

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.024

# 基于数字滤波和 LOADEST 模型的思茅河基流 氮磷输出通量估算

王 辉<sup>1,2</sup>, 马 巍<sup>2,3</sup>, 杨 智<sup>2</sup>, 李必琼<sup>2</sup>, 杨 斌<sup>2</sup>, 严长安<sup>4,5</sup>

(1. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;  
3. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038; 4. 云南省生态环境科学研究院, 云南 昆明 650034;  
5. 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 云南 昆明 650034)

**摘要:**为定量解析云贵高原地区河流基流的氮磷输出通量过程,采用最小滑动法、Chapman-Maxwell 滤波法、Boughton-Chapman 滤波法及递归数字滤波法对澜沧江三级支流思茅河进行了基流分割,基于 LOADEST 模型模拟了思茅河总径流及基流氮磷输出通量过程,估算了基流的氮磷输出贡献。研究表明:Boughton-Chapman 滤波法对思茅河基流分割的适宜性较好,基流年均补给量约占思茅河总径流量的 66%;基于 LOADEST 模型构建的思茅河总径流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 输出通量模型方程判定系数  $R^2$  分别为 81.89% 和 72.67%,拟合效果较好,二者年均输出通量分别为 567.58 t 和 25.75 t;基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 年均输出通量分别为 391.57 t 和 18.87 t,对思茅河总径流氮磷输出通量的年均贡献率分别为 69% 和 73%;在做好陆域氮磷削减的同时,更要充分考虑到对基流氮磷污染的精准防控。

**关键词:**氮磷;输出通量;基流分割;LOADEST 模型;数字滤波;思茅河

**中图分类号:**X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0186-09

**Estimation of base flow nitrogen and phosphorus output flux in the Simao River based on digital filtering and LOADEST model** // WANG Hui<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>2,3</sup>, YANG Zhi<sup>2</sup>, LI Biqiong<sup>2</sup>, YANG Bin<sup>2</sup>, YAN Chang'an<sup>4,5</sup> (1. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China; 3. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China; 5. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake Basin, Kunming 650034, China)

**Abstract:** In order to quantitatively analyze the nitrogen and phosphorus output flux process of river base flow in Yunnan-Guizhou Plateau area, the minimum sliding method, Chapman-Maxwell filtering, Boughton-Chapman filtering and recursive digital filtering were used to segment the base flow of the Simao River, a tertiary tributary of the Lancang River. Based on the LOADEST model, the nitrogen and phosphorus output flux process of the total runoff and base flow of Simao River were simulated, and the base flow nitrogen and phosphorus output flux contribution were estimated. The results show that: Boughton-Chapman filtering is more effective for the base flow segmentation of Simao River, and the average annual supply of the base flow accounts for about 66% of the total runoff of Simao River. The determination coefficients  $R^2$  of  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP output flux model equation of Simao River total runoff based on LOADEST model are 81.89% and 72.67%, respectively, indicating a good fitting effect. The average annual output fluxes of  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP are 567.58 t, 25.75 t, respectively. The average annual base flow output fluxes of  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP are 391.57 t and 18.87 t, respectively, which contribute 69% and 73% to the average annual nitrogen and phosphorus total runoff output flux of Simao River, respectively. While doing a good job in reducing nitrogen and phosphorus in the land area, the precise prevention and control of base flow nitrogen and phosphorus pollution should be fully considered.

**Key words:** nitrogen and phosphorus; output flux; base flow segmentation; LOADEST model; digital filtering; the Simao River

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41761093);云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202105AC160015)

**作者简介:**王辉(1993—),男,工程师,博士研究生,主要从事流域水文及水环境模拟研究。E-mail:hhwh1993@163.com

**通信作者:**严长安(1986—),男,研究员,博士,主要从事环境系统模拟研究。E-mail:ycaandy88@163.com

通常认为地表径流及基流均是污染物入河的水文通道<sup>[1]</sup>,因此河流污染物通量通常由地表和基流通量组成。由于地下水文循环过程的滞后性,基流的养分输出往往比地表径流滞后很多<sup>[2]</sup>,许多流域地下水中的养分可能是数年乃至数十年累积的历史产物<sup>[3]</sup>。国内外研究表明,基流的污染输出对河湖水质有重要影响,如爱沙尼亚沃尔茨湖来自地下水的有机碳负荷占总负荷的69%~79%<sup>[4]</sup>,韩国Daejeon市基流贡献了约60%的硝酸盐负荷输出<sup>[5]</sup>,美国Chesapeake湾流域58%~73%的硝态氮入河负荷量来源于基流<sup>[6]</sup>,国内学者在长乐江流域<sup>[7]</sup>、岙作口溪<sup>[8]</sup>、玉泉溪流域<sup>[9]</sup>、梧溪流域<sup>[10]</sup>等也得到了相似的研究结论。鉴于基流与地表径流养分输出在途径及负荷贡献上的巨大差异,在流域污染(特别是非点源)治理中,如果不能将二者加以科学区分,仅把污染来源简单归咎于地表径流,将对流域水污染综合治理工作产生误导<sup>[11]</sup>。因此,对基流进行分割研究并定量估算其输出通量具有重要意义。

基流分割方法主要可分为图解法、水量平衡法、水化学法以及数值模拟法等<sup>[12]</sup>,不同方法适用范围存在较大差异<sup>[12-14]</sup>,目前在流域尺度运用最广泛的是数值模拟法<sup>[15]</sup>,具有易操作、可重复等优点。而对基流污染物输出通量的估算之前主要采用流域模型进行模拟研究,但流域模型是基于一定的产汇流物理机制和大量经验关系假设构建的,在资料匮乏地区的应用受限<sup>[8]</sup>。近年来有学者基于数字滤波原理,将河流养分通量序列看成高低频信号的叠加进行基流污染物通量分割研究<sup>[7-10]</sup>。然而相比径流,河流养分通量更容易受人类活动的影响,通常造成基流污染物通量被低估,且数字滤波作为一种数值模拟方法,对不同流域适用性存在较大的差异,不同滤波方法及参数选取对分割结果影响较大<sup>[15]</sup>,但目前鲜有针对不同滤波方法分割效果的对比验证,导致分割结果存在一定的不确定性。基于此,本文采用4种不同的数值模拟方法对思茅河进行了基流分割,并根据基流指数比较、基流过程线比较以及基流分割结果可靠性评价结果对不同方法的适宜性进行了评估,基于LOADEST模型和“纯基流”序列筛选方法,定量解析了基流氮磷输出通量过程及其对河流氮磷输出通量的贡献,以为思茅河流域非点源污染治理中基流氮磷负荷的精准识别及防控提供参考。

## 1 研究区概况

思茅河是澜沧江三级支流,发源于普洱市思茅区南部的大尖山,由南向北贯穿思茅区在三棵桩下

游汇入普洱大河最终流入澜沧江。本文以思茅河水文站以上径流区为研究对象,面积为132.63 km<sup>2</sup>,研究区内主要有曼连河、老杨箐河、洗马河、石龙河、石屏河、机场左河6条入河支流,整体地势为北东南三侧较高、中西部较低,高程介于1 229~1 910 m(图1);主要土地利用类型为林地(50%)、建设用地(26%)、园地(15%)、水域(5%)及耕地(3%);多年平均降水量为1 454 mm,降水年内分布不均匀,汛期5—10月降水量约占全年的87%,干湿分明的气候特征明显。2015—2018年流域出口断面水质没有达到2020年水功能区划目标要求的Ⅳ类,主要超标因子为氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和总磷(TP),污染物产生量最高区域集中在中部石龙河、洗马河、老杨箐河等子流域。2018年末思茅区常住人口31.7万人,人口密度约为81人/km<sup>2</sup>;第一、二、三产业增加值结构为9.6:41.5:48.9;主要作物类型为茶叶、蔬菜及水果等,2018年农业共施用氮肥6 119 t、磷肥531 t及复合肥1 310 t(折纯)。

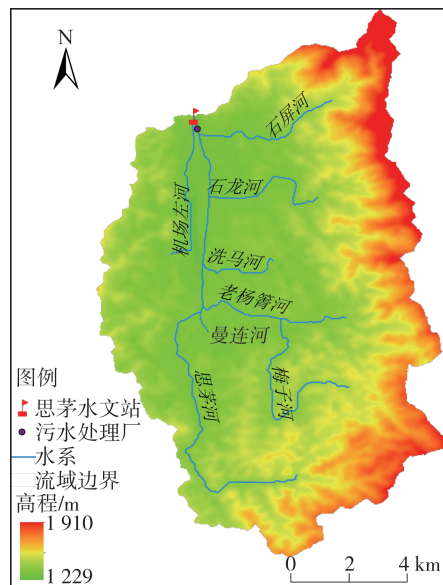


图1 研究区范围及高程

Fig. 1 Scope and elevation of study area

## 2 研究数据与方法

### 2.1 数据来源

本文采用的降雨数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);尾水负荷数据来自普洱市思茅区第一污水处理厂2015—2018年经济运行指标统计年报;水量水质数据来自思茅河水文站2009—2018年逐日流量监测数据和2015—2018年2月1次的常规水质监测数据。经序列完整性及水质特征分析,挑选NH<sub>3</sub>-N、TP两个特征污染物指标进行分析。

## 2.2 基流分割方法

本文采用最小滑动法和 3 种数字滤波方法进行基流分割,对比验证不同方法的适宜性。

### 2.2.1 最小滑动法

最小滑动法分割流程为:将年内连续日径流序列划分为  $N$  个时段,每个时段的最小流量值乘上拐点因子与相邻时段的最小值作比较,若小于相邻时段的最小值,该点即为拐点;重复以上流程直至找出所有拐点,连接所有拐点得到基流过程线。拐点因子一般取 0.9,本文分割时段长采用试算法确定,为  $5\text{ d}^{[16]}$ 。

### 2.2.2 数字滤波法

**a. Chapman-Maxwell 滤波法。**该方法基本原理是假定基流为同时刻的地表径流和前一时刻基流的加权平均,具体分割方程为

$$q_t = \frac{k}{2-k}q_{t-1} + \frac{1-k}{2-k}Q_t \quad (1)$$

式中:  $q_t$ 、 $q_{t-1}$  分别为  $t$ 、 $t-1$  时刻基流量;  $Q_t$  为  $t$  时刻总径流量;  $k$  为退水系数,参考取值 0.900 ~ 0.950<sup>[17]</sup>。

**b. Boughton-Chapman 滤波法。**该方法具体的分割方程为

$$q_t = \frac{k}{1+C}q_{t-1} + \frac{C}{1+C}Q_t \quad (2)$$

式中  $C$  为固定值,参考取值 0.15<sup>[18]</sup>。

**c. 递归数字滤波法。**该方法具体的分割方程为

$$q_t = \frac{1-I_{\max}}{1-kI_{\max}}kq_{t-1} + \frac{1-k}{1-kI_{\max}}I_{\max}Q_t \quad (3)$$

式中  $I_{\max}$  为最大基流指数,根据研究区水文地质特征,参考取值 0.50<sup>[19]</sup>。

### 2.2.3 基流分割结果评价方法

**a. 一般评价指标。**采用流量过程线及基流指数评估不同方法分割的差异性,流量过程线主要依据年际涨落幅度、平滑程度、基流退水迟滞等特征进行定性比选<sup>[20]</sup>;基流指数为某一时段内基流量与总径流量的比值<sup>[21]</sup>,可反映时段内河川基流量的大小。

**b. 可靠性评价。**采用枯水指数与总径流量的乘积来估算基流实际观测值<sup>[22]</sup>。枯水指数为时段内出现频率大于或等于 90% 径流量  $Q_{90}$  和大于或等于 50% 径流量  $Q_{50}$  的比值,  $Q_{90}$ 、 $Q_{50}$  通过日流量历时曲线确定。此外,采用纳什效率系数 (NSE) 和平均相对误差 (RE) 作为各方法基流分割值的可靠性评价指标<sup>[23]</sup>。

## 2.3 LOADEST 模型原理

传统的水质监测通常只能获取时间跨度较大的

离散分布监测值,因而通量计算只能采用时段通量的计算方法<sup>[24]</sup>。为了克服监测频次对通量计算结果的不确定性影响,本文采用美国地质调查局开发的 LOADEST 模型进行污染物通量估算。LOADEST 模型基于水文水质监测数据,采用多元线性回归方法建立河流污染物通量模型方程<sup>[25]</sup>。LOADEST 模型内嵌了 11 个污染物通量模型方程,通过 AIC (Akaike information criterion) 准则和 SPPC (Schwarz posterior probability criterion) 准则<sup>[26]</sup> 优选,本文采用的 3 个模型方程如下:

$$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 \quad (4)$$

$$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi T_d) + a_4 \cos(2\pi T_d) + a_5 T_d \quad (5)$$

$$\ln L = a_0 + a_1 \ln Q + a_2 \ln Q^2 + a_3 \sin(2\pi T_d) + a_4 \cos(2\pi T_d) + a_5 T_d + a_6 T_d^2 \quad (6)$$

式中:  $L$  为污染物通量;  $Q$  为径流量;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $\dots$ 、 $a_6$  为需要计算的模型参数;  $T_d$  为计算时刻距离整个序列中心时刻的时间。

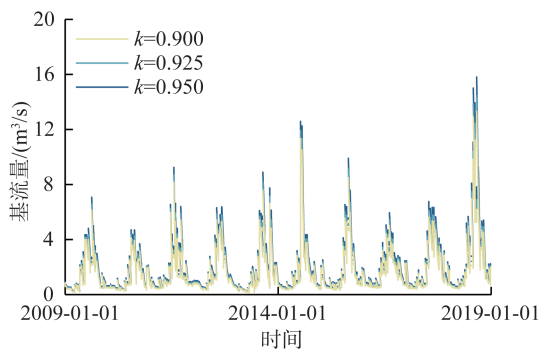
通过最大似然估计法 (MLE)、修正的最大似然估计法 (AMLE) 和最小绝对偏差法 (LAD) 进行模型方程参数估算<sup>[25]</sup>。通过判定系数 ( $R^2$ ) 评估优选出的模型方程拟合程度,  $R^2$  越接近 1,说明拟合效果越佳<sup>[27]</sup>;通过残差序列相关系数 (SCR) 检验残差序列的相关性, SCR 越小,说明残差之间相关性越低<sup>[28]</sup>;通过概率曲线相关系数 (PPCC) 检验非删失型数据残差是否符合正态分布<sup>[29]</sup>, PPCC 越接近 1,表示越接近正态分布;通过 Turnbull-Weiss statistic 法检验删失型数据残差是否符合正态分布,  $P$  值越小,表示残差越服从正态分布。

## 3 结果与分析

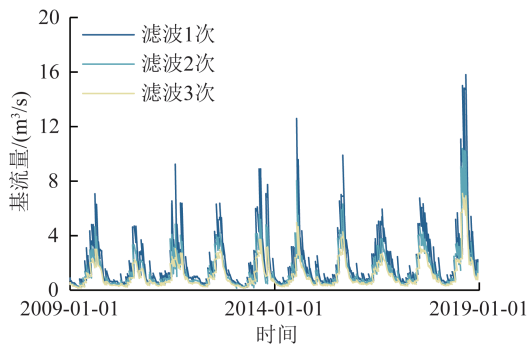
### 3.1 基流分割结果及验证

#### 3.1.1 参数选取

通过试算法确定滤波参数和滤波次数,以 Boughton-Chapman 滤波法为例,如图 2 所示,随着退水系数  $k$  的增大,分割得到的基流量逐渐增大,波动幅度也增大;随着滤波次数增加,分割结果逐渐减小,并且波动过程逐渐平缓。同时,日径流量序列在前后两天存在较大差异时,会出现基流量大于总径流量的高估现象,需要进行修正<sup>[15]</sup>。经过不同滤波参数和滤波次数的组合试算,确定退水系数  $k$  取值 0.950, Chapman-Maxwell 滤波法选择 1 次正向滤波, Boughton-Chapman 滤波法选择正-反 2 次滤波,递归数字滤波法选择 1 次正向滤波,分割出的基流量相对接近实际,无高估现象。



(a) 不同滤波参数



(b) 不同滤波次数

图2 Boughton-Chapman 滤波法基流分割过程线

Fig.2 Boughton-Chapman filtering segmentation process line

### 3.1.2 基流指数比较

如表1所示,从2009—2018年基流指数均值来看,最小滑动法分割的基流指数最大(0.71),递归数字滤波法分割的最小(0.59),而与枯水指数(0.68)最接近的是Boughton-Chapman滤波法分割的基流指数(0.66),说明Boughton-Chapman滤波法分割结果从量上更接近实际情况;以极值比来看,4种分割方法相近,介于1.08~1.19之间,说明4种方法分割结果年代际变化较小;以标准差来看,4种分割方法相近,介于0.01~0.03之间,说明4种方法参数选取恰当,基流分割结果稳定性相差不大。

表1 基流指数及其统计参数

Table 1 Base flow index and its statistical parameters

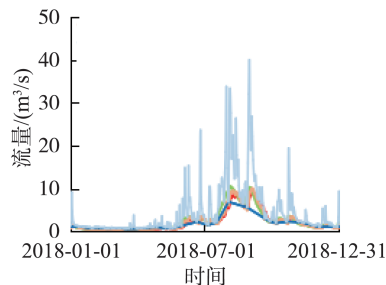
| 分割方法                 | 均值   | 最大值  | 最小值  | 极值比  | 标准差  |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| Chapman-Maxwell 滤波法  | 0.61 | 0.64 | 0.58 | 1.11 | 0.02 |
| Boughton-Chapman 滤波法 | 0.66 | 0.68 | 0.63 | 1.08 | 0.01 |
| 递归数字滤波               | 0.59 | 0.62 | 0.56 | 1.11 | 0.02 |
| 最小滑动法                | 0.71 | 0.75 | 0.63 | 1.19 | 0.03 |

### 3.1.3 基流过程线比较

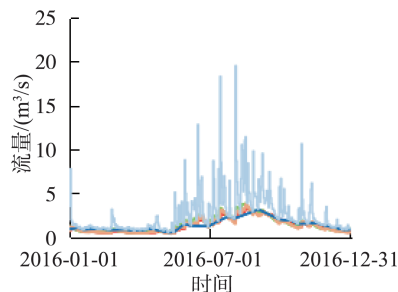
采用距平分析法划分得到研究时段丰水年(2018年)、平水年(2016年)、枯水年(2010年),对不同典型年的基流分割过程线进行比较分析,结果如图3所示,在3种数字滤波方法中,Chapman-Maxwell滤波法与递归数字滤波法的基流分割过程

线最为接近,汛期出现明显的涨落变化,相较而言Boughton-Chapman滤波法的基流分割过程线汛期涨落过程更平缓;最小滑动法的基流分割过程线拐点及折线段较多,平滑度低,且与总径流过程的一致性较高,不符合基流汇流时产生的阻尼和迟滞效应<sup>[20]</sup>,这与最小滑动法分割原理及分割过程中采用了插值处理有关。对比来看,Boughton-Chapman滤波法基流分割过程线更平缓,表现出较好的基流辨识能力。

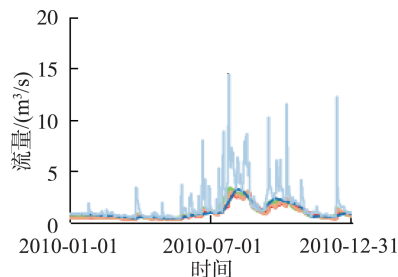
— Chapman-Maxwell滤波法 — Boughton-Chapman滤波法  
— 递归数字滤波法 — 最小滑动法 — 总径流量过程



(a) 丰水年(2018年)



(b) 平水年(2016年)



(c) 枯水年(2010年)

图3 不同典型年基流分割过程线

Fig.3 Segmentation process lines of base flow in different typical years

### 3.1.4 基流分割可靠性评价

由表2可知,相比其他方法,Boughton-Chapman滤波的基流分割可靠性更好,NSE为0.61,RE为-0.04。综合基流指数比较、基流过程线比较以及基流分割结果可靠性评价结果,均为Boughton-Chapman滤波法的分割效果更好,故认为Boughton-Chapman滤波法对思茅河基流分割的适宜性较好,

分割结果相对合理可信,基流是思茅河径流的重要组成部分,其年均补给量约占总径流量 66%。

表 2 不同分割方法可靠性评价指标

| Table 2 Reliability evaluation indexes of different segmentation methods |      |       |
|--------------------------------------------------------------------------|------|-------|
| 分割方法                                                                     | NSE  | RE    |
| Chapman-Maxwell 滤波法                                                      | 0.47 | -0.12 |
| Boughton-Chapman 滤波法                                                     | 0.61 | -0.04 |
| 递归数字滤波                                                                   | 0.52 | -0.14 |
| 最小滑动法                                                                    | 0.31 | 0.02  |

3.2 总径流氮磷输出通量过程模拟

3.2.1 模型构建与验证

根据河流污染物通量的估算原理,通过输入 2015—2018 年思茅河水文站的常规水质及逐日流量监测数据,LOADEST 模型根据 AIC 准则和 SPCC 准则进行模型方程优选,确定思茅河总径流 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 输出通量的最优回归模型方程(式(7)(8))。如表 3 所示,思茅河总径流 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量模型方程的判定系数( $R^2$ )分别为 81.89%、72.67%,表明二者总体拟合效果较好; $P$  值均较小,说明模型方程参数具有统计学意义;PPCC 介于 0.98~0.99 间,说明残差服从正态分布;SCR 介于 0.05~0.12 之间,表明序列残差相关性很低。综上所述,优选出的污染物输出通量模型方程较有效,适用于对思茅河总径流 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量的估算。

$$\ln L = 7.359 + 0.607 \ln Q + 0.085 \ln Q^2 \quad (7)$$

$$\ln L = 3.936 + 0.151 \ln Q + 0.056 \ln Q^2 - 0.181 \sin(2\pi T_d) + 0.055 \cos(2\pi T_d) - 0.018 T_d + 0.195 T_d^2 \quad (8)$$

表 3 总径流 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量模型方程检验结果

| Table 3 Tests results of NH <sub>3</sub> -N and TP output flux model equation of total runoff |                    |       |        |      |       |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------|--------|------|-------|--------|
| 模型参数                                                                                          | NH <sub>3</sub> -N |       |        | TP   |       |        |
|                                                                                               | 标准差                | $T$ 值 | $P$ 值  | 标准差  | $T$ 值 | $P$ 值  |
| $a_0$                                                                                         | 0.10               | 71.24 | <0.001 | 0.12 | 33.61 | <0.001 |
| $a_1$                                                                                         | 0.06               | 9.62  | <0.001 | 0.09 | 1.72  | 0.050  |
| $a_2$                                                                                         | 0.05               | 1.54  | 0.110  | 0.06 | 0.87  | 0.310  |
| $a_3$                                                                                         |                    |       |        | 0.12 | -1.51 | 0.080  |
| $a_4$                                                                                         |                    |       |        | 0.10 | 0.55  | 0.510  |
| $a_5$                                                                                         |                    |       |        | 0.05 | -0.35 | 0.670  |
| $a_6$                                                                                         |                    |       |        | 0.05 | 3.69  | <0.001 |

3.2.2 氮磷输出通量变化特征分析

根据 LOADEST 模型模拟结果,2015—2018 年思茅河总径流 NH<sub>3</sub>-N、TP 日均输出通量分别为 1.55 t 和 0.07 t,与水质水量实测序列计算结果的相对误差分别为 -8.1% 和 9.7%,在合理范围内;NH<sub>3</sub>-N、TP 年均输出通量分别为 567.58 t 和 25.75 t,其中 NH<sub>3</sub>-N 与李秦<sup>[30]</sup>的计算结果(498.2 t)相近,故综合认为模型计算结果是相对合理可信的。

根据日通量变化过程图(图 4),2015—2018 年 NH<sub>3</sub>-N 输出通量大致呈 4 次明显的年际涨落周期变化,年内分布基本与径流过程保持一致,即在丰水季(6—10 月)通量值相对较高,最大值出现在 8 月,而枯水季相对较低;2015—2018 年 TP 输出通量呈现明显的年际周期变化特征,而年内波动相对平稳,在 2—6 月相对较低,其他月份相差不大。采用肯德尔秩次相关检验对 2 个指标序列进行趋势分析,结果如表 4 所示,NH<sub>3</sub>-N 输出通量的  $|U|$  大于 1.96,表明其增大趋势显著( $\alpha=0.05$ ),而 TP 的  $|U|$  小于 1.96,表明增大趋势不显著;采用  $R/S$  分析进行变化趋势预测,二者 Hurst 值均大于 0.5,表明在未来 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量仍将持续增大。可见,对于思茅河而言,进行氮磷总量削减及控制是改善水质的重中之重。

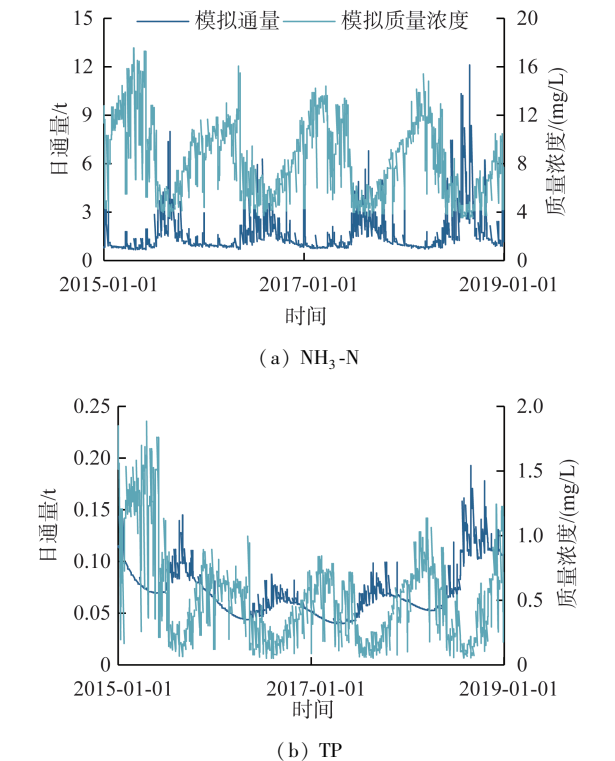


图 4 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 输出通量及质量浓度的日变化过程  
Fig. 4 Daily variation process of NH<sub>3</sub>-N and TP output fluxes and mass concentrations

表 4 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 输出通量的统计特征值

| Table 4 Statistical eigenvalues of NH <sub>3</sub> -N and TP output fluxes |          |            |      |         |          |
|----------------------------------------------------------------------------|----------|------------|------|---------|----------|
| 指标                                                                         | 日均输出通量/t | 95% 置信区间/t |      | $ U $ 值 | Hurst 指数 |
|                                                                            |          | 下限         | 上限   |         |          |
| NH <sub>3</sub> -N                                                         | 1.55     | 1.33       | 1.81 | 9.29*   | 0.81     |
| TP                                                                         | 0.07     | 0.06       | 0.08 | 0.19    | 0.95     |

注: \* 表示在  $\alpha=0.05$  置信水平下变化趋势显著。

2015—2018 年模拟的 NH<sub>3</sub>-N、TP 平均质量浓度分别为 8.36 mg/L 和 0.51 mg/L,与实测平均质量浓度(8.62 mg/L 和 0.54 mg/L)的相对误差分别为

-3.0%和-5.6%,总体模拟精度较好。而从模拟的污染物质量浓度变化过程看,与通量趋势变化一致性远低于径流过程,因此研究区径流变化对污染物输出通量的影响程度远大于污染物质量浓度,这也是NH<sub>3</sub>-N、TP输出通量逐渐增大的主要原因,与陈炼钢等<sup>[28]</sup>的研究结论一致。

3.3 基流氮磷输出通量定量解析

3.3.1 “纯基流”序列筛选

由于基流过程的复杂性、不确定性和难以监测性,目前还不能实现流域尺度基流量的直接测定,更没有直接测定基流负荷量的方法<sup>[7-9]</sup>。根据已有研究,通用做法是从实测序列中筛选出“纯基流”序列,认为“纯基流”期间河道水体完全由基流补给,相应的河流负荷近似等于“实测”基流负荷<sup>[31]</sup>。同时,考虑到思茅河在“纯基流”期间还存在上游污水处理厂尾水排放的影响,故实际基流输出通量还需扣除上游尾水负荷。本文实际基流输出通量的计算步骤如下:①BFI 准则筛选。根据国际通用的“纯基流”筛选准则(BFI 值大于或等于 0.9)<sup>[31]</sup>,从2015—2018 年思茅河实测径流、模拟水质序列(序列长度  $n = 1\,462$ )中筛选出符合条件的序列( $n = 69$ )。②剔除降雨因素影响。为了尽量降低降雨径流对“纯基流”序列筛选的影响,进一步剔除有降雨的时段,最终筛选出“纯基流”序列( $n = 50$ )。③构建基流输出通量模型。根据筛选出的“纯基流”序列构建基流污染物输出通量的 LOADEST 模型。④基流输出通量修正。“纯基流”序列计算的基流输出通量扣除上游思茅区第一污水处理厂尾水负荷(图 5(a))即认为是实际基流输出通量。

经过筛选的“纯基流”序列如图 5(b)所示,序列样本数为 50 个,序列均值为 1.53 m<sup>3</sup>/s,接近“纯基流”期间的总径流均值(1.63 m<sup>3</sup>/s),基流过程线大致呈 4 次明显的涨落周期变化,与“纯基流”期间总径流变化过程的相关性较高,说明筛选结果较为合理;从污染物指标看,“纯基流”期间 NH<sub>3</sub>-N、TP 平均质量浓度分别为 9.51 mg/L 和 0.65 mg/L,比2015—2018 年模拟的平均质量浓度(8.36 mg/L 和 0.51 mg/L)高,可能原因是“纯基流”期间思茅河上游无清洁水源补给,河道氮磷负荷除基流输出外,还有部分来自上游污水处理厂尾水负荷,导致“纯基流”期间河道水体氮磷聚集效应更明显。

3.3.2 基流氮磷输出通量模型构建与验证

根据筛选出的“纯基流”序列,构建基流 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 输出通量的 LOADEST 模型,基于 AIC 准则和 SPPC 准则优选出基流 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 输出通量的最优模型方程(式(9)(10)),各模型方程检验结果见

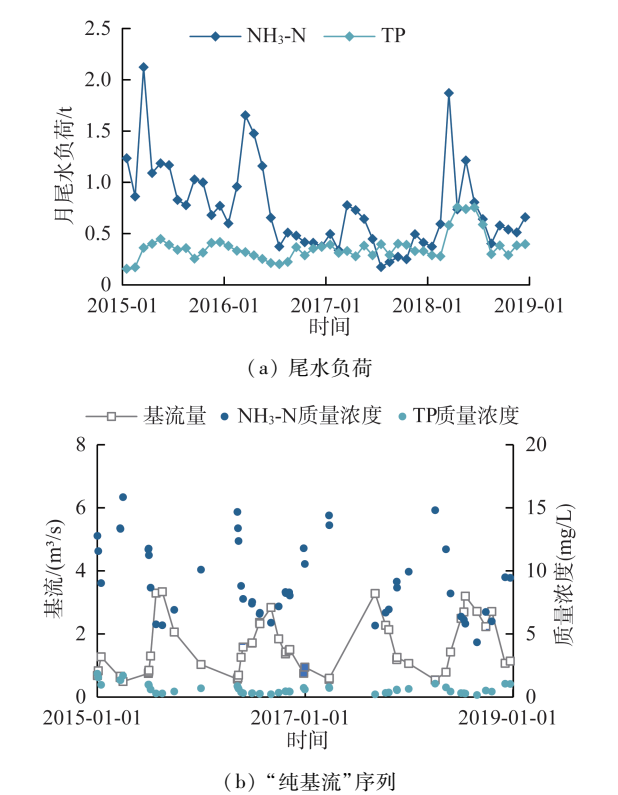


图 5 污水处理厂逐月尾水负荷和“纯基流”逐日序列过程  
Fig. 5 Monthly tail water load of sewage treatment plants in daily sequence process of “pure base flow”

表 5。基流 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量模型方程的判定系数( $R^2$ )分别为 99.78% 和 99.30%,总体拟合效果很好; $P$  值均较小,说明模型方程参数具有统计学意义;PPCC 介于 0.98~0.99 之间,说明残差服从正态分布;SCR 介于 -0.10~0.04 之间,表明序列残差相关性很低。综上所述,优选出的基流污染物输出通量模型方程均较有效,适用于对思茅河基流 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量的估算。

$$\ln L = 6.961 + 0.504 \ln Q + 0.081 \ln Q^2 + 0.011 \sin(2\pi T_d) + 0.007 \cos(2\pi T_d) - 0.004 T_d \quad (9)$$

$$\ln L = 3.835 + 0.101 \ln Q + 0.050 \ln Q^2 - 0.143 \sin(2\pi T_d) + 0.109 \cos(2\pi T_d) - 0.040 T_d + 0.195 T_d^2 \quad (10)$$

表 5 基流 NH<sub>3</sub>-N、TP 输出通量模型方程检验结果  
Table 5 Tests results of the NH<sub>3</sub>-N and TP output flux model equation of base flow

| 模型参数  | NH <sub>3</sub> -N |         |        | TP    |        |        |
|-------|--------------------|---------|--------|-------|--------|--------|
|       | 标准差                | $T$ 值   | $P$ 值  | 标准差   | $T$ 值  | $P$ 值  |
| $a_0$ | 0.004              | 1906.87 | <0.001 | 0.008 | 479.91 | <0.001 |
| $a_1$ | 0.007              | 70.95   | <0.001 | 0.013 | 7.83   | <0.001 |
| $a_2$ | 0.005              | 16.09   | <0.001 | 0.009 | 5.49   | <0.001 |
| $a_3$ | 0.006              | 1.73    | 0.069  | 0.012 | -12.04 | <0.001 |
| $a_4$ | 0.003              | 2.06    | 0.032  | 0.006 | 17.73  | <0.001 |
| $a_5$ | 0.002              | -1.90   | 0.047  | 0.003 | -11.26 | <0.001 |
| $a_6$ |                    |         |        | 0.003 | 63.15  | <0.001 |

3.3.3 基流氮磷输出通量估算及贡献分析

根据 LOADEST 模型模拟结果及基流输出通量

修正结果,基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 日均输出通量分别为 1.10 t 和 0.06 t,年均输出通量分别为 391.57 t 和 18.87 t。由图 6 可知,2015—2018 年思茅河基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 输出通量与总径流输出通量具有相似的波动过程,基流输出通量总体小于总径流输出通量,并且基流输出通量过程表现得更加平缓,符合基流汇流特征。由图 7(a)可知,基流  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 输出通量逐年上升,与年径流量和基流量变化趋势高度吻合,表明降雨径流的冲刷和淋溶作用是陆面污染物进入水体的主要驱动因子<sup>[32]</sup>,径流变化是研究区基流氮磷输出通量变化的主导因素。如图 7(b)所示,2015—2018 年思茅河基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 输出通量对总径流输出通量的贡献率呈微弱减小趋势,二者的年平均贡献率分别为 69% 和 73%,这与国内学者对长乐江流域<sup>[7]</sup>、梧溪流域<sup>[10]</sup>、双港溪流域<sup>[33]</sup>及凤羽河流域<sup>[34]</sup>,以及国外学者对美国 Chesapeake 湾流域<sup>[6]</sup>和 Raccoon River 流域<sup>[31]</sup>等研究结果相近,其主要原因为:①基流不仅是思茅河枯水期径流最主要来源,也是丰水期主要组成部分(BFI 均值为 0.66),同时径流过程变化主导着思茅河基流氮磷输出通量的变化(图 7(a));②研究区长期氮磷肥的过量使用导致土壤氮磷的大量累积,进而形成表层土壤遗留氮磷库,在降雨径流的冲刷和淋溶作用下进一步转化为地下水的遗留氮磷库<sup>[10]</sup>,导

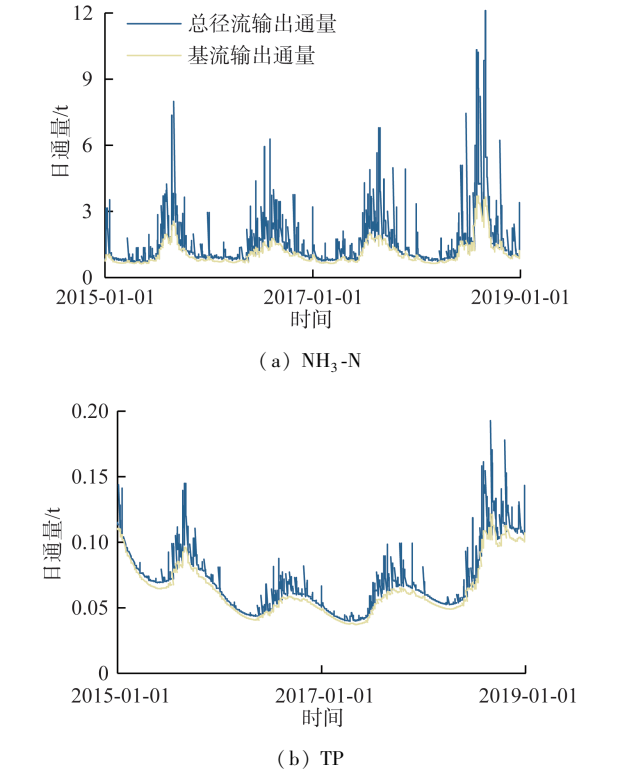


图 6 总径流和基流  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 输出通量日变化过程  
Fig. 6 Daily  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP output flux change process of total runoff and base flow

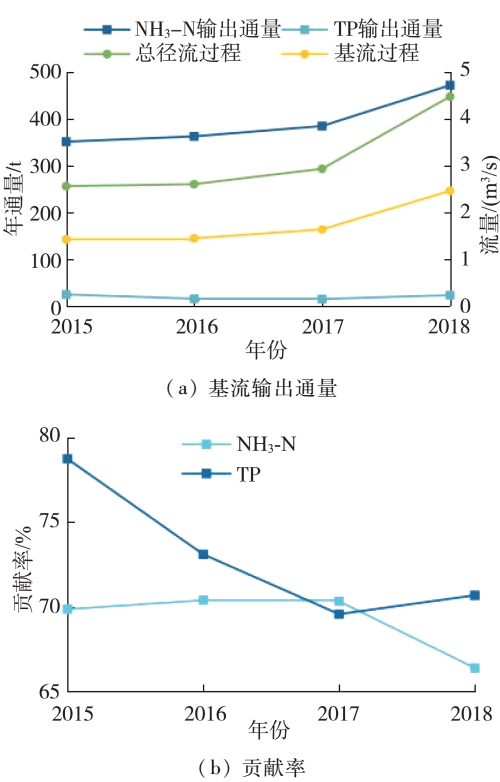


图 7 基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 输出通量及其贡献率  
Fig. 7 Base flow  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP output flux and its contribution rates

致基流中氮磷的富集;③研究区内林地面积占比最大(50%),高植被覆盖度能够对地表径流养分输移起到一定的拦截作用<sup>[8]</sup>,因而减小地表径流污染输出对河流水体的污染。综上所述,基流是思茅河氮磷输出的最主要方式,故在做好陆域氮磷削减的同时,更要充分考虑到对基流氮磷污染的精准防控。

4 结 论

- a. 根据基流指数比较、基流过程线比较以及基流分割结果可靠性评价结果,Boughton-Chapman 滤波法对思茅河的基流分割适宜性较好,NSE 为 0.61,RE 为 -0.04,思茅河基流年均补给量约占总径流量的 66%。
- b. 基于 LOADSET 模型构建的思茅河总径流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 输出通量模型方程判定系数( $R^2$ )分别为 81.89% 和 72.67%,总体拟合效果较好;2015—2018 年思茅河总径流  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 年均输出通量分别为 567.58 t 和 25.75 t,并有持续增大趋势,流域污染物总量削减及控制仍是改善思茅河水质的重点。
- c. 2015—2018 年思茅河基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 输出通量逐年增大,径流变化是基流氮磷输出通量变化的主导因素;基流  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 年均输出通量分别为 391.57 t 和 18.87 t,对思茅河总径流输出通量的年

均贡献率分别为 69% 和 73%。因此,有效防控基流氮磷输出通量,是今后思茅河流域非点源污染治理及水质改善的关键。

## 参考文献:

[1] HE Shengjia, LU Jun. Contribution of baseflow nitrate export to non-point source pollution [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(10): 1912-1929.

[2] VERVLOET L S C, BINNING P J, BØRGENSEN C D, et al. Delay in catchment nitrogen load to streams following restrictions on fertilizer application [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1154-1166.

[3] VAN METER K J, BASU N B. Catchment legacies and time lags: a parsimonious watershed model to predict the effects of legacy storage on nitrogen export [J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0125971.

[4] TAMM T, NÖGES T, JÄRVETA, et al. Contributions of DOC from surface and groundflow into Lake Võrtsjärv (Estonia) [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 599(1): 213-220.

[5] KIM G, LEE H, LIM Y, et al. Baseflow contribution to nitrates in an urban stream in Daejeon, Korea [J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(12): 3216-3220.

[6] MILLER M P, TESORIERO A J, CAPEL P D, et al. Quantifying watershed-scale groundwater loading and in-stream fate of nitrate using high-frequency water quality data [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(1): 330-347.

[7] 何圣嘉, 吕军. 流域基流氮磷流失的非点源污染定量研究 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 20-26. (HE Shengjia, LYU Jun. Quantitative study on nitrogen and phosphorus loss in baseflow of typical agricultural watershed based on non-point source pollution model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 20-26. (in Chinese))

[8] 潘可可, 龚健, 刘元元, 等. 地表和地下径流养分输出通量估算方法研究 [J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(5): 484-489. (PAN keke, GONG Jian, LIU Yuanyuan, et al. Estimation of the riverine nutrient export load from surface and ground runoff [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, 39(5): 484-489. (in Chinese))

[9] 黄宏, 廖忠鹭, 狄迪, 等. 基于 LOADEST 和数字滤波的水源地基流氮素输出定量方法应用实例 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 188-196. (HUANG Hong, LIAO Zhonglu, DI Di, et al. Case study of the quantification of baseflow nitrogen export using LOADEST and digital filtering in drinking water source region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 188-196. (in Chinese))

[10] 何圣嘉, 俞珂, 严琰, 等. 千岛湖地区上梧溪流域基流磷输出定量研究 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(9): 162-171. (HE Shengjia, YU Ke, YAN Yan, et al. Estimation of

baseflow phosphorus export of the Shangwu River watershed in the Qiandao Lake region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(9): 162-171. (in Chinese))

[11] MEALS D W, DRESSING S A, DAVENPORT T E. Lag time in water quality response to best management practices: a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(1): 85-96.

[12] 徐榕焱, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 352-359. (XU Ronghan, WANG Xiaogang, ZHENG Wei. Research progresses in baseflow separation methods [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(5): 352-359. (in Chinese))

[13] 王京晶, 徐宗学, 赵刚, 等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty analysis of urban storm water simulation [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 65-71. (in Chinese))

[14] PARTINGTON D, BRUNNER P, SIMMONS C T, et al. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458-459: 28-39.

[15] 莫崇勋, 谢燕平, 班华珍, 等. 不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2020, 18(2): 86-92. (MO Chongxun, XIE Yanping, BAN Huazhen, et al. Discussion on the applicability of different baseflow segmentation methods in Chengbi River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2): 86-92. (in Chinese))

[16] 张泳华, 刘祖发, 赵铜铁钢, 等. 东江流域基流变化特征及影响因素 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 75-81. (ZHANG Yonghua, LIU Zufa, ZHAO Tongtiegang, et al. Variation characteristics and influencing factors of base flow in Dongjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 75-81. (in Chinese))

[17] ARNOLD J G, ALLEN P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35(2): 411-424.

[18] CHAPMAN T G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1783-1784.

[19] ECKHARDT K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507-515.

[20] 樊晶晶, 刘纯, 穆征, 等. 不同基流分割方法在秦岭山区-黄土高原过渡带的对比应用及其演化规律研究 [J]. *华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2022, 43(3): 1-10. (FAN Jingjing, LIU Chun, MU Zheng, et al.

- Comparative application of different base flow segmentation methods in the transition zone between Qinling Mountains and Loess Plateau and its evolution law [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43 (3): 1-10. (in Chinese))
- [21] 吕向林,姬世保,仇亚琴,等. 汾河流域上游基流特征及其影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 147-153. (LU Xianglin, JI Shibao, QIU Yaqin, et al. Characteristics of base flow in upstream of Fen River Basin and its influencing factors[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 147-153. (in Chinese))
- [22] SMAKHTIN VU. Low flow hydrology: a review[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 147-186.
- [23] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 15-21. (HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, et al. Effects of rainfall patterns on urban waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 15-21. (in Chinese))
- [24] 宋为威,逢勇. 不同行政区入秦淮河污染物通量分担率研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 91-95. (SONG Weiwei, PANG Yong. Study on pollutant flux sharing rate of different administrative areas in Qinhuai River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 91-95. (in Chinese))
- [25] 严长安,杜展鹏,姚波,等. 滇池宝象河流域氮磷流失空间格局解析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2695-2704. (YAN Chang'an, DU Zhanpeng, YAO Bo, et al. Spatial pattern analysis of nitrogen and phosphorus losses in Baoliang River watershed of Dianchi Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2695-2704. (in Chinese))
- [26] 程国微,杜展鹏,严长安,等. 水质监测频率与极端气候对高原湖泊入湖河流氮磷通量估算的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 3982-3989. (CHENG Guowei, DU Zhanpeng, YAN Chang'an, et al. Impacts of water quality monitoring frequency and extreme climate on the estimation of nitrogen and phosphorus fluxes in river of Plateau Lake basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(11): 3982-3989. (in Chinese))
- [27] 喻一,宋芳,赵志杰,等. 深圳河口口近 10 年典型污染物通量变化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 460-470. (YU Yi, SONG Fang, ZHAO Zhijie, et al. A study of pollutant loads variations in Shenzhen River estuary in recent decade [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(3): 460-470. (in Chinese))
- [28] 陈炼钢,陈俊鸿,陈黎明,等. 基于 LOADEST 和卡尔曼滤波的河流污染通量过程估算[J]. 水利水电技术, 2019, 50(10): 138-144. (CHEN Liangang, CHEN Junhong, CHEN Liming, et al. Estimation on river pollution flux based on LOADEST and Kalman filtering [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(10): 138-144. (in Chinese))
- [29] 金亚楠,张柏发,郝韵,等. 基于 LOADEST 模型和小波变换的河流氮磷污染动态分析[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(9): 1692-1701. (JIN Yanan, ZHANG Baifa, HAO Yun. Dynamic analysis of river nitrogen and phosphorus pollution based on LOADEST model and wavelet transform [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(9): 1692-1701. (in Chinese))
- [30] 李秦. 西南山区城市河流健康评价研究: 以普洱市思茅河为例[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [31] SCHILLING K, ZHANG Youkuan. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA [J]. Journal of Hydrology, 2004, 295(1/2/3/4): 305-316.
- [32] JIANG Jin, AN Na, ZHANG Yi, et al. Influence of rainfall run-off in hydrologic process on non-point pollution [J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(2): 380-383, 444.
- [33] 沈泓. 双港流域河流磷污染的特征与源解析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [34] 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 Wenchao, LEI Qiuliang, ZHAI Limei, et al. Seasonal changes of the pathways of nitrogen export from an agricultural watershed in China [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5375-5382. (in Chinese))
- (收稿日期: 2023-02-02 编辑: 熊水斌)

(上接第 168 页)

- [48] SIGMAN D M, ALTABET M A, FRANCOIS R, et al. The isotopic composition of diatom-bound nitrogen in Southern Ocean sediments [J]. Paleoceanography, 1999, 14(2): 118-134.
- [49] 林晓,史书,木志坚,等. 稻田空间分布格局对三峡库区农业小流域径流氮排放的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 28-35. (LIN Xiao, SHI Shu, MU Zhijian, et al. Impact of spatial distribution pattern of paddy fields on runoff nitrogen export from a small agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017, 39(6): 28-35. (in Chinese))
- [50] ZHAO Yunyun, ZHENG Binghui, JIA Haifeng, et al. Determination sources of nitrates into the Three Gorges Reservoir using nitrogen and oxygen isotopes [J]. Science of The Total Environment, 2019, 687: 128-136.
- (收稿日期: 2022-09-27 编辑: 施业)