

# 流域基流氮磷流失的非点源污染定量研究

何圣嘉<sup>1,2</sup>, 吕军<sup>1,3</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学教育部污染环境修复与生态健康重点实验室, 杭州 310058; 3. 浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室, 杭州 310058)

**摘要:** 利用数字滤波技术, 在结合基流营养物负荷量消退过程和气象因子影响分析的基础上, 提出并建立了基流营养物日负荷量分割的递归滤波算法, 对浙江嵊州长乐江流域基流氮磷流失进行定量分析。结果表明, 基流总氮(TN)日负荷量模拟值的  $R^2$  为 0.86, 模拟效率系数 NSE 为 0.72; 基流总磷(TP)日负荷量模拟值的  $R^2$  为 0.65, NSE 为 0.63。用该方法对长乐江流域 2003—2012 年基流养分流失量的定量分析结果表明, 全流域 TN 和 TP 年平均基流流失量分别高达 1 317.6 t(15.25 kg/hm<sup>2</sup>)和 51.8 t(0.60 kg/hm<sup>2</sup>), 占该流域平均 TN 和 TP 总径流流失量的 61.82% 和 56.92%。随着降雨量的增加, 长乐江流域近年来的基流 TN 和 TP 流失量均呈现出极显著的上升趋势, 已经成为河流非点源污染不可忽视的重要污染源。

**关键词:** 基流; 氮; 磷; 养分流失; 数字滤波; 非点源污染

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0020-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.004

## Quantitative Study on Nitrogen and Phosphorus Loss in Baseflow of Typical Agricultural Watershed Based on Non-point Source Pollution Model

HE Shengjia<sup>1,2</sup>, LÜ Jun<sup>1,3</sup>

(1. College of Environment and Natural Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 2. Ministry of Education, Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

**Abstract:** Based on the digital filtering technology baseflow nutrient load recession analysis and meteorological factors, a recursive filter loading separation algorithm (RFLSA) for the daily load fraction of baseflow nutrient estimation was proposed and established. Quantitative analysis of the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) loss of baseflow was carried out in the Changle River Watershed of Zhejiang, Shengzhou. The results showed that the  $R^2$  of baseflow TN daily load simulation was 0.86, and the simulation efficiency coefficient NSE was 0.72, and the above parameters for baseflow TP were 0.65 and 0.63. The mean annual TN and TP loss through baseflow in the studied watershed from 2003 to 2012 were 1 317.6 t (15.25 kg/hm<sup>2</sup>) and 51.8 t (0.60 kg/hm<sup>2</sup>), respectively, and accounted for 61.82% and 56.92% of the TN and TP loss in annual total runoff. Along with the increasing of precipitation during 2003 to 2012, the baseflow TN and TP losses showed a significant upward trend, and has become an important pollution source of non-point source pollution of rivers.

**Keywords:** baseflow; nitrogen; phosphorus; nutrient loss; digital filtering; non-point source pollution

随着工业废水、城市污水等点源污染的控制和治理水平的不断提高, 由城镇生活、农业生产和水土流失以及大气沉降等引起的非点源污染, 已经成为许多地区地表水环境的首要污染源<sup>[1-2]</sup>, 是制约社会、经济可持续发展的一个重大环境问题。基流是指通过地

下水或其他滞后性水源进入受纳水体的径流<sup>[3]</sup>, 它不仅是枯水期河川径流的主要来源, 同时也是丰水期乃至暴雨径流过程中河川径流的重要组成部分<sup>[4]</sup>, 对维持流域基本生态功能和保障人类用水都具有重要作用<sup>[5]</sup>。近几十年来, 随着农业生产化肥投入的增加和

收稿日期: 2017-05-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“农业流域地下水富营养趋势与基流对非点源污染贡献的定量研究”(41571216)

第一作者: 何圣嘉(1986—), 男, 在读博士研究生, 主要从事农业非点源污染、水文模型的研究。E-mail: hesj86@sina.cn

通信作者: 吕军(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理和农业水土资源与环境研究。E-mail: jlu@zju.edu.cn

集约化程度的提高,出现了潜水、乃至地下水的富营养化倾向;基流对于农业流域非点源污染物迁移的重要作用已为大量研究所证实<sup>[6-8]</sup>。由于基流的循环和周转速度明显较地表径流缓慢,特别是在大流域尺度上,基流携带养分迁移的滞后作用尤为显著,如果不能与地表径流相区分,仅把非点源污染都归因于地表径流,将严重误导流域非点源污染治理的科学认识和工作策略<sup>[9]</sup>。北美和欧洲的大量非点源污染治理研究和实践均已表明,在流域尺度上,即便实施了严格的地表水污染控制和管理措施,河流的水质状况在短期内很难、甚至完全得不到改善<sup>[10]</sup>。因此,深入研究基流对非点源污染的贡献,对于今后流域水资源和水质管理<sup>[11]</sup>、控制河流富营养化与盐水入侵<sup>[3]</sup>以及水文水质模型的校准和验证<sup>[12]</sup>等具有重要意义。本研究以我国东部的一个典型农业流域为对象,旨在定量分析基流对流域氮、磷流失贡献,研究其变化规律,为推进流域尺度上非点源污染的治理提供进一步的理论依据和实际工作指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

长乐江流域(120°27'47"—120°47'45"E,29°20'2"—29°42'38"N)位于浙江省嵊州市西南部,属于宁绍平原。作为曹娥江的一条主要支流,长乐江发源于东阳唐婆岭,由西南流向东北,最终同澄潭江汇合后注入剡溪,全长达 70.5 km,沙砾河床,平均河宽约 55 m,平均河道比降为 3.6‰,多年平均流量约 18.4 m<sup>3</sup>/s,年径流量、侵蚀模数和输沙量分别为 5.71 亿 m<sup>3</sup>,127 t/km<sup>2</sup> 和 10.9 万 t,总流域面积约为 864 km<sup>2</sup>。该流域临近东南沿海,主要受亚热带季风气候控制,四季分明,湿润多雨;流域内的土地利用方式以农地为主,工业排污企业相对较少,农业非点源是该河流体的首要污染源。

### 1.2 基础数据的采集

于 2003 年 7 月至 2012 年 12 月,以月为步长对长乐江的水质状况进行连续监测。水样从河道中间离水面 30 cm 处采集,装于 2.5 L 聚乙烯瓶之中。待所有监测点水样采集完成以后,立即将水样运回实验室,并在 24 h 内完成相关化学分析。水质分析:总氮(TN)用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法(GB 11893—89)测定;总磷(TP)采用过硫酸钾消解法(GB 11893—89)测定。非点

源污染定量分析模拟所需的河流水文资料和流域气象资料由当地水利局和气象站提供。

### 1.3 基流分割定量

根据水文学原理,河川径流量是地表直接径流和地下基流的总和。其中地表径流对降水的响应更为直接和快速,强烈起伏的流量变化可以视为高频信号;而基流由于受到地下水库的缓冲,变化相对迟缓,涨落幅度也远小于地表径流,基流流量变化可以视为低频信号<sup>[13]</sup>。因此,尽管目前还没有办法直接对基流进行长期连续的观测,但基于低通滤波技术对河川流量进行基流分割则成为可能。近几十年来,数字滤波在基流定量研究中得到了广泛的应用,并被大量研究证实为一种客观而且快速的基流分割方法<sup>[14]</sup>。为了使数字滤波分割得到的基流更具普遍意义和水文意义,Eckhardt 于 2005 年提出了“双参数”滤波方法<sup>[15]</sup>,将退水常数和最大基流指数(BFI<sub>max</sub>)引入到传统的数字滤波方程之中:

$$b_k = \frac{(1 - \text{BFI}_{\max})ab_{k-1} + (1 - a)\text{BFI}_{\max}y_k}{1 - a\text{BFI}_{\max}} \quad (1)$$

式中: $y_k$  为  $k$  时刻的总径流量(m<sup>3</sup>/s); $b_k$  为  $k$  时刻的基流量(m<sup>3</sup>/s); $k$  为时间(d); $a$  为反映河流退水速度的退水常数( $0 < a < 1$ );BFI<sub>max</sub> 为最大基流指数(基流占总径流的比例)。

然而,BFI<sub>max</sub> 目前无法通过直接测定来获取,其值主要是在结合流域水文地质特征的基础上,利用数学算法计算模拟得到:多孔介质含水层地区的常年性河流与季节性河流以及硬质岩介质含水层地区的常年性河流的 BFI<sub>max</sub> 建议值分别为 0.80,0.50 和 0.25<sup>[15]</sup>。结合本研究区的水文地质特征,在利用递归数字滤波进行基流分割时,将 BFI<sub>max</sub> 设为 0.8。

根据退水分析,从当地 2003—2012 年的流量序列中筛选出 61 个典型基流退水过程,分别计算得到每个过程的退水常数,并在此基础上计算得到了长乐江流域多年月平均退水常数的值(表 1)。显然,由于气候(降雨、蒸发等)、植被及水资源的利用和管理措施等因素的季节性变化,使得退水常数  $a$  表现出了明显的季节性变化(图 1)。因此,本研究利用傅里叶函数对月平均退水常数进行拟合,以此来推求每天的退水常数,从而提高基流分割的准确性。鉴于不同条件下,退水常数  $a$  存在一定的变异性,故本研究在后续章节中改称其为退水参数。

表 1 长乐江流域多年月均退水参数

参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
过程数	5	7	6	3	5	3	6	3	6	7	6	4
$a$ 值	0.959	0.961	0.959	0.947	0.948	0.943	0.938	0.937	0.940	0.947	0.952	0.960

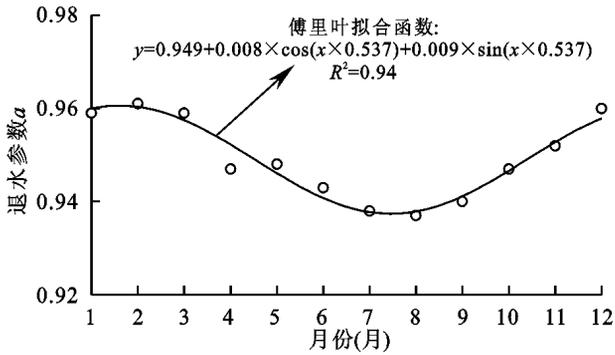


图 1 长乐江流域多年平均月退水参数的季节性变化

表 2 TN、TP 负荷量估算 LOADEST 模型回归方程

污染物	LOADEST 模型负荷量计算回归方程	统计指标		
		$R^2$	SCR	PPCC
TN	$\ln(L) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Q + \alpha_2 \sin(2\pi d \text{time}) + \alpha_3 \cos(2\pi d \text{time})$	0.94	0.25	0.99
TP	$\ln(L) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Q + \alpha_2 d \text{time}$	0.75	0.24	0.97

注:公式中  $L$  为污染物日负荷量( $t/d$ ); $Q$ 为径流量( $mm$ ); $d \text{time}$ 为中心化之后的分数日期( $d \text{time} = \text{分数日期} - \text{中心分数日期}$ ),具体计算参见文献[17]; $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和 $\alpha_3$ 为方程系数;SCR为残差序列相关系数;PPCC为概率曲线相关系数,用于检验残差的正态分布。

表 3 TN、TP 负荷量估算的 LOADEST 回归方程系数

污染物	参数	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
TP	参数值	3.924	1.103	0.075	
	标准差	0.070	0.074	0.025	
	显著性	<0.01	<0.01	<0.01	
TN	参数值	7.290	1.153	-0.159	0.109
	标准差	0.038	0.041	0.051	0.051
	显著性	<0.01	<0.01	<0.01	0.030

### 1.5 基流 TN、TP 负荷定量

河流污染物负荷量是流量和污染物浓度的乘积。由于河流中流量的变化幅度通常远大于污染物浓度的变化,从而在很大程度上主导了非点源污染负荷的变化幅度。而河流中非点源污染物的负荷量是由直接径流携带的负荷量和基流携带的负荷量叠加而成的。显然,地表径流的流量和污染物浓度的变化都远比基流的流量和浓度的变化更剧烈。因此,把地表径流的污染物负荷量变化视为高频信号,把基流负荷量变化视为低频信号,采用低通滤波技术进行基流污染物负荷的定量分割同样是可能的。当然,在应用低通滤波技术进行基流非点源污染负荷分割定量之前,所需要解决的关键问题是如何准确定量污染物浓度变化对负荷量变化的贡献,以此来减少基流非点源污染负荷分割中可能存在的误差。

根据水文学原理,基流污染负荷的变化会在基流涨落阶段更明显,而目前在绝大多数情况下无法实现对基流流量和污染物浓度变化进行直接测定,因此本研究以与基流负荷消退过程密切相关的水文、气象因子为自变量,构建基流负荷消退系数逐日变化的回归统计模型(公式 2),用于表征基流消退过程对负荷量变化的影响。本研究将这种基流负荷定量分割方法简称为递归滤波基流负荷分割算法(RFLSA)。

### 1.4 河流 TN 和 TP 的日负荷量

每月一次的河流水质和流量监测并不能代表每日的 TN 和 TP 的负荷量。因此,本研究根据 AIC 和 SPCC 准则从 LOADEST 模型提供的 11 个备选方程[16]中筛选得到了最适用于长乐江流域 TN、TP 污染物通量计算的回归统计方程(表 2);并根据 10 年(2003—2012)每月一次的监测资料,实现日污染物通量与日流量关系回归方程的参数率定,参数率定结果见表 3。在此基础上,利用完成参数率定的负荷量回归方程计算得到长乐江流域 2003—2012 年逐日 TN、TP 流失量。

$$\beta(t) = \lambda_0 + \lambda_1 a(t) + \lambda_2 E(t) + \lambda_3 P(t) \quad (2)$$

式中: $\beta$ 为基流负荷消退参数; $a$ 为退水参数; $P$ 为降雨量( $mm$ ); $E$ 为蒸发量( $mm$ ); $t$ 为时间( $d$ ); $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 为拟合参数。

由于目前无法实现长时间序列、大尺度上基流及其污染物负荷量的直接测定,因此本研究利用国际上常用的“纯基流筛选标准(基流指数  $BFI \geq 0.9$ ,表示基流占河流流量 90% 以上)”[18]从长乐江流域 2003—2012 年所有实测的日负荷量序列中( $n=111$ )中筛选得到“实测”日基流负荷数据( $n=43$ ),用于基流负荷消退系数回归统计模型中参数( $\lambda_0 \sim \lambda_3$ )的率定以及基流负荷分割结果的验证。其中,模型参数率定时的优化目标函数为纳什系数[NSE,公式(3)],参数优化所采用的算法为遗传算法。

### 1.6 模拟结果评价指标

本研究中用于 RFLSA 基流负荷定量模拟结果与适用性评价的统计指标包括:纳什系数(NSE)、均方根误差—实测值标准差比率(RSR)[19]和决定系数( $R^2$ ),其具体计算公式为:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (L_{(i,m)} - L_{(i,s)})^2}{\sum_{i=1}^n (L_{(i,m)} - L_{\text{avg}})^2} \right] \quad (3)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (L_{(i,m)} - L_{(i,s)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (L_{(i,m)} - L_{\text{avg}})^2}} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (L_{(i,m)} - L_{\text{avg}})(L_{(i,s)} - L_{\text{avg}}))^2}{\sum_{i=1}^n (L_{(i,m)} - L_{\text{avg}})^2 \sum_{i=1}^n (L_{(i,s)} - L_{\text{avg}})^2} \quad (5)$$

式中: $L_{(i,m)}$ 和 $L_{(i,s)}$ 分别表示第  $i$  个污染物负荷量的实测值和模拟值; $L_{\text{avg}}$ 表示污染物负荷量的实测值的

平均值; $n$ 为实测值个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 TN 和 TP 基流负荷分割方法验证

如图 2a 所示,基于 RFLSA 分割得到的基流 TN 负荷量不仅能够较好地反映长乐江流域“实测基流负荷量变化趋势( $R^2=0.86$ ),而且具有较高的模拟精度( $NSE=0.72$ , $RSR=0.53$ );基流 TP 负荷量模拟同样取得了令人满意的结果( $NSE=0.63$ , $RSR=$

$0.61$ , $R^2=0.65$ ,图 2b),但其模拟精度明显低于 TN 负荷量的模拟。显然基流中的营养物主要以可溶态占绝对优势,而总磷的流失总量中可溶态的比例相对较少,因而受到的干扰也相对增大,这可能是基流 TP 模拟结果略差于 TN 的主要原因。总体来看,在充分考虑气象因子对基流负荷消退的影响之后,RFLSA 能够较好地实现多雨地区基流非点源 TN 和 TP 污染的定量估算。

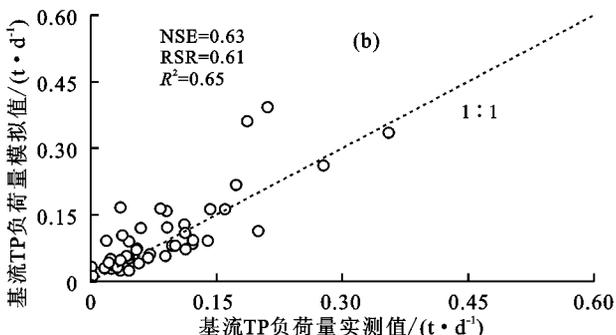
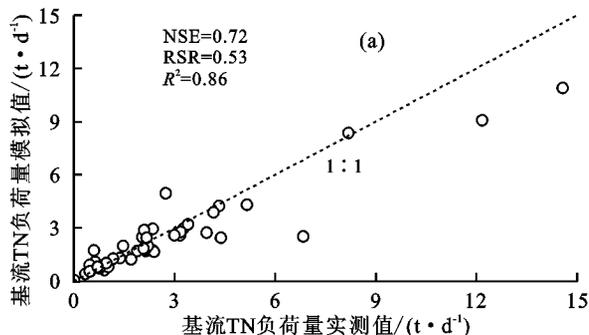


图 2 基流 TN 和 TP 负荷量模拟值与实测值的比较

### 2.2 流域 TN、TP 流失量的年际变化

2003—2012 年长乐江流域年均降雨量为 1 228 mm,其中 2003 年降雨量最少,仅为 879 mm;而 2012 年降雨量为诸年中最大,高达 1 740 mm,约为 2003 年降雨量的 2 倍(表 4)。从整体上来看,长乐江流域 2003—2012 年降雨量在表现出明显年际变化的同时,也存在较为明显的上升趋势(图 3a);长乐江流域总径流量的年际变化模式与降雨的年际变化相类似,2003—2012 年间年总径流量为 284 mm(2004 年)~944 mm(2012 年),多年平均总径流量为 551 mm( $Sd.=232$  mm)(表 4)。基流作为河流径流的重要组成部分,其对本研究区年总径流的贡献比率(即基流指数)为 61.9%(2007 年)~73.5%(2003 年),平均为 67.3%( $Sd.=2.8\%$ )(表 4)。由此可见,在大多数时间里,基流才是长乐江流域河道径流的主体。

表 4 长乐江流域 2003—2012 年逐年降雨量、蒸发量、径流量与基流量

年份 (年)	降雨量/ mm	蒸发量/ mm	总径 流量/mm	基流量/ mm	基流 指数/%
2003	879	999	351	258	73.5
2004	1036	992	284	190	66.9
2005	1174	978	535	368	68.8
2006	901	941	370	248	67.0
2007	1327	959	512	317	61.9
2008	1088	918	397	270	68.0
2009	1413	922	504	332	65.9
2010	1421	806	922	628	68.1
2011	1301	858	689	462	67.1
2012	1740	833	944	634	67.2
Avg.	1228	920	551	371	67.3
Sd.	266	68	232	156	2.8

注: Avg. 为均值; Sd. 为标准差; 基流指数表示给定时段基流量占总径流量的比例。

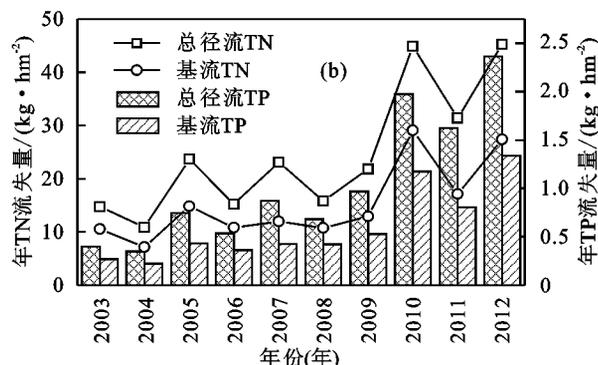
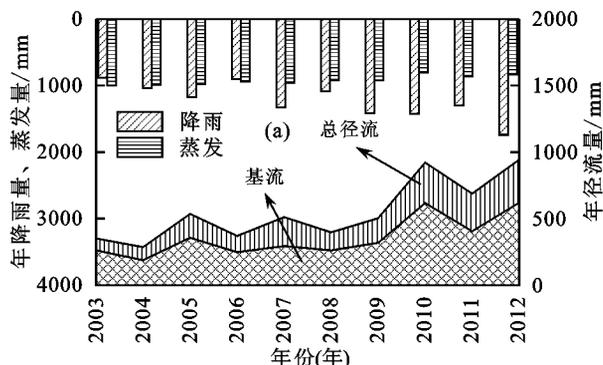


图 3 长乐江流域 2003—2012 年年降雨量、蒸发量、径流量变化和 TN、TP 流失量

降雨径流的冲刷和淋溶作用是地表营养物污染进入(地表与地下)水体的主要驱动因子<sup>[20]</sup>。因此,降雨和径流年际变化模式在很大程度上决定了非

点源污染负荷量的年际波动。2003—2012 年,长乐江流域年 TN 和 TP 流失量与随着年降雨量、年径流量的增加整体表现出明显的上升趋势;且枯水年与丰

水年负荷量之间表现出显著差异(图 3b)。例如,2004 年降雨量较少(1 036 mm),长乐江流域通过总径流输出的 TN 与 TP 的量分别为 10.86 kg/hm<sup>2</sup> 和 0.35 kg/hm<sup>2</sup>;而对于降雨量较大的 2012 年(1 740 mm),该流域总径流输出的 TN、TP 负荷量分别增加至 45.23 kg/hm<sup>2</sup> 和 2.36 kg/hm<sup>2</sup>,分别约为 2004 年对应负荷量的 4.2 倍和 6.8 倍(表 5)。

表 5 长乐江流域 2003—2012 年逐年 TN、TP 负荷量

年份 (年)	TN 负荷量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )		TP 负荷量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )		基流负荷 贡献率/%	
	总径流	基流	总径流	基流	TN	TP
2003	14.74	10.53	0.40	0.27	71.43	68.13
2004	10.86	7.12	0.35	0.22	65.58	63.70
2005	23.63	14.84	0.74	0.43	62.79	58.25
2006	15.20	10.79	0.53	0.36	70.98	68.06
2007	23.10	11.92	0.87	0.43	51.61	48.97
2008	15.84	10.73	0.68	0.42	67.74	61.74
2009	21.80	12.91	0.97	0.53	59.19	54.32
2010	44.88	29.09	1.97	1.17	64.82	59.50
2011	31.39	17.15	1.62	0.80	54.63	49.61
2012	45.23	27.41	2.36	1.34	60.60	56.58
平均值	24.67	15.25	1.05	0.60	61.82	56.92
标准差	12.22	7.37	0.70	0.38	6.56	6.77

注:养分负荷量按流域面积(864 km<sup>2</sup>)平均输出量计;基流负荷贡献率为给定时段内基流负荷量与总径流负荷量的比率。

近年来,随着非点源污染研究的进一步深入,基流作为非点源营养物质主要的输出途径已被越来越多的研究<sup>[6-8,21]</sup>所证实。长乐江流域基流 TN、TP 负荷量的年际变化与径流总负荷量的年际变化基本一致(图 3b)。2003—2012 年,长乐江流域以基流形式输出的 TN、TP 年平均负荷总量分别高达 1 317.6 t (15.25 kg/hm<sup>2</sup>)和 51.8 t (0.60 kg/hm<sup>2</sup>),其对总径流中相应污染物年均负荷量的贡献率分别高达 61.82%和 56.92%(表 5)。显然,在大多数情况下,基流主导了长乐江流域总径流中 TN、TP 负荷量的变化。造成这一现象的主要原因可归结为:(1)在绝大多数时间里,基流主导了长乐江流域的水文过程,其占该流域多年平均总径流量的比例达 65%以上;(2)本研究区植被覆盖度较高,其中林地占总土地面积的比例高达 62.38%,加之农业用地又以水田和苗木种植为主,致使本研究区的水土流失已经得到很大改善(侵蚀模数仅为 127 t/km<sup>2</sup>),从而很大程度上减少了通过水土流失的 TN、TP 负荷量。由此可见,基流已经成为长乐江流域 TN、TP 流失的最主要途径,这也意味着局限于地表非点源控制、减排的流域非点源污染治理,不一定能很快取得显著的成效。

为进一步分析长乐江流域基流非点源污染的变化趋势,本研究选用 Mann-Kendall 趋势检验法<sup>[22]</sup>对本研究区 2003—2012 年逐月的水文、气象以及污染物负荷量进行了分析。如图 4 所示,2003—2012 年,随着长乐江流域降雨的明显增加( $Z_s = 1.86, p < 0.1$ ),月径流和基流量均表现出极为显著的增加趋势,其对应的 Mann-Kendall 统计值  $Z_s$  分别为 3.57 ( $p < 0.01$ )和 4.09 ( $p < 0.01$ )。就流域尺度而言,径流和基流流量的波动主导了非点源污染负荷量的变化。因此,随着径流和基流的显著增加,长乐江流域基流 TN、TP 流失量均表现出极为显著的上升趋势( $Z_s$  均大于 2.57,达到 1%显著性水平)。由于 2007—2012 年降雨量(特别是大雨、暴雨数量)的显著增加,使得地表径流对于 TN、TP 负荷量的贡献比率有所增加,进而使得相应的基流负荷贡献率表现出一定的下降趋势,但趋势不显著(图 4)。由此可见,如果不采取相应的治理措施,基流所造成的养分流失将持续给长乐江流域地表水环境带来严重的富营养化风险。

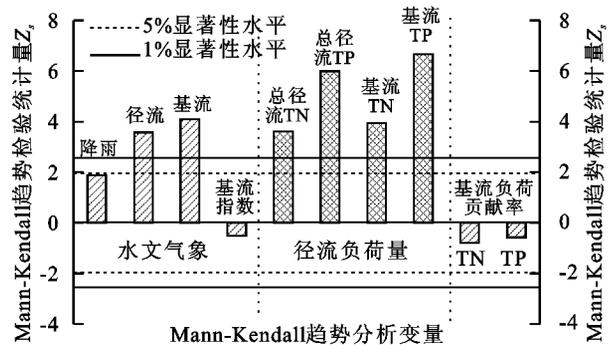


图 4 长乐江流域月降雨、径流及非点源 TN、TP 负荷量趋势分析

### 2.3 长乐江流域 TN、TP 流失季节变化

受亚热带季风气候的影响,长乐江流域月降雨表现出明显的季节性波动,年内降雨量的分布极不均匀。从月尺度上来看,长乐江流域的全年降雨量存在两个明显的峰值,分别出现于梅雨季(5—6 月)和台风暴雨季(8—9 月),两者共占全年总降雨量的比例接近 50%以上(表 6)。径流是降雨在重力作用下沿地表或地下流动的水流。因此,降雨的季节性变化在很大程度上决定了长乐江流域总径流、基流的季节性波动。由表 6 可知,长乐江流域月总径流量与降雨量之间存在极显著的相关关系( $r = 0.90^{**}, p < 0.01$ );月基流量的变化与月总径流量的变化基本同步,其同样与月降雨量显著相关( $r = 0.80^{**}, p < 0.01$ )。

从流域尺度来看,径流中非点源污染物负荷量的变化在很大程度上由径流量的变化所决定<sup>[23]</sup>。这也就意味着降雨量<sup>[24]</sup>、降雨强度<sup>[25]</sup>以及降雨历时<sup>[26]</sup>的季节性

变化是造成流域非点源污染季节性变化的一个最重要的原因。由表6可知,长乐江流域总径流中TN、TP月负荷量的变化与降雨径流的变化不仅具有较高的同步性,且具有较为一致的变化趋势,月总径流TN、TP负荷量与月降雨量之间的相关系数( $r$ )分别高达 $0.78^{**}$  ( $p < 0.01$ )和 $0.80^{**}$  ( $p < 0.01$ )。从全年来看,最大月负荷

量通常出现在全年降雨、径流量最大的6月,另外两个峰值则分别出现在3月和8月;3月、6月和8月TN与TP的总输出负荷量分别达 $10.68 \text{ kg/hm}^2$ 和 $0.47 \text{ kg/hm}^2$ ,分别占全年相应污染物负荷总量的43.28%和44.93%;在其他月份,月总径流中TN、TP负荷量随着降雨径流的减少而减少。

表6 长乐江流域2003—2012年平均月降雨、径流以及TN、TP负荷量

月份 (月)	降雨量/mm	径流量/mm		TN负荷量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		TP负荷量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		基流负荷贡献率/%	
		总径流	基流	总径流	基流	总径流	基流	TN	TP
1	67	28	18	1.342	0.930	0.046	0.030	69.34	66.06
2	94	41	27	2.108	1.396	0.070	0.041	66.21	58.69
3	105	69	47	3.756	2.412	0.134	0.068	64.22	50.88
4	97	39	28	1.755	1.268	0.071	0.048	72.27	68.26
5	123	48	33	2.024	1.382	0.087	0.057	68.26	64.97
6	205	98	62	4.418	2.298	0.212	0.098	52.01	46.06
7	89	34	26	1.157	0.868	0.060	0.044	75.03	74.35
8	148	61	39	2.503	1.238	0.125	0.061	49.47	48.56
9	114	48	33	1.903	1.087	0.085	0.051	57.11	60.10
10	52	35	23	1.552	0.788	0.065	0.033	50.78	51.05
11	81	26	18	1.082	0.781	0.049	0.032	72.18	66.75
12	52	24	17	1.066	0.800	0.045	0.033	74.99	72.72

注:养分负荷量按流域面积( $864 \text{ km}^2$ )平均输出量计;基流负荷贡献率为给定时段内基流负荷量与总径流负荷量的比率。

基流作为长乐江流域非点源污染物输出的一个主要途径,其对月总径流中TN、TP负荷量的贡献率分别高达50.78%~75.03%和46.06%~74.35%(表6)。然而,虽然长乐江流域月基流TN、TP负荷量的变化仍与月降雨量显著相关,相关系数( $r$ )分别为 $0.69^{**}$  ( $p < 0.01$ )和 $0.63^{**}$ 弱 ( $p < 0.01$ ),但其相关性明显较径流—降雨量之间的相关性弱。以8月为例,虽然8月的降雨量(148 mm)约为3月降雨量(105 mm)的1.41倍,但3月的基流量反而是8月基流量的1.21倍,其相应的基流TN、TP负荷量则分别为8月的1.95倍和1.1倍。造成这一现象的原因可能与基流养分循环的滞后效应等因素有关,但主要原因是基流营养物的输出量不仅受降雨总量的驱动,还与降雨模式(雨强和降水历时)密切相关。8月份的降雨主要以雷雨和台风暴雨为主,尽管雨量大,但产生的径流主要以超渗产流为主,雨水向基流的分配比例相对较小、土壤养分淋溶作用也都相对较弱;而3月份的绵绵细雨的蓄满产流过程,更有利于雨水向基流的分配,也更有利于养分向地下潜水的淋洗。

### 3 结论

基流是农业流域养分流失的一条重要途径。由于地下水循环的滞后效应,基流养分的输出往往不会与地表径流中的养分同步同源,是当前流域非点源污

染溯源和治理的重要难题之一。本研究提出的基流营养物日负荷量分割的递归滤波算法,充分考虑了气象因子对不同基流消退过程影响,实现了多雨地区(长乐江流域)基流TN( $\text{NSE}=0.72$ ;  $R^2=0.86$ )和TP( $\text{NSE}=0.63$ ;  $R^2=0.65$ )日负荷量的定量分析。研究表明,2003—2012年全流域年均基流TN和TP量高达 $1317.6 \text{ t}$ ( $15.25 \text{ kg/hm}^2$ )和 $51.8 \text{ t}$ ( $0.60 \text{ kg/hm}^2$ ),约占年均总径流TN和TP流失量的61.82%和56.92%。长乐江流域2003—2012年基流年TN、TP流失量年际变化与年降雨量存在极显著的相关关系;而基流TN、TP流失量的季节性变化(月变化)同时还深受降雨模式(降雨强度和降水历时)的影响。近年来,长乐江流域基流TN、TP流失量随着降雨量的增加均表现出极显著的上升趋势,已经成为该流域非点源污染的一个不可忽视的污染源。

#### 参考文献:

- [1] Gong X M, Dong J, Tian W J. A review of impacts of agricultural non-point source pollution on microbial community in riparian zone[J]. Advanced Materials Research, 2012, 610(1/4): 1975-1979.
- [2] Moges M A, Tilahun S A, Ayana E K, et al. Non-point source pollution of dissolved phosphorus in the Ethiopian highlands: The Awramba Watershed near lake Tana[J]. Clean-Soil Air Water, 2016, 44(6): 703-709.

- [3] Santhi C, Allen P, Muttiah R, et al. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 351(1/2): 139-153.
- [4] He S J, Li S, Xie R, et al. Baseflow separation based on a meteorology-corrected nonlinear reservoir algorithm in a typical rainy agricultural watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 418-428.
- [5] 徐磊磊, 刘敬林, 金昌杰. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3073-3080.
- [6] King K W, Williams M R, Macrae M L, et al. Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(2): 467-485.
- [7] He S J, Lu J. Contribution of baseflow nitrate export to non-point source pollution[J]. *Science China*, 2016, 59(10): 1912-1929.
- [8] Ouyang Y. Estimation of shallow groundwater discharge and nutrient load into a river[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 38(1): 101-104.
- [9] 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.
- [10] Sharpley A N, Kleinman P J A, Jordan P, et al. Evaluating the success of phosphorus management from field to watershed[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(5): 1981-1988.
- [11] Ahiablame L, Chaubey I, Engel B, et al. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476(2): 13-27.
- [12] Ferket B V, Samain B, Pauwels V R. Internal validation of conceptual rainfall-runoff models using baseflow separation[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 158-173.
- [13] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507-515.
- [14] Nathan R, McMahon T. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [15] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507-515.
- [16] 李娜, 盛虎, 何成杰, 等. 基于统计模型 LOADEST 的宝象河污染物通量估算[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(3): 355-366.
- [17] Qian Y, Migliaccio K W, Wan Y, et al. Trend analysis of nutrient concentrations and loads in selected canals of the southern Indian River Lagoon, Florida[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 186(1): 195-208.
- [18] Schilling K, Zhang Y K. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large, agricultural watershed, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 295(1/4): 305-316.
- [19] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the Asabe*, 2007, 50(3): 885-900.
- [20] Jin J, Na A, Yi Z, et al. Influence of rainfall run-off in hydrologic process on non-point pollution[J]. *Agricultural Science and Technology-Hunan*, 2012, 13(2): 380-383, 444.
- [21] Qi Z, Helmers M J, Christianson R D, et al. Nitrate-nitrogen losses through subsurface drainage under various agricultural land covers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(5): 1578-1585.
- [22] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100(1): 172-182.
- [23] Gong Y, Yu Z, Yao Q, et al. Seasonal variation and sources of dissolved nutrients in the Yellow River, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8): 9603-9622.
- [24] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民. 不同降雨一径流过程中农业非点源污染研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(10): 5-8.
- [25] 孟红旗, 赵同谦, 张华, 等. 孟津黄河滩区降雨产流及面源污染特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 48-51.
- [26] 王吉苹, 朱木兰. 厦门城市降雨径流氮磷非点源污染负荷分布探讨[J]. *厦门理工学院学报*, 2009, 17(2): 57-61.