

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.023

基于固定式 ADCP 的陈东港污染物通量计算

徐海波^{1,2}, 吴金华^{1,2}, 任小龙³, 顾炉华^{1,2}, 李秋红^{1,2}, 朱 玲³

(1. 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 江苏省环境工程重点实验室, 江苏 南京 210003;
3. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 江苏 无锡 214031)

摘要:根据太湖流域西部重要入太湖河道陈东港 2021 年 ADCP 流量测验数据和水质在线监测数据, 分析了该河道流量、污染物质量浓度和通量的年内变化特征, 比较了流量、水质数据采集频次对污染物通量计算结果的影响。结果表明: 2021 年陈东港年平均流量为 $73.66 \text{ m}^3/\text{s}$, 年径流量为 23.29 亿 m^3 , 日均流量年内波动剧烈, 峰值出现在 7 月, 其变化过程受降水影响显著; COD_{Mn} 和 TP 质量浓度的年内波动也较明显, 全年累计通量分别为 10357 t 和 352 t 。基于固定式 ADCP 流量测验数据计算污染物通量较基于水文巡测数据的精度提升约 39.5%, 两者差异主要集中在 6—8 月。若要将两种污染物年累计通量的计算相对误差控制在 5% 以内, 流量采集频次不宜低于 2 d 一次; 若相对误差控制在 10% 以内, 流量采集频次不宜低于 10 d 一次, 在丰水期 (6—9 月) 和枯水期 (12—2 月) 需提升至 2 d 一次。与流量采集频次相比, 两种污染物年累计通量对水质采集频次变化的敏感性相对较低, 当水质采集频次从 8 h 一次减少到 30 d 一次时, 相对误差仍在 5% 以内。

关键词: 固定式 ADCP; 污染物通量; 流量; 水质; 陈东港; 太湖流域

中图分类号: X502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)06-0178-08

Calculation of pollutant influx of the Chendong River based on fixed ADCP//XU Haibo^{1,2}, WU Jinhua^{1,2}, REN Xiaolong³, GU Luhua^{1,2}, LI Qiuhong^{1,2}, ZHU Ling³ (1. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210003, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210003, China; 3. Wuxi Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Wuxi 214031, China)

Abstract: According to the discharge data measured by ADCP and water quality data acquired by online monitoring of the Chendong River in 2021, which is an important channel into the western Taihu Basin, the annual variation characteristics of discharge, mass concentration and influx of pollutant of the river were analyzed. Also, the effects of discharge and water quality sampling frequency on the calculation of pollutant influx were compared. The results show that the annual average discharge of the Chendong River was $73.66 \text{ m}^3/\text{s}$ in 2021, and the annual runoff was $2.329 \text{ billion m}^3$. The daily discharge fluctuated violently during 2021, with a peak in July, and its change process was significantly affected by precipitation. The mass concentration of COD_{Mn} and TP also fluctuated greatly during 2021, with the annual cumulative influx being 10357 t and 352 t , respectively. The accuracy of pollutant influx calculation based on fixed ADCP discharge measurement data was about 39.5% higher than that based on hydrological patrol survey data. The difference was mainly reflected from June to August. If it is necessary to control the relative error of the calculation of the annual cumulative influx of the two pollutants within 5%, the discharge sampling frequency should be at least 2 days. If the relative error needed to be controlled within 10%, the discharge sampling frequency should be at least 10 days. While during the wet season (from June to September) and the dry season (from December to February), the discharge sampling frequency should be increased to 2 days. Compared with the discharge sampling frequency, the annual cumulative influx of the two pollutants were relatively less sensitive to change of water quality sampling frequency. When the water quality sampling frequency was reduced from 8 hours to 30 days, the relative error was still within 5%.

Key words: fixed ADCP; pollutant influx; discharge; water quality; the Chendong River; Taihu Basin

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42101056); 江苏省省属公益类科研院所自主科研经费资助项目 (GYYS2021204)

作者简介: 徐海波 (1975—), 男, 硕士, 主要从事环境规划与管理研究。E-mail: xuhb@jshb.gov.cn

通信作者: 吴金华 (1996—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事遥感与水生态研究。E-mail: gis_wujinhua@163.com

污染物通量是指单位时间通过某一过水断面的污染物质量^[1]。河道是流域水分、泥沙和污染物等物质输送和运移的基本通道,河道污染物入湖是造成湖体水质污染及水生态破坏的重要原因^[2]。掌握河道污染物通量的时空变化特征,可为流域污染物溯源、厘清跨界断面污染责任、控制和削减入河污染物提供技术支撑^[3-4]。

太湖^[5-6]、鄱阳湖^[7]、洞庭湖^[8]、呼伦湖^[9]等已有入湖河道污染物通量的相关研究,这些研究主要聚焦于河道污染物的入湖贡献^[10]、通量估算方法的筛选与不同数据采集频次的误差分析^[11]以及污染物通量与湖体水质响应关系^[12]等问题。河道污染物通量计算在很大程度上依赖于流量、水质数据的获取,实践中多通过水文巡测获取流量数据,结合同期水质监测数据计算污染物通量,但人工巡测获取流量的频次难以细致刻画污染通量的变化过程,而高频次测量河道流量和水质需耗费大量人力物力^[13-14]。21 世纪初,声学多普勒流速仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)开始应用于我国河道流量测验^[15]。ADCP 利用声学多普勒频移实现流量自动监测^[16],具有数据获取高效、传输快捷的优点^[17],可获取分钟级别的流量数据^[18-19],近年来在镇江九曲河闸^[20]、京杭大运河谏壁闸^[21]等的流量观测中取得成功应用,但应用 ADCP 流量测验数据开展河道污染物通量计算的研究尚未系统开展。

本文基于 2021 年固定式 ADCP 的流量测验数据和河道水质在线监测数据探索河道污染物通量的耦合计算方法,分析不同流量、水质采集频次对太湖西部重要入湖河道陈东港的污染物通量计算结果的影响,以期为平原河网地区河道污染物通量科学、经济监测与获取提供参考。

1 研究数据与研究方法

1.1 研究区概况

陈东港位于江苏省宜兴市,西起太湖流域西部重要湖泊东氿,东至太湖,是太湖湖西地区重要的入湖河道。陈东港全长 2.28 km,河底宽为 40~50 m,河面宽为 70~80 m,多年平均径流量约为 15.44 亿 m³。陈东港承接上游宜兴市的来水,多年平均入太湖水量占江苏省入太湖水量的 33%,是宜兴市所有入太湖河流中径流量最大的一条。陈东港位置和 ADCP 测流断面、水质监测点如图 1 所示,ADCP 测流断面距离陈东港入湖口约 700 m,水质自动监测点位于陈东港入湖口上游 500 m 处,流量和水质监测位置相邻,同步开展监测。

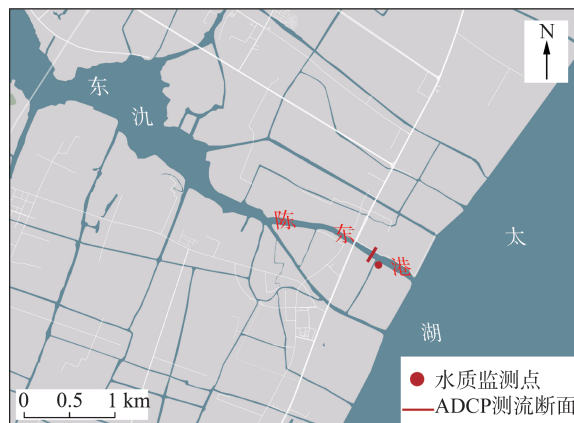


图 1 陈东港河道位置及监测布局示意图

Fig. 1 Location and survey layout diagram of the Chendong River

1.2 研究数据

1.2.1 流量数据

陈东港流量数据由横向固定式 ADCP 测验得到,测流断面见图 2。ADCP 利用声学多普勒效应,根据反射声波与发射声波间的频率差计算流速,该流速称为 ADCP 代表流速。为进一步获取断面平均流速,依据 SL 337—2006《声学多普勒流量测验规范》,需采集大于 30 个不同水流条件的流速数据样本,通过代表流速法建立 ADCP 代表流速与断面平均流速关系。考虑陈东港测流过程可能会受船行波、风浪等因素的影响,共计比测了 44 测次的断面流速,筛选了其中未受外部影响的 39 测次的断面流速参与率定分析。

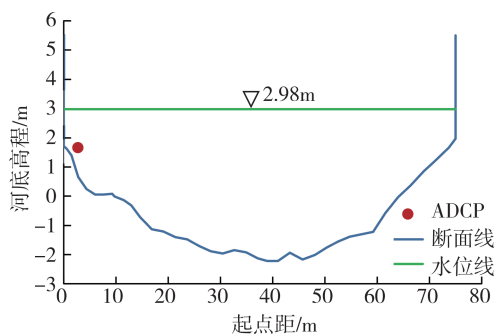


图 2 陈东港 ADCP 测流断面

Fig. 2 Section of ADCP discharge measurement in the Chendong River

固定式 ADCP 采集得到测流断面不同垂线的流速,在建立流速关系线时,需选取单元流速垂向分布较规则、均匀、稳定且基本无干扰影响的区间,作为最优代表单元区间。图 3 为陈东港测流断面 ADCP 代表流速与断面平均流速散点图及拟合关系。采用符号、适线和偏离值 3 项检验及定线精度分析对该关系线进行定线合理性和精度评定,评定结果满足 GB 50179—2015《河流流量测验

规范》和SL/T 247—2020《水文资料整编规范》)的相关要求,说明 ADCP 流量测验数据精确可信。

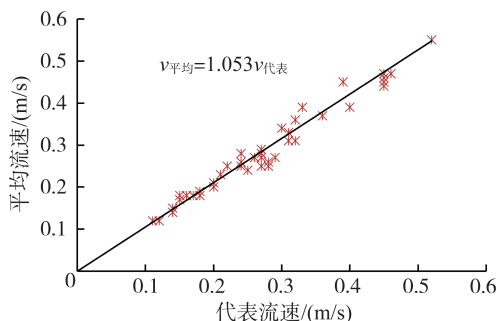


图3 陈东港 ADCP 代表流速与断面平均流速关系线

Fig. 3 Relationship between representative flow velocity of ADCP and average flow velocity of section in the Chendong River

在获取准确的 ADCP 断面平均流速数据后,基于流速面积法计算流量:

$$Q = vA$$

式中: Q 为断面流量, m^3/s ; v 为过水断面平均流速, m/s ; A 为过水断面面积, m^2 。采用卡尔曼滤波对原始数据进行异常值处理,最终得到陈东港每 5 min 一次的流量数据。

1.2.2 水质数据

水质指标包括高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 和总磷 (TP), 水质在线监测依据 HJ 915—2017《地表水自动监测技术规范(试行)》开展, 数据采集频次通常为 4 h 一次。其中, COD_{Mn} 的测定采用酸性高锰酸钾法 (GB/T 11892—89《水质 高锰酸盐指数的测定》), TP 的测定采用钼酸铵分光光度法 (GB/T 11893—89《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》)。理论上陈东港全年应监测水质数据 2 190 条, 但实际监测过程中受供电、通信、仪器故障等不确定性因素影响, 导致部分时段数据缺失或无效, 最终 COD_{Mn} 和 TP 分别监测到 1 773 和 1 777 条数据, 数据有效率在 80% 以上。对于缺失数据, 根据邻近数据由线性插值获取。

1.3 污染物通量计算方法

污染物通量可分为瞬时污染物通量和时段污染物通量, 瞬时污染物通量为河道瞬时流量与污染物质量浓度的乘积, 累计污染物通量则为一定时段内瞬时污染物通量的时间积分。Webb 等^[22]根据分时段通量、时段平均质量浓度与时段平均水量乘积两类估算方法构造了时段通量计算公式, 本文在其基础上, 根据所使用的流量、水质数据的频次, 采用如下污染物通量计算公式:

$$W_i = \rho_i Q_i \quad (1)$$

$$W_c = \sum_{i=1}^n \rho_i Q_i \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: W_i 为瞬时污染物通量, g/s ; W_c 为累计污染物通量, t ; ρ_i 为时刻 i 的污染物质量浓度, mg/L , Q_i 为时刻 i 的瞬时流量, m^3/s ; n 为总时刻数。

2 结果与分析

2.1 2021 年流量特征

根据 ADCP 流量测验和断面上游宜兴站的降水量数据, 绘制 2021 年陈东港日均流量、月均流量和日降水量变化过程如图 4 所示。2021 年陈东港年均流量为 $73.66 \text{ m}^3/\text{s}$, 日均流量波动剧烈, 峰值为 $318.56 \text{ m}^3/\text{s}$, 出现在 7 月 29 日; 谷值为 $4.56 \text{ m}^3/\text{s}$, 出现在 9 月 4 日, 7 月和 8 月的日均流量比其他月份的波动更大。月尺度上, 1—7 月流量呈上升趋势, 7 月最高, 月均流量为 $114.4 \text{ m}^3/\text{s}$; 7 月过后流量有所回落, 10 月又再次回升, 10 月月均流量为 $102.96 \text{ m}^3/\text{s}$ 。经计算, 2021 年陈东港年径流量为 23.29 亿 m^3 , 其中, 7 月径流量最高, 为 3.06 亿 m^3 , 占全年径流量的 13.16%; 其次为 10 月 (2.76 亿 m^3), 占全年径流量的 11.84%; 1 月、9 月的径流量相对较低, 分别为 1.26 亿 m^3 和 1.32 亿 m^3 , 占全年径流量的 5.40% 和 5.65%。

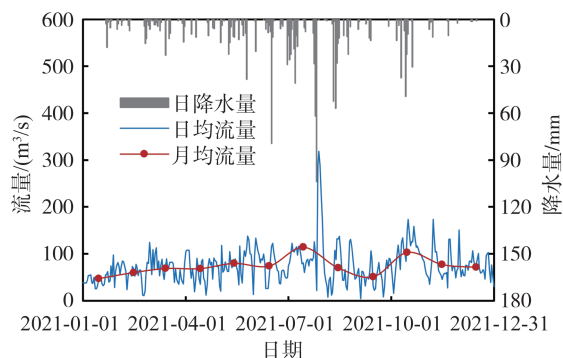


图4 2021 年陈东港流量和降水量变化过程

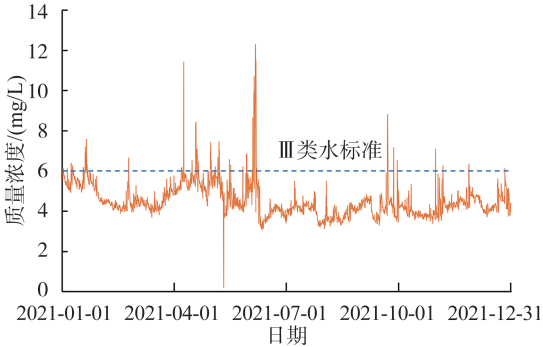
Fig. 4 Change process of discharge and precipitation of the Chendong River in 2021

通过对比 2021 年陈东港日均流量和断面上游宜兴站的日降水量, 可以看出陈东港流量变化受降水影响显著, 日均流量较大的时段基本对应着强降水过程。7 月 24—27 日区域降水量为 203 mm, 单日最大降水量为 104 mm, 该降水过程对应着 7 月 28—31 日的流量过程, 日均流量为 $280.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 单日最大流量为 $318.56 \text{ m}^3/\text{s}$ 。10 月 13—16 日区域降水量为 89 mm, 10 月 16—17 日的日均流量为 $158.72 \text{ m}^3/\text{s}$ 。7—8 月降水变化是造成该时段流量波动的主要原因。

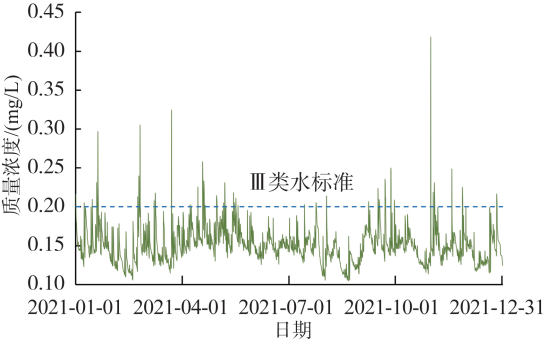
2.2 2021 年水质特征

陈东港 2021 年 COD_{Mn} 平均质量浓度为 4.52 mg/L (图 5 (a)), 达到地表Ⅲ类水标准 (≤6 mg/L)。根据每 4 h 一次的监测数据, 陈东港 COD_{Mn} 全年共超地表Ⅲ类水标准 88 次, 全年最高质量浓度为 12.28 mg/L, 超地表Ⅲ类水标准 1.05 倍。COD_{Mn} 质量浓度在 6 月中旬至 9 月中下旬的丰水期整体较低, 可稳定达到Ⅲ类水标准。4 月下旬至 6 月上旬, COD_{Mn} 质量浓度高位波动。

陈东港 2021 年 TP 平均质量浓度为 0.15 mg/L (图 5(b)), 达到地表Ⅲ类水标准 (≤0.2 mg/L), 全年共超地表Ⅲ类水标准 74 次, 全年最高质量浓度为 0.42 mg/L, 超地表Ⅲ类水标准 1.1 倍。TP 质量浓度波动较为明显, 但无明显规律。春夏之交, TP 质量浓度的波动上升与微生物与底栖动物活动增强及河道底泥释放有着较大关系。



(a) COD_{Mn}



(b) TP

图 5 陈东港 2021 年水质指标变化过程

Fig.5 Change process of water quality indexes of the Chendong River in 2021

2.3 2021 年污染物通量计算结果

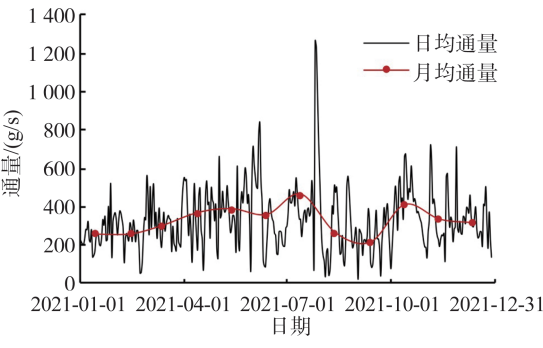
2021 年陈东港污染物通量计算结果如表 1 所示, 变化过程如图 6 所示。COD_{Mn} 和 TP 通量的变化特征有一定的相似性。两种污染物的日均通量波动性较大, 日均通量与日均流量的波动特征基本一致, 其中 COD_{Mn} 峰值为 1 237.06 g/s, TP 峰值为 55.38 g/s, 两种污染物峰值均出现在 7 月 29 日, 对应着日均流量的峰值。此外, COD_{Mn} 日均通量在 4—6 月比 TP 波动

幅度更大, 主要是受其质量浓度的影响。月尺度上, 1—5 月两种污染物月均通量呈上升趋势, 6 月有所降低, 随后均在 7 月达到全年峰值, 8—9 月回落, 在 10 月月均通量再次升高, 之后再次回落。

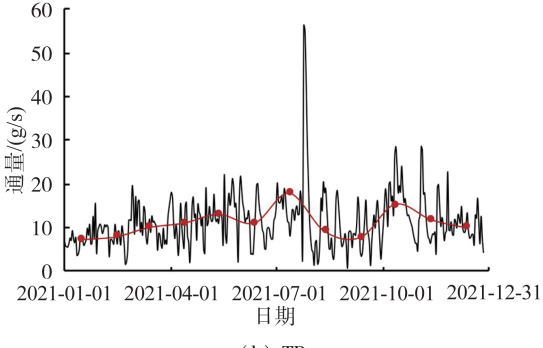
表 1 陈东港 2021 年污染物通量计算结果

Table 1 Calculation results of pollutant influx of the Chendong River in 2021

时间	COD _{Mn}		TP	
	平均通量/ (g/s)	累计通量/t	平均通量/ (g/s)	累计通量/t
1 月	256.87	688	7.43	20
2 月	259.19	627	8.09	20
3 月	302.86	811	10.14	27
4 月	367.80	953	11.17	29
5 月	387.22	1 037	13.12	35
6 月	358.05	928	11.17	29
7 月	462.32	1 238	17.86	48
8 月	263.77	706	9.27	25
9 月	217.68	564	7.97	21
10 月	408.12	1 093	15.37	41
11 月	333.82	865	11.92	31
12 月	315.33	845	10.13	27
全年	328.41	10 357	11.17	352



(a) COD_{Mn}



(b) TP

图 6 陈东港 2021 年污染物通量变化过程

Fig.6 Change process of pollutant influx of the Chendong River in 2021

污染物累计通量方面, 陈东港 7 月、10 月 COD_{Mn} 和 TP 累计通量明显高于其他月份, 7 月、10 月 COD_{Mn} 累计通量分别为 1 238 t 和 1 093 t, 占全年累计通量的 11.95% 和 10.55%, 7 月、10 月 TP 累计通量分别为 48 t 和 41 t, 占全年累计通量的 13.64% 和 11.65%。

1月、2月、8月和9月的累计通量相对较低,分别约占全年累计通量的5%。究其原因,陈东港作为太湖上游地区重要的出水口,其污染物通量变化过程与流域水文、气象条件以及人类活动息息相关。5月开始进入汛期,降雨增多,叠加农田退水,入河污染负荷较1—4月显著增加;7月和10月由于有强降雨过程,污染物通量在7月或10月均出现峰值;10月以后,污染物通量仍高于1—4月,主要是受上游水产养殖尾水集中排放的影响。

图7为2021年陈东港基于ADCP流量测验数据的污染物通量计算结果与基于水文巡测数据的通量计算结果对比。与ADCP流量测验数据相比,采用水文巡测数据计算得到的COD_{Mn}、TP年累计通量误差分别为54%和25%,平均相对误差为39.5%。从年内变化上,由于巡测数据采集频次较低,数据获取的随机性较强,从而导致个别月份水文巡测数据与ADCP测验数据计算的通量相差较大,这一情况在6—8月尤为明显。

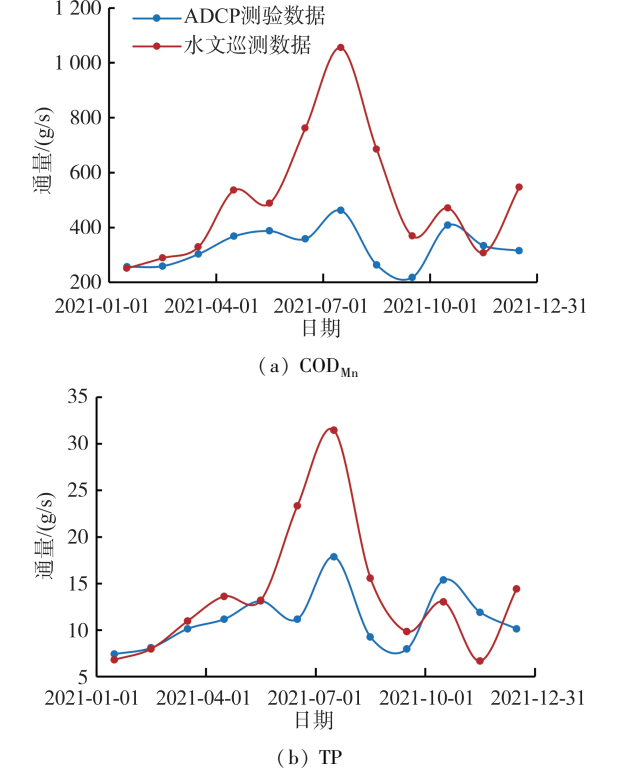


图7 基于ADCP测验数据和水文巡测数据的污染物通量计算结果对比

Fig.7 Comparison of pollutant influx calculation results based on ADCP monitoring and hydrological patrol survey data

2.4 不同数据采集频次对污染物通量计算结果的影响

2.4.1 不同流量采集频次下污染物通量

基于4h一次的水质数据,分别计算了5min、1h、4h、8h、12h、24h、2d、5d、10d、20d和30d流量

采集频次下污染物年累计通量及与通量参考值(5min流量采集频次下污染物年累计通量)之间的相对误差,结果如表2所示。可以看出,随着流量采集频次的降低,污染物年累计通量计算误差逐渐增大。同时由于采集频次降低后可获取的数据量减少,从而导致计算结果的不确定性增大,会出现相对高估或低估的情况。对陈东港而言,当流量采集频次为2d一次时,通量计算值与参考值之间的相对误差为-4.98%,通量计算结果会被低估;而流量采集频次为5d一次时,相对误差增大至7.56%,通量计算结果被高估。因此,如果需将两种污染物的年累计通量相对误差控制在5%以内,流量采集频次至少为2d一次;如相对误差需控制在10%以内,则流量采集频次至少为10d一次。

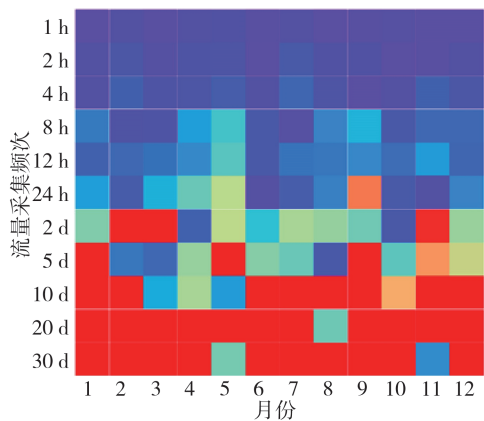
表2 不同流量采集频次下2021年污染物年累计通量
Table 2 Annual cumulative pollutant influx with different discharge sampling frequencies in 2021

流量采集频次	COD _{Mn}		TP		平均相对误差/%
	年累计通量/t	相对误差/%	年累计通量/t	相对误差/%	
5 min	10 357		352		
1 h	10 386	0.28	353	0.29	0.28
2 h	10 414	0.55	354	0.54	0.54
4 h	10 439	0.79	355	0.77	0.78
8 h	10 570	2.06	359	2.02	2.04
12 h	10 624	2.58	361	2.54	2.56
24 h	10 726	3.57	365	3.74	3.66
2 d	9 823	-5.16	335	-4.80	-4.98
5 d	11 130	7.47	379	7.66	7.56
10 d	9 933	-4.09	334	-5.11	-4.60
20 d	12 327	19.02	428	21.53	20.27
30 d	12 030	16.15	406	15.22	15.69

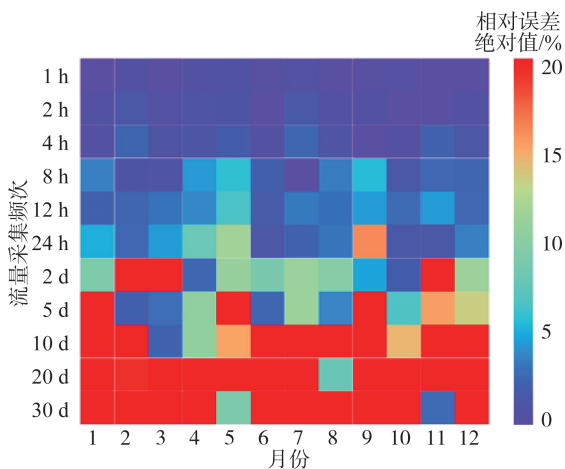
图8为不同流量采集频次下污染物月累计通量与参考值之间的相对误差绝对值,可以看出,随着流量采集频次的降低,污染物月累计通量计算误差逐渐增大,当流量采集频次高于2d一次时,各月的通量计算误差可以控制在较低水平。流量采集频次为30d一次时,丰水期(6—9月)和枯水期(12—2月)的相对误差较大,分别为77.7%和47.6%,若要将相对误差控制在10%以内,均需将流量采集频次提升至2d一次。这是因为陈东港作为湖西区下游河道,受上游降雨和沿江口门调度双重影响,丰水期和枯水期水量波动均较大,需要加密监测以尽可能捕捉特征流量过程。

2.4.2 不同水质采集频次下污染物通量

基于5min一次的流量数据,分别计算了4h、8h、12h、24h、2d、5d、10d、20d和30d水质采集频次下污染物年累计通量及与通量参考值(4h水质采集频次下污染物年累计通量)之间的相对误差,结果如表3所示。可以看出,与流量采集频次对污染



(a) COD_{Mn}



(b) TP

图8 不同流量采集频次下污染物月累计通量计算误差
Fig.8 Calculation error of monthly cumulative pollutant influx with different discharge sampling frequencies

物通量的影响类似,水质采集频次越低,两种污染物通量计算误差越大,同时不确定性上升,出现相对高估或低估的情况。但总体而言水质采集频次降低对年污染物累计通量计算结果的影响不大。当水质采集频次从8 h一次减少到30 d一次时,污染物年累计通量计算值与参考值之间的相对误差在5%以内。

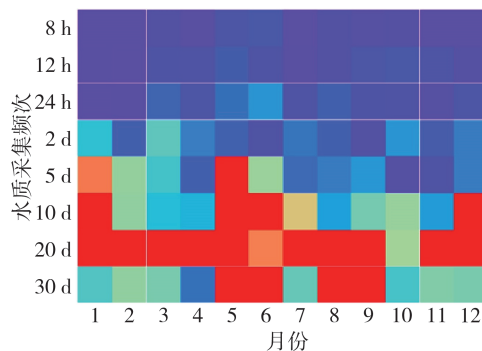
表3 不同水质采集频次下2021年污染物年累计通量

Table 3 Annual cumulative pollutant influx with different water quality sampling frequencies in 2021

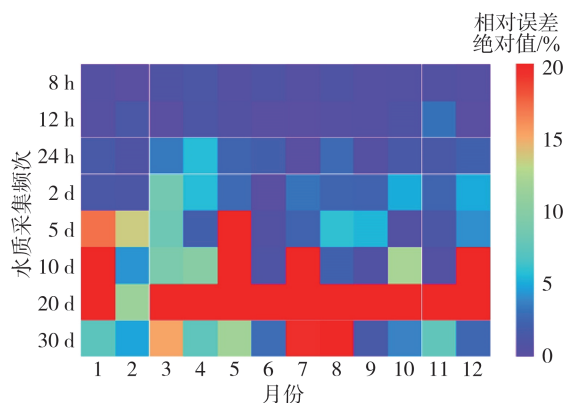
水质采集频次	COD _{Mn}		TP		平均相对误差/%
	年累计通量/t	相对误差/%	年累计通量/t	相对误差/%	
4 h	10357		352		
8 h	10402	0.43	354	0.58	0.51
12 h	10424	0.65	354	0.41	0.53
24 h	10495	1.33	358	1.71	1.52
2 d	10231	-1.21	346	-1.84	-1.53
5 d	10481	1.20	357	1.22	1.21
10 d	10074	-2.73	337	-4.43	-3.58
20 d	10105	-2.43	360	2.20	-0.11
30 d	9822	-5.16	340	-3.58	-4.37

因此在通量计算过程中,提升水质采集频次能够提升通量计算的准确性,但相较流量而言,通量计算对水质采集频次的要求较低。

图9为不同水质采集频次的污染物月累计通量与参考值之间的相对误差绝对值,可以看出,随着水质采集频次的降低,污染物月累计通量计算误差逐渐增大,其中丰水期(6—9月)和枯水期(12—2月)的相对误差较大,若要将相对误差控制在10%以内,丰水期需将水质采集频次提升至10 d一次,枯水期需将水质采集频次提升至2 d一次。丰水期和枯水期加密频次的差异源于陈东港枯水期流量相对较小,水质波动幅度比丰水期大。



(a) COD_{Mn}



(b) TP

图9 不同水质采集频次下污染物月累计通量计算误差

Fig.9 Calculation error of monthly cumulative pollutant influx with different water quality sampling frequencies

3 结 论

a. 2021年陈东港全年平均流量为73.66 m³/s,年径流量为23.29亿 m³,流量峰值出现在7月,其变化受降水影响显著;COD_{Mn}和TP年均质量浓度分别为4.52 mg/L和0.15 mg/L,两种污染物质量浓度存在明显的季节性波动。

b. 2021年陈东港COD_{Mn}和TP平均通量分别为328.41 g/s和11.17 g/s,累计通量分别为10357 t和352 t,峰值出现在7月。基于固定式ADCP流量

测验数据和水质在线监测数据的通量计算结果较基于水文巡测数据的通量计算结果精度提升约39.5%,相对误差较大的月份集中在6—8月。

c. 通过对比不同数据采集频次下的通量计算结果发现,若要将 COD_{Mn} 和TP两种污染物的年累计通量相对计算误差控制在5%以内,流量采集频次不宜低于为2d一次;若相对误差控制在10%以内,流量采集频次至少为10d一次;在丰水期(6—9月)和枯水期(12—2月),若要将月累计通量相对误差控制在10%以内,流量采集频次需提升至2d一次。总体而言,年累计通量对水质采集频次变化的敏感性相对较低,当水质采集频次从8h一次减少到30d一次时,年累计通量的相对误差在5%以内;在丰水期(6—9月)和枯水期(12—2月),若要将月累计通量相对误差控制在10%以内,水质采集频次需分别提高至10d一次和2d一次。

参考文献:

- [1] 吕文,杨惠,杨金艳,等.环太湖江苏段入湖河道污染物通量与湖区水质的响应关系[J].湖泊科学,2020,32(5):1454-1462. (LYU Wen, YANG Hui, YANG Jinyan, et al. Relationship between water quality in Lake Taihu and pollutant fluxes of the rivers surrounding Lake Taihu in Jiangsu Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5):1454-1462. (in Chinese))
- [2] 何锡君,孙英军,王贝,等.浙江省出入太湖河道水量水质及污染物通量变化(2007—2019年)[J].湖泊科学,2021,33(5):1425-1435. (HE Xijun, SUN Yingjun, WANG Bei, et al. Variation of water quantity, quality and pollutant flux of inflow and outflow rivers to Lake Taihu in Zhejiang Province, 2007-2019 [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5):1425-1435. (in Chinese))
- [3] 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[J].环境科学研究,2003,16(1):1-4. (FU Guo. Analysis of the estimation methods for the river pollutant fluxes(I):comparison and analysis of the estimation methods of period fluxes [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1):1-4. (in Chinese))
- [4] LI Liqing, SHAN Baoqing, YIN Chenqing. Stormwater runoff pollution loads from an urban catchment with rainy climate in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2012, 6(5):672-677.
- [5] 杨金艳,王雪松,沈顺中,等.环太湖出入湖河道污染物通量[M].南京:河海大学出版社,2019.
- [6] 罗缙,逢勇,林颖,等.太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(2):131-135. (LUO Jin, PANG Yong, LIN Ying, et al. Study on flux of pollutants discharged into Taihu Lake through main inflow river channels[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(2):131-135. (in Chinese))
- [7] 邹新,罗勇,李莹,等.不同水期鄱阳湖主要污染物河流入湖通量研究[J].环境科学与管理,2015,40(5):96-99. (ZOU Xin, LUO Yong, LI Ying, et al. Main pollutant flux in Poyang Lake in different season[J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(5):96-99. (in Chinese))
- [8] 周琴,贾海燕,卢路,等.洞庭湖水质及出入湖主要污染物通量变化趋势分析[J].三峡生态环境监测,2021,6(2):71-80. (ZHOU Qin, JIA Haiyan, LU Lu, et al. Changing trend of the pollutant influx and outflux in Dongting Lake and the water quality [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2021, 6(2):71-80. (in Chinese))
- [9] 李卫平,陈阿辉,于玲红,等.呼伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010—2014)[J].湖泊科学,2016,28(2):281-286. (LI Weiping, CHEN Ahui, YU Linghong, et al. Pollutant influx from the main river (Kherlen River) of Lake Hulun in wet seasons, 2010-2014 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2):281-286. (in Chinese))
- [10] 韦雨婷,逢勇,罗缙,等.苏南运河对太湖主要入湖河流污染物通量的贡献率[J].水资源保护,2015,31(5):42-46. (WEI Yuting, PANG Yong, LUO Jin, et al. Study on pollutant flux contribution rate of Sunan Canal to main inflow rivers of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5):42-46. (in Chinese))
- [11] 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[J].环境科学学报,2012,32(7):1670-1676. (HAO Chenlin, DENG Yixiang, WANG Yonghui, et al. Study on the selection and error analysis of riverine pollutant flux estimation methods [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(7):1670-1676. (in Chinese))
- [12] 杨惠,陈江,谈剑宏.阳澄湖入湖河道水质变化及污染物通量分析[J].水资源保护,2016,32(2):129-132. (YANG Hui, CHEN Jiang, TAN Jianhong. Analysis of water quality change and pollutant flux of river channels into Yangcheng Lake [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):129-132. (in Chinese))
- [13] 庄巍,王晓,逢勇,等.太湖流域跨界区域水污染物通量数值模型构建与应用[J].水资源保护,2016,32(1):36-41. (ZHUANG Wei, WANG Xiao, PANG Yong, et al. Establishment and application of numerical model of water pollutants flux for trans-boundary regions of Taihu Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1):36-41. (in Chinese))
- [14] 娄保锋,卓海华,周正,等.近18年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析[J].环境科学研究,2020,33(5):1150-1162. (LOU Baofeng, ZHUO Haihua, ZHOU

- Zheng, et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze Mainstem during recently 18 years[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5):1150-1162. (in Chinese))
- [15] 潘杰,李书建,胡尊乐,等. 流速分布规律在横向声学多普勒流量测验系统中的应用[J]. 水利信息化, 2021(2): 58-62. (PAN Jie, LI Shujian, HU Zunle, et al. Application of laws of velocity distribution in transverse acoustic Doppler flow measurement system[J]. Water Resources Informatization, 2021(2): 58-62. (in Chinese))
- [16] 程嫖嫖,金晨曦. ADCP 测流在巢湖流域水资源监测中的应用[J]. 水利信息化, 2019(4): 47-50. (CHENG Yuanyuan, JIN Chenxi. Application of ADCP flow measurement in water resources monitoring on Chaohu Lake Basin[J]. Water Resources Informatization, 2019(4): 47-50. (in Chinese))
- [17] 刘墨阳,蒋四维,林云发,等. 复杂水情下 H-ADCP 流量在线监测推流方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 27-34. (LIU Moyang, JIANG Siwei, LIN Yunfa, et al. Online H-ADCP discharge monitoring and flow derivation method under complex flow conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 27-34. (in Chinese))
- [18] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 128-135. (TANG Hongwu, HUANG Shujun, YUAN Saiyu, et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 128-135. (in Chinese))
- [19] 吴志勇,徐梁,唐运忆,等. 水文站流量在线监测方法研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 1-7. (WU Zhiyong, XU Liang, TANG Yunyi, et al. Research progress of on-line discharge monitoring methods in hydrometry stations[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 1-7. (in Chinese))
- [20] 张泉荣,谢运山,王萍,等. 定点式横向声学多普勒流速剖面仪应用研究[J]. 水文, 2021, 41(2): 69-74. (ZHANG Quanrong, XIE Yunshan, WANG Ping, et al. Study on the application of fixed-point type and lateral acoustic Doppler current profile[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(2): 69-74. (in Chinese))
- [21] 谢运山,赵德友,张泉荣,等. 单波束声学多普勒流速仪垂向在线测流应用研究[J]. 水利信息化, 2018(6): 44-48. (XIE Yunshan, ZHAO Deyou, ZHANG Quanrong, et al. Application of single beam acoustic Doppler current meter in vertical online flow measurement[J]. Water Resources Informatization, 2018(6): 44-48. (in Chinese))
- [22] WEBB B W, PHILLIPS J M, WALLING D E, et al. Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS(R) programme[J]. Science of the Total Environment, 1997, 194-195: 379-389.

(收稿日期:2022-08-25 编辑:熊水斌)

(上接第 103 页)

- [28] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 161-173. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 161-173. (in Chinese))
- [29] YANG Mingnan, XU Youpeng, PAN Guangbo, et al. Impacts of urbanization on precipitation in Taihu Lake Basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 739-746.
- [30] 岳彩军,唐玉琪,顾问,等. 城市阻碍效应对局地台风降水的影响[J]. 气象, 2019, 45(11): 1611-1620. (YUE Caijun, TANG Yuqi, GU Wen, et al. Study of urban barrier effect on local typhoon precipitation[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(11): 1611-1620. (in Chinese))
- [31] 江善虎,刘亚婷,任立良,等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 9-14. (JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 9-14. (in Chinese))
- [32] 黄晓东,刘文锴,曹润祥,等. 不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 22-30. (HUANG Xiaodong, LIU Wenkai, CAO Runxiang, et al. Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 22-30. (in Chinese))
- [33] 杨悦莹,朱志华,蔡宴朋,等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 27-33. (YANG Yueying, ZHU Zhihua, CAI Yanpeng, et al. Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 27-33. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-12 编辑:熊水斌)