

淮河流域多闸坝控制下环境变化与模拟

蒋 艳¹ 夏 军² 李 翀¹

(1. 中国水利水电科学研究院 北京 100038 ; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要 利用 MIKE 11 模型系统模拟淮河、沙颍河、洪河、涡河和淝河的洪水演进和水质变化过程。水动力学模型的流量模拟值与实测值吻合较好,除了某些闸坝附近的水文站,大多数水文站的模拟水位与实测水位值一致。水质模型模拟 COD、氨氮和溶解氧浓度,考虑到各种不确定性因素,认为水质模拟结果与实测值的误差在允许范围之内。闸坝调控方案分析了蚌埠闸、周口闸和横排头闸分别增加流量对下游河段水质浓度的影响,淝河六安市以下河段,通过增加横排头坝下流量,其水质有显著改善,而通过增加流量对沙颍河和淮河(吴家渡)水质改善效果不明显。因此,只有在确保污染源达标排放的同时,进一步削减污染物的入河排污量,才能有效地改善淮河干流及淮北支流的水环境污染现状。

关键词 水利工程 淮河流域 水动力模型 水质模型 闸坝调度 下泄流量

中图分类号 :TV64 ;X522 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)S1-0037-04

1 研究背景

淮河流域面积为 $27 \times 10^4 \text{km}^2$, 占国土面积的 3.5%, 水资源量占全国的 3.4%, 耕地却占到全国的 15.2%, 人口占全国的 16.2%, 水资源的利用率超过 60%。由于独特的气候条件、水系形态、地形地貌,淮河流域成为我国水旱灾害发生最为严重和频繁的地区之一。淮河是我国第一条全面治理的大河,为了解决淮河的洪水问题和水资源短缺问题,截至 2000 年,流域修建了约 1.1 万座蓄水水库和拦河节制闸蓄水工程,形成了集防洪、除涝、灌溉、供水为一体的综合性水利工程体系。

淮河流域水利工程建设后破坏了水系的连通性,引起了天然径流过程的大幅度改变,同时未经过处理的大量工业废水和生活污水直接排入,污水排放总量远远超过了水环境容量,对河流生态与环境造成了的重大影响。淮河流域现有水库和闸坝为了保证灌溉等经济用水,大多数闸坝在整个枯水期基本关闭,排入河道的工业废水和生活污水在闸坝前大量集聚,当汛期首次开闸泄洪时,高浓度污水集中下泄,极易造成突发污染事故,致使淮河干流沿岸城镇供水中断、洪泽湖等水域鱼虾大量死亡。这种因

污水团集中下泄而出现的大面积污染事故在 1994 年、2001 年、2002 年和 2004 年相继发生,直接威胁沿岸城镇居民饮用水安全,严重影响淮河流域下游城镇的经济和社会稳定。

水利工程建设促进了人类社会的经济发展,改善了局地的温度、湿度和区域小气候。但工程的建设因河流情势变化会对坝下与河口水生态环境产生潜在影响,由于阻断了河流的连续性,上下游水动力特性的巨大变更使原有的河势、泥沙输移、河口形态、生物物种的生存空间等都随之发生变化,特别是大坝的阻隔作用对生物物种、珍稀洄游性鱼类产生了较大的影响^[1-3],大型河流系统受到大坝的影响而面临着更高的水资源安全与生态安全问题^[4-7]。

目前国内外水利工程的优化调度改善水环境的实践均为单一的河流或湖泊,但对于复杂河流网络水系的研究尚处于探索阶段,河网系统的水动力条件极其复杂。又由于各个河流、湖泊污染程度存在较大差异,在污染迁移过程中避免水体污染物质从高污染负荷水体向低污染负荷水体流动,应使水质较差的湖泊得以较大程度的冲污稀释,其水利工程改善水环境的机理也与单一河流湖泊有很大区别。

淮河流域水库、湖泊、节制闸和分蓄洪区等水利

工程比较完善,具备了利用洪水资源冲污、释污和净污的水利工程条件。以往的闸坝调度研究以防洪、航运及灌溉调度为主,主要采用依赖于实测资料 and 个体经验的定性或半定量的描述和推理,以及局部的水力数值模拟和缺乏细节的宏观水文概算。淮河干支流水量、水质联合调度要充分利用淮河流域洪水资源,维持自然河川径流过程下的水域生态环境,其复杂性不仅体现在洪水演进和污染物对流扩散、降解的数值模拟过程的复杂,而且还体现在众多水利设施之间的多目标联合调度,建立将水库、闸坝、湖泊和淮河干支流河网有机地联系起来,实现全流域的水量、水质联合优化调控模式。

2 研究区域

研究区为淮河流域洪泽湖以上区域,面积为 $13.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括安徽、河南、湖北、江苏 4 省的部分地区。

2.1 自然特征

研究区域西南部为山区,高程为 500 ~ 2 000 m,除了山区外大部分地区地势平坦,高程在 20 ~ 100 m 之间。其中,旱地占 69.2%,水田占 15%,森林覆盖率仅 12.6%,小城镇和村庄遍布整个研究区。降雨量由南向北递减,南部山区为 1400 mm,而北部沿黄地区仅 600 mm 左右,年平均径流量由南部的 900 mm 降至北部的 50 mm,多年平均蒸发量为 500 ~ 600 mm。

2.2 水系特征

研究区域水系呈不对称的扇形分布,淮河干流偏南。南岸支流众多,均发源于山区和丘陵区,源短流急,较大的支流有史灌河、淝河、东淝河、池河等。史灌河、淝河是南岸主要支流,均发源于大别山区。北岸主要支流有洪河、颍河、涡河、包浍河等。颍河发源于伏牛山区,为淮河最大的支流,洪河发源于伏牛山区,其余均为源于黄河南堤的平原河道。淮河主要支流都在中游,由于南岸支流洪水汇集迅猛,而淮河中游河段比降小,洪水下泄十分缓慢。淮河以南和西部山区为水资源的开发利用修建了许多大型水库,平原河流大多为闸坝等人工建筑物所控制。

统计主要控制站多年平均天然径流量(1956 ~ 2000 年),淮滨为 62.42 亿 m^3 ,蚌埠为 304.93 亿 m^3 ,班台为 27.57 亿 m^3 ,横排头为 33.92 亿 m^3 ,周口为 39.03 亿 m^3 ,阜阳为 52.27 亿 m^3 ,蒙城为 13.23 亿 m^3 。

2.3 水质污染情况

以 2000 年为水质评价基准年,评价河长为 13 706 km(126 条河流,529 个监测点),全年期评价水质为 I 类的河长占总评价河长的 0.57%,II 类占 11.15%,III 类占 17.96%,IV 类占 16.64%,V 类占

7.18%,劣 V 类占 46.5%,超标河长达 70.32%。主要超标项目为 COD 和氨氮。位于淮北的 3 大支流沙颍河、涡河和洪河的水质多为超标,而山区河流和淮南诸河流水质较好,淮河干流污染较严重的河段是息县段、王家坝段和蚌埠吴小街段,颍河上游污染程度小于中下游地区,中游的周口黄桥至界首段污染较严重,但汛期水质较非汛期有所好转。由于六安市的污废水直接排入淠河,并且淠河上游水库的大部分清水用于灌溉和引到其他地区,造成淠河下游河段的水量少水质较差,其他淮河以南支流水质较好。因此,选取水污染防治的关键性河段(如淮河干流、沙颍河、洪河、涡河和淠河)作为模型模拟区域,以干、支流的主要闸坝或水文站点作为控制节点,即淮河干流上游淮滨,下游小柳巷,沙颍河上游周口闸,洪河上游班台闸,涡河上游亳州,以及淠河上游横排头闸。

3 研究方法

模型采用丹麦水力研究所开发的 MIKE 11 模型软件^[8-9]。MIKE 11 是一个模拟河流、渠道、湖泊和河口的一维模型系统,用水动力学模块(HD)和水质模块(WQ)分别模拟水位流量过程与水质过程,选取的水质参数是 COD、氨氮和溶解氧。模拟的河流网络结构如图 1 所示。

淮河干流的模拟范围是从淮滨至小柳巷,包括蚌埠闸、行蓄洪区(官钗分洪道、濠河分洪道、濠洼蓄洪区)以及城西湖区;沙颍河从周口至入淮河口,包括槐店、阜阳和颍上 3 个主要水闸;洪河从班台至入淮河口;涡河从亳州至入淮河口,包括涡河大寺闸、涡阳闸和蒙城闸 3 个主要水闸;淠河从横排头闸下至入淮河口。模型将闸坝控制工程作为内边界条件,选取 MIKE 11 模型中的 Regulating Structure 来描述各个闸坝控制工程,通过闸坝的下泄流量来实现其调度运行过程,从而避免了闸坝启闭及开启高度等问题。

4 模拟结果

4.1 水动力学模型

模型率定考虑了地形条件(横断面与糙率)、水位(尤其是闸上水位)和闸坝下泄流量,用 2002 年和 2003 年的逐日水位、流量资料进行了率定,用 2004 年和 2005 年的逐日水位、流量资料进行了验证。模型的率定与验证采用相同的糙率系数:沙颍河为 0.02 ~ 0.05,洪河为 0.033 ~ 0.100,淠河为 0.05 ~ 0.15,涡河为 0.025 ~ 0.070,淮河干流为 0.025。分别对王家坝、鲁台子、润河集、吴家渡、蒙城闸(闸下)

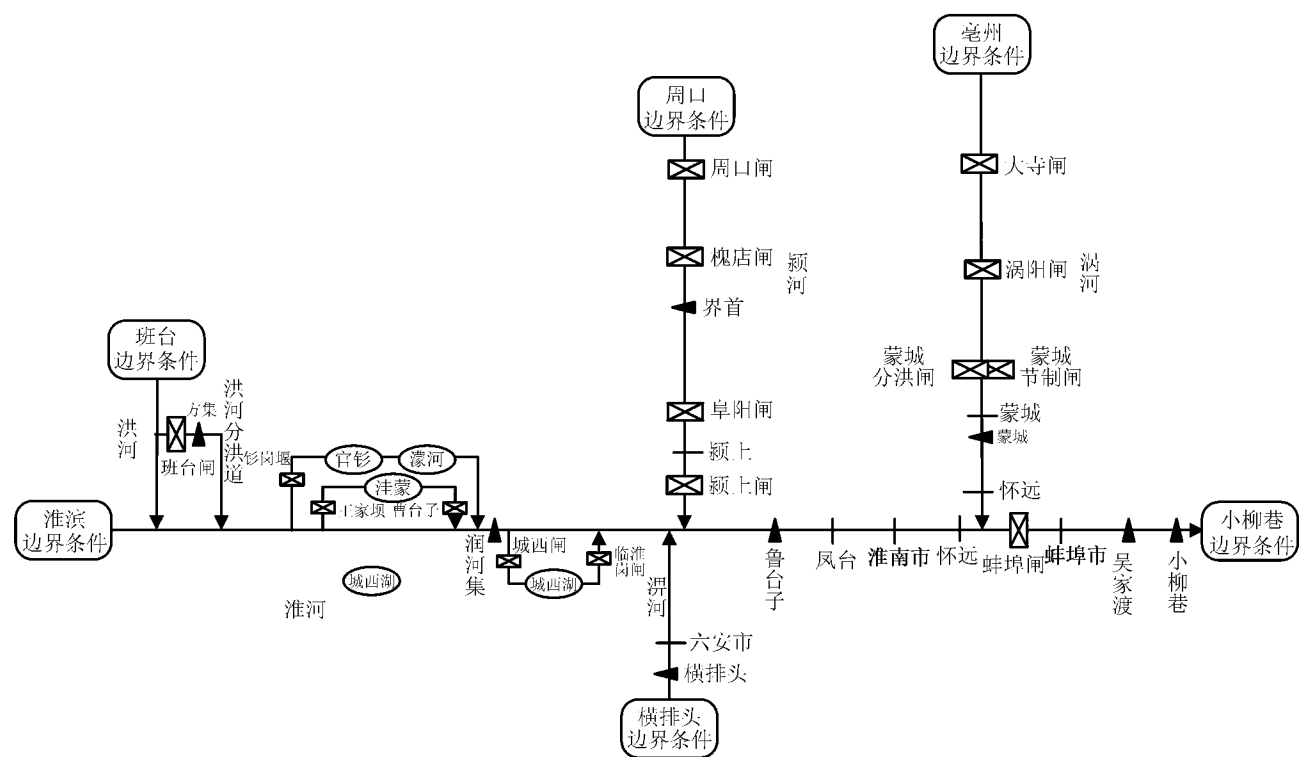


图1 河流网络结构

阜阳闸(闸下)和颍上闸(闸下)的流量过程进行分析 ,实测值与模拟值拟合较好 ,年累积误差在 2% 以内 ,对王家坝、鲁台子、润河集、吴家渡、蒙城闸(闸上)、阜阳闸(闸上)和颍上闸(闸上)的水位过程进行分析 ,除了一些靠近大型闸的河段以外 ,实测与模拟水位的拟合误差较小 ,其中淮河干流实测与模拟水位的拟合误差小于沙颍河和涡河。分析闸上水位模拟误差的原因 :一是因为河槽蓄水能力小 ,如沙颍河和涡河 ;二是由于闸的控制运用(下泄流量的变化) ,闸上游的水位季节性变化较大。

4.2 水质模型

水质模型率定的参数见表 1 ,对于复氧系数 ,在淠河用了 O 'conner/Dubbins 经验公式 ,在淮河和沙颍河采用恒定的复氧系数(0.5 L/d)。

水质模型对王家坝、蚌埠闸(闸上)和阜阳闸(闸上)的 COD、氨氮和溶解氧浓度进行了分析。王家坝和蚌埠闸(闸上)的 COD 模拟值与实测值吻合较好 ,但在 2004 年和 2005 年的 5 ~ 7 月间 ,模拟值较实

测值偏大 ,由于 2005 年工业负荷排放较 2004 年显著增加 ,污染负荷是以年平均值估算的 ,并未考虑污染源排放的年内变化过程。在沙颍河下游的阜阳闸 ,取样位置在闸的上游 ,而实际上 ,阜阳市在闸下排放污水 ,在比较模拟与实测值时 ,COD 模拟值偏小。

王家坝、蚌埠闸(闸上)和阜阳闸(闸上)氨氮模拟结果中 ,王家坝和蚌埠闸(闸上)模拟值高于实测值 ,而阜阳闸(闸上)氨氮的实测值低于模拟值 ,这可能是由于含有高浓度氨氮的污水废水排入所致。

溶解氧模拟是一个综合过程 ,包括氧气产生机制(复氧、藻类生长的产氧)和耗氧过程(BOD 降解、硝化、沉积物耗氧和动植物呼吸)。对于王家坝、蚌埠闸(闸上)和阜阳闸(闸上)溶解氧模拟值与实测值拟合较好。

5 闸坝调控方案模拟

淮河流域闸坝众多 ,必然在闸控河道形成污水

表 1 水质模型率定的基本参数

参数	取值	参数	取值
COD 衰减系数	0.05(L·d ⁻¹)	光合作用产氧的最大日值/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	3.5
BOD 的衰减系数(20℃)	0.1(L·d ⁻¹)	动植物耗氧量/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	3.0
20℃时氨氮的衰减系数	0.1(L·d ⁻¹)	沉积物需氧量/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	0.5
淠河 COD 衰减系数	0.3(L·d ⁻¹)	有机物的重新悬浮/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	0.5
淠河 BOD 衰减系数(20℃)	0.2(L·d ⁻¹)	有机物的沉降速率/(m·d ⁻¹)	0.1
淠河氨氮衰减系数(20℃)	0.3(L·d ⁻¹)	复氧系数(淠河除外)/(L·d ⁻¹)	0.5
反硝化	0.1(L·d ⁻¹)	复氧系数(淠河)	由 O 'Conner/Dubbins 确定

积蓄,在遇到适当的径流条件时,就可能出现污水团集中下泄的情况,造成淮河干流的污染事件。不合理的闸坝调控,将加重水污染事件,合理的闸坝调控措施,有可能避免污染事件,改善河道水质。

按《淮河流域水污染防治规划》(2006~2010年),以2010年为污染防治规划目标年,到2010年水质目标是淮河干流水质基本达到Ⅲ类,洪河、颍河等支流水质基本达到Ⅳ类;从污染防治角度看,未来淮河流域污染源的主要变化将是由于人口增长和人均耗水量增加而引起废水量和污染负荷的增加;预计到2010年,项目研究范围内主要城市的人口、工业用水和城市用水将分别增加大约15%、20%和25%。

闸坝调控方案主要是分析增加蚌埠闸、周口闸和横排头坝下流量对其下游河段水质的影响,其中蚌埠闸和横排头增加20%的流量,周口闸增加10%,其增加流量均为上游水库下泄水或干流源头来水,水质类别为Ⅱ类水。

从预测结果(图2、图3和图4)分析,对于淠河六安市以下河段,通过增加横排头坝下的流量,对六安市下游河段的水质改善最为显著,只有6月和8月非常短的时段水质没有改善,非汛期的COD的质量浓度降低50%左右。但在沙颍河和淮河(吴家渡)效果不明显,仅在2010年下半年水质略有改善。吴家渡站2010年9~11月COD的质量浓度约降低10%~25%,然而需要大量的上游来水($73\text{ m}^3/\text{s}$),在实际上很难做到。

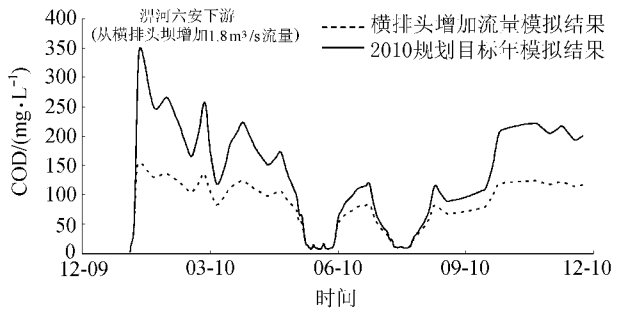


图2 淠河六下游流量模拟结果

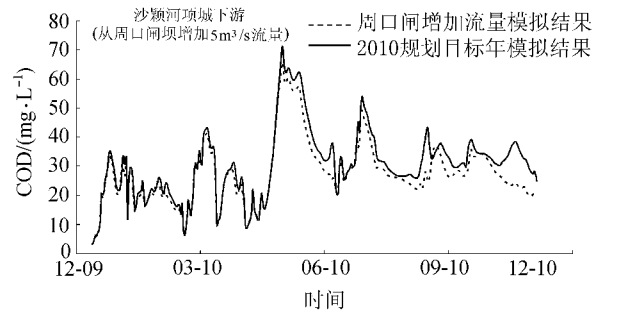


图3 沙颍河项城下游流量模拟结果

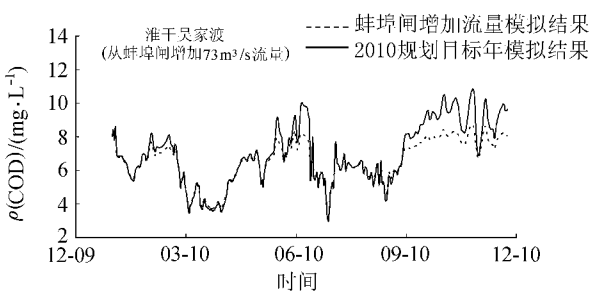


图4 淮河吴家渡流量模拟结果

6 结 论

从模型角度分析,建立淮河流域水动力学与水质模型相当困难,尤其是沙颍河和涡河水系,非汛期完全由闸门控制,与其说是自然河流,还不如说是一系列的水库串联系统。然而在汛期,这些河流的流量增大,受闸门控制的影响不大,近似于自然河流状况。由于自然河系与水库系统的特性不同,这种由河流、水库相互转换的系统加大了模型模拟的难度和复杂性。

与有恒定流量的河流相比,水库易受区域污染、废水排放的影响,即使是较小的污废水排放,对水质的局部影响也非常显著。在目前的模型设置中,由于大断面资料通常为1000m,只能将城镇的点污染源作为边界入流,污染源调查未包括大量小型企业的排污量,同时工业点污染源的排放位置难以确定,模型中排污负荷输入有一定偏差,污染物的监测数据也存着系统误差。进入水体并输送至模拟河流的负荷主要是流域内非点源污染负荷,而非点源污染负荷资料估算是根据一天的实测资料估算一年的总负荷量,这些因素都会造成水质模型率定结果的偏差。但是,如果将水质模拟所有的不确定性因素都考虑在内,模拟值与实测值之间的误差还是在可以接受的范围内。

对于淠河,增加横排头坝下流量,对六安市下游河段的水质改善效果显著,而对于沙颍河和淮河(吴家渡),其效果则不明显,仅在2010年下半年水质略有改善。吴家渡站2010年11月COD浓度约降低10%~25%,但这需要大量的水($73\text{ m}^3/\text{s}$),实际上很难做到,这对于通过闸坝的调控来改善淮河干流及淮北支流水质的作用不大。淮河流域水质不达标主要是由于沙颍河、洪汝河、涡河附近大量的生活与工业污染废水超负荷排放所致,河流纳污能力大幅度降低,对淮河干流的生活用水构成严重的污染威胁。针对枯水期水环境容量小的特点,在确保工业污染源达标排放的同时,需要采取进一步的措施削减入河排污量,根据淮河流域目前 (下转第54页)

求得附加应力系数 $K'_z = 0.903$, M_1 处的竖向附加应力为

$$\sigma_z = \sigma_{z1} - \sigma_{z2} - \sigma_{z3} = K'_z p_n = 51.471(\text{kPa})$$

用奥斯特伯格方法求解的结果为 51.500kPa ,与本文方法 1 求解的结果 51.471 kPa 相比误差很小 ,可见本文方法具有一定的可靠度。同理 ,也可以求出 M_1 点的侧向附加应力和附加剪应力 ,分别为 $\sigma_x = 17.613 \text{ kPa}$, $\tau_{xz} = 0.741 \text{ kPa}$ 。

2.2 求 M_2 处的竖向附加应力

由于 M_2 处于堤坝宽度范围外 ,奥斯特伯格方法不能够求得解答 ,采用本文方法 1 和方法 2 都可以求解 M_2 处的竖向附加应力 ,以下应用方法 2 求解。由式(21)第 1 式可以求得附加应力系数 $K'_z = 0.101$, M_2 处的竖向附加应力为

$$\sigma_z = \sigma_{z3} - \sigma_{z2} - \sigma_{z1} = K'_z p_n = 5.757(\text{kPa})$$

同理 ,也可以求出 M_2 点的侧向附加应力和附加剪应力 $\sigma_x = 14.307 \text{ kPa}$, $\tau_{xz} = 8.608 \text{ kPa}$ 。

3 结 语

奥斯特伯格方法的优点在于可以较简便地求解堤坝宽度范围内地基中任意一点 M 的竖向附加应力 ,但是当 M 点位于堤坝宽度范围外的地基中时 ,奥斯特伯格方法就不再适用 ,无法满足工程计算的需要 ,该课题 50 余年没有新突破。本文提出的普遍解答方法克服了文献[9-10]的适应缺陷 ,可以方便

地求解出堤坝范围内和范围外地基中任意一点附加应力的 3 个分量 ,计算适应性广 ,具有一定的使用价值。对于土的弹塑性特性及水平位移对土石坝(堤)基础应力的影响 ,笔者将作为后续课题进一步深入研究。

参考文献 :

[1] OSTERBERG J O. Influence value for vertical stresses in a semi-infinite mass due to an embankment loading[C]/Proc 4th Int Conf Soil Mechs Fndn Engrg.[S.1.][s. n.],1957.1 : 393-398.
[2] 高大钊.土质学与土力学[M].3 版.北京 :人民交通出版社 2001.
[3] 卢廷浩.土力学[M].2 版.南京 :河海大学出版社 2005.
[4] 施建勇. Soil mechanics[M].北京 :人民交通出版社 2004.
[5] 松冈元.土力学[M].罗汀 ,姚仰平 ,译.北京 :中国水利水电出版社 2001.
[6] 陈晓平 ,陈书审.土力学与地基基础[M].武汉 :武汉工业大学出版社 2002.
[7] 赵树德.土力学[M].北京 :高等教育出版社 2001.
[8] 刘成宇.土力学[M].北京 :中国铁道出版社 2005.
[9] 雷胜友 ,惠会清.垂直条形均布荷载下的地基附加应力推导[J].西安工业大学学报 2008 28(1) :72-75.
[10] 邵艳.梯形分布荷载下地基附加应力计算方法[J].合肥工业大学学报 :自然科学版 2004 27(5) :575-578.

(收稿日期 2009-01-12 编辑 :高建群)

(上接第 40 页) 水污染联防中污染源总量限排意见 ,来制定淮河流域未来的水质管理方案与规划目标 ,才能有效地改善淮河流域水污染现状 ,有效地避免突发性污染事故的发生。

参考文献 :

[1] THI V H L , HUU N N , ERIC W. The combined impact on the flooding in Vietnam 's Mekong River delta of local man-made structures , sea level rise , and dams upstream in the river catchmen[J]. Estuarine , Coastal and Shelf Science , 2007 , 71 (1-2) : 110-116.
[2] WILLIAM L G. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers[J]. Geomorphology , 2006 , 79(3/4) : 336-360.
[3] LUCIA S , GUSTAVO M. The world commission on dams : a fundamental step towards integrated water resources management and poverty reduction. A pilot case in the Lower Zambezi , Mozambique[J]. Physics and Chemistry of the Earth , 2005 , 30(11/16) : 976-983.
[4] WANG Hou-jie , YANG Zuo-sheng , YOSHIKI S. Interannual

and seasonal variation of the Huanghe(Yellow River) water discharge over the past 50 years : connections to impacts from ENSO events and dams[J]. Global and Planetary Change , 2006 , 50(3/4) : 212-225.
[5] LIU Chang-ming , XIA Jun. Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China[J]. Hydrology . Process , 2004 , 18 : 2197-2210.
[6] XIA JUN , CHEN Y D. Water problems and opportunities in hydrological Sciences in China[J]. Hydrological Science Journal , 2001 , 46(6) : 907-921.
[7] STONE R , JIA H. Going against the flow : the chinese government has begun a massive engineering project to divert water from three southern rivers to parched north with unknown consequences[J]. SCIENCES , 2006 , 313(25) : 1034-1037.
[8] Danish Hydraulic Institute. A modeling system for rivers and channels User Guide[R]. Denmark : Danish hydraulic Institute , 2003 : 29-201.
[9] Danish Hydraulic Institute. A modeling system for rivers and channels reference manual[R]. Denmark : Danish Hydraulic Institute , 2003 : 145-147.

(收稿日期 2008-08-27 编辑 :方宇彤)