

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.06.011

南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果

童朝锋^{1,2}, 岳亮亮², 郝嘉凌², 邵宇阳², 严以新², 刘丰阳²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为研究南京市外秦淮河不同引调水方式对秦淮河水质变化的影响并评估调水效果,建立了外秦淮河一维河网水动力和水质模型,模拟不同时期不同水源补给,包括从秦淮新河闸抽引长江水和石白湖引水,以及在不同闸控系统运行调控方式下,外秦淮河水质的相应变化。结果表明,不同引调水方案条件下,只要满足引水水量,可以显著提高外秦淮河的水质,部分河段水质甚至可以提高 1~2 个等级。枯季从秦淮新河闸引水工况为 50 m³/s 时,外秦淮河水质 COD 可达 IV 类水, NH₃-N 达到 V 类水;汛期从石白湖引水工况为 60 m³/s 时,外秦淮河水质 COD 可达 III 类, NH₃-N 达到 V 类水标准。研究结论可为南京市外秦淮河环境整治调水调度运行提供参考依据。

关键词:引调水;水质模型;调水方案;外秦淮河;南京市

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2012)06-0049-06

Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing

TONG Chao-feng^{1,2}, YUE Liang-liang², HAO Jia-ling², SHAO Yu-yang²,
YAN Yi-xin², LIU Feng-yang²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influences of water diversion from the external Qinhuai River in Nanjing on the water quality of the Qinhuai River and to evaluate the effect of water diversion, a one-dimensional hydrodynamic and water quality river network model was developed. This model was used to simulate the water quality in the external Qinhuai River during different periods by different means of water diversion from multiple water sources, which include the Yangtze River and Shijiu Lake, and the variation of water quality using different brake control systems. The results show that, in different water diversion schemes, the water quality in the external Qinhuai River can be improved distinctly so long as enough water from the two water sources can be transferred into the external Qinhuai River, and the water quality in parts of the river can even be improved by one or two grades. During the dry season, the COD and NH₃-N concentrations will meet grade IV and grade V standards, respectively, after 50 m³/s of flow is pumped from the Yangtze River. During the flood season, the COD and NH₃-N concentrations will meet grade III and grade V standards, respectively, after 60 m³/s of flow is diverted from Shijiu Lake. These research results can provide references for integrated environmental regulation and operation of water diversion of the external Qinhuai River.

Key words: water diversion; water quality model; water diversion scheme; external Qinhuai River; Nanjing City

我国城市化水平在不断加快,城市用水高度集中引起污水的集中排放,造成市区及周边地区水环

境恶化;同时人们对城市水环境要求却不断提高,恢复城市河流生态环境以及景观要求成为近年来人们

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-007-05);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基本科研业务费自主研究项目(2010585312);河海大学中央高校基本科研业务费项目(2009B09614)

作者简介:童朝锋(1973—),男,副教授,博士,主要从事河口海岸动力水环境模拟研究。E-mail: chaofengtong@hhu.edu.cn

关注的焦点。改善河流水质的根本措施是有效控制并减少污染负荷的排入。但是,要截除所有排入河流的污染源比较困难。通过综合调水,科学调度河网水流,尽量提高水体流动性,是改善河流水质的一项有效辅助措施^[1]。卢士强等^[2-5]对上海市主要河流调水方案进行了水质影响分析,结果表明,实施综合调水方案可以在不同程度上改善相应区域水系的水质。刘云华等^[6]对深圳市河湾水系引调水工程进行分析,提出从不同角度考虑的调水方案。郑建中等^[7]针对太湖无锡水域河流进行了调水工程对其水质的影响分析,表明联合引调工程改善了两湖水体的流动状态,这一流动状态对贡湖取水口和梅梁湖水源地的水质改善是非常有利的。从解决水体污染的机理出发,引调清洁水源冲洗水质较差、污染严重的河道,在水体综合治理的全过程中,始终起到十分重要的作用^[8-10]。

为了研究外秦淮河的水质情况以及不同引调水方式对水质影响作用,通过水质数学模型计算,比较各污染物荷载对外秦淮水质影响,同时分析不同调水方式及调水量对水质、河道防洪、流场的影响,为提出最优调水方案提供科学依据。研究成果也可为城市内河引水工程的实施提供参考。

1 外秦淮河环境综合整治工程

秦淮河水系位于长江下游,古称龙藏浦,后称淮水,全长约 110 km,流域面积 2 600 多 km²,是南京地区第一大河,也被南京人誉为“母亲河”。外秦淮河绕南京城东南、西南两角经三汉河流入长江,长约 34 km。秦淮河流域示意图见图 1。

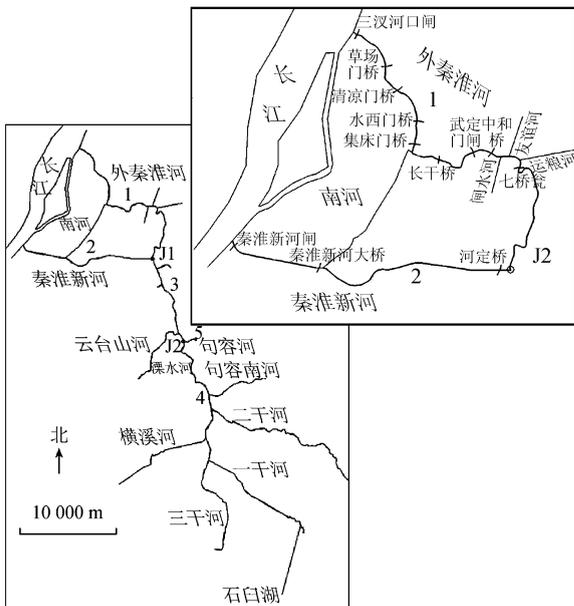


图 1 外秦淮河流域示意图

近年来,社会经济的快速发展给南京的水环境带来了很大影响。外源和内源污染物的排放、城市河湖闸控造成的水体滞流、河岸土壤硬化化和渠系化引发的生境缺损等问题的存在,使秦淮河的水环境质量逐渐恶化,根据实测资料分析,无引水前外秦淮河水体普遍出现劣 V 类国家地表水环境质量标准的情况,主要超标因子为 BOD₅、NH₃-N、TP 和 TN。

1.1 污染物排放

外秦淮河经过南京市主城区,由于工业废水和生活污水大量排入河道,导致外秦淮河水质普遍为劣 V 类水。

外秦淮河环境综合整治工程一期工程实施前,按人均每日生活污水排放量为 150 L,污染物排放浓度 $\rho(\text{COD})$ 为 225 mg/L 计算,2005 年南京市外秦淮河及南河的工业废水、生活污水及其污染物排放量统计如表 1 所示。外秦淮河环境综合整治工程一期工程实施后,外秦淮河武定门闸以下主城区河段,主要污水已经截流进入污水处理厂处理,按照实际截污率 70% 计算,工程完成后武定门闸以下河段排入外秦淮河的污水量和污染物量为原排污量的 30%,结果如表 2 所示。

表 1 整治工程前外秦淮河污水量及污染物排放量(2005 年)

河道	起迄点	污水排放量/ (万 t·d ⁻¹)		COD 排放量/ (t·d ⁻¹)	
		枯水期	汛期	枯水期	汛期
外秦淮河	运粮河—三汉河口	24.258	27.849	59.249	67.336
南河	西善桥—凤台桥	3.209	3.386	4.153	4.558
小计	运粮河口以下河道	27.467	31.235	63.402	71.894

表 2 整治工程后外秦淮河污水量及污染物排放量(2005 年)

河道	起迄点	污水排放量/ (万 t·d ⁻¹)		COD 排放量/ (t·d ⁻¹)	
		枯期	汛期	枯期	汛期
外秦淮河	运粮河—武定门闸	4.366	5.013	10.665	12.120
	武定门闸—三汉河口	5.968	6.851	14.575	16.565
	合计	10.334	11.864	25.240	28.685

从表 1 和表 2 可以看出,汛期污水排放量及污染物排放量比枯水期排放量要大,整治工程实施后汛期污水排放量为枯水期污水排放量的 1.14 倍。

1.2 综合整治工程设计

秦淮河流域内经济发达,流域内形成的径流量不能满足需水量的要求;秦淮新河枢纽建成后,抬高了流域内枯水期的河道水位,使用水条件得到改善,但同时也使流域内下游区域的河道水体成为静止水体,自净能力大大降低,随着流域内生活污水排放量的逐年增多,水环境日益恶化,外秦淮河水体普遍出

现劣V类水。为保护南京的母亲河,恢复古城自然风貌,创造优良人居环境,提升南京城市形象,南京市政府决定对秦淮河进行环境综合整治工程。

秦淮河环境综合整治是一项设计水利、环保、市政、园林、交通、旅游等多项子工程的庞大而复杂的工程。根据规划,整治工程分两期完成,其中三汊河口—运粮河长 16 km 的主城段为一期工程,规划 2005 年实施完成,运粮河口—江宁区西北村段长 18 km 的中游段为二期工程,规划 2010 年完成。2002—2005 年,随着外秦淮河环境综合整治工程(一期工程)的实施,外秦淮河南京主城区河段(运粮河口至三汊河口)进行了污水截流,直接排入秦淮河的污水量减少,加上引水冲污工程的实施,外秦淮河的水质得到改善。2005 年一期工程完成后,外秦淮河武定门闸以下主城区河段,主要的污水已经截流进入污水处理厂处理,考虑截流本身的效率,实际仍有 20% ~ 30% 进入外秦淮河。因此还应在截流污水的条件下,增加河道流量,通过多水源补给及闸控系统运行调控,引水调水、引清释污,提高秦淮河的水质。

1.3 闸泵抽引水系统

外秦淮河引水可由石臼湖和长江引水。汛期,石臼湖的水可以通过自流入外秦淮河,如不能满足要求,则从秦淮新河闸泵站抽取长江水;枯水期,石臼湖缺水,不能实现自流,因此外秦淮河须从秦淮新河闸泵站抽长江水补水。

三汊河口是外秦淮河引水排污调控计算的下游边界,为维持外秦淮河 6.5 m 的景观水位需要,三汊河口闸闸门一般为关闭状态,来水从闸门顶部溢出。

秦淮新河闸泵站有 5 台机组,枯水季节其抽水能力满足实际需要,根据污染物排放资料拟定引水量 30 m³/s、40 m³/s、50 m³/s、60 m³/s 等 4 种。

从秦淮新河闸引水至外秦淮河出三汊河口入长江,沿程有武定门闸。在引水期间,武定门闸开启,一般只要开启两个闸门,有洪水需要开启更多闸门,保证东电站水位不超过 8.5 m。

2 一维河网水质模型

秦淮河流域地处长江下游,属于湿润地区,降雨径流关系具有蓄满产流条件,采用目前在我国湿润和半湿润地区广泛应用的新安江三水源模型,为河网模型提供降雨期间的地表径流量。

2.1 模型方程

水动力模型采用四点线性隐式差分格式求解一维河流非恒定流方程组。模型的范围包括外秦淮河整个流域,河网概化见图 1。

水质模型采用隐式迎风差分格式对每一单一河道进行离散,描述单一河道污染物质运动及浓度变化规律的控制方程为带源项的一维对流扩散方程^[11-13],其表达式为

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + S_c + S \quad (1)$$

式中: C 为污染物断面平均浓度; A 为过水断面面积; Q 为过水断面流量; E_x 为纵向分散系数; S 为外部的源或汇项; S_c 为与污染物浓度有关的降解项; x 为空间横向坐标; t 为时间坐标。

2.2 初始边界条件

上游子流域水质边界根据各子流域旱地、水田面积及相应的排污参数,计算得出各子流域污染物排放量^[14-15],并根据该流域的径流量,得到相应的水质边界。上游石臼湖水水质采用 III ~ IV 类水边界浓度的平均值。秦淮新河闸所引长江水水质采用 II 类水。下游三汊河口闸控制水位为 6.5 m。

2.3 污染荷载

排入外秦淮河的污水主要是工业废水和生活污水,根据 2009 年南京市三汊河口闸管理处实际观测的外秦淮河污水排放量及污染物排放量估算,外秦淮河各河段污水排放量及污染物排放量见表 3。

表 3 外秦淮河各河段污水排放量及污染物排放量(2009 年)

河段	枯水期			汛期		
	污水 排放量/ (万 t · d ⁻¹)	COD/ (t · d ⁻¹)	NH ₃ -N/ (t · d ⁻¹)	污水 排放量/ (万 t · d ⁻¹)	COD/ (t · d ⁻¹)	NH ₃ -N/ (t · d ⁻¹)
响水河口— 南河河口	0.78	1.19	0.25	1.47	1.37	0.28
南河河口— 三汊河口闸	14.90	13.8	2.07	24.50	18.05	2.94
运粮河	11.00	6.90	7.22	12.30	1.61	1.79
响水河	1.15	1.28	0.36	2.20	1.44	0.41
南河	7.11	7.67	1.09	8.23	8.79	1.35
友谊河	1.43	1.55	0.22	2.22	1.67	0.25
合计	36.37	32.39	11.21	50.92	32.93	7.02

2.4 模型验证

河网水动力模型糙率系数的率定结果为:在外秦淮河下游包括秦淮新河,曼宁糙率系数为 0.022 ~ 0.025,在东山镇(节点 J1)上游稍有增大,系数为 0.025 ~ 0.032。秦淮河河网水质模型所采用的 COD 降解系数为 0.05 ~ 0.13 /d, 底泥释放系数为 0.18 ~ 0.40 g/(m² · d),NH₃-N 的降解系数为 0.08 ~ 0.2/d^[16]。

秦淮河河网水质模型采用实测水质资料进行模型验证,以上游来水量及武定门闸和秦淮新河闸实测闸门控制过程作为控制条件,同时根据外秦淮河沿程泵站开启状况和排污情况,进行水量水质数值模拟。如图 2 为 COD 质量浓度的计算值与实测值

的比较。从图2中看出,武定门闸处误差略大,可能是由于模型中点源的位置与点源数量与实际存在差异造成的。其他各点误差比较小,可应用于外秦淮河的水质计算。

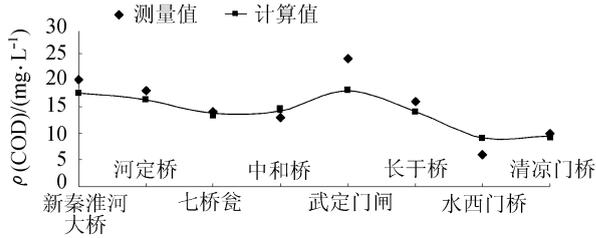


图2 秦淮河水系 COD 质量浓度计算值与实测值的比较

3 引调水对外秦淮河水质改善效果分析

根据2009年实际调度资料及排污资料,对外秦淮河水质变化进行了模拟,模拟结果如下。

3.1 枯水期

枯水期考虑最不利情况,不考虑降雨,利用秦淮新河道泵站从长江引水,引水工况采取引4d停15d的间断引水方式,设计引水流量分别为30 m³/s、40 m³/s、50 m³/s、60 m³/s等4种工况,ρ(COD)=15 mg/L,ρ(NH₃-N)=0.6 mg/L。上游石臼湖自流状况为20 m³/s,ρ(COD)=30 mg/L,ρ(NH₃-N)=1.7 mg/L。采用2009年实际入河污染荷载,模拟结果见图3~4。

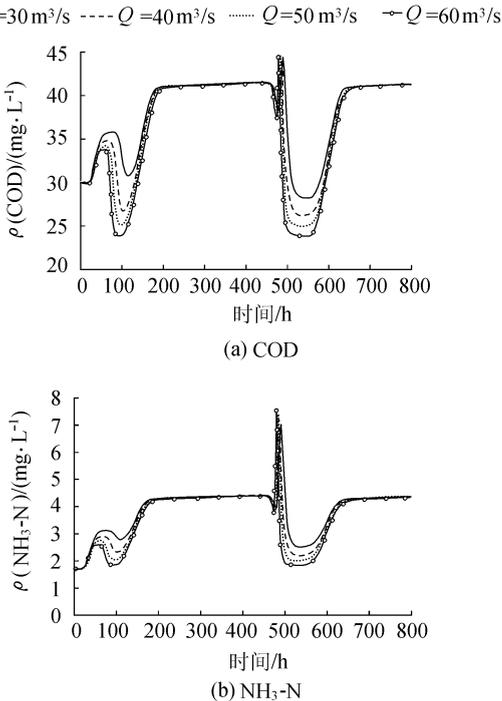


图3 枯水期不同流量下草场门桥污染物质量浓度变化

通过图3和图4可以看出,引水可以改善河道水质,引水量越大,改善作用越明显。在不引水期间,草场门桥处COD以及NH₃-N质量浓度均不达到V类水标准,凤台桥处COD质量浓度基本达到V

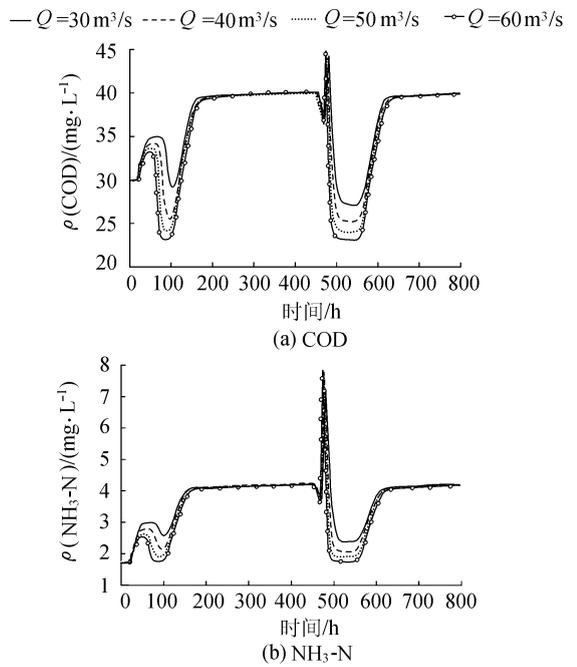


图4 枯水期不同流量下凤台桥污染物质量浓度变化

类水,NH₃-N质量浓度仍为劣V类水。引水期间,引水工况为30 m³/s时,草场门桥处COD质量浓度达到IV类水,NH₃-N质量浓度未达到V类水,凤台桥处COD质量浓度达到IV类水,NH₃-N质量浓度未达到V类水;工况为50 m³/s时,草场门桥处COD质量浓度达到IV类水,NH₃-N质量浓度基本达到V类水,凤台桥处COD质量浓度达到IV类水,NH₃-N质量浓度达到V类水。对第2次开始引水分析,引水初期,污染物浓度出现瞬间居高的现象,可能是由于引水,把上游的污水顶拖到下游,造成下游污水积聚,污染物浓度增大。引水大约30h后,水质浓度下降,引水大约70h后,水质浓度达到稳定状态,稳定状态持续30~50h,引水96h后,停止引水,此时水质仍处在稳定状态,停止引水约10h后,水质开始恶化,水质浓度开始增大,停止引水约100h后,水质浓度达到稳定状态。外秦淮河不同引水量下沿程各断面浓度变化见图5,从图5中可以看出,沿程各断面浓度逐渐增加,引水量越大,各断面浓度值越小;外秦淮河COD质量浓度维持在IV类水,引水工况为50 m³/s时,NH₃-N浓度可达V类水。

3.2 汛期

汛期利用流域降雨径流模型,即新安江三水源模型计算秦淮河流域的降雨径流过程,为河网水利计算提供边界。汛期大部分情况下,石臼湖湖水可通过自流流入外秦淮河释污,引水方式采取连续引水的方式,设计引水流量为30 m³/s、40 m³/s、50 m³/s、60 m³/s 4种工况,COD质量浓度为15 mg/L,NH₃-N质量浓度为0.6 mg/L。模拟结果如下:

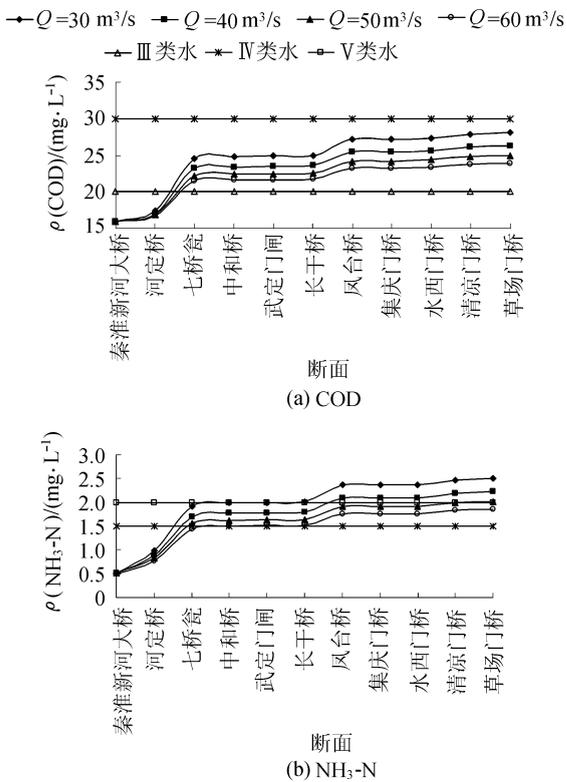


图5 枯水期沿程断面污染物质量浓度变化

从图6和图7得出,草场门桥处,引水大约80h后,COD质量浓度基本达到平衡状态,引水大约55h后,NH₃-N质量浓度基本达到平衡状态,引水工况为60 m³/s时,COD质量浓度基本达到Ⅲ类水,NH₃-N质量浓度基本达到V类水。风台桥处,引水大约70h后,COD浓度基本达到平衡状态,引水大约48h后,NH₃-N浓度基本达到平衡状态,引水工况为

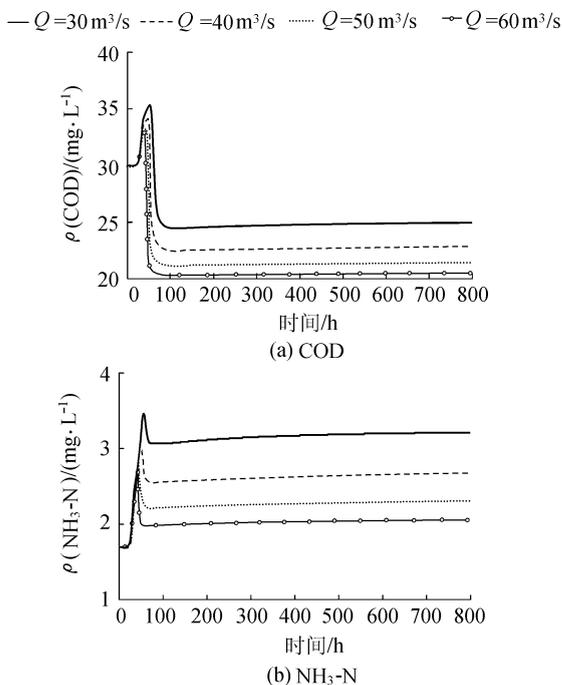


图6 汛期不同流量下草场门桥污染物质量浓度变化

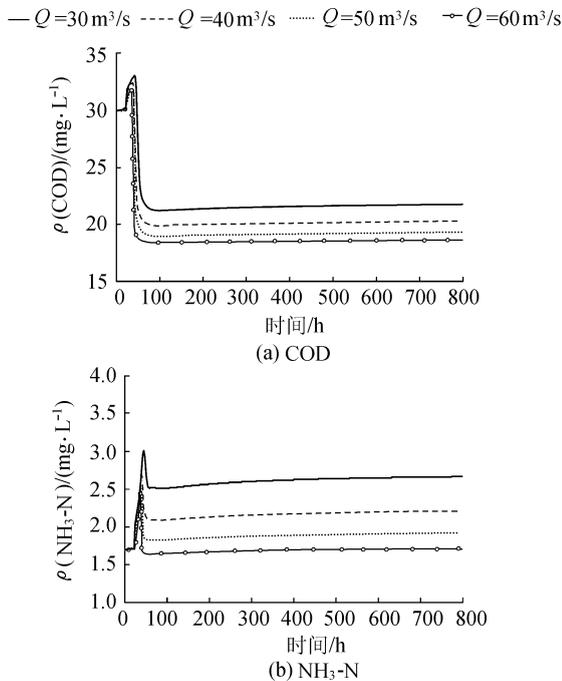


图7 汛期不同流量下风台桥污染物质量浓度变化

40 m³/s时,COD质量浓度基本达到Ⅲ类水,NH₃-N质量浓度基本达到V类水,引水工况为50 m³/s时,COD质量浓度已达到Ⅲ类水,NH₃-N质量浓度已达到V类水。汛期外秦淮河不同引水量下沿程各断面浓度见图8,从图中可以看出,COD质量浓度达到Ⅳ类水,引水工况为60 m³/s时,外秦淮河全河段COD质量浓度基本达到Ⅲ类水,NH₃-N质量浓度基本达到V类水。

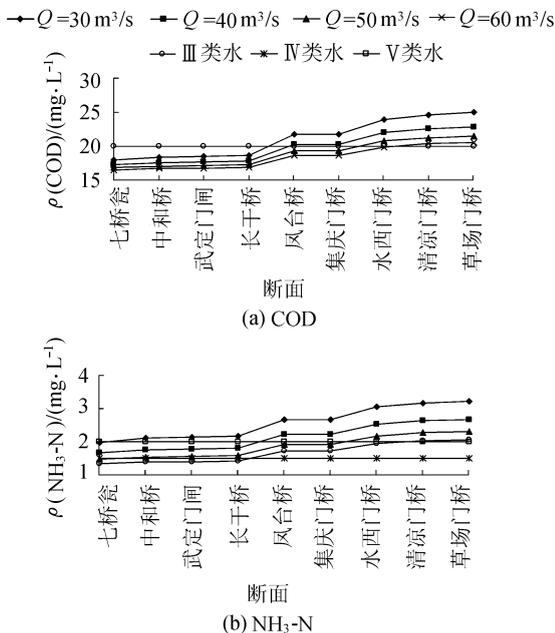


图8 汛期沿程断面污染物质量浓度变化

4 结论

城市水环境综合整治关键在于控源和治污,然

而在有条件的地区充分利用现有的水利工程,采取引清冲污,发挥当地的水资源优势及闸控条件改善水环境,可以促进水体的良性循环。

a. 建立了一维河网水质模型,并利用实测水质数据对模型进行了验证,效果令人满意,表明模型适用于外秦淮河引水调度模式的研究。

b. 利用该模型对外秦淮河不同引水规模、闸控方式和引水方式的引调水方案进行了水量水质的数值模拟,计算结果表明引水可以改善河道水质,引水量越大,改善作用越明显。枯季从秦淮新河闸引水工况为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,外秦淮河水质 COD 质量浓度可达Ⅳ类水, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度达到Ⅴ类水;汛期,石臼湖引水工况为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$,外秦淮河水质 COD 质量浓度可达Ⅲ类水, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度达到Ⅴ类水。

c. 根据模拟结果以及考虑外秦淮河引水量的沿程损失、引水的间隙性和污染物不连续排放特点,可以得到下列结论:枯水期,建议引水工况取 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,即取水量为 432 万 m^3/d ,以达到Ⅴ类水质标准。汛期首先考虑从石臼湖自流引水,实际引水工况控制在 $50 \sim 60 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上为佳;若石臼湖不能满足自流条件,则需要从长江引水,以改善外秦淮河水质。

参考文献:

[1] 徐祖信. 河流污染治理技术理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003: 498-545.

[2] 卢士强,徐祖信,罗海林,等. 上海市主要河流调水方案的水质影响分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2006,34(1): 32-36.

[3] 徐祖信,卢士强. 平原感潮河网水质模型研究与应用[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(2): 182-188.

[4] XU Zu-xin, LU Shi-qiang. Study on hydrodynamic model for tidal plain river-networks [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2003, 15(2): 64-70.

[5] 徐祖信,罗海林,屠鹤鸣. 苏州河调水对水质的改善作用分析[J]. 上海环境科学, 2003,22(增刊): 43-46.

[6] 刘云华,董增川,李朝方,等. 深圳河湾水系水质改善引调水工程[J]. 水资源保护, 2008,24(3): 31-34.

[7] 郑建中,王苓,尤征懿,等. 调水引流对太湖无锡水域湖流的影响[J]. 水利水文自动化, 2009(4): 47-50.

[8] 徐贵泉,褚君达. 上海市引清调水改善水环境讨论[J]. 水资源保护, 2001(3): 26-30.

[9] 唐礼智,汤建中. 上海市苏州河段水质污染综合治理研究[J]. 地理学与国土研究, 2001,17(4): 81-84.

[10] 应荣弟,徐华. 改善崇明岛河网水质引清调水量计算[J]. 吉林水利, 2006(4): 6-8.

[11] 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.

[12] CHU Jun-da, XU Hui-ci, YE Zu-de, et al. Unsteady water quality model with multiparameter for the river network [R]. Hong Kong: Proc Inter Sympo Envir Hydraulics, 1991.

[13] 褚君达,徐慧慈. 河网水质模型及其数值模拟[J]. 河海大学学报, 1992,20(1): 16-22.

[14] BRIAN R B, JOHN C I, JOHN L K, et al. Hydrological simulation program-fortran, hspf, user's manual [M]. California: AQUA TERRA Consultants. Mountain View, 2001.

[15] SHEN J, PARKER A, RIVERSON J. A new approach for a windows-based watershed modeling system based on a database-supporting architecture [J]. Environmental modeling and software, 2005(20): 1127-1138.

[16] 席燕萍,逢勇. 石臼湖引水改善秦淮河水环境研究[J]. 江苏环境科技, 2008,21(4): 6-8.

(收稿日期:2011-11-28 编辑:高渭文)

+++++
(上接第 11 页)

[6] 贾锁宝,马蕴芬,万晓凌. 1999 年梅雨期太湖暴雨洪水分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2002, 30(增刊 2): 72-75.

[7] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告(2010 年)[R]. 上海:水利部太湖流域管理局, 2010.

[8] 张红举,禹雪中,马巍. 浅水湖泊纳污能力计算研究:以太湖为例[C]//中国环境科学学会第十三届世界湖泊大会论文集. 北京:中国农业大学出版社, 2009: 2185-2188.

(收稿日期:2012-01-29 编辑:徐娟)

+++++
(上接第 48 页)

[5] 蒲文龙,郭守泉. 主成分分析法在环境监测点优化中的应用[J]. 煤矿开采, 2004,9(4): 6-7.

[6] 陆德中,桂志成,李志亮. Excel 2000 在水质监测中的应用[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2007,24(2): 47-49.

[7] 姜欣. “均值偏差法”在河流水质监测断面优化中的应用[J]. 黑龙江环境通报, 2006,30(3): 44-45.

[8] 郭小青. 贴近度法优化城市内河水水质监测点[J]. 科技通报, 2005,21(3): 360-363.

[9] 陈鸿. t 检验在环境监测数据评价分析中的应用[J]. 福建环境, 2001,18(5): 43-44.

[10] 赵岩. 基于 Excel 的 t 检验方法[J]. 吉林化工学院学报, 2005,22(3): 56-58.

(收稿日期:2011-11-08 编辑:彭桃英)