

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.006

梯级电站建设对水质的影响

陈黎明,李禔来

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:采用一维水动力数学模型和水质数学模型,对梯级电站建设前后的 CJ 江干、支流的水质变化进行研究,预测 CJ 江 2020 年 5 个梯级电站建设后干流水质主要参数的变化情况。结果表明,各梯级电站水库蓄水后各坝址处平均 DO 质量浓度将较建库前略有下降,BOD₅ 和 NH₃-N 的质量浓度呈下降趋势,TP 质量浓度变化较小。

关键词:梯级电站;水质分析;一维水动力数学模型;一维水质数学模型

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)05-0029-05

Impacts of cascade hydropower stations on water quality

CHEN Li-ming, LI Ti-lai

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In this study, a one-dimensional hydrodynamic numerical model and a one-dimensional water quality mathematical model were established to study the variation of flow in branches and the main stream of the CJ River before and after the construction of cascade hydropower stations. The variations of water quality indicators of the main stream of the CJ River after five cascade hydropower stations are constructed in 2020 were predicted. The results show that the average DO concentration at the dam site will be lower after reservoir storage than they are before the construction of the reservoir at the cascade hydropower stations, the concentrations of BOD₅ and NH₃-N will have a decreasing trend, and the concentration of TP will not change significantly.

Key words: cascade hydro power station; water quality analysis; one-dimensional hydrodynamic numerical model; one-dimensional water quality mathematical model

我国山区河流的特点为落差大、水量充沛,适于多级电站开发。梯级电站的开发改变了河道径流的年内分配,水流条件将发生巨大变化,水质状况也会发生变化。国内外很多学者^[1-6]对水库水质开展了研究。如,黄国如等^[7]根据官厅水库狭长、水浅及其水文、水力、水质迁移扩散等特点与河流相似的事实,采用一维数学模型对官厅水库的水质进行模拟;李锦秀等^[8]对三峡河道型水库水质采用整体一维数学模型进行了模拟研究。笔者开展梯级电站建设对水质影响的研究,对梯级电站建设前后的水库水质进行数值模拟,研究水体污染物输运情况,旨在为更好地保护水库水质提供依据。

1 研究方法

为了研究梯级电站建设对干流水质的影响,采用一维水动力数学模型和一维水质数学模型将干流、大坝及其主要支流连接起来,进行总体模拟。

1.1 一维水动力数学模型的率定

以西部某 CJ 江为例。CJ 江河道长 759 km,共建 5 级电站(图 1)。目前已建有梯级二、三电站和梯级五电站,至 2020 年将分别建成梯级一和梯级四电站。对该梯级电站所在河段建立一维水动力数学模型和一维水质数学模型,计算范围包括 5 个梯级

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAB42B08,2009ZX07528-005-02);南京水利科学研究院青年基金(Y510004);江苏环境监测基金(1021)

作者简介:陈黎明(1983—),男,助理工程师,主要从事水动力、水环境研究工作。E-mail:lmchen@nhri.cn

电站,从上游 A1 水文站起,至下游 A5 水文站止,共 71 个计算断面。模型验证资料选取 2002 年梯级一电站和梯级四电站已经建成情况下的 A2 水文站和 A4 水文站的全年水位、流量实测资料。上游边界给定 2002 年 1—12 月 A1 水文站的实测流量资料,下游边界为 A5 水文站断面处给定的自然水面比降。梯级二电站和梯级三电站作为内部边界条件,给定电站的运行水位。

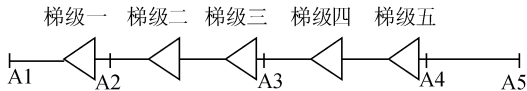
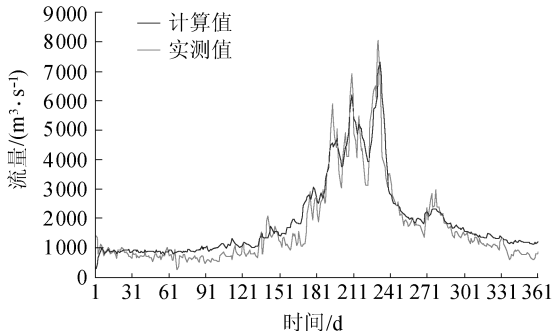
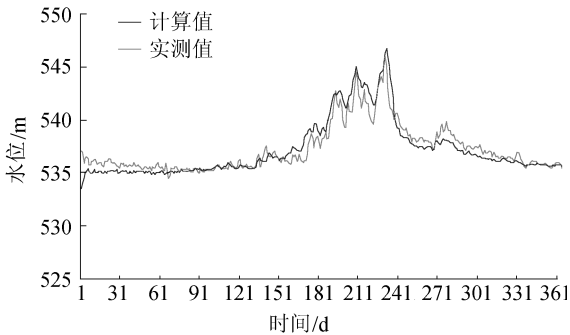


图 1 CJ 江梯级电站概化

采用一维水动力数学模型对 A2 和 A4 两个水文站 2002 年全年的水位和流量进行研究。模型计算时间步长为 3 600 s,模型中糙率 n 的取值为:当河道比较直且河床植被较少时, $n=0.020 \sim 0.040$;当河床多有石头时, $n=0.035 \sim 0.050$ 。从验证结果可知,无论是变化趋势还是变化幅度,计算得到的 A2 水文站和 A4 水文站的水位和流量数据与实测结果基本一致,A2 水文站的流量计算值与实测值全年平均误差约 12.2%,水位计算值与实测值误差的平均值为 0.06 m;A4 水文站的流量计算值与实测值全年平均误差约 24.1%,水位计算值与实测值误差的平均值为 0.06 m。限于篇幅,这里只给出 A4 水文站水位和流量的验证结果(图 2)。梯级二和梯级三水电站已经运行,计算其所在河段的河道水面线,结果见图 3。



(a) 流量的验证



(b) 水位的验证

图 2 2002 年 A4 水文站流量和水位的验证

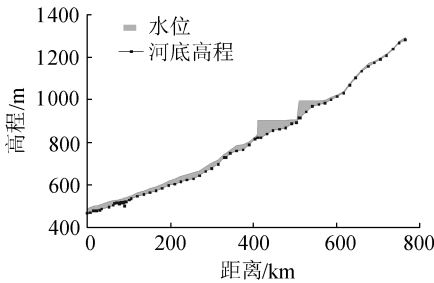


图 3 2002 年 CJ 江梯级二、三水电站河道水面线

1.2 一维水质数学模型的验证

一维水质数学模型的计算范围与一维水动力数学模型的计算范围相同。模型选取 2002 年 3 月(枯水期)、8 月或 9 月(丰水期)、11 月(平水期)3 次的水质监测资料作为验证值。

一维水质模型验证的主要水质参数及其值为:DO 的大气复氧系数 0.15 d^{-1} (建库后为 0.075 d^{-1}), BOD_5 的降解系数 0.05 d^{-1} , $\text{NH}_3\text{-N}$ 的降解系数 0.1 d^{-1} , $\text{NO}_3\text{-N}$ 之间的转化系数 0.5 d^{-1} ,TP 的降解系数 0.0005 d^{-1} [8-9]。

限于篇幅,这里只给出 A4 水文站水质验证结果(图 4)。从验证结果可以看出,计算时间内,DO 的质量浓度在秋冬季节略高,春夏季略低。各监测断面 DO 质量浓度的计算值与实测值在枯水期 3 月的平均相对误差为 6.4%,丰水期 8 月平均相对误差为 5.3%,平水期 11 月的平均相对误差为 5.9%;丰水期 8 月份 BOD_5 质量浓度的计算值与实测值的平均相对误差为 8.7%; $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的计算值与实测值的误差在平水期相对较小,在丰水期与枯水期则相对较大; $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度计算值与实测值的平均相对误差在丰水期 8 月与平水期 11 月分别为 9.7% 和 21.4%;TP 质量浓度总体趋势基本一致。一维水质模型基本上能够反映 DO、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 以及 TP 等水质指标的变化过程。

2 研究结果

对梯级一和梯级四两个大型水库工程建设前后的库区以及下游干流河道的水质变化情况进行分析。在典型平水年条件下,采用一维水质数学模型对预测年 2020 年 5 个梯级电站同时运行时 CJ 江干流的水质变化情况进行预测。

一维水质数学模型的上边界条件 DO 质量浓度按 2002 年现状监测结果给定, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 的质量浓度在 2002 年水质监测结果的基础上考虑污染负荷的增加,参考 CJ 江流域规划的污染负荷增长比率,按 2020 年污染物排放量增加 1.5 倍计。

表 1 和图 5 ~ 7 给出了 2020 年建库后(5 个梯

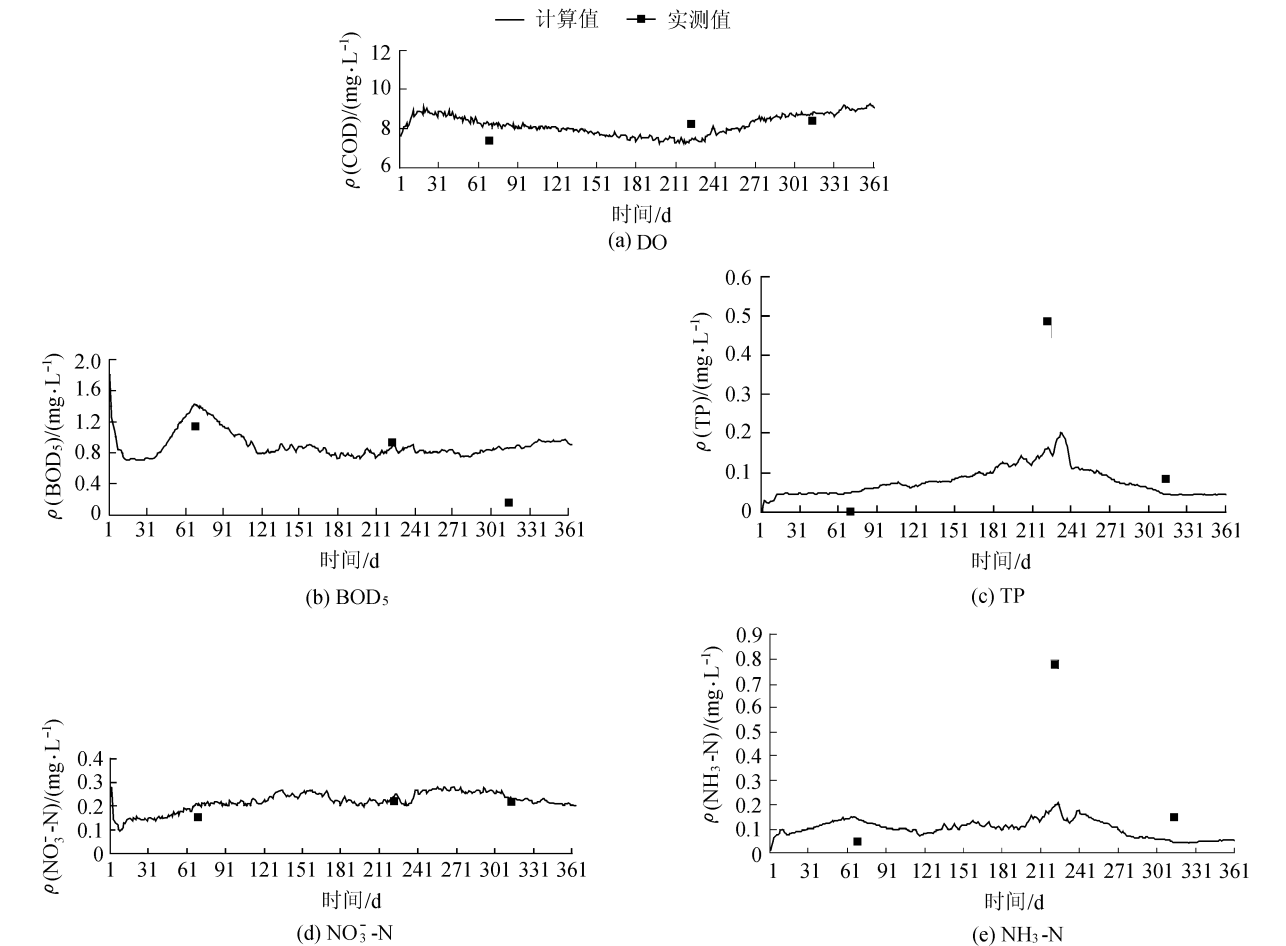


图4 2002年A4水文站水质验证结果

表1 2020年与建库前各坝址处DO质量浓度的比较

月份	梯级一 $\rho(\text{DO})$		梯级二 $\rho(\text{DO})$		梯级三 $\rho(\text{DO})$		梯级四 $\rho(\text{DO})$		梯级五 $\rho(\text{DO})$		A5断面 $\rho(\text{DO})$	
	建库前	2020年	建库前	2020年	建库前	2020年	建库前	2020年	建库前	2020年	建库前	2020年
6	7.86	7.84	7.94	7.89	7.95	7.80	7.95	7.83	8.04	7.77	7.91	7.59
7	7.61	7.36	7.66	7.34	7.58	7.16	7.59	7.25	7.64	7.23	7.55	7.16
8	7.52	7.25	7.56	7.20	7.45	7.06	7.47	7.09	7.51	7.07	7.41	7.00
9	8.02	7.80	8.04	7.75	7.93	7.61	7.90	7.56	7.91	7.53	7.79	7.44
10	8.51	8.27	8.55	8.24	8.49	8.14	8.45	8.20	8.38	8.00	8.18	7.86
11	8.93	8.81	9.06	8.82	8.94	8.69	8.80	8.76	8.78	8.64	8.63	8.51
12	8.98	8.95	9.36	9.05	9.42	9.03	9.19	9.22	9.27	9.17	9.01	9.01
1	8.87	8.89	9.61	9.02	9.72	9.03	9.34	9.21	9.54	9.37	9.18	9.25
2	8.55	8.70	9.30	8.84	9.64	8.89	9.35	9.15	9.54	9.27	9.15	9.14
3	8.50	8.46	8.98	8.55	8.87	8.55	8.62	8.60	8.79	8.69	8.57	8.61
4	8.34	8.33	8.57	8.37	8.83	8.41	8.78	8.56	8.79	8.61	8.51	8.48
5	8.15	8.25	8.34	8.28	8.26	8.04	8.44	8.31	8.49	8.32	8.28	8.17
平均值	8.32	8.24	8.58	8.28	8.59	8.20	8.49	8.31	8.56	8.31	8.35	8.18

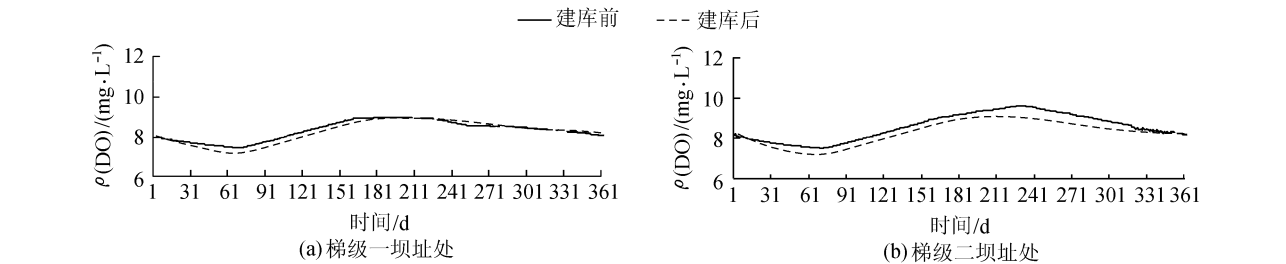


图5 2020年建库前后梯级一、二坝址处DO质量浓度的比较

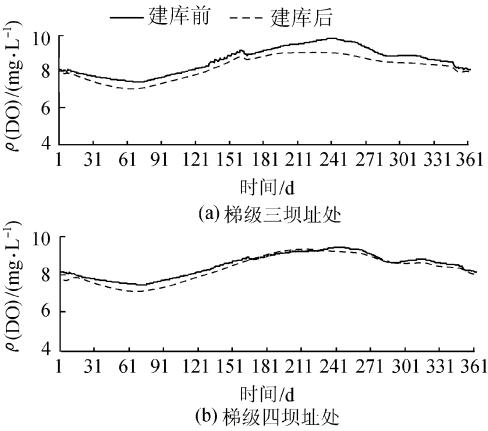


图 6 2020 年建库前后梯级三、四坝址处 DO 质量浓度的比较

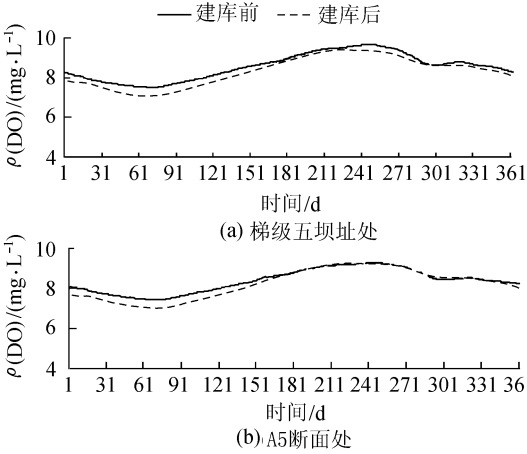


图 7 2020 年建库前后梯级五坝址处、A5 断面处 DO 质量浓度的比较

级电站全部运行)各坝址处逐月 DO 质量浓度的预测值与建库前(梯级二、三、五电站运行,梯级一、四两个大型水库未建)实测值的对比。

建库后,随着有机污染物自净降解量的增大,有机污染物、NH₃-N 等自净降解过程中 DO 的消耗量也将增大;另外水库蓄水以后,大气复氧能力随水位抬高而减弱。在这两方面因素的综合作用下,各梯级

电站水库蓄水后坝址处的平均 DO 质量浓度将较建库前略有下降,但下降幅度较小,下降幅度最大的出现在梯级三库区,下降幅度最大值为 0.69 mg/L。

由于各梯级电站运行时水的流量较大,库区换水周期较短,因此库区 DO 垂向分布梯度不大,同时上游梯级电站的下泄水是坝前水体的中层或上层水,一般不会出现下泄水 DO 质量浓度降低的情况。一维水质数学模型预测结果表明,在 2020 年 5 个梯级电站联合运行后,梯级水库及河道沿程的 DO 质量浓度均在 7.0 ~ 10.0 mg/L 之间,均达Ⅱ类水质标准。

这里只给出 A5 断面处的 BOD₅、NH₃-N、TP 等水质指标建库前后的比较结果。表 2 和图 8(a)给出了 2020 年建库后 A5 断面处逐月 BOD₅ 质量浓度的预测值与建库前的比较情况。

各梯级电站上游来水中的 BOD₅ 质量浓度普遍较低,基本都在 2 mg/L 以下,故库区建成后 BOD₅ 质量浓度也较低。虽然各梯级电站入库支流的 BOD₅ 质量浓度相对较高,但水库建成以后,水体体积增加,水环境容量增大,对于具有自净降解能力的有机污染物质而言,由于水库建成以后全库平均流速比建库前减小,污染物质在库区滞留时间将延长,污染物质在库区的自净降解总量将比建库前增大,因而,各梯级电站坝址处的平均 BOD₅ 质量浓度呈下降的趋势。

梯级一坝址处 BOD₅ 质量浓度的年平均值由 1.37 mg/L 降低为 0.86 mg/L,梯级二坝址处 BOD₅ 质量浓度的年平均值由 1.14 mg/L 降低为 0.76 mg/L,梯级三坝址处 BOD₅ 质量浓度的年平均值由 1.10 mg/L 降低为 0.78 mg/L,梯级四坝址处 BOD₅ 质量浓度的年平均值由 1.15 mg/L 降低为 0.69 mg/L,梯级五坝址处 BOD₅ 质量浓度的年平均值由 0.80 mg/L 降低为 0.55 mg/L,A5 断面处 BOD₅ 质量浓度的年平均值由 1.02 mg/L 降低为 0.77 mg/L,达到Ⅱ

表 2 2020 年与建库前 A5 断面处 BOD₅、NH₃-N、TP 质量浓度的比较 mg/L

$\rho(\text{BOD}_5)$			$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$			$\rho(\text{TP})$		
月份	建库前	2020 年	月份	建库前	2020 年	月份	建库前	2020 年
6	1.09	0.89	6	0.114	0.080	6	0.125	0.140
7	1.15	0.93	7	0.172	0.128	7	0.175	0.199
8	1.15	0.96	8	0.317	0.288	8	0.218	0.210
9	1.14	0.94	9	0.160	0.148	9	0.176	0.174
10	1.16	0.92	10	0.127	0.113	10	0.156	0.158
11	0.96	0.68	11	0.097	0.076	11	0.115	0.107
12	0.92	0.63	12	0.094	0.062	12	0.114	0.096
1	0.91	0.61	1	0.085	0.049	1	0.084	0.065
2	0.83	0.55	2	0.115	0.064	2	0.081	0.057
3	1.24	0.95	3	0.148	0.086	3	0.078	0.055
4	0.91	0.63	4	0.081	0.048	4	0.084	0.067
5	0.79	0.55	5	0.069	0.045	5	0.097	0.087
平均值	1.02	0.77	平均值	0.132	0.099	平均值	0.125	0.118

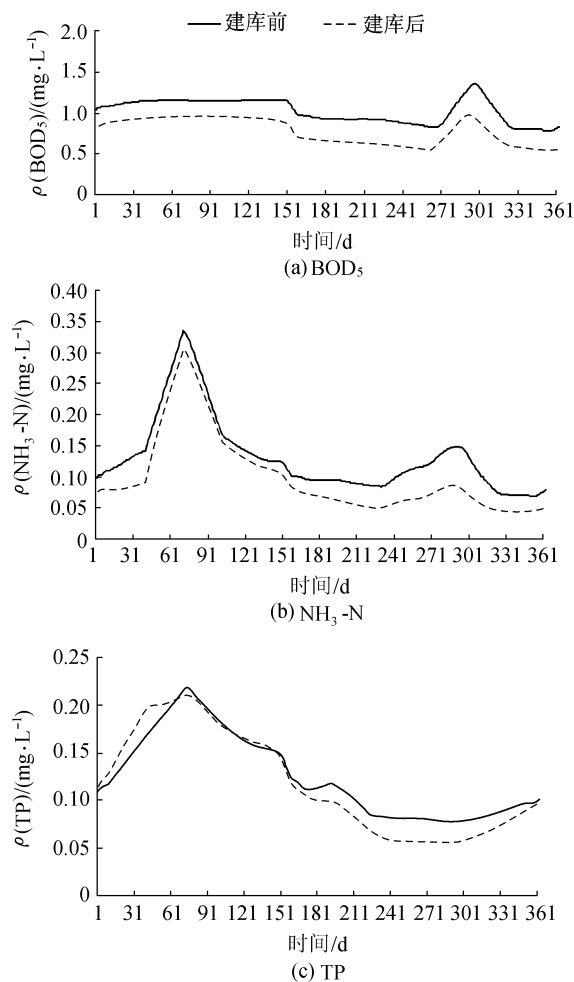


图8 2020年建库前后A5断面处BOD₅、NH₃-N、TP质量浓度比较

类水质标准,均满足水功能区划的要求。

表2和图8(b)给出了2020年建库前后A5断面处逐月NH₃-N质量浓度的比较情况。

总体而言,丰水期6—10月各坝址处的NH₃-N质量浓度变化不大,这主要是因为丰水期支流的NH₃-N质量浓度较高,水库下泄流量较建库前小,干流NH₃-N质量浓度受支流影响较大,因此建库后丰水期NH₃-N质量浓度变化较小;虽然枯水期1—2月支流的NH₃-N质量浓度较高,但由于建库后下泄流量增大,再加上水库的自净作用,因此各坝址处NH₃-N质量浓度下降较大。

梯级一坝址处NH₃-N质量浓度的年平均值由0.142 mg/L降低为0.109 mg/L,梯级二坝址处NH₃-N质量浓度的年平均值由0.124 mg/L降低为0.097 mg/L,梯级三坝址处NH₃-N质量浓度的年平均值由0.113 mg/L降低为0.088 mg/L,梯级四坝址处NH₃-N质量浓度的年平均值由0.141 mg/L降低为0.086 mg/L,梯级五坝址处NH₃-N质量浓度的年平均值由0.102 mg/L降低为0.068 mg/L,A5断面处NH₃-N质量浓度的年平均值由0.132 mg/L降低为0.099 mg/L。可

见,各坝址处NH₃-N质量浓度均小于0.5 mg/L,达到Ⅱ类水质标准,可满足水功能区划的要求。

表2和图8(c)给出了2020年建库后A5断面处逐月TP质量浓度的比较情况。可以看出,梯级四库区以下河道,丰水期支流的TP质量浓度较高,6—7月水库下泄流量较建库前小,污染物滞留时间较长,再加之入库污染负荷较大,各坝址及A5断面处的TP质量浓度略高于建库前水平。梯级四电站坝址处的TP质量浓度6月份由0.121 mg/L增加为0.141 mg/L,7月份由0.176 mg/L增加为0.202 mg/L;梯级五电站坝址处的TP质量浓度6月份由0.118 mg/L增加为0.132 mg/L,7月份由0.174 mg/L增加为0.201 mg/L;A5断面处的TP质量浓度6月份由0.125 mg/L增加为0.140 mg/L,7月份由0.175 mg/L增加为0.199 mg/L。枯水期1—2月则相反,水库下泄流量较大,对下游水体有一定的稀释作用,梯级电站各坝址及A5断面处的TP质量浓度则低于建库前水平。但是由于水库的TP质量浓度标准要高于河流的TP质量浓度标准,而建库后2020年各梯级电站库区TP质量浓度基本在0.1 mg/L左右,超过水库Ⅱ类水质标准。2020年A5断面处TP质量浓度的年平均值预测为0.118 mg/L,达到河流Ⅲ类水质标准。

3 结 论

a. 各梯级电站水库蓄水后各坝址处平均DO质量浓度将较建库前略有下降,下降最大值为0.69 mg/L;梯级水库及河道沿程的DO质量浓度值均在7.0~10.0 mg/L之间,水体的DO质量浓度达到Ⅱ类水质标准。

b. 对于具有自净降解能力的有机污染物质BOD₅以及NH₃-N而言,库区断面其平均质量浓度呈下降趋势,2020年各梯级坝址以及A5断面处均可达到Ⅱ类水质标准。

c. 对于TP这类难降解物质而言,建库前后其质量浓度变化较小。丰水期TP质量浓度略高于建库前水平;枯水期1—2月则相反,TP质量浓度低于建库前水平。但由于建库后TP质量浓度的水库标准要高于河流标准,因此建库后2020年各梯级电站库区TP质量浓度基本在0.1 mg/L左右,超过水库Ⅱ类水质标准。2020年A5断面处TP质量浓度的年平均值为0.118 mg/L,达到河流Ⅲ类水质标准。

参考文献:

[1] ORLOB G T. Mathematical modeling of water quality: streams, lakes, and reservoirs[M]. Michigan: Wiley, 1983.

(下转第56页)

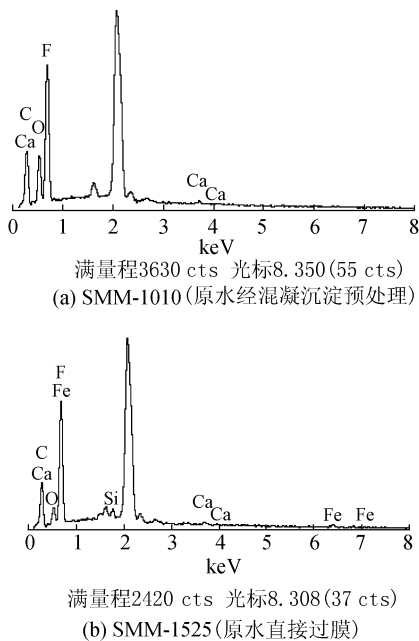


图 8 能谱扫描电镜元素分析对比

3 结 论

a. 采用浸没式超滤膜处理电厂冷却水,对浊度、总铁和 COD 的平均去除率分别为 98.2%、96.9% 和 43.2%,出水水质稳定,能够满足印染企业漂染用回用水的水质要求。

b. 增加混凝沉淀的预处理程序,对水体中污染物有很好的去除效果,能够改善超滤膜的过滤性能,提高超滤膜的过滤通量。电镜扫描以及膜表面元素分析也发现,经过混凝沉淀的超滤膜受污染较轻,混凝沉淀能够缓解超滤膜表面的污染。

参考文献:

[1] 黄福昌,詹健.超滤膜的过滤性能影响及其应用研究进展[J].江西化工,2009(4):23-26.

[2] 李佳.再生水回用于电厂循环冷却水的工艺研究[D].长安:长安大学,2010:4-7.

[3] 国家环境保护总局.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.

[4] 许振良.膜法水处理技术[M].北京:化学工业出版社,2001.

[5] TRAN T,BOLTO B,GRAY S,et al. An autopsy study of a fouled reverse osmosis membrane element used in a brackish water treatment plant[J]. Water Research,2007,41(17):3915-3923.

[6] 张艳,李圭白.混凝沉淀-浸没式超滤膜处理东江水的中试研究[J].中国给水排水,2009,25(11):37-39.

[7] 董秉直,杨伟帅,刘峥,等.不同混凝剂改善超滤膜通量的效果[J].给水排水,2009,35(12):12-17.

[8] CARROLL T,KING S,GRAY S R,et al. The fouling of microfiltration membrane by NOM after coagulation

treatment[J]. Water Research,2000,34(11):2861-2868.

[9] LAINE J M,CAMPOS C,BAUDIN I,et al. Understanding membrane fouling: a review of over a decade of research[J]. Wat Sci Tech: Water Supply,2003,3(5/6):155-164.

[10] AWWA Membrane Technology Research Committee. Recent advances and research needs in membrane fouling[J]. Journal of AWWA,2005,97(8):79-89.

[11] 蒋绍阶,刘宗源. UV_{254} 作为水处理中有机物控制指标的意义[J].重庆建筑大学学报,2002,24(2):61-65.

[12] KATSOUFIDOU K,YIANTSIS S. G.,KARABELAS A J. An experimental study of UF membrane fouling by humic acid and sodium alginate solutions: the effect of backwashing on flux recovery[J]. Desalination,2008,220:214-227.

[13] CAMPINAS M,ROSA M J. Assessing PAC contribution to the NOM fouling control in PAC/UF systems[J]. Water research,2010,44:1636-1644.

[14] DONG Bing-zhi,CHEN Yan,GAO Nai-yun,et al. Effect of coagulation pretreatment on the fouling of ultrafiltration membrane[J]. Journal of Environmental Sciences,2007,19(3):278-283.

[15] JUCKER C,CLARK M M. Adsorption of aquatic humic substances on hydrophobic ultrafiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science,1994,97:37-52.

[16] SCHAFER A I,SCHWICKER U. Microfiltration of colloids and natural organic matter[J]. Journal of Membrane Science,2000,171:151-172.

(收稿日期:2011-10-13 编辑:彭桃英)

(上接第 33 页)

[2] 凌万沛,李亚农.东江水库有机物(BOD_5 ,DO)变化预测研究[J].中国水电,1986(S1):56-61.

[3] 李怀恩.分层型水库的溶解氧模型发展概括[J].人民长江,1988(5):16-20.

[4] 雒文生,谈戈.三峡水库香溪河库湾水质预测[J].水电能源科学,2000,18(4):46-48.

[5] 申满斌,陈永灿,刘昭伟,等.岸边排放污染物浓度场三维浑水水质模型研究[J].水力发电学报,2005,4(3):93-98.

[6] 郭磊,高学平,张晨,等.北大港水库水质模拟及分析[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):11-16.

[7] 黄国如,芮孝芳.官厅水库水质模型研究[J].水科学进展,1999,10(1):20-24.

[8] 李锦秀,廖文根,黄真理.三峡水库整体一维水质数学模拟研究[J].水利学报,2002(12):7-17.

[9] 江春波,李凯,李苹,等.长江三峡库区污染混合区的有限元模拟[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(6):808-811.

(收稿日期:2011-09-02 编辑:彭桃英)