

复杂河网水质模型的研究与应用

乔伟¹, 赵奕², 鄂茂国³

(1. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 扬子江工程咨询有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 长江水利委员会, 湖北 武汉 430010)

摘要:复杂河网水系由于交错纵横、水流相对滞流的特征以及沿岸污染负荷(废水排放、生活垃圾、河涌淤积)的加大,使得水体受到不同程度的污染,对其进行治理刻不容缓。通过建立一维河网水质模型并将该模型应用于广东省佛山市北村水系河网中,通过计算分析,得出了该地区河道所有河段水力要素变化规律和污染物浓度的时空分布,为北村水系水环境的修复提供了技术支撑。

关键词:复杂河网;水质模型;数值计算;水环境修复;研究

中图分类号:TV212.2;TV856

文献标识码:B

文章编号:1001-2184(2014)02-0071-04

1 研究背景

佛山市南海区北村水系地处珠三角平原河网地区,涵盖北村水闸控制的全部集雨范围,主干、支干河涌纵横交错,总长44.8 km,水流相互顶托,形成复杂的河网水系并通过北村水闸流经水口水道后汇入珠江。该区域地势相对低洼,河道流速缓慢,河道水流呈复杂的往复流状态,河道比降小,易于受到潮汐影响。近年来,由于经济发展以及受沿岸人类活动的影响,污染负荷(废水排放、生活垃圾、河涌淤积)加大,使得水体受到不同程度的污染,在某些河段有时甚至出现黑臭现象。水环境污染不仅影响了当地居民的身体健康,水质型缺水也严重制约了该地区社会和经济的持续高速发展,该地区的环境整治势在必行^[1,2]。

随着社会经济的发展和技术的进步,对单一河道的模拟已不能满足工程实践和生产的需要。因此,能综合考虑江湖分合、河网交错、分蓄滞泄、吐纳交替等复杂情况下的水流数值模拟技术就成为现今社会发展的需要,也是水利工作者们竞相开展的研究课题^[3-5]。例如郝芳华,等^[6]以流域为研究对象,对流域中的河流、湖泊(水库)、河口、近海以及陆面污染的水质模型和流域水质管理模型进行了详细论述。叶守泽,等^[7]将确定性BOD-DO模型中的参数趋于概率分布参数、灰色参数和模糊化后,建立了河流水质不确定性数学模型。张明亮,等^[8]在WASP的水质模型基础上

建立了河网水质模型。

笔者主要以北村水系为例,通过建立一维河网水动力模型、非稳态的水质耦合模型,针对复杂河网水动力水质的计算方法,通过模拟计算佛山市南海区北村水系的河网水力要素变化规律和污染物浓度的时空分布,为北村水系水量水质调度和水环境修复提供技术支撑。

2 模型的建立

河网水流的运动规律可用圣维南方程组描述为:

$$\text{水流连续方程: } \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial t} = q_1 \quad (1)$$

$$\text{水流运动方程: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha' \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gAJ_f = 0 \quad (2)$$

式中 B 为水面宽度(m); A 为过水面积(m²); Q 为流量(m³/s); Z 为水位(m); n 为 Manning 糙率系数; g 为重力加速度; q_1 为单位流程上的侧向入流量(m³/s); J_f 为水力坡度, $J_f = \frac{Q|Q|}{K^2}$, 其中 K 为流量模数, $K^2 = \frac{A^2 R^{4/3}}{n^2}$ 。方程中,水位、流速为断面平均值,当水流漫滩时,平均流速与实际有差异。为了使水流漫滩后计算断面过流能力逼近实际的过水能力,需引进动量修正系数 α' , 其数值由下式给定, $\alpha' = \frac{A}{K^2} \sum_i \frac{K_i^2}{A_i}$, 其中 A_i 和 K_i 分别为断面第 i 部分的面积和流量模数。

Preissmann 四点隐式差分格式^[9,10]具有数值

收稿日期:2013-12-11

稳定性好和求解效率高等优点,能准确实现汉点流量按各分汉河道的过流能力自动分流;更为重要的是它能适应双向流特征的复杂河网计算,已成为目前较为实用的主流算法。笔者选用该格式对河网水流运动方程进行了数值离散,同时采用河网三级联解算法联合求解河网水系中的水流运动要素^[11]。

河网水质模型的通用方程可描述如下^[12]:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(AE_x \frac{\partial C}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x}(UAC) + AS \quad (3)$$

式中 C 为某种水质参数的浓度(mg/L); t 为时间(s); x 为沿水流方向的距离(m); E_x 为纵向分散系数(m²/s); U 为断面平均流速(m/s); S 为某

种水质参数的源汇项(g/(m³d))。

河网水质模型方程的求解与河网水流模型均采用三级解法相同的思路,即分为:河段、微段、汉点求解。通过推求各个河道首尾断面的水质指标浓度关系,进而列出汉点水质指标浓度方程组,通过求该方程组,进而得到各汉点的浓度,然后将各河道首尾断面浓度再带入单一河道离散方程组中,用追赶法求得各断面水质指标浓度。

3 实例分析

3.1 计算条件

笔者将佛山市南海区北村水系的河道概化为25条,河网汉点14个,控制建筑物2处,分别为北村闸站、瓜步汛闸站,河网概化计算情况见图1。

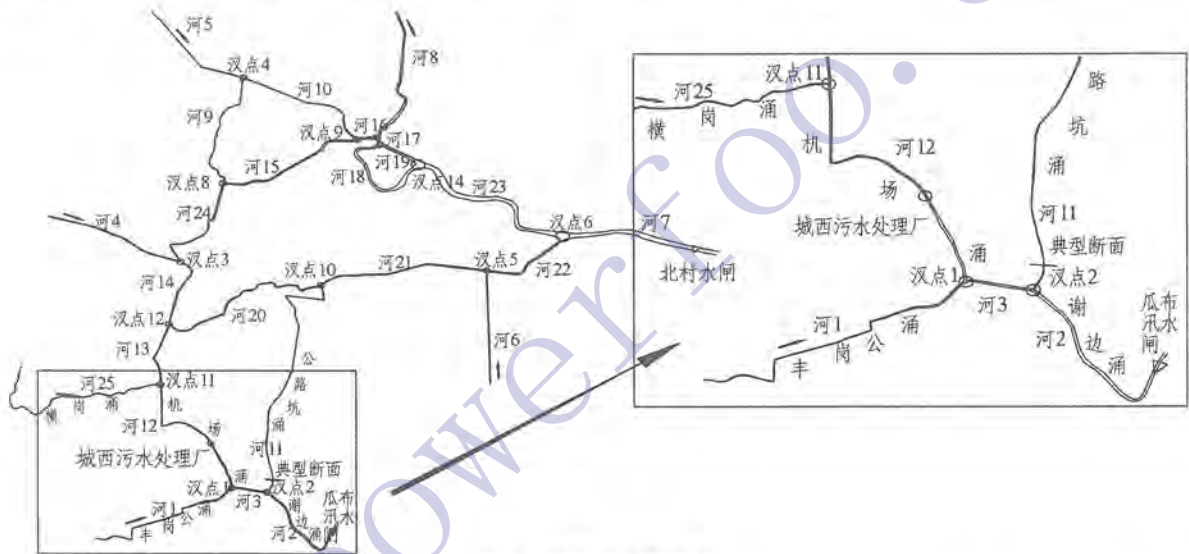


图1 河网概化布置图

由于在本次计算中缺少实测平常年份的各入流支流的流量(水位)过程资料及相应的外江潮位过程资料,现有的资料为内河涌10 a一遇涝水下的入流资料(图2)及外江5 a一遇年高潮潮位资料(图3)(为广东省有关规定及广东部分地区排涝规划时习惯采用的涝水与潮汐组合做法),因而,笔者在文中仅模拟该组合条件下各水质指标的变化规律,依此定性分析水系中污染物的输移规律。计算主要模拟的水质指标为COD_{Cr}、NH₃-N和TP。根据污水处理厂的实际情况设置了一个集中排污口,通过设排污口排污来模拟该区域的水质变化,排污口位置概化在机场涌(图1中河12)的中部。

通过对该区进行调查得知,现在仅有城西污

水处理厂的尾水排入北村水系(位于机场涌中间),其规划建设排放的尾水水质标准为COD_{Cr}:60 mg/L,NH₃-N:8 mg/L,TP:1 mg/L,其余的污染物沿岸而排。

3.2 结果分析

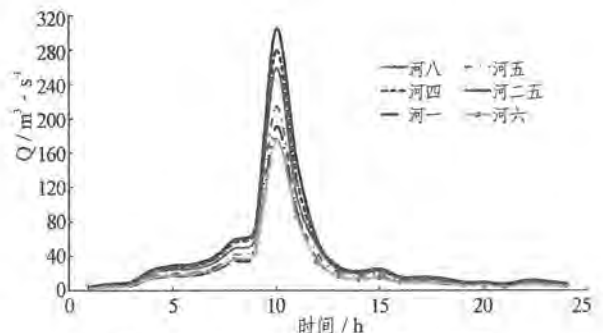


图2 支流河道入流流量过程示意图

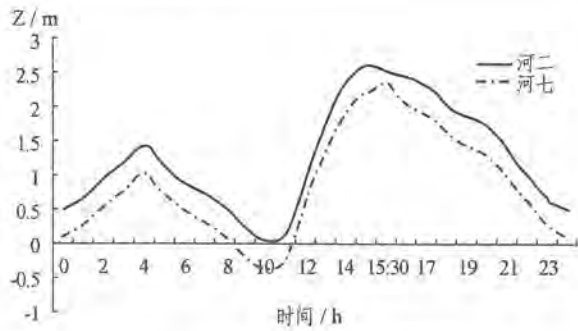


图 3 支流河道潮位过程示意图

计算发现,经城西污水厂排入机场涌的污染物在涝水及外潮波影响下,主要局限于在谢边涌水系中输移扩散。另外,由于 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 TP 输移规律相同,因而文中的讨论仅限于讨论谢边涌水系中 COD_{Cr} 的变化规律。排污后典型河段 COD_{Cr} 分布情况见图 4、5。为研究污染物在河涌中的输移过程,选取受污染物影响的典型断面进行水质分析,该对象为公路坑涌近汉点 2 处,所选典型断面的具体位置见图 1。特征断面流速、 COD_{Cr} 浓度分布情况见图 6。



图 4 排污 6 h 后谢边涌水系 COD_{Cr} 分布图



图 5 排污 6 h 后谢边涌水系 COD_{Cr} 分布图

由图 4~6 可以看出,随着外江河道流量的增加及潮位的上升,河 11 水流流速向北先增后减,

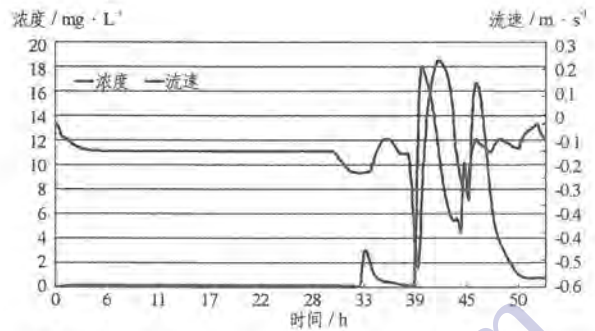


图 6 特征断面 1 处流速、 COD_{Cr} 浓度随时间变化过程图至约 39 h 洪峰到来时流速增加至最大值,约为 0.53 m/s,此时,从上游随水流带入的污染物浓度迅速增加,污染物浓度峰值到达时间稍较流速峰值滞后;洪峰过后,受外江潮位的周期性变化,河 11 流速也随之相应变化,但污染物浓度因流速的减小而难以被水流带走而保持一定的较高浓度,至 42 h 后河 11 的流速反向向南流动并逐渐增大,上一阶段积累的污染物浓度受上游清水(浓度很小)的稀释浓度迅速下降;44 h 左右河 11 流速再次反向向北流动,自河 2 向北的水流带入的高浓度污染物使河 11 中的水质指标浓度再次大幅度增加,之后随外江河道流速减小,整个计算域中的流速不大,从污水处理厂排出的污染物被带入下游的污染物通量减少,河 11 中污染物浓度逐渐减小至一稳定值。

引入外江潮水后的河网水系中的 COD_{Cr} 浓度总体呈减小趋势,且变化过程呈波动减小状态,主要是由于在落潮排水时小支涌的污水排出,使得研究断面的污染物浓度减小,水质得到恢复和改善。河网水质浓度变化过程存在空间差异性,主要是因为瓜步汛水闸潮汐变化为间歇性进行,从而使得公路坑涌等的水质净化过程较慢。

4 结 语

笔者在前人研究成果的基础上,采用三级联解算法,建立了一维河网水动力、水质数学模型,并将该模型应用于佛山市南海区北村水系的河网水量、水质的模拟计算。模型计算结果表明:该模型能够很好地模拟实际河网河段中的分流、汇流及涝水、潮水的演进传播过程,以及往复流变化规律和污染物浓度变化与水量的关系,能够为改善复杂河网地区的水量水质调度、水环境修复问题提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 矫勇. 中国水问题·对策及发展战略[C]. 第三次世界水论坛中国代表团论文集, 2003.
- [2] 周怀东, 彭文启. 水污染与水环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 张惠英, 严以新. 黄茅海域及上游河网区一、二维联网潮流计算整体数学模型[J]. 江苏交通工程, 1994, 57(6): 12-20.
- [4] 赖锡军, 汪德瑾. 非恒定水流的一二维耦合数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2002, 36(2): 48-51.
- [5] 诸裕良, 严以新, 李瑞杰, 等. 河网海湾水动力联网数学模型[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 131-135.
- [6] 郝芳华, 李春晖, 赵彦伟, 等. 流域水质模型与模拟[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2008.
- [7] 叶守泽, 等. 水库水环境模拟预测与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [8] 张明亮, 沈永明. 河网水动力及综合水质模型的研究[J]. 中国工程科学, 2008, 10(10): 78-80.
- [9] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [10] 穆锦斌. 荆江-洞庭湖水沙输移数学模型及其初步应用研究[D]. 武汉大学博士论文, 2007.
- [11] 吴作平. 复杂河网及江湖水沙联合调度数学模型研究[D]. 武汉大学博士论文, 2002.
- [12] 金蜡华, 徐峰俊. 河口及近海水质模拟[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

作者简介:

乔伟(1985-), 女, 河南开封人, 助理工程师, 硕士, 研究方向: 水质数值模拟;

赵奕(1982-), 男, 湖北武汉人, 工程师, 学士, 从事水利水电工程设计工作;

鄂茂国(1962-), 男, 湖北武汉人, 工程师, 从事水电工程设计及工程管理工作.

(责任编辑: 李燕辉)

(上接第52页)

于 2.2 g/cm^3 , 不能满足填筑标准中的最小干密度的技术要求。

②对于2B料, 松铺50cm时动碾4遍时的实测干密度值在 2.29 g/cm^3 左右, 已经非常接近设计值 2.3 g/cm^3 ; 动碾增加到6遍时, 干密度增加量不超过1%; 而松铺厚度为60cm时, 动碾2遍以上的实测干密度值均小于 2.3 g/cm^3 , 不能满足填筑标准中的最小干密度的技术要求。

(2) 沉降量变化。

对于2A和2B料, 松铺厚度50cm和60cm时, 随着碾压遍数的增加, 2、4、6遍振动碾压后的沉降量总体均随碾压遍数的增加而增加, 但增幅均很小。尤其是在振动碾压4遍以后, 沉降量基本没有明显变化。

(3) 渗透系数。

2A料的渗透系数在松铺厚度50cm时, 振压2、4、6遍后, 均大于 5×10^{-4} , 满足填筑标准技术相关要求。而在松铺厚度60cm时, 振压4、6遍后, 均小于 5×10^{-4} , 不能满足填筑标准技术相关要求。碾压试验后的样品2B料的渗透系数在松铺厚度50cm、60cm时, 振压2、4、6遍后, 均大于 1×10^{-3} , 满足填筑标准技术相关要求。

5.3.2 碾压参数的确定

综上所述, 反滤层(2A、2B)施工参数为:

(1) 碾压机具采用德国宝马公司生产的BW219DH-3光面振动碾, 机具重量为19.22t, 行走速率采用3km/h, 振动频率采用30Hz;

(2) 反滤料(2A)采用松铺厚度50cm, 静压2遍, 振动碾压4遍; 压实控制干密度暂按 2.2 g/cm^3 执行, 并根据现场实际情况进行适时调整;

(3) 反滤料(2B)采用松铺厚度50cm, 静压2遍, 振动碾压4遍。压实控制干密度暂按 2.28 g/cm^3 执行并根据现场实际情况进行适时调整。

6 结语

在Jatigede大坝反滤料填筑施工中, 现场施工人员严格按照确定的碾压参数进行施工, 现场取样试验成果表明, 填筑质量均满足各项技术指标要求。因此, 碎石土心墙土石坝反滤料填筑施工前, 应对所采用的反滤料进行筛分检测填筑料级配及生产工艺性碾压试验分析, 是确定正确的填筑碾压参数的前提。而在填筑施工中, 严格按照确定的碾压参数进行施工, 并及时通过现场取样试验进行质量控制是确保填筑质量的关键。

作者简介:

丁显庚(1980-), 男, 河南南阳人, 工程师, 学士, 从事水电工程施工技术与管理工作;

马乐(1962-), 男, 四川都江堰人, 高级技师, 从事水电工程施工技术与管理工作.

(责任编辑: 李燕辉)