

江苏省通南地区河网水量水质 数值模拟研究

方浩川¹, 许仁义¹, 钱睿智², 汪凌翔¹

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江苏水文水资源勘测局扬州分局, 江苏 扬州 225000)

摘要:通过已有的水文和水质数据建立了邵伯湖供水区扬州通南地区河网的一维水动力和水质模型,率定了水量和水质参数,为能够定量分析在不同水资源调度情况下扬州内部河网水动力条件的改善情况和水质条件的改善打下了基础,为今后邵伯湖供水区排涝防洪作可靠依据,为扬州市水生态文明建设提供技术支撑。

关键词:河网; 水动力; 水质

中图分类号: X824

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2020)10-0024-06

Numerical simulation study on water quantity and quality of river network in Tongnan area of Jiangsu Province

Fang Haochuan¹, XU Renyi¹, Qian Zhihui², Wang Lingxiang¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Yangzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Yangzhou 225000, China)

Abstract: Based on the existing hydrology and water quality data, a one-dimensional hydrodynamic and water quality model of the river network in the Tongnan area of Yangzhou in the Shaobo Lake water supply area was established, and the water volume and water quality parameters were calibrated, laying the foundation for the improvement of hydrodynamic and water quality conditions in the internal river network of Yangzhou under different water resources dispatch conditions, which could provide a reliable basis for flood control and drainage prevention of Shaobo Lake water supply area in the future, and provide a basis technical support for the construction of urban water ecological civilization of Yangzhou City.

Key words: river network; water power; water quality

1 概 述

江苏省扬州市通南地区位于长江下游沿江地区,地势平缓,属于亚热带季风气候,四季分明,雨水充沛,年平均降水量为 1 031 mm,但水文条件十分复杂,地表径流在空间和时间上分配很不均衡,具体表现为南部径流多于北部,丰水期降水值在年降水量中占了很大比重,而且由于许多河流河床都

比较窄,城区实际往外(长江及周边河流)排水口较少,水流常常被堵在城区,排水效果不是很完善,导致在汛期常常可能发生洪涝灾害。在水质问题上,由于近些年扬州城市发展较为迅速,且在水污染整治问题上有所欠缺,导致水污染问题日益严重^[1]。本文基于一维非恒定水流流动基本方程组及一维污染物对流-扩散方程,建立了扬州通南地区城市河网一维水量水质模型^[2],模型采用隐格式^[3]进行

收稿日期: 2020-05-19

基金项目: 国家青年基金(51509216)

作者简介: 方浩川(1997—),男,硕士研究生,研究方向为水流模拟。Email: 884452317@qq.com

数值求解,从而模拟出水流过程及污染物输运扩散过程,为以后改善该地区的水质以及水生态打下了基础。

2 水量水质模型

2.1 水量模型

水流在平底、棱柱形明渠中一维非恒定流动的基本方程组—圣维南方程组^[2]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = q_L v_x \quad (2)$$

式中: A 为过水面积, m^2 ; Q 为断面流量, m^3/s ; Z 为水位, m ; α 为动量修正系数; K 为流量模数; q_L 为旁侧入流, m^2/s , 入流为正, 出流为负; v_x 为入流沿水流方向的速度, m/s 。

2.2 水质模型

河网对流污染物输移问题的基本方程^[4]为

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S_c - S = 0 \quad (3)$$

式中: E_x 为纵向分散系数; C 为水流输送的物质浓度; S_c 为与输送物质浓度有关的衰减项, $S_c = K_d AC$, K_d 为衰减因子; S 为外部的源或汇项。

3 模型建立与验证

3.1 河网概化

本实验是对江苏扬州邵伯湖供水区通南地区所属河流进行河网水动力及水质数值模拟,其具体包括邵仙引河、老通扬运河、小涵河、顾圩河、白塔河、灰粪港、向阳河、红旗河八大主要河流,以及邵仙闸洞、宜陵地涵、通江闸、河口闸四大主要水利工程建筑物。根据通南地区各河流河床断面数据及过水情况分析,为符合工程计算要求,概化出扬州市通南地区河网平面图见图 1。

3.2 断面概化

数模过程根据实测断面资料,选用等腰梯形断面布置。

3.3 边界条件

根据 2016 年 5 月 30—31 日扬州市通南地区各个测量点实测资料,以及流域内各水工建筑物工作情况,得出该段时间内除通江闸为关闭外,其余闸门都正常过流。水流从邵仙闸洞入流,途径老通扬运河,连小涵河与顾圩河,经宜陵地涵与白塔河相通,最后

经小涵河、顾圩河及河口闸向外排出。结合河网边界条件给定条件,设定邵仙引河上游为流量进口边界,顾圩河、小涵河、河口闸给定水位出口边界。

3.4 时间、空间步长

由于天然河道河床高程沿着纵向不断变化,所以在构建数值模型时在空间步长的选择上需要贴合真实地形的需求。理论上而言,模型计算的时间、空间步长越小,计算结果的误差就会越小,但相对的产生的计算量就会变大,若时间和空间步长过大,容易产生过大的数值坦化,无法精确反映真实情况,因此权衡效率及误差是步长选择的根本。因此根据河网各河道断面实测数据,采用空间步长为 800 ~ 1 500 m,时间步长则为 200 s。

3.5 初始条件

模型的初始条件包括流量、水位及水质情况,设定初始条件的意义就是为了能更贴近真实河流水流情况,使模型开始计算时水流流速、水位及污染物浓度情况能与实际情况一致,使计算结果精确度更高,本次模拟水流上下游边界条件均采用 31 日 10 h 实测数据,内部水流情况为给定流速为零,水位统一为 3.6 m,各污染物浓度给定其一个均值情况,并以在该边界条件下模型正常运行 4 d 之后,待其流速、水位情况基本达到稳定之后各河段水动力及水质情况为后续模型计算的初始条件^[5]。

3.6 模型率定及验证

3.6.1 参数率定

本次模型选用 2016 年 5 月 30—31 日通南地区水文站实测资料进行模型参数率定,通过反复调整河床糙率数值以达到水位及流量计算值能与实测值尽量吻合,并根据查阅扬州市水质情况资料,在模型中加入点污染源,使得监测点的模型水质计算值更加贴合实测值。通过调整,得到各河流参数结果见表 1。

表 1 参数率定结果

河道	邵仙河、老通扬运河	向阳河、长庄河、长沟河	其余河流
糙率	0.022	0.035	0.028
污染物降解系数 μ	0.1	0.1	0.1

3.6.2 计算结果

并根据 2016 年 10 月 24—25 日的实测值进行模型验证,验证结果如下:表 2 ~ 3 为河网内部各测量点水位及流量验证对比结果;表 4 ~ 7 为河网内部

各测量点 TN、TP、NH₃-N 及 COD_{Mn} 质量浓度验证对比结果。

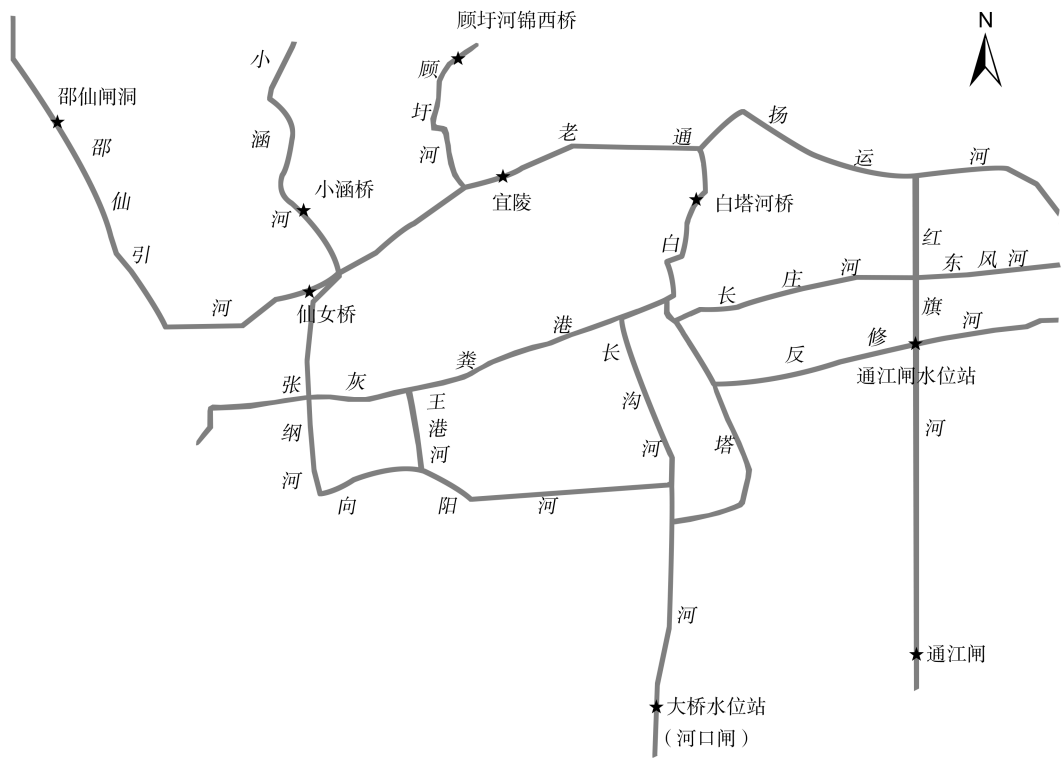


图 1 扬州通南地区河网概化图

表 2 模型水位模拟与实测对比

单位:m

时间	仙女桥		小涵桥		顾圩河锦西桥		宜陵		白塔河桥	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
10:00	3.24	3.31	3.23	3.23	3.20	3.20	3.27	3.30	3.28	3.31
12:00	3.25	3.31	3.23	3.23	3.20	3.20	3.26	3.30	3.28	3.31
14:00	3.26	3.30	3.24	3.24	3.19	3.19	3.27	3.30	3.28	3.30
16:00	3.26	3.30	3.25	3.25	3.20	3.20	3.27	3.30	3.29	3.30
18:00	3.25	3.30	3.24	3.24	3.19	3.19	3.27	3.30	3.29	3.30
20:00	3.24	3.30	3.23	3.23	3.19	3.19	3.25	3.30	3.27	3.31
22:00	3.24	3.30	3.22	3.22	3.19	3.19	3.25	3.29	3.28	3.31
0:00	3.24	3.31	3.22	3.22	3.19	3.19	3.25	3.29	3.28	3.31
2:00	3.24	3.30	3.22	3.22	3.19	3.19	3.25	3.30	3.28	3.30
4:00	3.24	3.30	3.22	3.22	3.19	3.19	3.25	3.29	3.28	3.30
6:00	3.23	3.29	3.21	3.21	3.18	3.18	3.25	3.29	3.27	3.30
8:00	3.22	3.30	3.21	3.21	3.18	3.18	3.25	3.29	3.27	3.30
10:00	3.22	3.30	3.20	3.20	3.19	3.19	3.27	3.29	3.28	3.30

表 3 模型流量模拟与实测对比 单位:m³/s

时间	仙女桥		小涵桥		顾圩河锦西桥		宜陵		白塔河桥	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
10:00	15.40	16.70	6.10	9.30	8.20	9.80	3.35	2.46	1.53	0.98
12:00	15.90	17.10	6.10	9.20	11.30	9.90	2.82	2.25	1.48	0.94
14:00	15.40	14.90	6.90	8.80	8.00	9.70	4.08	2.95	1.29	0.97
16:00	15.90	14.90	5.20	8.30	8.00	10.00	4.16	3.75	1.11	1.61
18:00	15.20	15.20	7.30	8.00	12.20	9.80	3.89	2.76	1.66	1.37
20:00	14.80	15.10	6.10	8.40	7.10	0.10	3.78	3.15	1.60	1.30
22:00	15.00	15.40	5.50	9.00	11.10	10.10	3.49	3.67	1.72	1.45
0:00	14.60	17.20	5.10	9.70	11.90	10.30	4.24	2.84	1.75	1.24
2:00	14.60	16.20	4.80	9.40	9.90	10.10	4.39	2.94	1.67	1.11
4:00	14.60	14.50	5.70	9.10	11.00	9.90	4.60	4.20	1.65	1.59
6:00	13.90	14.00	7.80	9.00	10.50	9.80	4.54	4.59	1.60	1.98
8:00	14.20	16.00	6.30	9.70	7.60	10.30	5.00	4.10	1.56	1.75
10:00	15.00	16.00	6.30	9.50	8.70	10.20	2.64	3.56	0.25	1.25

表 4 模型 TN 质量浓度模拟与实测对比 单位:mg/L

时间	仙女桥		小涵桥		顾圩河锦西桥		宜陵		白塔河桥	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
10:00	1.71	1.53	1.30	1.62	3.84	2.56	3.15	3.14	2.15	2.95
12:00	1.54	1.55	2.46	1.57	2.72	2.45	3.58	3.13	2.27	2.97
14:00	1.40	1.55	1.89	1.57	2.60	2.35	3.41	3.21	1.73	3.00
16:00	1.44	1.55	1.83	1.56	2.05	2.27	3.25	3.02	2.62	2.94
18:00	1.48	1.54	1.87	1.56	2.15	2.21	3.33	3.06	2.99	2.98
20:00	1.97	1.53	1.99	1.55	1.91	2.14	3.11	3.10	2.21	3.02
22:00	1.40	1.53	2.42	1.55	1.77	2.10	3.47	3.01	2.31	2.98
0:00	1.36	1.51	2.78	1.56	1.97	2.07	3.52	3.02	2.46	2.96
2:00	1.34	1.52	2.34	1.56	1.89	2.02	3.13	3.11	2.54	3.00
4:00	1.36	1.54	2.74	1.57	2.32	2.01	3.05	3.01	2.62	2.95
6:00	1.36	1.56	2.84	1.59	2.36	2.03	2.78	2.97	2.66	2.93
8:00	1.11	1.59	3.07	1.62	2.50	2.06	2.95	2.95	3.05	2.95
10:00	1.44	1.59	3.45	1.61	2.93	2.00	3.09	2.99	2.97	2.93

表 5 模型 TP 质量浓度模拟与实测对比

单位:mg/L

时间	仙女桥		小涵桥		顾圩河锦西桥		宜陵		白塔河桥	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
10:00	1.08	1.34	1.17	1.94	1.52	1.73	2.37	2.25	1.31	1.69
12:00	1.15	1.31	1.45	1.87	1.48	1.72	2.53	2.38	1.29	1.72
14:00	0.80	1.31	1.76	1.87	1.46	1.75	2.47	2.47	1.11	1.75
16:00	0.81	1.33	1.62	1.93	1.55	1.76	2.48	2.31	1.25	1.76
18:00	0.89	1.32	1.48	1.92	1.48	1.77	2.48	2.34	1.11	1.77
20:00	0.99	1.33	1.38	1.93	1.43	1.79	2.69	2.39	1.13	1.79
22:00	0.84	1.33	1.66	1.94	1.59	1.79	2.35	2.33	1.23	1.79
0:00	0.97	1.32	1.53	1.92	1.59	1.80	2.62	2.34	1.19	1.80
2:00	0.98	1.31	1.87	1.89	1.66	1.82	2.99	2.44	1.24	1.82
4:00	0.97	1.32	2.29	1.92	1.55	1.82	2.44	2.36	1.17	1.82
6:00	0.85	1.34	2.47	1.97	1.63	1.82	2.61	2.32	1.27	1.82
8:00	0.83	1.35	2.54	1.98	1.69	1.82	2.27	2.31	1.39	1.82
10:00	1.22	1.34	2.72	1.94	1.66	1.82	2.40	2.35	1.34	1.82

表 6 模型 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度模拟与实测对比

单位:mg/L

时间	仙女桥		小涵桥		顾圩河锦西桥		宜陵		白塔河桥	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
10:00	0.13	0.11	0.12	0.12	0.36	0.35	0.83	0.80	0.51	0.78
12:00	0.14	0.11	0.11	0.12	0.35	0.35	0.76	0.79	0.51	0.64
14:00	0.12	0.11	0.13	0.12	0.34	0.33	0.84	0.80	0.47	0.64
16:00	0.11	0.11	0.13	0.12	0.30	0.34	0.83	0.76	0.47	0.64
18:00	0.12	0.11	0.13	0.12	0.37	0.34	0.84	0.76	0.48	0.63
20:00	0.15	0.11	0.13	0.12	0.40	0.34	0.84	0.77	0.49	0.63
22:00	0.12	0.11	0.14	0.12	0.36	0.34	0.83	0.74	0.50	0.62
0:00	0.14	0.11	0.15	0.12	0.40	0.34	0.89	0.74	0.51	0.62
2:00	0.13	0.11	0.14	0.12	0.40	0.33	0.83	0.76	0.55	0.62
4:00	0.14	0.11	0.15	0.12	0.43	0.34	0.96	0.73	0.61	0.61
6:00	0.14	0.11	0.13	0.12	0.43	0.35	0.86	0.72	0.62	0.61
8:00	0.14	0.11	0.16	0.12	0.44	0.36	0.83	0.71	0.64	0.59
10:00	0.17	0.11	0.16	0.12	0.46	0.36	0.82	0.72	0.65	0.59

表 7 模型 COD_{Mn}质量浓度模拟与实测对比

单位:mg/L

时间	仙女桥		小涵桥		顾圩河锦西桥		宜陵		白塔河桥	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
10:00	3.50	3.59	4.70	4.51	4.90	5.59	8.50	8.70	8.70	8.20
12:00	3.20	3.55	4.20	4.53	5.80	5.85	9.10	8.88	8.30	8.17
14:00	2.70	3.56	4.00	4.52	5.60	5.77	10.80	8.97	7.80	8.24
16:00	2.70	3.59	4.40	4.60	5.70	5.78	10.00	8.63	7.90	8.18
18:00	3.20	3.58	3.50	4.56	5.40	5.77	10.00	8.63	9.00	8.19
20:00	4.10	3.58	4.40	4.56	5.40	5.71	9.60	8.66	8.00	8.19
22:00	3.60	3.57	4.40	4.56	5.40	5.70	9.40	8.48	7.80	8.12
0:00	4.20	3.55	4.20	4.51	5.70	5.71	9.60	8.44	8.00	8.08
2:00	4.20	3.53	4.50	4.46	5.40	5.66	9.50	8.55	8.70	8.09
4:00	4.10	3.55	5.30	4.53	6.60	5.69	9.10	8.35	8.50	8.02
6:00	3.20	3.58	6.00	4.62	6.20	5.77	8.00	8.23	8.80	7.95
8:00	3.30	3.58	5.40	4.63	6.00	5.84	7.90	8.16	9.00	7.87
10:00	3.70	3.55	5.40	4.57	5.70	5.83	9.00	8.18	9.10	7.80

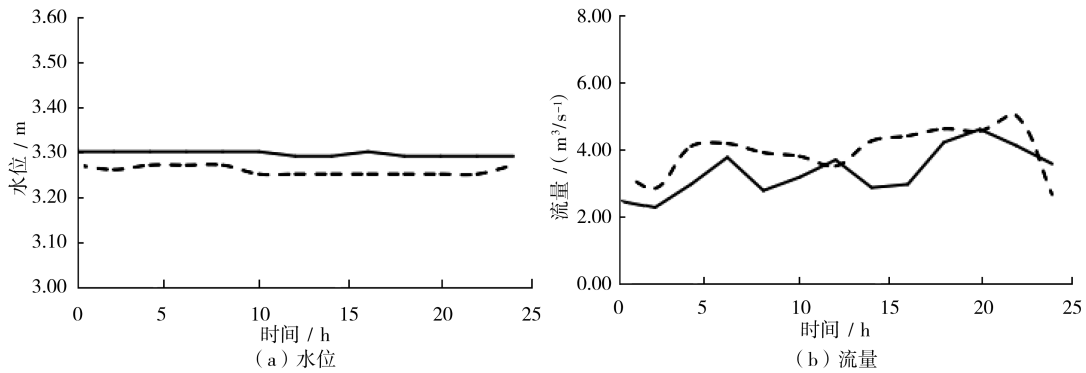


图 2 宜陵处流量、水位计算与实测对比

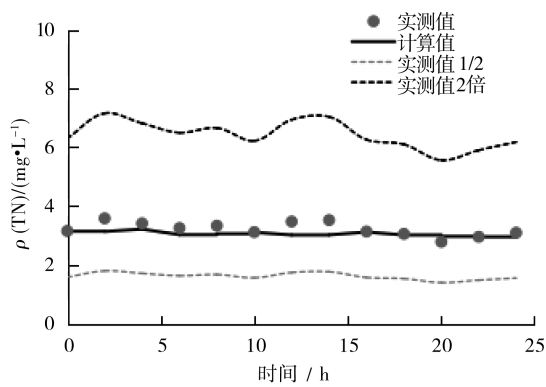


图 3 宜陵处 TN 质量浓度计算与实测对比

通过观察表 2~7 或图 2~3 可以发现,水位与流量的实测值与计算值曲线都较为接近,具体有所偏差原因可能是由于地下水及周边细小支流影响,但计算结果还是保证了在误差允许的范围内。在污染物浓度表现上,由于扬州水系支流十分发达,大部分工厂,房屋都是建在河流旁边,所以每天不同时刻都会有不定量的工业污水、生活污水排入河中,而这一部分的排入点污染浓度是无法精确到每一个时刻的,只能取一个近似的平均值,所以在计算结果上,相较于实测值的某时刻的突然变化,污染物浓度曲线所表现的就比较平缓,但也保证了计

(下转第 34 页)

代替传统巡检模式,采用热门的 RFID 技术助力水利工程巡视检查,使工程管理工作从繁琐复杂变得简单有序,巡检信息的实时传输,能够及时发现并排除安全隐患,提升检查效率,为水利工程的安全运行和发挥效益提供了保障,系统简单便捷,可充分在水利工程管理中推广使用,使水管单位精细化、现代化水平进一步提升。

参考文献:

[1] 张建云,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思

考[J]. 水利水运工程学报, 2019(6):1-7.

[2] 张博. 河流工程运行管理巡检系统设计与实现[D]. 长春:吉林大学, 2016.

[3] 施亮. 浅谈 RFID 应用[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012(22):113-113.

[4] CHRISTIANE HILSMANN. 条形码与 RFID 的较量 RFID 和二维条形码两种技术及应用中各有优势 [J]. 流程工业, 2010(6):58-59.

(上接第 20 页)

[3] 曹亚群. 基于 GPU 的并行优化算法研究[J]. 科技资讯, 2019, 17(21):7-8.

[4] 郭海燕,陈军,徐沅鑫,等. 径流汇流模拟的河道高程修正方法研究[J]. 干旱气象, 2019, 37(4):676-

682.

[5] 宋扬,周维博,马亚鑫,等. 降水、河流径流量与开采对西安地区潜水流场影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6):7-13.

(上接第 29 页)

算值并没有超过实测值的 2 倍和 1/2 间的范围,且变化趋势也较为统一。模型率定结果表明,模型参数选取合理,所建立的模型能够模拟东区河道内的水流运动情况及水质变化,为改善东区水动力条件及水环境改善提供了技术支撑。

4 结 论

本文通过对扬州市通南地区河网水动力及水环境经行数值模拟,建立了通南地区水动力-水环境河网数学模型,通过实测水文资料对模型进行了率定,并经水文站实测值与计算值验证对比情况可知,本模型无论在水位、流量及水质计算上都与实测值贴合程度都较好,计算结果有较好的精确度。因此,该模型能够用于分析在不同水资源调度情况下扬州内部河网水动力条件的情况和水质情况。且根据实测数据分析,邵伯湖供水去扬州通南地区河网水流从邵仙河引入后,绝大部分都从小涵河及

顾圩河流出,其河网中部及南部地区水流流速都较慢,而且由于河流断面都较为狭窄,所以在该闸门控制现状下,如遇到大规模降雨会有洪涝灾害的可能。

参考文献:

[1] 李鑫. 扬州市水资源供需现状分析[J]. 水利发展研究, 2014, 14(9):69-71.

[2] 韩进能. 河流一维水质模型在水环境容量计算方面的应用[J]. 环境科学与技术, 1995(4):43-45.

[3] 杨国录. 四点时空偏心 Preissmann 格式的应用问题[J]. 泥沙研究, 1991(4):88-98.

[4] 褚君达. 河网对流输移问题的求解及应用[J]. 水利学报, 1994(10):14-23.

[5] 徐小明. 大型河网水力水质数值模拟方法[D]. 南京:河海大学, 2001.