

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.009

牛栏江—滇池补水工程对滇池外海的水环境改善效果研究

毛建忠¹, 孙燕利¹, 贺克雕^{1,2}, 孔桂芬¹, 杨中兰¹

(1. 云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106; 2. 云南大学生态学与环境学院, 云南 昆明 650091)

摘要:利用牛栏江—滇池补水工程运行前后的水质实测资料,对滇池外海的水环境改善效果进行研究。选取 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl-a、SD 等主要水环境指标,从指标浓度变化、水质类别变化、指标向好率变化和极大值变化等方面分析牛栏江—滇池补水工程对滇池外海的水环境改善效果。结果表明,牛栏江—滇池补水工程运行后,滇池外海各监测站点的 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl-a、SD 及营养状态指数均优于调水前,富营养化水平明显好转,水环境改善成效显著。

关键词:牛栏江—滇池补水工程;滇池外海;水环境;改善效果

中图分类号:X824 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)02-0047-05

Study of water environment improvement effect by Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project in Waihai area of Dianchi Lake

MAO Jianzhong¹, SUN Yanli¹, HE Kediao^{1,2}, KONG Guifen¹, YANG Zhonglan¹

(1. Hydrology and Water Resources Bureau of Yunnan Province, Kunming 650106, China;

2. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: This study focused on the water environment improvement in the Waihai area of Dianchi Lake based on measured data before and after the Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project was implemented. Water environmental indices including TP, TN, NH₃-N, COD_{Mn}, Chl-a, and SD were selected to assess the improvement effects in regard to the variations of index concentration, water quality classification, rate of indices that show improving values, and maximum values. The results show that TP, TN, NH₃-N, COD_{Mn}, Chl-a, and SD, as well as the trophic level index improved after the water supplement project was implemented, and the level of eutrophication declined significantly, indicating that the Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project had a marked effect on water environment improvement.

Key words: Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project; Waihai area of Dianchi Lake; water environment; improvement effect

随着昆明市经济社会的发展,滇池流域人口数量和主城区面积不断增加,滇池水质状况总体呈下降趋势,20 世纪 70 年代后期滇池富营养化进程明显加快。一般说来,磷是影响湖泊水生植物特别是藻类的关键性营养元素^[1]。根据经济合作发展组织的统计调查,世界上有 80% 以上的湖泊富营养化进程受磷控制,滇池就属于磷控制型^[2]。从 80 年代末起,外海水质长期在 V 类~劣 V 类区间波动,1992 年滇池

首次发生较大规模的微囊藻水华,至今几乎每年都暴发蓝藻水华,水体污染和富营养化程度日趋严重,湖泊水生态系统受到严重损害。

2007 年,云南省针对滇池污染治理工作确定了 6 大水污染综合治理措施,其中“外流域调水水资源补给措施”已于 2013 年 12 月 28 日建成通水,即牛栏江—滇池补水工程。工程对增加滇池流域水资源量,提高水资源承载力,改善水环境,协调昆明市及曲靖市

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目(9201401026-02)

作者简介:毛建忠(1968—),男,高级工程师,主要从事水环境监测评价与管理研究。E-mail:13888999137@139.com

的社会经济发展具有重要意义^[3]。工程调水经输水渠(管)道汇入盘龙江(清水通道),并从滇池外海北部的盘龙江入湖口汇入滇池外海,工程设计年补水量 5.72 亿 m³。牛栏江—滇池补水工程是优化配置水资源的一项重大举措,工程运行至今已 2 年有余,向滇池外海补充优质水源共 10.71 亿 m³,其中 2014 年调水 4.46 亿 m³,2015 年调水 6.25 亿 m³。工程调水进入滇池外海后,对滇池水环境的改善效果已成为各级政府和社会公众关注的焦点,但缺乏利用实测数据开展的研究。本文选择滇池外海为研究对象,利用工程运行前后的水质实测资料,对滇池外海的水质状况和水环境改善效果进行分析,以期对滇池的水污染综合治理和水资源科学调度提供科学依据。

1 研究区概况

滇池是云南省最大的高原淡水湖泊,位于 102°36'E ~ 102°47'E,24°40'N ~ 25°02'N,属长江流域金沙江水系。滇池位于昆明市主城区的下游,湖泊面积 298 km²,湖体略呈弓形,弓背向东,为南北走向,南北最长 32 km,东西宽 12.5 km,湖岸线长 163.2 km。当水位为 1 886.5 m 时,平均水深 4.4 m,最大水深 10.9 m,湖容积 12.9 亿 m³,是典型的宽浅型高原湖泊。滇池水域被水工建筑物(船闸)分为 2 部分,北部为草海,南部为外海,外海水面面积占比约 96.7%,为滇池主体,出口位于湖泊西南端的海口镇,出流入螳螂川,后流入普渡河,最后在禄劝县境内的三江口汇入金沙江干流。

2 数据来源

云南省水环境监测中心长期在滇池外海设置了五水厂、海埂、白鱼口、中滩、昆阳、海晏 6 个常规监测点,见图 1,2013 年增加乌龙、观音山中、海晏中、白鱼口中、沙堤、河泊所、大河尾、海埂中、富善、王官、晋宁、红泥咀 12 个站点,2014 年以后再次增加观音山、西华中、晖弯中 3 个监测点,共 21 个站点。主要监测指标有 pH 值、电导率、DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN、SD 等,其中五水厂、海埂、白鱼口、中滩、大河尾、海埂中和观音山中加测 Chl-a。

结合改善水环境效果分析工作的需求,本文选取 2009—2015 年的各监测点水质监测资料作为水环境改善效果分析的基础数据源。结合滇池外海水污染特征分析,选取 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a 6 项水环境指标以及营养状态指数 I_E 作为分析的主要指标。据统计,以上站点 2009—2015 年,对 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a 6 项水环境指标共开展了 854 项次监测,共获得监测数据 4 696 组。

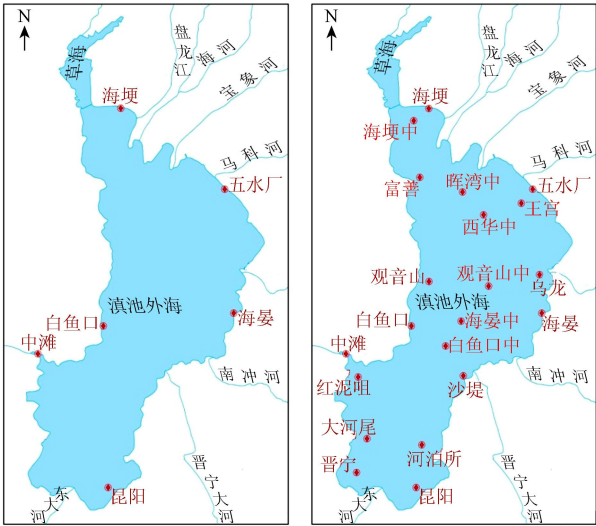


图 1 滇池外海监测站点示意图

3 研究方法

本研究重点考虑滇池外海在工程运行前后的水环境改善效果,采取的方法是以工程竣工运行时间节点划分为工程运行前(2009—2013 年)和工程运行后(2014—2015 年),对比 2 个时期滇池外海水体的富营养化关键因子(TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a)、营养状态指数、水质评价分析结果的差异与变化,进行统计分析后,科学评估滇池外海水环境的变化趋势和改善效果,分为以下 5 个步骤。

步骤 1:根据 2009—2013 年滇池外海 6 个常规监测点的 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a 6 项水环境指标的监测资料,用算术平均法计算各站点工程运行前各指标均值。营养状态指数根据《地表水环境质量评价技术规程》采用指数法^[4],评价项目包括 TP、TN、Chl-a、COD_{Mn} 和 SD,采用线性插值法将水质指标浓度值转换为赋分值,再根据以下公式计算:

$$I_E = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{N} \tag{1}$$

式中:I_E 为营养状态指数,I_E 多年均值同样采用算术平均法计算;E_i 评价项目赋分值;N 为评价项目个数。

步骤 2:用同样方法计算工程运行后(2014—2015 年)滇池外海 21 个站点 TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a 6 项水环境指标和营养状态指数的年均值,并与工程运行前的结果进行比较分析。

步骤 3:根据 SL395—2007《地表水环境质量评价技术规程》,按照水质站的口径,对滇池外海 21 个站点 2013—2015 年 NH₃-N、TN、COD_{Mn}、TP 4 项水环境指标进行区域水质评价,分析连续 3 年滇池外海区域水质的变化规律。如各项指标属于 I ~ III 类水标准比例增加,属于 IV ~ V 及劣 V 类水标准比例

减少甚至消失,我们即可认为在调水入湖后外海水体水质变化呈向好趋势。

步骤4:采用2013—2015年外海18个站点的监测数据(西华中、晖湾中和观音山缺少2013年监测数据,故未进行对比分析),对影响外海水质的TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、Chl-a等水环境指标逐一进行对比分析,将各站点2014、2015年的指标浓度和2013年同期分别进行比较,计算各指标浓度低于2013年同期的测次比例,即定义为指标向好率,以指标向好率不小于65%的站点多少来判断水质改善效果好坏,指标向好率不小于65%的站点比例越大,水质改善效果越好。

步骤5:分析比较外海监测站点的重要水质特征值,选取外海21个监测站点,比较调水前后TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}等水环境指标的极大值,计算各站点以上4个参数调水前后极大值变化率,计算方法见式(2),以极大值变化率正负,判断调水前后水质变化。

$$R = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \tag{2}$$

式中: R 为极大值变化率; M_1 为补水后极大值; M_0 为补水前极大值。

4 水环境改善效果分析

4.1 水环境指标浓度

牛栏江-滇池补水工程运行前后滇池外海TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a 6项水环境指标浓度和营养状态指数对比见图2。

与牛栏江-滇池补水工程运行前的均值相比,滇池外海21个监测点2014、2015年的NH₃-N质量浓度年均值都有所降低,其中21个数值降低幅度达50%,3个出现在2014年,18个出现在2015年;TN年均值中有95.2%的数值降低,其中7个数值降低幅度达50%,均出现在2015年;COD_{Mn}年均值中有97.6%的数值降低;TP年均值都有不同程度降低,其中29个数值减幅达50%,13个出现在2014年,16个出现在2015年;SD年均值中有95.2%的数值增大;营养状态指数年均值都小于工程运行前,大部分站点呈现出从中度富营养向轻度富营养状态转变的趋势;开展Chl-a检测的7个站点2014、2015年的年均值减小,其中9个数值小于多年均值的50%,4个出现在2014年,5个出现在2015年。

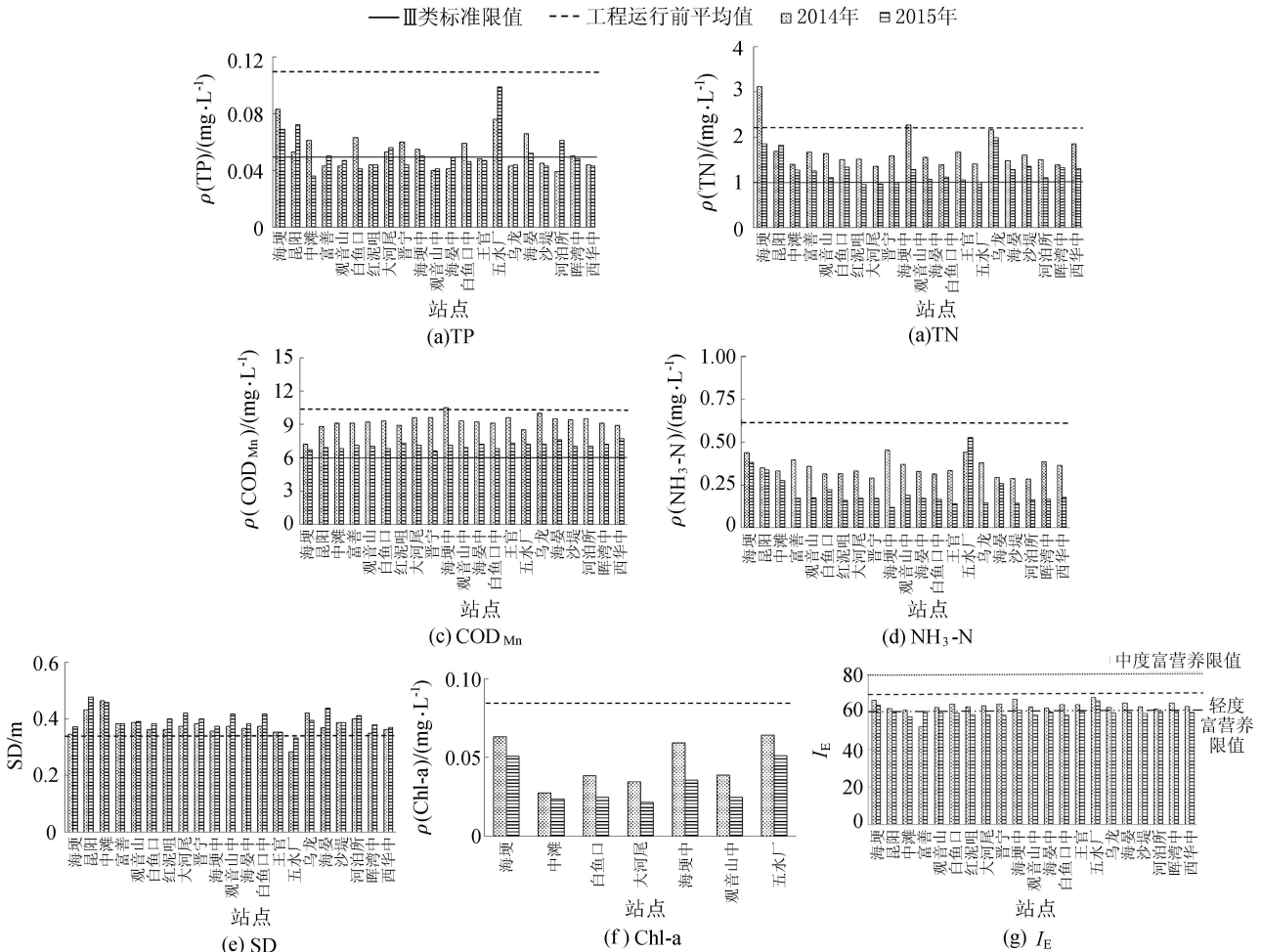


图2 工程运行前后外海各站点水环境指标对比

分析表明,除个别站点外,超过 95% 以上的站点的 TP、NH₃-N、COD_{Mn}、SD、Chl-a、营养化指数都呈向好趋势,同一站点 SD 年均值逐年递增,其余各水环境指标的年均值逐年递减,大部分站点 TN 明显呈下降趋势。张国涵等^[5]认为,从牛栏江引入滇池的清洁水能有效稀释 TP、TN,与本研究结果相符。

4.2 水质类别

对外海 21 个站点 2013—2015 年 NH₃-N、TN、COD_{Mn}、TP 4 项水环境指标进行单因子评价^[3]并统计各类水质比例,再按水质站口径进行区域水质评价,统计结果见图 3。

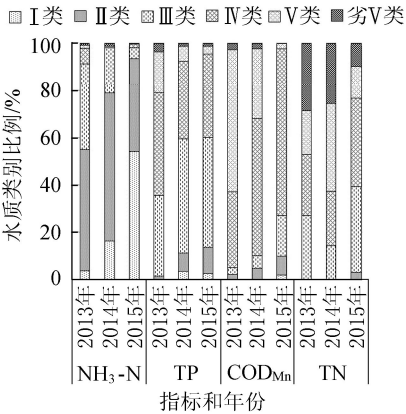


图3 滇池外海各站点各水质类别比例

可以看出,2013—2015 年,滇池外海水体中按 NH₃-N、TN、COD_{Mn}和 TP 评价的 I ~ III 类水比例呈稳步增加的趋势,其中 I ~ III 类水比例最大值是按 NH₃-N 评价,2015 年达到 98.11%;比例增加最快的是按 COD_{Mn} 评价,工程运行后增加了 4 倍多;而 IV ~ V 类水及劣 V 类水比例稳步下降,其中按 NH₃-N、COD_{Mn} 评价的劣 V 类水比例到 2015 年均下降为 0。

4.3 指标向好率

为直观显示滇池外海水质改善效果,采用指标向好率进行水环境改善效果分析,计算统计结果见表 1、图 4。

表 1 2014、2015 年与 2013 年相比 5 项指标向好率统计

水环境指标	年份	计算结果统计		
		A	B	C
COD _{Mn}	2014	1	18	0
	2015	9	18	0
NH ₃ -N	2014	0	15	3
	2015	7	15	2
TP	2014	1	14	4
	2015	2	13	5
TN	2014	0	4	14
	2015	2	12	6
Chl-a	2014	0	6	1
	2015	6	6	1

注:A 为指标向好率为 100% 的站点数;B 为指标向好率不小于 65% 的站点数;C 为指标向好率小于 65% 的站点数。

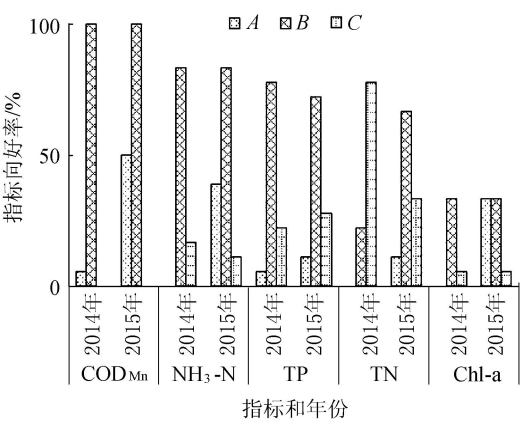


图 4 2014、2015 年与 2013 年相比 5 项指标向好率对比

参与分析的 18 个水质监测站点中,2014 年 COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN 和 Chl-a 的指标向好率不小于 65% 的站点分别为 18、15、14、4 和 6 个,其中, COD_{Mn} 和 NH₃-N 的改善效果较为显著;2015 年 COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN 和 Chl-a 的指标向好率不小于 65% 的站点分别为 18、15、13、12 和 6 个,TN 在 2014 年的基础上改善程度最大,2015 年指标向好率达 100% 的站点数有不同程度增加。总体上,牛栏江-滇池补水工程运行后,各水环境指标均有不同程度改善,尤其是对 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 的改善较为显著。

4.4 指标极大值

对外海 18 个站点工程运行前后 (2013—2015 年) TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn} 等水环境指标的极大值变化率进行比较,结果见图 5。

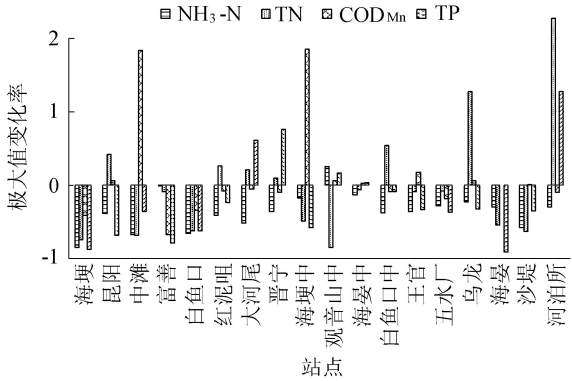


图 5 调水前后各站点极大值变化率

TP、TN、NH₃-N、COD_{Mn} 均为逆向指标,指标浓度越小表示水环境质量越好,因此,如极大值变化率为负,则说明该站点工程运行后水质好于工程运行前。从图 5 可以看出,NH₃-N 极大值变化率为负的站点有 16 个,占全部站点的 88.9%;TN 极大值变化率为负的站点有 11 个,占全部站点的 61.1%;COD_{Mn} 极大值变化率为负的站点有 8 个,占全部站点的 44.4%;TP 极大值变化率为负的站点有 13 个,占全部站点的 72.2%。18 个监测站点 4 个水环境指标共有 49 项次极大值变化率为负,占总项次的

68.1%。以上统计结果表明,工程运行后外海大部分站点的主要污染指标均有一定程度改善。

5 结 论

a. 牛栏江-滇池补水工程运行后,滇池外海各监测站点的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 COD_{Mn} 、 TN 、 Chl-a 、 SD 及营养状态指数均优于调水前,其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 、 Chl-a 质量浓度明显降低, COD_{Mn} 、 TN 质量浓度亦呈下降趋势, SD 上升,富营养化水平明显好转,已呈现出从中度富营养向轻度富营养状态转变的趋势,补水工程的水质改善成效显著。

b. 通过对工程运行前后区域水质评价分析表明,工程运行后外海水域按 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TN 、 COD_{Mn} 和 TP 评价的 I ~ III 类水比例大于工程运行前,且呈逐年稳步增加的趋势,与之对应的是 IV ~ V 类水及劣 V 类水比例稳步下降,部分水环境指标劣 V 类比例为 0,其中,按 COD_{Mn} 评价改善效果最为显著,可以说滇池外海区域水质总体呈向好的趋势。

c. 指标向好率分析表明,牛栏江-滇池补水工程运行后,外海各指标均有不同程度改善,尤其是对 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 的改善较为显著,大多数站点水质都不同程度变好。

d. 极大值变化率统计结果表明工程运行后外海大部分站点 TP 、 TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 等参数的极大值都小于运行前,外海水域的水质状况呈向好趋势。

e. 牛栏江—滇池补水工程 2015 年调水量比 2014 年多 1.8 亿 m^3 ,对比这 2 个年份滇池外海的水质监测数据以及各项统计指标,2015 年的水质状况要明显好于 2014 年,这表明调水量也是影响外海水环境质量的重要因素。牛栏江来水极大地改善滇池入出湖水量严重失衡的状态,可有效减轻湖体的内源污染程度^[6]。因此,在保证牛栏江下游用水和实现滇池流域内汛期洪水资源化的前提下,应适当增加调水量,确保滇池外海实现水体的高效置换^[7-8]。

参考文献:

[1] 陈田耕. 磷在湖泊富营养化中的作用[J]. 海洋湖沼通报,1986(1):79-84. (CHEN Tiangeng. Phosphorus role in lake eutrophication[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,1986(1):79-84. (in Chinese))

[2] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:21-23.

[3] 苏红兵,张天明,胡朝英. 基于生态足迹的调水工程环境影响评价:以牛栏江-滇池补水工程为例[J]. 人民长江,2015,46(10):48-51. (SU Hongbing, ZHANG Tianming, HU Chaoying. Environmental impact assessment

on water diversion project based on ecological footprint: case of NiuLan River-Dianchi Water Supplement Project [J]. Yangze River,2015,46(10):48-51. (in Chinese))

[4] 王圣瑞,刘文斌,曾维华,等. 滇池水环境[M]. 北京:科学出版社,2015:3-68.

[5] 张国涵,高原. 牛栏江-滇池补水工程对滇池外海总磷和总氮含量的影响[J]. 环境科学导刊,2015,34(5):22-26. (ZHANG Guohan, GAO Yuan. Impacts of water supply engineering from Niulanjiang River to Waihai of Dianchi Lake on the content of total nitrogen and total phosphorus [J]. Environmental Science Survey,2015,34(5):22-26. (in Chinese))

[6] 徐天宝,马巍,黄伟. 牛栏江-滇池补水工程改善滇池水环境效果预测[J]. 人民长江,2013,44(12):11-13,40. (XU Tianbao, MA Wei, HUANG Wei. Effect prediction of improving water environment by Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project [J]. Yangze River, 2013, 44 (12):11-13,40. (in Chinese))

[7] 华祖林,顾莉,刘晓东. 调水对改善浅水型湖泊水体的置换率研究[J]. 水资源保护,2009,25(1):9-17. (HUA Zulin, GU Li, LIU Xiaodong. Improving water exchange rate of shallow lakes through water diversion works[J]. Water Resources Protection,2009,25(1):9-17. (in Chinese))

[8] 桂重,段波. 牛栏江引水盘龙江入湖对滇池水质改善效果分析[J]. 山西建筑,2015,41(31):209-210,258. (GUI Zhong, DUAN Bo. On water quality improvement analysis at Dianchi Lake by diverting water of Panlong River into lakes at Niulan River[J]. Shangxi Architecture, 2015,41(31):209-210,258. (in Chinese))

(收稿日期:2016-05-13 编辑:王 芳)

• 信息播报 •

2017(第五届)中国水利信息技术论坛将在河海大学召开

2017(第五届)中国水利信息技术论坛将于2017年3月29-31日在河海大学召开。本次会议主题是探索“智慧水利”推动科技创新。会议将邀请水利行业主管部门、科研院所及高校的相关领导、专家和学者做主旨报告,组织水利信息化技术持有单位开展技术(产品)交流与现场咨询活动,旨在探讨水利现代化的发展趋势,活跃学术气氛,激励广大水利信息化科技工作者的积极性和创造性,推动全国水利现代化事业不断向前发展。

了解论坛最新资讯请登录论坛官网 www.sinowbs.org,或查阅微信公众号“水务论坛在线”,更多信息将在河海大学网站上公布。

(本刊编辑部供稿)