

WASP5 水质模型在平原河网区的应用

唐迎洲¹, 阮晓红², 王文远²

(1. 上海市水务规划设计研究院, 上海 200232; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 以平原河网区水环境为研究对象, 选择了 WASP5 系统作为平原河网水质模拟的基本工具, 针对 WASP5 系统自带的 DYNHYD5 水动力模型功能的局限性, 以及平原河网水力调控系统复杂的特征, 选择了具有产汇流模拟、闸坝控制模拟及河网水流模拟等功能的三级联解平原河网水动力模型。通过利用 C++ 语言编程, 实现了三级联解平原河网水动力模型与 WASP5 水质模型的耦合, 使之可以应用于平原河网水环境的模拟。并把研究成果运用到实际引调水工程中去, 模拟引调水工程中不同实施方案下的环境效益, 为引调水工程实施方案的确定提供了理论依据。

关键词: 平原河网; 水环境; 水动力模型; 水质水量耦合模型; 引调水工程

中图分类号: X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-693X(2006)06-0043-04

Application of water quality model WASP5 in water environment simulation of plain river network areas

TANG Ying-zhou¹, RUAN Xiao-hong², WANG Wen-yuan²

(1. Shanghai Water Planning and Design Research Institute, Shanghai 200232, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper focused on the water environment of plain river network areas, and WASP5 system was selected as the basic simulation tool. It is found out that the fundamental functions of hydrodynamic model DYNHYD5 in WASP5 are weak in these areas as the natural hydraulic regularity and controlling hydraulic works are complicated in these networks. A three-step hydrodynamic model suitable for solving plain river network was selected, which has the functions of simulating runoff and confluence, dam and sluice control, current in river networks, etc. The idea of coupling the hydrodynamic model with WASP5 water quality model is realized and the coupling model is created with C++. The coupling model can properly simulate the water environment in plain river network. The coupling model and the present methods were applied to the simulation of practical water diversion projects. The environmental benefits of different water diversion plans were compared by using numerical simulation method, which provided theoretical references for selection of the executive plan.

Key words: plain river network; water environment; hydrodynamic model; coupling model of water quality and water quantity; water diversion project

WASP5 模型系统由美国国家环保局环境研究实验室开发, 该模型系统是按照软件工程的思想来开发的^[1-3]。它由两个独立的程序组成: 水动力模型程序 DYNHYD5 和水质模型程序 WASP5。水质模型由两个模块组成: 模拟常规水质的 EUTRO5 模型和

模拟有毒物质污染的 TOXI5 模型。EUTRO5 模型用来分析常规的污染项目, 包括溶解氧、生化需氧量、氨氮、叶绿素 a、有机氮、硝酸盐、有机磷、无机磷等 8 种物质在水体中的迁移变化情况; TOXI5 模型用来模拟有毒物质的污染, 包括有机化学物质、金属和泥

沙等。在 WASP5 系统中,水质模型既可和 DYNHYD5 相联运行,也可和其他水动力模型相联运行,如果有已知水动力参数,还可将水动力参数作为输入参数单独运行。

平原河网地区河道数量众多,河网中水工建筑物运行十分复杂,水流相对滞缓以及近年来污染负荷的加大,水体已受到不同程度的污染,从有机污染为主发展到以富营养化为主。WASP5 水质模型提供了一个灵活的模拟系统,具有模拟平原河网水体富营养化的能力,在其基本程序中反映了对流、弥散以及边界的交换等随时间变化的过程。DYNHYD5 水动力模块不具有模拟水利工程运行的功能,因此,DYNHYD5 不适用于闸控平原河网水动力模拟。然而,在平原河网地区已经有多种运用比较成功的河网水动力模型^[4],可至今没有开发出与该模型直接匹配的水质模型。因此如何把河网水动力模型以及 WASP5 水质模型联立耦合在一起,同时增强水动力水质模型的适用性,从而节约时间和成本,达到模拟水环境的目的,对地区的水环境预测与污染防治具有很重要的作用。

Fortran 语言虽然在数值计算中具有重要的作用,但是其对数据传输的效率较低。因为 Fortran77 主要使用“传值”功能来实现函数参数的传递,虽然 Fortran 也可以使用 COMMON 语句实现数据的传递,但是非常繁琐。C++ 语言在这些方面则具有明显的优势^[5],所以本研究采用 C++ 语言来实现河网水动力模型与 WASP5 水质模型之间的耦合。

1 WASP5 水质模型与平原河网水量模型的耦合

1.1 平原河网水动力模型

由于有限差分法具有数学概念直观、表达简单的特点,其解的存在性、收敛性和稳定性早已有较完善的研究成果,所以河网水流计算通常采用有限差分法^[6]。该求解方法分为两类,常用的有“河道-节点”法和单元划分法^[7]。“河道-节点”法又可分为逐河道求解法、全网直接求解法及分级求解法^[8]。现在使用的平原河网水动力数学模型大多采用分级求解法。本研究采用三级联解^[8]河网水动力模型作为模拟河网水动力特征的模型。

1.2 耦合模型的开发

由于本研究所选用的河网水动力模型只对河道以及各河道的断面进行编号,而不需要对河网的节点(汇流点)进行整体编号,所以具有需要输入的数据量少、可灵活地增减模拟河道的数目及灵活地进行分片组合的优点。但由于 WASP5 水质模型采用单元划分法,且单元体须连续编号,这种解法和编号

的差异性使得河网水动力模型与 WASP5 水质模型之间的耦合计算存在着接口问题。因此利用 C++ 语言建立河网水动力模型的节点、河段与 WASP5 水质数学模型单元体之间的对应关系。

1.2.1 类对象的设计

为了建立河网水动力数学模型的节点、河段与 WASP5 水质数学模型单元体之间的对应关系,利用 C++ 语言编写的耦合程序中定义了 4 类:河网类、河道类、河段类以及水质单元体类。其中河网类为其余 3 个类的基类,河道类、河段类为水动力计算中所定义类,河道类派生于河网类,同时它又派生河段类,水质单元体类为 WASP5 水质模型计算中所定义类。河网、河道、河段所具有的属性(河道数、断面数等)在对应的类对象中定义。定义的类之间的关系见图 1。

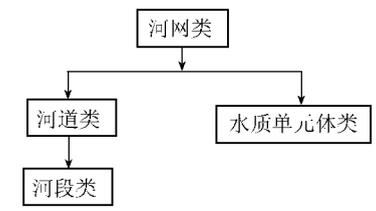


图 1 耦合程序中类之间的对应关系
通过定义这些耦合程序中类对象,就可以实现水动力网格向 WASP5 水质单元体的转换。

1.2.2 水质结点编码原则

图 2 给出了河网水动力模型中河道的编号、河道的首末节点编号以及河道的初始定义流向。在将河网水动力模型的基本河网概化信息向 WASP5 水质数学模型转换时,将河道看成由节点、断面以及水工建筑物(如果该河道上建有水工建筑物)组成,具体形式如下。

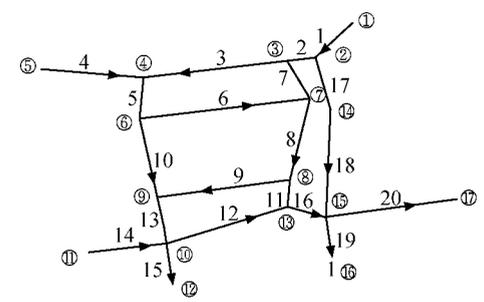


图 2 初始定义流向、河道编号及节点编号
a. 边界节点编号。河网中的节点可以分为边界节点与河网内部河道节点,所以本耦合模型在进行耦合过程中,优先考虑边界节点,即先将边界节点转化为水质单元体结点。
b. 河网内部河道节点编号。在河网内部,每逢一个河道与其他河道的汇流点就按照从小到大的顺序分别定义一个水质单元体编号,对于每条河道与

其他河道的汇流点只定义一个水质单元体编号,按先定义的河道节点的原则来定义对应的水质单元体编号。

c. 河道断面所对应的水质单元体编号。由于在河网概化中,单个河道中可能会细划出多个河段(断面)。河道中这些断面向水质单元体的转换是依据该河道初始定义流向的原则进行编号的。即河道的断面按照该河道初始定义的流向从上游到下游的顺序进行编号。河道中各断面所对应的水质单元体编号见图 3(编号从 18 到 27)。

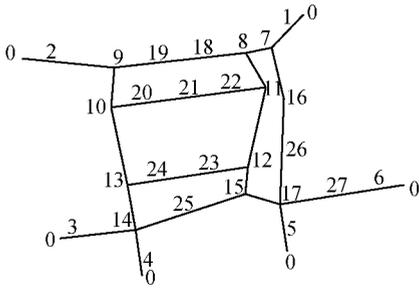


图 3 水质单元体编号

d. 对河网中闸坝等构筑物的处理。平原河网水力模型能够模拟闸坝的运行,但 WASP5 水质模型并不考虑闸坝调控的影响,根据 WASP5 的计算原理,在耦合模型中,水工建筑物将不单独作为一个水质单元体考虑。因为根据 WASP5 水质模型的基本方程,单元体间的污染物质的交换是随水体对流及交界面上的扩散而进行,单元体浓度的变化完全取决于交界面上的对流扩散运输、单元体污染物的降解及源项的加入。在水力计算模型结果中各计算河段的流量变化已体现了闸坝运行的影响,因此在 WASP5 模型中,通过流量的变化反应闸坝工程对水质的影响。这样,无论闸坝以何种方式运行,闸坝的闸上水质组分浓度和闸下水质组分浓度可以近似等于其相邻单元体的对应组分的浓度。

e. 对河网水力计算中新增断面的处理。在水动力数学模型中具有可以根据计算需要而在原有的河道断面上再新增断面的功能。这样新增断面后,河网节点和整体河段的变化较为复杂,对于大型河网,手工编码常常易出现错误,且即使在图上表示出来了,也无法实现水动力模型的计算结果向水质模型相应的节点进行传递。基于此,本程序新增自动识别功能,即自动增加 Reach 类的数目。图 4 中新增了 5 个节点,这 5 个节点将原有的概化河道进行了细化(即将原有的概化河道分为两条新的概化河道),具体位置见图中的“○”标志,耦合后的水质单元体编号见图 5。

1—河道编号 ①—河道节点编号

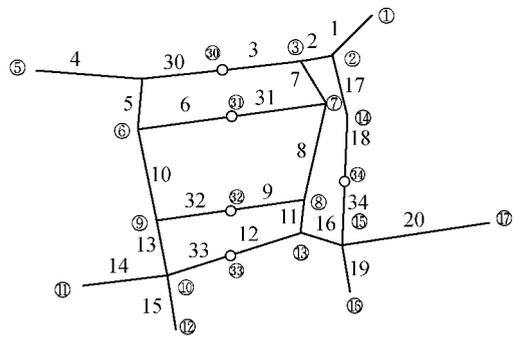


图 4 河网水力模型概化

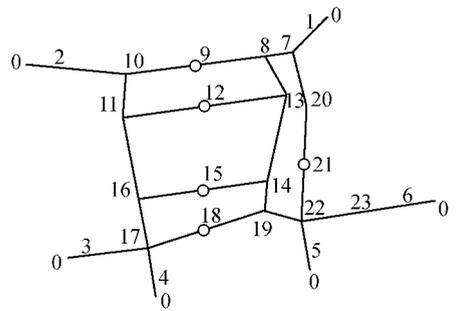


图 5 新增节点后河网新的水质单元体编号

f. 对河网水力计算中新增河道的处理。河网水力模型具有可以根据计算需要在原有的河道数量的基础上再新增加河道的功能。比如,新开挖一条河道或者将一条河道细化为两条或更多条河道(原河道的河段数可能会有减少)。本耦合模型可以自动识别这些新增河道,即自动增加 RiverWay 类的数目,其余处理步骤同上。

g. 局部河网水质单元体的生成。在某些情况下,需要由整体河网生成局部河网。比如有时水力数学模型是对整个河网进行模拟,而水质模拟则要求对所关心的部分河网进行模拟,或是对计算结果进行可视化显示时,只要求显示某些重点关心河道的水流情况,而不希望整个河网的水流情况都显示出来。此时,就要由整体河网出发,生成所需要的局部河网。本程序通过编码将局部河网作为整体河网的一个子集,并自动形成局部河网独立的节点编号和河段编号。

2 WASP5 水质模型的应用

2.1 苏州水系概况及引调水工程背景

本研究所涉及的行政区域为苏州市城市中心区,面积 72.58 km²,包括苏州市老城区。近年来,由于城市化水平的不断提高,城市中心区河道除了承担传统的抗御旱涝灾害和通航的功能外,还承担着区域内大部分工业、生活污水的排泄任务。由于污水处理水平的相对滞后和河网水流的相对滞缓,河

道水质污染情况越来越严重,河道自然生态功能基本丧失。水污染已成为当前制约当地社会经济发展的瓶颈。因此,在保证防洪排涝的基础上,如何改善区域内河道水环境质量是十分必要和紧迫的。而在治污经济实力还不很充裕的条件下,引调水工程不失为一种改善地区水环境的费用省、效益快的权宜之计^[9]。

2.2 河网水质模型的建立

本次研究的区域是苏州市城市中心区,但因调控方案需经望虞河、杨林塘、七浦塘、浏河等口门引长江水,故水动力模型的研究范围向北延伸至望虞河,向东延伸至长江。为了研究调水对淀泖区水质有无影响,故南边以吴淞江为界(包括吴淞江水域及大运河吴淞江水域),西边以太湖为界,见图6。本研究中,水质计算时间步长由水动力模型决定,这样可以保证水量水质计算的一致性。为了较好地模拟闸门运行,水环境模拟中时间积分步长取900s。水质单元体长度一般取1km左右,并保证单元体体积大致相等。



图6 苏州市城市中心区河网

a. 基本资料。2000年全计算区域的水质监测资料及污染源调查资料。

b. 模型参数的选取。由于污染物是按照 COD_{Cr} 指标来统计的,根据实验室对苏州市多个取样点水样进行 COD_{Cr} 与 COD_{Mn} 对比测定,根据测定结果,在研究范围内,取二者比值的平均值4.0用于计算。根据太湖流域河网水质计算的的经验值,氮氮的降解系数取 $0.05 \sim 0.27 d^{-1}$, COD_{Mn} 的降解系数取 $0.08 \sim 0.25 d^{-1}$ 。

2.3 河道水质改善引调水方案比选

2.3.1 计算条件

水力模拟典型年:苏州市城市中心区平水典型年为1988年,枯水典型年为1979年。由于是比选调水方案,所以水量计算年型采用1988平水年型。水质模拟的基准年:水质边界采用2000年实际监测资料。

2.3.2 计算工况

苏州市城市中心区引调水工程以提高西塘河引水工程的环境效益,实现城市中心区河道水环境质量达到最大程度的改善为目的。具体计算方案见表1。

表1 城市中心区河道水动力计算方案

方案	调水量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	闸控方式	目的
I-1	0.0	所有闸控采用现状常规控制方式	了解城市中心区河道水质状况
II-1	24	城市中心区内部闸门全部敞开;西塘河拓宽引水,全线封闭;切断城市中心区与周边地区的水力交换,仅老运河出水	分析西塘河拓宽引水对整个城市中心区河道水质状况的改善研究
II-2	40		

2.3.3 引调水方案比选

对应于表1的方案,部分河道的 COD_{Mn} , NH_3-N 的年均值计算结果见表2。

表2 不同方案下水质计算结果 mg/L

河道	I-1		II-1		II-2	
	$\rho(COD_{Mn})$	$\rho(NH_3-N)$	$\rho(COD_{Mn})$	$\rho(NH_3-N)$	$\rho(COD_{Mn})$	$\rho(NH_3-N)$
外城河北线	7.68	4.33	6.77	3.20	5.27	1.32
外城河东线	7.21	3.53	5.80	3.08	5.19	1.29
外城河南线	6.39	3.37	5.65	3.49	5.15	1.57
外城河西线	6.65	3.47	6.39	3.49	5.44	1.51
平门小河	7.41	3.80	7.09	3.55	5.82	1.44
府前河	13.08	8.69	8.64	3.72	6.67	1.79
平江河	6.48	4.37	8.91	5.29	6.20	2.64
学士河	7.48	4.05	6.98	4.31	5.75	2.39
南园河	7.53	4.71	6.98	3.50	4.96	1.90
上塘河	7.41	4.04	5.93	3.64	5.51	1.29
里双河	6.79	3.44	5.51	3.55	5.32	1.26

从计算结果分析可知,在引调水工况下, COD_{Mn} , NH_3-N 的浓度基本有所降低,水质得到了一定的改善。在调水 $24 m^3/s$ 时,各河道中 COD_{Mn} 指标基本达到IV类,但是在多条河道上 NH_3-N 指标并没有发生很明显的降低,甚至还发生了恶化现象。在调水 $40 m^3/s$ 时,各条河道的 COD_{Mn} , NH_3-N 的浓度均得到很明显的降低, COD_{Mn} , NH_3-N 指标基本达到IV~V类。所以推荐采用调水 $40 m^3/s$ 的工况来实施苏州市城市中心区河道水环境改善的工作。

参考文献:

- [1] TIM A W, ROBERT B A, JAMES L M, et al. Water quality analysis simulation program(Version 6.0) draft User's Manual [R]. Region 4 Atlanta, GA:USEPA/Tetra Tech, Inc 2001.
- [2] ROBERT B A, TIM A W. The water quality analysis simulation program, WASP5 Part A: Model Document [R]. Athens, Georgia:Environment Research Laboratory, 1993.
- [3] ROBERT B A, TIM A W. The water quality analysis simulation program, WASP5 Part B: The WASP5 input dataset [R]. Athens, Georgia:Environment Research Laboratory, 1993.

(下转第50页)

水后,研究区域的各主要河道除了北福山塘北福山塘桥水质略有改善外,其余断面的水质略有下降,引水对研究区域各主要河道水质影响情况见表1。由表1可见,望虞河引水造成了望虞河西岸水质的恶化,原因是望虞河引水使得西岸的排水受阻,而由于地势等原因,引入的长江水大部分进入常熟城区,只有极少的水流进入西岸区域,无法影响主要河道,并且水量较小不足以引起污水倒流从而将污水逼出研究区域,大量污水只能在研究区域内回荡,造成了水环境的恶化。对于北福山塘北福山塘桥断面,由于离望虞河较近且靠近望虞河出口处,引入的水量较多,对其的水质起到了一定的改善作用。

表1 调水对主要河道水质改善平均值 mg/L

断面编号	断面名称	$C(\text{COD}_{\text{Mn}})$			$C(\text{NH}_3\text{-N})$		
		调水前	调水后	改变值	调水前	调水后	改变值
20	北福山塘北福山塘桥	2.45	2.23	0.22	1.12	0.86	0.26
22	张家港大义张家港桥	5.40	7.80	-2.40	15.34	21.40	-6.06
23	锡北运河师古桥	7.46	7.93	-0.47	5.29	5.84	-0.55
24	羊尖塘界河桥	8.58	9.15	-0.57	3.63	5.14	-1.51
25	陆家塘钓渚大桥	4.90	5.33	-0.43	1.22	1.69	-0.47

3.4 引水时期的选择

本次常熟市原型调水试验中,发现城区及西岸水质并不是越引越好,这与引水时期的选择有关。本次试验的时间为10月29日18:00至10月30日21:00,虽然选择在这两日的长江高潮位时段引水,但10月份的潮位相对于全年的长江潮来说并不是最大潮,因此望虞河的引水水位并不是很高,这就导致西岸引入的水量较少,不能将污水逼出研究区域而造成水环境恶化。对于城区来说,水位较低挡不住西岸的污水进入城区,尤其是长江落潮时,西岸污水通过望虞河直冲东张家港河,对城区调水造成了很大影响,低潮位期间望虞河两岸水位见表2。因此,引水期的选择很重要,应该尽量选择非汛期、长江水处于高潮位的情况下引水。因为汛期望虞河还担负着防洪排涝任务,引水可能对防洪安全造成一

表2 排水期间望虞河两岸水位 m

断面	第一次排水(低潮位)						
	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00
20号	3.46	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47	3.47
1号	3.58	3.41	3.37	3.36	3.38	3.38	3.37
断面	第二次排水(低潮位)						
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	
20号	3.53	3.48	3.45	3.49	3.46	3.44	
1号	3.34	3.37	3.36	3.36	3.34	3.32	

定的威胁。同时考虑到经济效益应选择高潮位自引,尽量引入较多长江水,长江水位较高才能保证望虞河的高水位从而防止两岸污水进入望虞河影响引江济太功能的发挥,并且能够保证本研究区域引入的水量足以改善其水环境。

4 结论

在本次原型调水试验期间,除文中提及的口门、枢纽外,其余望虞河沿线的口门、枢纽,按照其原来的调度方式运行,因此,本次原型调水试验与引江济太具有一定的相似性。

根据以上分析,望虞河引水期间,由于水位抬高使得西岸的排水受阻,而由于地势及引水期的选择等因素的影响,引入的长江水只有极少量进入西岸区域,无法影响主要河道,并且水量较小不足以引起污水倒流从而将污水逼出研究区域,大量污水只能在研究区域内回荡,造成了研究区域水环境的恶化。同时引江济太工程的实施要求抬高望虞河水位保证尽量减少沿岸污水的汇入,这就使得两者之间产生了矛盾即西岸的污水没有出路,因此对于本研究区域来说必须进行排水通道的研究,建立相应的排水河道将污水截走,改善研究区域的水环境。

参考文献:

- [1] 沈爱春. 望虞河引江对太湖的影响研究[J]. 水资源保护, 2002(4):29-32.
- [2] 刘春生, 吴浩云. 引江济太调水试验的理论和实践探索[J]. 水利水电技术, 2003, 34(1):4-8.
- [3] 张文斌. “引江济太”对无锡水环境利弊析[J]. 江苏水利, 2002(12):19-20.

(收稿日期 2006-06-02 编辑 徐娟)

(上接第46页)

- [4] 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.
- [5] STANLEY B L. Essential C++[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2001.
- [6] 汪德. 计算水力学理论与应用[M]. 南京:河海大学出版社, 1989.
- [7] 韩龙喜, 陆冬. 平原河网水流水质模型研究展望[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(2):127-130.
- [8] 张二骏, 张东升, 李挺. 河网非恒定流三级联合解法[J]. 华东水利学院学报, 1982(1):1-12.
- [9] 王超, 卫臻, 张磊. 平原河网调水改善水环境实验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2005, 33(2):136-138.

(收稿日期 2005-03-30 编辑 舒建)