

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.004

南四湖截污导流工程水量水质联合调度运行研究

刘远书¹, 杜 婷², 黄跃飞², 王 玥², 柏 睿²

(1. 武汉大学经济与管理学院, 湖北 武汉 430072; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 选择典型截污导流工程——南四湖入湖河流截污导流工程, 根据水量和水质条件对设计运行方案进行初步优化, 将优化结果与原工程设计调度方案效果进行对比分析。结果表明: 联合水量和水质动态调整工程的运行调度能够更有效地发挥工程的截污拦蓄作用, 保障南四湖输水期的水质安全。

关键词: 南水北调东线工程; 截污导流工程; 水量水质联合调度; 南四湖; 东鱼湖

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)05-0395-05

Effect of pollution prevention and water diversion project based on combined water quantity and quality regulation in Nansi Lake

LIU Yuanshu¹, DU Ting², HUANG Yuefei², WANG Yue², BAI Rui²

(1. Economics and Management School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A typical pollution prevention and water diversion project for rivers flowing into Nansi Lake was studied. Based on water quantity and quality conditions, the operation scheme of the project was initially optimized, and then the optimized scheme was compared with the original operation scheme. The results show that combined water quantity and quality dynamic regulation can fully maximize the project's capacity for pollution prevention and storage and ensure the safety of the water quality of Nansi Lake during the water transfer period.

Key words: South-to-North Water Diversion Eastern Route Project; pollution prevention and water diversion project; combined water quantity and quality regulation; Nansi Lake; Dongyu Lake

南水北调东线工程成败的关键在治污。东线一期规划实施截污导流工程共 25 项, 其中江苏省境内 4 项、山东省境内 21 项。由于南四湖区域位置重要^[1], 污染严重, 这一地区为南水北调东线一期工程治污重点, 在已批复的山东省境内 21 项截污导流工程中, 南四湖流域项目就达到 16 项。截污导流工程是东线工程治污“治、用、保”体系中污染防治体系的重要组成部分, 其主要作用是将污水处理厂处理后达标排放的下泄尾水分别导向回用处理设施、农业灌溉设施和择段排放设施。这些设施在干线调水期可以减少污染物入干线量, 保证干线水质稳定, 达到国家地表水环境质量Ⅲ类水水质标准。完工后的工程参与南四湖入湖河流水量联合调度, 根据各河流水质、水量以及用水需求进行水量水质联合调度, 使污染物在调水期不进入或少进入南四湖, 改善南四湖水质, 对于确保南水北调东线工程输水期水质安全具有重要的意义。

目前, 许多水资源工作者在水量水质联合优化调度方面做了大量工作。例如宋刚福等^[2]针对城市河流河道淤堵、水质恶化、生态环境破坏等问题, 建立了基于生态的城市河流水量水质联合调度模型, 并应用于郑州市七里河水系的闸坝生态调度; 张永勇等^[3]以淮河流域 SWAT 水文模型和相邻闸坝间的水量水质模型为基础, 研究分析沙颍河闸坝开启污水下泄对淮河干流下游水质的影响; 刘玉年等^[4]针对淮河中游的特点, 建立了淮河中游水量水质联合调度模型; Azevedo 等^[5]以 QUAL2E-UNCAS 水质模型和 MODSIM 仿真技术为基

础,研究了水质水量耦合模型在流域规划中的应用;Li等^[6]运用水量水质耦合模型模拟评价了扎龙湿地的自净能力;裘骅勇^[7]等建立了杭嘉湖一维河网水量水质联合数学模型,反映了杭嘉湖地区的水流运动状况和水质变化情况;唐迎粥等^[8]利用崇明岛河网两次调水试验的水文水质同步监测资料,分析了崇明岛调水试验水量水质的变化。前人的这些研究为水量水质联合调度的开展奠定了一定的基础,但目前尚未有对南四湖流域主要入湖河流16项截污导流工程水量水质联合调度开展深入研究的报道。

有关南四湖方面的研究还主要集中在南四湖水环境问题及根源剖析、湖区水质模拟模型等方面。例如,徐敏^[9]以南四湖为研究对象,系统地研究了基于复杂性理论的河湖环境系统建模的新理论、新方法;路成刚^[10]、和慧^[11]分别运用WASP7.3和BP神经网络对南四湖主要污染物的分布规律与分布特征进行模拟研究,预测了南四湖加大治污力度后非调水期和调水期湖泊的水环境质量;赵世新等^[12]通过建立南四湖三维水力调配和水质模型,模拟了南水北调东线工程一个完整调水期对南四湖水质的影响。而南四湖流域在年内不同时段、各入湖河流来水情况、水量与水质以及用水需求均不相同,各截污导流工程的控污能力也不相同。因此,有必要探索各截污导流工程的高效运行调度方案以提高其控污能力和效果。

1 南四湖截污导流工程水量水质联合调度方法

1.1 水量水质平衡方程

根据现有的截污导流工程设计,截污导流工程各控污单元运行调度管理过程中涉及的主要水情参数包括各区间逐月天然径流量、引黄入河量、中水排放量、灌溉用水量、拦蓄库容等。依据这些水情数据,建立各控污单元的水量水质响应关系。本研究中,由于缺少相应的河道信息,在确定水量水质响应关系时假定各个闸的区间段内水质混合均匀。此外,在运行调度分析中没有考虑水流演进的时间效应。

a. 闸前水量平衡。截污导流工程各子单元闸前月末水量平衡方程如下:

$$Q_{\text{月末}} = Q_{\text{引黄水}} + Q_{\text{径流}} + Q_{\text{中水}} + Q_{\text{上级弃水}} - Q_{\text{灌溉水}} - Q_{\text{蒸发}} - Q_{\text{损失}} \tag{1}$$

$$Q_{\text{弃水}} = Q_{\text{月末}} + Q_{\text{上月库容}} - Q_{\text{月末库容}} \tag{2}$$

式中: $Q_{\text{月末}}$ ——该月需要拦蓄的水量; $Q_{\text{引黄水}}$ ——该月控污单元上游引黄水量; $Q_{\text{径流}}$ ——该月区间天然径流量; $Q_{\text{中水}}$ ——该月区间内排入的中水量; $Q_{\text{上级弃水}}$ ——上一级闸坝的下泄水量; $Q_{\text{灌溉水}}$ ——该控制区间内当月灌溉用水量; $Q_{\text{蒸发}}$ ——当月该区间的蒸发量; $Q_{\text{损失}}$ ——当月由于渗漏等造成的水量损失; $Q_{\text{弃水}}$ ——当前拦蓄闸的当月下泄水量; $Q_{\text{上月库容}}$ ——上月末所用库容; $Q_{\text{月末库容}}$ ——该月末所占用库容。若 $Q_{\text{月末}}$ 为正值,说明该控制区间总来水量大于用水量与损失量之和,若需要控制下泄流量,则需要利用剩余库容,若剩余库容不够则必须弃水。

b. 闸前段水质。在获得各闸前月末水量后,可根据入河水中以及上游来水的污染物(COD, $\text{NH}_3\text{-N}$)质量浓度,计算当前控制区间段的月末闸前污染物浓度。假定天然径流中的污染物可以忽略不计,计算公式如下:

$$C_{\text{月末COD}} = \frac{k_c(Q_{\text{中水}}C_{\text{中水COD}} + Q_{\text{上级弃水}}C_{\text{上级弃水COD}} + Q_{\text{上月末库容}}C_{\text{上月末COD}})}{Q_{\text{总来水}} - Q_{\text{蒸发}} + Q_{\text{上月末库容}}} \tag{3}$$

$$C_{\text{月末NH}_3\text{-N}} = \frac{k_n(Q_{\text{中水}}C_{\text{中水NH}_3\text{-N}} + Q_{\text{上级弃水}}C_{\text{上级弃水NH}_3\text{-N}} + Q_{\text{上月末库容}}C_{\text{上月末NH}_3\text{-N}})}{Q_{\text{总来水}} - Q_{\text{蒸发}} + Q_{\text{上月末库容}}} \tag{4}$$

$$Q_{\text{总来水}} = Q_{\text{引黄水}} + Q_{\text{径流}} + Q_{\text{中水}} + Q_{\text{上级弃水}} \tag{5}$$

式中: $C_{\text{月末COD}}$ ——月末COD质量浓度; $C_{\text{月末NH}_3\text{-N}}$ ——月末 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度; k_c ——COD在河道中的天然衰减系数; k_n —— $\text{NH}_3\text{-N}$ 在河道中的天然衰减系数。

1.2 水量水质联合调度基本原则和算法

根据截污导流工程的控污减排目标,确定南四湖截污导流优化调度运行的基本原则如下:(a)以满足截污导流工程规划控制目标为第一原则;(b)下泄水量、污染总量允许排放量、达标排放3个目标兼顾;(c)尽量利用拦蓄满足灌溉回用水量需求;(d)输水期目标满足的前提下兼顾减少汛期下泄污染目标。

根据截污导流工程运行管理的目标和调度原则,在截污导流工程末端控制闸坝断面水质若达到Ⅲ类水质标准,则下泄水量,确保有足够的剩余可利用库容,以应对系统的变化。当闸坝前水质不达标时,则尽量利用剩余库容拦蓄,在确保下泄水量达标的同时,最终达到下泄污染负荷最小。以三级控制子单元截污导流工程为例,描述水量水质联合调度思路如下:

- a. 首先根据水量水质响应关系计算控制区段内水质是否达标,若不达标则进入 b,若达标则进入 c。
- b. 判断当前库容和灌溉用水情况下是否存在被迫弃水。若无被迫弃水则计算当前剩余库容;若有被迫弃水则计算下泄水量,并将其作为第二级控制子单元的上游弃水量,进入 d。
- c. 下泄全部水量,作为第二级控制子单元的上游弃水量,进入 d。
- d. 判断上游弃水后第二级控制子单元区段内水质是否达标。若不达标则进入 e;若达标则进入 g。
- e. 判断是否存在被迫弃水。若存在被迫弃水,则调整第一级控制子单元下泄水量,充分利用第一级库容,重新计算下泄水量,进入 f。
- f. 判断调整第一级控制子单元下泄水量后第二级控制子单元是否存在被迫弃水。若存在被迫弃水则计算弃水量,作为第三级控制子单元的上游弃水量,进入 j。若不存在被迫弃水则直接进入 g。
- g. 下泄第二级控制子单元全部水量,作为第三级控制子单元的上游弃水量,进入 h。
- h. 判断上游弃水后第三级控制子单元区段内水质是否达标。若不达标则进入 i;若达标进入 j。
- i. 计算第三级控制子单元是否存在被迫弃水。若存在被迫弃水,则调整上级的所有控制子单元(优先利用上游库容),使进入第三级控制子单元的弃水量最小,从而调整上游各级控制单元的下泄水量和当前库容,进入 k。若不存在被迫弃水则直接进入 j。
- j. 在满足灌溉需求的前提下,下泄水量,使得可利用调蓄库容最大,进入 k。
- k. 计算和保存各级控制子单元的当前库容。
- 以上 a,b,c 为第一级控制子单元;d,e,f,g 为第二级控制子单元;h,i,j,k 为第三级控制子单元。
- 对每个拦蓄闸输水期(当年 10 月至翌年 5 月)的每个调度时段依次进行调蓄,以确保联合调度的时间和空间联系的正确性。

2 水量水质联合调度效果分析案例

2.1 菏泽市东鱼河截污导流工程概况

东鱼河是在山东菏泽境内注入南四湖的一条重要支流。东鱼河截污导流工程的任务是在南水北调东线第一期工程输水期间,利用已有和新建的拦蓄工程拦蓄城镇污水处理厂和工业企业达标排放的中水 4 749.6 万 m³,通过中水灌溉回用,减少 COD 入河量 4 624.6 t,减少 NH₃-N 入河量 323.1 t,使下泄的 COD 不超过 431.4 t,NH₃-N 不超过 5.33 t,满足治污规划和治污控制单元规定的控制指标要求。

2.2 优化调度效果分析

原有设计方案下,东鱼河截污导流工程末端下泄水量、水质见表 1。从表 1 可以看出,输水期被迫下泄的水,除了 4 月、5 月基本接近Ⅲ类水外,其他月份都超过地表水Ⅲ类水质标准,主要为 NH₃-N 超标。输水期共下泄水量 1 454.7 万 m³,其中 COD 总量为 199.56 t,NH₃-N 总量为 19.34 t。

表 1 东鱼河截污导流工程原设计调蓄方案末端下泄水量、水质

Table 1 Discharged water quantity and quality under originally designed scenario for PPWD Project for Dongyu River						
日期	末端徐寨闸 库容/万 m ³	末端泄水量/ 万 m ³	泄水 ρ(COD)/ (mg · L ⁻¹)	泄水 ρ(NH ₃ -N)/ (mg · L ⁻¹)	COD 下泄量/ t	NH ₃ -N 下泄量/ t
2011-10	355.52	0.16	10.07	1.34	0.02	0
2011-11	0	0	13.77	1.83	0	0
2011-12	129.56	0.19	27.70	3.69	0.05	0.01
2012-01	248.64	170.73	32.17	3.31	54.92	5.65
2012-02	548.08	212.28	14.19	1.17	30.21	2.50
2012-03	658.28	0.37	17.05	1.68	0.06	0.01
2012-04	750.12	597.47	10.17	1.02	60.78	6.11
2012-05	0	472.86	11.32	1.07	53.51	5.07

利用建立的水量水质联合调度方法对东鱼河截污导流工程的调度方案进行优化,结果见表 2。从表 2 可以看出,凡是污染物质量浓度大幅度超过Ⅲ类水质标准的月份,都利用拦蓄闸的库容尽量存储,控制 COD 和 NH₃-N 的排放量,在输水期只有 2 月份有 1 次达标主动弃水和 4 月份未达标被迫弃水。整个输水期污染物下泄总量和污染物平均质量浓度显著降低。输水期共下泄水量 1 298.38 万 m³,其中 COD 总量为 103.09 t,NH₃-N 总量为 11.22 t。与原设计方案相比,优化方案下污染物的排放总量明显减少,优化调度效果十分明显。

表2 东鱼河截污导流工程设计优化调度后末端下泄水量水质

Table 2 Discharged water quantity and quality after optimal regulation of PPWD Project for Dongyu River						
日期	末端徐寨闸库容/万 m ³	末端泄水量/万 m ³	泄水 $\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	泄水 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD 下泄量/t	NH ₃ -N 下泄量/t
2011-10	355.58	0	10.05	1.34	0	0
2011-11	0	0	13.75	1.83	0	0
2011-12	129.52	0	27.73	3.70	0	0
2012-01	254.41	0	29.19	3.82	0	0
2012-02	0	1213.06	7.69	0.85	93.34	10.29
2012-03	104.08	0	29.36	3.91	0	0
2012-04	750.12	85.32	11.44	1.09	9.76	0.93
2012-05	359.29	0	15.57	1.31	0	0

2.3 不同来水和用水条件下的敏感性分析

共设置7种不同来水和用水情景:天然径流量为原设计方案的1.2倍、0.8倍;引黄水量为原设计方案的1.2倍、0.8倍;灌溉用水量为原设计方案的1.2倍、0.8倍和0.6倍。分别讨论在原调度方案和优化调度方案下,东鱼河截污导流工程末端控制闸在整个输水期下泄污染物总量和污染物平均质量浓度的变化。7种情景的结果对比分析见表3。

表3 7种情景结果对比

Table 3 Comparison results of seven scenarios									
案例	来水(原设计方案的倍数)		用水(原设计方案的倍数)	状态	下泄水量/t	污染物总量		污染物平均值	
	天然径流	引黄水量				$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
原方案	1	1	1	优化前	1455	199.6	19.3	13.7	1.33
				优化后	1298	103.0	11.2	7.9	0.86
情景1	1.2	1	1	优化前	2158	298.7	28.3	13.8	1.31
				优化后	2003	156.6	16.9	7.8	0.84
情景2	0.8	1	1	优化前	1083	158.7	15.6	14.7	1.44
				优化后	1421	130.1	13.4	9.2	0.94
情景3	1	1.2	1	优化前	3539	486.3	40.7	13.7	1.15
				优化后	2998	330.0	28.0	11.0	0.93
情景4	1	0.8	1	优化前	0	0	0	0	0
				优化后	203	14.3	1.8	7.0	0.90
情景5	1	1	1.2	优化前	171	55.0	5.7	32.1	3.31
				优化后	539	47.5	5.2	8.8	0.97
情景6	1	1	0.8	优化前	4218	717.6	56.0	17.0	1.33
				优化后	2629	476.9	37.0	18.1	1.14
情景7	1	1	0.6	优化前	7627	1550.0	112.2	20.3	1.47
				优化后	5304	1127.0	80.5	21.3	1.52

从表3可以看出,通过水量水质联合调度,在各种不利条件下都能够有效地改善截污导流工程的控污效果,无论是下泄污染物总量、逐月污染物浓度,还是整个输水期下泄水量的平均污染物浓度都能够得到有效控制,对控污目标的实现以及南四湖水质安全保障具有重要的作用。

2.4 考虑河道水体自净能力的方案分析

由于缺乏相关的资料信息,为了简单起见,将截污导流工程相应水体内的污染负荷按照一定的比例削减,以代表和反映该河道水体的自净能力及人工湿地等污染削减措施的效果。在此设置6种情景,即污染负荷削减率分别为0(不考虑自净)、3%、6%、10%、20%、30%,分别进行原设计方案与优化调度后方案结果对比(表4)。

从表4可以看出:末端控制断面的下泄水量增加,下泄水流污染物平均质量浓度呈下降趋势,而下泄污染物总量由于下泄水量增加和质量浓度下降,呈现总体上升、略有波动的特征。主动下泄更多的水量,能在很大程度上减轻截污导流工程的拦蓄任务压力,充分预留出库容以应对突发性事故,显著提高截污导流工程的运行安全性。因此,充分挖掘截污导流工程的内部潜力,提高系统内部的污染削减能力,对保障整个截污

导流工程控污目标以及南四湖水质安全具有重要作用。

表 4 6 种情景优化调度结果对比

Table 4 Comparison results of six scenarios after optimal regulation

情景	污染负荷 削减率/%	下泄水量/t	污染物总量		污染物平均值	
			$\rho(\text{COD})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{COD})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	0	1 298.38	103.09	11.22	7.94	0.86
2	3	1 298.38	94.90	10.40	7.31	0.80
3	6	1 667.75	107.03	12.30	6.42	0.74
4	10	1 678.35	114.80	13.06	6.84	0.78
5	20	1 853.94	108.14	12.18	5.83	0.66
6	30	2 888.21	121.64	13.01	4.21	0.45

3 结 语

典型截污导流工程水量水质调度结果表明,在各种不利条件下都能够有效地提高截污导流工程的控污效果和能力,无论是下泄污染物总量、逐月污染物浓度,还是整个输水期下泄水量的平均污染物质量浓度都能够得到有效控制,对控污目标的实现以及南四湖水质安全保障具有重要的作用。建议加强南四湖截污导流工程实时水情监控系统的建设,以满足水量水质联合调度的需求,同时进一步加强水量水质联合调度的相关研究。

参考文献:

[1] 罗辉,周建仁,郭忠. 南水北调对南四湖水环境影响分析与评估[J]. 河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):63-67. LUO Hui, ZHOU Jianren, GUO Zhong. Analysis and assessment of the impact of South-to-North Water Diversion Project on water environment of Nansihu Lake[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005,33(1):63-67. (in Chinese))

[2] 宋刚福,沈冰. 基于生态的城市河流水量水质联合调度模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(3):258-263. (SONG Gangfu, SHEN Bing. An ecology-based water quantity and quality combined operation model for urban rivers[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012,40(3):258-263. (in Chinese))

[3] 张永勇,夏军,王纲胜,等. 淮河流域闸坝联合调度对河流水质影响分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(4):31-35. (ZHANG Yongyong, XIA Jun, WANG Gangsheng, et al. Research on influence of dams union dispatch on water quality in Huaihe River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007,40(4):31-35. (in Chinese))

[4] 刘玉年,施勇,程绪水,等. 淮河中游水量水质联合调度模型研究[J]. 水科学进展,2009,20(2):177-183. (LIU Yunian, SHI Yong, CHEN Xushui, et al. Union dispatch model for water quality and quantity in the middle reaches in Huaihe river[J]. Advances in Water Science, 2009,20(2):177-183. (in Chinese))

[5] AZEVEDO L, GATES T, FONTANE D, et al. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2000,126(2):85-97.

[6] LI Hongyan, ZHANG Guangxin, SUN Guangzhi. Simulation and evaluation of the water purification function of Zhalong Wealand based on a combined water quantity-quality model[J]. Science China Technological Sciences, 2012,55(7):1973-1981.

[7] 裘骅勇,章宏伟,陈增奇. 杭嘉湖—维河网水量水质联合数学模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2011, 31(S1):9-13. (QIU Huayong, ZHANG Hongwei, CHEN Zengqi, et al. One-dimensional water quantity and quality joint mathematic model for criss-cross stream network and application in the Hangjia Lake region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(Sup1):9-13. (in Chinese))

[8] 唐迎洲,徐贵泉,徐华,等. 崇明岛河网引清调水试验研究[J]. 水资源保护,2011, 27(4):70-73. (TANG Yingzhou, XU Guiquan, XU hua, et al. (Study on clean water diversion tests of river network in Chongming Island[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4):70-73. (in Chinese))

[9] 徐敏. 基于复杂性理论的河湖环境系统模型研究[D]. 长沙:湖南大学,2007.

[10] 路成刚. 基于 WASP7.3 的南四湖水质模拟分析研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2010.

[11] 和慧. 基于 BP 神经网络的南四湖水质评价研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2008.

[12] 赵世新,张晨,高学平,等. 南水北调东线调度对南四湖水质的影响[J]. 湖泊科学,2012,24(6):923-931. (ZHAO Shixin, ZHANG Chen, GAO Xueping, et al. The impact of the operation of Eastern Route Project of the South-to-North Water Diversion Project on water quality in Lake Nansi[J]. Journal of Lake Sciences, 2012,24(6):923-931. (in Chinese))