

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.012

时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响

朱晓琳¹,李一平¹,许益新²,程一鑫¹,朱向宇³

(1. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098; 2. 广东省环境科学研究院,广东 广州 510045;
3. 清水源(上海)环保科技有限公司,上海 200061)

摘要:为探究不同时间尺度边界入流条件对平原感潮河网水动力水质模型模拟精度的影响,以典型平原感潮河网地区的张家港市中部为研究区域,结合野外同步监测数据、自动高频监测数据、常规监测资料等构建了水动力水质模型进行模拟分析。结果表明:时间尺度、开始取值时刻以及调度情况均会影响模拟精度;研究区域边界入流条件、水动力模拟结果和水质模拟结果可信的最大时间尺度为1 h,水质模拟精度优于水动力模拟精度。

关键词:平原感潮河网;水动力水质模型;时间尺度;模拟精度;张家港市

中图分类号:TV131.2;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0067-09

Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network // ZHU Xiaolin¹, LI Yiping¹, XU Yixin², CHENG Yixin¹, ZHU Xiangyu³ (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China; 3. Qingshuiyuan (Shanghai) Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200061, China)

Abstract: In order to explore the effects of boundary inflow conditions at different time scales on the simulation accuracy of hydrodynamic water quality model of plain tidal river network, taking the middle area of Zhangjiagang, a typical plain tidal river network area, as an example, a hydrodynamic water quality model was constructed based on field synchronous monitoring data, automatic high frequency monitoring data and conventional monitoring data. The results show that the time scale, the starting time and the dispatching conditions have an impact on the simulation accuracy; the credible maximum time scale of the study area boundary inflow conditions, hydrodynamic simulation results and water quality simulation results is 1 h; and the accuracy of water quality simulation is better than that of hydrodynamic simulation.

Key words: plain tidal river network; hydrodynamic water quality model; time scale; simulation accuracy; Zhangjiagang City

随着城市化的发展,平原河网地区水环境污染越来越严重,多地通过调水引流来增强河网内部水流循环,改善水环境^[1]。水动力水质模型可较好模拟调水引流过程,是分析引调水对区域水动力水质改善效果的良好工具^[2-6]。模型不确定性是当今数值模拟领域中的重要问题,不确定性来源于模型结构不确定性、参数不确定性和输入条件不确定性^[7]。输入条件不确定性的研究主要集中在边界输入条件不确定性方面,Linden等^[8]研究了进水温度、风速和进出水库流量对水库水动力水质模型模拟结果的影响;李一平等^[9]研究了湖泊水动力模型

中出入湖流量、风速、风向3个边界输入条件和初始水位1个初始输入条件对模型水位、水龄以及流场模拟结果的影响与贡献;曹引等^[10]分析了二维水动力学模型参数、边界条件及两者共同作用导致模型模拟水位的不确定性,并利用偏秩相关分析方法分析了模型参数和边界条件对模拟水位的敏感性。目前对于模型边界条件不确定性的研究多集中于水库、湖泊或单条河流,由于这些区域多采用泵引,入流边界受时间变化影响较小,这就造成在筛选入流边界序列时,仅局限在最大和最小边界值区间内,并不适用于平原感潮河网地区,平原感潮河网地区受

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405203);宁夏回族自治区重点研发计划(20175046802)

作者简介:朱晓琳(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境数学模型。E-mail:2692595719@qq.com

通信作者:李一平,教授。E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

潮汐影响水动力情况变化剧烈,多利用潮位和内河水位差开闸引调水^[11],边界输入条件与引调水时间关联性较为密切。在野外同步监测过程中,除了关注监测仪器的精度,设计监测方案时还需要考虑监测频率的选取,监测频率选取过小会增加工作量且对后期的运算数据处理造成麻烦,选取过大会导致实测数据失真,故对平原感潮河网地区来说,不同时间尺度边界入流条件对模型水动力水质模拟精度的影响不能忽略。

本文以典型平原感潮河网地区的张家港市中部为研究区域,利用野外同步监测数据、自动高频监测数据、常规监测资料以及数值模拟技术,构建水动力水质模型,研究不同时间尺度边界入流条件对水动力水质数学模型模拟精度的影响,以期为平原河网地区实地监测和河道管理提供参考。

1 研究区域概况

张家港市隶属于江苏省苏州市,共河网水系属太湖流域澄锡虞水系,为典型的平原感潮河网地区,利用长江和内河水位差控制沿江闸站启闭,引水量和引水时间受长江潮位影响。天生港站为长江张家港段潮位代表站,水位高低主要受上游大通来水量和沿海潮汐双重影响,其潮位属不规则半日周期潮,每日有2次高潮和2次低潮,连续2次高潮差别较大,2次低潮则差别较小^[12],大潮主要出现农历初三和十八前后^[13]。张家港市利用下午的高潮引水,引水时间一般在14:00~20:00之间,经1h左右达到最大值,引水过程持续2~3h。

选取张家港市中部水系构建一维非稳态模型,中部水系主要的引水河道为朝东圩港和一干河,排水河道主要为二干河,9个水文自动监测站点位置如图1所示,实时输出频率为1min的流量、水位和流速数据为模型边界条件、初始条件设置以及参数率定验证提供良好的数据支撑。

2 分析方法

时间尺度即流量的监测频率,研究基于朝东圩港老闸站流量自动监测数据,以0.5h、1h、2h、3h、4h、5h、6h、12h、24h为时间尺度,选取不同开始取值时刻,得到多组模型边界入流序列。采用相对误差、决定系数和纳什效率系数描述模型水动力(流量、水位)和水质(COD、氨氮)模拟精度,用3个指标的变化曲线来评价影响程度。

一般认为,相对误差在 $[-20\%, 20\%]$ 以内,决定系数大于0.6,模拟效果可接受^[14];纳什效率系数在 $(0.75, 1]$ 之间表示模拟效果非常好,在 $(0.65,$

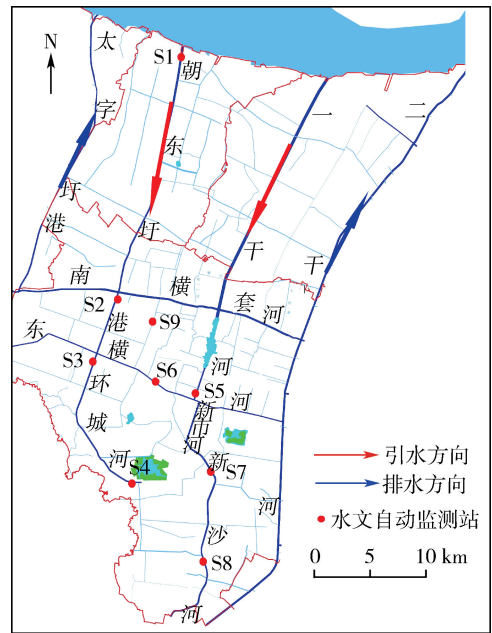


图1 张家港市水循环体系及中部水系水文自动监测站分布

Fig.1 Distribution of water cycle system and hydrological automatic monitoring stations in Zhang Jiagang

0.75]之间表示模拟效果较好,在 $(0.50, 0.65]$ 之间表示模拟效果一般,在 $(-\infty, 0.5]$ 之间表示模拟效果不好^[15]。相对误差越小、决定系数和纳什效率系数越大,表明模拟精度越高。

3 模型构建与率定

基于野外同步监测数据、自动高频监测数据、常规监测资料构建张家港市中部水系一维非稳态水动力水质模型,水动力模型计算采用圣维南方程组^[16-18],主要依据动量守恒和质量守恒原理,以水位和流量为未知变量,同时考虑了旁侧入流和漫滩的影响,水质模型计算采用污染物对流扩散方程^[19]。

根据概化后河网、湖泊在输水能力和调蓄能力与实际河网、湖泊相近或基本一致的原则^[20],将张家港市镇级以上河道、沿江水利枢纽、内河节制闸进行概化,共概化得到368条河流、151个闸站。中部水系朝东圩港、一干河与长江交汇处的进水口为模型上边界,根据沿江水文监测站监测数据确定流量边界,太字圩港、二干河与长江交汇处为模型下边界,根据同步监测数据确定水位边界;水质数据参考张家港市水功能区常规断面监测数据确定,模型初始水位的设定参考同步监测数据及往年水文资料,设置常水位为3.69m。

于2016年1月11—12日在张家港市中部水系开展野外水动力水质同步监测,布设5个水文监测断面,采用流速仪人工测量流速,水尺、自动水位计测量水位,监测频率为开闸引水后每0.5h或1h;布

设 17 个水质监测断面,采集水样送实验室分析,监测频率为开闸前采集一次水样用于本地浓度值测定,开闸后主要断面每 1 h 采集水样。

同步监测数据结合水文站实时监测数据用于模型率定,结果显示:张家港市现状河道糙率为 0.01~0.04, COD 降解系数为 0.04~0.08 d⁻¹, 氨氮降解系数为 0.03~0.08 d⁻¹; 流量率定结果相对误差均值在 20% 以内, 水位率定结果误差在 10 cm 以内, 水质率定结果相对误差在 30% 以内, 表明该水力水质模型模拟效果良好, 可用于后续模拟计算。

4 模拟结果与分析

4.1 不同时间尺度边界入流特性及代表性

平原感潮河网地区大多利用潮汐与内河水位差控制闸门启闭, 引水流量变化与潮位变化具有相同的周期性。长江潮位和张家港朝东圩港水利枢纽内河水位、流量情况如图 2 所示, 长江潮位基本高于朝东圩港水利枢纽内河水位, 满足引水条件; 朝东圩港实测流量与潮位变化一致, 流量变幅受潮汐影响较大, 最大流量可达 180 m³/s 左右。

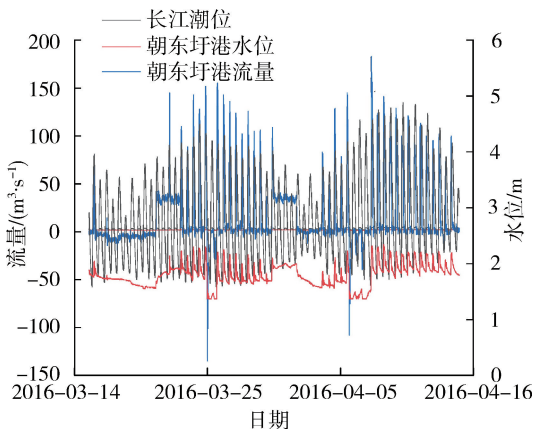
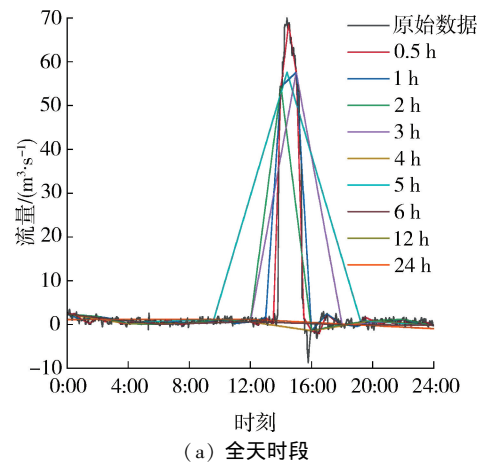


图 2 长江潮位、朝东圩港水位与流量变化

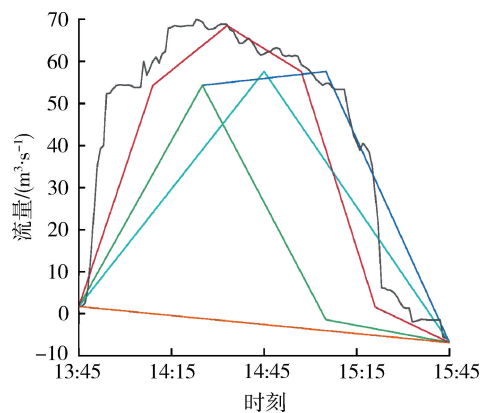
Fig. 2 Variation of tide level of Yangtze River, water level and discharge of Chaodongwei Port

基于朝东圩港 2016 年 2 月 6 日引调水流量数据, 以零点为开始取值时刻, 以不同时间尺度筛选入流边界序列进行数据代表性分析。图 3(a) 为全天时段入流序列曲线, 理论上时间尺度越小越易取到更多数据, 更具代表性, 但时间尺度小于 3 h 和为 5 h 时有流量峰, 而时间尺度为 4 h 和大于 6 h 时无流量峰, 说明是否有流量峰不仅与时间尺度有关, 还与开始取值时刻相关; 图 3(b) 为引水时段入流序列曲线, 时间尺度为 0.5 h 时, 边界入流流量序列取到原始流量峰数据上 3 个数据点, 1 h 时为 2 个数据点, 2 h、3 h 和 5 h 时为 1 个数据点, 时间尺度增大导致

取到原始流量峰数据上数据点变少, 对引水时段流量曲线的还原变差。由表 1 可知总水量误差、相关系数以及流量峰值大小并不随时间尺度变化呈规律性变化, 时间尺度小于 2 h 时, 随着时间尺度的增大总水量误差增大, 相关系数减小, 流量峰值减小; 时间尺度大于 2 h 时, 总水量误差、相关系数、流量峰值变化无明显规律; 时间尺度小于 1 h 时, 不论是在引水和非引水全天时段或单独引水时段, 总水量误差小于 20%, 相关系数大于 0.9, 表明该时间尺度边界入流数据具有代表性, 能够较为准确描述实际情况。



(a) 全天时段



(b) 引水时段

图 3 不同时间尺度边界入流流量曲线

Fig. 3 Inflow boundary discharge curve of different time scales

基于朝东圩港 2016 年 2 月 6 日引调水流量数据, 选取较小时间尺度 0.5 h 及较大时间尺度 3 h, 进一步分析全天时段和引水时段开始取值时刻不同对边界入流的影响。时间尺度为 0.5 h 时, 全天时段开始取值时刻分别为 0:00、0:05、0:10、0:15、0:20、0:25、0:30、0:40、0:50、1:00、1:10, 得到 11 组流量序列, 如图 4(a) 所示; 引水时段从下午 13:45 开始, 14:23 达到峰值, 持续时间约 2 h, 从 13:45 每间隔 5 min 或 10 min 开始取值得到 11 组流量序列, 如图 4(b) 所示, 前 7 组数据为流量峰曲线到达峰值前开

表 1 不同时间尺度边界入流总水量及曲线相关系数

Table 1 Total water volume and curve correlation coefficient of inflow boundary at different time scales

时间尺度/h	全天时段				引水时段		
	总水量/m ³	总水量误差/%	相关系数	流量峰值/(m ³ ·s ⁻¹)	总水量/m ³	总水量误差/%	相关系数
0.5	371 534	3.0	0.98	68.00	266 629	18.0	0.93
1	454 898	16.0	0.91	58.00	264 394	19.0	0.82
2	433 617	12.0	0.72	54.00	140 974	57.0	0.76
3	666 128	68.0	0.69	58.00	200 970	38.0	0.82
4	24 048	87.0	-0.32		21 321	93.0	0.52
5	1 059 234	167.0	0.60	58.00	200 970	38.0	0.82
6	38 330	89.0	-0.01		21 321	93.0	0.52
12	56 188	81.0	0.04		21 321	93.0	0.52
24	56 188	81.0	0.04		21 321	93.0	0.52

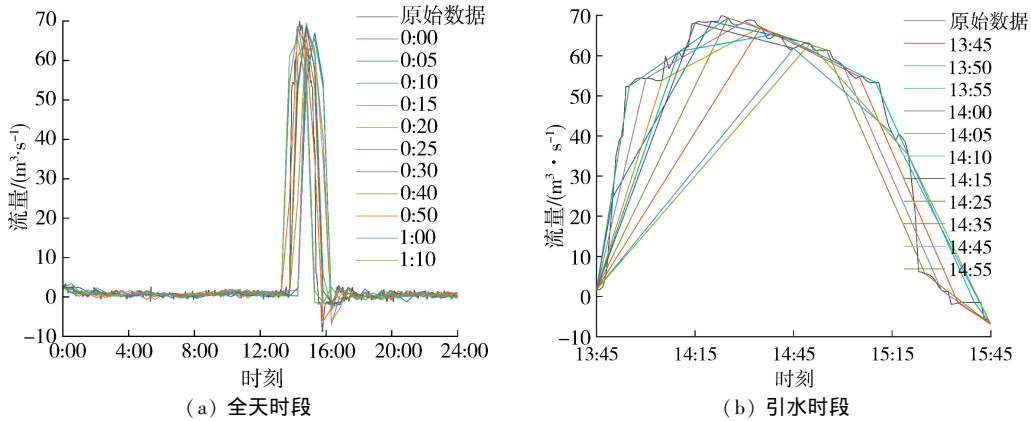


图 4 0.5 h 时间尺度不同开始取值时刻流量曲线

Fig. 4 Flow curve at different starting time of 0.5 h time scale

始取值,后 4 组为曲线到达峰值后开始取值。由表 2 可知,全天时段总水量误差最大为 5.2%,流量峰值误差在 10% 以内,说明时间尺度较小时开始取值时刻不同对边界入流代表性影响较小;引水时段总水量误差在 9.0% ~ 58.0% 之间,流量峰值误差在 0.8% ~ 13.0%,流量峰值前开始取值组别总水量和流量峰值的误差小于流量峰值后开始取值组别,开

始取值时刻不同造成的误差主要体现在引水时段。时间尺度为 3 h 时,研究从零点每间隔 15 min 开始取值得到 12 组流量序列,如图 5(a) 所示;从开始引水时刻 13:45 开始每间隔 10 min 取值,得到 12 组流量序列,如图 5(b) 所示,前 4 组数据为流量峰曲线到达峰值前开始取值,后 8 组为曲线到达峰值后开始取值。由表 3 可知,全天时段总水量误差在

表 2 0.5 h 时间尺度不同开始取值时刻总水量和流量峰值误差

Table 2 Deviation of the total water volume and peak flow at different starting times of whole day and diversion period in 0.5 h time scale

开始时刻	全天时段				引水时段				
	总水量/m ³	总水量误差/%	流量峰值/(m ³ ·s ⁻¹)	流量峰值误差/%	开始时刻	总水量/m ³	总水量误差/%	流量峰值/(m ³ ·s ⁻¹)	流量峰值误差/%
0:00	389 316	1.8	68.50	2.1	13:45	273 142	16.0	68.10	2.7
0:05	386 960	2.4	66.90	4.4	13:50	255 336	21.0	68.50	2.1
0:10	394 079	0.5	65.40	6.6	13:55	254 859	21.0	69.40	0.8
0:15	379 780	4.2	68.10	2.7	14:00	294 327	9.0	68.50	2.1
0:20	417 099	5.2	68.50	2.1	14:05	284 834	12.0	67.10	4.1
0:25	406 758	2.6	69.40	0.8	14:10	291 377	10.0	65.50	6.4
0:30	389 316	1.8	68.50	2.1	14:15	273 142	16.0	68.10	2.7
0:40	388 930	1.9	65.50	6.4	14:25	221 357	32.0	69.40	0.8
0:50	416 783	5.1	68.40	2.3	14:35	247 530	24.0	67.00	4.2
1:00	385 210	2.8	68.40	2.3	14:45	206 053	36.0	61.60	12.0
1:10	386 734	2.4	65.50	6.4	14:55	137 289	58.0	61.00	13.0

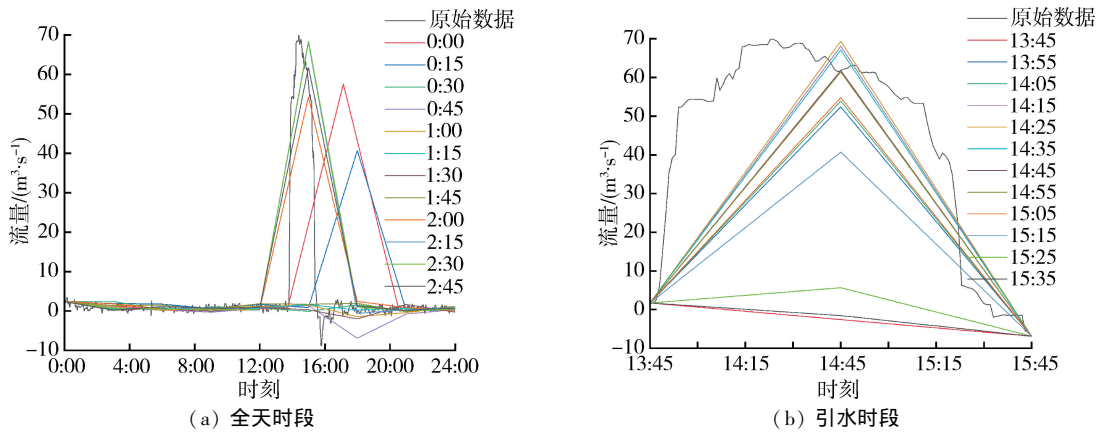


图5 3 h 时间尺度不同开始取值时刻流量曲线

Fig. 5 Flow curve at different starting time of 3 h time scale

表3 3 h 时间尺度不同开始取值时刻总水量和流量峰值误差

Table 3 Deviation of the total water volume and peak flow at different starting time of whole day and diversion period in 3 h time scale

全天时段					引水时段				
开始时刻	总水量/ m^3	总水量误差/%	流量峰值/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	流量峰值误差/%	开始时刻	总水量/ m^3	总水量误差/%	流量峰值/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	流量峰值误差/%
0:00	758 580	91.0	58.00	18.0	13:45	21 321	94.0	1.71	98.0
0:15	533 161	34.0	41.00	42.0	13:55	182 468	44.0	52.00	25.0
0:30	79 898	80.0	2.44	96.0	14:05	187 805	42.0	54.00	23.0
0:45	119 995	70.0	2.37	97.0	14:15	238 403	27.0	68.00	3.0
1:00	77 705	80.0	2.37	97.0	14:25	243 044	26.0	69.00	1.0
1:15	63 215	84.0	2.37	97.0	14:35	234 833	28.0	67.00	4.1
1:30	62 456	84.0	2.37	100.0	14:45	215 914	34.0	62.00	12.0
1:45	113 205	71.0	2.37	97.0	14:55	214 490	34.0	61.00	12.0
2:00	667 143	68.0	54.00	22.0	15:05	191 008	42.0	55.00	22.0
2:15	778 772	97.0	68.00	3.0	15:15	141 064	57.0	41.00	42.0
2:30	788 424	99.0	68.00	2.0	15:25	24 892	92.0	6.00	92.0
2:45	731 740	85.0	62.00	12.0	15:35	18 374	94.0	1.71	98.0

34.0% ~ 99.0% 之间, 流量峰值误差在 2.0% ~ 100.0% 之间; 引水时段总水量误差在 26.0% ~ 94.0% 之间, 流量峰值误差在 1.0% ~ 98.0% 之间, 时间尺度较大时取值开始时刻越靠近流量峰值误差越小。

从误差变化区间分析可知, 当时间尺度较大时, 开始取值时刻对全天和引水时段流量序列影响较为明显, 可能是当时间尺度大于引水时间时, 在引水时段内最多只能取到原始流量数据序列上的 1 个数据点, 故需保证尽量取到流量峰值附近的数据点以减小误差。开始取值时刻对边界入流条件代表性的影响程度随时间尺度的增大而变大, 在实际监测过程中, 未知引调水开始时刻情况下应尽量选取较小的时间尺度进行监测; 已知引调水开始时刻情况下可以在非引调水过程选取较大时间尺度测量少量数据点, 引调水过程中减小时间尺度、增大取样频率并保证流量峰值附近采集到较多的数据点。

基于朝东圩港 2016 年 2 月 6—15 日的引调水

数据, 综合比较 9 个不同时间尺度、12 个开始取值时刻边界入流代表性。总水量比值、相关系数、流量峰数量和峰值情况见表 4, 总水量比值和相关系数变化趋势见图 6, 随时间尺度增大, 总水量比值均值增大, 相关系数均值减小, 说明边界入流代表性变差, 变化区间增大说明开始取值时刻不同造成的影响增大。时间尺度小于 1 h 时, 流量峰为 9 个, 可较为准确地反映引水次数, 不受开始取值时刻的影响; 时间尺度大于 2 h 时, 峰数量明显减少; 时间尺度为 24 h 时, 流量序列失去流量峰, 失真严重。流量峰值波动随着时间尺度的增大而增大, 时间尺度小于 1 h 时, 总水量比值上下边界误差小于 5%, 相关系数大于 0.9, 峰数量为 9 个, 流量峰值变化幅度在 10% 以内, 说明此边界条件可信。该时间尺度小于张家港引水时间, 可能是由于较小的时间尺度能够大概率地覆盖引水数据, 时间尺度过大容易错过或取到少量引水数据点, 导致模型边界入流失真, 影响模拟精度。平原感潮河网地区进行水文野外同步监测时需

关心相关地区的潮位情况、引调水开始时刻,选取合适的时间尺度。

表 4 不同时间尺度边界入流流量序列特征值

Table 4 Eigenvalue analysis of inflow boundary flow series at different time scales

时间尺度/h	总水量比值	相关系数	流量峰数量	流量峰值/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)
1/60	1	1	9	99.61
0.5	0.98 ~ 1.02	0.96 ~ 0.99	9	93.14 ~ 98.7
1	0.95 ~ 1.04	0.86 ~ 0.97	9	91.44 ~ 97.01
2	0.95 ~ 1.05	0.74 ~ 0.89	8,9	81.22 ~ 93.88
3	0.90 ~ 1.10	0.50 ~ 0.76	7 ~ 9	79.76 ~ 91.16
4	0.76 ~ 1.26	0.02 ~ 0.63	5 ~ 8	62.80 ~ 97.35
5	0.11 ~ 1.41	0.02 ~ 0.32	3 ~ 7	23.90 ~ 90.85
6	0.64 ~ 1.30	0.05 ~ 0.38	3 ~ 5	63.10 ~ 97.37
12	0.01 ~ 2.55	0.01 ~ 0.33	1 ~ 5	48.75 ~ 97.35
24	0.02 ~ 5.02	0 ~ 0.12		

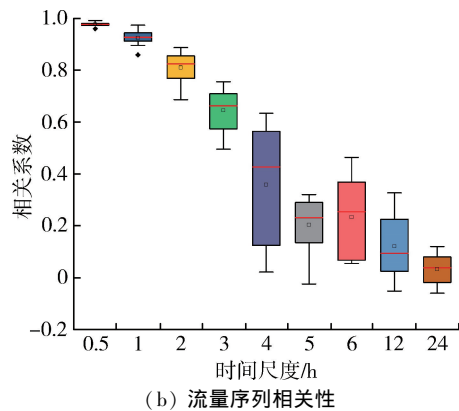
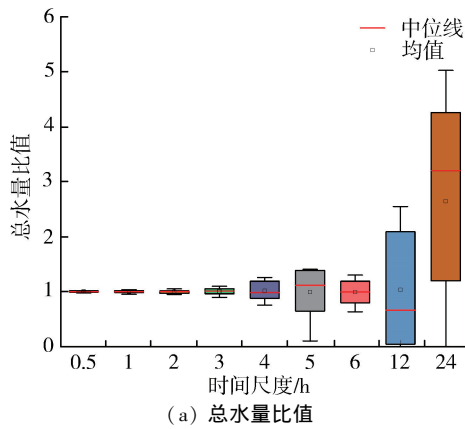


图 6 不同时间尺度边界入流总水量比值和流量序列相关性变化趋势

Fig. 6 Total flow ratio and flow sequence correlation changes at different time scales

4.2 不同时间尺度边界入流条件对水力模拟精度的影响

水力模拟结果的相对误差、决定系数和纳什效率系数变化情况如图 7 所示。由图 7(a)可知,流量的相对误差随时间尺度增大而增大,时间尺度小于 4 h 时小于 20%,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时增大到 600%,曲线在时间尺度大于 6 h 时上升幅

度变大表明时间尺度对模拟精度影响变大;水位的相对误差几乎不受时间尺度变化影响,一直维持在 0.15% ~ 1.78% 之间,误差在 10 cm 以内,模拟精度较高。由图 7(b)可知,流量的决定系数随时间尺度增大而减小,时间尺度小于 1 h 时大于 0.6,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时下降到 0.01,曲线在时间尺度大于 6 h 时下降幅度变小表明时间尺度对模拟精度影响变小;水位的决定系数在时间尺度小于 2 h 时大于 0.6,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时降低到 0.01,其曲线变化趋势与流量的决定系数相近,时间尺度变化对模拟精度影响由大变小。由图 7(c)可知,流量的纳什效率系数随时间尺度增大而减小,时间尺度小于 1 h 时大于 0.65,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时下降到 -6.86,曲线在时间尺度大于 1 h 时下降幅度变大表明时间尺度对模拟精度的影响变大;水位的纳什效率系数在时间尺度小于 2 h 时大于 0.65,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时降低到 -61.23,其曲线变化趋势与流量的纳

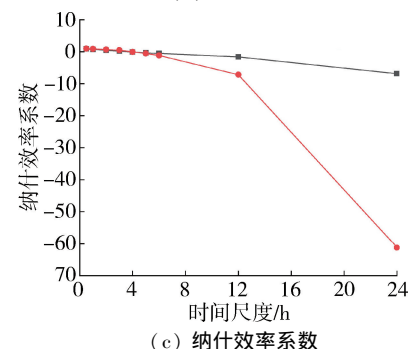
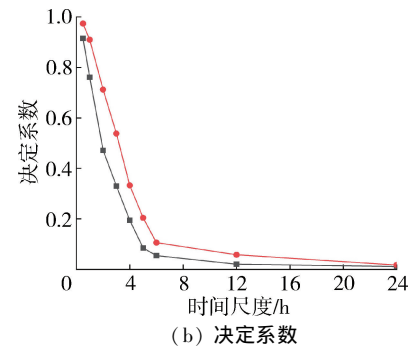
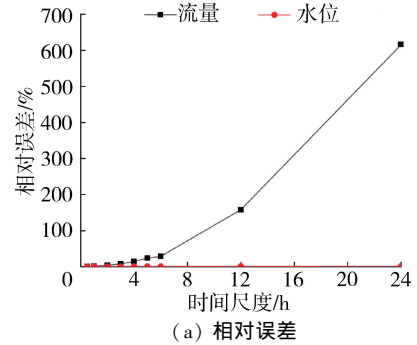


图 7 不同时间尺度边界入流水动力模拟精度变化趋势
Fig. 7 Variation trend of accuracy of boundary inflow hydrodynamic simulation at different time scales

什效率系数相近,时间尺度变化对模拟精度影响由小变大。

各项指标变化曲线在 6 h 左右发生突变可能与朝东圩港边界入流条件在该时间尺度下流量峰数量迅速减少有关;时间尺度小于 1 h 时流量、水位模拟结果相对误差在 $[-20\%, 20\%]$ 以内,决定系数大于 0.6,纳什效率系数大于 0.6,模拟精度较高,故研究区域水动力模拟结果可信的最大时间尺度为 1 h;其中水位的相对误差小于流量,水位的决定系数、纳什效率系数大于流量的决定系数和纳什效率,水位模拟精度优于流量模拟精度。

4.3 不同时间尺度边界入流条件对水质模拟精度的影响

水质模拟结果的相对误差、决定系数和纳什效率系数变化情况如图 8 所示。由图 8(a)可知,COD 的相对误差随着时间尺度增大一直小于 20%,模拟精度较好;氨氮的相对误差随时间尺度增大而增大,时间尺度小于 6 h 时小于 20%,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时增大到 27.2%,曲线在时间尺度大于 6 h 时上升幅度变小表明时间尺度对模拟精度影响变小,氨氮的曲线变化趋势与 COD 相近,时间尺度对模拟精度影响由大变小。由图 8(b)可知,COD 的决定系数随时间尺度增大而减小,时间尺度小于 2 h 时大于 0.6,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时降低到 0.30,曲线在时间尺度大于 6 h 时下降幅度变小表明时间尺度对模拟精度影响变小;氨氮的决定系数在时间尺度小于 2 h 时大于 0.6,时间尺度为 24 h 时降低到 0.33,变化趋势与 COD 相近,时间尺度变化对模拟精度影响由大变小。由图 8(c)可知,COD 的纳什效率系数随时间尺度增大而减小,时间尺度小于 2 h 时大于 0.65,模拟精度较高,时间尺度为 24 h 时降低到 -13.07,曲线在时间尺度大于 4 h 时下降幅度变大表明时间尺度对模拟精度影响变大;氨氮的纳什效率系数在时间尺度小于 2 h 时大于 0.65,时间尺度为 24 h 时降低到 -7.8,变化趋势与 COD 相近,时间尺度变化对模拟精度影响由小变大。

各项指标变化曲线在 6 h 左右发生突变可能与朝东圩港边界入流条件在该时间尺度下流量峰数量迅速减少有关;时间尺度小于 2 h 时,COD 和氨氮模拟结果相对误差在 $[-20\%, 20\%]$ 以内,决定系数大于 0.6,纳什效率系数大于 0.6,模拟精度较高,故研究区域水质模拟结果可信的最大时间尺度为 2 h;其中 COD 的相对误差、决定系数、纳什效率系数小于氨氮,氨氮模拟精度优于 COD。当边界入流能够

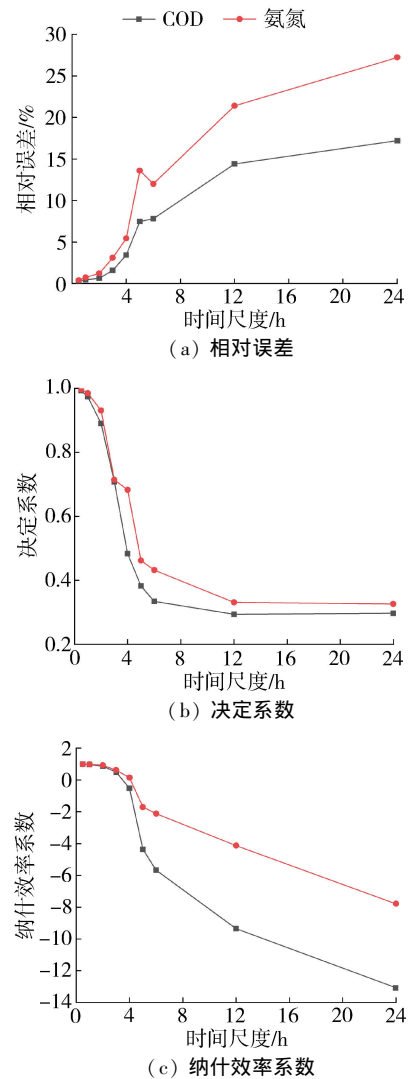


图 8 不同时间尺度边界入流水质模拟精度变化趋势

Fig.8 Variation trend of simulation accuracy of in flow water quality at different time scales

较好地模拟实际情况时,模型水动力水质模拟精度较高,总体水质相对误差小于水动力相对误差,水质的决定系数、纳什效率系数大于水动力的决定系数和纳什效率系数,水质模拟精度更高。综合来看张家港市平原感潮河网水动力水质模型可信的最大时间尺度为 1 h。

5 结论

a. 平原感潮河网水动力水质模型边界入流受潮位控制,其代表性受时间尺度、开始取值时刻和调度情况影响,并非为单纯的线性关系,张家港市全天时段和引水时段边界入流条件可信的最大时间尺度为 1 h。

b. 随着时间尺度的增大,模拟结果的相对误差增大,决定系数、纳什效率系数减小,张家港市感潮河网水动力、水质模拟可信的最大时间尺度为 1 h;水质模拟精度优于水动力模拟精度,水位模拟精度优于

流量模拟精度,氨氮模拟精度优于 COD 模拟精度。

c. 平原感潮河网地区进行野外同步监测时,监测时间尺度的选取需关心潮位情况、引调水开始时刻及引调水周期,未知引调水开始时刻情况下选择较小时间尺度进行监测,已知引调水开始时刻情况下可在非引调水过程选取较大时间尺度测量少量数据,引调水过程中减小时间尺度、增大取样频率并保证采集到较多的数据点。

参考文献:

[1] 许兴武,沃玉报,胡阳,等. 秦淮河水质改善现场调水试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):492-496. (XU Xingwu,WO Yubao,HU Yang,et al. Field water diversion tests of water quality improvement in Qinhuai River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):492-496. (in Chinese))

[2] 宋刚福,沈冰. 基于生态的城市河流水量水质联合调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):258-263. (SONG Gangfu,SHEN Bing. An ecology-based water quantity and quality combined operation model for urban rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(3):258-263. (in Chinese))

[3] 尤宾,臧红霞,李永丽. 淮河干流信阳段水质预测模型[J]. 水资源保护,2013,29(1):41-45. (YOU Bin,ZANG Hongxia,LI Yongli. Water quality prediction model for Xinyang section of main stream of Huaihe River[J]. Water Resources Protection,2013,29(1):41-45. (in Chinese))

[4] 贲鹏,虞邦义,倪晋,等. 淮河干流正阳关至吴家渡段水动力数学模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):42-46. (BEN Peng, YU Bangyi, NI Jin, et al. Development and application of hydrodynamic model in the main reach of Huaihe River from Zhengyangguan to Wujiadu [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(5):42-46. (in Chinese))

[5] 李晓,唐洪武,王玲玲,等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):393-399. (LI Xiao,TANG Hongwu,WANG Lingling,et al. Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river network area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(5):393-399. (in Chinese))

[6] 许益新,王文才,曾伟峰,等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. 水资源保护,2018,34(1):70-75. (XU Yixin,WANG Wencai,ZENG Weifeng,et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. Water Resources Protection,2018,34(1):70-75. (in Chinese))

[7] RADWAN M, WILLEMS P, BERLAMONT J. Sensitivity and uncertainty analysis for river quality modelling [J].

Journal of Hydroinformatics,2004,6(2):83-99.

[8] VAN DER LINDEN L, DALY R I, BURCH M K. Suitability of a coupled hydrodynamic water quality model to predict changes in water quality from altered meteorological boundary conditions [J]. Water, 2015, 7 (1):348-361.

[9] 李一平,邱利,唐春燕,等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析[J]. 中国环境科学,2014,34(2):410-416. (LI Yiping, QIU Li, TANG Chunyan, et al. Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model [J]. China Environmental Science, 2014, 34 (2): 410-416. (in Chinese))

[10] 曹引,冶运涛,梁犁丽,等. 二维水动力模型参数和边界条件不确定性分析[J]. 水力发电学报,2018,37(6):47-61. (CAO Yin, YE Yuntao, LIANG Lili. Uncertainty analysis of two-dimensional hydrodynamic model parameters and boundary conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (6): 47-61. (in Chinese))

[11] 顾正华,刘贵平,唐洪武,等. 感潮河网调水过程的数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2007,26(4):76-81. (GU Zhenhua, LIU Guiping, TANG Hongwu, et al. Study on numerical simulation of water transfer process in tidal river networks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4):76-81. (in Chinese))

[12] 王文才,李一平,杜薇,等. 长江感潮河段潮汐变化特征[J]. 水资源保护,2017,33(6):121-124. (WANG Wencai, LI Yiping, DU Wei, et al. Tidal variation features of tidal reach of Changjiang River [J]. Water Resource Protection, 2017, 33(6):121-124. (in Chinese))

[13] 宋正逵,黄利亚,仇娟娟. 长江上游径流对天生港站潮位影响浅析[J]. 水文,2010,30(4):56-58. (SONG Zhengkui, HUANG Liya, CHOU Juanjuan. Influence of runoff from upper reaches of Yangtze River on Tidal level at tianshenggang station [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4):56-58. (in Chinese)).

[14] 庞树江,王晓燕,马文静. 多时间尺度 HSPF 模型参数不确定性研究[J]. 环境科学,2018,39(5):2030-2038. (PANG Shujiang, WANG Xiaoyan, MA Wenjing. Research of parameter uncertainty for hrspf model under different temporal scales [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2030-2038. (in Chinese)).

[15] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M E, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.

[16] 赵凤伟. MIKE11HD 模型在下辽河平原河网模拟计算中的应用 [J]. 水利科技与经济, 2014, 20 (8): 33-35. (ZHAO Fengwei. Application of Mike11 HD on hydrodynamic modeling of waterways in Xialiaohe River

- Plain[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20(8):33-35. (in Chinese))
- [17] 卢士强,徐祖信.平原河网水动力模型及求解方法探讨[J].水资源保护,2003(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution[J]. Water Resource Protection, 2003(3):5-9. (in Chinese))
- [18] 向小华,吴晓玲,牛帅,等.基于显式有限体积法的一维河网模型[J].水利水电科技进展,2015,35(4):6-9. (XIANG Xiaohua, WU Xiaoling, NIU Shuai, et al. Construction of one-dimensional river network model based on explicit finite volume method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4):6-9. (in Chinese))
- [19] 逢勇,王瑶瑶,胡绮玉.浙江温黄平原典型河流水质改善方案研究[J].水资源保护,2016,32(2):100-105. (PANG Yong, WANG Yaoyao, HU Qiyu. Research on water quality improvement scheme for a typical river in Wenhuan Plain in Zhejiang Province[J]. Water Resource Protection, 2016, 32(2):100-105. (in Chinese))
- [20] 杨松彬,董志勇.河网概化密度对平原河网水动力模型的影响研究[J].浙江工业大学学报,2007,35(5):567-570. (YANG Songbin, DONG Zhiyong. Study on the influence of river network generalized density to hydrodynamic model for plain river system[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(5):567-570. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-22 编辑:熊水斌)

(上接第45页)

- [5] DIDIER B S P, BENEDETTO R, SEBASTIEN L, et al. A review of urban metabolism studies to identify key methodological choices for future harmonization and implementation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163:5223-5230.
- [6] BODINI A, BONDAVALLI C. Towards a sustainable use of water resources: a whole-ecosystem approach using network analysis[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2002, 18(5):463-485.
- [7] ZHANG Y, YANG Z F, FATH B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system; model development, and a case study for Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408:4702-4711.
- [8] ZHENG B Y, HUANG G H, LIU L R, et al. Metabolism of urban wastewater; ecological network analysis for Guangdong Province, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217:510-519.
- [9] WU Bo, ZENG Weihua, CHEN Honghan, et al. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112:3138-3151.
- [10] 李海燕,黄延,吴根.昆明湖水质变化分析及污染控制对策[J].水资源保护,2007,23(5):18-20. (LI Haiyan, HUANG Yan, WU Gen. Water quality changes of Kunming Lake and pollution control methods[J]. Water Resources Protection, 2007, 23(5):18-20. (in Chinese))
- [11] 昆明市水务局. 2017年昆明市水资源公报[R]. 昆明:昆明市水务局, 2017.
- [12] 昆明市环保局. 2017年昆明市环境质量公报[R]. 昆明:昆明市环保局, 2017.
- [13] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual; setting the global standard[D]. London: Water Footprint Network, 2011.
- [14] 尚海洋,宋妮妮.碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J].水资源保护,2018,34(2):15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint; comparison of concepts, methods, and policy responses[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):15-21. (in Chinese))
- [15] 任晓晶,白雪,刘丹,等.水足迹评价方法对比及案例研究[J].水利经济,2018,36(6):14-19. (REN Xiaojing, BAI Xue, LIU Dan, et al. Comparison and case study of assessment methods for water footprints [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6):14-19. (in Chinese))
- [16] JU X, XING G, CHEN X, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2009, 106:3041-3046.
- [17] PIZZOL M, SCOTTI M, THOMSEN M. Network analysis as a tool for assessing environmental sustainability; applying the ecosystem perspective to a Danish Water Management System[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 118:21-31.
- [18] FINN J T. Flow analysis of models of the Hubbard Brook Ecosystem[J]. Ecology, 1980, 61(3):562-571.
- [19] FATH B D. Community-level relations and network mutualism[J]. Ecological Modelling, 2007, 208:56-67.
- [20] SCHARLER U M, FATH B D. Comparing network analysis methodologies for consumer-resource relations at species and ecosystems scales [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(22):3210-3218.
- [21] OKUYAMA T, HOLLAND J N. Network structural properties mediate the stability of mutualistic communities [J]. Ecology Letters, 2008, 11:208-216.

(收稿日期:2019-01-27 编辑:熊水斌)