

太湖西部环湖河道污染物输移速率变化特征*

朱金格¹, 刘鑫², 邓建才¹, 彭俊翔², 张海涛²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 阐明污染物出入湖输移速率对于湖泊陆域污染控制具有重要意义. 本文研究了太湖西部主要环湖河道总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})输移速率变化特征. 结果表明环湖河道上述指标净输入速率分别为707.9、727.0、28.8、18.2和700.9 g/s. 城东港、百渚港、大浦港和沙塘港4条河道TN、DTN、TP、DTP和COD_{Mn}输入速率分别占西部河道总输入速率的62.7%、63.6%、67.1%、66.6%和64.8%. 太浦河、长兜港和大钱港TN、DTN、TP、DTP和COD_{Mn}输出速率占总输出的86.5%、86.9%、85.0%、85.3%和80.6%. 污染物净输入速率受水情影响, TN和DTN浓度汛前最大, 而TP、DTP、COD_{Mn}浓度汛期增大, 汛后分别降低44.2%、48.8%和39.8%. 城东港氮、磷输入速率受浓度控制, 其他河道各指标输移速率受流量控制. 近岸湖体TN浓度与入湖速率呈显著正相关, 而离岸湖体TN、TP、COD_{Mn}浓度对入湖速率的变化响应不明显.

关键词: 控氮; 入湖河道; 外源污染; 太湖西部; 输移速率

Pollutant transport rates in the rivers around western Lake Taihu

ZHU Jing¹, LIU Xin², DENG Jiancai¹, PENG Junxiang² & ZHANG Haitao²

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China*)

(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China*)

Abstract: Elucidating transport rate of pollutants of the rivers around the lake is of great significance to clarify and control the external pollution. Spatial and temporal variations of pollutants transport rate of the rivers around western Lake Taihu were studied according to monthly investigation. The results show that the net input rate of total nitrogen(TN) to the lake was 707.9 g/s, slightly lower than that of dissolved total nitrogen (DTN, 727.0 g/s). The input rate of total phosphorus(TP), dissolved total phosphorus(DTP) and permanganate index (COD_{Mn}) were 28.8 g/s, 18.2 g/s and 700.9 g/s, respectively. The input of pollutants was mainly from Chengdong River, and followed by Baidu River, Dapu River and Shatang River. The input rates of TN, DTN, TP, DTP and COD_{Mn} in the 4 rivers accounted for 62.7%, 63.6%, 67.1%, 66.6% and 64.8% of the total input rate respectively. The output of the pollutants was mainly via Taipuhe River, Changdou River and Daqian River and accounted for 86.5%, 86.9%, 85.0%, 85.3% and 80.6% of the total output rate, respectively. The net input rate of TN and DTN was high before flood season, decreased about 25.0% in flood season. The net input rate of TP, DTP and COD_{Mn} increased in flood season, whereas decreased about 44.2%, 48.8% and 39.8%, respectively after flood season. The transport rate of nitrogen and phosphorus in Chengdong River was significantly influenced by its concentration, but transport rate of each index in other rivers was influenced by flow flux. The concentration of TN in nearshore lakes was not significantly correlated with TN concentration of rivers, but significant positive correlated with the transport rate of surrounding rivers. Concentrations of TN, TP and COD_{Mn} of offshore lakes have no obvious response to the changes of pollutants input rates.

Keywords: Nitrogen control; inflow rivers; external pollution; western Lake Taihu; transport rates

* 国家自然科学基金项目(51609235)、江苏省自然科学基金项目(BK20151063)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205002)联合资助. 2018-01-16收稿; 2018-03-07收修改稿. 朱金格(1983~), 男, 博士, 助理研究员; E-mail: jgzhu@niglas.ac.cn.

流域污染物外部输入是造成湖泊水质恶化及生态系统受到破坏的重要原因. 太湖地处长江三角洲平原水网区, 周边河网密布, 出入湖河道(溇港)228条, 其中口门敞开的河道有62条, 主要分布于太湖西部地区. 环湖河道污染物的大量输入增加了太湖污染负荷^[1-3], 造成太湖西部湖区水质不能持续达标, 轻度富营养化的态势难以转变. 在各项环保措施综合作用下, 2007—2014年环太湖主要河道氮、磷等污染物浓度呈降低趋势^[4-5], 但与太湖的控氮控磷目标相比, 入湖河道相对较高的污染物浓度持续对太湖水质改善和富营养化治理形成了很大的压力. 围绕太湖环湖河道水质变化特征目前已有大量研究成果, 基本揭示了不同水文条件下环湖河道水质的时空分布^[6-7], 尤其是氮^[8-9]、磷^[10]营养盐的变化特征. 对于湖泊水质管理而言, 入湖污染物总量是需要重点考虑的因素, 弄清污染物输入量的时空变化, 对于进一步由太湖水质目标推算各河道或控制单元的减排目标至关重要. 入湖污染总量除了与环湖河道水质密切相关, 还受入湖流量控制. 当前研究一般基于流量与污染物浓度计算出月通量或年通量, 关注重点是总量的变化, 如滇池^[11]、巢湖^[12]和太湖^[2-3, 5]等重要湖泊的入湖污染物通量研究. 对于地处平原河网区的太湖流域, 河道水流方向多变, 出入湖通量的估算依赖于高频次的水文水质同步观测. 本文基于太湖西岸主要环湖河道水文水质的同步观测, 从输移速率的角度分析污染物出入湖速率的空间分布及不同水情下的变化, 探讨影响污染物输移速率的关键因素, 及其与太湖近岸、离岸湖体水质的关系, 以期对太湖水质目标管理及流域水环境综合整治提供重要参数与理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

选取太湖西部21条流量相对较大的河道为研究对象, 其中雅浦港往南至乌溪港之间的12条河道以及太浦河位于江苏境内, 合溪新港往东至汤溇港之间的8条河道位于浙江境内. 望虞河受“引江济太”调度影响较大且距离西部湖区相对较远, 本文未将其纳入研究范围. 为了探讨湖体污染物浓度对入湖河道的响应, 本文在近岸和离岸水体分别布点进行了水质的同步观测. 河道与湖体采样点空间分布见图1.

1.2 调查与样品分析

2014年1月14—15日、2月25—26日、3月26—27日、4月26—27日、5月25—26日、6月20—21日、7月23—24日、8月26—27日、9月26—27日、10月25—26日、11月26—27日和12月26—27日分别对21条河道进行了逐月流量观测和水样采集, 对湖体进行了同步水样采集. 流量采用SonTek River Surveyor M9走航式流速仪进行观测, 获取观测河道的断面形态、流量、平均流速信息. 在每个观测断面进行4次观测, 取其流量平均值. 进行流量观测的同时, 利用采水器在河道中间位置进行水样采集, 采样深度为水面以下20 cm, 采集水样1 L. 在湖体L1和L2采样点利用采水器采集水下50 cm处水样1 L. 上述水样当天带回至中国科学院太湖湖泊生态系统研究站, 参照《湖泊富营养化调查规范》^[13]进行总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等水化指标的分析. 其中, 氮、磷浓度测定采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法, COD_{Mn}测定采用酸性高锰酸钾法.

1.3 统计分析

根据太湖西部河道出入湖流量空间分布, 将雅浦港往南至乌溪港之间的12条河道归类为入湖河道, 合溪新港往南至太浦河的9条河道归类为出湖河道.

污染物输移速率 V_{TN} 、 V_{DTN} 、 V_{TP} 、 V_{DTP} 、 $V_{COD_{Mn}}$ 代表每秒种TN、DTN、TP、DTP和COD_{Mn}的输入输出质量(g/s). 河道*i*的TN输移速率 $V_{TN_i} = C_{TN_i} \cdot Q_i$, 其中 C_{TN_i} 为TN浓度(mg/L); Q_i 为流速仪观测的流量(m³/s). 将21条河道的同期 V_{TN} 累加, 即得到当前月份TN总输移速率 V_{TN_t} , 对12个月的 V_{TN_t} 求平均, 即得到年均输移速率(g/s). 用相同办法计算DTN、TP、DTP和COD_{Mn}各条河道输移速率、总输移速率及年均输移速率.

利用Pearson相关性统计分析, 探讨各河道污染物浓度、输移速率与流量的相关性, 入湖河道污染物输入速率与湖体污染物浓度的相关性. 利用One-way ANOVA进行95%置信度水平下的单因素方差分析, 探讨各河道在污染物浓度、输移速率方面的差异性. $P < 0.05$ 代表具有显著性.

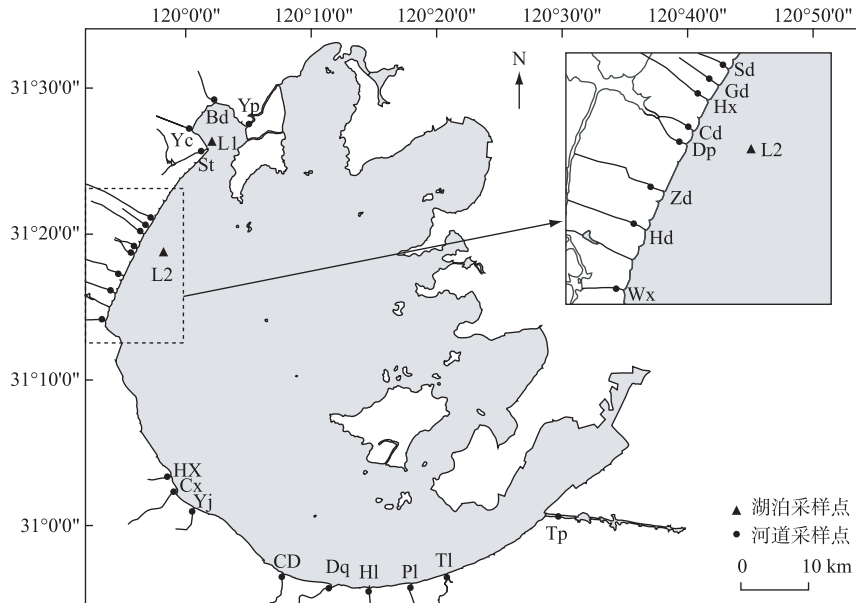


图1 环太湖河道水文水质同步监测断面及湖体采样点(Yp 雅浦港,Bd 百渎港,Yc 殷村港,St 沙塘港,Sd 社渎港,Gd 官渎港,Hx 洪巷港,Cd 城东港,Dp 大浦港,Zd 朱渎港,Hd 黄渎港,Wx 乌溪港,HX 合溪新港,Cx 长兴港,Yj 杨家浦港,CD 长兜港,Dq 大钱港,HI 幻溇港,PI 濮溇港,TL 汤溇港,Tp 太浦河)

Fig.1 Monitoring sections of the 21 rivers and water quality sampling sites of Lake Taihu

2 结果与分析

2.1 环湖河道流量与水质

太湖西部环湖河道流量具有较大的空间差异,西北部河道总体为入湖河道,年均最大入湖流量出现在城东港($84.1 \text{ m}^3/\text{s}$),其次是百渎港($32.8 \text{ m}^3/\text{s}$)。西南部河道以出湖为主,年均最大出湖流量出现在太浦河($73.1 \text{ m}^3/\text{s}$),其次是长兜港($24.7 \text{ m}^3/\text{s}$)。

环湖河道年均 TN 浓度介于 $1.80\sim 4.06 \text{ mg/L}$ 之间(图 2),空间上由北往南 TN 浓度逐渐降低。入湖河道和出湖河道 TN 平均浓度分别为 3.68 和 2.45 mg/L 。入湖河道 TN 浓度均值的年内变化与出湖河道具有显著性差异($P=0.02$)。DTN 浓度介于 $1.30\sim 3.85 \text{ mg/L}$ 之间,变化趋势与 TN 一致($r=0.909, P<0.01$)。DTN 在 TN 中的比例由北往南呈现出下降趋势,入湖河道 DTN/TN 比为 91.1% ,出湖河道降至 77.5% ,表明湖体中 DTN 在 TN 中的占比小于入湖河道。TP 浓度介于 $0.082\sim 0.209 \text{ mg/L}$ 之间,平均浓度为 0.136 mg/L 。入湖河道和出湖河道 TP 平均浓度分别为 0.149 和 0.118 mg/L ,年内并不具显著性差异。 COD_{Mn} 浓度介于 $2.94\sim 4.82 \text{ mg/L}$ 之间,平均浓度为 4.04 mg/L ,达到地表Ⅲ类水标准。TP 和 COD_{Mn} 由南往北的空间差异相对较小,主要原因在于入湖河道的浓度与西太湖浓度较为接近,与 TN 浓度相比入湖污染负荷相对较小,可见控氮依然是河道外源治理的重点。

按照汛前(1—4月)、汛期(5—9月)和汛后(10—12月)分时段对各河道水质进行了统计。汛前各河道 TN 浓度均高于汛期和汛后(图 3),其中入湖河道平均 TN 浓度汛前为 4.65 mg/L ,汛期平均浓度降低 31.5% ,为 3.18 mg/L ,汛后浓度略有上升,为 3.21 mg/L ,与汛前浓度相比降低 31.0% 。TP 浓度汛前、汛期和汛后入湖浓度均值分别为 0.13 、 0.19 和 0.11 mg/L ,汛期浓度升高 46.2% ,汛后浓度大幅下降。空间上,汛期各入湖河道 TP 浓度均高于汛前和汛后,出湖河道无明显规律。 COD_{Mn} 汛前、汛期、汛后入湖浓度均值分别为 4.21 、 4.47 和 3.60 mg/L ,汛期浓度略有上升,汛后浓度最低,空间上,入湖河道汛期浓度高。环湖河道 TN、TP、 COD_{Mn} 浓度在汛前和汛期和汛后都具有显著性差异($P<0.01$)。总体而言,汛期地表径流的汇入一定程度上稀释了入湖

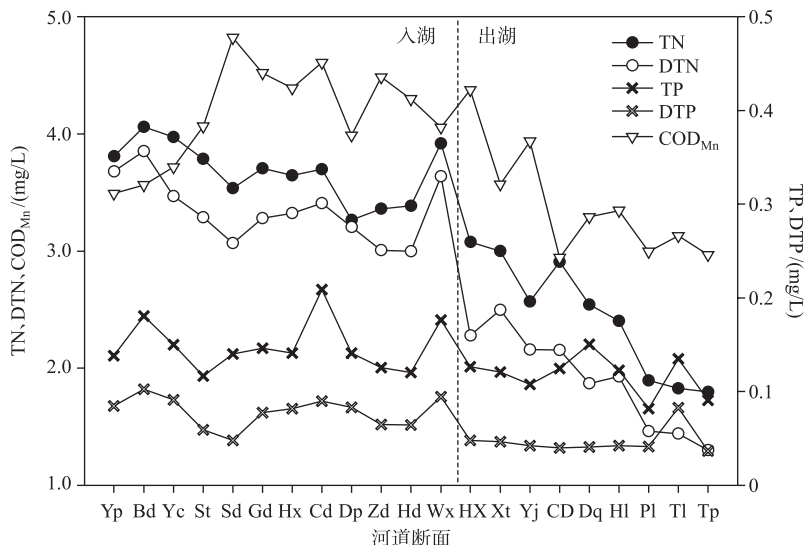


图2 太湖西部环湖河道污染物浓度变化趋势

Fig.2 Change trend of pollutant concentrations of the 21 rivers around western Lake Taihu

河道 TN 浓度,但 TP 和 COD_{Mn} 浓度分别上升 46.2% 和 6.2%,汛后 TN 浓度回升,TP 和 COD_{Mn} 浓度降低. 环湖河道尤其是入湖河道污染物浓度的时空多变性加上流量的变化,增加了入湖污染物输移的复杂性.

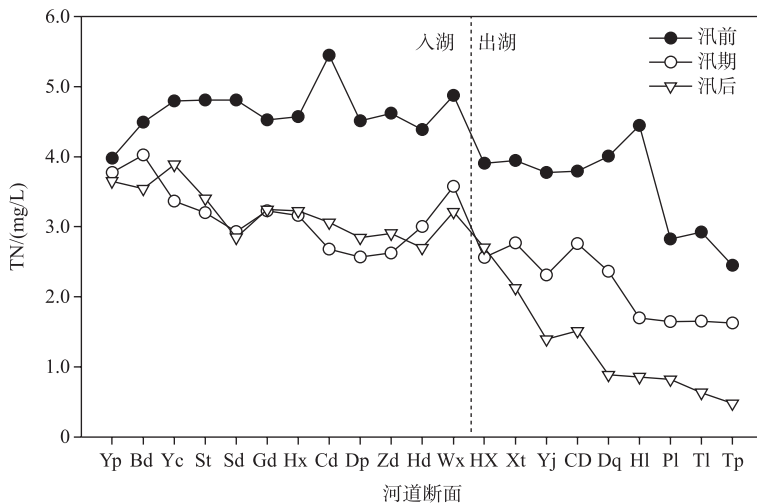


图3 不同水情下太湖西部环湖河道 TN 浓度

Fig.3 TN concentrations of the 21 rivers around western Lake Taihu in different hydrological conditions

2.2 环湖河道污染物输移速率

统计了各河道 V_{TN} 、 V_{DTN} 、 V_{TP} 、 V_{DTP} 和 $V_{COD_{Mn}}$ 月变化(图4),发现 TN 最大输入速率可达 646.5 g/s,以城东港为主要输入河道,其平均输入速率为 300.4 g/s;最大输出速率为 588.5 g/s,以太浦河和长兜港输出为主,平均输出速率分别为 98.3 和 93.3 g/s;环湖河道 TN 总输入速率为 963.6 g/s,净输入速率为 707.9 g/s. 各河道 DTN 输移速率与 TN 浓度均呈显著相关 ($P < 0.05$),二者在各河道的分配及时间上的变化具有高度一致性. 需要注意的是,出湖 DTN 比例下降造成 DTN 净输入速率为 727.0 g/s,略高于 TN 净输入速率. TP 最大输入

速率为 43.9 g/s, 同样以城东港为主要输入河道, 环湖河道 TP 总输入速率为 43.9 g/s, 净输入速率为 28.8 g/s. DTP 和 TP 输移速率的时空变化同样具有高度一致性 ($r=0.883, P<0.05$), DTP 总输入速率为 23.1 g/s, 净输入速率为 18.2 g/s. COD_{Mn} 以城东港为主要输入河道, 其平均输入速率为 392.6 g/s; 以太浦河输出为主, 平均输移速率为 179.8 g/s; 环湖河道 COD_{Mn} 总输入速率为 1093.9 g/s, 净输入速率为 700.9 g/s, 与 TN 较为接近.

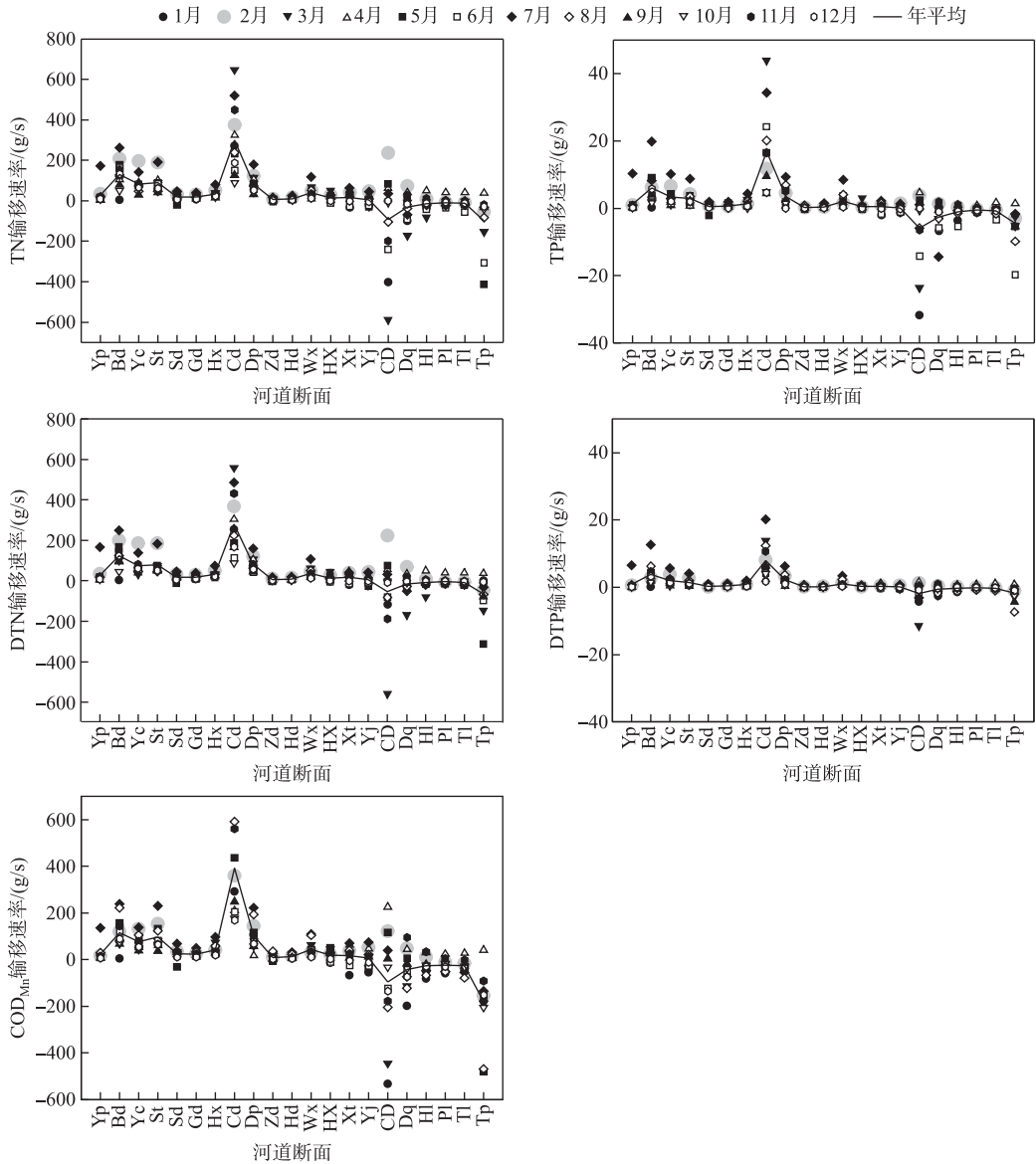


图4 太湖西部环湖河道污染物输移速率

Fig.4 Pollutant transport rates of the 21 rivers around western Lake Taihu

统计主要河道污染物输移速率可以看出城东港是污染物的主要输入河道, 各类物质输入速率占太湖西部河道总输入速率的 30% 以上, 其次是百淩港、大浦港和沙塘港 (表 1). 上述 4 条河道对 TN、DTN、TP、DTP 和 COD_{Mn} 的输入速率分别为 604.3、561.9、29.5、15.4 和 708.8 g/s, 占西部河道总输入速率的 62.7%、63.6%、67.1%、66.6% 和 64.8%. TN、DTN、TP、DTP、 COD_{Mn} 主要通过太浦河、长兜港和大钱港输出太湖, 3 条河道上述

指标的输出速率分别为 221.2、135.9、12.8、4.2 和 316.6 g/s, 占总输出速率的 86.5%、86.9%、85.0%、85.3% 和 80.6%。统计结果表明, 城东港、百洩港、大浦港和沙塘港是入湖污染物尤其是氮总量控制的重点治理目标, 其 TN 输入速率为 604.3 g/s, 估算每天氮的输入量达 52.2 t, 对太湖造成较高的外源污染负荷。

表 1 主要河道的污染物输移速率(g/s)及其在总输入/输出速率的占比

Tab.1 Percentage of pollutants transport rate and its average value of the main rivers

污染物		输入				输出		
		城东港	百洩港	大浦港	沙塘港	太浦河	长兜港	大钱港
TN	输移速率	300.4	130.5	83.7	89.6	98.3	93.3	29.6
	占比	31.20%	13.50%	8.70%	9.30%	38.40%	36.50%	11.60%
DTN	输移速率	278.5	124.2	80.5	78.6	65.6	53.7	16.6
	占比	31.50%	14.10%	8.90%	9.10%	41.90%	34.30%	10.60%
TP	输移速率	16.9	6.1	3.6	2.9	4.4	5.9	2.6
	占比	38.50%	13.80%	8.20%	6.60%	29.30%	38.80%	16.90%
DTP	输移速率	7.9	3.8	2.2	1.4	1.7	1.8	0.6
	占比	34.40%	16.30%	9.60%	6.30%	35.60%	36.70%	13.10%
COD _{Mn}	输移速率	392.6	116.1	103.4	96.7	179.8	95.4	41.4
	占比	35.90%	10.60%	9.40%	8.80%	45.80%	24.30%	10.50%

统计分析不同水情条件下 5 种污染物的输入、输出速率(表 2), 发现环湖河道 TN 汛前净输入速率较大, 为 748.9 g/s, 汛期和汛后入湖速率出现不同程度下降, 但净输入速率较为接近, 分别为 557.69 和 553.79 g/s. DTN 汛前净输入速率为 773.3 g/s, 汛期和汛后逐步降低. 在不同水情条件下 DTN 的净输入速率高于 TN, 表明太湖溶解性氮的输出能力较弱. TP 和 DTP 净输入速率均在汛期明显增大, 分别为 35.5 和 24.0 g/s, 汛前和汛后净输入速率较为接近. COD_{Mn} 净输入速率同样在汛期较高, 汛后最低. 表明 TP、DTP 和 COD_{Mn} 的污染负荷受水情影响较大。

表 2 不同水情下太湖环湖河道污染物输入、输出和净输入速率(g/s)

Tab.2 The sum of pollutants transport rate of the rivers around Lake Taihu in different hydrological conditions

污染物	汛前			汛期			汛后		
	入湖	出湖	净输入	入湖	出湖	净输入	入湖	出湖	净输入
TN	1034.3	285.4	748.9	878.0	320.4	557.6	662.2	108.5	553.7
DTN	939.9	166.6	773.3	812.0	192.4	619.6	636.9	82.6	554.3
TP	34.0	16.6	17.4	55.7	20.2	35.5	24.5	4.7	19.8
DTP	16.3	5.3	11.0	29.6	5.6	24.0	15.7	3.4	12.3
COD _{Mn}	895.1	346.3	548.8	1242.6	482.7	759.9	763.5	305.8	457.7

3 讨论

3.1 输移速率与流量和污染物浓度关系

各河道污染物浓度和流量相关性统计结果呈现出一定的差异. 除殷港和沙塘港 TN 浓度与流量呈正相关, 其他所有入湖河道 TN 浓度均随流量增加有降低趋势, 尽管相关性并不显著, 但一定程度上表明陆域水文过程对氮起到一定的稀释作用. 社渚港和城东港 TP 浓度与流量呈负相关, 其他所有入湖河道 TP 浓度均随流量增加有升高趋势, 其中雅浦港、殷村港、沙塘港 TP 浓度与流量呈显著正相关, 表明降雨过程加剧了陆域磷的污染负荷. 污染物的输移速率则主要受流量控制, V_{TN} 、 V_{DTN} 、 V_{TP} 、 V_{DTP} 和 $V_{COD_{Mn}}$ 均与流量呈显著相关 ($P < 0.01$). 除了城东港, 其他各入湖河道的 V_{TN} 均与流量呈显著相关 ($P < 0.05$), 输入速率主要受来水量的影响. 城东港 V_{TN} 与 TN 浓度呈显著相关 ($r = 0.667$, $P < 0.01$), 除此之外沙塘港、殷村港、合溪新港 V_{TN} 除了与流

量呈显著相关,同样与 TN 浓度呈显著相关($P<0.01$). 表明控制城东港、沙塘港、殷村港和合溪新港的 TN 浓度对于降低入湖氮负荷具有关键影响. V_{DTN} 与 V_{TN} 规律一致($r=0.971$, $P<0.05$). 城东港 V_{TP} 与 TP 浓度呈显著相关($r=0.764$, $P<0.05$), 与流量无相关性, 而其他入湖河道 V_{TP} 与 TP 浓度和流量均表现出显著相关性($P<0.05$). 城东港 TP 浓度为入湖河道最高, 控制其 TP 浓度是外源磷污染治理的关键. 各入湖河道 $V_{COD_{Mn}}$ 与流量均呈显著相关, 此外殷村港、沙塘港、洪巷港、城东港、大浦港 $V_{COD_{Mn}}$ 还与 COD_{Mn} 浓度呈显著相关($P<0.05$).

3.2 输移速率对湖体水质的影响

为了探讨河口附近湖体水质对污染物浓度和输移速率的响应, 统计近岸湖体(L1点)TN、TP和 COD_{Mn} 浓度与社渚港、官渚港、洪巷港、城东港和大浦港的浓度, 发现湖体与各河道水质均无显著相关性(图5). 但对5条河道的 V_{TN} 进行求和后与湖体浓度进行相关性分析, 发现除了7月强降雨导致入湖速率异常升高外, 其他月份变化趋势较为接近, 在去除7月的影响后, 二者显著相关($r=0.971$, $P<0.01$). 表明湖体TN浓度虽然不直接与河道浓度显著相关, 但非极端水情条件下湖体浓度与周边河道的综合输入速率呈显著相关. 因此, 降低湖西区近岸水体TN浓度的关键是控制城东港的TN浓度, 这是由于城东港 V_{TN} 占入湖总 V_{TN} 的31.2%, 且其 V_{TN} 受河道TN浓度控制. 入湖TP和 COD_{Mn} 污染负荷较低, 统计结果表明 V_{TP} 和 $V_{COD_{Mn}}$ 与湖体TP和 COD_{Mn} 浓度并无显著相关性.

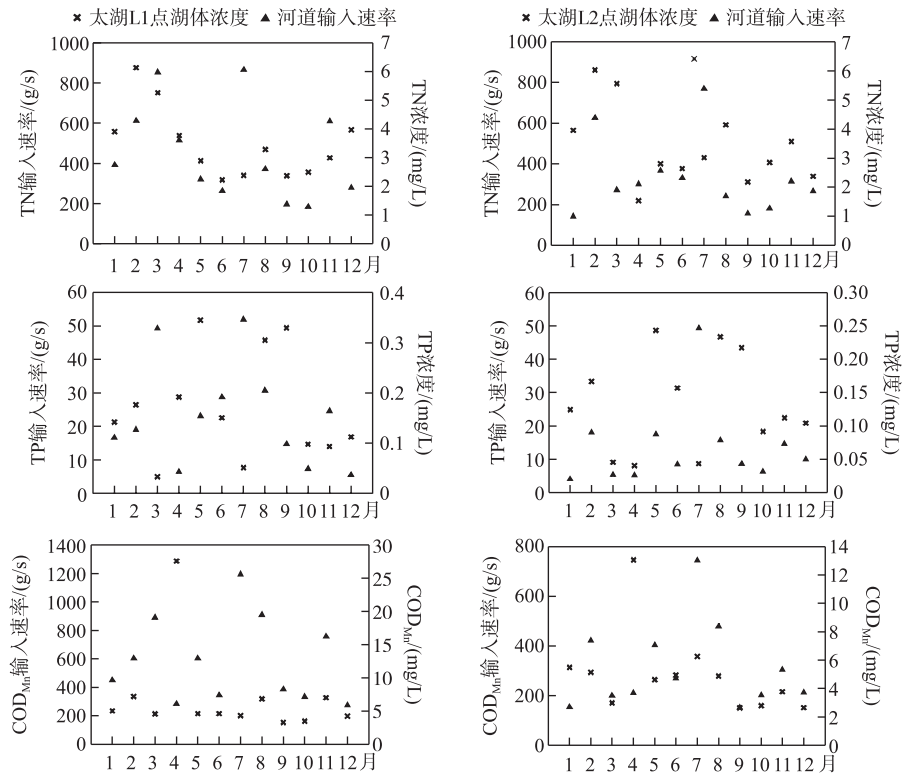


图5 入湖河道污染物输移速率与湖体浓度同期对比

Fig.5 Correlations of pollutant input rate of the rivers around Lake Taihu and pollutant concentrations in the lake

统计竺山湾(L2点)TN、TP、 COD_{Mn} 浓度与雅浦港、百渚港、殷村港和沙塘港4条入湖河道的关系, 探讨半封闭型湖湾浓度对河道的响应. 结果显示湖体浓度与河道浓度无显著相关性(图5), 与各河道 V_{TN} 、 V_{TP} 和 $V_{COD_{Mn}}$ 以及4条河道输移速率之和同样不具显著相关性, 表明污染物入湖速率变化并不直接引起湖湾浓度发生相应的改变. 其原因在于L2点位于湖湾中间位置, 与L1点相比距离河口较远, 湖体的稀释作用和自

净功能使得 TN、TP 和 COD_{Mn} 浓度对入湖速率的响应不再明显. 现有研究结果表明太湖氮素年自净量约 $3.22 \times 10^4 \text{ t}$, 占入湖氮素总量的 46%^[14], 总磷自净量为 1500 t ^[15], 竺山湾总氮、总磷年自净能力分别为 1979 和 119 t ^[16]. 目前 4 条河道综合 V_{TN} 、 V_{TP} 和 $V_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 分别为 330.0、13.6 和 313.0 g/s , 估算年入湖 TN、TP 和 COD_{Mn} 总量分别为 10402、431 和 9870 t. 削减 4 条河道 TP 浓度以及沙塘港和殷村港 TN、 COD_{Mn} 浓度是降低竺山湾入湖污染负荷的关键. 此外, 竺山湾需要加强湖滨带的生态重建及湖体水生植被生态修复, 加强对入湖污染物的拦截和植物吸收能力, 提升自净作用以应对当前较高的污染负荷.

4 结论

太湖西部入湖和出湖河道 TN 浓度变化存在显著性差异, 入湖 DTN/TN 比为 91.1%, 出湖降至 77.5%. 水情影响入湖水质, TN 浓度汛期降低 31.5%, 但 TP 和 COD_{Mn} 浓度分别上升 46.2% 和 6.2%, 汛后 TN 浓度回升, TP 和 COD_{Mn} 浓度下降.

环湖河道 TN、DTN、TP、DTP 和 COD_{Mn} 净输入速率分别为 707.9、727.0、28.8、18.2 和 700.9 g/s . 污染物的主要输入河道依次是城东港、百渎港、大浦港和沙塘港, 其 TN、DTN、TP、DTP、 COD_{Mn} 输入速率分别占西部河道总输入速率的 62.7%、63.6%、67.1%、66.6% 和 64.8%. 太浦河、长兜港和大钱港上述指标输出速率分别占总输出速率的 86.5%、86.9%、85.0%、85.3% 和 80.6%.

污染物入湖速率在不同水情下具有显著性差异, TN 和 DTN 净输入速率汛前最大, 汛期和汛后下降 25% 以上, TP、DTP 和 COD_{Mn} 净输入速率汛期增大, 汛后分别降低 44.2%、48.8% 和 39.8%. 城东港氮、磷输入速率受浓度控制, 其他河道各指标输移速率受流量控制. 近岸湖体 TN 浓度与入湖速率呈显著正相关, 离岸湖体 TN、TP 和 COD_{Mn} 浓度对入湖速率的变化响应不明显.

5 参考文献

- [1] Xu PZ, Qin BQ. Water quality and pollutant fluxes of surrounding rivers of Lake Taihu during the hydrological year of 2001–2002. *J Lake Sci*, 2005, **17**(3): 213–218. DOI:10.18307/2005.0304. [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.]
- [2] Zhai SH, Zhang HJ. Water quality and waste load variation of rivers around Lake Taihu from 2000 to 2002. *J Lake Sci*, 2006, **18**(3): 225–230. DOI: 10.18307/2006.0305. [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.]
- [3] Yan SW, Yu H, Zhang LL *et al.* Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 855–862. DOI:10.18307/2011.0605. [燕姝雯, 余辉, 张璐璐等. 2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855–862.]
- [4] Yi J, Xu F, Gao Y *et al.* Variations of water quality of the major 22 inflow rivers since 2007 and impacts on Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1167–1174. DOI:10.18307/2016.0602. [易娟, 徐枫, 高怡等. 2007 年以来环太湖 22 条主要河流水质变化及其对太湖的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1167–1174.]
- [5] He XJ, Wang B, Liu GY *et al.* Water quality, quantity and pollutant fluxes variations of the rivers surrounding Lake Taihu in Zhejiang Province during hydrological year of 2010–2011. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 658–662. DOI:10.18307/2012.0502. [何锡君, 王贝, 刘光裕等. 2010–2011 水文年浙江省环太湖河道水质水量及污染物通量. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 658–662.]
- [6] Zha HM, Zhu MY, Zhu GW *et al.* Seasonal difference of water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China. *Environmental Science*, 2018, (3): 1102–1112. [查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析. 环境科学, 2018, (3): 1102–1112.]
- [7] Wang Q, Wu YD, Ding QL *et al.* Temporo-spatial variations and influential factors of water quality in the flowing river systems of western Taihu Lake Basin. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2699–2707. [王倩, 吴亚东, 丁庆玲等. 西太湖入湖河流域污染时空分异特征及解析. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2699–2707.]
- [8] Lv XY, Zhang Y, Xu L *et al.* Nitrogen pollutants variation of typical rivers entering into Taihu Lake in summer-autumn period. *Hydro-Science and Engineering*, 2016, (5): 9–15. [吕学研, 张咏, 徐亮等. 典型入太湖河流夏-秋季氮素污染变化特征. 水利水运工程学报, 2016, (5): 9–15.]

- [9] Wu QL, Ruan XH, Wu CM *et al.* Analyses of sources and transformation of nitrogen as a contaminant in the river and lake water in the western region of the Taihu Lake basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3883-3889. [吴庆乐, 阮晓红, 吴朝明等. 太湖西部河湖氮污染物来源及转化途径分析. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 3883-3889.]
- [10] Gao YX, Song YZ, Yu JH *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of different forms of phosphorus in three sorts of rivers around Lake Taihu. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1404-1412. [高永霞, 宋玉芝, 于江华等. 环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征. 环境科学, 2016, **37**(4): 1404-1412.]
- [11] Li L, Wang SR, Wang HF *et al.* Temporal and spatial variations of phosphorus loading and the forms, compositions and contributions in inlet river of Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 951-960. DOI:10.18307/2016.0504. [李乐, 王圣瑞, 王海芳等. 滇池入湖河流磷负荷时空变化及形态组成贡献. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 951-960.]
- [12] Tang XX, Jiang CY, Wang C *et al.* Responses of total phosphorus concentration to total phosphorus loading of inflow rivers in the western part of Chaohu Lake. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(S1): 176-180. [唐晓先, 蒋晨韵, 王璨等. 巢湖西半湖总磷浓度对入湖总磷负荷的响应. 环境科学与技术, 2017, **40**(S1): 176-180.]
- [13] Jin XC, Tu QY eds. The standard methods in lake eutrophication investigation; second edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. [金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范: 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [14] Chen XF, Chuai XM, Zeng J. Nitrogenous fluxes and its self-purification capacity in Lake Taihu. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2309-2314. [陈小锋, 揣小明, 曾巾等. 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究. 环境科学, 2012, **33**(7): 2309-2314.]
- [15] Zhai SH, Han T, Chen F *et al.* Self-purification capacity of nitrogen and phosphorus of Lake Taihu on the basis of mass balance. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 185-190. DOI:10.18307/2014.0203. [翟淑华, 韩涛, 陈方等. 基于质量平衡的太湖氮、磷自净能力计算. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 185-190.]
- [16] Han T, Zhai SH, Hu WP *et al.* Experiment and model simulation of self-purification capacity of nitrogen and phosphorus in Lake Taihu. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3862-3871. [韩涛, 翟淑华, 胡维平等. 太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟. 环境科学, 2013, **34**(10): 3862-3871.]