

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.004

# 洱海环湖截污治污工程的治污效果诊断与分析

杨逢乐<sup>1,2</sup>, 唐文景<sup>1</sup>, 张先智<sup>2</sup>, 李金花<sup>1</sup>, 金放鸣<sup>1</sup>, 周保学<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 云南省生态环境工程评估中心, 云南 昆明 650028)

**摘要:** 环湖截污治污是控制和治理湖泊富营养化的有效工程手段。洱海环湖截污治污工程运营后,对洱海的10座污水处理厂2019年的运行效果进行了诊断和分析。结果显示,新建的6座乡镇污水处理厂COD负荷率明显偏低,仅为26.1%~40.7%,但仍取得了较好的COD和氮、磷去除效果;乡镇污水处理厂氮、磷负荷主要与服务片区内的养殖业有关,养殖业发达的上关镇片区氮、磷浓度明显高于中心城区。10座污水处理厂对COD、氨氮和总磷的平均去除率分别为91.7%、97.5%和83.0%,纳入分析的9座污水处理厂对总氮的平均去除率为57.3%。10座污水处理厂出水COD、氨氮和总磷控制指数范围分别为2.00~3.35、6.53~14.20、0.60~10.10,纳入分析的9座污水处理厂出水总氮控制指数范围为1.33~1.99。环湖截污治污工程有效削减了洱海流域的污染负荷,对洱海的水质改善具有重要作用。

**关键词:** 环湖截污治污; 洱海; 污水处理厂; 水力负荷; 污染物负荷; 污染物去除率; 污染物控制指数

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0021-06

## Performance Diagnosis and Analysis of Sewage Interception and Treatment Project around Erhai Lake

YANG Feng-le<sup>1,2</sup>, TANG Wen-jing<sup>1</sup>, ZHANG Xian-zhi<sup>2</sup>, LI Jin-hua<sup>1</sup>, JIN Fang-ming<sup>1</sup>, ZHOU Bao-xue<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Yunnan Appraisal Center for Ecological and Environmental Engineering, Kunming 650028, China)

**Abstract:** Sewage interception and treatment around the lake is an effective engineering method to control lake eutrophication. After the operation of the sewage interception and treatment project around Erhai Lake, the operational performance of 10 sewage treatment plants (STPs) around Erhai Lake in 2019 were diagnosed and analyzed. The COD load rate of the 6 newly-built rural STPs was obviously low, which was only 26.1%~40.7% of the design value. However, good removal performances of COD, nitrogen and phosphorus were still obtained. Nitrogen and phosphorus loads of the rural STPs were mainly related to the aquaculture industry in the service area. The nitrogen and phosphorus concentrations of sewage in Shangguan Town with developed aquaculture industry were significantly higher than those in the central

基金项目: 大理市住房和城乡建设局咨询项目(201833)

通信作者: 周保学 E-mail: zhoubaoxue@sjtu.edu.cn

urban area. The average removal efficiencies of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus in 10 STPs were 91.7%, 97.5% and 83.0%, respectively, and the average removal efficiencies of total nitrogen in 9 STPs included in the analysis were 57.3%. The control indices of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus in the effluent from 10 STPs were 2.00–3.35, 6.53–14.20 and 0.60–10.10, respectively, and the control index of total nitrogen in the effluent from 9 STPs included in the analysis ranged from 1.33 to 1.99. The sewage interception and treatment project around the lake effectively reduced the pollution load of Erhai Lake Basin and played an important role in improving the water quality of Erhai Lake.

**Key words:** sewage interception and treatment around lake; Erhai Lake; sewage treatment plant; hydraulic load; pollutant load; pollutant removal efficiency; pollutant control index

洱海属于沧江-湄公河水系,是我国第七大淡水湖、云南第二大高原湖泊,是大理盆地生态平衡的核心。随着环湖旅游业快速发展,洱海湖周人口快速集聚,湖泊水质恶化,1998年—2003年全湖暴发螺旋鱼腥草水华。2011年以后,洱海流域的污染源管控增强,洱海水水质恶化程度得到了一定的控制<sup>[1-2]</sup>。为了从根本上改变洱海的污染问题,2015年以来,大理市在原有中心城区截污治污体系以及环洱海农村污水分散处理系统的基础上,开展了洱海环湖截污一期和二期工程,对环洱海流域城镇、集镇、村落进行管网系统建设和污水处理工程建设,包括截污工程、污水处理工程和尾水处置工程,总投资50多亿元。环湖截污二期工程结束后,环洱海的污水通过管网进入环洱海的10座污水处理厂(原有3座、环湖截污工程新建6座、2018年建成1座)进行集中处理,部分无法接入管网的农村分散污水单独收集与处理。该工程于2018年6月30日全面投入运营。工程的运行,对保持洱海Ⅱ~Ⅲ类水质起到了关键作用。目前,洱海水水质变化趋势总体保持稳定,2019年洱海水水质达到7个月Ⅱ类、5个月Ⅲ类的成效,并且未发生规模性蓝藻水华<sup>[3]</sup>。

笔者针对大理市洱海环湖截污一期和二期工程全面投入运营后,环洱海10座污水处理厂2019年的运行效果,对污水处理厂水力负荷率、污染物负荷率、污染物去除率、出水污染物控制指数等关键指标进行了诊断和分析,以期对洱海环湖截污治污工程效果进行全面的评估,为湖泊治理提供科学依据。

## 1 洱海环湖截污治污工程概况

目前大理市洱海环湖运行的污水处理厂共10座,具体分布情况如图1所示。



图1 污水处理厂的分布

Fig.1 Distribution of sewage treatment plants

10座污水处理厂可分为如下三部分:

① “十二五”末期之前建设并运行的污水处理厂(3座):位于中心城区的大理市污水处理厂一期工程(设计规模为 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )和二期工程(设计规模为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ );位于海东镇的海东污水处理厂(设计规模为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )。

② 2015年8月启动的环湖截污一期工程新建的污水处理厂(6座):挖色污水处理厂( $0.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、双廊污水处理厂( $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、上关污水处理厂

( $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、湾桥污水处理厂( $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、喜洲污水处理厂( $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )、古城污水处理厂( $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),设计处理规模合计 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

③ 2018年1月9日完成建设的大理市凤仪污水处理厂(一期设计规模为 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,其中再生水系统为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )。

在10座污水处理厂中,古城、湾桥、喜洲、上关、挖色和大理市污水处理厂二期这6座污水处理厂的主体工艺均为 $A^2/O$ 工艺,双廊、海东、凤仪和大理市污水处理厂一期这4座污水处理厂的主体工艺分别为CAST、CASS、 $A^2/O$ 微曝氧化沟和 $A/O$ 工艺。

洱海环湖截污治污工程投运后,大理市形成了以环洱海下关镇、大理镇(古城)、湾桥镇、银桥镇、喜洲镇、上关镇、双廊镇、挖色镇、海东镇和凤仪镇10乡镇10座污水处理厂的集中式污水处理模式。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

分析数据采用大理市住建局提供的10座污水处理厂在线监测系统数据,时间段为2019年1月1日—12月31日。基于在线监测数据,剔除零值样本,并通过与同期的人工水质监测数据进行比对,采用线性回归方法对出水氨氮浓度 $<0.2 \text{ mg/L}$ 的数据进行了校正,对监测期内污水处理厂的平均水力负荷率、主要污染物指标(COD、氨氮、总氮、总磷)的负荷率和去除率以及出水污染物控制指数进行比较分析。凤仪污水处理厂没有总氮监测数据,故不对该污水厂的总氮指标进行分析。

### 2.2 计算方法

#### 2.2.1 平均水力负荷率

平均水力负荷率的计算方法如下:

$$R_h = \frac{\sum_{i=1}^T Q_i}{Q_d \times T} \quad (1)$$

式中: $R_h$ 为统计时间段内污水处理厂的平均水力负荷率; $T$ 为统计计算时间段内有数据记录的天数; $d$ ;  $Q_i$ 为第*i*天的污水处理量, $\text{m}^3$ ;  $Q_d$ 为设计日污水处理量, $\text{m}^3/\text{d}$ 。

#### 2.2.2 平均污染物负荷率

平均污染物负荷率的计算方法如下:

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^T (C_{\text{进}i} \times Q_i)}{C_d \times Q_d \times T} \quad (2)$$

式中: $R_p$ 为统计时间段内污染物(COD、氨氮、总氮、总磷)的平均负荷率; $C_{\text{进}i}$ 为第*i*天的进水污染物浓度, $\text{mg/L}$ ;  $C_d$ 为进水污染物浓度的设计值, $\text{mg/L}$ 。

洱海环湖10座污水处理厂的进水污染物浓度设计值如表1所示。

表1 环洱海10座污水处理厂的进水污染物浓度设计值

Tab.1 Design values of influent pollutant concentrations of 10 sewage treatment plants

around Erhai Lake				$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
污水厂	COD	氨氮	总氮	总磷
古城	280	15	35	3
湾桥	280	15	35	3
喜洲	280	15	35	3
上关	280	15	35	3
双廊	280	15	35	3
挖色	280	15	35	3
海东	280	15	35	3
凤仪	220	20	25	5
大理一期	350	30	40	4
大理二期	350	30	40	4

#### 2.2.3 平均污染物去除率

平均污染物去除率为污水处理厂削减污染物总量与实际处理污染物总量之比:

$$R_r = \frac{\sum_{i=1}^T [(C_{\text{进}i} - C_{\text{出}i}) \times Q_i]}{\sum_{i=1}^T (C_{\text{进}i} \times Q_i)} \quad (3)$$

式中: $R_r$ 为统计时间段内污染物的平均去除率; $C_{\text{出}i}$ 为第*i*天的出水污染物浓度, $\text{mg/L}$ 。

#### 2.2.4 出水污染物控制指数

出水污染物控制指数为污水处理厂出水水质标准限值与实际出水污染物的加权平均浓度之比,用来反映污水处理厂对出水污染物的控制效果。出水污染物控制指数越大,表明控制效果越好,当出水污染物控制指数 $>1$ 时,表明污水处理厂的出水水质总体控制在标准限值以内。出水水质标准限值统一采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准限值。

$$IC = \frac{S \times \sum_{i=1}^T Q_i}{\sum_{i=1}^T (C_{\text{出}i} \times Q_i)} \quad (4)$$

式中:IC为统计时间段内的出水污染物控制指数; $S$ 为出水污染物控制标准限值。



### 3 结果与讨论

#### 3.1 污水处理厂的水力负荷

经计算,古城、湾桥、喜洲、上关、双廊、挖色、海东、凤仪以及大理市污水处理厂一期和二期2019年的平均水力负荷率分别为84.3%、96.6%、102.1%、89.2%、63.4%、99.6%、38.5%、17.8%、85.6%、85.6%。在“十二五”末期之前建设并运行的3座污水处理厂中,大理市污水处理厂一期和二期的水力负荷率均达到了85.6%,说明大理市中心城区的污水排放量较大,且一期和二期在水力负荷分配上控制良好;海东污水处理厂的水力负荷率只有38.5%,远低于设计水平,这主要与海东片区现阶段的污水排放量较小有关。

环湖截污一期工程新建的6座污水处理厂,即古城、湾桥、喜洲、上关、双廊、挖色污水处理厂的平均水力负荷率均达到了60%以上,其中,湾桥、喜洲和挖色污水处理厂的水力负荷率较高,总体已达到或接近设计值;古城、上关两座污水处理厂的平均水力负荷率在80%~90%范围,双廊污水处理厂的平均水力负荷率在60%~70%范围。凤仪污水处理厂的平均水力负荷率只有17.8%,是10座污水处理厂水力负荷率最低的一座,远低于设计水平。调查发现,这主要与凤仪片区内大部分污水接入大理市污水处理厂,未接入该污水处理厂有关。

#### 3.2 污水处理厂的污染物负荷

表2给出了10座污水处理厂2019年的平均污染物负荷率。

表2 环洱海10座污水处理厂的污染物负荷率平均值

Tab.2 Average pollutant load rates of 10 sewage treatment plants around Erhai Lake %

污水厂	COD负荷率	氨氮负荷率	总氮负荷率	总磷负荷率
古城	30.8	58.6	54.8	50.1
湾桥	26.1	95.3	65.1	78.6
喜洲	32.4	71.4	53.0	94.4
上关	40.7	165.3	112.5	114.9
双廊	32.5	105.8	69.6	51.7
挖色	32.3	87.1	70.0	76.4
海东	9.0	24.8	19.2	22.0
凤仪	11.3	20.0	—	3.7
大理一期	61.9	44.8	54.2	59.4
大理二期	59.0	46.6	54.4	55.7

大理市污水处理厂一期和二期的平均COD负荷率分别为61.9%和59.0%,相对于其他乡镇污水

处理厂,COD负荷处于较高水平,反映出中心城区的污水有机物浓度较高。环湖截污治污工程新建的6座污水处理厂的平均COD负荷率范围为26.1%~40.7%,平均氨氮负荷率范围为58.6%~165.3%,平均总氮负荷率范围为53.0%~112.5%,平均总磷负荷率范围为50.1%~114.9%,表明这6座污水处理厂尽管有较高的水力负荷率,但COD负荷率明显偏低,说明进水有机物浓度严重偏低(见图2)。新建的6座污水处理厂服务范围覆盖大理市洱海流域中心城区以外的绝大部分乡镇和村落,污染物负荷反映了村镇污水收集情况。COD负荷明显偏低已成为新建乡镇污水处理厂的典型特征<sup>[4-6]</sup>。一方面与农村生活环境的差异导致排水中有机物浓度较低有关,另一方面可能与地下水渗入、雨水混入等有关。然而新建乡镇污水处理厂的氮、磷负荷相对较高,且不同污水处理厂之间的差别较大,进一步调查分析发现,各乡镇污水处理厂进水氮、磷负荷主要与乡镇内的养殖活动和养殖废水的接入情况有关。例如,目前大理市50%以上的奶牛养殖都集中在上关镇,该片区养殖废水经过专门建设的沉淀池统一收集接入管网系统,导致上关污水处理厂的进水氮、磷负荷明显较高。低COD负荷、高氮磷负荷导致乡镇污水处理厂在脱氮除磷,特别是脱氮方面困难较大。污水处理厂对总氮的去除主要通过消耗较多碳源的反硝化实现,由于进水COD浓度较低,污水处理厂普遍存在碳源不足的问题,为了实现脱氮,污水处理厂需要额外补充碳源,这会增加处理成本<sup>[7]</sup>。

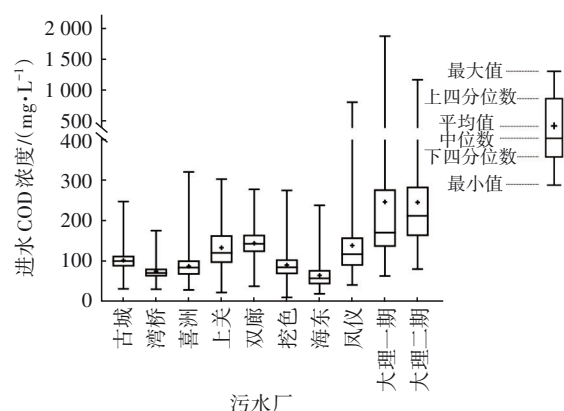


图2 环洱海10座污水处理厂的进水COD浓度

Fig.2 Influent COD concentrations of 10 sewage treatment plants around Erhai Lake

### 3.3 污水处理厂的污染物去除率

大理市环洱海10座污水处理厂的污染物去除率如表3所示。10座污水处理厂的COD去除率范围为71.9%~93.9%,平均去除率为91.7%;氨氮去除率范围为95.1%~98.6%,平均去除率为97.5%;总磷去除率范围为71.0%~97.4%,平均去除率为83.0%;除凤仪污水处理厂外,其他9座污水处理厂的总氮去除率范围为49.3%~80.5%,平均去除率为57.3%。其中,环湖截污治污工程新建的6座污水处理厂对COD、氨氮、总氮和总磷的平均去除率分别为80.4%、97.0%、62.8%和92.9%。尽管这6座污水处理厂的COD负荷率明显偏低,但是仍取得了较高的COD去除率,并且总氮和总磷去除率也较高。根据实际调查,在进水COD浓度过低的情况下,污水处理厂会通过投加碳源和化学除磷方法保障脱氮除磷效果。这说明在低进水COD负荷下,污水处理厂仍可通过补充碳源和强化除磷等工艺手段取得较高的总氮和总磷去除率。

表3 环洱海10座污水处理厂的污染物去除率

Tab.3 Pollutants removal rates of 10 sewage treatment plants around Erhai Lake %

污水厂	COD去除率	氨氮去除率	总氮去除率	总磷去除率
古城	82.5	96.4	57.3	89.7
湾桥	72.3	96.8	59.6	93.4
喜洲	79.7	96.4	49.3	93.8
上关	80.4	98.6	80.3	97.4
双廊	86.5	97.0	80.5	92.2
挖色	80.2	97.3	59.7	90.9
海东	71.9	95.1	51.7	71.6
凤仪	89.4	96.9	—	95.3
大理一期	93.9	97.5	55.1	71.0
大理二期	93.8	97.8	55.2	85.9

### 3.4 污水处理厂的出水污染物控制指数

环洱海10座污水处理厂出水COD、氨氮、总氮和总磷的控制指数如表4所示。除去部分无数据记录的日期外,10座污水处理厂出水COD控制指数范围为2.00~3.35,氨氮控制指数范围为6.53~14.20,总磷控制指数范围为0.60~10.10;除无总氮监测数据的凤仪污水处理厂外,其他9座污水处理厂的总氮控制指数范围为1.33~1.99。由此可知,各污水处理厂的COD、氨氮和总氮控制指数均大于1,表明出水COD、氨氮、总氮浓度总体满足或优于国家一

级A排放标准。结合处理工艺来看,各污水处理厂的生化处理工艺都实现了对COD的有效控制,但采用A<sup>2</sup>/O工艺的污水处理厂出水氨氮浓度更低,而采用CAST或CASS工艺的污水处理厂可将出水总氮控制在更低水平。对于出水总磷,除受到生化处理工艺影响外,还受到后续强化除磷工艺和泥水分离效果的影响,这导致不同污水厂之间的总磷控制指数差异较大,其中,海东、大理一期和二期这3座中心城区污水处理厂的总磷控制指数相对较低,大理市污水处理厂一期的总磷控制指数小于1(该厂建设较早,出水水质实际执行国家二级排放标准),表明中心城区污水处理厂在出水总磷控制方面仍有提升空间。结合各污染物负荷率和去除率的结果可知,大理市环洱海各污水处理厂的主体工艺均能够满足对服务片区内污水中COD和氮元素去除的要求,其中,以A<sup>2</sup>/O为代表的工艺对畜禽养殖影响下的村镇污水表现出了良好的适应能力。

表4 环洱海10座污水处理厂的出水水质控制指数

Tab.4 Effluent quality compliance rate of 10 sewage treatment plants around Erhai Lake

污水厂	COD控制指数	氨氮控制指数	总氮控制指数	总磷控制指数
古城	2.80	13.40	1.55	2.73
湾桥	2.39	10.60	1.57	3.11
喜洲	2.77	13.40	1.63	2.92
上关	2.00	13.30	1.74	5.02
双廊	2.57	6.53	1.99	2.62
挖色	2.78	14.20	1.51	2.39
海东	2.73	10.70	1.83	1.03
凤仪	3.02	7.08	—	10.10
大理一期	3.17	12.80	1.34	0.60
大理二期	3.35	14.00	1.33	1.36

## 4 结论

大理市洱海环湖截污治污工程全面投入运营后,对环洱海10座污水处理厂2019年全年的运行效果进行了分析,结果表明,10座污水处理厂在去除COD、氨氮和总氮以及控制出水水质方面均具有良好表现,但中心城区污水处理厂在出水总磷控制方面仍有提升空间;以A<sup>2</sup>/O为代表的污水处理工艺对畜禽养殖影响下的村镇污水表现出良好的适应能力。环湖截污治污工程有效削减了洱海流域的污染负荷,对洱海水质的改善具有重要的意义。研究成果可为未来流域截污治污工程的建设提供

借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 王琳. 洱海治污对周边社区的影响及居民调适研究——以云南大理州湾桥镇古生村为例[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- WANG Lin. The Influence of Erhai Lake Pollution Control to the Surrounding Communities and the Research of Adjustment by Residents—A Case Study from Gusheng Village of Wanqiao Township, Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province [D]. Kunming: Yunnan University, 2019 (in Chinese).
- [2] 刘蜀治, 刘宏斌, 李旭东, 等. 洱海流域污染排放总量分区控制系统设计研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(15): 71-74.
- LIU Shuzhi, LIU Hongbin, LI Xudong, *et al.* Design of zoning control system for total pollutant emission in Erhai Lake Basin [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(15): 71-74 (in Chinese).
- [3] 赵顺娟, 李正祥. 洱海流域农业面源污染的控制[J]. 云南农业, 2020(4): 54-57.
- ZHAO Shunjuan, LI Zhengxiang. Control of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake Basin [J]. Yunnan Agriculture, 2020(4): 54-57 (in Chinese).
- [4] 樊玲凤, 胡家忠, 欧亮. 城市污水处理厂进水浓度偏低原因分析及对策研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(3): 132-135.
- FAN Lingfeng, HU Jiazhong, OU Liang. Research on low inlet concentration of urban sewage treatment plant and countermeasures [J]. Environmental Science and

Management, 2016, 41(3): 132-135 (in Chinese).

- [5] 朱铁才, 刘舸, 马少杰, 等. 广东省城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(5): 67-69.
- ZHU Tiecai, LIU Ge, MA Shaojie, *et al.* Analysis of influent water quality characteristics of urban wastewater treatment plants in Guangdong Province [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(5): 67-69 (in Chinese).
- [6] 曹岳, 端允, 周爱娟, 等. 晋中市污水水质及低C/N值进水反硝化特征[J]. 中国给水排水, 2017, 33(1): 102-105.
- CAO Yue, DUAN Yun, ZHOU Aijuan, *et al.* Wastewater quality of Jinzhong City and denitrification characteristics of influent with low C/N ratio [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(1): 102-105 (in Chinese).
- [7] 李朝阳, 李辰. 污水处理厂低碳源条件下的强化脱氮措施[J]. 中国给水排水, 2013, 29(17): 67-69.
- LI Zhaoyang, LI Chen. Enhanced nitrogen removal under conditions of low carbon source in sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(17): 67-69 (in Chinese).

作者简介: 杨逢乐(1970—), 男, 云南江川人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事生态环境评估和水污染治理等工作。

E-mail: 1060587828@qq.com

收稿日期: 2020-08-10

修回日期: 2020-09-28

(编辑: 刘贵春)

全面推进水生态环境保护和修复  
打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园