J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(6):000-000
DOI 10.18307/2026.0621
©2026 *by Journal of Lake Sciences*

巢湖流域典型入湖河流氮磷通量及其趋势变化（2019-2024 年）*

罗怡[1,2]，张汪寿[2**]，奚德通[3]，朱腾龙[2]，章曜程[2]，王履华[1]，吴雷[4]，李恒鹏[2]
（1：南京信息工程大学地理科学学院，南京 210044）
（2：中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135）
（3：台州市黄岩区环境保护监测站，台州 318020）
（4：安徽农业大学资源与环境学院，合肥 230036）

摘要: 入湖河流是湖泊外源营养盐输入的主要通道，其氮（N）和磷（P）通量变化直接影响湖泊富营养化进程及藻华风险。为准确评估巢湖流域典型入湖河流的污染物输出特征与驱动机制，本研究以巢湖最大入湖支流-杭埠河为研究对象，基于时段通量估算法、Load Estimator（LOADEST）模型和 WRTDS 模型对 2019~2024 年上游姚家河站，中游河口大桥站，中下游三河镇新大桥站和下游北闸渡口站水文-水质数据进行了通量估算与趋势分析。时段通量估算法虽计算简单，但误差较大，相比之下，LOADEST 模型在巢湖流域适用性更强，其估算结果与实测日通量的吻合度显著优于 WRTDS 模型。结果证实，LOADEST 模型在流量记录连续、水质监测相对稀疏的条件下拟合效果最佳（R^2=0.89~0.97，NSE=0.84~0.98），可稳定重建连续通量序列；进一步，采用 LOADEST 模型估算了杭埠河总氮（TN）和总磷（TP）通量，研究发现氮磷通量时空变化剧烈。比如，入湖口断面，丰水期（5~9 月）贡献全年通量的 68%~77%（TN）和 72%~81%（TP），单次暴雨事件（61.8mm）TN 和 TP 输出量可高达月通量的 73%和 77%，呈脉冲式输出特征；空间上，TN 与 TP 通量均自上游向下游递增，下游北闸渡口断面年通量分别达 4.24×10^6 kg N yr^{-1} 和 2.25×10^5 kg P yr^{-1}，为上游的 10~17 倍。趋势分解结果显示，近五年杭埠河入湖 TN 通量呈持续上升趋势，而 TP 通量略有下降，剔除流量波动影响后，上述趋势仍然成立（TN 约 0.68 t·$month^{-1}$，TP 约-0.06 t·$month^{-1}$），说明 TN 的负荷积累效应仍然突出，而 TP 输出已出现阶段性缓解。综上，流域通量变化受水文过程与人类活动双重驱动，高强度的降雨事件加剧了下游农业、城镇排放等污染对入巢湖的负荷贡献。研究结果可为新时期巢湖流域外源负荷评估、污染控制及藻华风险防控提供科学依据与管理支撑。

关键词: 巢湖流域；污染物通量；LOADEST；WRTDS；杭埠河；通量估算

Spatiotemporal Dynamics and Hydrological Drivers of Nitrogen and Phosphorus Fluxes in a Major Inflow River of Lake Chaohu (2019-2024) Based on Comparative Load Estimation Methods*

Luo Yi[1,2], Zhang Wangshou[2**], Xi Detong[3], Zhu Tenglong[2], Zhang Yaocheng[2], Wang Lühua[1], Wu Lei[4], Li Hengpeng[2]

(1.School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P, R China)

*2025-12-03 收稿；2026-01-26 收修改稿。
国家重点研发计划项目（2023YFD1702101）、国家自然科学基金项目(42471139)和中国科学院青促会项目(2023330)联合资助.
** 通信作者；E-mail:wszhang@niglas.ac.cn.

(2.State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P, R China)
(3.Huangyan District Environmental Protection Monitoring Station, Taizhou 318020, P, R China)
(4.College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036. P, R China)

Abstract: Inflowing rivers are the main pathways for external nutrient inputs to lakes. Changes in nitrogen (N) and phosphorus (P) fluxes directly affect lake eutrophication and the risk of algal blooms. To accurately evaluate pollutant export characteristics and driving mechanisms of typical inflow rivers in the Chaohu Basin, this study selected the Hangbu River, the largest tributary of Lake Chaohu, as the research object. Using hydrological and water quality data from 2019 to 2024 at four monitoring stations along the river (Yaojiahe in the upstream, Hekou Bridge in the midstream, Sanhe Town Bridge in the mid-downstream, and Beizhadukou in the downstream), this study estimated nutrient fluxes and their long-term trends using the period-average flux method, the LOADEST model, and the WRTDS model. The period-average flux method has a simple calculation process but relatively large estimation errors. In comparison, the LOADEST model is more applicable to the Chaohu Basin and shows much higher consistency with observed daily fluxes than the WRTDS model. The results show that the LOADEST model performs best under conditions with continuous discharge data and relatively sparse water quality measurements, with R2 values from 0.89 to 0.97 and NSE values from 0.84 to 0.98, supporting the stable reconstruction of continuous nutrient flux sequences. The TN and TP fluxes estimated by the LOADEST model show clear temporal and spatial variability. At the lake inlet section, the wet season from May to September contributes 68 to 77% of annual TN flux and 72 to 81% of annual TP flux. A single storm event (61.8 mm of rainfall) can contribute up to 74% and 77% of the monthly TN and TP fluxes, respectively, reflecting a typical pulse-driven nutrient export pattern. Spatially, TN and TP fluxes gradually increase from upstream to downstream. The annual TN and TP fluxes at the Beizhadukou section reach 4.24×106 kg N per year and 2.25×105 kg P per year, which are 10 to 17 times the upstream values. Trend decomposition analysis shows that the lake-entering TN flux has continuously increased over the past five years, while the TP flux shows a slight decreasing trend. This finding indicates sustained nitrogen accumulation and temporary relief of phosphorus export in the study area. After removing the influence of discharge variation, these trends remain stable, with flow-normalized change rates of approximately 0.68 t month-1 for TN and -0.06 t month-1 for TP. Overall, variations in nutrient fluxes are co-driven by hydrological processes and human activities. Intense rainfall events enhance the input of agricultural and urban pollutants, thereby increasing nutrient loads in downstream river sections. This study provides a scientific basis for external load evaluation, pollution control, and algal bloom risk management in the Chaohu Basin.
Keywords: Lake Chaohu Basin; pollutant flux; LOADEST; WRTDS; Hangbu River; flux estimation.

湖泊富营养化是当前全球范围内水生态系统面临的最严峻挑战之一[1,2]。随着经济社会的快速发展和农业集约化进程的加快，流域内氮、磷等营养盐在土壤和水体中不断积累，并通过地表径流输送入湖，成为藻类暴发与生态退化的关键驱动因子[3]。在我国，外源输入仍是湖泊水质恶化与富营养化态势未能得到根本遏制的主要原因[4]。因此，准确量化外源营养盐入湖负荷，是实施科学管控的关键前提[5]。

河流营养盐通量作为连接流域污染与湖泊响应的核心指标，其科学估算对识别污染来源、评估环境容量和制定控污策略具有基础性意义[6]。与单点浓度监测相比，通量能更系统表征污染物在流域中的迁移转化全过程，可有效揭示水质对管理措施的响应机制[7]。然而，传统通量核算方法受限于水质监测频率不足与极端水文事件影响，结果存在显著不确定性，难以支撑精准治理[8]。在此背景下，探索适应实际监测条件、兼具稳健性与精度的通量估算方法，已成为推进精准治污与湖泊水质长效改善的迫切需求。

在通量估算实践中，一个普遍存在的技术难点在于水文数据（如流量）通常可获取连续监测序列，而水质数据则多为间断性巡测，两者在时序上的不匹配给通量的准确计算带来显著挑战[9]。为克服这一瓶颈，研究者陆续发展出从简到繁的一系列估算方法。早期主要依赖时段通量累积等简化方法，虽便于操作但误差较大[9]；此后，LOADEST 等回归模型被引入，其通过构建流量与浓度的对数线性关系，在低频水质数据条件下仍能实现较为稳定的负荷估算，因而获得广泛应用[10]。为进一步提升对趋势与季节性

变化的识别能力，WRTDS 模型在 LOADEST 基础上引入了时间与季节性加权回归结构，研究表明其在浓度趋势分析方面表现更优，系统偏差也得到更好控制[11]。之后，为进一步降低序列自相关误差，Zhang 与 Hirsch[12]提出了 WRTDS-K 模型。近年来，随着数据处理能力的增强，机器学习方法与经典统计模型的融合逐渐成为趋势，该类方法在数据稀疏或下垫面条件复杂的流域中展现出更优的适应性与预测潜力[13,14]。总体而言，通量估算方法正逐步从依赖统计假设的传统路径，转向更加依赖数据驱动与智能计算的新范式。

然而，尽管方法不断演进，现有的氮磷通量估算仍面临较大不确定性[15]。具体而言，受监测频率限制，低频采样往往难以捕捉短时暴雨径流事件，导致通量结果偏低；同时，不同采样策略及流量分割方法可能造成估算结果差异高达 30%以上[14]。为提升估算可靠性，已有研究指出可通过优化通量估算的模型结构并增强对水文过程的刻画能力，从而降低由于过程差异与观测离散性引起的不确定性[13]。王辉等[16]在 LOADEST 模型框架下引入数字滤波方法进行通量估算，结果显示不同水文过程对氮、磷输出贡献存在显著差异，表明在过程贡献差异较大的情形下，通量估算结果对模型结构设定及过程表征方式更为敏感，从而可能影响结果的稳定性与解释性；隋修国等[17]在黄河入海口应用 LOADEST 模型，指出增加丰水期监测密度可显著提高估算精度。这进一步表明，监测频率与模型结构是影响通量估算可靠性的关键因素。

巢湖是我国典型的富营养化湖泊，其流域人口密集、农业施肥强度高、城镇化迅速发展，自 20 世纪 80 年代以来氮磷输入持续增加，湖区水质长期维持在Ⅳ～Ⅴ类水平[18,19]。尽管流域综合治理取得一定成效，藻华仍高频发生，外源营养盐负荷削减任务依然艰巨[20]。巢湖流域河网密布，流域内农业活动与城镇发展叠加，污染来源复杂，是研究外源营养盐迁移与通量变化的典型区域[17,21,22]。其中，杭埠河作为八大入湖河流之一[16]，上游农田施肥强度大，中下游沿线城镇密布，这必然驱动污染物输移通量的复杂变化[23]。因此，筛选与巢湖流域特点、与现有监测数据相适配的通量方法，并解析其污染物通量变化特征，对于明确污染来源和制定分区控制策略具有重要科学意义[24]。

综上，尽管国内外关于营养盐通量估算的研究已取得丰富成果，但针对巢湖典型入湖河流的氮磷通量时序变化规律、季节差异及驱动机制仍缺乏系统研究[11,12]。本研究以杭埠河为研究对象，基于多年实测水文与水质数据，采用 LOADEST 与 WRTDS 等主流模型对比分析了不同方法的估算差异和精度，系统解析氮、磷通量的时空变异规律及其变化趋势，以期为流域污染负荷精准管控与富营养化治理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杭埠河位于巢湖流域西南部，是集水区面积最大、入湖水量贡献最高的一级支流，约占巢湖年入湖径流总量的 50%以上[25]。河流发源于大别山北麓岳西县与霍山县交界处，流经舒城县、庐江县和肥西县，全长约 145 km，流域面积约 4150 km^2，最终在肥西县注入巢湖[26]。流域地势总体由西南向东北倾斜，地形类型依次为低山、丘陵、岗地和平原区，流域整体平均高程约为 80 m。上游位于岳西-舒城一带，海拔普遍为 300~800 m；中游庐江地区地势逐渐降低，海拔约 50~200 m；下游肥西入湖区地势低平，海拔约 20~40 m[26]。杭埠河流域属亚热带湿润季风气候区，气候温和、降水充沛，年平均气温约 15.6℃，多年平均降水量约 1100 mm，降水主要集中在 5~9 月，约占全年总降水量的 60%[27]。具体研究区概况图如图 1 所示。

杭埠河流域土地利用整体呈现“一山两水三分田”的空间格局[28]，其中耕地和建设用地为主要类型，分别约占流域面积的 55%和 12%；林草地占比约 30%，主要分布于上游山区；水域及湿地约占 3%[29]。农业耕作主要以水稻、小麦和油菜为主要作物，多实行一年两熟制[30]。根据安徽省农业统计年鉴，流域内化肥施用强度高达每公顷 450~500 kg（折纯量），是全国平均水平的 1.1~1.3 倍[31]。农业面源输入叠加畜禽养殖和城镇化扩张，使氮、磷等营养盐在入湖径流中占较高比例[32]。杭埠河流域是保障区域粮食高产稳产的重要区域，由于农业开发强度大、畜禽养殖规模大、加上近些年的城镇扩张，使得入

湖污染物的通量快速变化，在此背景下，进行通量估算，厘清其对巢湖负荷贡献，这对于制定流域污染控制策略具有重要的科学与管理意义[33]。

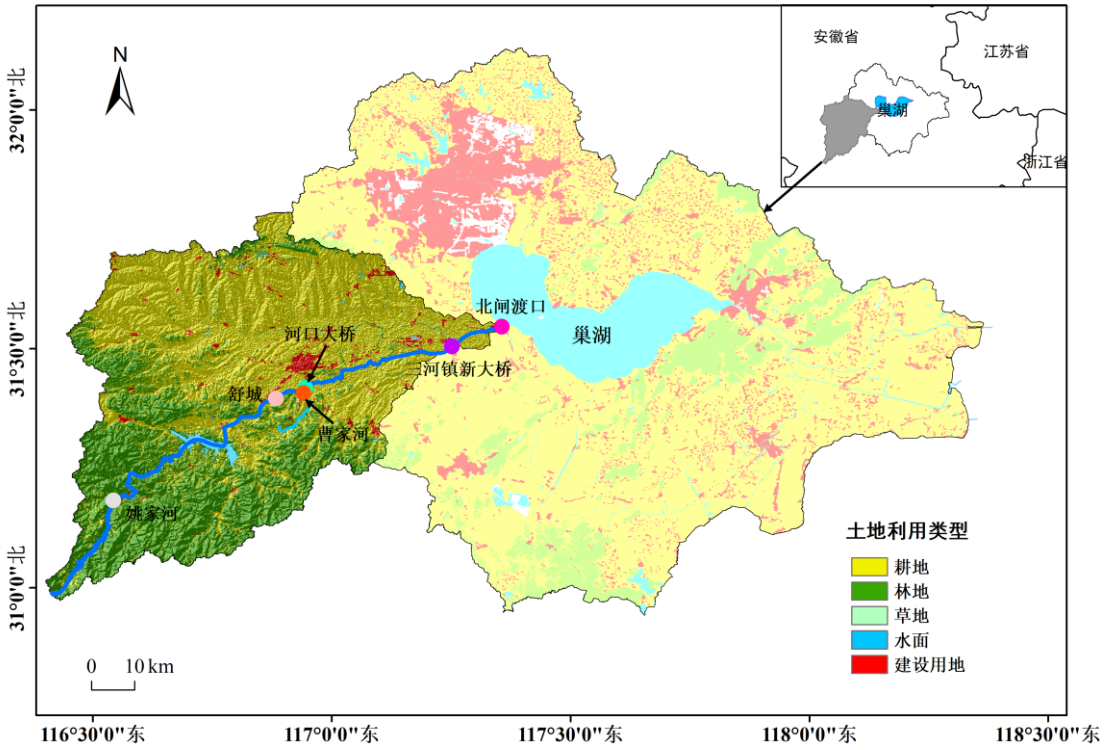

图 1 杭埠河流域位置及研究点位分布

Fig.1 Location of the Hangbu River Basin and distribution of monitoring sites.

1.2 数据来源与处理

本研究所用数据主要包括水文与水质两类观测数据。水文数据来自杭埠河流域典型控制断面的水文自动观测站，监测频率为逐日。不同站点的时间覆盖范围有所差异：上游姚河村站点覆盖 2024 年全年，中游河口大桥站点为2021~2024年，中下游三河镇新大桥站点和下游北闸渡口站点则覆盖2019~2024年。其中，除中游河口大桥点位外，水质监测点与各水文自动观测站重叠。其中，中游河口大桥断面缺少对应的水文自动监测站点，因此采用主干道与临近主干道的重要支流的水量相加得到河口大桥的水量数据，由其上游两个水文自动监测点（曹家河站和舒城站）的逐日流量叠加计算得到[34]。曹家河站位于河口大桥附近的重要支流上，可反映支流补给贡献；舒城站则位于杭埠河干流，可监测上游主干道流量数据。两站距离接近（相距 6km），且河口大桥断面位于两站下游汇流区附近，因此上述叠加可近似表征该断面集水区的逐日来水过程。水质数据由人工定期巡测获取，监测频率为逐月，监测指标包括总氮（TN）和总磷（TP）。水质指标分析测试参照《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）及配套方法标准（GB 11894-89、GB 11893-89）执行[35]。

在数据预处理阶段，首先对监测序列进行时间匹配与异常值识别。针对由仪器漂移、采样环境突变或通信中断等造成的异常记录，采用阈值筛查与时间序列平滑法进行剔除或插补[36]。随后，将逐日流量与月均水质数据按时间对应，构建统一的通量计算基础数据集。为验证数据质量，结合流域土地利用和气象资料对序列的时序一致性进行校核。

1.3 通量估算与验证

河流污染物通量估算常用方法主要包括时段通量估算法、多元统计回归法（LOADEST）和加权回归法（WRTDS），具体如下：

1.3.1 时段通量估算法 时段通量估算法是通量估算中最基础且常用的方法。其基本公式为：

$$L = \sum_{i=1}^{n} C_i\, Q_i \tag{1}$$

其中 L 为观测时段内累计通量，C_i 为第 i 时段断面的实测浓度，Q_i 为第 i 时段对应断面的水量，n 为时段长度[9]。

该方法通常适用于缺乏连续水文监测、仅有瞬时流量数据的场景。在本研究中，为评估无连续水文数据对通量估算的影响，我们采用逐月采集的水质数据及其对应时刻的瞬时流量，基于水质、水量在月尺度内保持稳定的假设，计算得到年通量。该方法本质上以瞬时观测值近似代表月均水质与水量，难以刻画丰水期暴雨径流引起的短时通量峰值，因而具有低估风险。因此，本研究将其作为数据最稀缺条件下的估算情景，该处理方式便于与后续 LOADEST、WRTDS 等模型方法的估算结果进行对比，从而检验数据稀缺条件下通量估算的适用性与偏差范围。

1.3.2 Load Estimator (LOADEST) LOADEST（Load Estimator）模型由美国地质调查局（USGS）开发，用于在流量连续、水质采样离散的条件下估算河流污染物通量[10]。模型的通用形式可表示为：

$$\ln L(\mathrm{t}) = a_0 + \sum_{j=1}^{N_V} a_j\, X_j(t) + \varepsilon \tag{2}$$

其中，L(t)为瞬时负荷，a_0 和 a_j 为模型系数，X_j（t）为流量、时间及季节等变量的函数，N_V 为解释变量的数量，ε 为观测误差。

LOADEST 内置多种回归方程形式（见表 1），涵盖流量、时间与季节因子的不同组合。模型采用 Akaike 信息准则（AIC）或 Schwarz 后验概率准则（SPPC）自动筛选最优方程。在参数估计方法上，LOADEST 提供最大似然估计（MLE）、调整最大似然估计（AMLE）和最小绝对偏差（LAD）三种方式。由于这三种参数估算方法一般差别不大，为了污染物通量的统计分析，本研究仅提供调整最大似然估计（AMLE）的结果。

表 1 LOADEST 模型内置的回归方程形式

Tab.1 Built-in regression equation forms of the LOADEST model.

模型编号	回归模型
1	$a_0 + a_1 lnQ$
2	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2$
3	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2\, dtime$
4	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi\, dtime) + a_3 \cos(2\pi\, dtime)$
5	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3\, dtime$
6	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi\, dtime) + a_4 \cos(2\pi\, dtime)$
7	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi\, dtime) + a_3 \cos(2\pi\, dtime) + a_4\, dtime$
8	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi\, dtime) + a_4 \cos(2\pi\, dtime) + a_5\, dtime$
9	$a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi\, dtime) + a_4 \cos(2\pi\, dtime) + a_5\, dtime + a_6\, dtime^2$
10	$a_0 + a_1\, per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q\ per$
11	$a_0 + a_1\, per + a_2 \ln Q + a_3 \ln Q\ per + a_4 \ln Q^2 + a_5 \ln Q^2\ per$
99	用户自定义

注：表中 per 表示周期项，用于刻画营养盐浓度/通量在一年内的季节性变化。

1.3.3 WRTDS WRTDS（Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season）模型由美国地质调查局（USGS）于 2010 年提出，是一种基于加权回归的统计方法，用于同时描述浓度-流量关系的时间变化与季节性特征[11]。模型的一般形式为：

$$\ln C = \beta_0 + \beta_1(t) + \beta_2 lnQ + \beta_3 \sin(2\pi T) + \beta_4 \cos(2\pi T) + \varepsilon \tag{3}$$

其中，C 为浓度（mg L^{-1}），Q 为日均流量（m^3 s^{-1}），T 表示时间（十进制年份），β_0~β_4 为随时间与流量平滑变化的回归系数，ε为残差项。

通过估算每日浓度并与对应流量相乘可得日通量序列，再按时间汇总得到月或年负荷。WRTDS 模型还能计算流量归一化（flow-normalized）通量，以消除年际径流差异对趋势分析的影响。

1.3.4 模型率定与验证 为确保不同通量估算方法在研究区的适用性，本研究依据观测数据对 LOADEST 和 WRTDS 模型进行了率定与验证。LOADEST 模型通过内置的多种回归方程自动筛选最优形式，并在确定方程结构后生成日尺度通量序列；WRTDS 模型则基于其默认的加权回归框架，利用监测的流量与水质数据计算每日浓度并进一步推算日通量。

在模型验证时，采用水质逐月采样当天的实测浓度与对应采样日当天水量的乘积计算得到的日通量作为实测数据，将其与两模型模拟得到的日通量逐一匹配，对比评估模型在日尺度上重建通量过程的能力。

1.4 数据分析方法

1.4.1 模型比选 为定量评价不同模型在污染物通量估算中的性能，本文采用决定系数（R^2）、纳什效率系数（Nash-Sutcliffe Efficiency，NSE）和显著性水平（p 值）等统计指标对模拟结果进行综合比较。

决定系数（R^2）反映模型估算值与实测日通量的线性相关程度，其取值范围为 0~1，越接近 1 表明模型拟合效果越好[37]；纳什效率系数（NSE）用于衡量模型对实测日通量变异性的再现能力，其值越接近 1 表示模拟性能越优，0 表示模型与观测均值预测效果相当，负值则表明模型预测能力较差[38]；显著性水平（p 值）采用双尾 t 检验检验模型拟合结果与观测值之间的相关显著性。当 $p<0.05$ 时，认为模型估算结果与观测值显著相关；当 $p<0.001$ 时，模型精度达到高显著水平[39]。

1.4.2 单因素方差分析 为比较不同季节和年份之间氮、磷通量的差异，本文采用单因素方差分析（One-way ANOVA），以站点分组通量为因变量、季节/年份为自变量，检验组间均值是否存在显著性差异，显著性水平设定为α=0.05。当 ANOVA 显著时，进一步采用 Tukey HSD 事后检验进行两两比较，并将结果转换为紧凑字母显示，以直观呈现差异性[40]。

1.4.3 STL 季节-趋势分解 为揭示杭埠河流域氮、磷通量的长期变化与季节规律，本文采用 *STL*（Seasonal-Trend decomposition using Loess）方法对 2019~2024 年入湖口断面月尺度通量序列进行分解[41]。*STL* 基于 LOESS 平滑，能够在非线性、非平稳条件下稳健地分离趋势、季节与残差三部分，其加法模型为：

$$X_t = T_t + S_t + R_t \tag{4}$$

其中，X_t为观测序列，T_t为长期趋势项，S_t为季节项，R_t为残差项。

在实现过程中，首先将月通量统一换算为吨/月，并通过线性回归剔除流量对通量的线性影响，残差部分作为“非流量驱动”成分。

具体地，设第 t 月原始通量为 F_t（t month^{-1}），流量为 Q_t（m^3 s^{-1}），构建回归模型：

$$F_t = \alpha Q_t + \beta + \varepsilon_t \tag{5}$$

其中，α与β为回归系数，ε_t为剔除流量线性贡献后的残差项。

本文以回归残差ε_t构建去除流量线性影响后的通量序列，并对残差序列进行 STL 分解，提取趋势线T_t、月均季节曲线S_t，以及异常波动的残差R_t。为检验线性假设的适用性，本文对 F_t 与 Q_t 的回归残差特征进行了诊断分析，以验证线性回归能够刻画通量随流量变化的趋势。结果显示，残差未表现出明显的系统性偏差。同时，对近三年的趋势项进行线性拟合，计算通量的斜率变化，以定量刻画上升或下降速率。本文在鲁棒模式下设定季节周期为 12（月），并结合不确定性分析，以确保结果的稳健性。

2 结果

2.1 模型精度评估与模型选择

本节从拟合性能、参数稳健性和通量结果三个方面系统评估不同方法的适用性与精度表现。

LOADEST 模型在各监测断面（中游河口大桥、中下游三河镇新大桥、下游北闸渡口）对 TN 和 TP 的估算结果与实测日通量高度一致。其决定系数（R^2）介于 0.89~0.97，纳什效率系数（NSE）为 0.84~0.98，均通过 $p<0.001$ 显著性检验，能够较好地再现不同流量条件下的通量变化过程，尤其在高流量阶段表现出稳定可靠的拟合性能（图 2）。相比之下，WRTDS 模型在各断面 R^2 为 0.32~0.78，NSE 为-0.05~0.56，相关性较低。虽然其在长期趋势与季节变化方向上与观测值保持一致，但在通量峰值和高流量阶段的拟合能力较弱（图 3）。

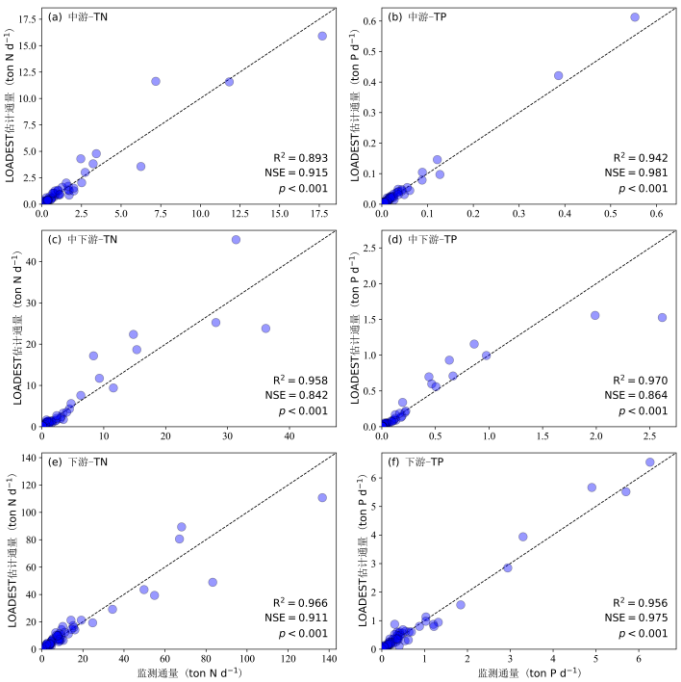

图 2 LOADEST 模型日尺度通量估算与日监测通量(日浓度×日流量)的对比(a~f 分别为中游、中下游和下游断面 TN、TP)

Fig.2 Comparison between LOADEST-estimated daily fluxes and observed daily fluxes (a~f represent TN and TP at the middle, lower-middle, and downstream sections).

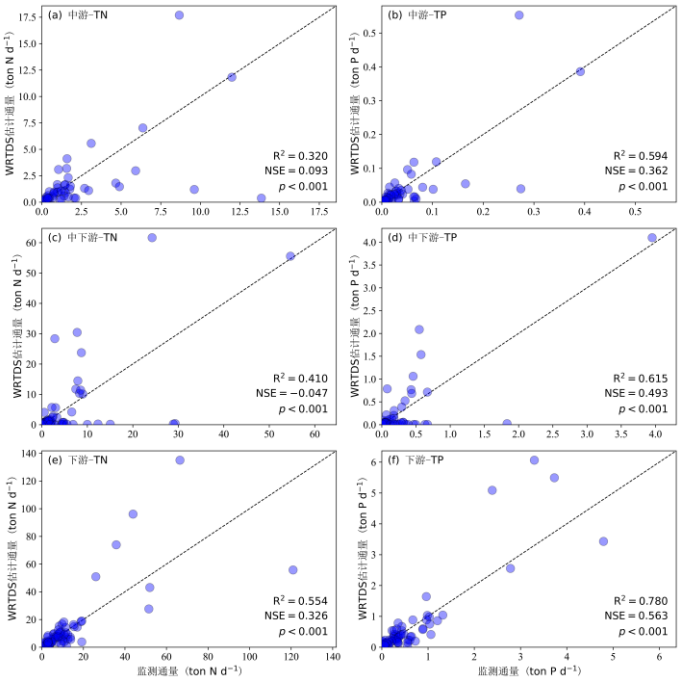

图 3 WRTDS 模型日尺度通量估算与监测通量（日浓度×日流量）的对比（a~f 分别为中游、中下游和下游断面 TN、TP）

Fig.3 Comparison between daily fluxes simulated by the WRTDS model and those derived from daily concentration discharge observations (a~f correspond to TN and TP at the middle, lower-middle, and downstream sections).

为进一步验证 LOADEST 模型的可靠性与方程适配性，本文统计了各站点的优选回归方程及其信息准则指标（表 2）。结果显示，不同断面和指标的最优方程均具有较低的 Akaike 信息准则（AIC）值与负向较大的 Schwarz 后验概率准则（SPPC）值，说明模型参数拟合合理、信息损失较小、预测稳定性较高。例如，下游北闸渡口 TN 方程的 AIC=0.52、SPPC=-24.53，为各断面中表现最佳。

表 2 LOADEST 模型优选回归方程及其 AIC 与 SPPC 统计指标

Tab.2 Optimal regression equations of the LOADEST model and their AIC and SPPC statistics

名称	位置	指标	优选回归方程	模型编号	AIC	SPPC
河口大桥	中游	TN	$\ln(\text{Load}) = 7.07 + 1.15\ln Q + 0.25\sin(2\pi\,\text{dtime}) + 0.27\cos(2\pi\,\text{dtime})$	模型 4	1.07	-29.46
		TP	$\ln(\text{Load}) = 3.24 + 1.14\ln Q - 0.15\sin(2\pi\,\text{dtime}) - 0.21\cos(2\pi\,\text{dtime})$	模型 4	0.61	-18.34
三河镇新大桥	中下游	TN	$\ln(\text{Load}) = 7.11 + 1.02\ln Q + 0.34\sin(2\pi\,\text{dtime}) + 0.22\cos(2\pi\,\text{dtime}) + 0.05\,\text{dtime}$	模型 7	1.26	-47.50
		TP	$\ln(\text{Load}) = 4.10 + 1.03\ln Q - 0.02(\ln Q)^2 - 0.10\sin(2\pi\,\text{dtime}) - 0.23\cos(2\pi\,\text{dtime}) + 0.07\,\text{dtime} - 0.03\,\text{dtime}^2$	模型 9	0.72	-33.73
北闸渡口	下游	TN	$\ln(\text{Load}) = 7.97 + 1.03\ln Q + 0.35\sin(2\pi\,\text{dtime}) + 0.21\cos(2\pi\,\text{dtime}) + 0.11\,\text{dtime}$	模型 7	0.52	-24.53
		TP	$\ln(\text{Load}) = 4.86 + 1.00\ln Q + 0.03\sin(2\pi\,\text{dtime}) - 0.20\cos(2\pi\,\text{dtime})$	模型 4	0.90	-36.77

进一步，本研究系统比较了时段通量估算法与 LOADEST、WRTDS 模型在典型断面通量估算中的差异。结果表明，三种方法在年尺度上均能反映出杭埠河污染物通量沿程递增的总体空间格局，但在具体量级上存在明显区别，尤其在中游至下游断面表现更为突出。以中下游的典型断面三河镇新大桥为例，TN 的年均通量在时段通量估算法、LOADEST 与 WRTDS 下分别为 967、2080 和 1732 ton yr^{-1}。相较之下，时段通量估算法显著偏低，约为 LOADEST 的 46%和 WRTDS 的 56%，反映出该方法在高流量时期对浓度实际动态的捕捉能力不足，导致丰水期负荷被系统性低估。TP 通量亦呈现类似规律，三种方法所得年均通量分别为 51.5、81.2 和 87.7 ton yr^{-1}，时段通量估算法相较于 LOADEST 与 WRTDS 的低估幅度达 37%-41%（图 4）。上述差异说明，在监测数据较为稀疏的条件下，时段通量估算法因难以准确表征水文-水质响应关系，在部分断面可能产生偏差，其不确定性与流量及采样时间密切相关，因此在评估流域污染物负荷时需谨慎使用。因此，综合模型原理、现有数据条件与估算结果，本研究认为 LOADEST 的估算序列在杭埠河流域更具结构合理性，故将其作为后续时空变化规律分析的主要依据。

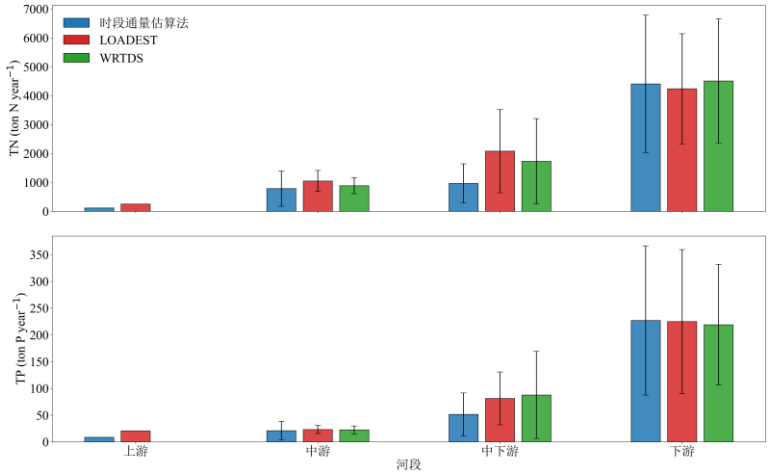

图 4 杭埠河各断面总氮（TN）和总磷（TP）年通量的三种估算结果对比

Fig.4 Comparison of annual total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) fluxes at different sections of the Hangbu River.

2.2 杭埠河通量空间变化特征

LOADEST 模型多年平均结果显示，杭埠河流域 TN 与 TP 通量均随河程下移显著增加，反映出汇水面积扩大与人类活动增强的累积效应[42]。TN 年通量由上游的 2.52×10^5 kg yr^{-1} 增至下游的 4.24×10^6 kg yr^{-1}（约增 17 倍），TP 由 2.07×10^4 kg yr^{-1} 增至 2.25×10^5 kg yr^{-1}（约增 11 倍）。这种逐级递增趋势主要受下游汇流区扩大、土地利用类型复杂化以及城镇排放增强等因素影响。

单位面积输出强度在空间上差异显著，TN 在上游最高（1843 kg km^{-2} yr^{-1}），中游降低后于中下游和下游回升至约 1000 kg km^{-2} yr^{-1}；TP 则由上游（152 kg km^{-2} yr^{-1}）经中游显著下降后逐渐升高至下游（53 kg km^{-2} yr^{-1}）。总体上表现为上游单位面积输出强、中游下降、下游总通量大的空间格局，表明流域汇流过程与上下游人类活动叠加造成了明显的污染累积效应[43]（表 3）。

上游单位面积输出强度较高但总通量最低，主要与上游流域面积较小、污染输入相对集中有关。在汇水范围有限的情况下，降雨径流更容易将地表氮磷快速汇入河道，尤其在农业施肥和农村生活排放影响下，暴雨过程往往会产生较强的营养盐输出，从而抬升单位面积输出水平[44]。相比之下，中游断面输出强度明显降低，可能与沿程营养盐被滞留、削减以及来水混合后浓度降低等因素有关，使得单位面积输出强度下降[45]。进入中下游及下游后，随着汇水范围扩大、城镇与农业活动影响增强以及支流输入逐步累积，总通量继续增加，形成沿程递增的空间变化特征[44]。

由于各断面可用监测年份不同（上游姚家河仅覆盖 2024 年，中游河口大桥为 2021-2024 年，中下游三河镇新大桥与下游北闸渡口为 2019-2024 年），为提高站点断面的可比性，本文进一步提取各站点共同覆盖年份（2024 年）对通量进行统一时间尺度下的对比分析（见表 3），结果表明上下游递增的空间格局及主要结论保持一致。

表 3 杭埠河流域不同河段总氮（TN）与总磷（TP）年通量及输出强度（多年均值±标准差与 2024 年典型值）

Tab.3 Annual flux and export intensity of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) in different sections of the Hangbu River Basin (multi-year mean ± standard deviation and typical year 2024)

站点名称	姚家河	河口大桥	三河镇新大桥	北闸渡口
位置	上游	中游	中下游	下游
通量（kg N yr^{-1})	-	1,048,044±314,544	2,080,022±1,315,748	4,237,778±1,739,081
输出强度（kg N km^{-2} yr^{-1}）	-	672±202	1,033±653	1,004±412
通量（kg P yr^{-1})	-	23,342±6,562	81,241±45,094	224,961±122,735
输出强度（kg P km^{-2} yr^{-1}）	-	15±4	40±22	53±29
典型年份（2024 年）通量（kg N/a)	251,718	1,059,062	3,925,059	5,549,277
典型年份（2024 年）输出强度（kg N km^{-2} /a）	1,843	679	1,948	1,315
典型年份（2024 年）通量（kg P /a)	20,725	27,803	127,231	205,127
典型年份（2024 年）输出强度（kg P km^{-2} /a）	152	18	63	49

2.3 杭埠河通量时间变化特征

2019-2024 年间，杭埠河 TN 和 TP 通量变化与流量过程高度同步，表现出典型的事件驱动特征。从月尺度变化来看，上游通量整体较低；中游至下游断面通量水平明显升高，同时月通量散点离散度增大，说明月尺度通量更易受降雨径流过程及汇流叠加影响，月际波动更为剧烈（图 5 图 6）。在季节尺度上，具有明显的季节集中性。TN 与 TP 通量均在丰水期（5~9 月）显著升高，而在枯水期（10 月至翌年 3 月）显著下降。夏季（6~8 月）为全年输出峰值期，TN 月均约 950 ton $month^{-1}$，TP 月均约 68 ton $month^{-1}$，分别占全年总通量的约 43%和 40%。春季次之，秋冬季最低。Tukey 检验结果表明季节差异显著（$p<0.05$），夏季与其他季节差异最为突出（图 7 图 8）。在年际尺度上，图 7 和图 8 展示了 2019-2024 年各月份 TN 和 TP 通量的年际变化，2020 年和 2024 年为高通量年份，TN 和 TP 峰值较平水年（2021、2023 年）高出 70%~90%。丰水年通量振幅可达平水年的 4~6 倍，而枯水年仅约 2 倍，说明降雨强度对营养盐输出波动具有显著的放大作用（图 7 图 8）。一般情况下，丰水年在汛期月份往往出现较高的峰值，但由于月通量受极端降雨过程影响显著，年内波动幅度较大，在对各年份的月通量序列的整体进行比较时，年份间的差异可能不显著。且总体来看，丰水期高流量阶段是流域营养盐的主要输出时段，也是年际差异形成的

关键时期。

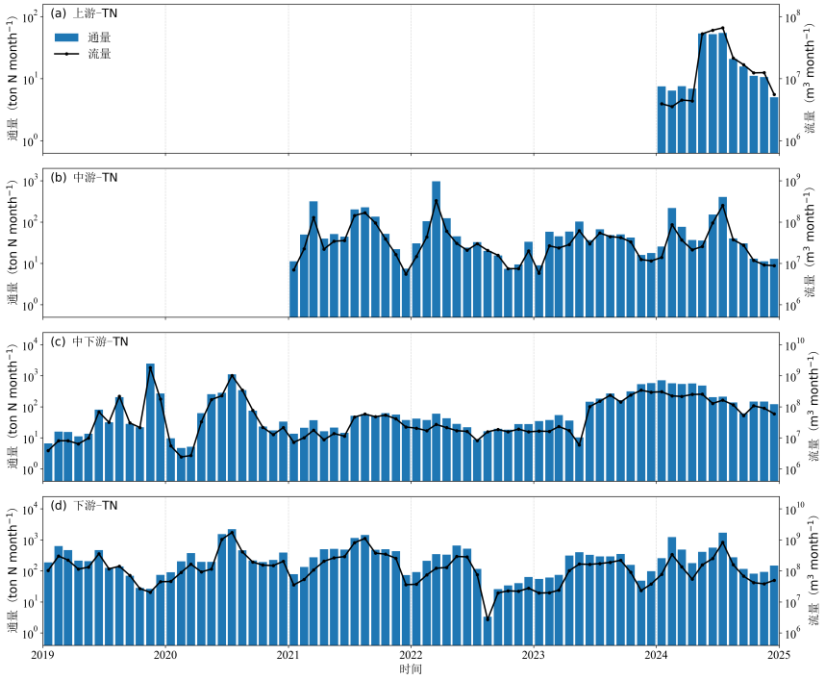

图 5 2019~2024 年杭埠河流域各河流断面总氮（TN）月尺度通量变化

Fig.5 Monthly variations in total nitrogen (TN) flux across different sections of the Hangbu River Basin from 2019 to 2024

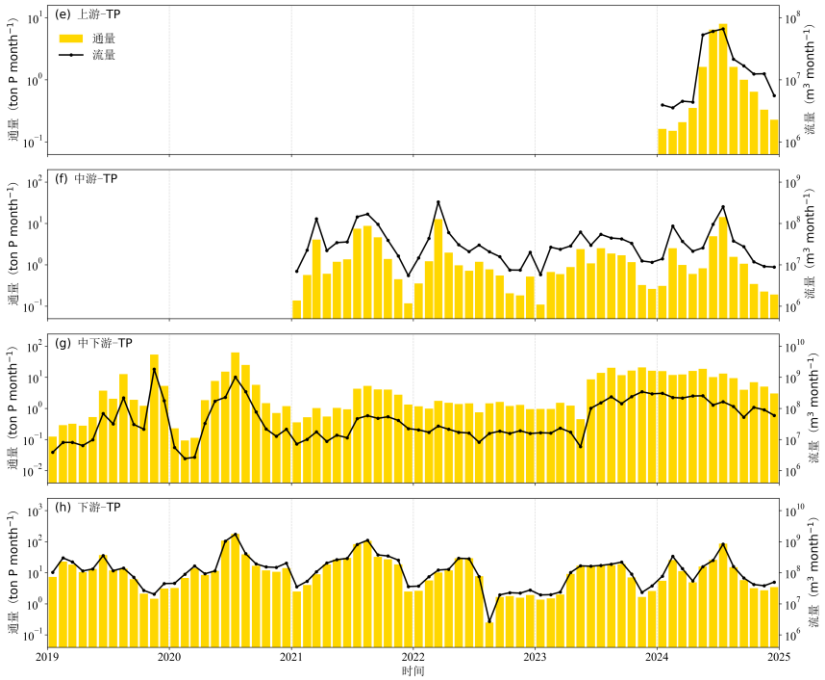

图 6 2019~2024 年杭埠河流域各河流断面总磷（TP）月尺度通量变化

Fig.6 Monthly variations in total phosphorus (TP) flux across different sections of the Hangbu River Basin from 2019 to 2024

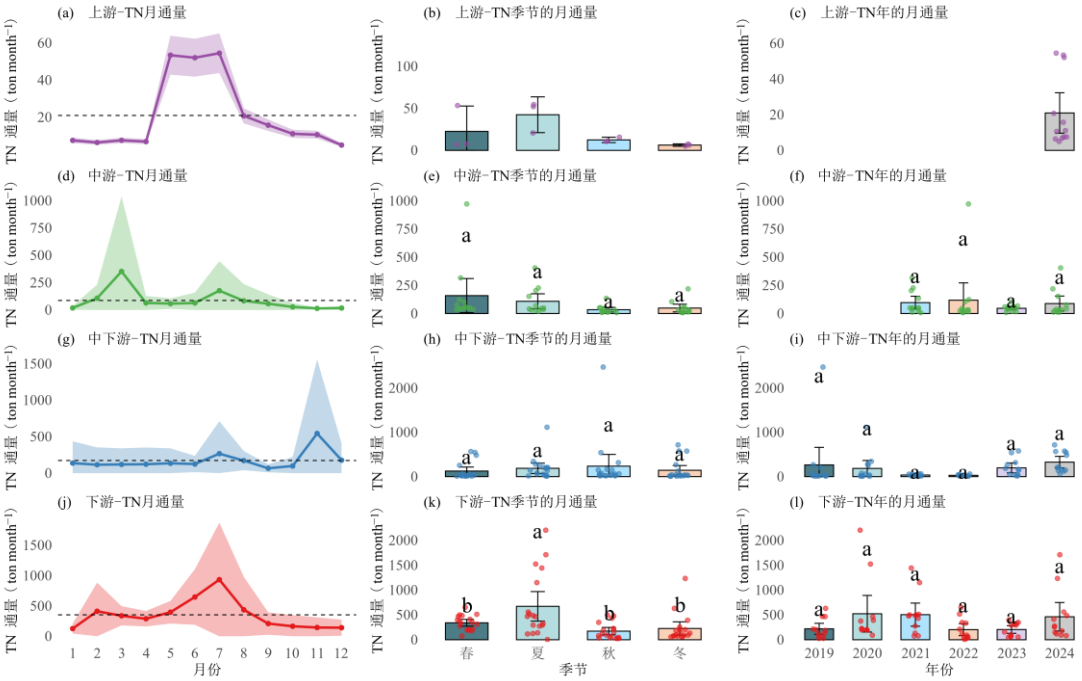

图 7 2019~2024 年杭埠河流域总氮（TN）月、季节与年际通量变化特征（散点表示各月份月通量值）

Fig.7 Monthly, seasonal, and interannual variations in total nitrogen (TN) flux in the Hangbu River Basin from 2019 to 2024(Dots represent monthly flux values)

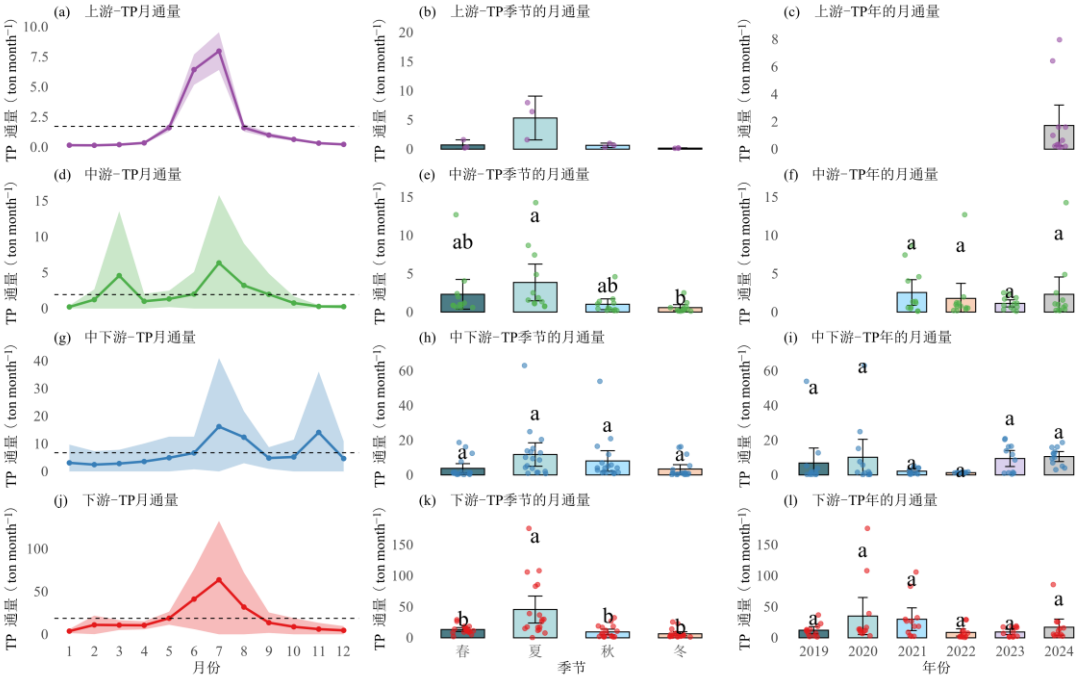

图 8 2019~2024 年杭埠河流域总磷（TP）月、季节与年际通量变化特征（散点表示各月份月通量值）

Fig.8 Monthly, seasonal, and interannual variations in total phosphorus (TP) flux in the Hangbu River Basin from 2019 to 2024(Dots represent monthly flux values)

2.4 杭埠河入湖通量趋势解析

基于下游北闸渡口断面 2019~2024 年的月尺度通量序列，采用 STL（Seasonal-Trend decomposition using Loess）方法对 TN 和 TP 通量进行分解（图 9），以揭示入湖负荷量变化趋势。结果显示，杭埠河入湖 TN 通量在研究期内总体呈持续上升趋势，原始序列线性斜率约为 5.26 ton month^{-1}，剔除流量影响后的非水文驱动部分仍为 0.68 ton month^{-1}，表明除径流变化外，农业施肥、生活排放及面源输入等人为因素可能是氮对氮负荷变化具有重要影响[44]。TP 通量则略有下降。原始序列斜率为 0.03 ton month^{-1}，而在剔除流量影响后转为-0.06 ton month^{-1}，说明磷输出主要受水动力过程控制。

丰水年暴雨径流可引起颗粒态磷的短时高释放，而平水或枯水阶段则因吸附沉降和治理措施作用而显著削减。近年来下游污水处理与生态拦截工程的实施，可能是 TP 通量下降的重要原因。STL 趋势分解的季节项显示，TN 与 TP 均具有明显的年周期波动，峰值集中在 6~8 月，季节振幅分别为约 250~300 ton month^{-1} 和 30~50 ton month^{-1}。残差项中短期异常波动与极端降雨或突发排放事件对应，TN 峰值可超过 800 ton month^{-1}，TP 达约 40 ton month^{-1}。总体上，杭埠河下游入湖通量表现为氮负荷持续上升、磷输出趋于稳定或略降的特征。综上，杭埠河 TN 通量的上升可能主要受农业施肥和点源排放驱动，而 TP 的阶段性下降则反映出降雨减弱与水文调蓄的双重影响。在丰水期重点削减氮输入、同时保持磷控制，可能是未来流域营养盐管理的关键方向。

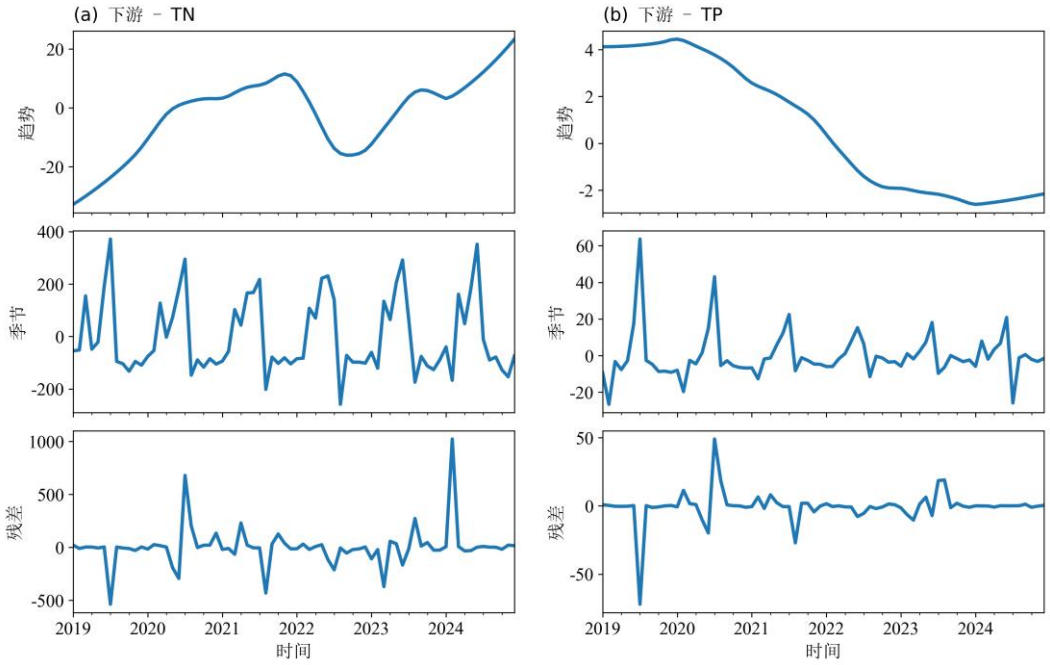

图 9 杭埠河下游北闸渡口总氮(a)与总磷(b)通量的 STL 趋势分解(2019~2024)。通量单位分别为 ton N month^{-1} 与 ton P month^{-1}

Fig.9 STL (seasonal-trend decomposition using loess) of total nitrogen(a) and total phosphorus(b) fluxes at the Beizha Dukou station in the downstream reach of the Hangbu River, 2019~2024. Flux units are ton N month^{-1} and ton P month^{-1}

3 讨论

3.1 模型评价与适用性建议

本研究系统比较了时段通量估算法、LOADEST 与 WRTDS 模型在杭埠河流域的应用效果，最终选取 LOADEST 作为后续分析的主要工具。尽管三种方法在刻画营养盐通量沿程递增的空间格局上表现一致，但其量级估算存在明显差异。时段通量估算法因假设月内浓度恒定，难以捕捉丰水期流量骤增伴随的浓度变化，导致通量显著低估；WRTDS 虽能较好识别长期趋势，但在数据稀疏条件下拟合稳定性较弱，对

极端水文事件的响应仍显不足。其原因在于 WRTDS 基于流量与时间的平滑回归框架，需依赖较长且相对均匀的观测序列以支撑趋势与季节项的稳健分解；而本研究水质样本在时间上相对有限，使得高流量区间的有效样本不足，局部拟合对边界样本更敏感，从而削弱了对暴雨洪峰等突发过程的刻画能力。需要指出的是，WRTDS 在数据覆盖期较长、采样较为充分的流域中已被广泛应用并取得良好效果，其性能表现具有明显的数据依赖性[46]。相比之下，LOADEST 在流量连续、水质监测频率有限的条件下表现出更高的拟合稳定性与计算鲁棒性，其基于流量、时间与季节变量的多元回归框架，能够有效重建连续通量序列，更适用于杭埠河这类人类活动强烈、径流过程复杂的入湖流域。

在模型适配性方面，LOADEST 对流量记录连续但水质采样频率受限的流域环境具有显著优势[44]。其固定参数结构减少了在数据不足条件下的过拟合风险，在农业面源与城镇排放并存的流域中能较稳健地表征浓度-流量关系[48]。模型验证结果显示（图 2、图 3），LOADEST 能够较好地再现不同流量条件下的营养盐通量变化，尤其在高流量阶段保持较高模拟精度，在数据相对有限的条件下仍具备良好的可操作性与应用价值[49]。然而，该模型在数据短缺、季节性断流或极端洪峰事件条件下仍存在一定局限[50]。当监测样本不足或流量波动剧烈时，固定参数回归可能难以捕捉突发性高通量过程，从而产生一定程度的系统误差[22]。此外，对比分析表明（图 4），直接基于瞬时浓度与瞬时流量的时段通量估算结果，其月尺度偏差远大于采用连续流量序列的模型方法，进一步说明瞬时观测难以代表月均水文-水质状态，是时段通量法不确定性的主要来源之一。

为进一步提升 LOADEST 在类似流域的适用性，建议从以下三方面着手：一是优化采样策略，在丰枯转换期和极端降雨事件中提高监测频率，以增强模型对通量峰值的捕捉能力；二是推进参数的本地化，结合流域土地利用、气象因子和水文年型特征进行参数本地化调整，在模型中引入季节修正项或响应阈值，提高不同水文条件下的预测精度与解释能力；三是探索模型融合路径，比如在 LOADEST 框架上引入分布式回归或贝叶斯更新机制，或与 WRTDS、机器学习模型等耦合，实现不确定性量化与多源信息整合，从而增强模型在非平稳环境下通量重建与趋势识别能力。综上，LOADEST模型在杭埠河这类受人类活动干扰显著、流量记录完整但水质数据相对有限的流域中，兼具可靠性、稳定性与应用性，是进行营养盐通量评估与趋势分析的有效工具。

3.2 杭埠河流域营养盐输出强度的区域比较与治理启示

为从更合理的尺度评估杭埠河营养盐输出特征及其污染控制水平，本文将杭埠河的氮、磷输出强度与国内典型农业型中小流域以及巢湖流域典型入湖河流进行对比（表 4）。结果表明，杭埠河（2019-2024 年）TN 与 TP 输出强度分别为 1004kg N·km^{-2}/a 与 53kg P·km^{-2}/a，整体处于农业型流域的中等偏低水平。

表 4 典型流域总氮（TN）与总磷（TP）输出强度对比

Tab.4 Comparison of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) export intensities among typical river basins

区域/流域	时段	氮输出强度（kg N km^{-2}yr^{-1}）	磷输出强度（kg P km^{-2}yr^{-1}）	文献
浙北平原河网农村小流域	2008	3357	537	[52]
太湖流域低平圩区	2013	-	180	[53]
滇池流域设施农业区	2014	5464	546	[54]
南淝河（巢湖流域）	2011~2018	3516	249	[51]
派河（巢湖流域）		1834	125	[51]
白石天河（巢湖流域）		1334	272	[51]
柘皋河（巢湖流域）		481	91	[51]
杭埠河（巢湖流域）		822	95	[51]
杭埠河（巢湖流域）	2019~2024	1004	53	本研究

与国内农业型小流域相比，浙北平原河网农村小流域（2008 年）TN 与 TP 输出强度分别高达 3357kg $N \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$ 和 537kg $P \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$[52]，滇池流域设施农业区（2014 年）更达到 5464kg $N \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$ 和 546kg $P \cdot km^{-2} \cdot yr^{-1}$[54]，显著高于杭埠河。这表明在高强度农业生产活动条件下，面源污染更易通过降雨径流过程形成强烈的氮磷输出脉冲，从而造成更高的单位面积输出强度。

与巢湖流域典型入湖河流相比，杭埠河的输出强度明显低于南淝河、派河、白石天河。柘皋河 TN 输出强度低于杭埠河，而其 TP 输出强度高于杭埠河[51]。上述差异说明，即便同属巢湖流域，各子流域在土地利用结构、城镇排放强度、农业面源贡献及水文响应特征等方面存在显著差异，从而导致氮磷输出强度表现出明显空间异质性。总体而言，杭埠河当前输出强度虽低于部分巢湖高污染支流与典型高强度农业区，但仍具有一定营养盐输出压力，尤其在强降雨事件驱动下可能形成短时高通量过程。因此，后续治理应继续聚焦丰水期面源污染拦截与过程控制，通过优化施肥管理、强化农田径流削减与生态缓冲带建设，降低氮磷在暴雨径流条件下的脉冲式输出风险，从而实现入湖负荷的持续削减。

3.3 通量驱动因素解析与管控建议

杭埠河流域营养盐通量在时间上表现出显著的季节集中性与年际波动特征。丰水期（5~9 月）为主要输出阶段，TN 与 TP 通量分别贡献全年总量的约 68%~77%与 72%~81%。年际上，2020 年与 2024 年为典型高通量年份，均对应强降雨集中期，表明营养盐输出受水文过程的事件驱动影响显著。

从长期趋势来看，STL 分解结果显示，2019~2024 年间 TN 通量总体呈持续上升趋势（斜率约 5.26 ton N $month^{-1}$），而 TP 通量相对稳定并略有下降（斜率约-0.06 ton P $month^{-1}$）。这一差异反映出氮负荷仍在上升，而磷输出过程受到阶段性抑制。结合同期降雨资料（图 10），可见杭埠河流域在 2020 年后极端降雨事件的频率和峰值均有所下降，丰水期月降雨峰值明显减弱。颗粒态磷是流域非点源负荷的主要形态，其输出对暴雨冲刷和径流强度高度敏感[55]。降雨强度下降意味着暴雨携带作用减弱，导致高流量阶段磷迁移量减少，从而在年尺度上表现为通量下降的趋势[56]。此外，上游水库群与沿河湿地的调蓄削峰作用，进一步延缓了暴雨径流过程，降低了短时磷负荷的入河强度[56]。综合来看，TP 通量的下降主要源于降雨事件特征的阶段性变化与流域面源拦截工程的协同作用，体现出水文与管理双重驱动的控制效应。

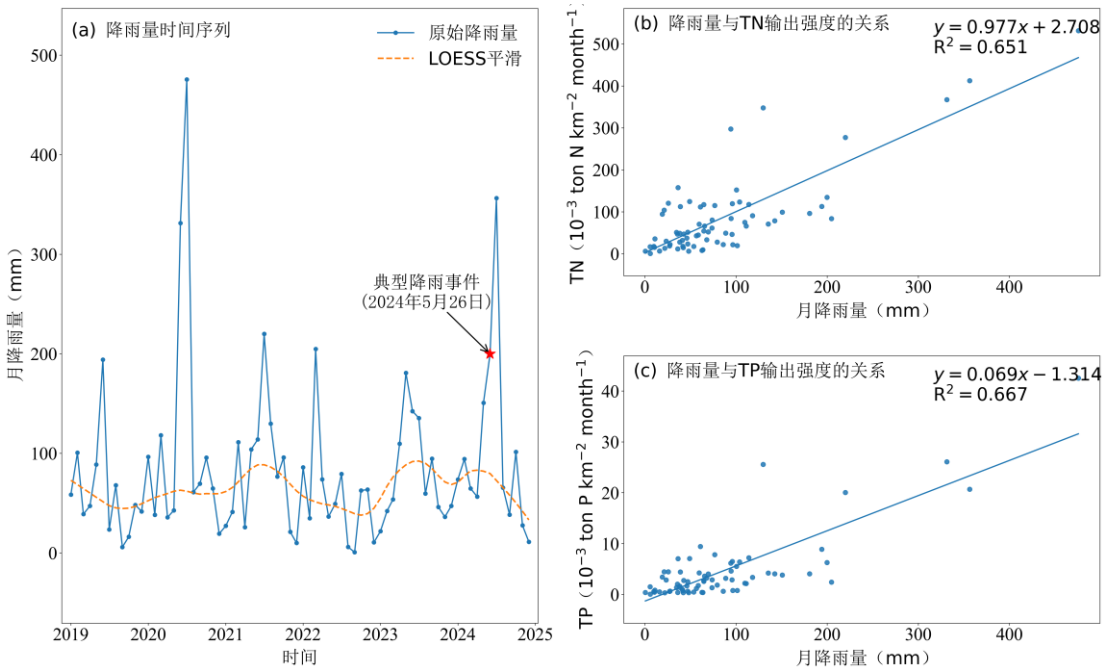

图 10 杭埠河下游（北闸渡口）降雨量变化及其与氮、磷输出强度的关系（2019~2024 年）

Fig.10 Variations in rainfall and its relationships with nitrogen and phosphorus export intensities at the downstream Beizha Dukou Station of the Hangbu River during 2019~2024

综上，杭埠河流域的营养盐输出变化既受自然水文波动的控制，又受到人类活动干预的调节。强降雨过程主导了 TN 与 TP 的短期峰值，而面源污染治理、水库调蓄与土地利用格局变化共同塑造了其长期趋势。暴雨径流对通量变化具有显著放大效应。以下游北闸渡口监测站点为例，发生于 2024 年 5 月 26 日发生的降雨事件（61.8mm）径流响应显著，单次事件输出的 TN 与 TP 通量分别占当月通量比例高达 73%和 77%。该案例表明，巢湖流域污染物输出呈现显著的脉冲式特征。

巢湖是典型的富营养化浅水湖泊，杭埠河作为其主要入湖支流之一，对湖体氮、磷负荷输入及藻华形成具有关键影响。前文分析表明，流域营养盐通量具有显著的季节集中性和下游累积特征，丰水期高通量过程显著强化了入湖负荷，对藻类暴发构成直接驱动。针对这一特征，制定基于时序差异的流域管控措施，是缓解巢湖藻华频发、提升生态系统韧性的关键途径。从藻华控制角度看，春末至夏初是巢湖藻华的高发时段，对应杭埠河营养盐输出的快速上升期。此阶段流域应重点实施“生态窗口期”内的差异化控制策略，以削减外源输入、平抑营养盐脉冲输出；在春季（2~4 月），应聚焦上游农业面源管理。春肥施用过早会导致氮磷在土壤表层积累，并在随后的降雨季被冲刷入河[58]。因此，应通过优化施肥时期与配方、推广控释肥与测土配方施肥技术、以及增加覆盖作物与生态缓冲带，减少土壤中氮磷的可迁移储量，削弱初期径流中的营养盐浓度峰值[59]；进入夏季（5~9 月），强降雨和灌溉排水叠加，使面源负荷成为主要通量来源。应在中下游重点建设农田湿地、生态沟渠和沿河拦截带，利用自然净化与拦截作用减少入河负荷[60]；同时，通过分时段灌排与田间蓄水管理降低暴雨期间径流强度，从而削弱面源污染的瞬时冲击效应[61]。湿地群落和稻田复合系统的设置不仅有助于营养盐削减，也能在高温期形成水体缓冲区，减缓藻类扩散[62]；在秋冬季（10 月至翌年 1 月），流域总体径流量下降，点源排放成为主要营养盐输入。应加强下游区域的污水处理与畜禽养殖管理，提高农村污水集中处理率，控制追肥与冬季粪肥还田强度，防止枯水期污染物积累[63]。针对部分小流域和城镇排水口，可增设人工湿地或滞留塘系统，在低温期持续削减基流负荷[64]。

此外，上游水库在调控通量过程上具有潜在生态功能。通过优化水库调蓄运行，可在丰水期暂蓄高营养负荷径流，延长水体停留时间以促进颗粒沉降与氮转化，从而降低短期入湖通量峰值；在枯水期适度下泄清水，则有助于维持河道自净与下游水质稀释[65]。这种生态调度模式可视为削弱外源冲击、稳定入湖负荷的重要手段。

总体而言，杭埠河流域的营养盐治理应由单一的均衡削减模式转向时空差异化管理。通过在不同季节和空间单元实施针对性的控制措施，构建春季源头控制、夏季过程拦截、秋冬末端治理的多层次管控体系，可有效削减入湖通量峰值，降低巢湖藻华的发生频率和强度。同时，强化监测网络与生态调度体系建设，将水文过程调控与农业管理相结合，是实现流域-湖泊系统协同治理的关键方向。

3.4 研究局限性与未来展望

现有通量估算方法在闸控条件下的适用性有待验证。本研究采用的 LOADEST 与 WRTDS 等统计模型，其核心假设建立在自然河流连续水文过程与稳定的水质-流量关系之上，可能难以准确刻画闸坝频繁启闭造成的非连续流态、蓄泄过程以及由此引发的泥沙与营养盐滞留-释放效应，这可能导致通量峰值被低估或时序出现偏差。与此同时，监测数据对复杂驱动过程的代表性有限：受监测频率约束，短历时暴雨径流及其引发的“脉冲式”输出过程往往难以被完整捕捉；固定断面的监测可能无法充分反映闸坝上下游、重要支流汇入点等关键界面的通量变化，从而影响对整个流域输移通量的集成评估。最后，通量核算与人类活动强度的耦合机制解析不足。当前方法主要建立在水文-水质相关关系上，未能有效分离农业灌溉回归水、污水处理厂排放、闸坝生态调度等不同人类活动驱动下的通量组分，限制了从核算结果到管理归因的深入解读。

针对上述局限，未来研究可在通量核算方法层面进行以下深化：构建面向过程的多源数据观测体系：在关键闸坝、重要支流口门增设监测点，并利用高频传感器、遥感反演等手段，强化对敏感期和关键界面通量过程的直接观测与数据约束；发展适用于闸控河道的通量模型：改进或构建能够耦合闸坝调度规则、反映非连续水动力过程的通量估算模型，提高在人为干扰流域的模拟精度；推进机理与统计融合的源-汇解析：将流域水文模型、水质过程模型与统计模型相结合，并辅以同位素等指纹手段，量化各类人

类活动源对通量的贡献，实现从“通量核算”到“过程归因”的跨越。

4 结论

本研究以巢湖典型入湖河流-杭埠河流域为研究对象，基于时段通量估算法与 LOADEST 模型和 WRTDS 模型的系统对比，探讨了不同通量估算方法在数据稀疏与强人类干扰条件下的适配性，并揭示了 2019-2024 营养盐通量的时空变化规律及其水文驱动机制。主要结论如下：

（1）通过三种方法的比较分析，说明在监测历时较短、流量连续且水质监测稀疏的条件下，LOADEST 模型表现最佳。

（2）杭埠河总氮（TN）与总磷（TP）通量在丰水期（5~9 月）贡献全年通量的 68%~77%（TN）和 72%~81%（TP），是污染物输出的关键期。空间上，下游河段 TN 输出强度约为中游的 1.5 倍，TP 输出强度约为中游的 3.6 倍，表明随着城镇化与农业等人类活动强度增强，污染物单位面积输出显著提高。

（3）趋势分解结果显示，2019-2024 年杭埠河入湖 TN 通量总体呈上升趋势，而 TP 通量相对稳定并略有下降。建议巢湖流域污染管控在时间上聚焦于汛期暴雨过程，空间上聚焦中下游湖口，实施分时分区精准管控。

综上，研究结果揭示了杭埠河流域氮、磷通量的时空分布特征及其水文驱动机制，为巢湖流域外源负荷削减和藻华风险防控提供了科学依据与管理参考。

5 参考文献

[1] Liu Y, Jiang QS, Liang ZY, *et al*. Lake eutrophication responses modeling and watershed management optimization algorithm: A review. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 49-63.[刘永, 蒋青松, 梁中耀等. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 49-63.]

[2] Zhou J, Leavitt PR, Zhang Y, *et al*. Anthropogenic eutrophication of shallow lakes: Is it occasional?. *Water Research*, 2022, **221**: 118728.

[3] Ma EP, Cai JM, Lin J, *et al*. Spatial pattern and water environment impact of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural in China in recent 30 years. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(3): 752-770.[马恩朴, 蔡建明, 林静等. 近 30 年中国农业源氮磷排放的格局特征与水环境影响. 自然资源学报, 2021,**36**(3):752-770.]

[4] Qin B, Zhang Y, Zhu G, *et al*. Are nitrogen-to-phosphorus ratios of Chinese lakes actually increasing?. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2020, **117**(35): 21000-21002.

[5] Hu XY, Zhu YR, Sun FH, *et al*. Mechanism research of the effects of water quality (nitrogen and phosphorus concentrations) and water volume on eutrophication of Lake Taihu. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(6): 1407-1418.[胡晓燕, 朱元荣, 孙福红等. 河流氮磷和水量输入对太湖富营养化的影响机理研究. 环境科学研究, 2022,**35**(6): 1407-1418.]

[6] Wu W, Zhai F, Liu Z, *et al*. The spatial and seasonal variability of nutrient status in the seaward rivers of China shaped by the human activities. *Ecological Indicators*, **157**, 111223.

[7] Li Y, Qin LH, Lei QL, *et al*. Review on agricultural non-point source pollution monitoring sections layout and pollutant loading estimation in small watershed. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(5): 1413-1427.[李影, 秦丽欢, 雷秋良等. 小流域农业面源污染监测断面设置与污染物通量估算研究进展. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1413-1427.]

[8] Hao CL, Deng YX, Wang YH, *et al*. Study on the selection and error analysis of riverine pollutant flux estimation methods. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(7): 1670-1676.[郝晨林, 邓义祥, 汪永辉等. 河流污染物通量估算方法筛选及误差分析. 环境科学学报, 2012, **32**(7): 1670-1676.]

[9] Fu G. Analysis of the estimation methods for the river pollutant fluxes (I): comparison and analysis of the estimation methods of period fluxes. *Research of Environmental Sciences*, 2003, **16**(1): 1-4.[富国. 河流污染物通量估算方法分析(I)--时段通量估算方法比较分析. 环境科学研究, 2003, **16**(1): 1-4.]

[10] Runkel R, Crawford GC, Cohn T. Load estimator (LOADEST) is a FORTRAN program for estimating constituent loadsin streams and rivers R.Techniques and Methods Book 4,chapter A5.

[11] Hirsch RM, Moyer DL, Archfield SA. Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season (WRTDS), with an Application to Chesapeake Bay River Inputs. Journal of the American *Water Resources Association*, 2010, **46**(5): 857-880.

[12] Zhang Q, Hirsch RM. River Water-Quality Concentration and Flux Estimation Can be Improved by Accounting for Serial Correlation Through an Autoregressive Model. *Water Resources Research*, 2019, **55**(11): 9705-9723.

[13] Huang S, Xia J, Wang Y, *et al*. Water quality prediction based on sparse dataset using enhanced machine learning. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, **20**: 100402.

[14] Goswami A, Paul PK, Rudra R, *et al*. Evaluation of statistical models: Perspective of water quality load estimation. *Journal of Hydrology*, 2023, **616**: 128721.

[15] Gao ZJ, Xiao QT, Xie H, *et al*. Spatiotemporal variations in riverine CO_2 partial pressure and emission fluxes under high-intensity anthropogenic disturbance: a case study of Lake Chaohu watershed. *Journal of Lake Sciences*,2026,38(2):749-761. doi: 10.18307/2026.0256.[高志杰, 肖启涛, 谢晖等. 高强度人类活动干扰下河流水体 CO2 分压及其排放通量的时空分异：以巢湖流域为例. 湖泊科学,2026,38(2):749-761.]

[16] Wang H, Ma W, Yang Z, *et al*. Estimation of base flow nitrogen and phosphorus output flux in the Simao River based on digital filtering and LOADEST model. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(6): 186-194.[王辉, 马巍, 杨智, 等. 基于数字滤波和 LOADEST 模型的思茅河基流氮磷输出通量估算. 水资源保护, 2023, **39**(6): 186-194.]

[17] Sui XG, Wang FY, Miao FK, *et al*. Estimation of pollutant fluxes into the Yellow River based on the LOADEST model. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2025, **47**(3): 120-129.[隋修国, 王方钰, 缪丰锴等. 基于 LOADEST 模型的黄河入海污染物通量估算. 海洋湖沼通报(中英文), 2025, **47**(3): 120-129.]

[18] Xi SS, Zhou CC, Liu GJ, *et al*. Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 542-547.[奚姗姗, 周春财, 刘桂建等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征. 环境科学, 2016, **37**(2): 542-547.]

[19] Xie ST, Zhu HL, Tang XX, *et al*. Ecological protection and restoration of the mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in the Chaohu Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2023, **39**(2): 252-258.[谢三桃, 朱慧奕, 唐晓先等. 巢湖流域山水林田湖草生态保护和修复. 水资源保护, 2023, **39**(2): 252-258.]

[20] Ning CW, Bao Y, Huang T, *et al*. Sources and spatial variation of dissolved organic matter in summer water of inflow rivers along the Chaohu Lake watershed. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3743-3752.[宁成武, 包妍, 黄涛等. 夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化. 环境科学, 2021, **42**(8): 3743-3752.]

[21] Liang K, Jiang Y, Fuller K, et al. Large variability of nitrate load estimated from sparse measurements by typical methods in Atlantic Canada. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, **13**: 1557004.

[22] Jia LD, Hu HX, Du XZ, *et al*. Impact of sampling strategy and frequency of river water quality on nitrogen and phosphorus load estimation. *China Environmental Science*, 2024, **44**(4): 2111-2118.[贾临东, 胡宏祥, 杜新忠等. 河流水质采样策略与频率对氮磷负荷估算的影响. 中国环境科学, 2024, **44**(4): 2111-2118.]

[23] Ma X, Peng W, Tong B, *et al*. Estimation of Pollutant Load in Typical Drainage Ditches of Ningxia Yellow River Diversion Irrigation Area Based on LOADEST Statistical Model. Water, 2023, **16**(1): 120.

[24] Ren P, Fan ZY, Yang ZY, *et al*. Variation characteristics and causes of total phosphorus in small and medium-sized gate-controlled lakes along the Yangtze River: a case study of Lake Shitang in Anqing City. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(4): 1359-1369.[任鹏, 范中亚, 杨忠勇等. 沿江城市中小型闸控通江湖泊总磷变化特征及成因分析——以安庆市石塘湖为例. 湖泊科学, 2023, **35**(4): 1359-1369.]

[25] Wang J, Liu AA, Zhang JW, *et al*. Effect of integrated landscape characteristics around Chaohu Lake on river water quality based on watershed units. *Environmental Science*, 2024, **45**(6): 3214-3224.[王杰, 刘安安, 张俊武等. 基于流域单元的环巢湖综合景观对河流水质的影响. 环境科学, 2024, **45**(6): 3214-3224.]

[26] 刘诺. 杭埠河流域湿地景观格局对非点源污染输出的影响[学位论文] 吉林大学, 2025.

[27] He M, Liu GJ, Wu L, *et al*. Spatial distribution and pollution assessment of dissolved heavy metals in Chaohu Lake Basin during the wet season. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5346-5354.[何苗, 刘桂建, 吴蕾等. 巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价. 环境科学, 2021, **42**(11): 5346-5354.]

[28] Yi YJ, Guo YM, Liu HX. Impacts of the Yangtze River Water Transfer Project on water quality of Lake Chaohu in different typical years. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(6): 1901-1911.[易雨君, 郭玉明, 刘泓汐. 不同典型年“引江济巢”工程对巢湖水质的影响. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 1901-1911.]

[29] 钱华, 钱圆, 高芮. 巢湖入湖河流不同污染物对降雨的响应关系分析. 水资源开发与管理, 2023, **9**(12): 46-53.

[30] Lin L, Wang ZL, Hu XL, *et al*. Analysis of the response characteristics of drought and flood losses based on remote sensing rice planting area. *Water Saving Irrigation*, 2025: 1-19.[林琳, 王兆林, 胡小龙等. 基于遥感水稻种植面积的旱涝损失响应特征分析. 节水灌溉, 2025: 1-19.]

[31] Wang ZF, Lin C, Xu JD, *et al*. Spatial differences in non-point source particulate phosphorus loads and critical influence factors in the Chaohu Basin. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 659-670.[王赵飞, 林晨, 许金朵 等. 巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间差异及关键影响因子研究. 农业环境科学学报, 2019, **38**(3): 659-670.]

[32] 胡珂歆. 降雨前后巢湖流域水环境变化及其影响原因[学位论文]; 中国科学技术大学, 2024.

[33] 吴杰, 陈郭青, 龙丹丹, 等. 晓天河径流变化及影响因素分析. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2025, **43**(1): 130-132.

[34] 水利部水文司. 水文站网规划技术导则实用方法. 河海大学出版社. 1993.

[35] 浦国佳, 俞丽琅, 苏营营, 等. “十三五”期间嘉兴市地表水水环境质量研究. 环境科学导刊, 2025, **44**(3): 53-58.

[36] Lu DL, Zhou JD, Duan K, *et al*. The inflow fluxes of chemical oxygen demand, total nitrogen and total phosphorus in the Maolingjiang River in Beibu Gulf. *Journal of Marine Sciences*, 2022, **40**(3): 86-98.[鲁栋梁, 周姣娣, 段克等. 北部湾茅岭江化学需氧量、总氮和总磷的入海通量. 海洋学研究, 2022, **40**(3): 86-98.]

[37] Chen J, Shi W, Jin X. Pollutant Flux Estimation of the Lijiang River Based on an Improved Prediction-Correction Method. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 868404.

[38] Moriasi DN, Arnold JG, Liew MWV, *et al*. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3): 885-900.

[39] Ali W, Liu J, Tian Y, *et al*. Quantifying variation of non-point source pollution and its impact factors: A study of Nansi Lake Basin. *Plos One*, 2025, **20**(2): e0318691.

[40] Ruxton GD, Beauchamp G. Time for some a priori thinking about post hoc testing. *Behavioral Ecology*, 2008, **19**(3): 690-693.

[41] Cleveland R B, Cleveland W S, McRae J E, et al. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 1990, **6**(1): 3-73.

[42] Zhang BF, Chen DJ. Dynamic response of riverine nitrate flux to net anthropogenic nitrogen inputs in a typical river in Zhejiang Province over the 1980-2010 period. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2911-2919.[张柏发, 陈丁江. 1980～2010 年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应. 环境科学, 2014, **35**(8): 2911-2919.]

[43] Xu DX, Qin YW, Zhang L, *et al*. Phosphorus forms and their distribution characteristics in sediments and soils of the water-level fluctuating zone in the backwater reach of an inflow river to the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1337-1344.[徐德星, 秦延文, 张雷等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究. 环境科学, 2009, **30**(5): 1337-1344.]

[44] Seitzinger S P, Mayorga E, Bouwman A F, *et al*. Global river nutrient export: a scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, **24**(4): 2009GB003587.

[45] Ensign S H, Doyle M W. Nutrient spiraling in streams and river networks. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,* 2006, **111**(G4): 2005JG000114.

[46] Chen H T, Wang C C, Song M L, et al. Research of the WRTDS model on long-term changes in water quality: progress and perspectives. *China Environmental Science*, 2023, **43**(S1): 268-276.[陈海涛, 汪成成, 宋梦来等. WRTDS 模型对长时间序列水质变化的研究进展. 中国环境科学, 2023, **43**(S1): 268-276.]

[47] Li J, Gao W, He JL, *et al*. Assessing source-sink effect and source apportionment of COD in Bosten Lake from 2014 to 2023. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, **45**(10): 268-278.[李江, 高伟, 贺金良等. 2014-2023 年博斯腾湖 COD 出入湖通量特征与溯源解析. 环境科学学报. 2025, **45**(10): 268-278.]

[48] 谢润婷. 非点源污染河流的水环境容量动态分析与定量研究[学位论文]; 浙江大学, 2017.

[49] 赵一蔚. 淮河王蚌区间流域基流与地表径流农业非点源污染量化研究[学位论文]; 安徽理工大学, 2021.

[50] Yang Y, Xu Z, Zheng W, et al. Rain Belt and Flood Peak: A Study of the Extreme Precipitation Event in the Yangtze River Basin in 1849. *Water*, 2021, **13**(19): 2677.

[51] Zhang J, Gao J, Zhu Q, *et al*. Coupling mountain and lowland watershed models to characterize nutrient loading: An eight-year investigation in Lake Chaohu Basin. *Journal of Hydrology*, 2022, **612**: 128258.

[52] Yuan XY, Yu ZM, Shi WM. Investigation of and countermeasures for non-point source pollution in rural small watersheds in river-net plain regions of North Zhejiang: A case study of Xinqi Village, Wukang Town, Deqing County. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(3): 193-198.[袁晓燕, 余志敏, 施卫明. 浙北地区平原河网农村小流域面源污染调查与防治对策: 以浙江省德清县武康镇新琪村为例. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(3): 193-198.]

[53] Huang J, Gao J, Jiang Y, *et al*. Sources, distribution and export coefficient of phosphorus in lowland polders of lake taihu basin, china. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 1274-1283.

[54] Zeng XL, Wang TT, Luo WS, *et al*. Characteristics and simulation of rainfall runoff and nitrogen & phosphorus outputs in facility agricultural area: A case study of flower greenhouse region in the East Coast of Lake Dianchi. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(5): 1061-1069.[曾晓岚, 王涛涛, 罗万申等. 设施农业生产区降雨径流和氮磷输出特征及模拟--以滇池东岸花卉大棚种植区为例. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1061-1069.]

[55] Ryberg K R. Structural equation model of total phosphorus loads in the red river of the north basin, USA and Canada. *Journal of Environmental Quality*, 2017, **46**(5): 1072-1080.

[56] King T V, Yoder A M. A trend analysis and model comparison of total phosphorus concentrations and loads in the Boise River near Parma, southwestern Idaho, water years 2003-21：Scientific Investigations Report 2024-5110[R]. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2024.

[57] Brett M T, Benjamin M M. A review and reassessment of lake phosphorus retention and the nutrient loading concept. Freshwater Biology, 2008, **53**(1): 194-211.

[58] Ballagh B, Ballagh A, Bushong J, *et al*. The Effect of Nitrogen Fertilizer Placement and Timing on Winter Wheat Grain Yield and Protein Concentration. *Agronomy*, 2025, **15**(8): 1890.

[59] Wang T, Fan Y, Xu Z, *et al*. Adopting cover crops and buffer strips to reduce nonpoint source pollution: Understanding farmers' perspectives in the US Northern Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **76**(6): 475-486.

[60] Wu S, Bashir MA, Raza Q-U-A, *et al*. Application of riparian buffer zone in agricultural non-point source pollution control--A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, **7**: 985870.

[61] Fu D, Gong Y, Chen C, *et al*. Nitrogen and Phosphorus Loading Characteristics of Agricultural Non-Point Sources in the Tuojiang River Basin. *Water*, 2023, **15**(19): 3503.

[62] Wang D, Gao X, Wu S, *et al*. A Comprehensive Review on Ecological Buffer Zone for Pollutants Removal. *Water*, 2024, **16**: 2172[EB/OL].(2024).

[63] Zhang Z, Li Y, Yang J, *et al*. Discussion on the Treatment of Rural Domestic Sewage in the Water Source Area of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project-A Case Study of a Village. *Water*, 2024, **16**(15): 2118.

[64] Yan Y, Xu J. Improving Winter Performance of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Northern China: A Review. *Wetlands*, 2013, **34**(2): 243-253.

[65] Wang JY, Zhang W, Yang YL, *et al*. Study on hysteresis characteristics between flood peaks and sediment peaks and their causes in the Tongguan–Xiaolangdi reach of the middle Yellow River (2002-2024). *Advanced Engineering Sciences*. https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20251111.1703.004.[王江瑜, 张为, 杨泱柳等. 2002～2024 年黄河中游潼关-小浪底河段洪峰沙峰异步特性及成因研究 工程科学与技术. https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20251111.1703.004.]