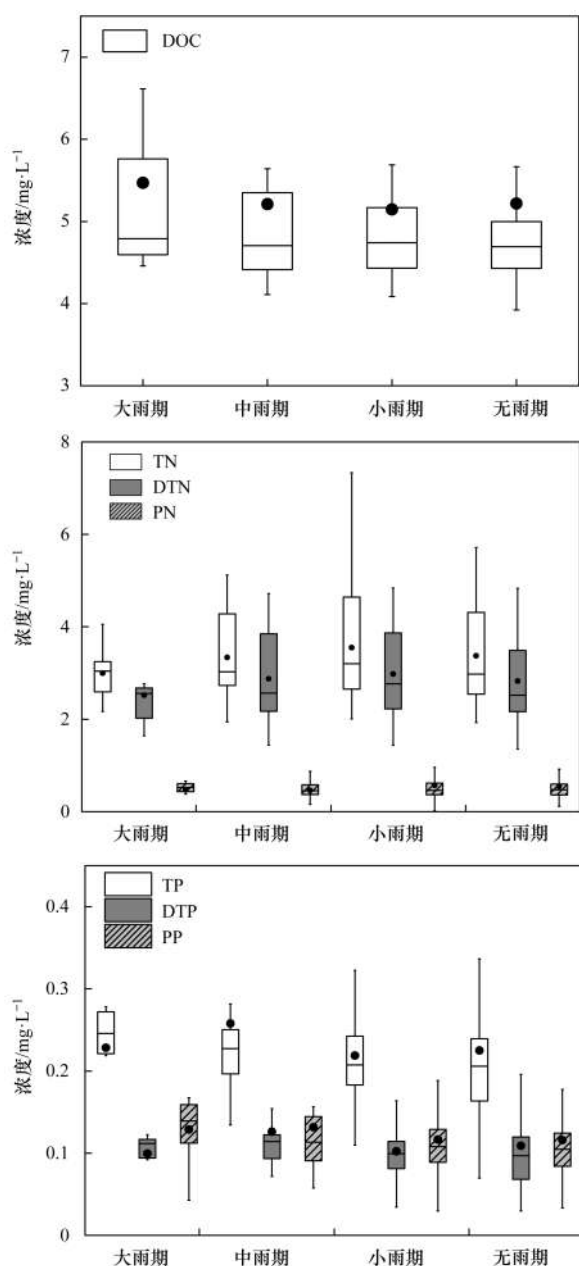


图 3 不同雨强下大浦河水体碳 (DOC)、氮 (TN、PN 和 DTN) 以及磷 (TP、PP 和 DTP) 浓度差异

Fig. 3 Differences in DOC, TN, PN, DTN, TP, PP, and DTP concentrations in the Dapu River under different rainfall intensities

TN、PN 和 DTN 的年均值分别为 (3.43 ± 1.08) 、 (0.55 ± 0.41) 和 $(2.88 \pm 0.98) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 DTN 平均占 TN 的 84%. TN 在大雨、中雨、小雨及无雨期浓度均值分别为 (3.00 ± 0.58) 、 $(3.34 \pm$

$0.93)$ 、 (3.55 ± 1.05) 和 $(3.37 \pm 1.14) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 统计上并无显著差异, TN 浓度在小雨期相对更高. DTN 规律与 TN 类似, 在大雨、中雨、小雨及无雨期浓度均值分别为 (2.52 ± 0.73) 、 (2.87 ± 0.98) 、 (2.98 ± 0.94) 和 $(2.83 \pm 1.02) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中小雨期的平均浓度相对更高. 河道 PN 浓度在不同雨强下的差异性也类似, 大雨、中雨、小雨及无雨条件下的平均浓度分别为 (0.48 ± 0.20) 、 (0.46 ± 0.19) 、 (0.57 ± 0.46) 和 $(0.55 \pm 0.40) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 不同雨强下各形态氮浓度在统计上无明显差异.

TP、PP 和 DTP 的年均值分别为 (0.225 ± 0.107) 、 (0.118 ± 0.060) 和 $(0.108 \pm 0.056) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 DTP 平均占 TP 的 48%, 与 PP 占比基本相当 (图 4). TP 在大雨、中雨、小雨及无雨期浓度均值分别为 (0.228 ± 0.068) 、 (0.258 ± 0.121) 、 (0.219 ± 0.083) 和 $(0.225 \pm 0.121) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在中雨期浓度相对更高, 但在统计上差异不显著. DTP 的差异与 TP 类似, 大雨、中雨、小雨及无雨条件下的平均浓度分别为 (0.100 ± 0.031) 、 (0.126 ± 0.057) 、 (0.102 ± 0.038) 和 $(0.109 \pm 0.067) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中雨期的平均浓度高于其他雨强时. 各时期 PP 的差异性也类似, 大雨、中雨、小雨及无雨条件下的平均浓度分别为 (0.129 ± 0.041) 、 (0.132 ± 0.069) 、 (0.117 ± 0.056) 和 $(0.116 \pm 0.063) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从统计角度看, 各形态磷浓度在不同雨强下的差异均不显著.

2.2.2 夏季典型降雨事件过程中河道营养盐浓度变化情况

以大浦港地区夏季不同强度的单场降雨事件 (2017-06-05 的大雨事件、2017-06-20 的中雨事件以及 2017-07-11 的小雨事件) 为例, 分析不同雨强下大浦河水体碳、氮和磷浓度的变化过程 (如图 4).

河道 DOC 浓度在大雨当天显著增加, 与降雨前一天相比增加了 19%, 但在大雨后第 2 d 水体 DOC 浓度与雨前浓度无明显差异; DOC 浓度在中雨和小雨过程中略有变化, 但变化幅度较小. TN、PN 和 DTN 浓度在 3 种雨强降雨过程变化幅度微小, 如大雨当天河道 PN 浓度增加了 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DTN 浓度降低了 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 中雨当天河道 PN 浓度降低了 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DTN 浓度增加了 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

河道 TP、PP 和 DTP 浓度在 3 种类型降雨过程中变化明显有别于碳和氮, 大雨次日 TP、PP 和 DTP 浓度分别比降雨前高 0.157、0.073 和 0.084 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但在大雨后第 4 d 各形态磷浓度均恢复到降雨前的水平; 与雨前相比, 中雨次日 TP 和 DTP

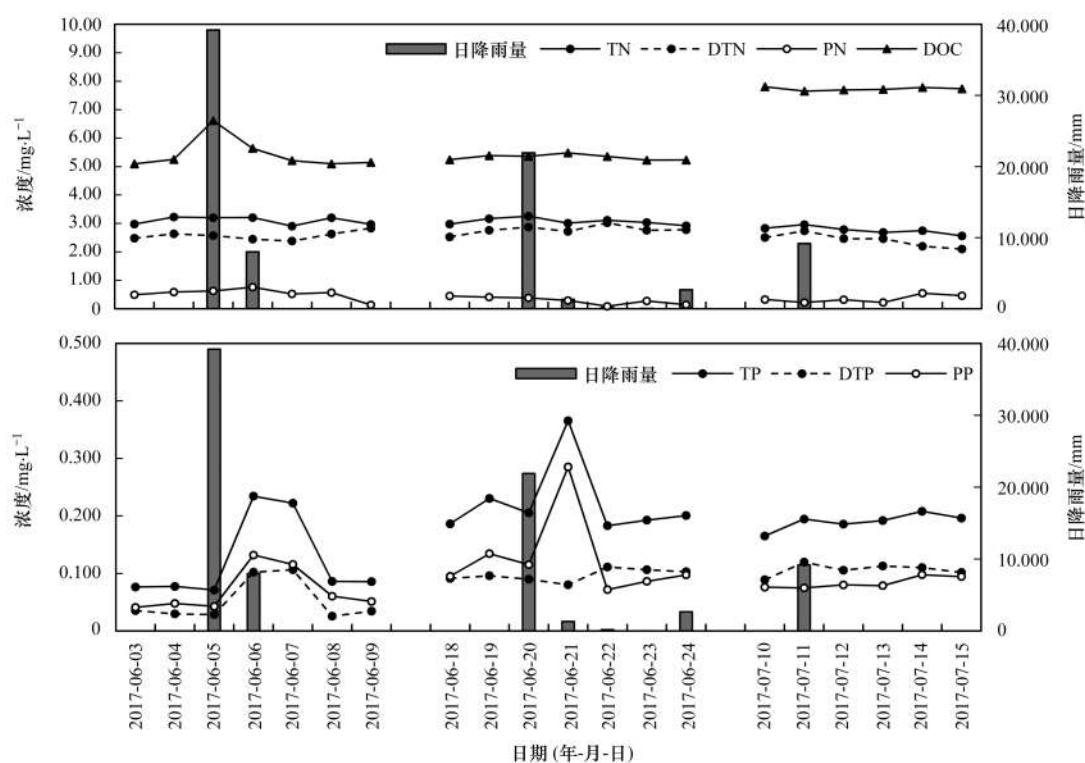


图4 夏季不同强度降雨事件下大浦河水体碳(DOC)、氮(TN、PN和DTN)以及磷(TP、PP和DTP)浓度变化情况

Fig. 4 Change in the DOC, TN, PN, DTN, TP, PP, and DTP concentrations from the Dapu River under different rainfall in summer

浓度增加了 $0.135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.151 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且在中雨后第2 d恢复至雨前水平,河道DTP浓度在中雨过程无明显变化;小雨事件下,降雨当天河道TP和DTP浓度略高于降雨前,分别增加了 $0.029 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并在小雨次日就恢复到雨前水平,河道PP浓度在小雨过程无明显变化。

2.3 不同雨强下大浦河氮磷入湖负荷特征

根据大浦河日均流量及各形态营养盐的逐日监测资料,估算不同雨强下大浦河营养盐日负荷(如图5)。从图5可以看出,流量差异是造成不同雨强下碳、氮和磷日负荷差异的重要因素。即大雨事件下DOC、TN、PN、DTN、TP、PP和DTP等营养盐的日负荷均显著高于其他3种雨情时,平均日负荷依次为 12.70 、 7.64 、 1.08 、 6.56 、 0.59 、 0.33 和 $0.26 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,而其余雨情期间日负荷均值依次为 4.76 、 2.89 、 0.52 、 2.38 、 0.21 、 0.11 和 $0.10 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。相应地,根据观测周年内各类型降雨发生天数,进一步估算周年内不同类型降雨期间营养盐入湖负荷特征(如图6),发现年内大雨期入湖负荷贡献率很小,于总氮而言仅占 5.6% ,为 61.11 t ,于总磷而言仅占 5.8% ,为 4.72 t 。

3 讨论

3.1 不同雨强下太湖平原河网区河道氮磷通量特征

雨强通常是面源污染的重要影响因素。一般来

说,雨强越大,产生的氮和磷等面源负荷就越高,这在山区流域更为明显。比如蒋锐等^[18]于2007年观测盐亭丘陵区小流域大暴雨及施肥后首场降雨过程中氮、磷流失特征,发现径流中颗粒氮和颗粒磷在降雨初期流失明显,后期淋溶主要流失的是硝态氮,即使是施肥后的首场降雨,其产生的氮磷面源负荷也不及强降雨。李振炜等^[19]于2010年调查了沂蒙山孟良崮小流域降雨径流过程中氮磷面源污染特征,首场降雨对氮磷冲刷携带强度很大,超过了最大降雨,但最大降雨的初期冲刷效应明显。以上研究均表明,降雨强度和降雨时机对于山区氮磷的降雨径流过程影响很大,是分析营养盐面源强度的重要考量因子。

本研究表明,太湖平原河网区雨强与河道氮磷浓度的特征关系可能与山区有较大差别。基于周年逐日观测结果,发现雨强对大浦河水体营养盐浓度的影响不大:TN和DTN的浓度峰值出现在小雨期,而TP和DTP的峰值一般出现在中雨期;大雨对河道氮和磷浓度则表现出稀释作用。这与太湖流域平原河网区对面源污染物截留、缓冲能力有相对较大的关系。就污染源强而言,太湖流域平原河网区的降雨产流和营养盐负荷并不低,如梁新强等^[20]观测嘉兴王江泾稻田施肥后的暴雨产流过程时发现,暴雨初期氮磷浓度很高,TN最高达 $22.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP最高达 $4.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但主要以溶解态形式输

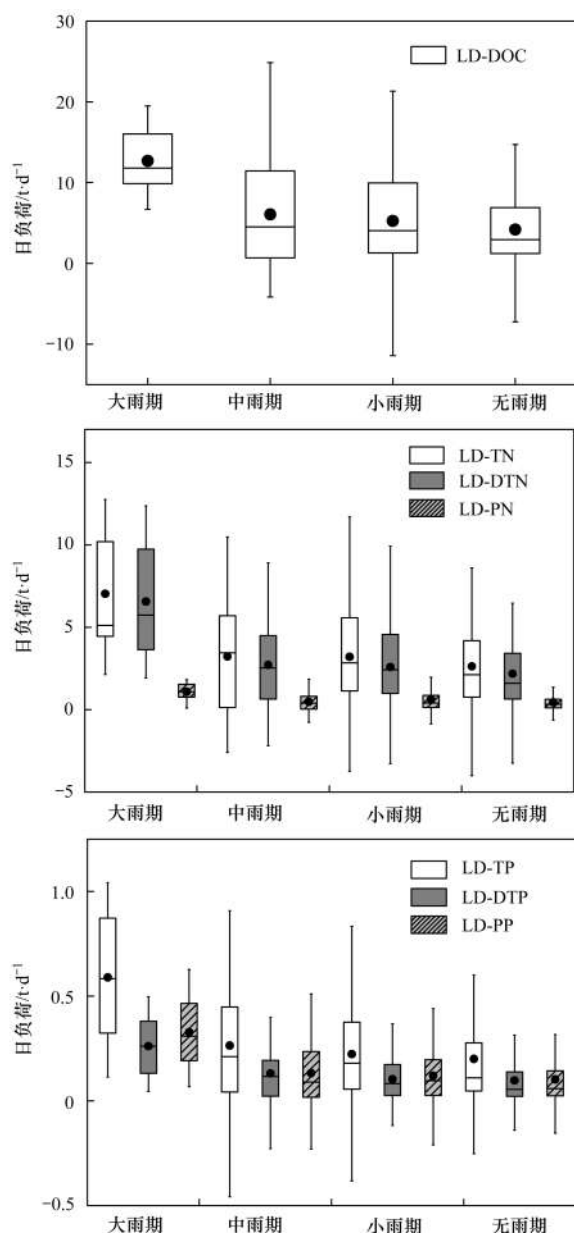


图5 不同雨强下大浦河水体碳(DOC)、氮(TN、PN和DTN)以及磷(TP、PP和DTP)日负荷情况

Fig. 5 Daily loadings of DOC, TN, PN, DTN, TP, PP, and DTP from the Dapu River under different rainfall intensities

出,溶解态氮磷的比例均超过了70%,这不同于山区农业面源污染特征.曾远等^[12]于2004年调查了太湖湖西农业区降雨产流过程中的氮磷情况,发现以菜地、农沟、民区、农田等为源强的径流水体TN浓度分别高达17.837、25.307、8.741和16.894 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP依次为0.507、0.511、0.901和0.683 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其浓度值已经接近甚至超过污水处理厂氮磷的一级A排放标准.但平原河网区的稻田、水塘、沟汊等湿地系统对氮磷有较强的截留、净化及缓冲能力.如在曾远的调查中,农业区池塘TN平均浓度仅为2.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP仅为0.254 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[12],显著低于周边其他土地利用类型的径

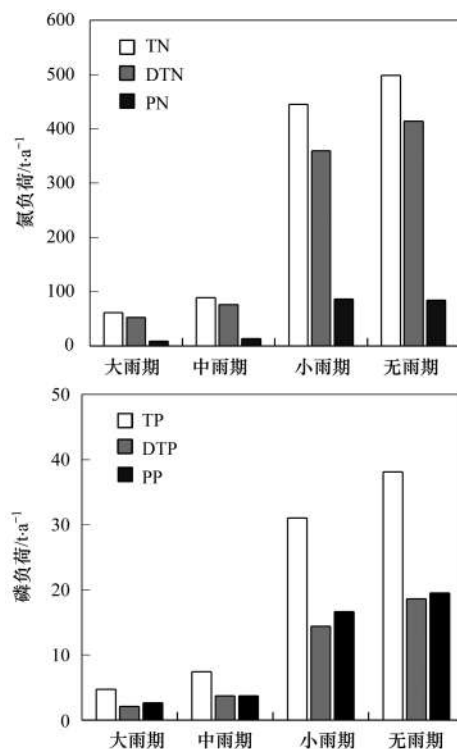


图6 不同雨强情形下大浦河各形态氮磷年负荷特征
Fig. 6 Total loadings of different nitrogen and phosphorus forms into Lake Taihu from Dapu River during the entire observatory year under different rainfall intensities

流浓度,而与入湖河道的浓度相近^[21],甚至与太湖湖西入流区水体氮、磷浓度相近^[22].太湖平原河网区的稻田对暴雨径流过程中氮和磷的流失有一定的缓冲和截留作用.据薛利红等调查发现,拔节期的稻田湿地系统对低污染水体中氮的去除率达77%~93%,磷的去处理率达87%~98%^[23].太湖流域平原河网区这些自然和人工湿地系统的拦截、缓冲和净化作用是入湖河道营养盐浓度与降雨强度关系不紧密的主要原因.

3.2 太湖平原河网区河道营养盐径流特征对面源污染管理的启示

太湖流域平原河网区水量与负荷的密切关系表明,入湖水量的多少是估算平原河网区入湖负荷的主要考量因子.为此,在监测管理方面,可以相对简化流域监测方案;在污染源控制方面,应适当控制入湖水量,并且加大滨湖湿地系统的建设及其水文管理.

对平原河网区的营养盐通量监测中,应当强化以河道流量监测为基础的污染物通量监测.以太湖为例,环湖219条河道中,大多数河道入湖实施闸控,如过去污染入湖负荷较高的梁溪河和直湖港等,目前均实施闸控管理.在相应河道水质不达标的情况下,平时这些河道水体与太湖是不交换的,其水质与太湖水质无关.然而,一旦洪水到来,因

行洪等因素, 闸控河道积蓄的大量污水短期入湖, 对湖泊水质产生较大影响. 这是 2016 年洪水过后太湖水体磷浓度增高的成因^[22]. 因为行洪径流的突发性和偶然性, 这些河道的入湖污染负荷监控的难点不是水质监测, 而是水量交换数据的准确获取. 除了闸控因素之外, 降雨强度与流量关系的复杂性, 也是太湖平原河网区入湖河流水面源污染估算的难点. 从本调查结果表明, 太湖平原河网区入湖河道流向多变, 流量与降雨量相关性不好, 这给区域入湖流量的推算带来了较大的困难. 水量估算不准, 负荷的估算精度就得不到保证. 因此, 提高太湖平原河网区河道流量的自动监测能力, 是监控面源污染负荷的重点.

负荷与流量间的高度关联性, 表明在治理平原河网区的富营养化湖泊时, 应充分论证调水、补水和冲水等治理措施的预期效果. 平原河网区河道营养盐含量普遍较高, 特别是由于长期淤积沉降, 导致流域内的城市河道、塘坝和农田等各类湿地系统中均储存了大量营养盐^[24]. 人工增加水量这一类稀释措施对湿地系统的自净能力提升不大, 却大大增加了湖泊的水量收支, 相应地, 增加了营养盐的入湖负荷. 平原河网区的湖泊多为浅水湖泊, 本身就类似一个大的净化营养盐的湿地系统, 因此, 湖泊出水的营养盐浓度一般远低于来水^[21]. 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^[25]. 通常来水量越大, 滞留量越多. 近 10 a, 太湖水质改善幅度有限, 其原因之一就是外源负荷削减不够大^[3]. 这其中一个重要因素就是 2014 ~ 2016 年太湖来水量偏大, 外源负荷明显增加^[22].

太湖流域平原河网区的湿地系统对强降雨事件下河道流量及营养盐浓度的“削峰”作用, 启示在控制流域面源污染时, 应进一步加强对流域湿地系统的构建及其水文过程的管理. 太湖流域平原河网区农业基础长期较好, 营养盐自然本底高, 使得该地区的湖泊易于富营养化. 流域湿地, 特别是滨湖湿地系统是拦截营养盐入湖, 维持湖泊良性生态系统的重要缓冲区. 滨湖区自净系统的破坏, 使得湖泊富营养化程度增加, 更难治理. 太湖蓝藻水华问题的加剧, 与环太湖大堤建设及其伴随的水文过程有一定的联系. 环太湖大堤的建设, 提高了环湖湿地农业开发程度, 加剧了环湖营养盐净化系统的破坏程度. 如何高效恢复环湖湿地净化系统, 科学管理湖泊水文过程, 成为变化水文格局下太湖面源污染控制与湖泊富营养化治理的一个重要课题.

4 结论

(1) 由于太湖流域平原河网对面源污染的滞留、缓冲及自净作用, 仅日降雨量大于 25 mm 的强降雨事件, 河道当日流量才会显著增加, 中雨及其以下强度的降雨对河道当日流量有一定影响, 但在统计上差异不显著.

(2) 不同强度降雨事件下太湖流域平原河网区典型入湖河道水体 DOC、TN、TP、DTN、DTP、PN 和 PP 等营养盐浓度差异不显著, 营养盐通量主要受入湖水量的影响; 本次高频观测并没有观测到太湖流域平原河网区典型入湖河道强降雨期间营养盐负荷占比极高的现象.

(3) 太湖流域平原河网区面源通量监测中应加强对水文过程的监测; 在面源控制过程中应加强对流域、湖泊水量交换及滨湖区自然和人工湿地系统的水文过程的管理.

参考文献:

- [1] Qin B Q. Lake eutrophication: control countermeasures and recycling exploitation [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35** (11): 1569-1573.
- [2] Sekaluvu L, Zhang L F, Gitau M. Evaluation of constraints to water quality improvements in the Western Lake Erie Basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **205**: 85-98.
- [3] 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.
- [4] 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, Lu J, Zhu G W, *et al.* Occurrence characteristics of black patch events and their influencing factors in Lake Taihu during 2009 to 2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(5): 1196-1205.
- [5] Carpenter S R, Booth E G, Kucharik C J, *et al.* Extreme daily loads: role in annual phosphorus input to a north temperate lake [J]. *Aquatic Sciences*, 2015, **77**(1): 71-79.
- [6] Michalak A M, Anderson E J, Beletsky D, *et al.* Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(16): 6448-6452.
- [7] 林荷娟, 甘月云, 胡艳, 等. 2013 年第 23 号“菲特”台风期间太湖流域洪水运动分析 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(3): 548-552.
Lin H J, Gan Y Y, Hu Y, *et al.* Flood movement in Lake Taihu basin during typhoon Fitow influence period in 2013 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(3): 548-552.
- [8] 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.
- [9] Shi K, Zhang Y L, Zhou Y Q, *et al.* Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: responses to nutrient enrichment and meteorological factors [J]. *Scientific*

- Reports, 2017, **7**: 40326.
- [10] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: Implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss[J]. *Water Resources Research*, 2018, **54**(7): 4319-4331.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李治源, 吴玮, 黄天寅, 等. 苏州市古城区降雨径流中不同形态磷的动态污染特征及初期冲刷效应[J]. *水电能源科学*, 2017, **35**(3): 44-48.
Li Z Y, Wu W, Huang T Y, *et al.* Dynamic pollution characteristics and initial flush effect of phosphorus in rainfall-runoff of the ancient town of Suzhou [J]. *Water Resources and Power*, 2017, **35**(3): 44-48.
- [14] 马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析 (1998-2007 年) [J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 29-34.
Ma Q, Liu J J, Gao M Y. Amount of pollutants discharged into Lake Taihu from Jiangsu Province, 1998-2007 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(1): 29-34.
- [15] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009 年环太湖入出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.
- [16] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
Sun S C, Huang Y P. Lake Taihu [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李振伟, 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 279-295.
Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 279-295.
- [23] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(1): 117-124.
Xue L H, Yang L Z. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(1): 117-124.
- [24] 吴庆乐, 阮晓红, 吴朝明, 等. 太湖西部河湖氮污染物来源及转化途径分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3883-3889.
Wu Q L, Ruan X H, Wu C M, *et al.* Analyses of sources and transformation of nitrogen as a contaminant in the river and lake water in the western region of the Taihu Lake basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3883-3889.
- [25] 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.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)