

负荷历时曲线在流域水质特征分析中的应用

程 艳¹ 李炳花¹ 此里能布² 和寿芳² 黄 兵²

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所 北京 100038 ; 2. 云南省水文水资源局大理分局 云南 大理 671000)

摘要 :介绍了负荷历时曲线 (LDC) 的概念和建立方法 , 以及针对不同水质标准时 , LDC 应用于水质评价、关键水质条件和主要污染机制判断、现状及允许负荷通量估算等问题的分析。结合国外已有案例 , 并以洱海弥苴河流域作为典型研究区域 , 分别探讨了不同水质限制要求下 , 运用 LDC 具体分析和解决各类水质问题的方法。结果表明 , LDC 包含众多水质特征信息 , 可以在较少数据信息条件下 , 合理分析各类水环境问题 , 从而为流域水环境管理提供可靠决策依据。

关键词 :负荷历时曲线 ; 水质评价 ; 流域 ; 水文流量模式

中图分类号 : X824 **文献标识码** : A **文章编号** : 1004-693X (2009) 02-0033-05

Application of load duration curve in watershed water quality characteristics analysis

CHENG Yan¹ , LI Bing-hua¹ , CILI Neng-bu² , HE Shou-fang² , HUANG Bing²

(1. Department of Water Environment , China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100038 , China ; 2. Dali Bureau of Hydrology and Water Resources of Yunnan Province , Dali 671000 , China)

Abstract : The concept and development method of load duration curve (LDC) are introduced. The principle of LDC application in assessing water quality , identifying critical water quality conditions and main pollution mechanisms , calculating present and acceptable loads , and other issues are discussed under different water quality standards. The methods of analyzing and solving water quality problems with LDC are described. Through a case study , it is concluded that , with abundant water quality information included , LDC can analyze different water environmental problems even when there are insufficient data , thus providing references for watershed water environmental management.

Key words : load duration curve ; water quality assessment ; watershed ; flow pattern

在流域水文过程的驱动下 , 各类污染负荷最终影响着流域出口水质变化 , 因此可以用河道断面水量、水质变化关系 , 判断其上游流域范围内水环境污染现状及主要污染发生机制。由于非点源污染的发生具有广泛性、时空不确定性等特征 , 对其进行估算和评价较为不易。基于水量、水质监测数据的经验统计方法 , 结果精确度及合理性均不高 , 而基于流域综合模拟的非点源负荷估算模型 , 对基础数据质量及技术要求高而难以广泛应用。针对现有水质分析方法存在的主要问题及流域非点源污染特征 , 美国堪萨斯州环境与健康保护局 (KDHE) 提出基于负荷

历时曲线 (Load Duration Curve , 简称 LDC) 的分析方法 , 并在 1999 后广泛应用于该州最大日负荷总量计划 (TMDL) 的制定和实施中^[1]。LDC 是一种基于完整流量模式下的简单数据分析工具 , 以具体地点水质要求和完整流量系列为基础 , 建立河道断面水质变化与流域潜在污染机制间的联系。特定污染物的 LDC 综合分析图建立后 , 包含和反映了流域水质现状、允许负荷通量、现状负荷通量、关键水质条件、潜在污染发生机制等诸多水环境信息 , 可为水质特征分析提供合理依据。由于常规日流量系列的监测和推演已经十分普遍 , 该方法提出后在美国日益受到

重视,许多资料缺乏地区开始陆续采用 LDC 制定并实施 TMDL 计划^[2-6]。我国流域非点源污染研究起步较晚,技术力量薄弱,基础数据广泛缺乏,基于常规水质监测的简单合理水环境分析方法,对于广泛开展流域污染控制具有重要意义。

1 LDC 介绍

1.1 LDC 的概念及建立方法

历时曲线是水文学中常用于频率分析的一种工具,系指特定参数系列中大于等于某一给定参数值的频率曲线,是将参数系列值按照由大到小的顺序排列后,以不小于具体参数值的其他参数量占总数的百分比作为横坐标,对应参数值作为纵坐标(多采用对数坐标)后建立的曲线。当参数为流量系列时,即为流量历时曲线(Flow Duration Curve,简称 FDC),将流量系列乘以特定污染物标准得到的负荷通量,作为新参数系列建立的历时曲线即为该指标 LDC。完整水文年的日流量过程,基本反映了河道流量的所有变化范围,多年日均流量系列建立的日 LDC 作为水质分析依据更为合理。在 KDHE 的基础上,Cleland^[7-8]、美国环保署(EPA)等^[9]就如何建立特定污染指标的 LDC,及如何对以上问题作出合理分析和评价进行了较为详细的总结和说明。日 LDC 的建立主要有以下 3 个步骤。

a. 获取具体地点日流量系列,建立日系列 FDC。径流系列应该基于一个或多个完整水文年日流量资料,可以是实测值也可以是模拟值,能够合理反映所有可能水文流量模式,并且所有数据均经过校正。按照流量大小进行排列,计算超过每个日流量值的参数量占总量的百分比,建立 FDC 并根据研究区域水文特征划分流量模式,其中美国环保署推荐的划分方法^[9]为:特丰条件:0~10%(历时范围);丰水条件:10%~40%;平水条件:40%~60%;枯水条件:60%~90%;特枯条件:90%~100%。流量模式划分并不是绝对的,可以根据研究区域具体气候、水文特征采用不同方法,各流量模式下的污染发生机制应有所区别。

b. 确定研究地点水质限制要求。水质标准的大小直接关系到断面允许负荷通量的多少,进而影响水质分析及评价结果的准确性,需要根据研究地点具体水质要求合理给定。水体功能,污染物特性及对水质的影响机制,水体动力学特征等是影响水质限制的主要因素。目前常用的水质标准主要包括两类:①急性水质标准,要求特定污染指标在任何时候都应低于该阈值,否则可能在短期内引发严重水环境问题,对于多数指标物适用。②慢性水质标准,

只要求污染物在一段时间内的平均浓度低于规定值。例如 TN、TP 浓度对湖库水质的影响是一个较为缓慢过程,较长时段内平均浓度过高是引发富营养化的关键,因此常用年平均浓度作为水质限制。慢性水质标准可以转化为时段内污染负荷总量限制,即时段内现状污染负荷应低于由平均浓度限制确定的允许负荷。由于标准要求不同,在进行水质特征分析中关注的主要问题也有所区别。

c. 基于 FDC 和水质标准建立 LDC。将污染物标准与 FDC 各纵坐标值相乘后,重新建立的曲线即为该指标负荷历时曲线,曲线纵坐标代表各流量下河流断面特定污染物允许负荷通量。然后将流量系列年限内的同步实测水量、水质转化为瞬时负荷通量,点绘到 LDC 图中,即可用于水质分析。如果在水质采样同时没有进行流量观测,用采样当日平均流量代替瞬时流量,典型 LDC 如图 1 所示。

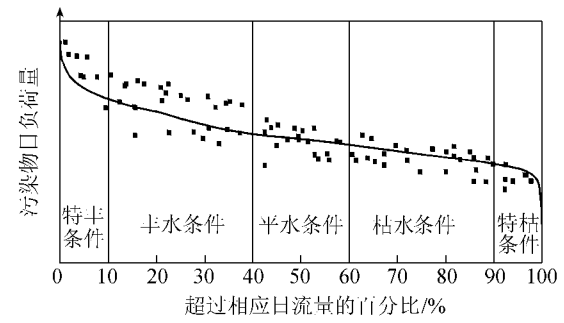


图 1 典型 LDC 示意图

1.2 LDC 法水质分析

LDC 法可以用于水质评价,评判关键水质条件及潜在污染发生原因,合理估算具体断面现状及允许负荷通量等,主要的分析原理如下。

1.2.1 水质评价原理

根据 LDC 的概念和建立过程,位于曲线之上的实测点超过水质浓度限制。急性水质标准一般要求所有情况下污染物浓度应低于限值,但是基于统计学原理,个别水质样本超标并不代表整体水质受损,当水质监测样本足够多时(一般不少于 5 个),规定样本超标频率限制,是判定水质是否达到急性标准的合理方法。例如,规定有 10% 实测样本超标,则认为断面水质不达标。如果流域水体的主要问题在于输出过量营养盐负荷,则需要分别估算关注时段内的污染物现状负荷通量与允许负荷通量,当前者大于后者时则水质不满足要求。

1.2.2 流域潜在主要污染机制及关键水质条件判断

对于河流水体,不同流量模式下流域污染源发生和传输的主要机制有所区别,一般在 85%~99% 历时范围内,潜在主要污染原因为点源;10%~70%

历时范围内,应以非点源污染为主,70%~85%历时范围内水质则受到点源和非点源综合影响;流量历时小于10%和大于99%代表极端丰水及枯水条件的水质状况^[10],对于具体流域各污染机制影响的历时范围有所不同,但整体趋势不变。因此,可将完整流量范围划分为不同流量模式,根据各模式内水质受损状况,判定潜在主要污染机制。

当水质受损同时发生在不同流量模式,需要判断最关键水质条件。对于急性水质标准,如果规定样本超标率应少于总数的10%,这一目标相当于实测样本浓度系列第90百分位数不大于标准要求,或者对应瞬时负荷通量低于同一流量下的允许负荷通量。分别确定各流量模式下实测浓度系列第90百分位数,与该范围中心流量相乘得到实测日负荷通量系列第90百分位数,与对应标准日负荷通量相比较,计算现状日均负荷通量削减率。其中削减率最高的流量模式为最关键水质条件,可作为水环境管理的控制条件,极端流量由于发生频率小、采样困难,一般不考虑作为关键水质条件。对于慢性水质标准,应分别计算各流量模式下现状及允许总负荷通量,根据现状负荷通量的削减率判断关键水质条件,并且不能忽略极端高流量条件对负荷通量的贡献。

1.2.3 河道断面现状及允许年负荷通量估算

断面负荷通量计算公式为

$$M = \int_0^t FC dt$$

式中: F 为断面瞬时流量; C 为瞬时浓度; t 为研究时段。断面负荷通量随流量和浓度不断变化,如果将计算时段划分足够小,可认为各时段内的流量、水质变化不大,可用平均流量与平均水质浓度代表实测值。由于LDC法将完整流量范围按照由大到小顺序依次排列,可以方便地将日流量系列划分为多个连续流量范围,估算各范围平均流量、平均实测浓度,结合各流量段在一年内发生的平均天数,得到每个流量段在1年内贡献的平均负荷通量,各段总和即为观测时间内的年均负荷通量,用标准浓度代替实测浓度,可得到年允许负荷通量。采用这种方法估算得到的实测及允许负荷通量更接近实际情况,还能将多年实测水质资料结合起来,随着观测时间的增长,其准确性也不断提高。

2 基于急性标准限制的流域水质分析

2.1 典型研究区概况

如果流域特定河段内有一典型断面能够合理代表该河段水质特征,这种情况下可运用LDC法建立断面水质与其上游流域范围内潜在污染机制间的关

系,分析河段水质受损特征。以美国南卡罗莱纳州约克角郡Turkey河流域为例^[11],探讨采用LDC法如何分析这类水质问题。Turkey河位于约克角郡西部,所关注的河段为Turkey河支流Ross河,流域面积10.5 km²,其中林地、草地、耕地及城镇用地分别占44%、16%、18%和19%,监测点位于流域出口,站点编号为B-086。水体主要功能为景观娱乐,关注污染物为病原体,以大肠杆菌作为控制指标,标准要求为:①30 d内5个连续观测样本的几何平均浓度不超过2 cfu/mL(指水样中的菌落形成单位);②所有样本中超过4 cfu/mL的数量不大于10%,两者满足其一即可。流域内没有点源排放,非点源污染主要来源于野生动物排泄物、农业活动、家禽饲养、城镇径流、化粪池等。其中野生动物排泄物主要分布于林地、草地、农田等区域,家禽饲养主要位于城镇区域,这些污染物主要经由暴雨径流进入水体。化粪池处理设施在流域内共有81处,分布密度为7.6个/km²,在枯水期以淋溶、下渗等途径将污染物带入水体,在暴雨季节则可能随地表径流流失。

2.2 LDC及水质特征分析

考虑到30 d内水质监测5次以上在该区域尚不能实现,采用研究时段内大肠杆菌浓度超过4 cfu/mL的样本数不大于10%作为水质限制。在此基础上,根据1990~2000年Ross河B-086测站日流量记录,结合实测水质资料,建立B-086站大肠杆菌指标LDC(图2)。图2中, x 为大肠杆菌日负荷,流量模式划分采用EPA推荐方法。

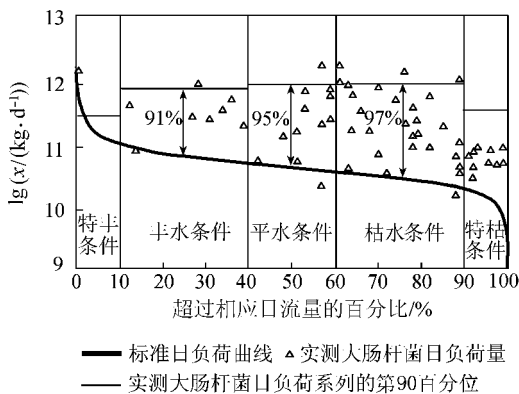


图2 1990~2000年Ross河B-086测站
大肠杆菌指标LDC

根据LDC法水质分析原理,B-086测站大肠杆菌浓度在所有流量条件下均不能满足标准要求,说明断面水质是由各类污染源综合作用的结果。由于水质超标在各类流量模式下均有发生,为了判断最关键水质条件,采用上述方法分别估算不同流量模式下,实测水质样本的日负荷通量系列第90百分位数的削减率。通过计算,不考虑极端流量条件的影

响 Ross 河 B-086 测站丰水、平水及枯水流量模式下规定的负荷通量削减率分别为 91%、95% 和 97% ,即枯水条件可作为水环境管理策略制定的关键设计条件 ,同时需要考虑各类污染负荷的影响作用。

3 基于慢性标准要求的流域水质特征分析

3.1 典型研究区域概况

弥苴河流域位于云南省大理白族自治州洱海北端的洱源县境内 ,东经 99°50′ ~ 100°02′、北纬 25°48′ ~ 26°16′ ,属澜沧江水系的洱海流域。流域以农业生产为主 ,土地利用方式主要为林地、草地和耕地 ,分别占流域总面积的 33.5%、35.0% 和 24.1%。弥苴河全长 71.1km ,集水面积 1310.8 km² ,该河上建有炼城水文站 ,控制面积为 1024.0 km² ,基本控制弥苴河干流 80% 以上的来水量。经长期观测 ,弥苴河 COD、NH₃-N 等指标均满足功能要求 ,其主要问题是向洱海输入过多的 N、P 污染负荷。收集了云南省水文局大理分局在炼城水文站 2004 ~ 2006 的年实测日均流量系列 ,并根据 2004 ~ 2006 年水质监测资料(其中 2006 年加密监测) ,建立了近 3 年弥苴河流域控制断面 TN、TP 的 LDC ,对流域营养盐污染输出特征进行分析。

3.2 水质标准及 LDC 建立

由于我国湖泊与入湖河流营养盐指标分别执行不同标准 ,忽略了两者的水力联系时输入负荷与水质间的关系 ,使得河流水质达到使用要求但依然向下游输出过量污染负荷。为此 ,需要建立河流出口负荷与湖泊水质间的关系 ,以便根据受纳湖(库)水质要求合理确定入湖水质标准。就外部污染物负荷对入湖水质的影响来说 ,可以采用 Vollenwieder 模型^[12]简单表达入湖水体水质与湖水浓度间的关系 :

$$\rho_L = \rho_i \left(\frac{1}{1 + sT} \right) \tag{1}$$

其中

$$T = V/W_0$$

式中 : ρ_L 为湖泊水质质量浓度 ,mg/L ; ρ_i 为湖泊平均进水浓度 ,mg/L ; T 为湖泊水力停留时间 ,a ; V 为湖泊体积 ,m³ ; W_0 为多年平均出湖水量 ,m³/a ; s 为特定污染物的净沉积系数 ,1/a。

由式(1)可以得到入湖河流水质的计算公式 :

$$\rho_i = \rho_L (1 + sT) \tag{2}$$

从式(2)可以看出 ,湖泊水质确定的情况下 ,入湖水体水质主要由湖泊的水力滞留时间及污染物净沉积系数决定 ,即使水质标准相同 ,输入不同湖泊水体的水质要求也不同 ,式(2)提供了根据湖泊水质标准确定入湖水质要求的一种方法。洱海是大理市主要

饮用水源地 ,全湖水质标准需达到 GB 3838—2002《水环境质量标准》中的Ⅱ类要求 ,其中 $\rho(\text{TN})$ 标准为 0.5 mg/L , $\rho(\text{TP})$ 为 0.025 mg/L。根据洱海多年年平均库容量及出流量 ,得到洱海水体的平均水力停留时间为 2.37 a ,研究表明洱海的 TN、TP 年均净沉积系数分别为 0.2 a 和 0.5 a。由以上参数计算得到入流水体 TN、TP 水质限制质量浓度分别为 0.774 mg/L 和 0.055 mg/L ,为保守起见分别采用 0.75 mg/L 和 0.05 mg/L 作为炼城断面水质限值标准。由估算方法可知 ,该限制为年均标准 ,并不要求在任何情况下都能满足 ,转化为污染负荷通量限制 ,即为年均现状负荷通量应低于标准要求的年允许负荷通量 ,炼城断面 2004 ~ 2006 年 TN、TP LDC 如图 3 所示 ,图 3 中 x_{TN} 为 TN 的日负荷量 , x_{TP} 为 TP 的日负荷量。

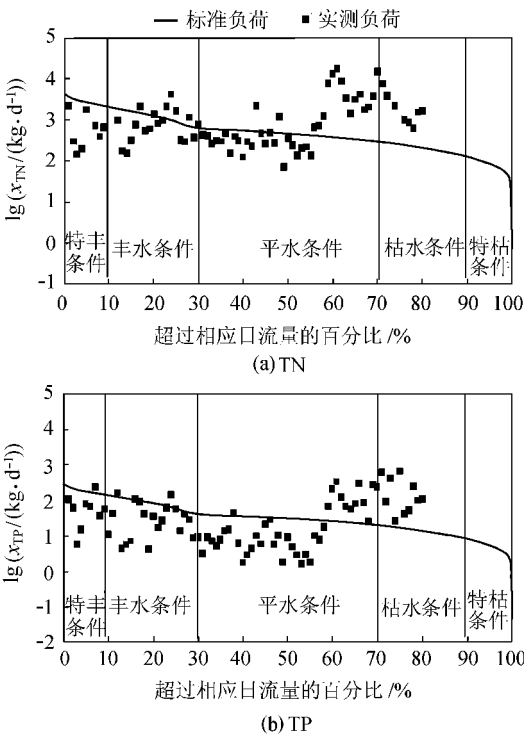


图 3 炼城水文站 2004 ~ 2006 年 TN、TP 负荷历时曲线
根据弥苴河流域暴雨与径流的经验关系 ,各类流量模式的划分范围如下 ,特丰条件 :0 ~ 10% ;丰水条件 :10% ~ 30% ;平水条件 :30% ~ 70% ;枯水条件 :70% ~ 90% ;特枯条件 :90% ~ 99.5% ,其中历时在 99.5% ~ 100% 之间的流量为极端枯水条件 ,不予考虑。

3.3 TN、TP 输出负荷通量特征分析

为了合理估算负荷通量 ,将完整流量范围重新划分为 22 个连续小流量段 ,分别计算各段内 TN、TP 现状及允许日均负荷通量 ,然后乘以各流量范围在 3 年内发生的平均时间 ,得到炼城站 2004 ~ 2006 年 TN、TP 实测及允许年均负荷通量。结果表明 ,弥苴河流域输出的 TN、TP 年均允许负荷通量为 262.79 t/a、

表 1 炼城站不同流量模式下 TN、TP 负荷通量及超标率

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	TN			TP			主要污染源
	现状 负荷/t	允许 负荷/t	负荷削 减率/%	现状 负荷/t	允许 负荷/t	负荷削 减率/%	
33.45 ~ 67.20	290.94	60.35	79.3	9.87	4.02	59.2	降雨侵蚀 地表径流
9.81 ~ 33.45	278.85	130.64	53.2	11.47	8.71	24.1	降雨侵蚀 地表径流
4.48 ~ 9.81	87.37	55.58	36.4	3.52	3.71	- 5.4	农田排水 地表污染物淋溶、冲刷
1.90 ~ 4.48	25.84	13.25	48.7	0.51	0.88	- 73.3	农田排水 地表污染物淋溶
0.60 ~ 1.90	5.75	2.96	48.4	0.10	0.20	- 92.6	地下水
合 计	688.74	262.79	61.9	25.47	17.52	31.2	

17.52t/a ,年均现状负荷通量为 688.74 t/a、25.47 t/a ,均超过允许限值 ,分别需要削减 61.9% 和 31.2% ,其中不同流量模式下的负荷通量特征如表 1 所示。

根据炼城断面 TN、TP 负荷通量估算结果 ,弥苴河流域 TN 年负荷通量超标严重 ,并且在所有流量模式下均超过限值要求 ,TP 超标则主要发生在较高流量条件下 ,极端高流量时两者的超标率均为最大。其中丰水和特丰流量条件下 TN、TP 负荷通量 ,对年均总通量的贡献率分别达到 82.7% 和 83.8% ,即流域降雨径流导致的非点源污染是造成 TN、TP 负荷通量超标的最主要原因。流域出口负荷通量输出特征 ,是由流域内各类污染源综合作用的结果 ,根据调查炼城站以上流域内只有一个生活污水集中排放点 ,排放量很小并且已达到排放标准 ,距离炼城站较远 ,对断面水质影响很小 ,因此弥苴河流域营养盐污染主要来自区域径流污染 ,其次为农田排水、基流背景负荷等其他非点源污染。一般来说溶解性磷在土壤中的含量较低 ,磷多以颗粒结合态为主 ,易于在暴雨径流造成土壤侵蚀和流失后随泥沙颗粒一起进入水环境 ,且磷流失多发生在近河道地区 ,因此表现为丰水条件负荷增加的现象。氮化合物易溶解于水中 ,同时也可被土壤颗粒吸附 ,即可以溶解态形式随径流流失 ,也能够随土壤侵蚀产生的泥沙进入地表水体 ,还可通过淋溶进入地下或地表水体 ,因此氮污染可在全流域发生。在弥苴河流域氮肥是农田化肥施用的主要类型 ,农田排水及径流中氮的含量很高 ,流域内山地与坝区连接区域多分布有溶岩地貌 ,可能导致较多硝态氮淋溶进入地下水 ,使得以地下水补给为主的枯水期 ,TN 浓度依然较高。

4 结 语

LDC 以具体地点完整流量变化范围为基础 ,以断面实测水量、水质资料为依据 ,建立断面水质变化与流域潜在污染机制间的关系 ,包含有众多流域水环境特征信息 ,可为较少数据信息条件下 ,水质评价和水环境管理提供合理依据。虽然可以合理确定不同流量模式下潜在污染源对河道断面水质影响 ,但

由于 LDC 反映的是流域内各类污染因素对断面水质的综合作用结果 ,在确定每个具体污染源定量贡献率及传输机制方面受到限制。对于面积较小及污染源简单的流域 ,各类污染源对出口断面负荷通量的贡献相对直接 ,易于判断 ,对于面积较大、污染机制复杂的流域则难以进行区分 ,这种情况下可将流域划分为不同级别的子流域 ,分别采用 LDC 分析法则能够更为有效识别这些信息。此外 ,LDC 是基于污染物在水中完全混合条件下发展和应用的 ,对于断面水质沿横向变化差异显著的大江、大河的适应性不高 ,尤其对于有岸边污染带存在时 ,则不能够用近岸水质样本代表断面总体现状水质 ;为此在处理这类问题时 ,可将岸边污染带及流域影响范围单独处理 ,以便消除个别区域对断面综合水质的影响。随着基础数据的不断增加 ,将 LDC 分析法与流域非点源负荷估算模型及河网水质模型相结合 ,则可以对流域水污染特征进行完整合理的评价和分析 ,因此 LDC 分析法应用前景十分广泛。

参考文献 :

[1] Kansas Department of Health and Environment (KDHE). Kansas TMDL curve methodology :data analysis[EB/OL]. [2002-05-17]. <http://www.kdhe.state.ks.us/tmdl/eutro.htm>.

[2] SULLIVAN J A. Use of load duration curves for the development of nonpoint source bacteria TMDLs in Texas[C]// ASAE Proceedings of the watershed management to meet emerging TMDL regulations conference. Fort Worth , TX , 2002 355-360.

[3] STILES T C. A simple method to define bacteria TMDLs in Kansas[C]//ASIWPCA/ACWF/WEF TMDL science issues conference : On-site Program. St Louis , MO , 2001 375-378.

[4] UDEQ (Utah Department of Environmental Quality). TMDL water quality study of the middle and lower sevier river watershed[EB/OL] [2004-03-30]. http://www.waterquality.utah.gov/TMDL/Sevier_River_TMDL.pdf

[5] OEPA (Ohio Environmental Protection Agency). Total maximum daily loads for the lower cuyahoga River final report [EB/OL] [2003-09-13]. <http://www.epa.state.oh.us/dsw/tmdl/LowerCuyahogaFinalTMDL.html>. (下转第 41 页)

2.2 通过白屈港从长江引水的工况

单独通过白屈港从长江引水,白屈泵站开启进行泵引,分析对江阴城区水环境的改善情况。其水文计算条件中黄山港的流量边界条件取自引工况下的流量值,其余水文计算条件同原型调水试验,COD_{Mn}和NH₃-N分别取调水试验前实测初始浓度值。通过白屈港从长江泵引,不同引水时间后城区各主要断面水质变化见图6。从图6可以看出:应天河以北3个断面水质在引水10h后都有不同程度的改善,引水20h后改善更为明显,其中靠近白屈港的17号断面水质改善最显著,引水20h后COD_{Mn}和NH₃-N的改善程度分别达到72.5%和88.2%;应天河及以南的3个断面水质在引水10h后也都有所改善,引水20h后改善更为明显,其中20号断面COD_{Mn}和NH₃-N的改善程度为52.0%和85.5%,其黄山港泵引工况下水质没有改善的13号断面,其COD_{Mn}和NH₃-N的改善程度达到34.9%和70.4%。

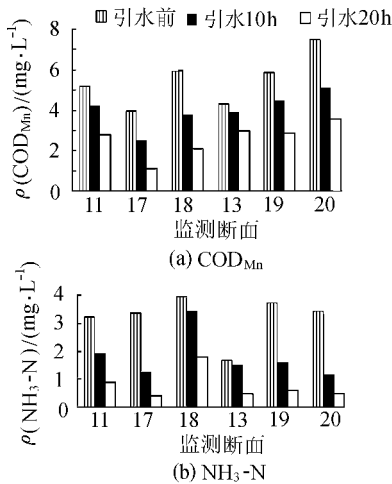


图6 白屈港泵引前后各断面水质对比

3 结论与建议

a. 从调水改善水环境角度考虑,江阴城区应天河以北的水环境可以通过黄山港或白屈港引水改善,但白屈港较黄山港泵站的流量要大得多,综合经济因素,推荐黄山港线路,各主要断面COD_{Mn}和NH₃-N在黄山港泵引10h后平均改善程度为16.6%和16.2%,泵引20h后为35.8%和32.3%;应天河及以南的水环境通过黄山港引水不能得到改善,只能通过白屈港泵引改善,各主要断面的COD_{Mn}和NH₃-N在泵引10h后平均改善程度为21.7%和45.3%,泵引20h后为45.9%和80.0%。

b. 从实验结果可知,江阴河网区通过调水来改善其水环境效果迅速明显。因此,在污染治理短期难以有效改善水质的情况下,江阴城区利用引长江水来缓解区域缺水问题,提高用水水质安全,有其现

实的必要性和紧迫性,通过这一手段不仅实现阶段性的区域水安全保障,同时也给区域水污染的综合防治创造必要的外在环境和赢得必要的时间。

参考文献:

[1] 韩龙喜,张书农,金忠青. 复杂河网非恒定流计算模型:单元划分法[J]. 水利学报, 1994(2): 52-56.
[2] 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.
[3] 丁玲,逢勇,赵棣华,等. 调水工程对五里湖水环境影响分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(4): 1-4.
[4] 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): 3-5.
[5] LUNG W S, LARSON C E. Water quality modeling of upper Mississippi River and lake Pepin[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(10): 691-699.
[6] DONALD H B. Water quality management through combined simulation-optimization[J]. Journal of Environmental Engineering, 1989, 115(5): 1011-1024.
[7] BEVEN K J. How far can we go in distributed hydrological modeling?[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2001, 5(1): 1-12.
[8] STEVEN C, RAYMOND C. Numerical methods for engineers[M]. McGraw Hill, 1998: 219-328.

(收稿日期: 2007-06-12 编辑: 高渭文)

(上接第37页)

[6] MDNR (Missouri Department of Natural Resources). Total maximum daily load (TMDL) for James River, Webster, Greene, Christian and Stone Counties, Missouri[EB/OL]. [2004-04-21]. http://www.dnr.state.mo.us/wpscd/wpcp/tmdl/james_river_final_tmdl.pdf.
[7] CLELAND B. TMDL development from the "bottom up"—part II: using duration curves to connect the pieces[EB/OL]. [2002-08-15] <http://www.in.gov/idem/programs/water/tmdl/bottomup.pdf>.
[8] CLELAND B. TMDL development from the "bottom up"—Part III: duration curves and wet-weather assessment. [2003-09-15]. <http://www.tmdls.net/tipstools/docs/TMDLsCleland.pdf>.
[9] US EPA Office of Wetlands, Oceans, & Watersheds. An approach for using load duration curves in the development of TMDLs[EB/OL]. [2008-05-28]. <http://www.epa.gov/owow/tmdl/techsupp.html>.
[10] HARRU X Z, SHAW L Y. Condition critical-defining the 'critical condition' for a total maximum daily load requires great care, especially when addressing nonpoint source pollutant[J]. Water Environment & Technology, 2005, 17(6): 38-42.
[11] US EPA. Total Maximum daily load for fecal coliform-upper broad river Basin[EB/OL]. [2005-09-11]. http://www.scdhec.net/environment/water/tmdl/docs/tmdl_lwrbrd_fc.pdf.
[12] VOLLENWEIDER R A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication[J]. Mem Ist Ital Idrobiol, 1976, 33: 53-83.

(收稿日期: 2007-12-07 编辑: 徐娟)