

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.009

基于数值模拟的澄通感潮河段水源地预警站设置研究

徐振山¹,王苏东¹,丁宏伟²,杨柳俊³,陈永平¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029;
3. 江苏省水文水资源勘测局南通分局, 江苏 南通 226006)

摘要: 针对突发性水污染事件可能严重影响水源地取水, 而现有研究针对感潮河段水源地预警站的确定方法尚无系统论述的问题, 基于长江澄通感潮河段水动力-水质耦合数学模型, 在厘清径潮共同作用下该河段污染物扩散输运规律的基础上, 初步确定了长青沙和狼山水源地的预警站位置和数量; 结合影响水源地的潜在污染源分布特征和污染物累积特征对预警站进行了空间校核, 利用预警响应时效性对预警站进行了时间校核, 最终确定了两水源地上下游共4个预警站的位置; 基于预警站位置水质与水源地位置水质的相关性确定了长青沙和狼山水源地的应急响应方案, 并给出了苯酚泄漏的风险响应限值。

关键词: 突发性水污染; 感潮河段; 数值模拟; 预警站; 澄通感潮河段

中图分类号: TV132⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)04-0061-09

Study on setup of early warning station in Chengtong tidal reach based on numerical simulation

XU Zhenshan¹, WANG Sudong¹, DING Hongwei², YANG LiuJun³, CHEN Yongping¹

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. River Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Nantong Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nantong 226006, China)

Abstract: Sudden water pollution accidents may seriously affect the intake of water source, and the establishment of early warning stations is very important to protect the safety of water source. The existing research has not systematically discussed the determination method of early warning stations of water source in tidal river reach. Based on the coupled mathematical model of hydrodynamic and water quality in the Chengtong tidal reach of the Yangtze River, and on the basis of clarifying the law of diffusion and transport of pollutants in the reach under the combined action of channel and tide, the location and number of early warning stations in the Changqingsha and Langshan water sources were preliminarily established. Combined with the distribution characteristics of potential pollution sources and the accumulation characteristics of pollutants affecting the water source, the early warning station was checked in space, and the early warning station was checked in time by using the timeliness of early warning response. The locations of four early warning stations upstream and downstream of the two water sources were finally determined. Based on the correlation of water quality index between warning station and water source, the emergency response scheme of water source and the risk response limit value for phenol leakage in these two water sources were determined.

Key words: sudden water pollution; tidal reach; numerical simulation; early warning stations; Chengtong tidal reach

水源地的水质安全是维护人类健康和生态系统完整性的前提, 是国家各级政府和相关部门一直关注的重点问题。相比常规污染, 突发性水污染事件具有突然性和不确定性, 可能会对水源地水质状况产生更为严重的威胁^[1]。水源地的水质预警是建立健全水质安全保障体系的关键所在。径潮共同作用下水动力和物质输运规律复杂, 感潮河段水源地水质预警研究显得尤为重要。

水源地水质预警体系主要由预警站、水质数学模型、风险评估系统和可视化操作界面四部分组成。预警

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979076)

作者简介: 徐振山(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail: zsxu2006@hhu.edu.cn

引用本文: 徐振山, 王苏东, 丁宏伟, 等. 基于数值模拟的澄通感潮河段水源地预警站设置研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 61-69.

XU Zhenshan, WANG Sudong, DING Hongwei, et al. Study on setup of early warning station in Chengtong tidal reach based on numerical simulation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 61-69.

站的污染物指标应与水源地的污染物指标具有强相关性,该相关性分析依赖于当地水动力条件和污染物扩散输运规律的清晰把握,可借助水动力-水质耦合数学模型明晰上述规律,并厘清预警站与水源地之间的水动力与水质关系,进而确定预警站的位置和数量。

目前水质数学模型研究比较成熟,可基于GIS^[2-3]、EFDC^[4-5]、MIKE^[6-7]、WRF^[8]和GPU加速技术^[9]等创建水质模型;而国内水质预警的实时水质监测数据主要来源于已有水质测站,存在现有水质测站污染物指标与水源地污染物指标相关性不大的问题。Propato^[10]指出选择好监测位置才能获得有价值的水质采样数据,因此预警站的设置是必要的。根据以往关于湖区和非潮汐河流水源地的突发性水污染及预警体系研究^[11-18],预警站应位于检测污染事件概率最大的位置,并能提供足够的预警时间。同时预警站还受季节^[19]、污染源排放形式^[20]等因素影响,如季风季节需要站点多于非季风季节,固定源与移动源站点设置不同。

感潮河段受径流、潮流以及地形等因素影响,预警站位置确定更具挑战性。Lee等^[21]指出供水系统中监测站的位置应使其能够最大限度地提供有关饮用水状况的信息;Ostfeld等^[22]研究了一种基于随机污染矩阵和遗传算法的城市供水监测站最佳布局方法,指出实时污染物监测与网格建模相结合在跟踪和控制污染物扩散方面有重要作用;Strobl等^[23]研究了水质监测网络中采样关键点的选择方法,发现在确定采样点的最佳位置时,需要考虑污染物的产生和输送机制;Liu等^[24]提出了一种优化常规河流水质监测采样频率的方法,研究表明优化采样频率可以保证监测数据的可靠性,同时降低监测成本。可以看出,目前的研究重视预警站与水源地的相关性和污染物扩散输运规律对预警站设置的作用,但对感潮河段预警站设置的研究较少。本文基于长江澄通感潮河段(以下简称“澄通河段”)水动力-水质耦合数学模型,在厘清径潮共同作用下污染物扩散输运规律的基础上,确定了该河段水源地预警站位置,可为澄通河段水源地预警提供支撑,并与其他感潮河段的水源地预警站设置提供参考。

1 研究区概况

澄通河段河道地形如图1所示。福姜沙河段、如皋沙河段、通州沙河段以及狼山沙河段是以河内沙洲为节点划分的,4个河段共同组成了澄通河段,且表现为较为发育的弯曲分汊型河道。该河段是平原型感潮河段,且位于长江潮流界变化区域,其中对物质输运起主要作用的是落潮流。澄通河段主要有长青沙和狼山两个主要饮用水源地,供水量分别为约200万m³和60万m³,分别位于如皋沙河段和狼山沙河段,具体位置如图1所示。

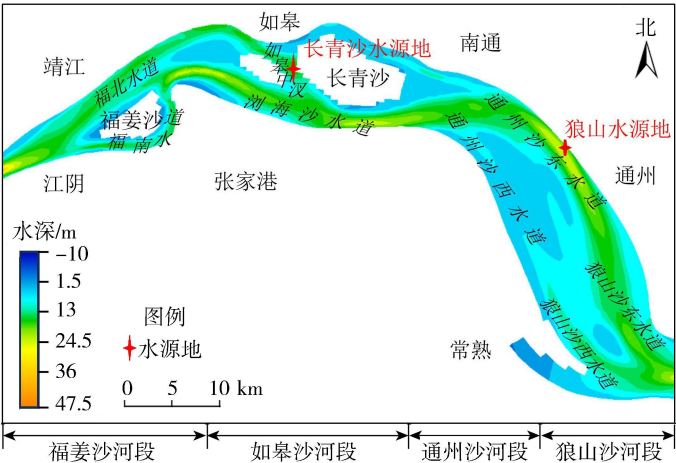


图1 澄通河段地形及水源地位置

Fig.1 Schematic diagram of topography and water source location of Chengtong reach

2 研究方法

2.1 水源地预警站设置方法

a. 资料调查与收集整理。确定水源地位置,调查影响水源地水质的潜在污染源,收集水源地附近发生的历史突发性水污染事件,对相关数据进行整理。

b. 污染物输运规律模拟分析与预警站初步确立。结合实测数据,建立并验证水源地所在河段水动力-水质耦合数学模型;利用模型系统分析河段水动力特征和污染物输运规律(如流线、质量浓度场等),特别是水源地前后一定范围内水流走向及污染物输运方向,从而初步确定预警站位置。

c. 预警站位置空间校核与时间校核。分析不同潜在污染源影响下污染物质量浓度空间分布规律,确定断面污染物最大质量浓度线,根据预警站是否位于断面污染物最大质量浓度线附近,对其进行空间校核;根据不同径潮组合条件下污染物从预警站输运到水源地的时间,利用预警响应时效性对其进行时间校核。

d. 风险等级确定及应急响应方案启动。分析预警站位置水质与水源地位置水质的相关性,根据预警站实测水质确定水源地的风险等级并启动对应应急响应方案。

感潮河段水源地预警站设置的总体流程如图 2 所示。

2.2 澄通河段水动力-水质耦合数学模型

采用 Delft3D 建立澄通河段水动力-水质耦合数学模型。考虑到澄通河段复杂的水动力特性,上游边界设置为长江大通站的实测日流量,下游边界设置为东海 8 个主要分潮的计算水位。由于突发性水污染事件通常只持续几天,温度和盐度被认为是恒定的。本文模拟 2012 年 2 月镇江苯酚泄漏事件,水质模型的特定污染物为苯酚。模型具体设置可以参见文献[25]等。

模型验证使用水文测站实测值与模型模拟值相对比的方法。水文测站位置如图 3 所示,水动力模型代表验证结果如图 4 所示,水质模型验证结果如图 5 所示。水动力与水质验证结果良好,能够较好地模拟最大水质超标倍数与污染团到达时间^[20],可以用作水质预警模型。

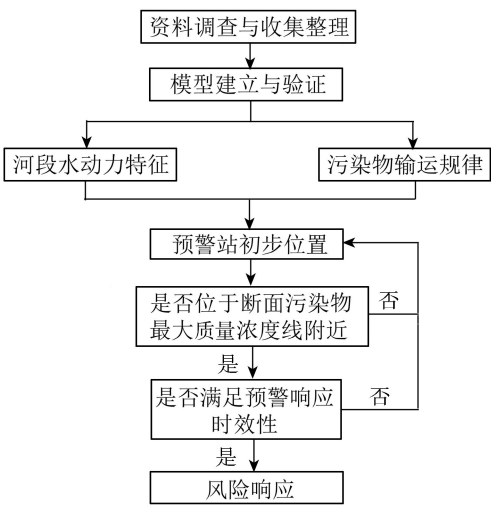


图 2 感潮河段预警站设置流程
Fig.2 Flow chart of early warning station setup in tidal reach

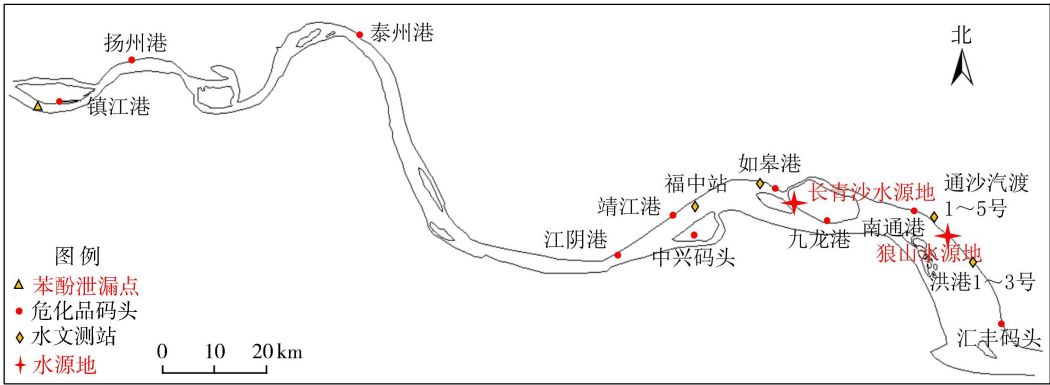


图 3 水文测站及危化品码头位置
Fig.3 Location of hydrologic station and hazardous chemical terminals

3 结果与分析

3.1 污染物扩散输运规律

在污染物源强不变的情况下,河段污染物扩散输运规律受河段水动力和污染物源点的位置影响。澄通河段水动力条件受潮汐、径流以及地形等因素影响,其中地形因素在小时间尺度下变化不明显,对水动力条件影响较小,可以忽略。在潮汐和径流影响下,分别需要考虑大小潮、涨落潮和洪枯两季的组合影响。

洪季大潮落潮流流量大、流速快,污染物下泄较快,但污染物质量浓度低;枯季大潮涨潮流,潮流上溯影响较大,除了下游污染物上溯外,污染物持续影响时间也较长;枯季小潮期间,污染物质量浓度较高;其他组合介于三者之间。同时由于澄通河段处于长江潮流界变化区域,当小潮向大潮转变时,落潮流水位低于涨潮流水位,意味着上游污染物可能未被完全带入大海便随着涨潮流与水源地下游污染物一起上溯,下游污染物

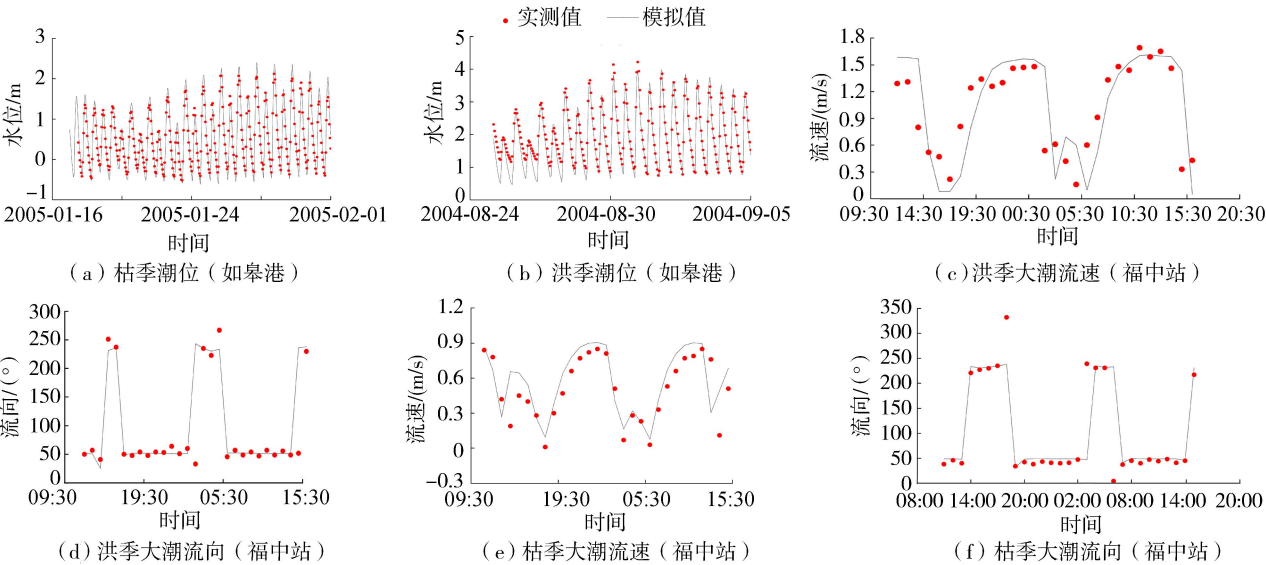


图4 水动力验证结果

Fig.4 Hydrodynamic verification results

将会产生更大的威胁,尤其是枯季涨落潮转换时,潮流作用明显,对上游水源地的威胁大。可以看出,枯季污染物对水源地的威胁较大,但也不应忽视对洪季污染物的预警。

同时,突发性水污染事件通常表现为污染物以点源的形式排放,且在一定时间内连续释放进入水体,随水体的动力条件扩散输运,对水体水动力条件影响较小。故可通过发生突发性水污染事件时的流线确定污染物的扩散输运规律。对镇江苯酚泄漏模型进行后处理,得到流线图如图6所示,可以看出长青沙水源附近的浏海沙水道的流线比如皋中汊流线密集,即浏海沙水道分流比大于如皋中汊水道;而狼山水源地附近的流线则集中在狼山水源地所处的北岸。

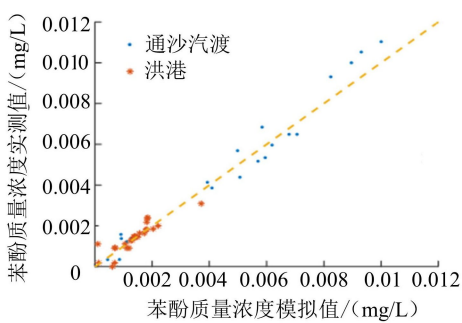


图5 水质验证结果

Fig.5 Water quality verification results

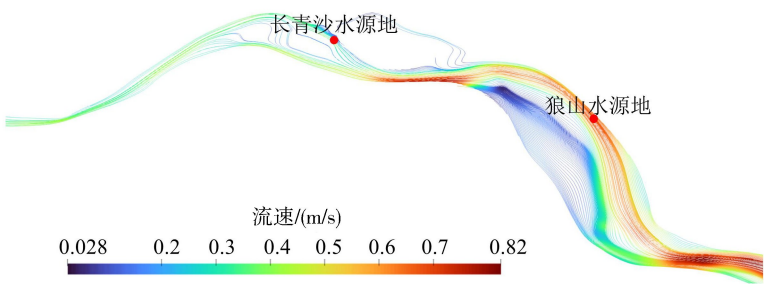


图6 镇江苯酚泄漏模拟流线

Fig.6 Simulated stream tracer of Zhenjiang phenol leak

结合直观的质量浓度场图,可以分析污染源位置对污染物输运规律的影响。综合图3中10个潜在污染源(危化品码头),可以得到不同污染源发生泄漏时,污染物扩散对水源地的影响,模拟结果如图7所示。由图7分析可知,在泰州发生泄漏时,污染团到达长青沙水源地和狼山水源地时已经扩散到整个河道;在江阴发生泄漏时,污染团对长青沙水源影响不大,但对狼山水源地有很大威胁;在靖江发生泄漏时,污染团主要从如皋中汊汇入下游,对长青沙水源地和狼山水源地都造成很大影响;在九龙港发生泄漏时,基本不会影响上游长青沙水源,而会随着河道流线运动至河道左侧从而会影响狼山水源地。

通过上面分析可得,污染团下泄规律符合流线特征。水源地上游远处发生泄漏,到达水源地时污染团已经扩散到全断面,但整体质量浓度较低;水源地上游近处发生泄漏,会受泄漏点位置影响,左岸污染团走如

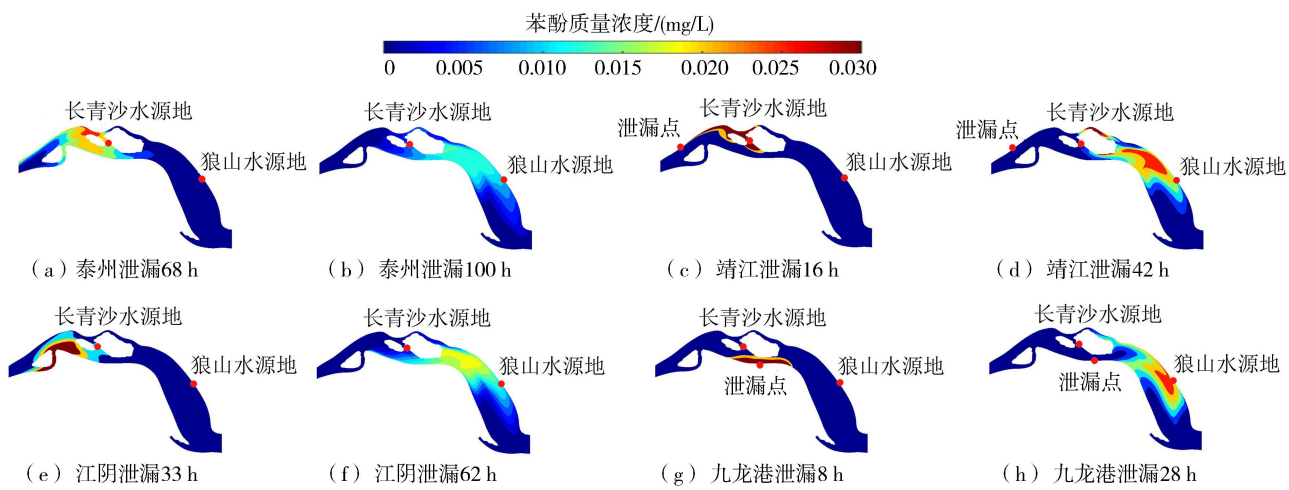


图 7 不同污染源发生泄漏时模拟质量浓度场

Fig. 7 Mass concentration field diagram for leakage from different sources

皋中汉汇入下游,右岸污染团走浏海沙水道汇入下游,而在下游都会扩散至狼山水源地;两个水源地之间发生泄漏,污染团对狼山水源地威胁大,但不排除大潮涨潮时会影响到长青沙水源地;水源地下游发生泄漏则很难对两个水源地产生影响,同样不排除大潮涨潮时对狼山水源地产生影响的可能。所以考虑到潮汐影响,可以在两处水源地上下游各设置预警站。例如,在浏海沙水道附近设置一个长青沙预警站,以监测涨潮时污染物是否扩散到长青沙水源地;在如皋中汉设置一个预警站,以监测上游流经长青沙的污染物;在狼山水源地所在北岸的上下游设置狼山预警站,以监测涨落潮时流经狼山水源地的污染物。

3.2 预警站选择与校核

预警站应该位于检测污染事件概率最大的位置,同时还必须提供足够的预警时间,以便给下游水处理厂实施响应方案的时间。这两个目标不能同时优化:当站点尽可能靠近上游时,预警时间最大化;而当站点尽可能靠近水源地时,检测概率最大化,因为水源地附近可以最大限度地覆盖所有潜在的上游威胁。确定预警站的位置需要平衡二者的关系。同时在满足上述两点的基础上,预警站还应当具备完善的设施,以便于监测、维护和通信,毗邻现有港口的位置将是更好的选择。预警站位置的选择和校核应当利用以上三点原则来确定。

3.2.1 预警站初步选择

根据污染物输运规律,考虑极端情况对水源地的影响,结合预警站选择与校核原则,作出预警站的初步选择。污染物会随着径流下泄,所以需要在水源地上游布置预警站。当径流一定时,落潮会加速污染物的扩散下泄,但也会减少预警时间;涨潮时,下游污染物会随潮上溯,进而影响到水源地。因此,狼山水源地需要在其上下游布置预警站。然而由于长青沙水源地位于分汊河段,涨潮流会根据分流比上溯,即下游污染物首先会随着涨潮流沿浏海沙水道上溯,当涨潮流与径流之比足够大时,才会分流进入到如皋中汉,进一步影响到长青沙水源地。所以长青沙水源地下游预警站可以布置在浏海沙水道中,上游预警站选择在如皋中汉。

综合上述分析,并考虑到预警站的设置原则,本文初步设置预警站位置如图 8 所示。长青沙上游预警站位于如皋港附近,主要监测长青沙上游的污染物,距长青沙水源地进水口约 5.5 km,地理坐标为(32°4′10″N,120°31′30″E)。长青沙下游预警站(即浏海沙水道预警站)位于民主沙南侧,距长青沙水源地进水口约 5.2 km,用于监测涨潮时长青沙下游上溯的污染物,地理坐标为(32°1′43″N,120°32′38″E)。狼山上游预警站位于南通港下游,距狼山水源地进水口约 7.9 km,地理坐标为(32°0′27″N,120°48′38″E)。狼山下游预警站位于营船港区下游,距狼山水源地进水口约 7.5 km,地坐标为(31°54′1″N,120°54′54″E)。

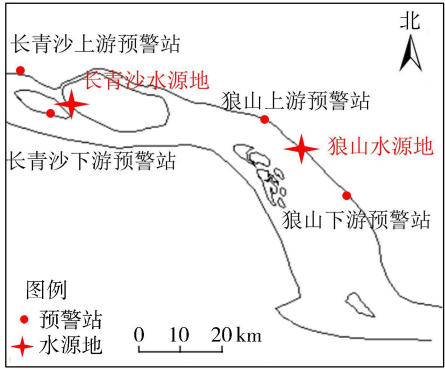


图 8 预警站初步位置示意图

Fig. 8 Preliminary location diagram of early warning stations

3.2.2 空间校核

考虑到河段可能存在多个突发性水污染事件泄漏点,预警站位置应综合考虑这些泄漏点对水源地的影响,所以需要分析潜在泄漏点位置,并模拟每个泄漏点发生突发性水污染事件时预警站的预警效果,以验证预警站位置设置的合理性,即空间校核。数值试验设置中参照了2012年镇江苯酚泄漏事件,每个污染源泄漏强度取2 kg/s,泄漏时间为2月2日15—21时,共6 h。

全河段使用截面累积质量浓度最大点连成截面累积质量浓度最大线来表示预警站预警效果,即预警站越靠近截面累积质量浓度最大线预警效果越好。采用上述水质模型分别对每个码头区域发生意外泄漏事件进行模拟,将得到的各泄漏点发生泄漏后的河段苯酚质量浓度分布进行累积叠加,得到苯酚质量浓度累积分布图(图9),每个截面上的最大质量浓度点用*标记。截面最大质量浓度点在一定程度上可以代表澄通河段发生突发性水污染事件后,每个截面能够监测污染物动向的最大概率点。从图9可以看出,长青沙水源取水口附近的如皋中汊与浏海沙水道都有较大的概率具有较高质量浓度的污染物,狼山水源地取水口附近也有很大的概率受高质量浓度污染物影响。因此,初步选择的4个预警站位置具有较大的概率监测到威胁两个水源地取水口的突发性水污染事件,是满足要求的。

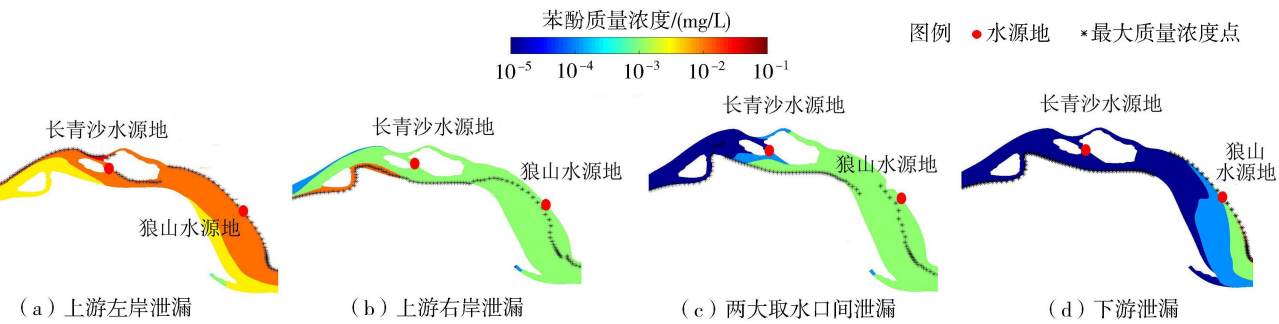


图9 澄通河段苯酚质量浓度累计时均分布

Fig.9 Cumulative time average distribution of phenol mass concentration in Chengtong tidal reach

3.2.3 时间校核

预警站位置离水源地越近则预警时间越短,留给水源地采取应急措施的时间越短。为了提供充足的应急时间,预警站要满足最小预警时间的要求。不同水域选取的最小预警时间不同,可以根据当地情况进行分析选取。本文选取的最小预警时间为Sim等^[26]研究中的2 h,即预警站监测到其所在位置污染物质量浓度异常后,污染物从预警站位置随水流输运扩散到水源地位置的时间至少要2 h。

探讨污染物扩散输运规律时需要考虑洪枯两季,并根据澄通河段常年水文资料,选择设置了7 000~64 700 m³/s的不同径流值,以尽可能地模拟真实的不同径潮比下的预警情况。同时,假定所有的泄漏都发生在大潮时刻。考虑到外海边界条件相对稳定,下游输入条件采用2019年的潮位。经过模型计算,在各潜在污染源位置发生突发性水污染事件时,设置的预警站均能够发挥预警作用,并为水源地提供至少2 h的预警时间,满足预警时间要求。预警时间计算结果如表1所示。

3.3 风险响应

预警信息发出后,水源地将开展风险响应工作。不同的预警等级应当对应不同的应急响应方案,以减少资源的损耗。风险等级的划分可以依据下式确定:

$$\delta = \sum_{i=1}^K w_i \delta_i \quad (i = 1, 2, \dots, K)$$

(1)

式中: δ_i 为危险源的第*i*个风险指标值; w_i 为第*i*个风险指标的权重; K 为风险指标总数。

风险响应主要考虑污染团对水源地取水口的影响,包含以下三个方面:①预警站检测到超标污染团后,污染团从预警站到达水源地的时间;②超标污染团在水源地的滞留时间,即污染团对水源地的持续影响时间;③污染团的最高危害程度,即污染团质量浓度最大峰值。因此选取了污染团到达时间、水质超标持续时间、最大水质超标倍数作为风险指标,对突发性水污染事件的危害性进行描述^[2]。

风险指标可以根据当地处理应急事件能力进行等级划分;风险指标的权重可以根据专家评审、对风险指标的重视程度及查找相关文献等手段确定;最后可以将 δ 值等分,分别用不同颜色标记,以更直观地表示风

表 1 澄通河段水源地上下游预警站预警时间

Table 1 Early warning time of upstream and downstream warning stations for water sources in Chengtong reach													
危险源	预警站	不同径流时的预警时间/h											
		7 000	7 570	8 500	10 200	12 770	15 890	33 000	37 180	41 770	48 300	56 100	64 700
镇江港	长青沙上游	14. 87	12. 90	11. 98	11. 42	10. 73	3. 63	7. 75	2. 70	3. 12	7. 83	2. 40	2. 12
	狼山上游				12. 38	14. 18	3. 15	11. 03	2. 82	3. 63	2. 72	2. 65	6. 90
扬州港	长青沙上游	23. 32	4. 35	14. 03	13. 38	3. 85	10. 17	2. 80	2. 92	8. 30	2. 45	2. 32	2. 30
	狼山上游			25. 12	14. 83	11. 43	10. 65	2. 90	2. 75	6. 85	2. 73	3. 63	2. 58
泰州港	长青沙上游	12. 48	14. 08	4. 07	3. 95	3. 85	3. 57	2. 85	3. 45	6. 20	2. 52	2. 33	2. 28
	狼山上游	25. 40	13. 03	3. 45	3. 37	14. 02	3. 23	2. 90	3. 03	2. 82	2. 77	2. 55	4. 17
江阴港	长青沙下游	4. 73	12. 72	12. 57	12. 28	3. 17	4. 00		3. 02	3. 38	4. 17		
	狼山上游	3. 42	12. 53	12. 20	14. 12	3. 18	10. 45	2. 83	2. 75	2. 72	2. 68	2. 73	3. 55
靖江码头	长青沙上游	3. 97	3. 87	3. 80	3. 73	3. 63	3. 55	3. 27	3. 23	3. 22	3. 17	3. 15	3. 13
	狼山上游	14. 78	14. 70	3. 52	3. 23	11. 08	3. 15	2. 78	2. 75	2. 75	2. 70	3. 00	5. 47
中兴码头	长青沙下游	7. 30	7. 50	7. 78	11. 57	2. 20	2. 48	4. 03	4. 52	5. 10			
	狼山上游	3. 55	3. 35	12. 07	11. 70	3. 18	12. 80	2. 82	2. 80	2. 98	8. 15	7. 28	2. 60
九龙港	长青沙下游	10. 33	10. 45	10. 68									
	狼山上游	3. 03	3. 02	2. 98	2. 93	2. 88	2. 85	2. 67	2. 65	2. 63	2. 60	2. 57	2. 52
如皋港	长青沙上游	6. 23	6. 22	6. 17	6. 08	5. 97	5. 83	5. 95	5. 62	5. 32	4. 88	4. 47	4. 10
	狼山上游	14. 32	14. 40	14. 12	13. 83	3. 18	3. 05	10. 18	9. 52	2. 78	2. 68	2. 65	2. 60
南通港	狼山上游	4. 10	4. 08	4. 08	4. 07	4. 05	4. 05	3. 68	3. 60	2. 27	3. 52	3. 55	4. 23
汇丰码头	狼山下游	3. 45	3. 47	3. 50	3. 57	3. 68	3. 88	3. 32	3. 42	3. 58			

注:径流单位为 m³/s,如 7 000 m³/s。

险等级。预警方案根据风险等级的不同划分为蓝、黄、橙、红 4 种颜色预警方案,当蓝色预警时,水源地基本不受突发性水污染事件威胁,居民正常取水用水;黄色预警时,进入水源地的污染团质量浓度较低或者超标时间较短,可以强化常规净水措施或者可以在取水口增设过滤措施;橙色预警时,对水源地造成的威胁已经较大,在强化净水措施的同时,可以开启应急水源,对生活分时段供水,并及时按照相关规定向社会发布相关信息,通知市民污染期间节制用水,减轻对社会生产生活的突发性影响;红色预警时,突发性水污染事件对水源地的影响已经非常严重,需要各部门联合起来,在采取橙色预警应急措施的同时,还要及时向周围地区申请调水,并抓紧时间找到污染源头,从源头上切断污染物的持续泄漏,减小损失。

最后经过模型试算预测了枯季 1 万 m³/s 流量条件下的风险响应,各级别预警启动条件如表 2 所示。

4 结 论

- a. 长江澄通河段污染物扩散受径流影响大,潮流上溯携带污染物影响长青沙和狼山水源地的概率较小。洪季大潮落潮时,污染物下泄快,对两大水源地的预警时间要求高,但洪季温度高、流量大,污染物挥发扩散快,污染团整体质量浓度低,且潮流上溯影响到水源地的概率低;枯季大潮涨潮时,下游污染物对水源地产生威胁的可能性较大,且径流量小,潮流作用下污染团上下波动,污染团下泄速度较慢,持续时间较长,且质量浓度较高;枯季小潮时,污染团质量浓度较高,且下泄速度较慢。因此枯季突发性水污染事件对长青沙和狼山水源地的威胁更大。
- b. 总结了设置预警站的 3 个原则:提供足够的预警时间;预警站位置应当处于能够监测到对水源地产生影响的突发性水污染事件概率最大的位置;预警站应当尽量布置在港口码头等交通与设施完善的区域,以便于建设、维护以及通信。分别设置了长青沙和狼山水源地的上游和下游预警站的地理位置,预警站在各级径流条件下均能提供 2 h 以上的预警时间,符合南通市的取水口水污染风险应对能力。
- c. 以苯酚为例,得出了枯季狼山和长青沙水源地上下游预警站 4 种颜色预警等级的质量浓度风险响应

限值,可为澄通河段的长青沙和狼山水源地在事件期间的取水口保护工作提供借鉴。

参考文献:

- [1] 汤宇. 数值模拟技术在长江水源地水质保障中的应用[J]. 中国水运: 下半月, 2016, 16(5): 101-103. (TANG Yu. Application of numerical simulation technology in water quality assurance of Yangtze River water source[J]. China Water Transport, 2016, 16(5): 101-103. (in Chinese))
- [2] 肖泽云, 莫创荣, 雷晓霞. 基于 GIS 平台的水污染预警系统研究与应用[J]. 水电能源科学, 2011(5): 139-141. (XIAO Zeyun, MO Chuangrong, LEI Xiaoxia. Research and application of water pollution early warning system based on GIS[J]. Water Resources and Power, 2011(5): 139-141. (in Chinese))
- [3] 何梅芳. 长江南京江心洲河段水污染扩散仿真模拟与可视化[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [4] 蒋永丰. 基于 EFDC 模型的水源地水质模拟及安全预警技术[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [5] 潘炜. 基于 EFDC 的长江常州段污水排江浓度场数值模拟[J]. 环境监控与预警, 2015, 7(1): 5-9. (PAN Wei. Numerical simulation on pollutants concentration field in Changzhou Reach of Yangtze River by EFDC model[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2015, 7(1): 5-9. (in Chinese))
- [6] 袁珩, 师懿, 程胜高. 基于二维动态水质模型的长江蕪春段水污染扩散分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 212-217. (YUAN Yue, SHI Yi, CHENG Shenggao. Analysis of water pollution dispersion at Qichun section of the Yangtze River based on the 2-D dynamic water quality model[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 212-217. (in Chinese))
- [7] 匡翠萍, 王丹, 赵钊, 等. 金梦海湾及其邻近海域水环境因子时空分布特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 880-890. (KUANG Cuiping, WANG Dan, ZHAO Fan, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of water environmental factors in Jinmeng Bay and its adjacent waters[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2021, 49(6): 880-890. (in Chinese))
- [8] 张万顺, 卜思凡, 彭虹, 等. 基于 WRF 模型的澎溪河流域非点源污染预测[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 160-167. (ZHANG Wanshun, BU Sifan, PENG Hong, et al. Prediction of non-point source pollution in Pengxi River Basin based on WRF model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 160-167. (in Chinese))
- [9] 栾广学, 侯精明, 杨露, 等. 耦合高效高精度水动力模型的多组分污染物输移及衰减反应模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 131-137. (LUAN Guangxue, HOU Jingming, YANG Lu, et al. Multi-component pollutant transport and attenuation reaction model coupled with high-efficiency and high-precision hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 131-137. (in Chinese))
- [10] PROPATO M. Contamination warning in water networks: general mixed-integer linear models for sensor location design[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(4): 225-233.
- [11] 李玉臣, 吴雪梅. 北京城市重要水源污染预警系统应用研究[J]. 水利建设与管理, 2008(7): 95-98. (LI Yuchen, WU Xuemei. Research on the application of the pollution warning system of major water sources in Beijing[J]. Water Resources Development & Management, 2008(7): 95-98. (in Chinese))
- [12] 杨司嘉, 彭虹, 王永桂. 丹江口水库突发性水污染事件预警系统的开发及应用[C]//陈兴伟, 陈莹, 高路, 等. 变化环境下的水科学与防灾减灾: 第十二届中国水论坛论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 359-363.
- [13] 赵凯. 基于 GIS 的马鞍山长江段突发性水污染预警系统研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2010.
- [14] 张楚天, 杨勇, 杨中华, 等. 江河突发性水污染事故动态模拟与预警: 以长江武汉段为例[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 1363-1368. (ZHANG Chutian, YANG Yong, YANG Zhonghua, et al. Early-warning and dynamic simulation of river sudden water pollution accident: a case study in Wuhan section of the Changjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(10): 1363-1368. (in Chinese))
- [15] 顾立忠, 宫鹏杰, 李虎成, 等. 北江流域水污染预警体系研究初探[J]. 中国水运: 下半月, 2016, 16(12): 155-157. (GU Lizhong, GONG Pengjie, LI Hucheng, et al. Preliminary study on water pollution early warning system in Beijiang River Basin[J]. China Water Transport, 2016, 16(12): 155-157. (in Chinese))
- [16] 董瑞瑞, 陈和春, 王继保, 等. 汉江中下游突发性水污染事故预测模型研究[J]. 水力发电, 2017, 43(12): 1-5. (DONG Ruirui, CHEN Hechun, WANG Jibao, et al. Study on prediction model of accidental water pollution in the middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. Water Power, 2017, 43(12): 1-5. (in Chinese))
- [17] 宋为威, 逢勇. 滨江典型区突发水污染事件溯源及响应方法[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 182-188. (SONG Weiwei, PANG Yong. Traceability and response method of sudden water pollution events in typical riverside areas[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 182-188. (in Chinese))
- [18] 彭虹, 周文婷, 张万顺, 等. 流域突发水污染云溯源体系构建与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 176-181. (PENG Hong,

ZHOU Wenting,ZHANG Wanshun,et al. Construction and application of cloud traceability system for sudden water pollution in river basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):176-181. (in Chinese))

[19] VAREKAR V,KARMAKAR S,JHA R,et al. Design of sampling locations for river water quality monitoring considering seasonal variation of point and diffuse pollution loads[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2015,187(16):376. 1-376. 26.

[20] 庄巍,李维新,周静,等. 长江下游水源地突发性水污染事故预警应急系统研究[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(1):34-40. (ZHUANG Wei,LI Weixin,ZHOU Jing,et al. Early warning system for sudden water pollution incidents in water source areas in lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2010,26(1):34-40. (in Chinese))

[21] LEE B H,DEININGER R A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system[J]. Journal of Environmental Engineering,1992,118(1):4-16.

[22] OSTFELD A,SALOMONS E. Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2004,130(5):377-385.

[23] STROBL R O,ROBILLARD P D,SHANNON R D,et al. A water quality monitoring network design methodology for the selection of critical sampling points:Part I[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2006,112:137-158.

[24] LIU Y,ZHENG B H,WANG M,et al. Optimization of sampling frequency for routine river water quality monitoring[J]. Science China Chemistry,2014,57:772-778.

[25] DING H,XU Z,CHEN Y. Modelling of accidental water pollution incidents at Chengtong Reach of Yangtze River[C]//The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, USA:International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019:637-642.

[26] SIM H P,BURN D H,TOLSON B A. Probabilistic design of a riverine early warning source water monitoring system[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2009,36(6):1095-1106.

(收稿日期:2023-02-28 编辑:熊水斌)

(上接第 60 页)

[10] 白桦. 影响桥梁及建筑结构风洞试验结果若干因素研究[D]. 西安:长安大学,2012.

[11] 符健. 大跨度悬索桥颤振特性风洞试验研究与数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2016.

[12] 党嘉敏. 栏杆展向布置形式对直腹板钢箱梁涡激振动的影响[D]. 西安:长安大学,2021.

[13] 刘志文,江智俊,黎晓刚,等. 流线型钢箱梁涡激振动机理与气动控制措施[J]. 中国公路学报,2022,35(11):133-146. (LIU Zhiwen,JIANG Zhijun,LI Xiaogang,et al. Study on mechanism and aerodynamic control measures for vortex-induced vibration of a streamlined-box steel girder[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(11):133-140. (in Chinese))

[14] 曹丰产,葛耀君,吴腾. 钢箱梁斜拉桥涡激共振及气动控制措施研究[C]//中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会. 第十三届全国结构风工程学术会议论文集:中册. 大连:大连理工大学出版社,2007:668-673.

[15] 高亮. 桥梁断面三分力系数试验研究[D]. 西安:长安大学,2010.

[16] 杨婷,周志勇. 中央开槽箱梁涡激共振特性及抑振措施机理研究[J]. 振动与冲击,2015,34(10):76-83. (YANG Ting,ZHOU Zhiyong. Vortex-induced resonance characteristics and anti-vibration measures' mechanism of central-slotted box girders [J]. Journal of Vibration and Shock,2015,34(10):76-83. (in Chinese))

[17] 马存明,王俊鑫,罗楠,等. 宽幅分体箱梁涡振性能及其抑振措施[J]. 西南交通大学学报,2019,54(4):724-730. (MA Cunming,WANG Junxin,LUO Nan,et al. Vortex-induced vibration performance and control measures of wide twin-box girder [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2019,54(4):724-730. (in Chinese))

[18] 陈星宇. 大攻角来流作用下流线型箱梁断面涡激振动研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[19] 赵峰,刘卫东,阚阆,等. 基于 CFD 的尾水冷却器布置方案优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):138-143. (ZHAO Feng,LIU Weidong,KAN Kan,et al. CFD-based optimization of layout scheme of tail water cooler[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(6):138-143. (in Chinese))

[20] 张芝永,谢咏哲,陈红,等. 涌潮 CFD 数值模拟若干问题探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):58-65. (ZHANG Zhiyong,XIE Yongzhe,CHEN Hong,et al. Discussion on some problems of numerical simulation of tide using CFD technology[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(5):58-65. (in Chinese))

[21] 李加武,徐敏建,王子健,等. 风嘴几何参数对双边箱式 II 型梁涡振性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):74-83. (LI Jiawu,XU Minjian,WANG Zijian,et al. Effect of geometric parameters of wind fairing on vortex-induced vibration performance of two-side box type II-shaped girder[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(5):74-83. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-11 编辑:刘晓艳)