

钱塘江枯水期主要污染物水环境模拟

徐礼强, 童杨斌, 楼章华*, 曹飞凤, 许月萍

(浙江大学水文与水资源工程研究所, 杭州 310028)

摘要: 确立基于可视化技术的污染物水环境模拟技术框架, 建立水环境空间模型, 基于 MapInfo 和 Delft3D 平台对钱塘江枯水期主要污染物氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总磷(TP)进行模拟, 对其时空变化规律进行分析. 观测断面污染物实测值与模拟值对比表明, 对于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 兰江口、严陵坞断面实测值较模拟值分别偏大 0.19 mg/L、0.66 mg/L, 窄溪、渔山和袁浦断面实测值较模拟值分别小 0.16 mg/L、0.54 mg/L 和 0.49 mg/L; 对于 TP, 梅城水厂、严陵坞断面的实测值高出模拟值分别为 0.13 mg/L、0.14 mg/L, 窄溪、渔山、浦阳江出口和袁浦等断面实测值均较模拟值略小, 其沿途变化趋势与实际情况基本吻合. 结果表明, 钱塘江污染物主要来自上游兰江、富春江、浦阳江的贡献, 其中兰江、浦阳江的污染物浓度较高, 水质较差, 对沿途及下游影响较大; 兰江污染物是富春江水体污染的主要来源, 当新安江下泄流量小时, 可能发生回流而导致新安江部分河段受污染, 当新安江下泄流量较大时, 则对富春江水质起明显的改善作用; 对于浦阳江, 除了上游带来的污染物质, 从尖山到浦阳江出口断面沿途两岸排放的污水也较严重, 是影响钱塘江水质的原因之一.

关键词: 钱塘江; 枯水期; 污染物; 可视化; 模拟

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2682-06

Water Environmental Simulation of Main Contaminations in the Qiantang River at Low Water Period

XU Li-qiang, TONG Yang-bin, LOU Zhang-hua, CAO Fei-feng, XU Yue-ping

(Institute of Hydrology and Water Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

Abstract: Technical framework for water environment simulation of contaminations is established based on visualization and a spatial environmental model is built. The main two contaminations, namely $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TP, are simulated on the platform of MapInfo and Delft3D in the Qiantang River at the low water period, to analyze its space-time diversity. For $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, the measured values are 0.19 mg/L and 0.66 mg/L larger than simulated values at the Lanjiang River mouth and the Yanlingwu, 0.16 mg/L, 0.54 mg/L and 0.49 mg/L smaller at the Zhaixi, the Yushan and the Yuanpu. For TP, the measured values are 0.13 mg/L and 0.14 mg/L higher than simulated values at the Meicheng Water facility and Yanlingwu. However, the measure values are slightly lower than simulated ones at Zhaixi, Yushan, Puyang River mouth and Yuanpu, the trend of which accords with actual situation. The results indicate that the contaminations of the Qiantang Reach mostly come from the Lanjiang River, the Fuchun River and the Puyang River on the upstream, among which the Lanjiang River and the Puyang River have a very high concentration of polluted materials, which means bad water quality, and influence the water downstream. The Lanjiang River becomes the chief contaminative source in the Fuchun River. When the discharge from the Xin'an River Dam is small, the recirculation region may be formed and makes part of the Xin'an Reach contaminated. Otherwise, when the discharge is large, the water quality in the Fuchun River is apparently improved. And the Puyang River, which brings the contaminations from the upstream, along with the polluted water let into it from the industries along the reach, has significant impacts on the water quality in Qiantang Reach.

Key words: Qiantang River; low water period; contaminations; visualization; simulation

钱塘江是浙江省最大的河流, 干流从西向东贯穿皖南和浙北, 汇入东海. 流域界于 $117^{\circ}37' \sim 121^{\circ}52'E$, $28^{\circ}10' \sim 30^{\circ}48'N$ 之间, 跨浙、皖、赣、闽、沪五省、市, 流域面积 55 558 km^2 , 其中 86.5% 在浙江省境内, 占浙江省总面积的 47.2%. 钱塘江流域浙江省境内每年产生大量工业废水和生活污水, 大部分进入钱塘江干流及主要支流. 另外, 由于水体渔业养殖、地表径流、降尘、航运和沿岸旅游业、宾馆、以及畜禽养殖产生或带来的各类污染物质进入水体, 从而影响着钱塘江干流及各支流的水环境质量^[1,2].

复杂河网的水质分析与预测^[3]一直是水环境领

域广为关注的研究课题. 河网地区主要水量与水质模拟方法在生产实践中的应用^[4], 动态逸度模型^[5]、Matlab 辅助下的水流模型^[6]、GIS 和情景分析辅助^[7]等方法的应用在流域水污染控制与规划管理中有重要的意义. 在对钱塘江水环境的研究中, 一维水质数学模型^[8,9]和二维浅水波方程及传质模型^[10]等数值仿真在钱塘江新增引水工程的水质预测和对下游水

收稿日期: 2007-07-11; 修订日期: 2007-08-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422107)

作者简介: 徐礼强(1976~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境与水信息, E-mail: xu_liqiang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: iwr@zju.edu.cn

质影响评价中起到重要的作用. 氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)是环境管理部门对水环境控制的重要指标,运用测量与数值模拟相结合的手段对钱塘江进行污染物时空变化规律的解析,实现了对污染物从估算到测算研究的转变,对于区域氮磷污染源与汇的研究有重要的实践意义.

本研究确立了基于可视化技术^[11,12]的污染物水环境模拟技术框架,建立水环境空间模型,基于 MapInfo 和 Delft3D 平台进行模拟结果的可视化表达,对枯水期主要污染物NH₄⁺-N和 TP 的时空变化规律进行分析,以期为钱塘江流域水环境可持续发展的管理工作提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 水环境监测与数据获取

采取对钱塘江控制断面进行流量测量的方案,测量仪器采用声学多普勒剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP, 美国),定位则通过 GPS (DIFFERENTIAL GPS RECEIVER-NR51, 法国)实现. 共设 12 个监测断面,具体监测断面名称以及布设如图 1 所示.

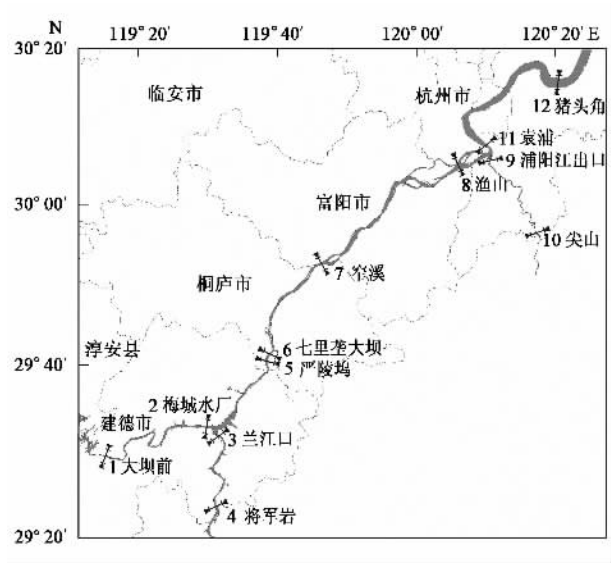


图 1 钱塘江水环境监测断面示意

Fig.1 Environmental monitoring cross sections of the Qiantang River

2006-12-27 ~ 2006-12-31 进行测量,水样取各断面中央部位,自上而下依次采 3 个水样(表层 0.5 m 处、中层 1/2 水深处、底层 0.5 m 处),装入标准水样瓶,并于当天运往杭州市环境监测中心站实验室进行分析. NH₄⁺-N采用 7230G 可见分光光度计通过纳氏试剂比色法(GB/T 7479-1987)测定;TP 采用 7230G 型分光光度计根据钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989),测定结果见表 1.

表 1 钱塘江枯水期流量与主要污染物
测量表(2006-12-27 ~ 2006-12-31)

监测断面名称	流量/m ³ ·s ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
1 大坝前	2.00	0.039	0.022
2 梅城水厂	- 182.00 ¹⁾	0.738	0.257
3 兰江口	98.90	0.941	0.107
4 将军岩	117.30	0.757	0.127
5 严陵坞	645.30	0.783	0.162
6 七里垄大坝	1 435.30	0.803	0.126
7 窄溪	1 201.90	0.665	0.119
8 渔山	58.70	0.275	0.074
9 浦阳江出口	16.90	1.669	0.075
10 尖山	24.30	1.958	0.060
11 袁浦	518.70	0.377	0.083
12 猪头角	240.90	0.494	0.092

1)2 号断面流量中“-”表示水流为回流,方向为自下游到上游

1.2 水环境空间建模

流场的模拟采用了荷兰 Delft 水利机构的 Delft3D 模型,主要使用 Delft3D-FLOW 模块,其特点是由多个模块灵活组成,模块间联系性强,采用贴体正交曲线网格,计算稳定,精度高. 其数值格式采用交错 C 网格和 ADI 时间积分法. 一系列偏微分方程和一系列相应的定解条件都是基于有限差分网格进行求解的^[13~15].

在正交曲线坐标系 $\xi-\eta$ 下,水流运动的连续性方程、动量方程以及守恒物质的输移方程^[16,17] 分别如下:

(1)连续性方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

(2)动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\rho \sqrt{G_{\xi\xi}}} p_{\xi} - g u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(d + \zeta)} + F_{\xi} + F_{\xi} + M_{\xi} \\ &\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + f u \\ &= \frac{1}{\rho \sqrt{G_{\eta\eta}}} p_{\eta} - g v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(d + \zeta)} + F_{\eta} + F_{\eta} + M_{\eta} \end{aligned}$$

(3)物质输移方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial [(d + \zeta)c]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [(d + \zeta)u] \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{\partial [(d + \zeta)v] \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} \right\} \\ &= \frac{(d + \zeta)}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_h \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_h \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\} + (d + \zeta) S \end{aligned}$$

式中, $\sqrt{G_{\xi\xi}}、\sqrt{G_{\eta\eta}}$ 为曲线坐标系至直角坐标系的转换系数; u 和 v 分别为 ξ 和 η 方向的流速; f 为柯氏力系数; F_{ξ} 和 F_{η} 分别为 ξ 和 η 方向的紊动动量通量; p_{ξ} 和 p_{η} 分别表示 ξ 和 η 两方向的水压力梯度; M_{ξ} 和 M_{η} 分别表示 ξ 和 η 两方向上动量的源或汇; d 为参考水平面下的水深; ζ 为参考水平面上的水位; C 为谢才系数; ρ 为水的密度; c 为保守物质浓度; S 为源汇项。

1.3 计算区域及其网格划分

在研究中,对河流的数字化以 MapInfo 7.0 为平台,采用 Longitude/Latitude 投影格式完成1:25万的边

界数字化(数字化成果见图1)。在 MapInfo 球面坐标与 Delft3D 平面直角坐标的转换处理上,运用 MapInfo 的 tab 到 mif 格式的交换,由于河流中“岛”的存在,形成了多个闭合边界(polygon),研究中对多个 polygon 的直角坐标分别进行冗余检验和处理,得到了 Delft3D-rgfGrid 模块所需的平面直角坐标文件。

网格划分由 Delft3D 的前处理模块 Delft3D-rgfGrid 完成。网格采用贴体正交曲线网格,边界贴合较好。对研究河段采取以七里垄大坝为界,分两部分分别进行模拟的方案,上、下游段的模拟计算区域及网格划分如图2所示。

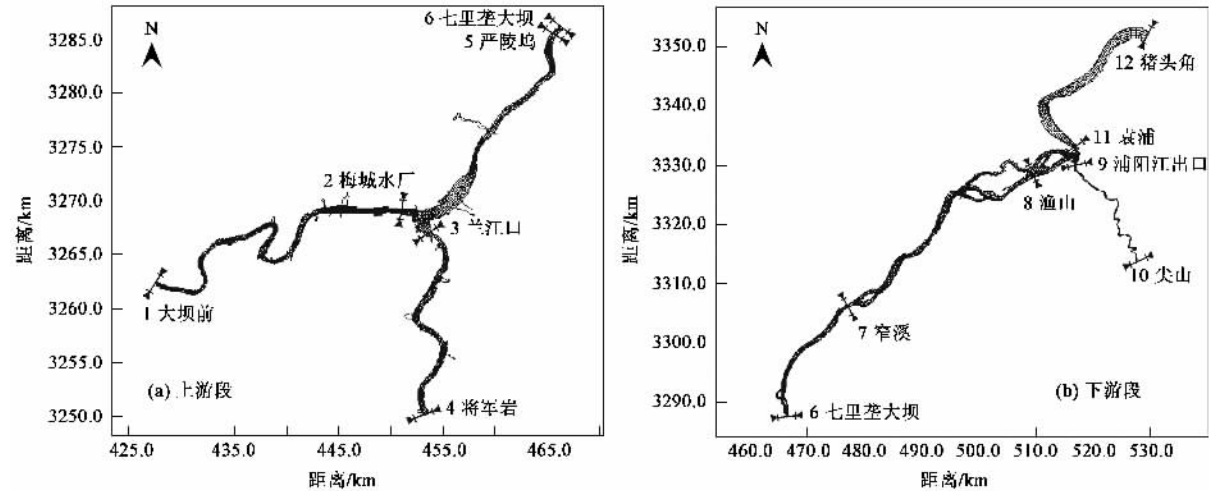


图2 模拟计算区域网格
Fig.2 Model grids of computing domain

上游段,模拟河段的开边界在新安江段上游取大坝前、兰江段取将军岩、富春江段取七里垄大坝。网格数为 306×123 ,有效计算网格约为2 500个。下

游段,模拟河段的开边界在富春江段取七里垄大坝,浦阳江段取尖山、钱塘江下游取猪头角。网格数为 216×413 ,有效计算网格约3 600个。

2 结果与讨论

模型的模拟时间取钱塘江流域枯水期,根据多次示踪模拟与研究,为确保模拟河段的流场和污染物的扩散达到稳定状态,确定模拟的时间长度为上游 7 d、下游 15 d.

初始条件为:
$$\begin{cases} Z(x,y,t)|_{t=0} = Z(x,y) = 0 \\ u(x,y,t)|_{t=0} = v(x,y,t)|_{t=0} = 0 \end{cases}$$

模型参数设置为:模型区域纬度取 30°N,经度取东经 120°E.由于模拟时间较短,且作为由河道地形、地球引力及自转力为驱动力的内陆河,只考虑水面风速对流场的影响.风速参考浙江气象台数据资料,取平均值 3 m/s,方向为 N.模型的重力加速度 g

取 9.81 m/s^2 ,水的密度取 $1\,012\text{ kg/m}^3$,大气密度取 1.0 kg/m^3 ,温度取 15°C .河床糙率由曼宁系数 n 表示,在 2 个方向均取 0.012 且全区域一致.除开边界外,其余边界均默认为闭边界,采用自由滑动边界条件.水平方向紊动粘滞系数和扩散系数分别取 $10\text{ m}^2/\text{s}$ 和 $10\text{ m}^2/\text{s}$.

2.1 上游段模拟结果

边界条件为:由于数据资料有限,为尽可能的使模型接近现实,大坝下泄流量分别参考实测值.新安江大坝前、将军岩流量分别取 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $180\text{ m}^3/\text{s}$,七里垄大坝取 $200\text{ m}^3/\text{s}$.分别在梅城水厂、兰江口、严陵坞 3 处设了观测断面.上游段第 7 d NH_4^+-N 、TP 模拟结果如图 3 所示.

通过上游段观测断面枯水期污染物实测与模拟

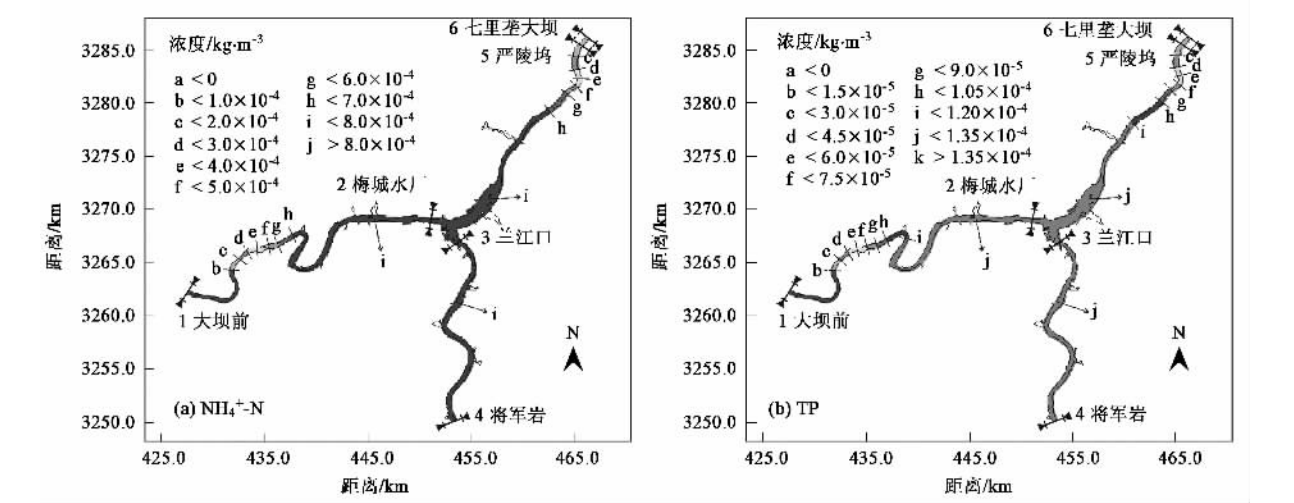


图 3 上游段第 7 d NH_4^+-N 、TP 模拟结果

Fig.3 Simulated results of NH_4^+-N and TP in Part One on the 7th day

值对比(见表 2),有如下发现:

- (1)观测断面 NH_4^+-N 空间变化 梅城水厂由于受兰江流量远大于新安江大坝下泄流量产生回流的影响,浓度较大;兰江口断面由于受沿途两岸排污影响,浓度较上游将军岩有所增大;严陵坞断面由于受兰江污染物的影响,数值较大.
- (2)观测断面 TP 空间变化 梅城水厂断面的数值较大,除受到兰江污染影响外,该河段本身亦有污染贡献;自将军岩至兰江口浓度呈下降趋势,证明沿途的污染贡献较少;严陵坞断面则受到兰江和新安江河段的共同影响,浓度较大.
- (3)实测值与模拟值的对比发现 对于 NH_4^+-N ,兰江口断面实测值较模拟值偏大 0.19 mg/L ,与测量过程中调查的沿途两岸排污口较多有很大关系;严

陵坞断面实测值明显高出模拟值 0.66 mg/L ,原因为受七里垄大坝型水库的影响,污染物在此累积.对于 TP,梅城水厂断面的实测值明显高出模拟值 0.13 mg/L ,原因为除受兰江污染影响外亦受到建德市新安江工业区块污染贡献;严陵坞断面实测值明显高出模拟值 0.14 mg/L ,原因与该断面情况类似.

2.2 下游段模拟结果

边界条件为:七里垄大坝、尖山流量分别取 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30\text{ m}^3/\text{s}$,猪头角取 $330\text{ m}^3/\text{s}$.分别在窄溪、渔山、浦阳江出口、袁浦 4 处设了观测断面.下游段第 15 d NH_4^+-N 、TP 模拟结果如图 4 所示.

通过下游段观测断面枯水期污染物实测与模拟值对比(见表 3),有如下发现:

- (1)观测断面 NH_4^+-N 空间变化 自七里垄大坝

表 2 上游段观测断面枯水期污染物实测与模拟值对比/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Comparison of measured values with simulated values at cross sections in Part One/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

断面名称	NH_4^+-N			TP		
	实测值	模拟值	实测-模拟	实测值	模拟值	实测-模拟
2 梅城水厂	0.738	0.758	-0.02	0.257	0.127	0.13
3 兰江口	0.941	0.750	0.19	0.107	0.128	-0.02
5 严陵坞	0.783	0.125	0.66	0.162	0.018	0.14

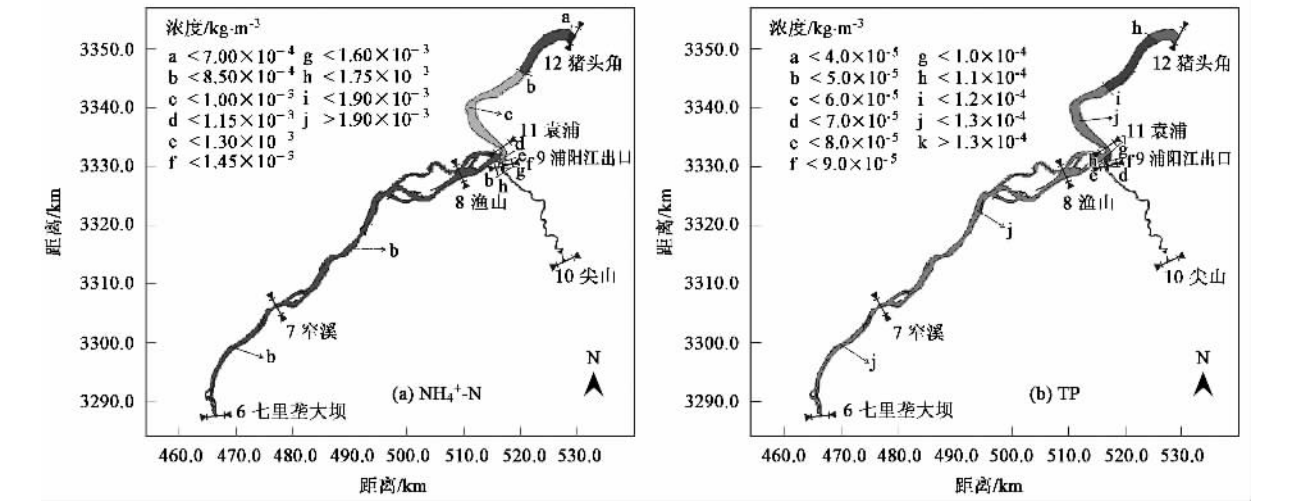


图 4 下游段第 15 d NH_4^+-N 、TP 模拟结果

Fig.4 Simulated results of NH_4^+-N and TP in Part Two on the 15th day

至窄溪、渔山浓度呈降低趋势,表明富春江段的该类污染物贡献很少,尖山至浦阳江出口浓度呈降低趋势;袁浦断面则受浦阳江的影响,浓度较渔山有较大上升。

(2)观测断面 TP 空间变化 自七里垄大坝至窄溪、渔山浓度呈降低趋势,表明富春江段的该类污染物贡献很少,尖山至浦阳江出口浓度呈上升趋势,表明沿途两岸有该类污染物排放。

(3)实测值与模拟值的对比发现 对于 NH_4^+-N ,窄溪实测值较模拟值小 0.16 mg/L 、渔山实测值较模拟值小 0.54 mg/L ,表明富春江段的 NH_4^+-N 贡献少,与实际中该段各汇入支流的水质较好情况一致;袁浦实测值较模拟值小 0.49 mg/L ,表明钱塘江干流 NH_4^+-N 控制较好.对于 TP,所有观测断面实测值均较模拟值略小,其沿途变化趋势与实际变化趋势基本吻合。

表 3 下游段观测断面枯水期污染物实测与模拟值对比/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Comparison of measured values with simulated values at cross sections in Part Two/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

断面名称	NH_4^+-N			TP		
	实测值	模拟值	实测-模拟	实测值	模拟值	实测-模拟
7 窄溪	0.665	0.821	-0.16	0.119	0.126	-0.01
8 渔山	0.275	0.810	-0.54	0.074	0.126	-0.05
9 浦阳江出口	1.669	1.620	0.05	0.075	0.080	-0.01
11 袁浦	0.377	0.870	-0.49	0.083	0.122	-0.04

2.3 污染物空间分布差异的讨论

首先,钱塘江干流位于下游,其污染物主要来自上游兰江、富春江、浦阳江的贡献.其中兰江、浦阳江的污染物浓度较高,水质较差,对沿途及下游影响较大。

其次,若兰江流量较大,且污染物浓度较高时,是富春江水体污染的主要来源,如果新安江下泄流量小,则有可能发生回流,导致新安江、富春江同时受污染;如果新安江下泄流量较大,则不会发生回流,并且对富春江水质起明显的改善作用。

第三,对于浦阳江,除了上游交接断面带来的污染物质,从尖山到浦阳江出口断面沿途两岸排放的污水也较严重,是影响钱塘江干流水质的原因之一.

3 结论

(1)观测断面污染物实测值与模拟值对比表明:对于 NH_4^+-N ,兰江口、严陵坞断面实测值较模拟值分别偏大 0.19 mg/L、0.66 mg/L,窄溪、渔山、袁浦断面实测值较模拟值分别小 0.16 mg/L、0.54 mg/L、0.49 mg/L;对于 TP,梅城水厂、严陵坞断面的实测值高出模拟值分别为 0.13 mg/L、0.14 mg/L,窄溪、渔山、浦阳江出口和袁浦等观测断面实测值均较模拟值略小,其沿途变化趋势与实际情况基本吻合.

(2)钱塘江干流污染物主要来自上游兰江、富春江、浦阳江的贡献,其中兰江、浦阳江的污染物浓度较高,水质较差,对沿途及下游影响较大.兰江流量较大且污染物浓度较高时,是富春江水体污染的主要来源.浦阳江除上游交接断面带来的污染物质外,从尖山到浦阳江出口断面沿途两岸排放的污水也较严重.

(3)钱塘江水质受上游及沿途各支流水质的影响,同时沿途工业污染源亦有重要的影响.要保证钱塘江水质,应重点对上游兰江、浦阳江进行污染控制,并加强流域内工业污染源的达标排放.

参考文献:

[1] 吴洁,虞左明,钱天鸣. 钱塘江干流杭州段水体氮污染特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2003,12(6):552 ~ 556.
[2] 同帆,贾红建,李海红,等. 钱塘江流域水质发展趋势研究[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(5):80 ~ 83.

[3] 王振宇,李富强,陈昌军. 钱塘江引水入城工程水质分析及预测研究[J]. 水力发电学报,2005,24(4):47 ~ 50.
[4] 韩龙喜,陆冬. 平原河网水流水质数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(2):127 ~ 130.
[5] 刘振宇,杨凤林,全燮,等. 河流环境持久性有机污染物归宿的动态逸度模型[J]. 环境科学,2006,27(1):121 ~ 125.
[6] 李怀恩,胥彦玲,张强,等. 黑河流域磷迁移转化过程连续模拟研究[J]. 环境科学,2006,27(7):1292 ~ 1298.
[7] 王少平,程声通,贾海峰,等. GIS 和情景分析辅助的流域水污染控制规划[J]. 环境科学,2004,25(4):32 ~ 37.
[8] 金腊华,徐峰俊. 钱塘江新增引水工程对下游水质影响评价[J]. 中国给水排水,2004,20(3):103 ~ 106.
[9] 金腊华,徐峰俊. 钱塘江九溪新增引水工程对下游水厂取水口含氯度影响评价[J]. 暨南大学学报(自然科学版),2004,25(5):650 ~ 655.
[10] 邵雄飞. 数值仿真在钱塘江引水入城工程水质预测中的应用[J]. 环境污染与防治,2005,27(6):465 ~ 467.
[11] 贾泽露,刘耀林,张彤. 可视化交互空间数据挖掘技术的探讨[J]. 测绘科学,2004,29(5):34 ~ 37.
[12] 李德仁,王树良,李德毅,等. 论空间数据挖掘和知识表现的理论与方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2002,27(3):221 ~ 233.
[13] 陈景秋,刘雪兰,赵万星,等. 重庆主城区两江汇流流场数值模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2005,28(8):135 ~ 137,141.
[14] 栗苏文,李红艳,夏建新. 基于 Delft 3D 模型的大鹏湾水环境容量分析[J]. 环境科学研究,2005,18(5):91 ~ 95.
[15] 申宏伟. Delft3D 软件在水利工程中的数值模拟[J]. 水利科技与经济,2005,11(7):440 ~ 441,448.
[16] Delft Hydraulics. Delft3D-Flow User Manual[M]. Ho1-Land: WL Delft hydraulics,1999.9-10 ~ 9-11.
[17] Podsetchine V, Huttula T. Numerical simulation of wind-driven circulation in Lake Tanganyika[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management,2000,3:55 ~ 64.