

## 府河至白洋淀沿线水体氮磷时空变化及对极端降雨的响应规律\*

唐誉硕<sup>1,2,3</sup>, 王仕琴<sup>1\*\*</sup>, 吕嘉丽<sup>2,3</sup>, 古丛珂<sup>1</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 中国科学院农业水资源重点实验室, 河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050022

2. 中国科学院大学中丹学院, 北京 100190

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 白洋淀是华北地区最大的淡水湿地, 府河是白洋淀上游主要的入淀河流之一。近年来极端降雨的频率和强度增大, 府河水体氮、磷浓度及通量的时空变化规律复杂, 极大影响了白洋淀的水环境质量。本研究以府河至白洋淀水体为研究对象, 结合野外在线监测、野外采样、室内测定分析等方法, 研究极端降雨影响条件下府河至白洋淀沿线水体总氮(TN)、总磷(TP)浓度的年内时空变化特征, 并解析水体氮、磷浓度与负荷对极端降雨事件的响应规律。结果表明: TN浓度春冬高, 夏季低; TP浓度春冬低, 夏季高; 且从府河上游至下游 TN和TP浓度呈降低的趋势。2023年“7.29”极端降雨后至结冰期前, 水体TN浓度呈现升高-降低-再升高的变化趋势, TP浓度呈现升高-降低的变化趋势。农业面源污染的外源输入和底泥的内源释放均导致水体TN浓度升高, 稀释、反硝化和沉积作用导致极端降雨后TN降低, 而后期底泥内源释放和生物吸收利用减弱导致TN浓度持续升高; 极端降雨后面源污染物输入增加使TP浓度升高, 而磷向底泥的沉积和生物吸收利用导致TP浓度逐渐降低。极端降雨前沿线水体氮、磷负荷逐渐降低; 极端降雨后由于面源污染物的输入沿线氮、磷负荷显著升高, 升高10.5~47.4倍, 极端降雨期控制污染物入淀是保证白洋淀水质安全的必要条件。该研究可为变化环境下白洋淀及入淀河流的水环境管理提供科学依据。

**关键词:** 氮; 磷; 极端降雨; 时空动态; 白洋淀;

## The spatial and temporal variation characteristics of nitrogen and phosphorus in the water from Fu River to Lake Baiyangdian and their response to extreme rainfall\*

Tang Yushuo<sup>1,2,3</sup>, Wang Shiqin<sup>1\*\*</sup>, Lü Jiali<sup>2,3</sup>, Gu Congke<sup>1</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, P.R.China;

2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P.R.China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

**Abstract:** Lake Baiyangdian is the largest freshwater wetland in North China. Fu River is one of the main rivers that flow into Lake Baiyangdian. In recent years, increasing frequency and intensity of extreme rainfall events have introduced new challenges, driving complex spatiotemporal variations in nitrogen and phosphorus concentrations and fluxes. This study systematically investigated the Fu River-Lake Baiyangdian system through field monitoring,

\* 2024-10-15 收稿; 2024-12-12 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2021YFD1700500)、河北省创新能力提升计划项目(225A3902D)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn.

water sampling, laboratory measurements and statistical analysis to reveal the dynamics of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations and their response to extreme rainfall. Results revealed distinct seasonal trends: TN concentration was highest in spring and winter and lowest in summer, whereas the TP concentration peaked in summer and declined in spring and winter. Spatially, TN and TP concentrations decreased from upstream to downstream along the Fu River. After the "7.29" extreme rainfall event, TN concentration showed a complex increase-decrease-increase trajectory influenced by agricultural runoff, sedimentary nutrient release, and biogeochemical processes such as dilution and denitrification. TP concentration showed a simpler increase-decrease pattern driven by sediment resuspension and subsequent attenuation. Before the extreme rainfall event, nitrogen and phosphorus loads along the river gradually decreased. After the extreme rainfall event, nitrogen and phosphorus loads along the river significantly increased due to the input of non-point source pollutants. Nutrient loads surged significantly after the extreme rainfall event, increasing by factors of 10.5 to 47.4 due to the input of non-point source pollutants. These findings underscore the vulnerability of Lake Baiyangdian to extreme hydrological events and highlight the urgent need for targeted interventions to reduce pollutant loads during such events. This research provides critical insights into nutrient cycling dynamics under changing climatic and hydrological conditions, offering a scientific basis for sustainable water quality management in lake-watershed systems.

**Keywords:** Nitrogen; Phosphorus; Extreme rainfall; Temporal and spatial changes; Lake Baiyangdian

氮、磷营养盐是生物生长发育必须的营养物质，然而河湖系统过量氮、磷营养盐的输入，会造成水体富营养化，危害地表水水质安全<sup>[1]</sup>。在中国整体水环境中，50%的河湖富营养化问题是由氮、磷为主的面源污染源引起的，面源污染对氮、磷污染的贡献率分别高达81%和93%<sup>[2]</sup>。研究水体氮、磷浓度和通量变化规律及其主要影响因素对农业区河湖富营养化防控具有重要意义。

河流和湖泊的氮、磷营养盐的浓度和通量受到多种环境条件的影响<sup>[3]</sup>。研究表明，农业面源污染是降雨事件中导致氮、磷外源负荷增大的直接原因<sup>[4]</sup>，而水动力条件改变引起的底泥扰动，是造成富营养化河湖的底泥氮、磷内源释放的主要原因<sup>[5, 6]</sup>。近年来，随着全球气候变化，极端降水事件的频率和量级呈显著上升趋势<sup>[7]</sup>。极端降雨会导致地表径流量增加，改变河道的水动力条件，携带更多的氮、磷污染物进入水体改变河湖氮、磷循环，导致水体TN、TP和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度的升高<sup>[8, 9]</sup>。但也有研究表明，强降雨虽然造成水体氮、磷负荷急剧升高，同时因流量增加，水体稀释作用会降低水体氮、磷浓度<sup>[10]</sup>。此外，除了外源输入，极端降雨也会通过改变水体的理化性质如酸碱性（pH）、溶解氧（DO）和温度（T），影响底泥氮、磷的内源释放。如Lu等<sup>[6]</sup>研究表明极端降雨会改变水体的理化性质和微生物群落，水体和底泥的硝化-反硝化作用增强，促进氮素消耗从而降低水体的TN浓度；由于极端降雨增加水体对底泥的扰动，通过内源释放增加促进了水体TP浓度升高<sup>[10, 11]</sup>。可见，极端降雨对水体氮磷变化的影响受限于特定区域的环境条件，而过去大多数研究关于环境条件变化对氮磷变化的短期影响，较难全面理解水体氮磷对极端降雨的响应规律。

白洋淀地处雄安新区核心位置，是华北平原最大的浅水型湖泊湿地<sup>[12]</sup>。府河是白洋淀上游常年有水且流量较大的河流之一，具有近50年的纳污历史，府河水中携带的氮磷营养盐严重影响白洋淀淀区的水质<sup>[5]</sup>，制约了雄安新区生态宜居城市的建设。府河上游流经农业种植区，受面源氮、磷污染物输入的影响严重。研究表明，TN和TP是白洋淀及府河的主要面源污染物<sup>[13, 14]</sup>。2023年7月29日至8月1日府河-白洋淀出现极端强降雨（“7.29”极端降水），最大日降雨量270 mm，4日累计降雨量达423.2 mm。极端降雨后府河的流量、流速等水动力条件发生了极大的改变，加剧了河道及淀区水质恶化。以往研究为白洋淀污染负荷和富营养化治理提供了重要支撑，但研究多集中在白洋淀淀区<sup>[6, 11-14]</sup>，而对入淀河流的氮、磷时空变化规律的研究较少。此外，在气候变化如极端降水频率增加的背景下，历史纳污河流水体氮、磷浓度对极端降水的响应规律及其对白洋淀水环境质量的影响更加复杂。

因此,本研究以白洋淀主要污染输入河流——府河为研究对象,基于野外定位观测和采样分析,结合水化学和数理统计方法,解析府河至白洋淀沿线水体的氮、磷浓度时空变化特征并定量估算入淀氮、磷通量,揭示水体氮、磷浓度对极端降雨的响应规律,为府河水质修复和白洋淀水环境保护提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选择河北省保定市以东府河至白洋淀入淀口沿线水体为主要研究对象(115°34'~116°00'E, 38°49'~38°55'N),东西长约 47.1 km(图 1),大部分位于雄安新区境内。府河是白洋淀上游主要污染入淀河流之一,其上游位于保定市,下游位于雄安新区境内,主要承接保定市污水处理厂尾水,并接纳沿线村庄生活污水<sup>[21, 26]</sup>。研究区属温带大陆性季风气候,年平均降水量和蒸发量分别为 917.41 mm 和 1369 mm<sup>[16, 17]</sup>,年内和年际降雨分布不均,70%~80%的降水集中在 6~9 月<sup>[28]</sup>。2023 年为典型极端降雨年,“7.29”极端降水后府河水位上涨约 1.9 米,白洋淀水位上涨 0.5~1 米,本次极端强降水有累计雨量大、覆盖范围广、持续时间长,极端性突出的特点<sup>[18]</sup>。受气候和人类活动等影响,自 20 世纪 80 年代以来白洋淀出现多次干淀。为维持白洋淀生态系统的平衡,多次从上游的安格庄水库、王快水库、西大洋水库、岳城水库以及黄河通过不同的路线向白洋淀调水<sup>[19]</sup>,2023 年 3 月-6 月、10 月-12 月通过府河对白洋淀进行生态补水。

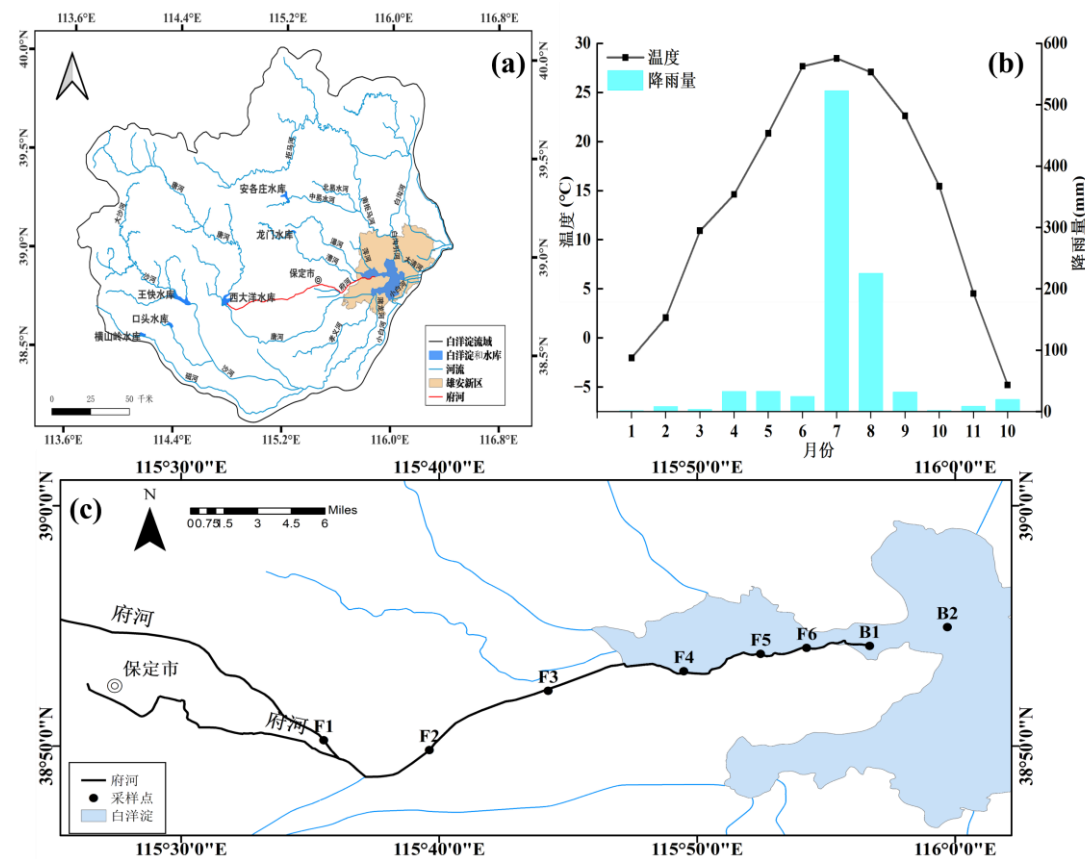


图 1 (a) 白洋淀流域水系图, (b) 2023 年研究区温度与降雨量统计图, (c) 研究区采样点位置图

Fig.1 (a) Watershed of Baiyangdian Basin, (b) Temperature and rainfall of the study area in 2023, (c) Sampling points location in the study area

### 1.2 样品采集与数据来源

选择河北省保定市东段至白洋淀淀区府河沿线布设 8 个采样断面, 采样点位置分布如图 1 所示。采样点 F1~F6 位于府河河道, B1 位于府河入淀口, B2 位于白洋淀淀区(以下简称“府河河道”、“入淀口”和“淀区”)。为研究极端降水对河流入淀过程中氮、磷动态的影响, 分别在极端降雨前(2023 年 6 月 13 日~14 日)和极端降雨后(8 月 12 日~13 日)对府河至白洋淀沿线 8 个采样点采集一次地表水样品, 每个采

样点用采水器取 100 mL 水样两瓶，水样滴加 2~3 滴 1 mol/L 的稀硫酸后立即放于 4℃ 冰箱保存，用于分析总氮（TN）、硝态氮（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N）、亚硝态氮（NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N）、铵态氮（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N）、总磷（TP）和可溶性磷酸盐（DIP）的浓度；采样同时用多普勒剖面流速仪（River Surveyor-S5/M9, YSI Corporation, OSU, 美国）测定河流的流速和断面流量，并利用便携式水质仪（HORIBAR Scientific, 日本）现场测定 T、pH、DO、电导率（EC）、氧化还原电位（ORP）、盐度（PPT）等水体理化指标。

为进一步揭示河流入淀过程中氮、磷及其环境因子全年时空变化规律及其主要影响因素，选择 F3（代表府河河道）、B1（代表入淀口）和 B2（代表淀区）布设水质在线监测仪（AMT-YB101），每 4 小时监测一次，自动监测水体 TN、TP 浓度和 T、pH、DO、EC、ORP 环境指标，监测时段为 2023 年 3 月 17 日-2023 年 11 月 28 日。

### 1.3 样品测定与数据分析

水体 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DIP、TP 浓度利用全自动间断化学分析仪（Smartchem 200）测定，每 10 个样品进行一次重复标定以保证结果的准确性。将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤，直接测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 DIP 的浓度；调 pH、碱性过硫酸钾消解后上机测定 TN 浓度；过硫酸钾消解后上机测定 TP 浓度。

水体氮、磷日负荷采用降雨前后实地采样测量的断面流量和该点位水体氮、磷浓度的乘积估算<sup>[20]</sup>，计算公式如下：

$$Loads=Q \cdot C \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

式中：Loads 为污染负荷(kg/d)；Q 为河流断面流量(m<sup>3</sup>/s)；C 为污染物浓度（mg/L）。

综合衰减系数的计算参考《全国水环境容量核定技术指南》和《河北省地表水水环境容量核定技术报告》，考虑府河的水文特征，采用经验公式<sup>[21]</sup>计算河流氮、磷污染物的综合衰减系数，计算公式如下：

$$k = 86.4 \frac{u}{X} \ln \frac{C_u}{C_d} \quad (2)$$

式中：k 为衰减系数（d<sup>-1</sup>）；u 为河段平均流速（m/s）；X 为上下断面的间距（km）；C<sub>u</sub>、C<sub>d</sub> 为上下断面的污染物浓度（mg/L）。选择 F2 作为上断面，B1 作为下断面，上下断面间的距离为 28.86 km。

利用 IBM SPSS Statistics 16.0 和 Origin 2023 完成数据的 Spearman 相关性分析和数值计算，利用 Origin 2023 完成表绘制并利用 QGIS Desktop 2.2.3 绘制研究区概况图。TN、TP 浓度变化按自动监测数据的日均值绘制散点图。

## 2. 结果

### 2.1 府河入淀过程中水体理化参数时空变化特征

图 2 为 2023 年 3 月至 11 月府河河道 F3、入淀口 B1 和淀区 B2 水体理化参数月统计值变化图，受生态补水、降水等因素影响，各监测点季节性波动较大（图 2）。F3、B1 和 B2 的 EC 变化范围分别为 192.8~2106.4 μs/cm、288.4~1296.9 μs/cm 和 412.5~1077.9 μs/cm，其中 3-6 月受补水影响水体 EC 较为稳定。补水初期府河水质最差、EC 最大，而 4-6 月水体 EC 大小顺序为：入淀口>河道>淀区；7 月受降水影响 EC 下降，特别是“7.29”极端降水后各点 EC 下降到最低；9 月至 11 月 EC 持续上升，除 11 月外，3 个点的 EC 大小顺序为：河道>淀区>入淀口。F3、B1 和 B2 的 DO 变化范围分别为 0.05~13.21 mg/L、0.01~14.44 mg/L 和 0~10.65 mg/L，入淀口 DO 变化范围最大；3 月至 8 月各点 DO 逐渐降低，极端降雨后各点均降到最低值，水体偏还原环境，8-11 月持续上升；与 EC 变化相似，3-6 月水体 DO 大小顺序为：入淀口>河道>淀区，9 月至 11 月 DO 大小顺序为：河道>淀区>入淀口。F3、B1 和 B2 的 pH 变化范围分别为：7.10~8.52、6.79~8.87 和 7.05~8.61，与 DO 变化相似，3-8 月水体 pH 有降低趋势，“7.29”极端降水后下降到最低值，9-11 月逐渐上升。水体 T 随着年内气温变化呈现季节性变化。由此可见，“7.29”极端降水前后总体水质和主要环境因子均发生了很大变化，且入淀口的变化最大，从极端降水前的偏氧化环境转变为偏还原环境。

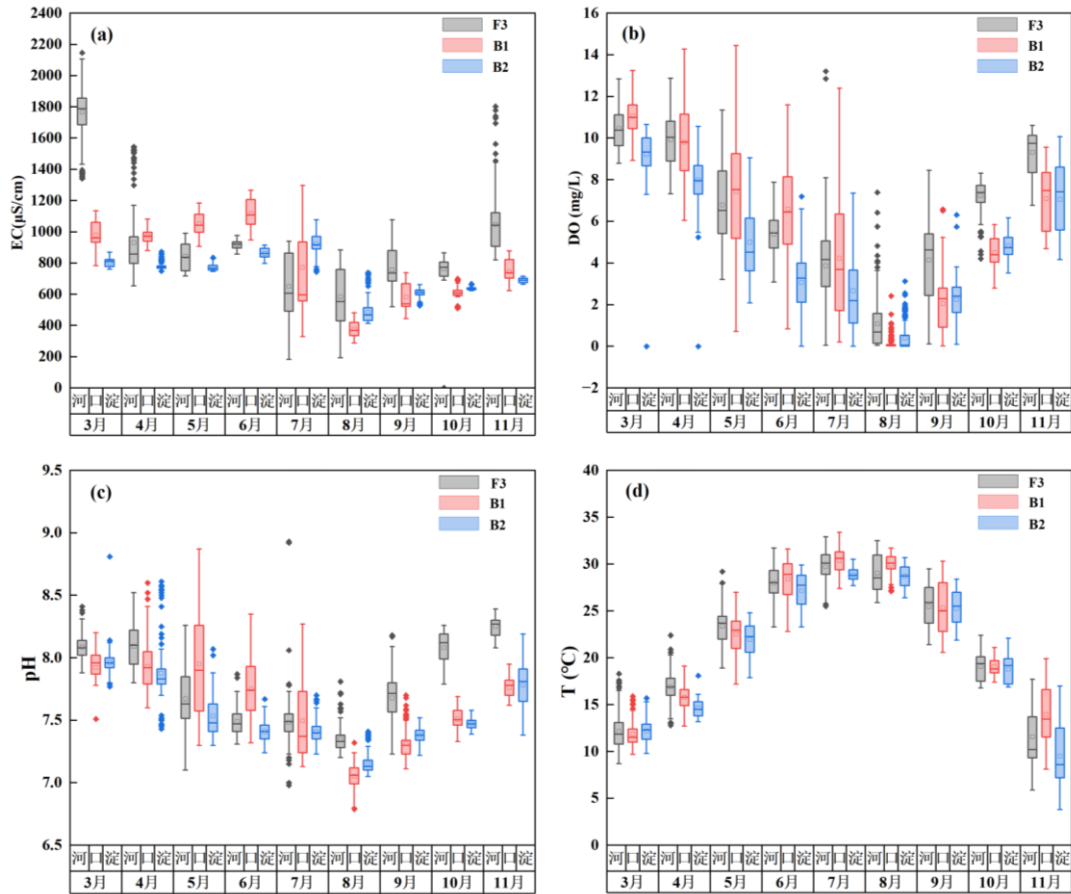


图2 府河-入淀口-淀区水体理化参数

Fig. 2 Water environment indicators of the Fu River, estuary and Lake Baiyangdian

## 2.2 府河入淀过程中水体 TN、TP 浓度时空变化特征

图3是2023年3月至11月府河F3、入淀口B1和淀区B2各监测点水体氮、磷浓度统计值变化图。由图可见，总体上3个点TN浓度大小顺序为：F3>B1>B2。3月至7月初，TN浓度主要受降水影响呈波动式下降的趋势，其中F3点波动的幅度最大（0.62~5.82 mg/L），入淀口次之（0.72~3.04 mg/L），淀区B2变化范围最小（0.52~1.60 mg/L），雨季初期TN的波动峰值最大。“7.29”极端降水后F3和B1点TN浓度快速上升到最大峰值后降低，但其峰值低于雨季初期波动峰值，这可能与雨季降水量增加驱动农业面源污染物的输入有关<sup>[10]</sup>，同时受到降水的稀释作用浓度峰值降至低点。3个监测点TN浓度分别在极端降水结束后第14 d、32 d和32 d再次出现持续升高的趋势，其中府河上升幅度最大至8.39 mg/L，入淀口上升幅度次之（最大升至5.16 mg/L）。这一方面与极端降水后上游污染物持续输入有关系，另一方面可能与流量剧增水体底泥扰动引起的内源释放有关系<sup>[6]</sup>。其中，白洋淀TN浓度升高滞后时间大于府河，这可能与淀区还原条件下对氮磷消纳作用有关，也受到芦苇等水生植物对污染物的净化作用影响<sup>[22]</sup>。

TP浓度在年内的季节性变化显著但是其变化趋势与TN相反，呈现夏秋高、冬春低的特点，3个点TP浓度大小顺序为：F3>B1>B2。雨季前3-6月较为稳定，期间降水造成各观测点浓度小幅增加；6~9月F3、B1和B2各点的TP浓度波动幅度较大，变化范围分别为0.04~0.45 mg/L、0.03~0.28 mg/L和0.01~0.10 mg/L。府河水体TP浓度在降水的第2 d迅速上升到峰值，之后降低，而入淀口和淀区TP浓度变化则具有一定滞后性，B2在第5 d达到峰值，B3则在极端降水后第3 d才呈现上升趋势，到第8 d达到峰值。F3的TP浓度最大值出现在极端降雨前（7月16日），B1和B2点最大值在点出现在“7.29”极端降水后，分别达到0.28 mg/L和0.1 mg/L。

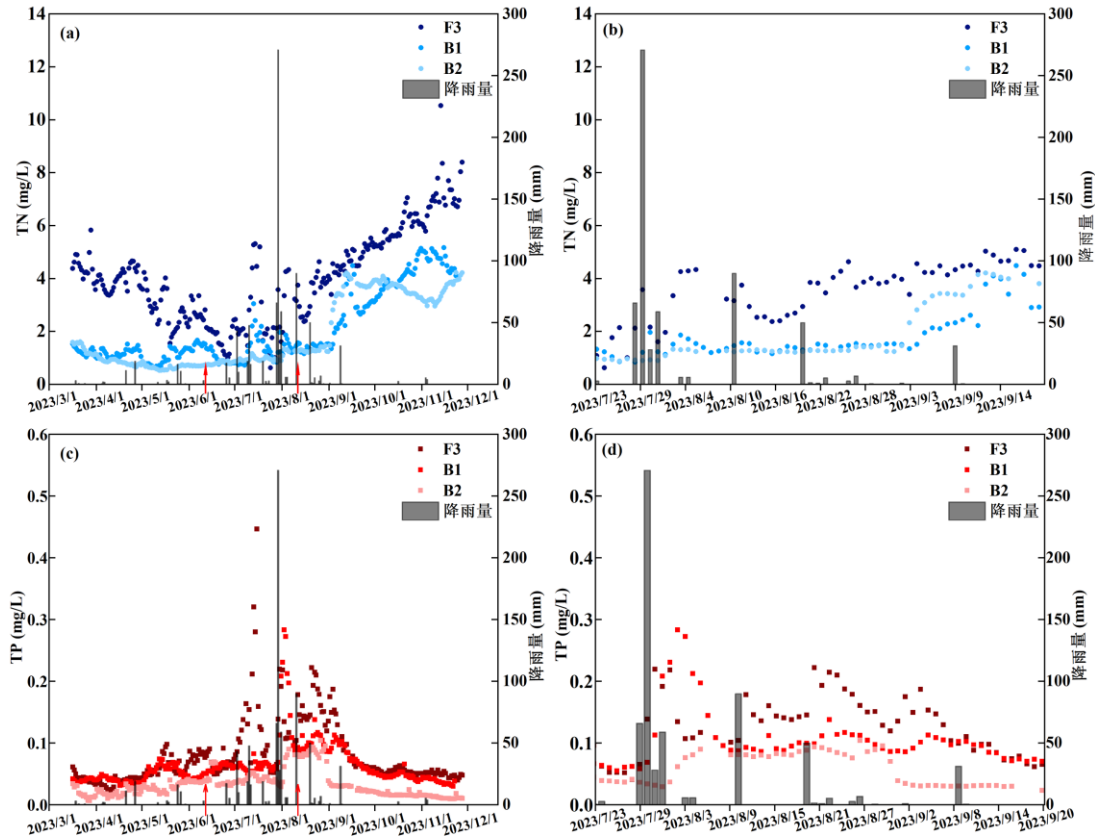


图 3 府河-入淀口-淀区水体氮、磷浓度变化，a) 全年 TN 变化，b) 极端降雨期 TN 变化，c) 全年 TP 变化，d) 极端降雨期 TP 变化（红色箭头为采样时间）

Fig. 3 Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in the Fu River, estuary and Lake Baiyangdian, a) annual changes of TN, b) TN after extreme rainfall, c) annual changes of TP, d) TP after extreme rainfall, (The red arrows indicate the field sampling dates.)

### 2.3 极端降雨前后府河-白洋淀沿线不同形态氮、磷浓度的变化特征

极端降雨前后府河至白洋淀沿线水体  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP 及 DIP 浓度变化如图 4 所示。极端降雨前流量相对较为稳定，变化范围为  $2.4\sim 3.5\text{ m}^3/\text{s}$ （平均值为  $2.8\text{ m}^3/\text{s}$ ）。TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 沿程具有下降的趋势，而  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 府河沿线较为稳定（变化范围分别为  $0.039\sim 0.048\text{ mg/L}$  和  $0.13\sim 0.16\text{ mg/L}$ ），进入白洋淀浓度上升显著，说明白洋淀反硝化和硝化作用加强；TP 和 DIP 沿程相对较为稳定，呈降低趋势（变化范围分别为  $0.038\sim 0.095\text{ mg/L}$  和  $0.012\sim 0.051\text{ mg/L}$ ）。极端降雨后府河沿程断面流量逐渐增加，变化范围为  $2.5\sim 66.9\text{ m}^3/\text{s}$ （平均值为  $19.6\text{ m}^3/\text{s}$ ），TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 沿程呈降低趋势且降低幅度大于极端降雨前，而  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度均升高，且在白洋淀各离子浓度上升或下降幅度增加，说明水体的硝化-反硝化加剧。水体  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度升高 5.7 倍，这可能与流量增大导致底泥中  $\text{NH}_4^+$ -N 的大量释放有关<sup>[6]</sup>。极端降雨前 TP 和 DIP 沿程具有缓慢降低的趋势，而极端降雨后二者浓度均大于雨前，DIP 浓度升高 3.6 倍，且 DIP 在 TP 中占比升高，其主要的可能原因是农业面源污染输入和底泥内源释放增加<sup>[23]</sup>。从沿程变化来看，F1 到 F3 点 TP 和 DIP 上升、F3 至 B2 下降，说明磷主要受到沿线面源污染物输入影响，在府河下游至入淀后可能存在河道吸附沉降作用影响。

### 2.4 极端降雨前后府河-白洋淀沿线水体氮磷负荷与衰减系数变化

极端降雨前后河流氮、磷的综合衰减系数如表 1 所示。极端降雨后 TN 的综合衰减系数升高 1.8 倍，TP 的综合衰减系数升高 4.0 倍。虽然极端降雨后面源污染物的输入增多，但汛期河道污染物净化能力强，污染物的衰减系数升高，TN、TP 的衰减加快。这与李先锋<sup>[24]</sup>等人的研究结果一致。

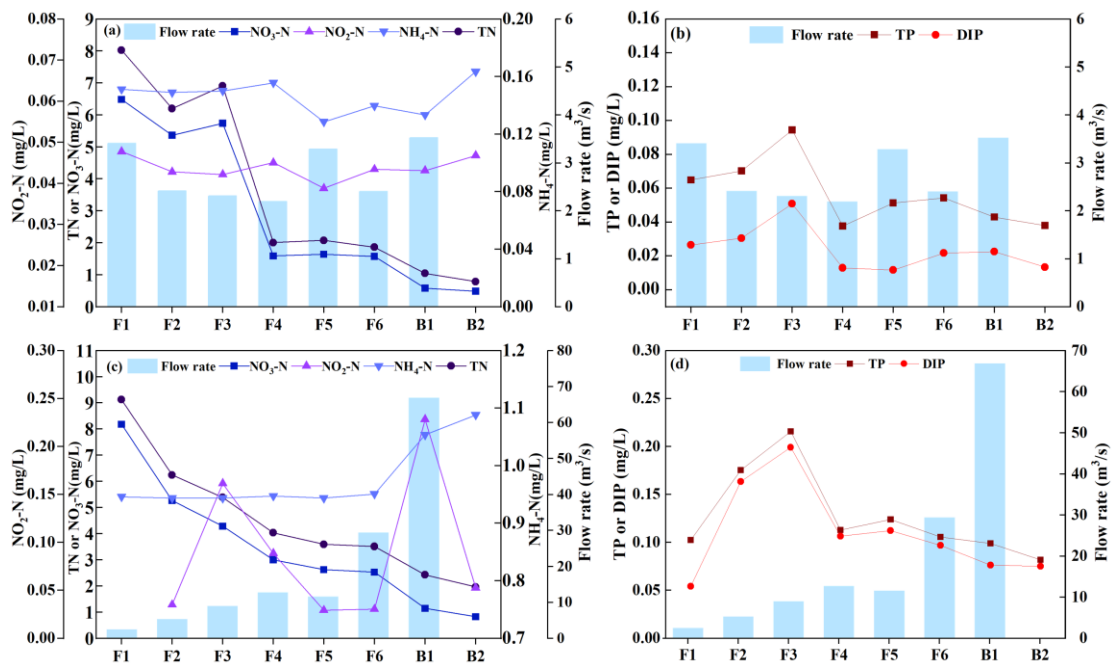


图 4 极端降雨前氮(a)、磷(b)和极端降雨后氮(c)、磷(d)浓度及流量变化

Fig. 4 Changes in flow volume, nitrogen (a), phosphorus (b) concentrations before extreme rainfall and nitrogen (c), phosphorus (d) concentrations after extreme rainfall

表 1 极端降雨前后府河氮、磷的综合衰减系数

Table 1 Comprehensive fall coefficient of nitrogen and phosphorus in Fu River before and after extreme rainfall

| 衰减系数 ( $d^{-1}$ ) | 极端降雨前 (6 月 13-14 日) | 极端降雨后 (8 月 12-13 日) |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| TN                | 0.49                | 0.90                |
| TP                | 0.14                | 0.54                |

水体氮、磷负荷与水量具有高度关联性<sup>[10]</sup>。极端降雨后氮、磷污染物的衰减加快，但由于农业面源污染物的输入，水体氮、磷在淀负荷显著升高。 $NO_3^-$ -N 是水体氮素的主要形态，水体 TN 负荷中  $NO_3^-$ -N 负荷占比最高，硝化作用对氮素转化起到主要作用；极端降雨后水体 TN 负荷显著升高，由 317~2366 kg/d (平均值为 959 kg/d) 升高至 1952~14022 kg/d (平均值为 5713 kg/d)，均值升高 10.5 倍。水体  $NH_4^+$ -N 负荷由 29~45 kg/d (平均值为 35 kg/d) 升高至 202~6090 kg/d (平均值为 1695 kg/d)，均值升高 47.4 倍 (图 5)。水体 TP 负荷由 7~19 kg/d (平均值为 14 kg/d) 升高至 22~571 kg/d (平均值为 194 kg/d)，均值升高 12.9 倍。总体上，极端降雨前从府河到白洋淀沿程氮磷负荷具有降低趋势，说明沿程衰减作用。而极端降雨后沿程氮磷负荷具有增加趋势，说明虽然衰减系数增大，但是受到污染物输入总量增加影响，负荷持续增加。

### 3 讨论

#### 3.1 水体理化参数对氮、磷浓度时空变化的影响

水体理化参数和氮磷浓度相关性分析表明，影响水体氮浓度的主要环境因子为 T、DO 和流量 (图 6)。TN 与  $NO_3^-$ -N 呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，水体 TN 的主要形态为  $NO_3^-$ -N。由于夏季水体温度升高，微生物活性增强<sup>[6]</sup>，消耗大量氧气，且氧气在水体的溶解度减小，造成水体 DO 浓度下降。厌氧环境为反硝化脱氮创造了条件，TN 因反硝化作用的消耗而浓度降低，因此 DO 浓度与 TN 浓度呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。流量与 EC、TDS、PPT 呈显著负相关 ( $P<0.05$ )，这是由于水量增大对污染物和离子起到了稀释的作用。流量与  $NO_2^-$ -N 浓度呈显著正相关、与 DO 呈负相关 ( $P<0.05$ )，这是由于夏季径流量增大会带入更多的污

染物，加速 DO 的消耗，使水体呈还原环境，促进反硝化作用的进行和  $\text{NO}_2^-$ -N 的生成，从而造成水体  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度升高<sup>[25]</sup>。 $\text{NH}_4^+$ -N 与流量呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，底泥是  $\text{NH}_4^+$ -N 的“源”，流量增大会促进底泥  $\text{NH}_4^+$ -N 向水体释放<sup>[6]</sup>。TN 浓度均呈现冬春季明显高于夏秋两季的特征，主要原因如下：一方面，春冬季的生态补水工程会增大底泥的内源释放量<sup>[6]</sup>，加之春耕时化肥的使用<sup>[31]</sup>，会引起大量含氮物质进入河道，使水体氮素浓度升高；夏季高温和低 DO 会促进反硝化作用，加快水体氮素衰减，同时，夏秋季节降雨量增加会在一定程度上稀释水体营养盐浓度，因此冬春季水体氮素浓度明显高于夏秋季节。

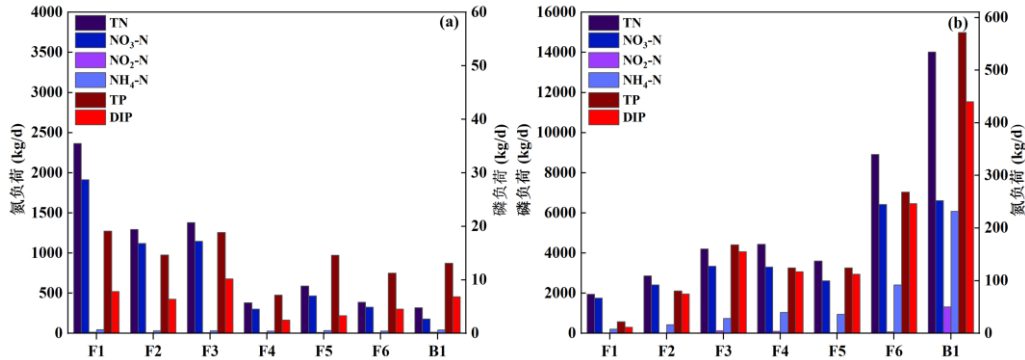


图 5 极端降雨前(a)和极端降雨后(b)各断面氮、磷负荷

Fig. 5 Nitrogen and phosphorus loads before (a) and after (b) extreme rainfall

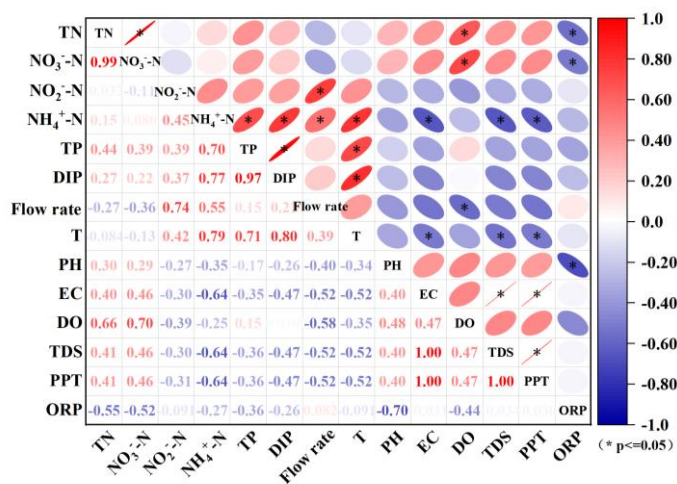


图 6 不同形态氮、磷浓度与水体理化指标的相关性

Fig. 6 Correlation analysis between nitrogen and phosphorus concentrations and water environmental indicators

影响水体磷浓度的主要环境因子为温度  $T$  (图 6)。此外，流量和水体氧化还原条件也会影响 TP 浓度<sup>[11]</sup>。TP 和 DIP 呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，DIP 是水体 TP 的主要存在形态。TP 浓度与水体  $T$  变化呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。夏季水体温度高，降雨集中，地表径流携带的农业面源污染物是水体 TP 的重要来源之一；温度是影响 TP 内源释放的主要因素，温度升高，微生物活性增强，底泥中物理、化学和生物反应速率加快，促进底泥磷的内源释放<sup>[26]</sup>，增大水体 TP 浓度。春季、冬季水体温度低，降雨量少，内源释放和外源输入的磷较少，因此水体 TP 浓度也较低。流量的增大加大了底泥的扰动，也促进底泥磷向上覆水的释放<sup>[11]</sup>。水体 DO 影响 ORP 的变化，水体 DO 夏秋低、春冬高 (图 2)，沉积物中的无机磷在环境厌氧条件下更易释放<sup>[11]</sup>，因此夏季 DIP 内源释放量大；春、冬季 DO 较高，抑制磷的内源释放，沉积物的内源释放减

少。平原区河湖水体 TP 以溶解性为主，底泥 TP 呈现夏季显著降低的变化特征<sup>[19]</sup>。夏秋季降雨量大，地表径流带入大量的磷，同时由于水体 T 的升高和 ORP 的降低，使内源 DIP 释放增多，共同增加水体 TP 浓度；而春冬季由于磷的沉积和吸附作用，内源释放的磷减少，因此水体浓度呈现夏秋季节高于春冬两季的特征。

### 3.2 水体氮、磷浓度及负荷对极端降雨的响应规律

时间上，TN 和 TP 浓度在极端降雨后的变化规律不同。TN 浓度对极端降雨的响应表现为先升高后降低再持续升高的变化特征（图 3）。极端降雨主要通过地表径流冲刷作用、稀释作用、促进反硝化脱氮作用、对水体和底泥的扰动作用及沉积作用影响水体 TN 浓度，不同时期氮浓度变化的主导作用不同。极端降雨后，地表径流会携带大量含  $\text{NO}_3^-$ -N 的农业面源污染物及有机污染物进入水体<sup>[27]</sup>，促进水体的硝化作用，导致水体  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TN 浓度升高；底泥是  $\text{NH}_4^+$ -N 的“源”，极端降雨后流量增大会加大对底泥的扰动，促进底泥氮的释放<sup>[6]</sup>，因此，农业面源输入和底泥内源释放增加是导致极端降雨后水体 TN 浓度急剧升高的重要原因，这与 Liu 等人的研究结果一致<sup>[27]</sup>。极端降雨后水体 TN 浓度达峰值后出现降低趋势，主要原因可能是极端降雨后水体 DO 浓度较低，有利于反硝化作用的进行，促进水体 TN 衰减，导致 TN 浓度降低和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度升高；此外，富氮河流的水体  $\text{NO}_3^-$ -N 在流量增大时更易于向底泥沉积<sup>[6]</sup>，因此极端降雨后， $\text{NO}_3^-$ -N 沉积量增多，且沉积到底泥的  $\text{NO}_3^-$ -N 增加也会促进反硝化脱氮作用降低水体的 TN 浓度<sup>[28]</sup>；此外，流量急剧增加稀释作用也是造成氮浓度降低的原因之一。秋冬季温度降低，水体 DO 浓度升高，不利于反硝化脱氮作用和生物吸收转化，导致 TN 的衰减速率降低，水体 TN 的消耗减少<sup>[29]</sup>；水动力条件改变和底泥氮沉积量升高，促进底泥中的氮向水体释放<sup>[6]</sup>，使水体 TN 浓度持续升高，因此 TN 浓度峰值存在时间滞后性。TP 浓度对极端降雨的响应表现为先升高后降低，并最终降低回初始水平的变化特征。极端降雨后 TP 浓度升高的主要原因是面源污染物的输入和底泥的内源释放量增加，沉积作用是极端降雨后 TP 浓度降低的主导作用。降雨后水体 pH 和 DO 显著降低，流量升高，缺氧、水力扰动均促进底泥 DIP 的释放<sup>[30]</sup>，促进内源释放增大水体 TP 浓度。随着秋冬季节水体 DO 浓度的增大和 pH 的升高，加速水体中的磷向底泥沉降并抑制磷的内源释放<sup>[11]</sup>，水体 TP 浓度逐渐降低。

空间上，F3、B1、B2 的 TN、TP 浓度变化对降雨的时空响应不同。极端降雨前，仅 F3 氮磷浓度对雨季初期降雨有响应，B1 和 B2 的浓度变化较小。这是由于雨季初期正值玉米种植期<sup>[31]</sup>，雨季初期降雨对农田地表的冲刷会将土壤表层大量氮、磷带入府河，导致府河水体氮、磷浓度迅速升高。由于沉积作用，水体氮、磷会快速沉积到底泥中；夏季水体温度高，污染物衰减较快，同时由于白洋淀湿地的净化作用，B1 的响应较小，B2 基本无响应。由于雨季对地表的不断冲刷，极端降雨期土壤中的养分较雨季初期显著减少，且极端降雨表现出一定的稀释效应<sup>[10]</sup>，因此极端降雨后 TN、TP 的浓度峰值低于雨季初期。极端降雨后，F3、B1 和 B2 氮磷浓度对极端降雨均有不同程度响应，最大氮、磷污染物浓度呈现  $F3 > B1 > B2$  的变化趋势。极端降雨后 TN 浓度峰值的出现的滞后时间主要与底泥的内源释放和水体的氮素的衰减速率有关，TP 浓度峰值的出现时间与极端降雨后流域污染物的持续输入和湿地净化有关。极端降雨后水体 TN 浓度的稀释和沉积作用显著，但极端降雨期氮通量较大，尤其是府河下游及入淀口污染物通量较大（图 5）。沉积到底泥中的氮在水动力条件和水体理化环境的改变时会再释放进入水体<sup>[6]</sup>，且秋冬季节氮素的衰减速率降低<sup>[28,29]</sup>，造成水体 TN 浓度持续升高。TP 浓度在极端降雨后府河由于农业面源污染物的输入而立即显著升高至最大值，白洋淀则出现滞后响应。秋冬季水体 TP 浓度逐渐降低，这是由于磷在 T 高、流量大、pH 低时易于从底泥释放<sup>[11]</sup>，秋冬季节水体 T 降低、pH 升高，不利于沉积磷的释放。

## 4 结论

府河和淀区水体氮、磷浓度时空差异显著，氮、磷浓度和通量影响不同时期的水环境质量。解析氮、磷浓度的变化规律及对极端降雨的响应规律，对变化环境下的水质修复和污染防控具有重要意义。本文通过对水体氮、磷浓度变化规律的研究，取得的主要结论包括：

- 1) 府河至白洋淀水体氮、磷时空变异显著。时间上，TN 浓度夏季低，春冬高；TP 浓度夏季高，春

冬低。空间上,从府河至白洋淀水体氮、磷浓度逐渐降低,极端降雨对府河氮、磷浓度的影响程度最大,入淀口次之,淀区影响最小。

2) 水体 TN 浓度对极端降雨存在滞后响应,具体表现为升高-降低-再升高的变化特征,响应的滞后时间:河道<入淀口<淀区。面源污染物输入及底泥内源释放量增加导致 TN 浓度升高,稀释作用、水体反硝化脱氮作用及沉积作用导致浓度降低,浓度再升高的原因是氮素衰减速率降低和底泥的内源释放。

3) 水体 TP 浓度对极端降雨的响应为升高-降低,并最终降低回初始水平。面源污染污染物的输入和底泥的内源释放增加导致 TP 浓度升高;沉积和吸附作用导致水体 TP 浓度降低。

4) 极端降雨后由于地表径流的汇入,河流沿线流量逐渐增大,氮磷负荷量增大。

未来极端降雨频率的增加,地表径流带入府河的面源污染物增多,入淀的氮、磷负荷增大,加重底泥氮、磷蓄积,对白洋淀水环境安全有长远影响。因此,控制氮、磷入淀负荷和及时清淤是保证白洋淀水环境安全的重要条件。

## 5 参考文献

- [1] Qin BQ, Gao G, Zhu GW *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chin Sci Bull*, 2013, 58(10): 855-64, DOI: 10.1007/s11434-012-5560-x. [秦伯强, 高光, 朱广伟等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, 58(10): 855-64.]
- [2] Zhang SH, Hou XN, Wu CS *et al.* Impacts of climate and planting structure changes on watershed runoff and nitrogen and phosphorus loss. *Science of The Total Environment*, 2020, 706. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134489.
- [3] Ding N, Tao FL, Chen Y. Effects of climate change, crop planting structure, and agricultural management on runoff, sediment, nitrogen and phosphorus losses in the Hai-River Basin since the 1980s. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 359. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132066
- [4] 王亚博. 降雨影响岩口水库上游河流水质的关键过程解析及污染物溯源研究[学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [5] Wu Z, Wu SF, Liu Y *et al.* Key processes and mechanisms of nitrogen and phosphorus cycling in lake. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(01): 218-28, DOI: 10.13209/j.0479-8023.2017.143. [吴桢, 吴思枫, 刘永等. 湖泊氮磷循环的关键过程与定量识别方法. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(01): 218-28.]
- [6] Lu JL, Wang SQ, Liu BB *et al.* Slight flow volume rises increase nitrogen loading to nitrogen-rich river, while dramatic flow volume rises promote nitrogen consumption. *Science of The Total Environment*, 2022, 844: 157013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022. 157013.
- [7] Papalexioiu, SM, Alberto M. Global and Regional Increase of Precipitation Extremes Under Global Warming. *Water Resources Research*, 2019, 55(6): 4901-14. DOI: 10.1029/2018WR024067
- [8] E. de Eyto, E. Jennings, E. Ryder *et al.* Response of a humic lake ecosystem to an extreme precipitation event: physical, chemical, and biological implications. *Inland Waters*, 2016, 6(4): 483-98. DOI: 10.5268/IW-6.4.875.
- [9] Lu H, Yang LY, Yang MY *et al.* Influence of rainfall in upper reaches of the Taihu basin on inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake. *Water Resources Protection*. DOI: 10.3880 /j.issn.10046933. 2022.03.024. [陆昊, 杨柳燕, 杨明月等. 太湖流域上游降水量对入湖总氮和总磷的影响. 水资源保护, 2022, 38(04):174-181.]
- [10] Che R, Lin S, Fan ZY *et al.* Effects of c Extreme rainfall on water quality of the Dongjiang river basin. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4440-9, DOI: 10.13227/j. hjkx.201902042. [车蕊, 林澍, 范中亚等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析. 环境科学, 2019, 40(10): 4440-9.]
- [11] Li WY, Wang SQ, Gu CK *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of phosphorus forms in water-sediment from Fu River to Baiyangdian Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(08): 179-88, DOI:

- 10.13671/j.hjkxxb.2023.0115. [李维燕, 王仕琴, 古丛珂等. 府河至白洋淀沿线水体-沉积物中磷形态的分布特征及其影响因素. 环境科学学报, 2023, 43(08): 179-88.]
- [12] Zhu YY, Jin X, Tang WZ *et al.* Comprehensive analysis of nitrogen distributions and ammonia nitrogen release fluxes in the sediments of Baiyangdian Lake, China. *Journal of Environmental Science*, 2019, 76: 319-28. DOI: 10.1016/j.jes.2018.05.024.
- [13] Du YH, Liu C, Chen KN *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian. *Journal of Lake Science*, 2018, 30(06): 1537-51, DOI: 10.18307/2018.0606. [杜奕衡, 刘成, 陈开宁等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷. 湖泊科学, 2018, 30(06): 1537-51.]
- [14] Han Q, Tong RZ, Sun WC *et al.* Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in North China over the last decade. *Science of The Total Environment*, 2020, 701. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134929.
- [15] Wang HJ, Liu XC, Wang YL *et al.* Spatial and temporal dynamics of microbial community composition and factors influencing the surface water and sediments of urban rivers. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 124(02): 187-97. DOI: 10.1016/j.jes.2021.10.016.
- [16] Liu CL, Xie GD, Huang HQ. Shrinking and drying up of Baiyangdian Lake wetland: A natural or human cause? *Chinese Geographical Science*, 2006, (04): 314-9. DOI: 10.1007/s11769-006-0314-9.
- [17] Wang SQ, Tang CY, Song XF *et al.* The impacts of a linear wastewater reservoir on groundwater recharge and geochemical evolution in a semi-arid area of the Lake Baiyangdian watershed, North China Plain. *Science of The Total Environment*, 2014, 482: 325-35. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.130.
- [18] Zhang JT, He LY, Li JB *et al.* Preliminary study on the characteristics and causes of the “23.7” extreme rainstorm in Hebe. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2023, 46(06): 884-903, DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230905001.[张江涛, 何丽华, 李江波等. 河北“23.7”极端暴雨过程特征及成因初探. 大气科学学报, 2023, 46(06): 884-903.]
- [19] Zhang GN, Cao XZ, Mao TJ. Ecological Benefit Assessment of Water Supplement to Baiyangdian Wetland. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(05): 605-11, DOI: 1673-4831(2013)05-0605-07. [张赶年, 曹学章, 毛陶金. 白洋淀湿地补水的生态效益评估. 生态与农村环境学报, 2013, 29(05): 605-11.]
- [20] Yang S, Luo LC, Zhai HT *et al.* Analysis on inputs of nitrogen and phosphorous from the main inflow rivers of Dashahe Reservoir. *Ecological Science*, 2013, 32(02): 158-64, DOI: 1008-8873(2013)02-158-07. [杨尚, 罗淑葱, 翟海涛等. 大沙河水库主要入库河流氮磷营养输入分析. 生态科学, 2013, 32(02): 158-64.]
- [21] 李磊. 基于 MIKE 11 水动力水质模型的滹沱河石家庄段水环境容量分析[学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- [22] Zhang ZW, Chen SB, Wang JX *et al.* Community structure of phytoplankton in summer of the Fuhe River, Baiyangdian Basin and their indication on water quality. *Journal of Hebei University(Natural Science Edition)*, 2023, 43(01): 67-74, DOI: 1000-1565(2023)01-0067-08. [张仲伟, 陈思宝, 汪家鑫等. 白洋淀流域府河夏季浮游植物的群落结构及其对水质的指示. 河北大学学报(自然科学版), 2023, 43(01): 67-74.]
- [23] Zhou YQ, Feng JS, Duan TT *et al.* Variation of phosphorus concentration in surface water during rainfall events in Banqiao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(11): 131-8, DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2022.0225. [周艳青, 冯嘉申, 段亭亭等. 板桥河小流域降雨事件中地表水磷浓度的变化特征. 环境科学学报, 2022, 42(11): 131-8.]
- [24] 李先锋. 海河流域基于 SWAT 模型的氮磷迁移转化研究[学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [25] Qin BQ, Zhou J, Elser JJ *et al.* Water Depth Underpins the Relative Roles and Fates of Nitrogen and Phosphorus in Lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3191-8. DOI: 10.1021/acs.est.9b05858.

- [26] 黄善恒. 新密市双洎河沉积物磷形态及吸附/释放特征研究[学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [27] Liu L, You XY. Water quality assessment and contribution rates of main pollution sources in Baiyangdian Lake, northern China. *Environmental impact assessment review*, 2023, 98(2023): 6965-6965. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.106965.
- [28] Scott JT, McCarthy MJ, Garnder WS *et al.* Denitrification, dissimilatory nitrate reduction to ammonium, and nitrogen fixation along a nitrate concentration gradient in a created freshwater wetland. *Biogeochemistry*, 2008, 87(1): 99-111. DOI: 10.1007/s10533-007-9171-6.
- [29] Wang ZC, Xu H, Zhu GW *et al.* Spatial and temporal differences of nitrogen removal potential by denitrification and its management implications of water-based reservoirs in the upper reaches of Taihu Basin: A case study of Lake Tianmuhu. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(01): 112-22, DOI: 10.18307/2024.0124. [王子聪, 许海, 朱广伟等. 太湖流域上游水源性水库水体脱氮潜力时空变化特征及其管理意义——以天目湖沙河水库为例. 湖泊科学, 2024, 36(01): 112-22.]
- [30] Yu JZ, Wang X, Cai JY *et al.* Effects of hydrodynamic conditions on nitrogen and phosphorus release from sediments in shallow lakes. *China Environmental Science*, 2023, 43(08): 4219-28, DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230506.005. [余景芝, 王烜, 蔡剑英等. 水动力条件对浅水湖泊沉积物氮磷释放的影响. 中国环境科学, 2023, 43(08): 4219-28.]
- [31] Ma L, Wang HY, Liu G *et al.* Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from cropland in northern China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(01): 1-10, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200910. [马林, 王洪媛, 刘刚等. 中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(01): 1-10.]