



请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

基于浓度与流量突变的河流总磷通量估算

黄洁钰,庞树江,王晓燕

引用本文:

黄洁钰, 庞树江, 王晓燕. 基于浓度与流量突变的河流总磷通量估算[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 644-653.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0679

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春 农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174-184 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853

基于人为氮净输入及入河系数的流域河流氮输出负荷估算

凡翔, 吴凤平, 孟岑, 叶磊, 李希, 张满意, 李裕元, 吴根义, 吴金水 农业环境科学学报. 2021, 40(1): 185-193 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0762

长江下游"玉米--花菜"轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究 朱文俊,李金文,钱晓雍,沈根祥,张敏,付侃,王振旗,赵庆节 农业环境科学学报.2021,40(10):2167-2178 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0323

亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素

申雅莉,周脚根,彭佩钦,吴金水 农业环境科学学报.2020,39(10):2420-2428 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1257

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊,邓旭哲,薛利红,侯朋福,徐德福,杨林章 农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2761-2769 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397



关注微信公众号,获得更多资讯信息

黄洁钰, 庞树江, 王晓燕. 基于浓度与流量突变的河流总磷通量估算[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 644-653. HUANG J Y, PANG S J, WANG X Y. Estimation of total phosphorus flux in river based on the change-point of concentration and flow[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 644-653.



基于浓度与流量突变的河流总磷通量估算

黄洁钰, 庞树江, 王晓燕*

(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘 要:为进一步加深对流量与水质浓度突变特征的理解,探究浓度与流量突变点对通量模拟的影响,本研究基于 Mann-Kendall 突变检验法以及贝叶斯突变点模型,对潮河流域20多年来(1992—2014年)的径流量、总磷(TP)浓度以及二者之间关系进行突变分析,并结合 LOADEST模型估算 TP 通量。结果表明:潮河流域径流、TP浓度整体均呈下降趋势,径流突变点发生于 1998年,突变前后的平均流量分别为 7.92 m³·s⁻¹和 2.86 m³·s⁻¹; TP浓度突变点发生于 1993 年和 1996年, 1992—1993 年、1994—1996 年和 1997—2014年平均浓度分别为 0.08、0.06 mg·L⁻¹和 0.03 mg·L⁻¹。TP浓度-流量关系在 2004 年 12 月前后发生突变,前后两个阶段的流量阈值分别为 2.36 m³·s⁻¹和 9.08 m³·s⁻¹。突变点前,TP浓度与流量的关系是典型的流量驱动模式;突变点后二者关系会在高流量情况下转变为稀释主导模式。基于突变点识别的分段建模有助于改善LOADEST模型的模拟效果,而不同类型突变点各有优势。基于TP浓度突变点的分段模型的整体模拟效果最佳,使纳什系数从 0.50 提高到 0.96;基于浓度-径流关系突变点的模型对关系突变后 TP 通量的模拟效果最佳,使纳什系数从 -0.31 提高到 0.89。此外本研究讨论了降水及流域管理措施的可能影响。研究表明,进行水质建模及负荷模拟时,考虑水质浓度与流量及其关系的突变可在一定程度上提高模型的适用性。

关键词:突变分析;浓度与流量关系;总磷;LOADEST模型;潮河

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0644-10 doi:10.11654/jaes.2023-0679

Estimation of total phosphorus flux in river based on the change-point of concentration and flow

HUANG Jieyu, PANG Shujiang, WANG Xiaoyan*

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: It is necessary to gain more insights into the characteristics of flow and water-quality concentration change points and explore the role of concentration and flow change points in flux simulation. Mann-Kendall trend analysis and a Bayesian-based change point recognition model were used to evaluate the material flux of rivers with the LOADEST model. The Chaohe River Basin was selected as the research area, and the long-term(1992—2014) variation and change points of flow, TP concentration, and the relationship between the two were explored. The results indicated that the overall flow trend and TP concentration were decreasing. The flow changed in 1998, with an average flow rate of 7.92 m³ · s⁻¹ and 2.86 m³ · s⁻¹ before and after it happened. The changes in TP concentration occurred in 1993 and 1996, with average concentrations of 0.08, 0.06 mg · L⁻¹, and 0.03 mg · L⁻¹ from 1992 to 1993, 1994 to 1996, and 1997 to 2014, respectively. Around December 2004, there was a change point in the relationship between the TP concentration and flow. Before and after the relationship change–point, the flow thresholds were 2.36 m³ · s⁻¹ and 9.08 m³ · s⁻¹, respectively. The TP concentration-flow relationship was typical of flow-driven regimes before the change point but changed to dilution-dominant regimes under high flow conditions. The simulation performance of the LOADEST model could be enhanced by segmental modeling with change points, and different types of change points had their advantages. The segmented model based on the TP concentration change–point, showed the best overall simulation results, which increased the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient (*NSE*) from 0.50 to 0.96. The model based on concentration-flow

收稿日期:2023-08-22 录用日期:2023-11-15

*通信作者:王晓燕 E-mail:wangxy@cnu.edu.cn

作者简介:黄洁钰(1995一),女,广西南宁人,博士研究生,从事流域水环境污染模拟研究。E-mail:huangjy163163@163.com

基金项目:北京市自然科学基金委员会-北京市教育委员会联合资助项目(KZ201810028047)

Project supported : Natural Science Foundation of Beijing and Beijing Education Development Foundation (KZ201810028047)

relationship change-points performed best after the relationship change-point, increasing the NSE of that period from -0.31 to 0.89. In addition, the possible impacts of precipitation and watershed management measures were discussed. In summary, when simulating water quality and flux, analyzing the change points in water quality concentration, flow, and their relationship may improve the model's applicability to a certain extent. Furthermore, the potential effects of precipitation and watershed management measures were discussed. To sum up, when simulating water quality and flux, evaluating the change points in water quality concentration, flow, and their relationship may enhance the model's applicability to a specific extent.

Keywords: change-point analysis; concentration-flow relationship; total phosphorus; LOADEST model; Chaohe River

河流水质在气候和人类活动的驱动下时刻发生 着变化,关系着河流生态系统的健康发展^[1-2]。农田 径流、畜禽养殖、生活污水排放、土地利用变化等人类 活动导致河流水质的恶化^[3-5],特别是自然水体中广 泛存在的营养物质元素(如氮和磷),如果过量不仅会 对水生生物有害,而且会降低饮用水质量,损害人类 健康^[6]。了解河流水文及水质特征变化及准确估算 物质通量,对流域生态系统保护、水资源管理及可持 续发展至关重要^[7-10]。

流域水文水质数据通常会由于洪水、干旱、人为 活动或环境中发生的其他变化而出现突变点^[11-12],探 究流域流量及水质浓度的长期变化与突变特征,对估 算河流物质通量及评估流域管理效果至关重要^[11,13]。 突变分析是分析水资源长期变化的重要工具,通常选 取某一水文或水质指标,通过相应的统计分析方法确 定其时间序列变化发生的时间节点^[14],常见的方法 有:Mann-Kendall(M-K)突变检验法^[12]、Pettitt突变检 验法^[15]、分段回归法^[16]、Wild二值分割法^[17]等。这些方 法通常应用于单因子时间序列的突变点分析,较难识 别因子间(如浓度与流量)的关系变化。而研究表明河 流氮磷浓度不仅受流量影响,且与流量间存在复杂的 非线性关系,同时存在阈值效应^[18],还可能存在时间变 化特征^[19]。为了深入理解河流水文水质特征的变化, 需要进一步识别浓度与流量关系的变化特征。

当前研究因子间关系变化的方法主要为贝叶斯 模型法,可将时间视为独立变量来检测营养物质元素 与流量、叶绿素含量等其他因子关系变化的时间^[20]。 研究者建立了包含径流量和多种水质因子的贝叶斯 统计模型,更好地认识浓度与流量之间潜在关系的变 化,理解河流水量、水质对人类活动变化的响应。比 如,Alameddine等^[11]提出了一种结合温度变化的贝叶 斯突变点-阈值模型,该研究量化了总有机氮浓度与 流量关系随时间的变化,判断美国Neuse河在实施一 系列管理措施后流量变化发生的年份^[11]。Pirani等^[19] 结合其他水质指标(水温、溶解氧和电导率)的影响, 识别河流水质组分时间动态及其对流量阈值效应的 响应和潜在的季节性变化^[19]。这类模型对于认识水 环境内部的复杂过程具有重要的理论意义和现实价 值,可为分析浓度与流量关系的突变与阈值特征提供 有力工具。

河流物质通量通常由径流量和相对离散的浓度 数据估算,LOADEST模型[21]是估算河流物质通量的 最常用方法之一。一些研究表明,LOADEST模型准 确性受水质组分类型[22]、采样频率[23]、土地利用和流 域面积[24-25]等多个因素影响。而模型模拟结果产生 偏差的根本原因可能来源于对浓度与流量关系的拟 合性差^[26]。一方面,LOADEST模型在模拟通量时,低 流量数据会对高流量数据的模拟造成影响,使得高流 量数据的模拟偏差较大,特别是磷这类受到径流冲刷 影响较大的水质组分^[26]。另一方面,LOADEST模型 假设浓度与流量之间的关系在不同时间和不同流量 状态下是固定不变的[7,27-28],并未考虑浓度与流量之 间复杂的关系变化,采用统一的模型结构估算通量可 能会产生较大的偏差。尤其是在长时间序列的模拟 中,当河流受到明显人为活动干扰,如点源的削减、土 地利用改变或土地管理措施等,都可能会导致浓度与 流量关系发生实质变化,从而使得物质通量评估效果 并不理想,降低了模型的拟合效果和预测能力。

已有一些研究表明,在水质建模及通量模拟时考 虑突变点,可以减少模型的时间不变性带来的偏 差^[11],但不同方法、不同参数得到的突变点存在差 异^{112]},当前仍需要加深对单因子(浓度或流量)突变点 以及浓度-流量关系突变点对通量模拟影响的理解。 为进一步加深对流量与水质浓度突变特征理解,探究 浓度及流量突变点对通量模拟的作用,本研究以潮河 流域为研究区,基于M-K突变检验法以及贝叶斯突 变点模型对流量、总磷(TP)浓度以及二者之间的关 系进行突变分析,并结合LOADEST模型估算其通量。 潮河流域位于密云水库上游,畜禽养殖、农业施肥、水 土流失是影响其水质的主要原因^[29-30]。21世纪以来, 该流域先后实施了多项水土保持和水华防治工程,有 效减少了水土和氮磷的流失^[31]。长期的人类活动使 流域水文水质产生的变化使其更适合于突变点的研 究。本研究主要目标:分析流域长期径流量和TP浓 度的变化趋势和突变特征;构建流域TP浓度与流量 的非线性突变响应关系,识别二者关系发生突变的时 间,分析浓度-流量关系变化特征;基于时间突变点 构建LOADEST模型,评估流域的TP通量,比较不同 突变点对通量模拟的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

密云水库是我国首都居民的主要地表饮用水 源^[29]。潮河位于密云水库上游,横跨北京和河北两省 市,如图1所示。潮河流域面积4888km²,约占密云 水库上游集水面积的40%。地貌以山地丘陵为主,占 总面积80%左右,属于大陆性季风气候,多年平均气 温为8.30℃,多年平均降水量为511mm,汛期(6—9 月)占年降水量的75%以上。研究区共有人口约40.5 万,农业人口约占总人口的77%,城镇人口约占23%。 21世纪前该流域大部分地区经济基础较差,以农业 为主,工业不发达,农田管理方式粗放。畜禽养殖、农 业施肥等人类活动以及水土流失是影响潮河水质的 主要原因^[32-33]。为了确保北京供水安全以及水库的 运行,1989—2005年在该流域陆续开展了多项水利



Figure 1 Location of study area

工程建设并采取了水土保持措施[31]。

1.2 分析方法与数据来源

数据分析主要分为三部分:(1)采用线性回归、局 部加权回归分析法(LOWESS)^[34]和M-K突变检验法 分析流量与浓度的时间趋势与突变特征。(2)通过改 进的贝叶斯突变点模型^[19]识别浓度-流量关系变化; 运用WinBUGS 14专业软件包基于马尔科夫链蒙特 卡洛(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)算法对TP浓 度-流量关系突变识别模型进行主要参数估计;此部 分将在1.3中详细介绍。(3)基于以上突变点运用 LOADEST模型进行分段拟合,并比较模型改进前后 的拟合精度。

线性回归、LOWESS法是常见的趋势分析方法, LOWESS法相较于线性回归更能够处理与描述数据 的局部波动特征。M-K突变检验法是一种非参数统 计检验方法,被广泛应用于水文气象变化研究中[35]; 该方法可通过正向序列和反向序列的趋势变化统计 量UF和UB的交点判断是否存在突变点;若UF和UB 在95.00%显著性(P=0.05)的置信区间[-1.96,1.96]内 存在交点,则该交点为时间序列突变点。LOADEST 模型运用中,选取观测日期当日的流量和浓度监测数 据作为平均流量和平均浓度,平均流量与平均浓度的 乘积作为当日通量的观测值,并与模拟结果进行比较 验证。最终模拟结果通过均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)和纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSE)进行评价^[31]。主要数 据分析基于 MATLAB 程序脚本实现,后续所有数据 整理汇总与图形绘制工作均用Origin软件完成。

研究中潮河流域监测站(下会站)的流量、水质数 据来自密云水库管理处,其中径流量(m³·s⁻¹)数据为 逐日尺度,水质数据包括:TP浓度(mg·L⁻¹)、水温 (℃)、溶解氧(%)和电导率(μS·cm⁻¹),为逐月尺度, 筛除缺失值共262组水质数据。以上实际监测数据 时间跨度为1992—2014年,共计23 a。

为了探讨流量和TP浓度变化成因,对潜在的影响因素进行分析,包括:降水、净人为磷输入(Net Anthropogenic Phosphorus Input, NAPI)和归一化植被指 数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。降 水数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/),站 点为密云站,时间跨度为1992—2014年; NAPI根据研 究区各区县统计年鉴提供的社会经济数据计算,时间 跨度为1995—2014年; NDVI数据来自于资源环境科 学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI),时 间跨度为1998—2014年。以上数据均以年为尺度, 个别年份缺失数据根据已有数据的线性趋势估算。

1.3 贝叶斯突变点模型

模型定义时间*t*上观测到的TP浓度(*y_i*)为因变量, 而径流量和其他水质参数被视作为自变量;引入了术 语"突变点"来表示时间上的变化点,以"阈值"表示流 量范围的变化。假设TP浓度对数服从正态分布:

$$\ln(y_i) \sim Normal(\mu_i, \sigma^2);$$
 (1)
其中, μ_i 和 σ 分别为分布的均值和标准差,由于对 y_i 进
行对数运算,故不考虑量纲。然后,定义 μ_i 为包含突
变点和流量阈值的非线性水质模型,引入基于惩罚样
条的非参数平滑函数表征每个水质属性的非线性影
响,并纳入突变点结构相关的参数,最终 u_i 具体计算
公式如下:

$$\mu_{i} = \beta_{0} + \sum_{j=1}^{p} \beta_{j} x_{ij} + \sum_{j=1}^{p} \sum_{k=1}^{K} b_{kj} (x_{ij} - \kappa_{kj})^{d} + \sum_{h=1}^{4} \delta_{h} v_{ih}$$
(2)

式中: β_0 为全局截距; β_i 为水质变量j的样条函数待拟 合参数($j=1, \dots, p$); x_{ij} 为第t时刻标准化水质变量j的 取值($t=1, \dots, T$); b_{ij} 为所选取样条函数的系数序列, κ_{ij} 为 x_{ij} 的样本分位数($k=1, \dots, K, K=5$),当($x_{ij} - \kappa_{ij}$)d>0时, $b_k=1$,否则 $b_k=0$;d为样条函数的次数,设为3。 δ_h 是与突变点结构相关的系数($h=1, \dots, 4$;分别代表不 同情况:1-突变点前小于流量阈值;2-突变点前大于 或等于流量阈值;3-突变点后小于流量阈值;4-突变 点后大于或等于流量阈值)。 v_{th} 表示t时刻流量对数 与所对应流量阈值对数的差; $\delta_h v_{th}$ 可表示流量增加的 影响。

模型各参数取值以及不确定范围确定采用MCMC 算法,该方法已广泛应用于统计模型参数估计及参数 不确定性分析等领域^[36-38]。在WinBUGS 14^[39]的MC-MC参数估计中,其中一共设置了3条马尔科夫链,每 条链采样 20 000次。各项水质影响因素的惩罚样条 计算参照相关文献^[19]。

2 结果与分析

2.1 流量与TP浓度趋势及突变分析

图2展示了潮河流域流量、TP浓度的趋势与突变分析结果。可以看到流域径流量总体呈下降趋势(图2a)。M-K突变分析中统计量UF和UB在95.00%显著性临界限的上限和下限区间,即[-1.96,+1.96]内存在的交点,以此判断流域径流量在1998年初出现突变(图2b),突变前后的平均流量分别为7.92 m³·s⁻¹和

2.86 m³·s⁻¹,突变前的平均流量明显高于突变后的平均流量。

潮河流域TP浓度呈现明显的下降趋势。根据线 性趋势结果,TP浓度以平均每年1.38×10⁻³ mg·L⁻¹的 速度降低(图 2c)。根据M-K突变分析结果,TP浓度 在1993年初和1996年底出现突变(图 2d)。据此,TP 浓度时间变化总结为三个阶段:下降阶段(1992— 1993年)、速增阶段(1994—1996年)和波动降低阶段 (1997—2014年);三个时间段平均浓度分别为0.08、 0.06 mg·L⁻¹和0.03 mg·L⁻¹。在1997—2014年,TP浓度 于 2004年底出现峰值,但未形成突变;2005年以后, TP浓度基本维持在0.03 mg·L⁻¹以下的低浓度水平。

2.2 浓度-流量关系突变的识别

表1展示了浓度-流量关系的突变点-阈值模型 相关参数。结果显示,潮河流域TP浓度与流量的非 线性关系在2004年12月前后发生突变(图3)。可据 此将TP浓度-流量关系划分为前后独立的两个阶段: 1992—2004年和2005—2014年。前后两个阶段的流 量阈值分别为2.36 m³·s⁻¹和9.08 m³·s⁻¹。模型中温 度、电导率对TP浓度的影响系数为正(β₁,β₂>0),产生 正面影响;溶解氧则表现出负面影响(β₃<0)。

河流物质浓度-流量关系可以分为两种模式:稀 释主导模式和流量驱动模式^[11]。将大于或等于阈值 的流量称为高流量,小于阈值的流量称为低流量。突 变点与流量阈值将流域出口的流量与对应的TP浓度 分为了4组(表1):突变前-低流量(δ₁);突变前-高流 量(δ₂);突变后-低流量(δ₃);突变后-高流量(δ₄)。结 果显示,在突变点前,TP浓度与流量的关系是典型的 流量驱动模式(δ₁,δ₂>0)。在突变点后,浓度与流量关

表1 突变点-阈值模型参数

Table 1 Parameters of the change point-threshold model					
参数	均值	标准差			
Parameter	Mean value	Standard deviation			
τ(时间突变点)	2 004.12	_			
φ_1 (突变前流量阈值)	2.36	2.08			
$\varphi_2(突变后流量阈值)$	9.08	1.97			
β ₀ (全局截距)	8.63	13.65			
$\beta_1(温度的固定影响)$	0.10	0.05			
β2(电导率的固定影响)	0.06	0.06			
β3(溶解氧的固定影响)	-0.05	0.06			
$\delta_1(突变点前低于流量阈值的斜率)$	1.67	4.62			
$\delta_2(突变点前高于流量阈值的斜率)$	1.30	2.81			
δ ₃ (突变点后低于流量阈值的斜率)	0.29	7.28			
δ ₄ (突变点后高于流量阈值的斜率)	-0.10	4.72			

www.aes.org.cn





系发生转变,在低流量情况下仍是流量驱动模式(δ₃> 0),但在高流量情况下转变为稀释主导模式(δ₄<0)。

2.3 基于突变点的TP通量估算

依据流量、TP浓度以及TP浓度-流量关系的突 变分析得到了三类突变点,据此将观测时间序列划分 相应的子序列,利用LOADEST模型分别估算每个子 序列对应的污染物通量方程,并与总时间序列(1992— 2014年)进行比较(表2),并将不同模型的综合模拟 效果绘制散点图(图4),比较不同突变点设置对负荷 模拟的影响。根据LOADEST模型统计指标,LOAD-EST模型所模拟的不同时段的TP通量与实测值的吻 合程度较高,方程决定系数*R*²在0.66~0.93之间,模型 优化系数均具有显著性统计学意义(显著性水平*P*< 0.05),说明LOADEST模型能够满足潮河流域TP的 通量评估。

整体上看,模拟结果表现出分段模型优于未分段 模型。其中,基于TP浓度突变点的模型(模型3)表现 最佳,使NES由未分段模型(模型1)的0.50提高到 0.96;与之表现相近是基于流量突变点的模型(模型 2,NES=0.95);模型2和模型3的线性拟合方程斜率 均接近于1,RMSE相比模型1有所降低(图4b、图4c 和表2)。基于TP浓度-流量关系突变点分段模型的





NES虽然没有模型2和模型3高,但比模型1模拟TP的NES提高了0.20(图4d),整体的RMSE也有所降低,TP通量的拟合曲线斜率由0.34提高到0.58,增加了0.24。

为了方便比较,根据所有类型的突变点,将各模型的序列进行分段比较,共分为四段(表3,1997年与1998均存在突变点,由于时间较近,为方便统计统一为1997年)。在1992—1996年的两个阶段,分段模型的表现均优于未分段模型,其中以模型3的NES最

表2 不同突变点设置下各阶段LOADEST模型回归方程

Table 2 Regression equations of LOADEST models at different stages under different change-point settings

	0	1	8	0 1	0		
模型编号 Model C Number C	突变点设置 Change paint Setting	时间跨度 Time phase	LOADEST 回归方程 LOADEST regression equation	统计指标 Statistical indicators	评化 Evaluatio	评价指标 valuation indicators	
	Change-point Setting			R^2	NES	RMSE/t	
模型1	无突变点	1992.01—2014.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi d \text{time}) + a_3 \cos(2\pi d \text{time}) + a_4 d \text{time}$	0.73	0.50	0.16	
模型2	流量突变点	1992.01—1997.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi d \operatorname{time}) + a_4 \cos(2\pi d \operatorname{time}) + a_5 d \operatorname{time} + a_6 d \operatorname{time}^2$	0.79	0.95	0.10	
		1998.01—2014.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi d \text{time}) + a_3 \cos(2\pi d \text{time}) + a_4 d \text{time}$	0.67	0.81	0.02	
模型3	TP浓度突变点	1992.01—1993.02	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 d$ time	0.93	0.98	0.05	
		1993.03—1996.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 d \text{time}$	0.84	0.96	0.09	
		1997.01—2014.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi d \operatorname{time}) + a_3 \cos(2\pi d \operatorname{time}) + a_4 d \operatorname{time}$	0.66	0.78	0.02	
模型4	TP浓度-流量关系突变点	1992.01—2004.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi d \operatorname{time}) + a_4 \cos(2\pi d \operatorname{time}) + a_5 d \operatorname{time} + a_6 d \operatorname{time}^2$	0.73	0.69	0.17	
		2005.01-2014.12	$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \sin(2\pi d \operatorname{time}) + a_3 \cos(2\pi d \operatorname{time}) + a_4 d \operatorname{time}$	0.78	0.89	0.01	

注:表中L为TP通量(kg·d⁻¹),a₀~a₆为方程待拟合系数,O为实测流量数据(ft³·s⁻¹);dtime表示中心化后的十进制时间。

Note: *L* represents the total phosphorus flux $(kg \cdot d^{-1})$, $a_0 \sim a_6$ represent the fitting coefficients of the equation, *Q* is the observed runoff data $(ft^3 \cdot s^{-1})$, and *dtime* is the decimal time after centralization.

高。在1997—2004年阶段,模型2和模型3效果均较好,NES>0.80,但模型4表现不佳;而对于2005—2014阶段,模型4的NES最高,对比模型1它使NES由-0.31提高到0.89。

综合来看,以突变点对河流TP通量进行分段估算,一定程度上有助于提高LOADEST模型模拟河流

表 3 不同阶段各模型评价指标对比 Table 3 Comparison of evaluation indicators for different

stages and models

时间跨度	模型编号	评价指标 Evaluation indicator		
Time phase	Model number	NES	RMSE	
1992.01—1993.02	模型1	0.43	0.37	
	模型2	0.96	0.09	
	模型3	0.98	0.05	
	模型4	0.87	0.18	
1993.03—1996.12	模型1	0.49	0.34	
	模型2	0.94	0.12	
	模型3	0.96	0.09	
	模型4	0.70	0.26	
1997.01-2004.12	模型1	0.45	0.05	
	模型2	0.85	0.02	
	模型3	0.83	0.03	
	模型4	-1.52	0.10	
2005.01-2014.12	模型1	-0.31	0.03	
	模型2	0.54	0.02	
	模型3	0.52	0.02	
	模型4	0.89	0.01	

物质通量的准确性,而不同的突变点类型对模型的优 化效果不同。

3 讨论

3.1 流量和TP浓度突变的成因分析

流量和TP浓度整体呈下降趋势,时间序列突变 发生在1992—1998年之间,虽然突变发生的时间节 点不一致但是时间相对靠近。相关分析显示流量及 TP浓度 Pearson 相关系数为 0.45(P<0.05), 一定程度 上说明TP浓度变化与流量关系密切,TP浓度的突变 可能与流量的突变存在关联。研究结合了潜在的影 响因素(降水、NAPI和NDVI)进行讨论,这些因素的 变化趋势如图5所示。NAPI作为磷的输入来源,总体 呈上升趋势,无显著突变点;与流量及TP浓度呈负相 关,Pearson相关系数分别为-0.55(P<0.01)和-0.42(P< 0.05),说明存在其他因素控制了磷的输出和变化。 NDVI整体也呈上升趋势,与流量呈反比(Pearson相 关系数:-0.54,P<0.01),体现了植被覆盖增加对于水 土保持具有积极作用,但由于NDVI不存在突变点,与 流量和TP浓度的突变缺少关联性,其影响仍需进一 步讨论。

降水是径流的主要驱动因素。在1992—1998年 期间,降水出现了多个突变点(1992年、1993年和 1996年),与流量以及TP浓度的突变点的时间较为一 致。这期间多年为丰水年,降雨量较大,降雨径流冲



Figure 4 Results and comparison of flux simulation of LOADEST model

刷使得泥沙进入河道,增大了河流中的TP浓度;而后 1999—2002年降水相对较少,多为平水年及枯水年, 径流和TP浓度也相应减少。虽然1989—1993年流 域已实施了大量的水土保持措施,以及20世纪70— 80年代建成的水利工程也开始运作,但由于1994年 及1998年出现暴雨和山洪,水土保持措施的减水作 用可能被暴雨所导致的强度产流作用所掩盖^[40]。综 合以上讨论,1992—1998年期间径流量及TP浓度的 时间序列突变的发生主要受降水变化的控制。

3.2 TP浓度-流量关系突变的成因分析

潮河流域TP浓度-流量关系在2005年前后发生 了转变,突变前为典型的流量驱动模式,突变后在高 流量情况下为稀释主导模式。虽然浓度-流量关系 是复杂的非线性关系,但利用线性趋势依然可以看 出,突变前在高、低流量区流量与TP浓度均呈弱正相 关(图 6a),TP浓度随流量的增加而增加;突变后,线 性趋势由弱正相关转为弱负相关(图 6b),这可能表 明超过流量阈值后,流域景观的磷流失不再随着流量 的增加而增加。这与在英国 Hampshire Avon 河对磷 的研究结果类似,在突变点之前高流量与磷酸盐增加 的关系并不显著,突变点后较高水平的河流流量似乎 与磷酸盐稀释有关,即稀释主导模式^[19]。由于这项研 究时间跨度较短,研究者认为此现象受到极端暴雨事 件的影响。

虽然气候变化或极端天气的发生也可能导致浓度-流量关系突变,但从长时间尺度来看,潮河流域 TP浓度-流量关系突变更可能与流域水土保持措施 有关。潮河流域于1998—2000年启动退耕还林还草 和京津风沙源治理工程水土保持项目,至2005年均 属于实施阶段^[31,40]。近20多年来潮河流域自然景观 的恢复使得林草地面积比重明显增加,1998—2014 年流域的*NDVI*由0.73波动上升至0.83(图5)。植被 覆盖面积的增加很大程度上降低了流域的径流量和 土壤侵蚀强度^[41],也减少了伴随泥沙输出的颗粒态 磷^[42]。另一方面,城市化以及逐年增加的人口增大了 流域内的用水需求,也可能导致流域产流减少。但是 通过对比可以发现,除去已经讨论的1992—1998年 期间,2004年降水量也出现较高的峰值,虽然径流量



Figure 5 Trends and change-point analysis of precipitation, NAPI, and NDVI in the watershed

较低(年均2.46 m³·s⁻¹),但是出现了较高的TP浓度峰 值(0.29 mg·L⁻¹),这可能是强降雨冲刷导致颗粒态磷 的流失;关系突变点后,2010年流域也经历了较大的 降水,但对比1992—1998年间和2004年的数据,2010 年流量年均为2.81 m³·s⁻¹,TP浓度峰值为0.04 mg· L⁻¹,这表明随着强降雨被冲刷进入河流的TP减少了。 在Zhang等^[31]研究中也得到了类似的结论,他们发现 潮河流域气候和土地利用变化对年输沙量减少的贡 献率分别为4.12%和95.88%,土地利用变化对径流和 泥沙减少的贡献大于气候变化。潮河流域土地利用 变化的主要驱动力为上述工程与管理措施的实施,它 们对流域水文、水质特征产生了一定的影响^[31,43]。



Figure 6 Linear fitting trend of flow and concentration before and after the change point

3.3 突变点对通量模拟的影响

研究比较了基于三类突变点分段对TP通量模拟 的效果,并了解到基于突变点识别的分段建模有助于 改善LOADEST模型的模拟效果,虽然基于TP浓度突 变点的分段模型的效果最佳,但不同类型突变点侧重 点不同。由于TP浓度与流量呈正相关,基于M-K分 析的流量突变点与TP浓度突变点都识别了高流量引 起的突变,以此为分段结合LOADEST模型模拟,可以 减少低流量数据对高流量的影响,提高高流量数据的 模拟精确度^[26]。

运用突变点-阈值模型识别浓度-流量关系变 化,可以更好地理解流域中的物质运输过程及动态, 也可以较客观和明确地评价流域所采用的管理政策 成功与否和起效时间,可为管理者评估措施实施效果 以及制定未来管理计划提供参考。而基于浓度-流 量关系突变点的模型,将突变点-阈值模型与LOAD-EST模型结合,在一定程度上可以克服浓度-流量关 系时间不变性这一缺点,提高了突变点后对浓度-流 量关系的把握。同时也应该看到,当前突变点-阈值

www.aes.org.cn

模型仍存在一定缺陷。首先目前的方法中只假设了 一个突变点的存在,但研究结果表明考虑多个突变点 更能把握浓度与流量的变化,因此未来研究中可以推 广到多个突变点¹¹⁹¹。另一方面,突变点-阈值模型考 虑了水温、电导率以及溶解氧等水质参数对浓度-流 量关系的影响,而对降水、NDVI等自然或人为的环境 因素考虑较为欠缺。

此外,需要考虑分段模拟可能带来新的不确定 性。因为数据集是可能影响模拟准确度的原因之 一^[44],而数据的缺失对LOADEST模型的模拟结果会 造成一定的影响^[45]。对时间序列进行分段会造成每 个子序列的数据量减少,从而可能降低模拟效果。目 前,仅将浓度与流量的突变识别与LOADEST模型结 合,尚未应用于更多模型,因此对于其他模型的影响 效果尚不清楚。因此,在未来的研究中,或许可以将 突变点分析与更多模型结合,以及考虑开发涉及多个 突变点的模型。

4 结论

研究基于 Mann-Kendall 突变检验和贝叶斯突变 点模型识别潮河流域流量、TP浓度和TP浓度-流量 关系的变化点,并将突变点与LOADEST模型结合,以 更准确地模拟河流TP的通量。研究发现:

(1)潮河流域流量、TP浓度整体均呈下降趋势, 流量突变点发生于1998年;TP浓度突变点发生于 1993年和1996年。流量、TP浓度突变点的形成时间 相近,可能受到降水的控制。

(2)TP浓度-流量的非线性关系在2004年12月 前后发生突变。突变点前,TP浓度与流量的关系是 典型的流量驱动模式;突变点后二者关系会在高流量 情况下转变为稀释主导模式。TP浓度-流量关系的 突变可能与流域内水土保持措施有关。

(3)基于突变点识别的分段建模有助于改善 LOADEST模型的模拟效果,而不同类型突变点各有 优势。基于TP浓度突变点的分段模型的整体效果最 佳,基于浓度-流量关系突变点的模型对关系突变后 TP通量的模拟效果最佳。

参考文献:

- LEIGH C, BUSH A, HARRISON E T, et al. Ecological effects of extreme climatic events on riverine ecosystems; insights from Australia [J]. Freshwater Biology, 2015, 60(12):2620–2638.
- [2] 韩谞, 潘保柱, 陈越, 等. 黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布[J]. 环境科学, 2021, 42(12):5786-5795. HAN X, PAN B Z, CHEN Y,

- [3] CHEN D, HU M, WANG J, et al. Factors controlling phosphorus export from agricultural/forest and residential systems to rivers in eastern China, 1980—2011[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533:53–61.
- [4] PRASKIEVICZ S, CHANG H. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2009, 33(5):650– 671.
- [5] 黄益平, 王鹏, 徐启渝, 等. 袁河流域土地利用方式对河流水体碳、 氮、磷的影响[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9):2132-2142. HUANG Y P, WANG P, XU Q Y, et al. Influence of land use on carbon, nitrogen and phosphorus in water of Yuan River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(9):2132-2142.
- [6] WHITEHEAD P G, CROSSMAN J. Macronutrient cycles and climate change: key science areas and an international perspective[J]. Science of the Total Environment, 2012, 434:13–17.
- [7] APPLING A P, LEON M C, MCDOWELL W H. Reducing bias and quantifying uncertainty in watershed flux estimates: the R package loadflex[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(12):1–25.
- [8] ONGLEY E D, XIAOLAN Z, TAO Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmen*tal Pollution, 2010, 158(5):1159–1168.
- [9] 庞树江, 王晓燕. 流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用
 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(18):213-223. PANG S J, WANG X Y. Application of modified diffuse total nitrogen export coefficient model at watershed scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18):213-223.
- [10] 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 等. 流域氮素主要输出途径及变化特征
 [J]. 环境科学, 2018, 39(12):5375-5382. LI W C, LEI Q L, ZHAI L M, et al. Seasonal changes of the pathways of nitrogen export from an agricultural watershed in China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12):5375-5382.
- [11] ALAMEDDINE I, QIAN S S, RECKHOW K H. A Bayesian changepoint-threshold model to examine the effect of TMDL implementation on the flow-nitrogen concentration relationship in the Neuse River basin[J]. Water Research, 2011, 45(1):51–62.
- [12] SHARMA S, SWAYNE D A, OBIMBO C. Trend analysis and change point techniques: a survey[J]. *Energy, Ecology and Environment*, 2016, 1(3):123–130.
- [13] LAUDON H, SPONSELLER R A. How landscape organization and scale shape catchment hydrology and biogeochemistry: insights from a long-term catchment study[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Water, 2018, 5(2):e1265.
- [14] DAI D, LEI K, WANG R, et al. Evaluation of river restoration efforts and a sharp decrease in surface runoff for water quality improvement in North China[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17 (4): 44028.
- [15] CIVAN A, WORRALL F, JARVIE H P, et al. Forty-year trends in the flux and concentration of phosphorus in British rivers[J]. *Journal* of Hydrology, 2018, 558:314-327.
- [16] HUANG H, WANG Z, XIA F, et al. Water quality trend and changepoint analyses using integration of locally weighted polynomial regres-

sion and segmented regression[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(18):15827-15837.

- [17] PIOTR F. Wild binary segmentation for multiple change-point detection[J]. *The Annals of Statistics*, 2014, 42(6):2243-2281.
- [18] XU Q, ZHAI L, LIU X, et al. Hydrological transport pathways of dissolved organic nitrogen and their seasonal changes in an agricultural watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617:129054.
- [19] PIRANI M, PANTON A, PURDIE D A, et al. Modelling macronutrient dynamics in the Hampshire Avon river: a Bayesian approach to estimate seasonal variability and total flux[J]. Science of the Total Environment, 2016, 572:1449–1460.
- [20] LIANG Z, QIAN S S, WU S, et al. Using Bayesian change point model to enhance understanding of the shifting nutrients-phytoplankton relationship[J]. *Ecological Modelling*, 2019, 393:120–126.
- [21] RUNKEL R, CRAWFORD C, COHN T. Load estimator(LOADEST): a FORTRAN program for estimating constituent loads in streams and rivers[R]. Virginia: US Geological Survey, 2004.
- [22] GOSWAMI A, PAUL P K, RUDRA R, et al. Evaluation of statistical models: perspective of water quality load estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616:128721.
- [23] KAMRATH B, YUAN Y, MANNING N, et al. Influence of sampling frequency and estimation method on phosphorus load uncertainty in the Western Lake Erie Basin, Ohio, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617:128906.
- [24] TADA A, TANAKAMARU H. Unbiased estimates and confidence intervals for riverine loads[J]. Water Resources Research, 2021, 57: e2020WR028170.
- [25] HOROWITZ A J, CLARKE R T, MERTEN G H. The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(4):531-543.
- [26] HIRSCH R M. Large biases in regression-based constituent flux estimates: causes and diagnostic tools[J]. Journal of the American Water Resources, 2014, 50(6):1401-1424.
- [27] AULENBACH B T. Improving regression-model-based streamwater constituent load estimates derived from serially correlated data[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 503:55-66.
- [28] VERMA S, MARKUS M, COOKE R A. Development of error correction techniques for nitrate–N load estimation methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 432:12–25.
- [29] WANG X, LI Z, LI M. Impacts of climate change on stream flow and water quality in a drinking water source area, Northern China[J]. *Envi*ronmental Earth Sciences, 2018, 77(4):410.
- [30] 耿润哲, 王晓燕, 焦帅, 等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及 特征分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5):1484-1492. GENG R Z, WANG X Y, JIAO S, et al. Application of improved export coefficient model in estimating non-point source nutrient load from Miyun reservoir watersheds[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(5): 1484-1492.
- [31] ZHANG J, QIAO R, SONG Y, et al. Assessing runoff and pollutant loading upstream of the Miyun Reservoir for sustainable water resources management[J]. Water and Environment Journal, 2021, 36 (1):115-131.

- [32] 王俊,黄洁钰,李方圆,等.潮河流域人类活动氮输入对河流硝态 氮通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1):142-154.
 WANG J, HUANG J Y, LI F Y, et al. Influence of anthropogenic nitrogen input on river nitrate nitrogen flux in the Chaohe River watershed
 [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1):142-154.
- [33] DU L F, LIU J, LI S J, et al. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Miyun Reservoir [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 82:012084.
- [34] CLEVELAND W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots[J]. Journal of the American Statistical Association, 1979, 74(368):829-836.
- [35] WANG H, CHEN L, YU X. Distinguishing human and climate influences on streamflow changes in Luan River basin in China[J]. *Catena*, 2016, 136:182–188.
- [36] ZHENG Y, HAN F. Markov Chain Monte Carlo (MCMC) uncertainty analysis for watershed water quality modeling and management[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30 (1): 293-308.
- [37] WU Z, LIU Y, LIANG Z, et al. Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: a dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference[J]. Water Research, 2017, 116:231-240.
- [38] JIN X, XU C, ZHANG Q, et al. Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 383(3):147–155.
- [39] CRAINICEANU C M, RUPPERT D, WAND M P. Bayesian analysis for penalized spline regression using WinBUGS[J]. Journal of Statistical Software, 2005, 14(14):1–24.
- [40] 李子君, 李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响:基于 经验统计模型的评估[J]. 地理学报, 2008(9):958-968. LI Z J, LI X B. Impacts of engineering measures for water conservancy on annual runoff in the Chaohe River Basin based on an empirical statistical model[J]. Acta Geographica Sinica, 2008(9):958-968.
- [41] LI Z, LI X, XU Z. Impacts of water conservancy and soil conservation measures on annual runoff in the Chaohe River Basin during 1961— 2005[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(6):947–960.
- [42] 龙天渝, 钟少荣, 李业盛, 等. 基于改进的 SWAT模型的山地流域 吸附态总磷负荷模拟[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1314-1320. LONG T Y, ZHONG S R, LI Y S, et al. Simulation of adsorbed phosphorus load in a mountainous watershed based on an improved SWAT model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6):1314-1320.
- [43] NIU R, DU B, WANG Y, et al. Impact of fractional vegetation cover change on soil erosion in Miyun reservoir basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(8):2741-2749.
- [44] KIM J, LIM K J, PARK Y S. Evaluation of regression models of LOADEST and Eight-Parameter Model for nitrogen load estimations [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2018, 229(6):1-11.
- [45] CHEN L, SUN C, WANG G, et al. Event-based nonpoint source pollution prediction in a scarce data catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552:13-27.

(责任编辑:叶飞)