

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.04.011

乌江上游梯级水库水体富营养化研究

魏 浪¹,夏 霆²,严志程³,卞勋文³

(1.中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院,贵州 贵阳 550081;2.南京工业大学环境学院,江苏 南京 210002;3.河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:以乌江上游洪家渡、东风、索风营和乌江渡 4 座梯级水库为研究区域,于 2007 年开展了现场监测和调查,分别对 4 座水库富营养化状况和影响原因进行初步研究。结果表明:洪家渡水库枯水期为贫营养状态,丰水期为贫-中营养状态;东风和索风营水库枯、丰水期均为中营养状态;乌江渡水库枯、丰水期均为中-富营养状态。自上游至下游梯级水库水体富营养化程度趋于严重,梯级电站大坝阻隔引起的水动力条件变化,N、P 等营养盐输入条件,网箱养殖,日照和水温条件均对库区富营养化状况产生了重要影响。

关键词:乌江 梯级开发 富营养化 水库

中图分类号:TV211.1 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2010)04-0039-04

Eutrophication in upstream cascade reservoirs of Wujiang River

WEI Lang¹,XIA Ting²,YAN Zhi-cheng³,BIAN Xun-wen³

(1. HYDROCHINA Guiyang Engineering Corporation, Guiyang 550081, China;2. College of Environment, Nanjing University of Technology, Nanjing 210002, China;3. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract:Field monitoring and investigation of the Hongjiadu, Dongfeng, Suofengying, and Wujiangdu cascade reservoirs were carried out, and the status and influences of eutrophication were studied in 2007. The results showed that the Hongjiadu Reservoir had a low level of nutrients in the dry season, and a low to medium level of nutrients in the flood season; Dongfeng and Suofengying reservoirs had a medium level of nutrients both in the dry and flood seasons; the Wujiangdu Reservoir had a medium to high nutrient level both in the dry and flood seasons; and the degree of eutrophication tended to increase from upstream to downstream. The change of hydrodynamic conditions due to the cutting off of the dam, the inputs of nitrogen and phosphorus, net cage fish farming, sunlight, and water temperature most affected the reservoir eutrophication.

Key words:Wujiang River; cascade development; eutrophication; reservoirs

水电开发在带来巨大社会效益和经济效益的同时,对生态环境也产生了影响,尤其是流域梯级水库开发的影响更为深远。梯级水库富营养化状况受地形、地质和气候等自然条件以及人类生产、生活等多层次和多尺度因素综合影响,能在很大程度上反映河流生态环境的变化特征^[1-2]。乌江为贵州省第一大河流,也是我国十三大水电能源基地之一,近年来,乌江已建、正建的梯级水电工程已对区域经

济和河道生态环境产生了重大影响。笔者选择乌江上游已建 4 座梯级水库,初步探讨其富营养化特征和影响因素,希冀能为乌江流域的科学管理以及更深入地研究梯级水电工程的生态效应提供参考。

1 研究区概况

乌江发源于贵州省西北部乌蒙山东麓,南源三岔河发源于贵州威宁县的盐仓,北源六冲河发源于

作者简介:魏浪(1978—),男,贵州桐梓人,工程师,主要从事环境保护评价研究。E-mail: weilang@ghidri.com.cn
通讯作者:夏霆(1973—),讲师。E-mail: xiating92@163.com

贵州赫章县的妈姑(图1)。从1971年乌江渡电站开工至今,乌江干流共规划有12个梯级电站。为探索梯级水库的影响效应,笔者选择乌江上游(包括北源)已建好的洪家渡、东风、索风营和乌江渡4座连续梯级水库为研究区域(表1)。研究区河谷切深达170 m以上,水位由上游洪家渡电站的1 140 m过渡到下游乌江渡电站的760 m,落差达380 m,乌江渡坝址以上流域面积27 790 km²,为整个乌江流域面积的1/3,坝址处多年平均流量483 m³/s。研究区属亚热带季风气候,年平均气温为13℃左右,云量多,太阳辐射总量少、日照少,降雨量年内分配极不均匀,一般5月进入汛期,到10月汛期结束,5~10月降水量约占全年的83%左右。研究区山地多、平地少,城市化水平较低,以农业为主,且耕作方式较为原始。

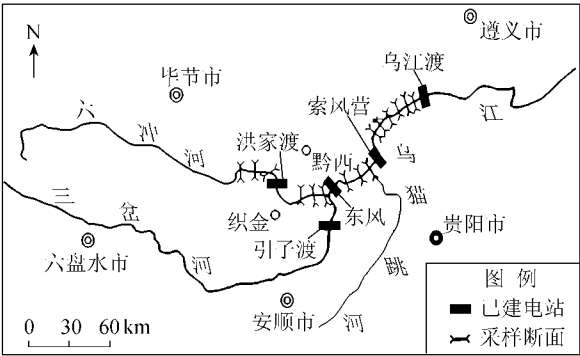


图1 研究区域及各水库监测断面设置

表1 研究区水电站主要指标

名称	蓄水位/m	平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	集水面积/km ²	调节性能	库容/ 亿 m ³	坝址位置
洪家渡	1140	155	9900	多年	44.97	E105°51'54" N26°51'49"
东风	970	343	18 161	季	8.64	E106°24'36" N26°59'44"
索风营	837	395	21 862	日、周	1.69	E106°23'24" N27°5'27"
乌江渡	760	483	27 790	季	21.40	E106°42'54" N27°20'11"

2 研究方法

根据4个水库回水段的长度共设置15个采样监测断面。其中洪家渡、东风和索风营水库分别设置3个断面,库区观测范围为25 km左右,乌江渡6个断面,库区观测范围为大坝上游55 km。分别于2007年4月上旬(枯水期)和8月上旬(丰水期)开展现场调查与监测,水质监测包括Chl-a、COD_{Mn}、SD、DO、TN、TP等项目,同时进行浮游藻类的采集及定量镜检观察。水样以及藻类的采集、保存和分析方法参照文献[3]。

根据监测结果,结合水体综合营养状态指数

(TLI)藻类密度与藻类Shannon-weaver指数(H')^[4]进行各水库富营养化评价。

3 结果与讨论

3.1 水质、藻类调查结果

各水库枯、丰水期水质平均监测结果见表2。由监测结果看,4个库区DO质量浓度为8.5~9.6 mg/L,且4个库区之间差异不大,除洪家渡外,其余水库枯水期DO浓度优于丰水期;TN质量浓度洪家渡较低,实测值均低于0.7 mg/L,其余3库质量浓度值均较高,除枯水期索风营外,均值均大于1.5 mg/L,乌江渡库区TN质量浓度断面实测值差异较大,由库尾至库首浓度逐渐增大,其中丰水期2个断面质量浓度值高于3 mg/L;TP质量浓度和TN相似。洪家渡库区TP质量浓度最低,在0.01 mg/L左右,东风和索风营库区TP质量浓度基本上在0.07 mg/L左右,乌江渡库区TP质量浓度最高,最高值达到了0.24 mg/L;COD_{Mn}质量浓度各库区均较低,基本在3 mg/L以下,除乌江渡水库外,其余3库枯水期COD_{Mn}质量浓度均高于丰水期;Chl-a质量浓度上游洪家渡、东风和索风营3库较低,质量浓度值均小于3 mg/m³,且丰水期优于枯水期,乌江渡水库浓度值较高,丰水期高于枯水期,丰水期实测浓度最高值达到了13.1 mg/m³;4个库区SD值均较大,平均值均在1.5 m以上,自上游至下游SD值渐趋变小。从以上监测结果,可知乌江4个梯级库区从上游到下游营养盐和Chl-a浓度总体上呈逐级增加的趋势,且富营养化主要水质控制因子为N和P。各监测断面TN、TP与Chl-a实测浓度变化见图2(监测断面序号自上游至下游排列)。

表2 各水库水质监测平均结果

库区	水期	$\rho(\text{DO})$ (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{TN})$ (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{TP})$ (mg·L ⁻¹)	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ (mg·L ⁻¹)	SD /m	$\rho(\text{Chl-a})$ (mg·m ⁻³)
洪家渡	枯	8.96	0.55	0.01	1.57	3.32	1.73
	丰	9.06	0.52	0.01	1.11	3.04	1.67
东风	枯	8.89	1.59	0.08	1.42	1.90	2.13
	丰	8.74	1.83	0.06	1.19	1.79	1.53
索风营	枯	8.88	1.31	0.07	3.52	2.07	2.57
	丰	8.71	1.52	0.06	2.65	1.68	2.43
乌江渡	枯	8.77	1.50	0.12	2.07	1.89	5.43
	丰	8.58	1.70	0.09	2.94	1.52	6.93

两次调查共检出藻类103种,分属于蓝藻门、隐藻门、甲藻门、金藻门、硅藻门和绿藻门等6门55属。各水库枯、丰水期浮游藻类平均细胞密度值与优势种见图3。从图中可以看出,在枯水期,从上游的洪家渡水库到下游的乌江渡水库,蓝藻门和绿藻门藻类数量不断增加,硅藻门藻类数量变化不大,在索风营水库数量最大。在丰水期,从洪家渡水库到

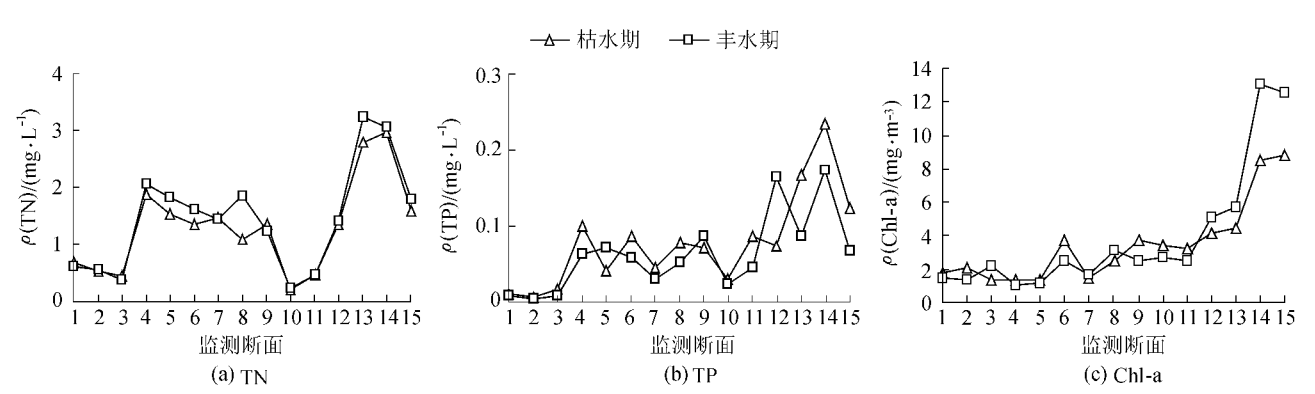


图2 各监测断面 TN、TP 与 Chl-a 实测质量浓度变化

乌江渡水库 蓝藻门和绿藻门藻类数量先逐渐减小 , 到乌江渡水库后发生突增 , 硅藻门藻类数量也从洪家渡水库的数量最多渐变到索风营水库的数量最少 , 在乌江渡水库又有所回升。洪家渡、东风和乌江渡水库的枯水期藻类总数量都小于丰水期的数量 , 而索风营水库枯水期藻类总数量大于丰水期。

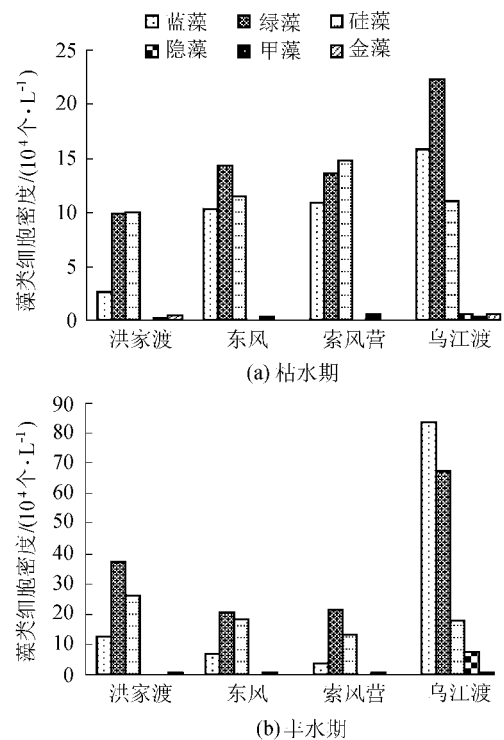


图3 各水库浮游藻类分布及细胞密度

监测结果表明 , 绿藻、硅藻和蓝藻构成了乌江上游 4 座梯级水库藻类优势种 , 其中检测到的绿藻种类最多 , 除索风营水库丰水期绿藻种数占检测到总藻种数的 40.6% 外 , 其余各库丰水期和枯水期绿藻种数占检测到总藻种数百分比都达到 50% 以上 , 其中东风水库丰水期绿藻种数占检测到总藻种数百分比达 67.9%。绿藻门的卵囊藻属(*Oocystis*) 盘星藻属(*Pediastrum*) 栅藻属(*Scenedesmus*) 角星鼓藻属(*Staurostrum*) 和鼓藻属(*Cosmarium*) 是检测到包含种最多的属。

3.2 富营养化评价结果

参考文献 [4] 选择 Chl-a、TN、TP、SD 和 COD_{MN} 指标计算出各库区综合营养状态指数 TLI , 同时根据藻类种数和相应密度计算出 H' 指数(表 3)。计算结果表明 4 个库区枯、丰水期 TLI 值均呈自上游到下游逐渐增大趋势 , 各库枯、丰水期相差不大 , 丰水期略好 , 藻类 H' 值枯、丰水期总体上呈自上游到下游逐渐减小趋势 , 各库枯水期值优于丰水期。按文献 [4] 规定的评判标准 , 可知洪家渡枯、丰水期 TLI 值均小于 30 , 应为贫营养状态 , 但由于在丰水期藻类密度较大 , 且 H' 指数值小于 3 , 可综合判定丰水期洪家渡水库为贫-中营养状态。东风、索风营两库枯、丰水期 TLI 值均在 30 ~ 50 内 , 且藻类密度值与 H' 指数值均符合相应的中营养标准 , 因此均综合判定为中营养化状态。下游乌江渡水库枯水期 TLI 值大于 50 , 应为富营养状态 , 但按照藻类密度值与 H' 指数值均符合中营养状态标准 , 因此综合判定为中-富营养化状态 ; 丰水期虽然乌江渡水库 TLI 值与 H' 指数值均符合中营养标准 , 但藻密度值大于 100 已符合富营养化标准 , 因此也综合判定为中-富营养化状态。评判结果见表 3。

表3 各水库富营养化评价结果

库区	水期	TLI	H' 指数	藻密度 / $(10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1})$	营养化状况
洪家渡	枯	26.9	3.3	23.1	贫营养
	丰	24.2	2.5	76.9	贫-中营养
东风	枯	35.0	2.6	36.6	中营养
	丰	31.5	2.4	46.0	中营养
索风营	枯	45.6	2.8	40.0	中营养
	丰	44.1	1.7	39.0	中营养
乌江渡	枯	50.8	2.7	50.6	中-富营养
	丰	49.9	1.6	176.5	中-富营养

评判结果表明 , 乌江渡水库枯、丰水期均呈现轻度的富营养化趋势 , 尽管上游洪家渡、东风、索风营 3 座水库目前综合营养化状况较好 , 但总体上看 4 座梯级水库自上游到下游富营养化状况呈加重趋势 , 这一现象应引起重视。

3.3 富营养化影响因素初步探讨

3.3.1 库区水体滞留时间

建坝后水库流速减缓,使水体的交换作用减弱,不利于污染物移送,易导致营养盐的富集并促进藻类生长。根据本次调查与评价结果,乌江梯级水库N、P营养盐、Chl-a浓度以及藻密度均呈自上游至下游逐渐增大变化。水库蓄水后,随着水体滞留时间变长,浮游植物拥有更长的生长繁殖周期,在适宜的营养条件下数量会显著增长,水体发生富营养化的几率增大。乌江上游4个梯级水库的水体滞留时间排序为:洪家渡、乌江渡、东风、索风营(表4)。洪家渡水库属多年调节水库,滞留时间长,尽管营养盐浓度较低,但水力停留时间长,以致形成数量较大的硅藻群落。而东风、索风营水库的滞留时间都比较短,尤其在丰水期,水流滞留时间太短,藻类难以在短时间内迅速增长繁殖,不能形成稳定的藻类群体,使得即使在丰水期较适宜的温度条件下,藻类也难以大量增长。

表4 各水库不同水期平均滞留时间

水 库	平均径流量/亿 m ³		平均滞留时间/d	
	枯	丰	枯	丰
洪家渡	8.89	38.10	921	216.0
东 风	18.10	89.45	91	17.7
索风营	22.00	104.00	14	2.9
乌江渡	28.90	129.10	135	30.0

3.3.2 N、P等营养盐条件

N、P等营养盐条件是表征湖库水体出现富营养化并影响浮游藻类生长的重要因素。一般认为,湖库水体出现富营养化的N、P临界质量浓度分别为0.2 mg/L和0.02 mg/L。根据表2结果可知,除洪家渡水库TP质量浓度低于0.02 mg/L外,其余水库丰、枯水期N、P质量浓度水平均超过了这一临界浓度,营养盐偏高为浮游藻类的生长创造了条件,这也是库区藻类组成和数量变化的重要影响因素。

本次调查表明,乌江梯级库区水质受周边污染源及上游、支流汇入条件影响较大。尽管多数库区周边居民居住分散,生活性污染源少,但水质受矿产污染源和水土流失面污染源影响较大,如两岸的黔西氮肥厂、黔西磷肥厂、息烽重钙厂及息烽造纸厂等,流域内水土流失较高,同时由于居民耕作方式较为原始,耕地施用的农药和化肥等N、P易随地表径流进入河流与水库。并且,洪家渡上游来水的营养盐尤其是N浓度背景输入条件较高,支流汇入的水质较差,均严重影响了库区水质。就污染输入而言,进入乌江渡库区污染源要明显高于上游库区,使得乌江渡水库营养盐浓度较高,同时使得乌江渡水库

在丰水期维持较高的藻类密度。

3.3.3 光照与水温

光照为影响藻类生存的必要条件。乌江上游水库均为高山峡谷型地貌,高山遮挡,影响水库光照。根据乌江流域气象条件统计,流域日照偏低,全年只有7、8、9三个月日照时数最高,高于30%,同时据鸭池河水文站统计资料,这三个月日平均水温分别为23℃、21.7℃、20.6℃,适合藻类生长(15~30℃),使得藻类生长条件丰水期优于枯水期,这也是乌江库区藻密度丰水期大于枯水期原因之一。

河道筑坝后,水库易出现水温分层现象,并改变下泄水温条件。同步监测表明,丰水期洪家渡、东风水库水温分层现象明显,下泄低温水影响下游水库,使得表层平均水温从洪家渡的26.5℃分别降低到东风水库的24.5℃、索风营水库的21.9℃。而索风营属混合型水库,水体混合均匀,无分层现象,对下游的乌江渡没有下泄低温水影响,由于沿程增温作用,表层水温由索风营水库的21.9℃,再上升到乌江渡水库的27℃。由表3可以看出,受下泄低温水影响的东风和索风营水库在丰水期浮游植物数量分别为 46×10^4 个/L和 39×10^4 个/L,远远低于不受下泄低温水影响的洪家渡水库的 76.9×10^4 个/L和乌江渡水库的 176.5×10^4 个/L。低温下泄水和浮游植物数量之间有一定关系,低温在一定程度上能够降低丰水期浮游植物数量。相比于东风和索风营库区,丰水期洪家渡和乌江渡库区发生水体富营养化的几率更大。

3.3.4 网箱养鱼

本次调查发现,乌江渡水库从漩塘到大坝前遍布养鱼网箱,对水库营养盐和藻类生长条件均形成重要影响。网箱养鱼需要投加饵料,如果鱼类不能完全摄食就会产生残饵,加上养殖鱼类的排泄物,容易造成水体营养盐增加,促进浮游藻类的生长。根据本次调查,同时参考同类地区水库网箱养鱼的数据统计^[5],可计算出当年乌江渡水库由网箱养鱼向水体输入的N、P负荷量分别达278.85 t/a、54.43 t/a。近年来乌江渡库区网箱养殖量逐年增长,这些N、P负荷进入水体,严重影响了水体营养盐浓度和藻类生长条件。同时网箱养鱼还有可能使得浮游动物被鱼类摄食,减轻浮游藻类的被摄食压力,加快藻类的增殖速率,洪家渡、东风、索风营水库没有人工养殖或放养,浮游动物和滤食性鱼类的生物量低,难以显著地影响浮游藻类生长。乌江渡水库藻密度较高应与库内大量网箱养殖密切相关。

(下转第66页)

果从高到低顺序为:美人蕉,黑三棱草,野茭白,对 COD 的净化效果从高到低顺序为:野茭白,黑三棱草,美人蕉。

b. 同一植物不同基质对生活污水的净化效果有所不同。不同基质对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 净化效果从高到低顺序为:碎石,高炉渣,瓜子片;对 TP 净化效果从高到低顺序为:高炉渣,碎石,瓜子片;对 COD 净化效果从高到低顺序为:碎石,瓜子片,高炉渣。

c. 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 浓度较高的污染环境,采用碎石为基质、黑三棱草为植被的人工湿地系统效果最佳;对 TP 浓度较高的污染环境,采用高炉渣为基质、美人蕉为植被的人工湿地系统效果最佳;对 COD 浓度较高的污染环境,采用碎石为基质、野茭白为植被的人工湿地系统效果最佳。

d. 空白对照系统(仅填充基质未种植物)对污染物的净化有一定效果。同一基质湿地系统下,空白对照系统对污染物的净化效果明显低于有植物的湿地系统。

参考文献:

[1] GILLESPIE B, HAWKINS B, RODGERS H, et al. Transfers and transformation of in constructed wetlands: mitigation of faecal coliforms[J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 279-292.

[2] JUWARKAR A S, OKE B, JUWARKAR A, et al. Domestic wastewater treatment through constructed wetland in India[J]. Wat Sci Tech, 1995, 33(3): 291-294.

[3] 靖元孝, 陈兆平, 杨丹菁. 风车草对生活污水的净化效果及其在人工湿地的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2002,

8(6): 614-617.

[4] 廖新伟, 骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 719-722.

[5] 徐丽花, 周琪. 模拟暴雨径流人工湿地系统中 N 和 P 的去除及其分布[J]. 给水排水, 2002, 28(10): 12-15.

[6] BRASKERUD B C. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural nonpoint source pollution[J]. Ecological Engineering, 2002, 19: 41-61.

[7] 李晓东, 孙铁珩, 李海波. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1226-1232.

[8] KNIGHT R L. Constructed wetlands for livestock waste water management[J]. Ecological Engineering, 2000, 15: 41-55.

[9] 魏成, 刘平, 秦晶. 不同基质和不同植物对人工湿地净化效率的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3691-3697.

[10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 环境科学出版社, 2002.

[11] 周小平, 杨林章, 王建国, 等. 炉渣等 4 种基质对富营养化水体中 N、P 的降解研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 94-98.

[12] 张曦, 陆铁峰. 天然沸石吸附技术防治暴雨径流氮磷污染[J]. 云南环境科学, 2003, 24(1): 48-51.

[13] 邓雁希, 许虹, 黄玲, 等. 炉渣处理含磷废水的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 290-292.

[14] TANNER C C. Plants for constructed wetland treatment systems: a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. Ecological Engineering, 1996, 7(1): 59-83.

[15] 白晓慧, 王宝贞, 余敏, 等. 人工湿地污水处理技术及其发展应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(6): 88-92.

(收稿日期: 2009-03-30 编辑: 高渭文)

(上接第 42 页)

4 结 语

a. 2007 年现场监测表明, 洪家渡、东风、索风营和乌江渡 4 个库区 DO 浓度与 SD 值均较大, DO 浓度 4 个库区之间差异不大, SD 值 4 个库区自上游至下游渐趋变小。乌江 4 个梯级库区从上游到下游营养盐和 Chl-a 浓度总体上呈逐级增加的趋势, 富营养化主要水质控制因子为 N 和 P。

b. 绿藻、硅藻和蓝藻构成了乌江上游 4 座梯级水库藻类优势种。洪家渡、东风和乌江渡水库的枯水期藻类数量都小于丰水期的数量, 而索风营水库枯水期藻类数量大于丰水期。枯水期 4 个库区自上游至下游蓝藻门和绿藻门藻类数量不断增加, 硅藻门藻类数量基本稳定, 在索风营水库数量最大; 丰水期 4 个库区自上游至下游蓝藻门和绿藻门藻类数量先逐渐减小, 到乌江渡水库后发生突增, 硅藻门藻类数量也从洪家渡水库的数量最多渐变到索风营水库的数量最少, 在乌江渡水库又有所回升。

c. 洪家渡水库枯水期为贫营养状态、丰水期为贫-中营养化状态, 东风和索风营水库枯、丰水期均

为中营养化状态, 乌江渡水库枯、丰水期均为中-富营养化状态, 自上游至下游梯级水库富营养化程度有趋于严重的特征, 乌江渡水库枯、丰水期均呈现了轻度的富营养化趋势。

d. 除了梯级大坝阻隔引起的水体滞留变化及 N、P 等营养盐条件外, 日照和水温、网箱养殖条件均对库区富营养化状况产生了重要影响。

参考文献:

[1] BONACCI O, ROJE-BONACCI T. The influence of hydroelectrical development on the flow regime of the Karstic River Cetina[J]. Hydrological Process, 2003, 17: 1-16.

[2] CULLAJ A, HASKO A, MIHO A, et al. The quality of Albanian natural waters and the human impact[J]. Environment International, 2005, 31: 133-146.

[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] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 208-232.

[5] 许德芝. 红枫湖网箱养鱼对水质的影响[J]. 环境, 2002(2): 43.

(收稿日期: 2009-02-16 编辑: 高渭文)