

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.03.002

基于数学模型的第二松花江支流饮马河水质对干流水质的影响分析

孙少晨^{1,2},肖伟华²,周祖昊²,王 浩²

(1. 东华大学环境科学与工程学院 ,上海 201620 ; 2. 中国水利水电科学研究院 ,北京 100038)

摘要 利用 2007 年的监测数据分析第二松花江支流饮马河(劣Ⅴ类水质)对干流水质的影响程度,通过建立的松花江流域一维河网水动力水质耦合模型,模拟分析了饮马河水质改善(假设达到Ⅲ类水)后对第二松花江干流水质变化的影响。结果表明 6—8 月支流水质改善后对干流水质影响较大, $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标比 COD_{Cr} 指标改善明显,枯水月支流水质对干流水质的影响较小。

关键词 水质分析 ;数学模型 ;第二松花江 ;饮马河

中图分类号 :X522 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2011)03-0007-04

Impact of the second branch Yinma River on water quality of Songhua River based on mathematical model

SUN Shao-chen^{1,2} ,XIAO Wei-hua² ,ZHOU Zu-hao² ,WANG Hao²

(1. School of Environmental Science and Engineering , Donghua University , Shanghai 201620 , China ; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100038 , China)

Abstract : With the assistance of the monitored data of 2007 , the impact of the second tributary Yinma River water quality(worse than level V water standard) on Songhua River was analyzed . A coupled hydrodynamics and water quality model of Songhua river net was developed . Based on this model , the impact of Yinma River on water quality of main stream of Songhua River was predicted . The results indicated that if the water quality of tributary met level Ⅲ water standard , the water quality of main stream of Songhua River was improved largely from June through August . Ammonia Nitrogen Index was improved more significantly than that of COD_{Cr} . The impact was small in low flow months .

Key words : water quality analysis ; mathematical model ; the second tributary of Songhua River ; Yinma River

第二松花江水质污染问题一直受到环境界的极大关注,许多科技工作者做了大量的研究工作,但研究内容侧重于沿岸点源、面源对水体质量的影响,而忽略了支流对水质的影响^[1-6]。河流水质受上游来水水质的影响、本区污染源的影响以及支流水质的影响,因此有必要系统地分析和评价第二松花江支流水质对干流的影响。笔者利用所开发的松花江水动力水质模型进行第二松花江支流饮马河水质对干

流的影响研究,并进一步预测了支流水质条件变化后松花江干流水质的变化,以期对松花江治理工程提供决策依据。

1 饮马河水质状况

饮马河为第二松花江主要支流之一,发源于磐石市驿马乡呼兰岭,流经磐石、双阳、永吉、九台、德惠、农安六县(市),全长 386.8 km,流域面积为 18 247 km²,

基金项目 :国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-006)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50721006)、“十一五”国家科技支撑计划(2007BAB28B01)

作者简介 :孙少晨(1982—),男,黑龙江嫩江人,博士研究生,主要从事环境水质水动力模型开发及应用研究、水污染防治技术研究。
E-mail :sunshaochen@126.com

流域形态略成一斜三角形(图 1)。东部为山地和松辽平原的过渡带,南部为连绵的低山丘陵,西北部为松辽平原,中部为平原。地势东南高、西北低,河流多为南北流向。主要支流有伊通河、雾开河、双阳河等。

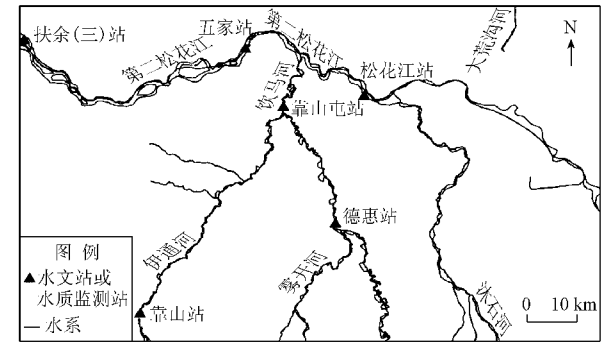


图 1 研究区概况

目前饮马河水质恶化极为严重,饮马河的德惠段、拉他泡段和靠山屯段为劣 V 类水质,饮马河支流伊通河的伊通段、长春段和农安段等也均为劣 V 类水质^[7]。伊通河在靠山屯水位站附近注入饮马河,汇合后流经 22 km 注入第二松花江。主要超标项目为 BOD₅、COD_{Cr}、NH₃-N。

德惠水质监测站和靠山水质监测站(以下简称德惠站和靠山站)位于饮马河及其支流伊通河上,德惠站监测德惠市排污后饮马河的水质状况,靠山站监测伊通河汇入饮马河前的水质状况,两站信息见表 1。

表 1 德惠站和靠山站信息

水系	河名	监测站名	监测断面位置	设站目的	主要功能
第二松花江	饮马河	德惠站	德惠市饮马河大桥	监测德惠市排污后的水质状况	水资源质量站
第二松花江	伊通河	靠山站	农安县靠山镇伊通河公路桥	监测伊通河汇入饮马河前的水质状况	水资源质量站

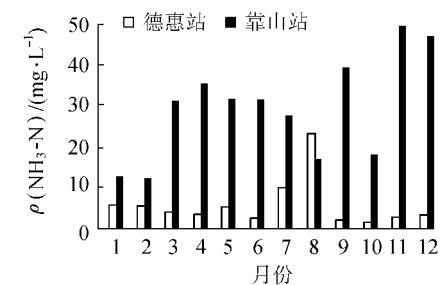
从表 2、图 2 可以看出主要超标项目为 BOD₅、COD_{Cr}和 NH₃-N,其中 NH₃-N 超标最严重,在伊通河上 NH₃-N 监测极大值超标 48.64 倍,饮马河上 NH₃-N 监测极大值超标 22.62 倍。其他监测结果亦表明伊

表 2 德惠站和靠山站 2007 年监测的水质情况

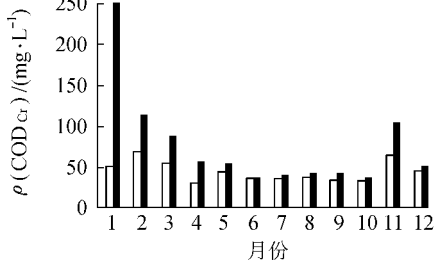
水质指标	监测站名	水质评价分类	$\rho_{\max}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	超标倍数/倍
NH ₃ -N	德惠站	劣 V 类	22.62	22.62
	靠山站	劣 V 类	48.64	48.64
COD _{Cr}	德惠站	V 类	65.30	3.26
	靠山站	劣 V 类	247.10	12.36
COD _{Mn}	德惠站	Ⅳ类	12.90	2.15
	靠山站	劣 V 类	27.77	4.63
BOD ₅	德惠站	V 类	12.77	3.19
	靠山站	劣 V 类	39.30	9.83

注: $\rho_{\max}$ 表示测得的最大值(质量浓度);超标倍数是 $\rho_{\max}$ 与 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水比较的结果。

通河全年 NH₃-N 污染都非常严重。



(a) NH₃-N 监测结果



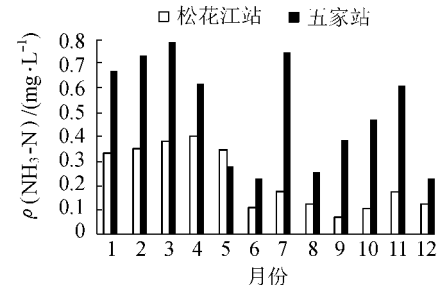
(b) COD_{Cr} 监测结果

图 2 饮马河德惠站、靠山站 2007 年监测数据比较

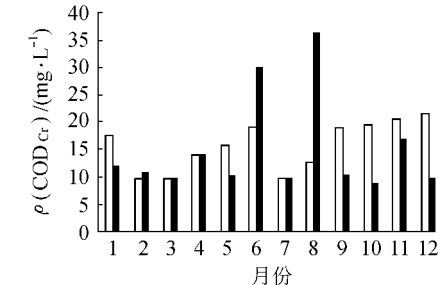
2 饮马河汇入前、后第二松花江干流水质变化

通过设在第二松花江干流上游的松花江站和下游的五家水质监测站(以下简称松花江站和五家站)的监测数据,分析饮马河汇入前、后第二松花江干流的水质状况,结果如图 3 所示。两站信息见表 3。

从图 3 可以看出,饮马河汇入第二松花江后,干流五家站与上游松花江站测得的 NH₃-N 质量浓度相比,前者明显较大,但 COD_{Cr} 质量浓度没有明显增大。冰封期(1—3 月及 12 月)由于河面结冰,干流



(a) NH₃-N 监测结果



(b) COD_{Cr} 监测结果

图 3 第二松花江干流松花江站和五家站 2007 年监测数据比较

表3 松花江站和五家站信息

水系	监测站名	监测断面位置	设站目的	主要功能
第二松花江	松花江站	吉林省水文水资源局长春分局松花江水文站基本断面	监测饮马河汇入前的水质状况	水资源质量站
第二松花江	五家站	吉林省水文水资源局松原分局五家站水位站基本断面	监测饮马河汇入后的水质状况	水资源质量站

不受面源的影响,水质变化完全由支流汇入及点源造成,在水流自净作用的前提下,冬季支流汇入及点源影响可导致干流 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度明显升高。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是饮马河超标最为严重的水质指标,对干流而言 COD_{Cr} 的影响相对较小。从图 3 中还可以看出,在汛期干流五家站的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度及 COD_{Cr} 质量浓度与上游松花江站相比明显升高。

3 水动力水质模型的建立

3.1 水动力模型

一维水动力模型的控制方程组(圣维南方程组)如下:

连续性方程

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + B \frac{\partial z}{\partial t} = q_L \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial s} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \tag{2}$$

式中: Q 为流量; z 为水位; g 为重力加速度; B 过水断面宽度; A 为过水断面面积; q_L 为旁侧入流流量; R 为水力半径; C 为谢才系数; t 为时间; s 为距离。

利用 Preissmann 四点加权隐式差分格式对水流连续性方程和水流动量方程进行离散。可用追赶法求解^[8-10]。

采用三级联解法,即河道-节点-河道的方法,将整个河网看做由河道及河道节点组成,先将各单一河道划分为若干计算断面,在计算断面上对圣维南方程组进行有限差分运算,得到以水位及流量为自变量的单一河道差分方程组,再根据节点连接条件及边界条件形成封闭的节点水位方程,求解得到各节点水位,然后将各节点水位回代至单一河道,最终得到单一河道各断面的水位和流量^[8]。

3.2 水质模型

污染物质在河流中运动变化的基本方程(一维对流扩散方程)用下式表达:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = E \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + S_1 + S_2 \tag{3}$$

式中: $\bar{C}$ 为断面的水质平均质量浓度; u 为流速; E 为纵向离散系数,采用 Fisher 半经验公式^[11]获得; x

为河道长度; S_1 为内部反应与相互作用项,如生物化学中的生长与降解变化等; S_2 为外部源、汇项。

按照物质守恒的原理和方法进行离散,可以得到相应的矩阵方程,结合边界方程,可形成三对角矩阵方程组,并可用追赶法对方程组进行求解^[12-15]。

4 水动力、水质模型的率定

4.1 水动力模型的率定

图 1 给出了第二松花江模拟河段,上游边界为松花江站,下游边界为扶余(三)水文站(以下简称扶余站),距离步长为 500 m,时间步长为 10 min。水动力计算中上游边界松花江站、德惠站、靠山站给定流量过程线,下游边界扶余站给定水位过程线。采用 2006 年、2007 年 4—10 月第二松花江实测水位、流量资料对水动力模型进行率定、验证。以糙率系数为基本率定参数,经率定,本江段的糙率系数为 0.025 ~ 0.033。部分率定结果见图 4、图 5。从率定验证的结果可知,水位和流量的计算值和实测值吻合很好,经率定的模型能够满足工程分析的精度需要。

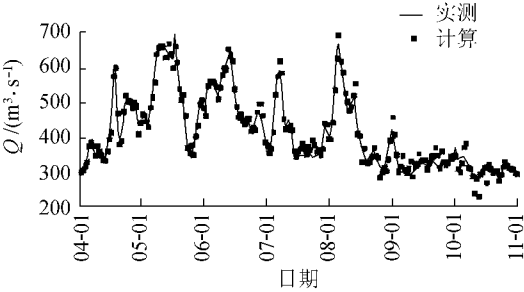


图4 扶余站流量计算值与实测值对比

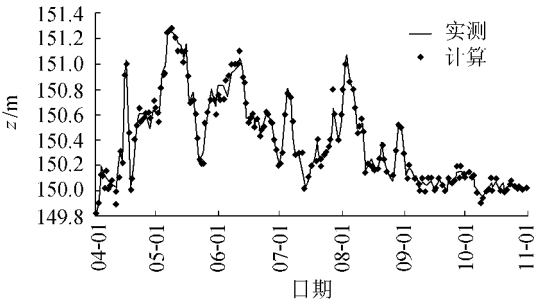


图5 松花江站水位计算值与实测值对比

4.2 水质模型的率定

水质边界给定 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 质量浓度时间历程。干流河道上、下游之间各断面初始时刻 COD_{Cr} 质量浓度为 10 ~ 15 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 0.5 ~ 0.7 mg/L;支流河道各断面初始时刻 COD_{Cr} 质量浓度为 30 ~ 50 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 3 ~ 35 mg/L, COD_{Cr} 衰减系数为 0.15 ~ 0.33 d^{-1} , $\text{NH}_3\text{-N}$ 衰减系数为 0.08 ~ 0.2 d^{-1} 。

利用 2007 年 4—10 月的松花江同步水文水质监测资料对水质模型进行率定验证,结果见图 6。主要衰减系数率定值与松辽水利委员会提供值相近。各水质变量质量浓度计算的相对误差除了 COD_{Cr} 质量浓度个别时刻较大外(相对误差接近 30%)其余水质变量的相对误差均不超过 20%,说明所采用的模型能满足水质模拟的需要。

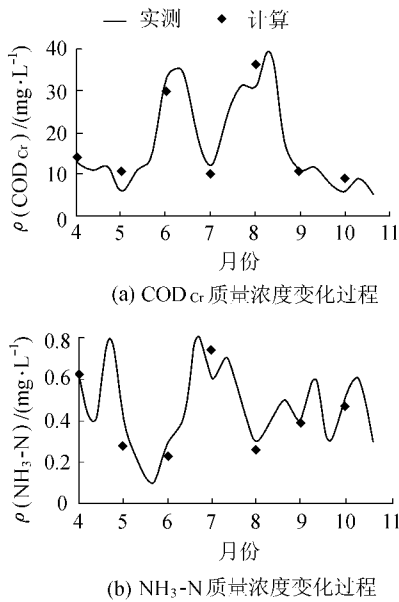


图 6 五家站 COD_{Cr} 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度
计算值与实测值对比

5 支流水质改善对干流水质的影响分析

在上述工作的基础上,为了更深入地分析支流水质改善对干流的影响,假设同期饮马河劣 V 类水质经过治理后达到 GB 3838—2002 规定的地表水 III 类水质标准,同时干流上游来水水质不发生改变,在此假设的基础上进行模拟,结果见图 7。

从图 7 可以看出,4—10 月期间饮马河 III 类水质情况下,干流下游五家站 6—8 月水质改善情况明显, $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标变化比 COD_{Cr} 指标明显,质量浓度最大变化可达 20% 左右,其他月份无明显改善。

分析认为出现上述情况的主要原因在于:①支流 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染情况比 COD_{Cr} 严重;②从图 8 中可以看出,6—8 月支流流量占干流流量比例较大,最高可达 30%,此时支流水质改善对干流影响较大,其他月份支流流量占干流流量的比例小于 0.5%,相当于饮马河的污染物汇入第二松花江干流后将被稀释 200 倍以上,大幅度削减了污染物质量浓度。

6 结 论

a. 饮马河主要超标项目为 BOD_5 、 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。通过松花江站、五家站的监测数据分析表明,在饮马

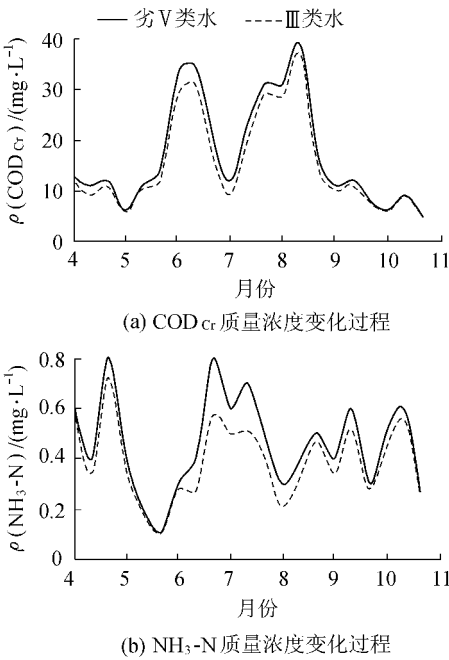


图 7 饮马河不同水质情况下干流五家站的水质情况

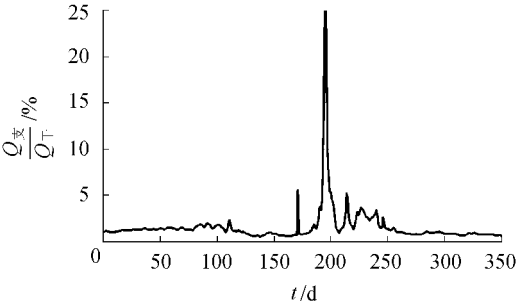


图 8 德惠站与松花江站 2007 年监测日均流量比
河汇入第二松花江干流后,经过水体的自净作用,第二松花江干流水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度增加明显, COD_{Cr} 质量浓度增加不明显。

b. 通过建立的松花江流域一维河网水动力水质耦合模型,模拟了 4—10 月期间饮马河水质改善(III 类)后第二松花江干流水质的变化,结果表明:支流水质改善后对 6—8 月干流水质的影响较大,同时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标比 COD_{Cr} 指标改善明显,枯水月相应的影响较小。

c. 第二松花江支流饮马河的流量多数时间占干流流量的 0.5% 以下,相当于饮马河的污染物汇入第二松花江干流后被稀释 200 倍以上,大幅度削减了污染物质量浓度,导致大部分时间段饮马河水水质改善对第二松花江干流水质的影响较小。

d. 丰水期第二松花江干流 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标受饮马河水水质影响较大,通过评价饮马河水水质对第二松花江干流水质的影响,可以类推其他流量较小、水质好于饮马河的支流对第二松花江干流水质的影响会更小。

(下转第 37 页)

段 ,其长期效应需进一步的研究。

参考文献：

[1] 濮培民 ,王国祥 ,胡维平 ,等 . 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗 ?[J]. 湖泊科学 ,2000 ,13(3) :269-279.

[2] 钟继承 ,范成新 . 底泥疏浚效果与环境效应研究进展 [J]. 湖泊科学 ,2007 ,19(1) :1-10.

[3] 周扬屏 . 南湖疏浚后底泥氮、磷释放规律研究 [D]. 南京 : 河海大学 ,2005.

[4] 王俊 . 底泥对河流水质影响的数学模型研究进展 [J]. 水资源保护 ,2009 ,25(S1) :55-60.

[5] 曹卉 ,曹诤 ,张选岐 ,等 . 东钱湖污染底泥疏挖吹填特性 [J]. 水利水电科技进展 ,2008 ,28(S1) :162-163.

[6] 董浩平 ,姚琪 . 水体沉积物磷释放及控制 [J]. 水资源保护 ,2006 ,22(4) :20-23.

[7] SCHINDLER D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes [J]. Science ,1977 ,195 :260-262.

[8] 彭杜 ,刘凌 ,胡进宝 . 玄武湖沉积物磷形态的垂向变化和生物有效性 [J]. 水资源保护 ,2009 ,25(1) :31-35.

[9] 魏复盛 ,寇洪茹 ,洪水皆 . 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版 . 北京 :中国环境科学出版社 ,2002.

[10] RUBAN V ,LOPEZS ,PARDO P ,et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of

extractable contents of phosphorus in freshwater sediments :a synthesis of recent work[J]. Fresenius ' Journal of Analytical Chemistry ,2001 ,370(2/3) :224-228.

[11] 高丽 ,杨浩 ,周健民 . 湖泊沉积物中磷释放的研究进展 [J]. 土壤(Soils) ,2004 ,36(1) :12-15.

[12] 金相灿 ,王圣瑞 ,庞燕 . 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响 [J]. 中国环境科学 ,2004 ,24(6) :707-711.

[13] 尹起范 ,孙建 ,金都 ,等 . 洪泽湖沉降物中磷的形态分布及其对水体的影响 [J]. 安徽农业科学 ,2009 ,37(12) :5631-5633.

[14] 王爱萍 ,杨守业 ,周琪 . 长江口崇明东滩湿地沉积物对磷的吸附特征 [J]. 生态学报 ,2006 ,25(8) :926-930.

[15] 张路 ,范成新 ,秦伯强 ,等 . 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究 [J]. 湖泊科学 ,2001 ,13(1) :35-42.

[16] 金相灿 ,姜霞 ,王琦 ,等 . 太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化 [J]. 环境科学学报 ,2008 ,28(1) :24-29.

[17] 李大鹏 ,黄勇 ,李伟光 . 底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响 [J]. 环境科学学报 ,2009 ,29(2) :279-284.

[18] 郭志勇 ,李晓晨 ,王超 ,等 . pH 值对玄武湖沉积物中磷的释放及形态分布的影响 [J]. 农业环境科学学报 ,2007 ,26(3) :873-877.

(收稿日期 :2011-01-20 编辑 :徐 娟)

(上接第 10 页)

致谢 :松辽水利委员会韩俊山总工程师及松辽流域水资源保护局李青山总工程师对本课题给予了大力支持 ,在此表示感谢 !

参考文献：

[1] 王起超 ,邵志国 ,张磊 . 20 年来第二松花江汞污染自净规律研究 [J]. 环境科学学报 ,2007 ,27(3) :474-479.

[2] 苏伟 ,刘景双 ,李方 . 第二松花江干流重金属污染物健康风险评价 [J]. 农业环境科学学报 ,2006 ,25(6) :1611-1615.

[3] 刘景双 ,于君宝 ,闫百兴 ,等 . 第二松花江水体中氮含量的动态变化分析 [J]. 环境科学 ,1997 ,18(1) :14-16.

[4] 徐祖信 ,尹海龙 . 平原感潮河网地区一维、二维水动力耦合模型研究 [J]. 水动力学研究与进展 ,2004 ,19(6) :744-751.

[5] 赵南霞 ,王鹏 ,郑彤 ,等 . 松花江有机毒物环境归宿模型及程序设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报 ,2001 ,33(4) :479-481.

[6] 余江 ,许刚 ,康建雄 . 河流一维水质预测模型在污染贡献值计算中的应用 [J]. 环境科学与技术 ,2006 ,29(S1) :32-34.

[7] 中华人民共和国环境保护部 ,国家发展改革委员会 . 松花江流域水污染防治规划 (2006—2010 年) [R]. 北京 :中华人民共和国环境保护部 ,国家发展改革委员会 ,2006.

[8] 汪德 . 计算水动力学 [M]. 南京 :河海大学出版社 ,1989.

[9] 杨国录 . 河流数学模型 [M]. 北京 :海洋出版社 ,1993 :76-89.

[10] 李光炽 ,王船海 . 流域洪水演进模型通用算法研究 [J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2005 ,33(6) :624-628.

[11] WU W M ,VIEIRA D A ,WANG S S Y. One-dimensional numerical model for nonuniform sediment transport under unsteady flows in channel networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2004 ,130(9) :914-923.

[12] 褚君达 . 河网对流输移问题的求解及应用 [J]. 水利学报 ,1992 ,23(7) :30-34.

[13] 郑孝宇 ,褚君达 ,朱维斌 . 河网非稳态水环境容量研究 [J]. 水科学进展 ,1997 ,8(1) :25-31.

[14] 薛亚莉 . 城市河流水量水质自适应控制模型研究 [D]. 南京 :河海大学 ,2006.

[15] 张明亮 . 河流水力及水质模型研究 [D]. 大连 :大连理工大学 ,2007.

(收稿日期 :2010-05-18 编辑 :高建群)