

## 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影响因素(2008—2012年)\*

刘发根, 王仕刚, 郭玉银, 曹 美  
(江西省鄱阳湖水文局, 星子 332800)

**摘 要:** 研究鄱阳湖入、出湖污染物通量是加强鄱阳湖及长江水功能区限制纳污红线管理的前提, 是建立鄱阳湖水质预测模型的基础。基于 2008—2012 年鄱阳湖 8 条主要入湖河流、出湖口的逐月水量、水质同步监测资料, 根据污染源特征优选算法, 计算总磷 (TP)、氨氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 的入、出湖污染物通量, 并分析时空变化特征及影响因素。结果表明: (1) 出湖口和乐安河入湖口断面的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 及昌江入湖口断面的 TP, 以点源污染为主, 采用每月瞬时通量作为月平均通量的算法更准确; 其余以非点源污染为主, 采用瞬时污染物浓度与月平均流量之积来计算月平均通量更准确。(2) 2008—2012 年  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 年平均入湖通量分别为 304398、53063 和 9175 t, 年平均出湖通量分别为 367436、45814 和 8452 t。8 条入湖河流每年的入湖水量、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  通量和个别年份的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 通量小于出湖, 这主要是因为未计算区间产流及相应排污和采砂引起的内源污染。(3) 入、出湖污染物通量在年际间主要受水量影响而呈现 W 型波动变化趋势,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 入湖通量及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  出湖通量均集中在汛期,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 出湖通量则是冬季较多 (低水位下湿地植被净化作用受限)。入湖 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  通量主要来自赣江、信江、乐安河, 而  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 浓度最高的是乐安河、信江。

**关键词:** 鄱阳湖; 污染物通量; 算法; 时空变化; 影响因素

## Spatial-temporal variations of pollutant fluxes of inflow and outflow of Lake Poyang (2008 – 2012)

LIU Fagen, WANG Shigang, GUO Yuyin & CAO Mei  
(Hydrology Bureau of Lake Poyang, Jiangxi Province, Xingzi 332800, P. R. China)

**Abstract:** Research on pollutant fluxes of inflow and outflow is an essential prerequisite to establish water quality prediction model of Lake Poyang, and strengthen the management of pollutants receiving capacity threshold in the water function zones of Lake Poyang and Yangtze River. This paper estimated the influxes and outfluxes of total phosphorous (TP), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), permanganate index ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) of Lake Poyang, analysed their spatial-temporal variations and main influencing factors, based on appropriate estimation methods, and characteristics of pollution sources for inflow (8 main rivers) and outflow of Lake Poyang, using the synchronous monthly water quality and quantity data during the period of 2008 – 2012. The results showed: (1) Point source was the main source for TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$  of outflow and Le'an River inflow, and for TP of Changjiang River inflow. Therefore, applying monthly instantaneous flux as monthly average flux is more accurate for estimation. For other pollutants at the monitoring sites, applying the product of instantaneous pollutant concentration multiplying monthly average flow as monthly average flux is more appropriate. (2) During 2008 – 2012, annual average influxes of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TP were 304398, 53063 and 9175 t, respectively, and annual average outfluxes were 367436, 45814 and 8452 t, respectively. For annual water quantity and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  flux, and TP flux and  $\text{NH}_3\text{-N}$  flux of some specific years, inflow values of 8 rivers were smaller than those of outflow values due to the fact that flows and pollution fluxes from the intervening basin, and internal pollutants discharges from sediments accelerated by dredging had not been included in this study. (3) During 2008 – 2012, both annual inflow and outflow pollutant fluxes showed a wavy variation trend, mainly influenced by water quantity. Higher TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  influxes of 8 main inflow rivers and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  outflux mainly occurred in high-water periods, while higher TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$  outfluxes mainly occurred in winter (as in lower-water periods, the biological purification of wetland plants were inhibited). TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  influxes were mainly from

\* 2013-08-19 收稿; 2014-01-21 收修改稿。刘发根 (1984 ~), 男, 本科; E-mail: liufagen2001@163.com.

Ganjiang River, Xinjiang River and Le'an River, while the highest concentration of TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$  occurred in Le'an River and Xinjiang River.

**Keywords:** Lake Poyang; pollutant flux; estimation method; spatial-temporal variations; influencing factors

鄱阳湖是中国最大的淡水湖和全球重要生态区,承载着鄱阳湖生态经济区的可持续发展,以占长江15.5%的年径流量影响长江中下游用水安全,因此其生态、生活、生产地位非常重要.但近年来,随着江西工业化城镇化加快及人口增长,污水排放增加,给鄱阳湖水环境保护造成威胁.因此,研究鄱阳湖入、出湖污染物通量及时空变化特征,分析其影响因素,可为鄱阳湖水环境模拟、大型通江湖泊“江-湖”关系研究提供参考,是加强鄱阳湖及长江水功能区限制纳污红线管理,严格控制入湖、入江排污总量的前提,对保护“一湖清水”,保障长江中下游水环境安全具有重要意义.

关于污染物通量,早期研究集中在海湾、河流入海口等近海地带<sup>[1-2]</sup>,后来扩展到内陆河流,特别在太湖流域研究较多<sup>[3-6]</sup>.目前对鄱阳湖的相关研究已取得初步成果,如计算2004—2007年的五河入湖污染负荷(高锰酸盐指数、总氮、总磷)<sup>[7]</sup>,2008—2010年部分时段多种污染物综合后的出、入湖通量<sup>[8]</sup>,重金属出、入湖通量<sup>[9]</sup>.但以上研究都尚未对通量算法进行辨析,而通量算法精度的高低决定通量分析的准确性;且在通量的时空分布特征、影响因素、入出湖通量对比等方面,也有待延续和深入.

本文基于2008—2012年鄱阳湖入、出湖逐月水量、水质同步监测资料,研究通量算法以提高通量计算的准确度,计算鄱阳湖入湖(8条主要入湖河流)、出湖的污染物(总磷、氨氮、高锰酸盐指数)通量,分析其时空分布特征和影响因素(如河湖两相转换影响生物净化能力等),对比入、出湖通量,探讨出湖通量大于入湖通量的原因(水量平衡、内源污染等).

## 1 研究区域概况

### 1.1 鄱阳湖水系

鄱阳湖汇纳赣江、抚河、信江、饶河(由昌江、乐安河汇合而成)、修河(五大河)及西河、博阳河等区间径流,经调蓄后于湖口注入长江,鄱阳湖水系在江西省境内的面积占96.62%.作为过水性、季节性、吞吐型通江湖泊,鄱阳湖具有“高水是湖、低水似河”的独特形态,每年4—6月随五河洪水入湖而水位上涨,7—9月因长江洪水顶托或倒灌而维持高水位,10月稳定退水.丰水期湖水漫滩、湖面扩大;枯水期湖水落槽、洲滩显露、湖面缩小、流速加快,与河道无异.丰、枯水期湖泊面积相差27倍,容积相差66倍<sup>[10]</sup>,多年平均换水周期为19 d<sup>[11]</sup>.

江西水文部门自2007年9月启动鄱阳湖水量水质动态监测,在8条主要入湖河流的水位控制站:赣江(外洲站)、抚河(李家渡站)、信江(梅港站)、修河(永修站)、昌江(渡峰坑站)、乐安河(石镇街站)、西河(石门街站)、博阳河(梓坊站),布设断面开展水量、水质同步监测;在湖口布设出湖监测断面(图1);监测频率均为每月1次.

鄱阳湖入出湖水量平衡计算:假定鄱阳湖年内蓄水变化量为零,则水量平衡公式为:主要径流入湖水量+区间产流=出湖水量.其中,区间产流=区间降雨量-区间总蒸发量(陆地蒸发+湖面蒸发).据研究,1999—2009年间,区间产流约为五河入湖水量的13.2%~25.3%,平均为18.5%<sup>[12]</sup>.此处的“区间”,指五河6个水文控制站(赣江外洲站、抚河李家渡站、信江梅港站、修河永修站、饶河的昌江渡峰坑站和乐安河石镇街站)以下至湖口(含湖面),面积约29519 km<sup>2</sup>,占五河控制面积的19.0%.另据统计,五河多年(1956—2006年)平均入湖水量为 $1257 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,鄱阳湖多年(1956—2005年)平均入江水量为 $1473.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,则多年平均区间产流为五河入湖水量的17.2%<sup>[13]</sup>.

### 1.2 入、出湖水质

1.2.1 入湖水质 按水量占比分析,2008—2012年8条入湖河流水体Ⅰ~Ⅲ类水年均比例为86.0%~93.1%,年际变化无明显差异(Spearman秩相关系数).在季节变化上,汛期(4—9月)水质好于非汛期,5年间各月入湖水体Ⅰ~Ⅲ类水比例低于80%共出现8次,其中6次出现在非汛期;1次出现在2012年8月,该次是因为受台风影响引发强降雨,大量非点源污染物冲刷入湖导致(图2).总之,2008—2012年入湖水质总体维持较好状态,在非汛期和暴雨初期水质下降,主要超标污染物是氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )和总磷(TP).

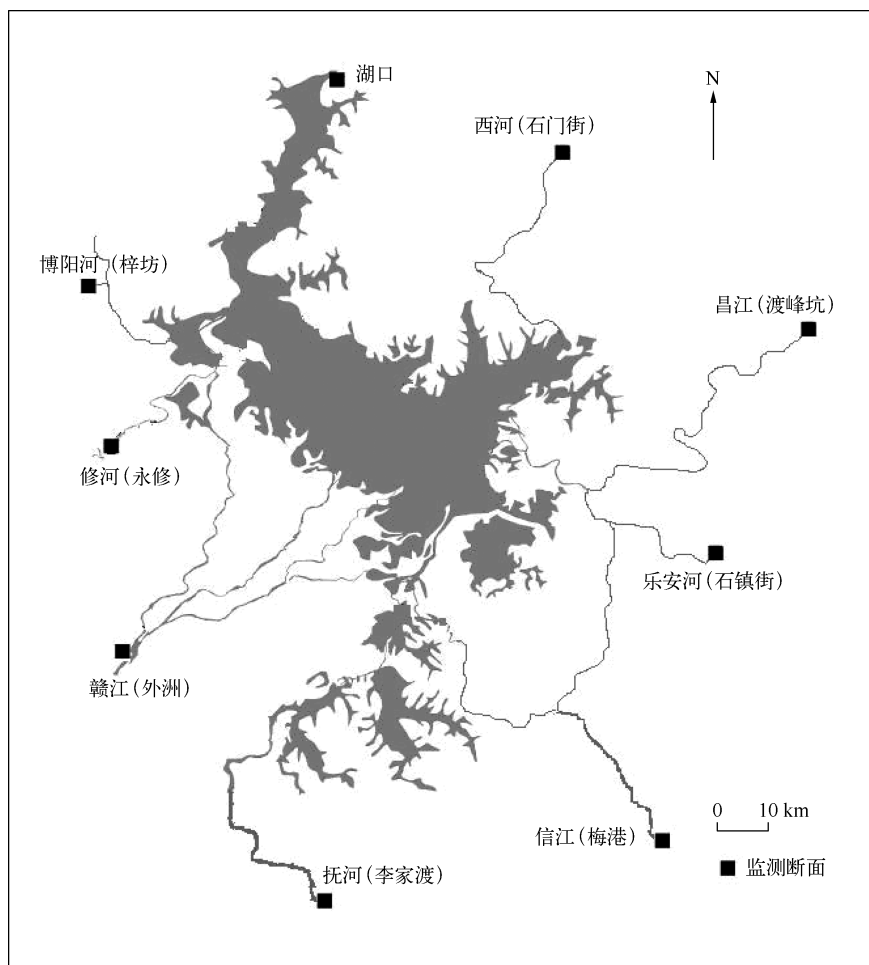


图1 鄱阳湖水量水质同步监测断面分布

Fig. 1 Distribution of synchronous water quantity and quality monitoring sites for inflow and outflow of Lake Poyang

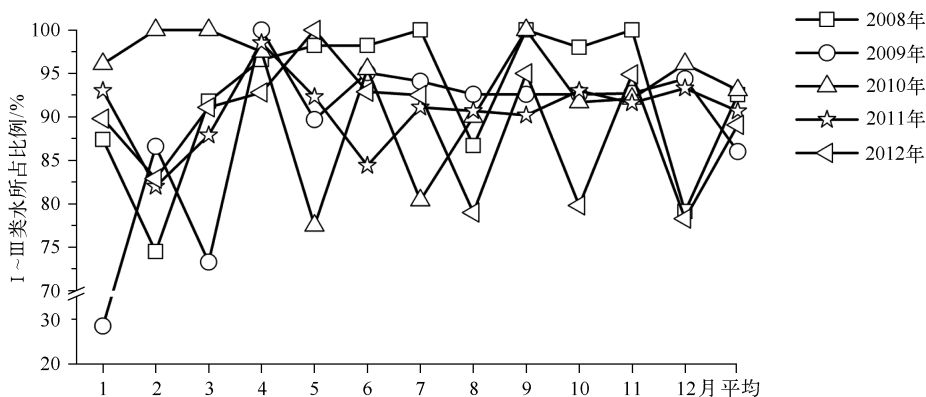


图2 2008—2012年逐月入湖I~III类水所占比例

Fig. 2 Monthly proportions of inflow water met Grade I-III standard(2008-2012)

1.2.2 出湖水质 2008—2012 年出湖口 I ~ III 类水年均比例为 41.7% ~ 58.3%, 年际变化无明显差异 (Spearman 秩相关系数检验). 劣于 III 类水质主要出现在非汛期 (频率达 78%), 主要污染物是 TP.

### 1.3 数据来源

根据鄱阳湖水环境污染特征<sup>[14]</sup>和已有逐月水量、水质同步监测资料, 选取  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、高锰酸盐指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 3 个指标, 代表营养盐污染和耗氧有机物污染, 计算 2008—2012 年鄱阳湖 8 条主要入湖河流的入湖和出湖污染物通量.

## 2 污染物通量算法

污染物瞬时通量是流量与污染物浓度的乘积, 长时段的通量 (如年通量) 需要对该时段内瞬时流量和浓度的监测数据进行研究. 流量资料常有每天 1 次的连续监测数据, 而水质监测频率多为每月 1 次. 因此, 如何利用有限、离散的水质数据和实时、连续的流量数据来提高长时段通量计算的准确性成为一个研究热点. 富国<sup>[15]</sup>讨论了不同污染源对通量贡献的影响, 给出不同通量计算方法的适用范围: 点源作用下 (假定排放量恒定), 径流量只影响污染物浓度, 浓度多与流量呈负相关; 非点源作用下, 污染物产生量与径流量呈正比, 浓度多与流量呈正相关; 点源、非点源混合作用下, 径流量的变化会改变污染物通量和浓度. 浓度与流量关系较为复杂, 可能呈正相关、负相关、无关.

故计算时段通量, 首先应确定主要污染源类型 (实地考察, 资料调研, 或对污染物浓度与流量作相关分析: 负相关明显, 以点源污染为主; 正相关明显或相关不明显, 以非点源污染为主), 再根据表 1 选择合适的算法. 理论和实例研究表明, 表 1 中两种时段通量算法的准确性较高<sup>[16-18]</sup>, 其它算法详见文献 [15, 19]. 注意不同污染物的主要污染源类型可能不同, 需分别考虑<sup>[17]</sup>. 还可根据丰水期、平水期、枯水期的水文特征, 就各时段的污染物通量分别选择最优算法<sup>[18]</sup>.

表 1 常用时段通量算法<sup>[15]</sup>\*

Tab. 1 Popular estimation methods of period-fluxes

| 算法 | 公式                                       | 含义                                 | 特点及应用范围                 |
|----|--|------------------------------------|-------------------------|
| C  | $W_C = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{n}$ | 瞬时通量 $C_i Q_i$ 平均值                 | 弱化径流量的作用, 较适合点源污染为主的情况  |
| D  | $W_D = K \sum_{i=1}^n C_i \bar{Q}_p$     | 瞬时浓度 $C_i$ 与该时段平均流量 $\bar{Q}_p$ 之积 | 强调径流量的作用, 较适合非点源污染为主的情况 |

\* 式中,  $W$  为时段通量,  $n$  为时段内的监测次数,  $K$  为时段转换系数,  $C_i$  为第  $i$  次监测时的污染物浓度,  $Q_i$  为第  $i$  次监测时的水量.

对 2008—2012 年鄱阳湖入湖、出湖断面的水量与水质数据进行相关关系分析 (表 2), 表明乐安河 (石镇街断面) 和出湖口断面的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 以及昌江 (渡峰坑断面) 的 TP 浓度与流量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 表明主要受点源污染影响 (如: 乐安河的污染主要来自乐平工业园所排放的制药化工废水), 其通量适合用算法 C 计算, 即月平均通量等于瞬时通量. 而其它站点的污染物浓度与流量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ) 或相关性不显著, 表明存在非点源污染为主或点源与非点源复合污染的情况, 其通量适合用算法 D 计算, 即月平均通量为瞬时污染物浓度与月平均流量之积.

表 2 鄱阳湖入、出湖监测断面污染物浓度与流量的 Pearson 相关系数

Tab. 2 Pearson's correlations between pollutant concentration and flow of inflow and outflow of Lake Poyang

| 污染物                      | 赣江<br>(外洲) | 抚河<br>(李家渡) | 信江<br>(梅港) | 修河<br>(永修) | 昌江<br>(渡峰坑) | 乐安河<br>(石镇街) | 西河<br>(石门街) | 博阳河<br>(梓坊) | 湖口        |
|--------------------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------|
| $\text{COD}_{\text{Mn}}$ | 0.058      | 0.266 *     | 0.218      | 0.240      | 0.086       | -0.082       | 0.203       | 0.202       | 0.013     |
| $\text{NH}_3\text{-N}$   | -0.089     | 0.127       | 0.434 **   | 0.231      | -0.205      | -0.439 **    | 0.402 **    | 0.148       | -0.345 ** |
| TP                       | 0.231      | 0.259 *     | -0.123     | -0.089     | -0.256 *    | -0.345 **    | -0.053      | -0.108      | -0.328 *  |

\* 表示显著相关,  $P < 0.05$ ; \*\* 表示极显著相关,  $P < 0.01$ .

### 3 结果与分析

#### 3.1 入、出湖通量及对比

根据前述算法,计算2008—2012年8条入湖河流COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP入湖通量的年均值分别为304398、53063、9175 t/a,出湖通量年均值分别为367436、45814、8452 t/a(表3)。理论上分析,污染物入湖后,在物理降解、生物转化等自净作用下,出湖通量应小于入湖通量。但2008—2012年的水量、COD<sub>Mn</sub>通量和个别年份的NH<sub>3</sub>-N、TP通量,八河入湖值小于出湖值,这与有关研究<sup>[8,20]</sup>结果一致。分析原因为:

(1) 未计算区间产流及相应污染物通量。据1.1节分析,除五河入湖外,另需加上相当于五河入湖水量17.2%~18.5%的区间产流(区间降雨量-区间总蒸发量),鄱阳湖入、出湖水量才能平衡,对应的入、出湖通量才能平衡。本研究中,部分入湖通量仅为出湖通量的67%~99%,主要是因为未计算滨湖区污水排放、湖面大气干湿沉降等污染物其它入湖来源,这与已有研究结果相一致:1987—1988年五河输入的氮、磷各占入湖总量的66.8%、76.6%<sup>[21]</sup>;2004—2007年五河输入的COD、TN、TP各占入湖总量的98.7%、77.8%、82.4%<sup>[7]</sup>。对2011年7月湖区水质的研究表明,在入江水道呈现从星子到湖口TN浓度增加的趋势<sup>[22]</sup>,表明滨湖区排污对水质有影响。另外,1987—1988年大气沉降带入的氮、磷总量分别占入湖氮、磷总量的2.5%、1.0%<sup>[21,23]</sup>;2010年8月至2011年7月湖区大气干湿沉降的氮、磷总量分别占五河入湖总量的2.6%、2.3%<sup>[20]</sup>。

(2) 未计算内源污染。底泥中的污染物在一定条件下可能释放而造成内源污染。底泥扰动使表层底泥再悬浮,增加底泥颗粒的反应界面,促进磷的释放,同时也加速了底泥间隙水中磷的扩散<sup>[24-25]</sup>。自2001年长江禁止开采河砂以来,鄱阳湖采砂活动频繁,加剧了底泥中的污染物释放。研究发现,2011年7月湖区总磷浓度极高值出现在松门山北部等采砂区水域,表明采砂加剧了总磷的内源污染释放<sup>[22]</sup>。总磷出湖通量中,内源污染的贡献量不可忽视;氮氮易降解转化,内源污染可能贡献较小。

表3 鄱阳湖八河入、出湖水量和污染物通量对比

Tab. 3 Comparison of water quantity and pollutant fluxes between inflow and outflow of Lake Poyang

| 年份    | 水量  |   |           | COD <sub>Mn</sub> 通量 |              |           | NH <sub>3</sub> -N通量 |              |           | TP通量         |              |           |
|-------|---|---|-----------|----------------------|--------------|-----------|----------------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|
|       | 入湖/<br>(×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 出湖/<br>(×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) | 入湖/<br>出湖 | 入湖/<br>(t/a)         | 出湖/<br>(t/a) | 入湖/<br>出湖 | 入湖/<br>(t/a)         | 出湖/<br>(t/a) | 入湖/<br>出湖 | 入湖/<br>(t/a) | 出湖/<br>(t/a) | 入湖/<br>出湖 |
| 2008年 | 1027                                      | 1296                                      | 79%       | 260752               | 339022       | 77%       | 36688                | 26451        | 139%      | 7709         | 5563         | 139%      |
| 2009年 | 843                                       | 1060                                      | 80%       | 172546               | 237473       | 73%       | 42506                | 18237        | 233%      | 5182         | 5213         | 99%       |
| 2010年 | 1800                                      | 2217                                      | 81%       | 489361               | 500592       | 98%       | 79169                | 60134        | 132%      | 12703        | 12634        | 101%      |
| 2011年 | 738                                       | 970                                       | 76%       | 199421               | 207154       | 96%       | 34695                | 43722        | 79%       | 4497         | 6752         | 67%       |
| 2012年 | 1761                                      | 2120                                      | 83%       | 399907               | 552938       | 72%       | 72257                | 80528        | 90%       | 15785        | 12098        | 130%      |
| 平均    | 1234                                      | 1532                                      | 81%       | 304398               | 367436       | 83%       | 53063                | 45814        | 116%      | 9175         | 8452         | 109%      |

与太湖2001—2002水文年<sup>[3]</sup>、2000—2002年年均<sup>[6]</sup>、2009年<sup>[4]</sup>相比,鄱阳湖(2008—2012年年均)入湖水量是太湖的13.8~15.4倍,而COD<sub>Mn</sub>、TP、NH<sub>3</sub>-N的入湖通量仅为太湖的4.0~8.9倍,表明鄱阳湖入湖水质优于太湖入湖水质;鄱阳湖(2008—2012年年均)出湖水量是太湖的15.8~19.1倍,而COD<sub>Mn</sub>、TP、NH<sub>3</sub>-N的出湖通量为太湖的5.2~12.7倍,表明鄱阳湖出湖水质总体优于太湖(但太湖2000—2002年年均TP出湖浓度低于鄱阳湖)(表4)。

#### 3.2 入、出湖污染物通量年际变化

结合水量分析污染物通量年际变化特征可见(图3),COD<sub>Mn</sub>、TP、NH<sub>3</sub>-N的入湖、出湖通量均与相应水量的年际变化较一致(除出湖NH<sub>3</sub>-N通量与水量的相关性略差外,其它均显著相关, $P < 0.05$ ),在2008—2012年间呈W型波动变化趋势。据《江西省水资源公报》<sup>[14]</sup>数据分析,2008—2012年入湖水量的波动变化,主要为鄱阳湖流域年降雨量波动变化所致。

表4 鄱阳湖和太湖入、出湖水量及污染物通量对比

Tab. 4 Comparison of water quantity and pollutant fluxes between Lake Poyang and Lake Taihu

|                       | 入湖                                   |                              |              |                              | 出湖                                   |                              |              |                              |
|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------|------------------------------|
|                       | 水量/<br>( $\times 10^8 \text{ m}^3$ ) | COD <sub>Mn</sub> /<br>(t/a) | TP/<br>(t/a) | NH <sub>3</sub> -N/<br>(t/a) | 水量/<br>( $\times 10^8 \text{ m}^3$ ) | COD <sub>Mn</sub> /<br>(t/a) | TP/<br>(t/a) | NH <sub>3</sub> -N/<br>(t/a) |
| 鄱阳湖(2008—2012年年均)     | 1234                                 | 304398                       | 9175         | 53063                        | 1532                                 | 367436                       | 8452         | 45814                        |
| 太湖(2001—2002水文年)      | 80                                   | 37571                        | 1029         | —                            | 97                                   | 35431                        | 668          | —                            |
| 太湖(2000—2002年年均)      | 89                                   | 58567                        | 1557         | —                            | 80                                   | 30267                        | 350          | —                            |
| 太湖(2009年)             | 88                                   | 50957                        | 1918         | 13198                        | 93                                   | 44697                        | 1103         | 8893                         |
| 鄱阳湖/太湖(2001—2002水文年)* | 15.4                                 | 8.1                          | 8.9          | —                            | 15.8                                 | 10.4                         | 12.7         | —                            |
| 鄱阳湖/太湖(2000—2002年年均)* | 13.8                                 | 5.2                          | 5.9          | —                            | 19.1                                 | 12.1                         | 24.1         | —                            |
| 鄱阳湖/太湖(2009年)*        | 14.0                                 | 6.0                          | 4.8          | 4.0                          | 16.5                                 | 8.2                          | 7.7          | 5.2                          |

\* 表示量纲,无单位.

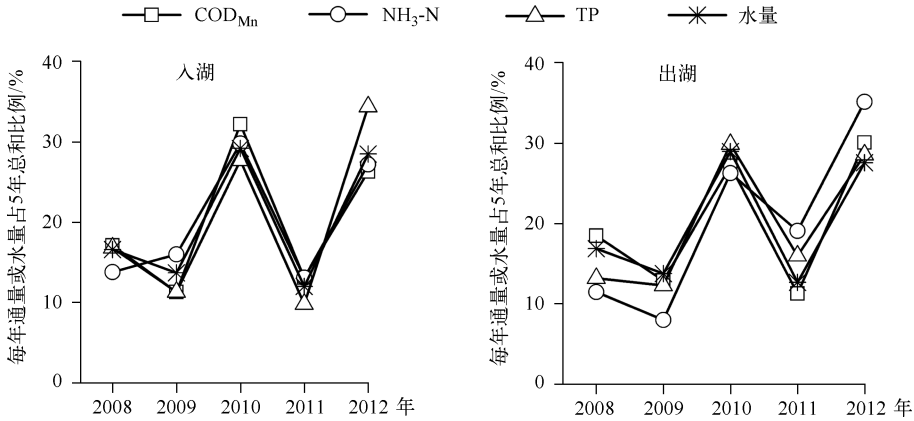


图3 鄱阳湖主要河流入、出湖水量和污染物通量年际变化

Fig. 3 Interannual variability of water quantity and pollutant fluxes for inflow and outflow of Lake Poyang

有学者采用污染物通量等于平均浓度与月平均流量之积的算法,计算2004—2007年五河入湖污染物通量<sup>[7]</sup>.对比发现,2008—2012年鄱阳湖TP入湖通量总体上较前几年有所降低(图4);但按Spearman秩相关系数检验,变化趋势无显著差异.

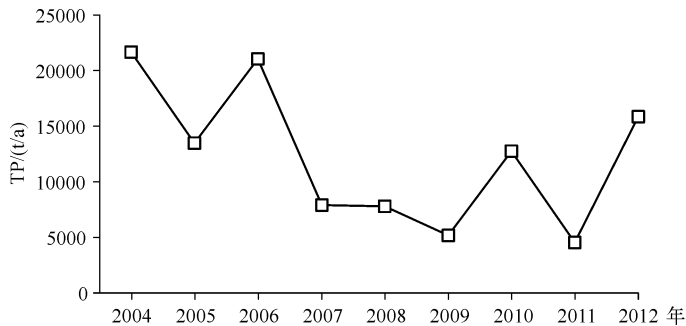


图4 鄱阳湖主要河流总磷入湖通量年际变化

Fig. 4 Interannual variability of total phosphorus flux for main inflow rivers of Lake Poyang

### 3.3 入湖、出湖污染物通量年内变化

从2008—2012年入湖、出湖污染物通量与水量的年内分布可以看出,汛期入湖通量平均占年通量的71.4%,表明污染物入湖集中在汛期的4—7月(2009、2012年在3月份提前入汛)(图5)。入湖通量与入湖水量的季节变化特征总体一致(二者每月占比呈极显著相关, $P < 0.001$ ),特别是2011年 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 入湖通量及2008—2012年的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 入湖通量与相应入湖水量季节变化一致性很好,而部分月份的TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 入湖通量与入湖水量的季节分布有较大差异。结果表明鄱阳湖入湖污染物主要来自面源,入湖通量主要受入湖水量的影响。

出湖方面, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 出湖通量与出湖水量的季节变化特征一致(二者每月占比呈极显著相关, $P < 0.001$ ),峰值出现在4—7月,表明出湖 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 通量主要受出湖水量的影响,集中在汛期出湖。而TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 出湖通量与出湖水量在季节变化上的关系较为复杂,除2009年TP出湖通量与出湖水量的各月占比呈显著正相关外,其它年份出现正相关、负相关、不相关等多种情况。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP出湖通量的高峰值多出现在每年3、12月份,也偶尔出现在其它月份。

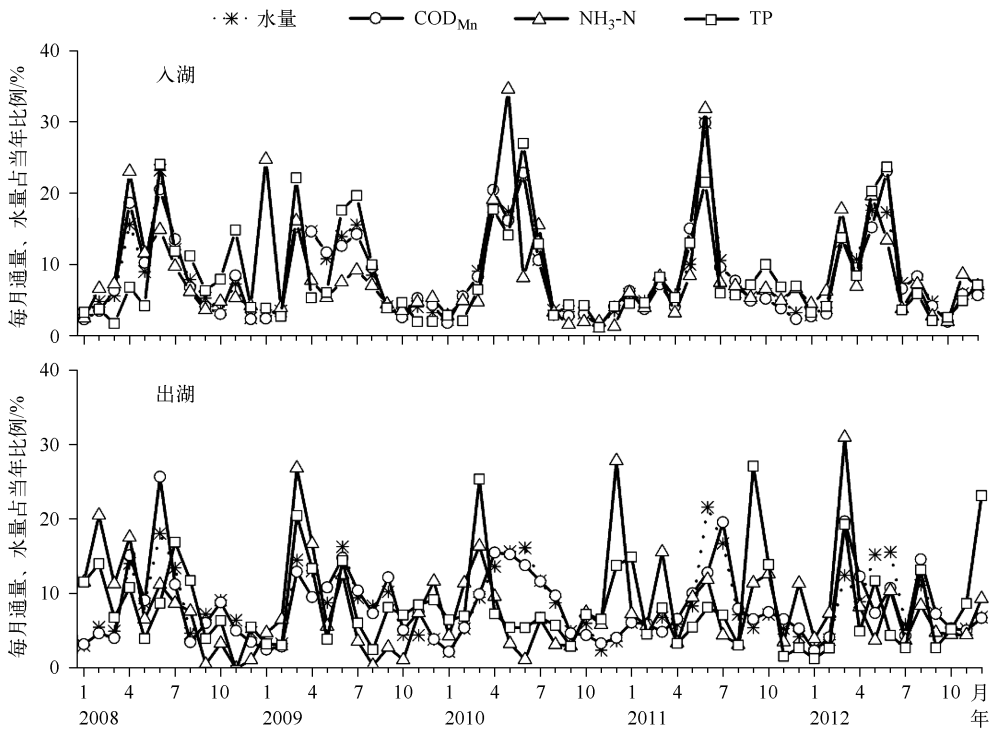


图5 入、出湖水量及污染物通量的逐月分布

Fig. 5 Monthly variability of water quantity and pollutant fluxes for inflow and outflow of Lake Poyang

$\text{COD}_{\text{Mn}}$ 通量的入湖曲线与出湖曲线重叠性较好,呈极显著正相关( $P < 0.001$ ),表明入湖通量大,出湖通量也大;而TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的入湖各月占比与出湖各月占比则无显著相关关系(图6)。原因可能是鄱阳湖具有河湖两相,水位14 m以上湖水开始浸漫洲滩,由河道特性转向湖泊特性<sup>[26]</sup>。2008—2012年间,鄱阳湖月均水位(星子站,吴淞高程)高于14 m均出现在每年5—9月(6—9月占90%)。此时主航道水体进入湖区草洲或将其浸没,又正逢春、夏、秋季节有利于植被生长,植被降解水体氮、磷的生物净化作用较强,故尽管营养盐通量入湖较多,但出湖较少;而冬季湖区洲滩裸露,入湖水体仅在主航道流动,未与洲滩上的植被接触,水体中营养盐降解较少,营养盐通量尽管入湖较少,出湖仍较多。故营养盐出湖通量一般是冬季多,春、夏、秋季少。

刘元波等<sup>[20]</sup>采用瞬时浓度(每季度1次)与月平均流量之积计算月平均通量,得出2010年8月至2011

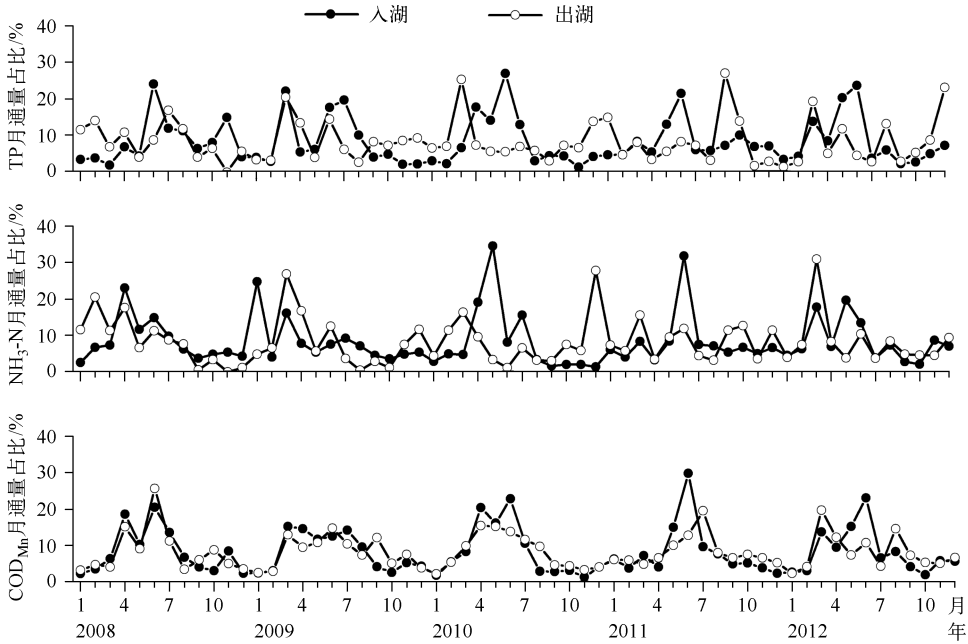


图6 各月污染物通量入湖、出湖对比

Fig. 6 Comparison of monthly pollutant fluxes between inflow and outflow of Lake Poyang

年7月的TP出湖通量为12500 t/a, 本文结果与其接近. 但本研究得出的湖口TP通量季节分布特征(通量值大小排序: 2011年1月 > 2010年10月 > 2011年6月 > 2011年7月 > 2011年4月)与其(2011年6月 > 2011年7月 > 2011年1月 > 2011年4月 > 2010年10月)不一致, 这可能是水质采样时间及采样点的不同导致TP浓度监测值不同、通量算法不同等因素所致. 本文对通量算法的研究表明, 计算湖口TP通量, 宜以每月监测的瞬时浓度与瞬时流量之积做为月平均通量.

### 3.4 入湖污染物通量空间分布

2008—2012年间, 8条主要入湖河流输入鄱阳湖的COD<sub>Mn</sub>通量中, 60%来自赣江、信江, 赣江历年占比均超过45%; NH<sub>3</sub>-N通量的60%来自赣江(2008—2009年占比超过50%, 2010—2012年约占30%)和乐安河(2011年占46%, 其它年份约占25%); TP通量方面, 赣江约占40%, 信江约占20%, 乐安河约占15%. 刘元波等<sup>[20]</sup>采用瞬时浓度(每季度1次)与月平均流量之积作为月平均通量的算法, 计算出2010年8月至2011年7月的五河TP入湖通量为10750 t/a; 赣江输入量占五河入湖TP通量的41.5%, 饶河、信江各占31.3%、18.8%, 本文结果与之接近, 即入湖污染物主要来自于赣江、信江、乐安河(图7). 但据各河污染物浓度可发现, 超标污染物TP、NH<sub>3</sub>-N浓度最高的是乐安河、信江; 赣江污染物浓度较低, 只是因水量最多(2008—2012年每年占八河总水量的比例均超过51.9%)而成为3种污染物入湖通量的最大贡献者(图8). 故防治鄱阳湖水环境污染, 需对输入污染物总量最多的赣江和污染物浓度最大的乐安河、信江进行统筹治理.

## 4 建议

1) 鄱阳湖出湖水质劣于入湖水质, 部分污染物的出湖通量大于入湖通量, 故开展鄱阳湖水功能区限制纳污红线管理, 应重点加强对滨湖区城镇排污、采砂扰动加剧内源污染的治理, 并统筹治理污染物浓度贡献最大的乐安河、信江和污染物总量输入最多的赣江.

2) 出湖口冬季流量较小, 但TP、NH<sub>3</sub>-N出湖通量较多, 故保护长江中下游水环境, 需重点关注鄱阳湖枯季时的排污贡献. 鄱阳湖水利枢纽工程建成后, 是否会因提高水位而加强湿地净化作用、减少出湖营养盐通量, 值得跟踪研究.



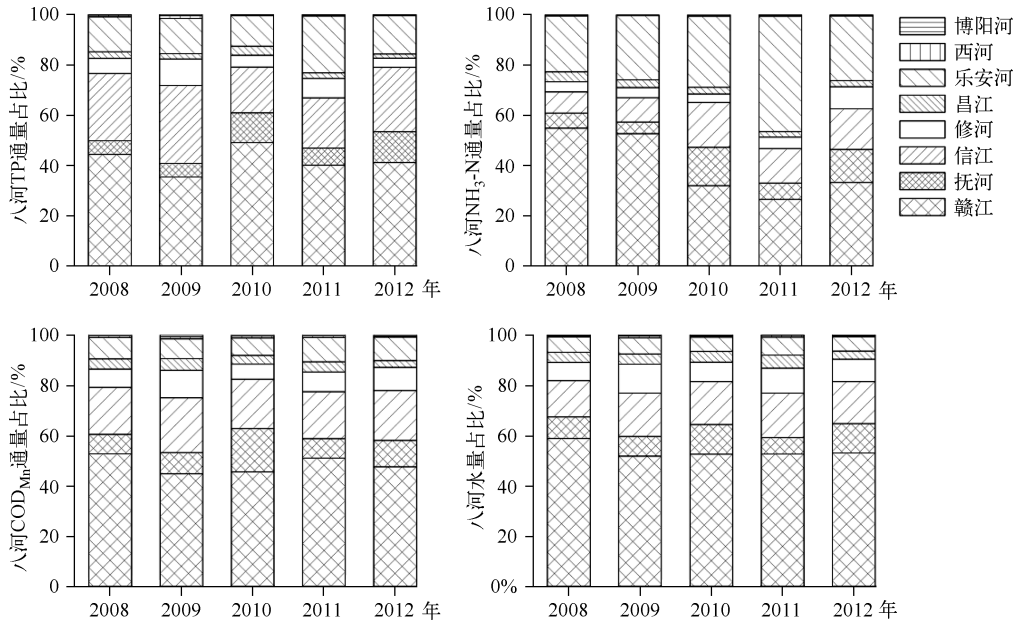


图7 鄱阳湖八河入湖污染物通量、水量的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of pollutant fluxes and water quantity for eight inflow rivers of Lake Poyang

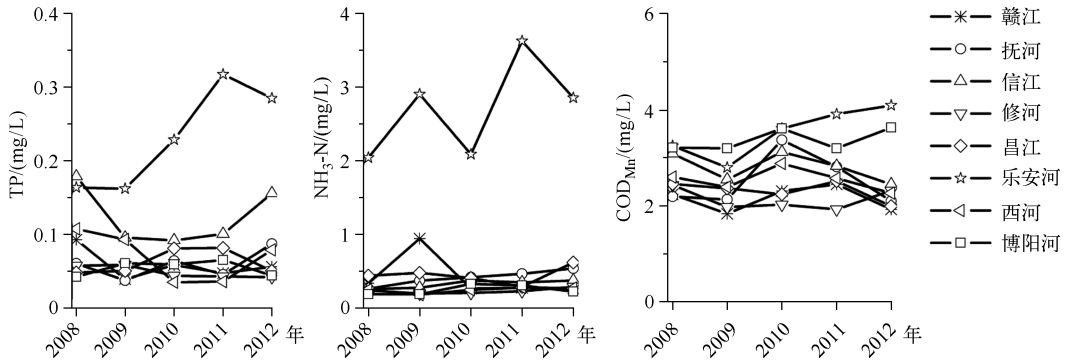


图8 鄱阳湖八河入湖河流 COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 年均浓度

Fig. 8 Annual average concentrations of COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>3</sub>-N and TP for eight inflow rivers of Lake Poyang

### 5 参考文献

[ 1 ] 袁 宇,朱京海,侯永顺等. 以大辽河为例分析中小河流入海通量的估算方法. 环境科学研究,2008,21(5): 163-168.

[ 2 ] 刘玉机. 鸭绿江口主要污染物入海通量的研究. 海洋环境科学,1988,7(2):13-16.

[ 3 ] 许朋柱,秦伯强. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量. 湖泊科学,2005,17(3):213-218.

[ 4 ] 燕姝雯,余 辉,张璐璐等. 2009 年环太湖入湖出湖河流量及污染负荷通量. 湖泊科学,2011,23(6):855-862.

[ 5 ] 罗 缙,逢 勇,林 颖等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(2): 131-135.

[ 6 ] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002年). 湖泊科学,2006,18(3):225-230.

[ 7 ] 李志军. 鄱阳湖水资源保护规划研究. 人民长江,2011,42(2):51-55.

- [ 8 ] 李荣昉,张 颖. 鄱阳湖水质时空变化及其影响因素分析. 水资源保护, 2011, 27(6): 9-13, 18.
- [ 9 ] 区铭亮,周文斌,胡春华. 鄱阳湖水系重金属出入湖通量估算. 广东农业科学, 2012, 39(4): 114-117.
- [ 10 ] 江西省水利厅. 江西河湖大典. 武汉: 长江出版社, 2010.
- [ 11 ] 金国花,谢冬明,邓红兵等. 鄱阳湖水文特征及湖泊纳污能力季节性变化分析. 江西农业大学学报, 2011, 33(2): 388-393.
- [ 12 ] 郭家力,郭生练,李天元等. 鄱阳湖未控区间流域水量平衡分析及校验. 水电能源科学, 2012, 30(9): 30-32, 58.
- [ 13 ] 莫 蕾. 鄱阳湖污染物最大日负荷估算和分配研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [ 14 ] 江西省水文局. 江西省水资源公报(1999~2012). 2012.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 王君丽,姜国强,任秀文等. 流域污染物通量测算方法研究. 新疆环境保护, 2011, 33(2): 1-7, 18.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 谭 恒,赵文晋,王 伦. 东辽河分水期污染物通量估算研究. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 337-339.
- [ 19 ] Webb BW, Phillipsa JM, Wallinga DE *et al.* Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS (R) Programme. *Science of the Total Environment*, 1997, 194/195: 379-389.
- [ 20 ] 刘元波,张 奇,刘 健等. 鄱阳湖流域气候水文过程及水环境效应. 北京: 科学出版社, 2012: 221-255.
- [ 21 ] 姜加虎,窦鸿身. 中国五大淡水湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [ 22 ] 陈晓玲,张 媛,张 琨等. 丰水期鄱阳湖水体中氮、磷含量分布特征. 湖泊科学, 2013, 25(5): 643-648.
- [ 23 ] 朱海虹,张 本. 鄱阳湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [ 24 ] 高 丽,周健民. 磷在富营养化湖泊沉积物-水界面的循环. 土壤通报, 2004, 35(4): 512-515.
- [ 25 ] 董浩平,姚 琪. 水体沉积物磷释放及控制. 水资源保护, 2004, 20(6): 20-23, 69.
- [ 26 ] 方春明,曹文洪,毛继新等. 鄱阳湖与长江关系及三峡蓄水的影响. 水利学报, 2012, 43(2): 175-181.