

# 滇池流域污水厂尾水污染负荷特征分析

吴雪, 何佳, 徐晓梅, 鲁露, 杨艳, 张英, 严长安  
(昆明市环境科学研究院, 云南 昆明 650032)

**摘要:** 滇池流域自1991年起大力建设污水处理厂,截至2015年已建成24座污水处理厂,处理能力达到 $205 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质均能达到一级A标准。然而,目前滇池流域污水厂尾水的TN浓度较高(约为 $10 \text{ mg/L}$ ),与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)存在较大的差距,尾水污染负荷已经成为该流域入湖污染负荷的主要来源之一,其贡献的TN占滇池流域TN入湖总量的59%,部分子流域尾水负荷的贡献率占80%以上,且旱季贡献率大大高于雨季。受纳尾水的河道TN浓度远高于V类地表水标准,存在加剧滇池湖体富营养化的风险。为全面提升滇池水质,有必要高度重视污水厂尾水负荷,研究制定地方污水厂排放标准,进一步降低尾水中污染物浓度。

**关键词:** 滇池流域; 污水厂尾水; 污染负荷; 总氮

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)17-0069-05

## Pollution Characteristics of Tail Water from Wastewater Treatment Plants in Dianchi Watershed

WU Xue, HE Jia, XU Xiao-mei, LU Lu, YANG Yan, ZHANG Ying, YAN Chang-an  
(Kunming Institute of Environmental Science, Kunming 650032, China)

**Abstract:** From 1991, the local government started to build wastewater treatment plants (WWTPs) in Dianchi watershed. There were in total 24 WWTPs in Dianchi watershed until 2015 and the total treatment capacity reached 2.05 million  $\text{m}^3/\text{d}$ . The tail water quality can reach the first grade A standard. However, TN concentration in WWTP tail water exceeds the *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838 - 2002) now. WWTP tail water has been major sources of the pollutants for Dianchi Lake. TN from tail water accounts for 59% of the total TN load into the lake, and even reaches 80% for some sub-basins. WWTP tail water contributes larger percentage of pollution load in dry season than in wet season. The TN concentration in the receiving rivers largely exceeds class V standard of GB 3838 - 2002, which might aggravate the risk of eutrophication in Dianchi Lake. To improve the water quality in Dianchi Lake, it is necessary to establish local emission standards for the WWTPs in Dianchi watershed and to reduce the pollutant concentration in tail water.

**Key words:** Dianchi watershed; tail water from WWTP; pollution load; total nitrogen

截至2015年,滇池流域共建成污水处理厂24座,总处理规模达到 $205 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。除昆明市第十

一、十二水质净化厂尚处于试运行阶段,捞鱼河污水厂和捞鱼河水质净化厂尚不具备进水条件以外,流

域内实际投入运行的污水处理厂达20座,实际处理水量达到 $147 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。随着污水处理规模的剧增,滇池流域入湖污染负荷呈明显下降趋势<sup>[1]</sup>。然而,目前流域内污水厂出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,部分出水水质指标高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的V类水标准<sup>[2]</sup>,庞大的污水厂尾水已经成为主要的入湖污染源之一。

污水处理厂是流域水污染治理的重要手段,但其尾水也会对水环境造成二次污染<sup>[3,4]</sup>。基于此,笔者对滇池流域污水厂尾水污染负荷特征进行了分析,旨在为后续采取有针对性的治理措施全面提升滇池流域水质提供技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 子流域划分

滇池是典型的半封闭宽浅型湖泊,主要入湖河道有35条,滇池出水经螳螂川、普渡河流入金沙江<sup>[5]</sup>。长期以来,流域总供水量大于流域水资源量,生态用水极度缺乏。

为提高研究空间分辨率,采用ArcGIS软件,综合考虑滇池流域地形地貌和污水厂纳污范围,将滇池流域划分为19个子流域,见图1。



图1 滇池流域的子流域划分

Fig.1 Sub-basins of Dianchi watershed

### 1.2 污染源核算方法

滇池流域水污染负荷可分为点源和面源。其中点源污染负荷又可分为未收集处理的点源和经污水厂收集处理后排放的尾水负荷,面源分为农业农村面源和城市面源。尾水负荷采用污水厂处理水量和出水浓度进行核算,根据污水厂尾水去向,确定各子流域的尾水负荷;未收集的点源即为点源入湖量与尾水负荷之差,其中滇池流域点源主要包括城镇生活源、工业源和第三产业源;农业农村面源采用排污系数法和流失系数法计算;城市面源采用输出系数模型法计算。各类污染源的核算方法详见文献<sup>[1]</sup>。

### 1.3 污水厂尾水特征

目前尽管滇池流域污水厂出水水质均能达到一级A标准,但部分出水水质指标浓度高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的V类水标准,存在使滇池水质恶化的风险。以2015年为例,污水厂尾水TN浓度约为 $10 \text{ mg/L}$ ,是地表水V类水质标准的5倍。污水厂尾水较高的氮负荷可能加剧受纳水体的富营养化<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 滇池流域入湖污染负荷现状

随着污水处理规模的剧增,2015年滇池流域点源污染负荷削减量增长到COD为 $102\,910 \text{ t}$ 、TN为 $13\,029 \text{ t}$ 、TP为 $1\,320 \text{ t}$ ,较1993年分别增加了66、73和101倍<sup>[7]</sup>。在污染负荷产生量持续上升的情况下,滇池入湖污染负荷量呈持续下降趋势,2015年滇池流域污染负荷入湖总量COD为 $38\,634 \text{ t}$ 、TN为 $7\,083 \text{ t}$ 、TP为 $595 \text{ t}$ 。

从污染负荷构成来看,COD主要来源于城市面源,占总入湖量的54%,TN主要来源于污水厂尾水,占总入湖量的59%,TP主要来源于未收集的点源,占总入湖量的41%。从污染负荷的空间分布来看,外海北岸对滇池外源污染的贡献率最高,2015年该区域COD、TN、TP入湖量分别占到滇池流域入湖污染物总量的56%、57%和51%。外海西岸污染程度较轻,2015年该区域污染物入湖量约占滇池流域入湖污染物总量的1%~2%。

### 2.2 滇池流域尾水负荷时空分布特征

#### ① 尾水负荷的空间分布

2015年,滇池流域实际运行的20座污水厂实际处理水量为 $53\,521 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,出水水质均达到一级A标准。来自尾水的COD、TN、TP入湖负荷分别

为 6 030、4 193、95 t,分别占 COD、TN、TP 入湖总量的 16%、59%、16%。

2015 年滇池流域的 19 个子流域中,王家堆渠流域、小清河-虾坝河流域、广普大沟流域、南冲河流域、柴河流域未接纳污水厂尾水;海河流域和捞鱼河流域的污水厂 2015 年未运行,暂无尾水负荷。2015 年实际接纳尾水负荷的 12 个子流域中,采莲河-金家河流域贡献的 COD、TP 尾水负荷最多,分别占来源于尾水的 COD 和 TP 入湖量的 23% 和 26%;乌龙河-新老运粮河流域贡献的 TN 尾水负荷最多,占来源于尾水的 TN 入湖量的 24%。白鱼口水质净化厂的滇池西岸子流域贡献的尾水负荷最少,占来源于尾水的 COD、TN、TP 入湖量的 0.2%、0.1% 和 0.5%。

从污染负荷构成来看(见图 2),第七(八)水质净化厂所在的采莲河-金家河流域尾水负荷占比最高,占该流域污染负荷入湖总量的 83%,其次为马料河流域(52%)、乌龙河-新老运粮河流域(45%)、大清河-柘槽流域(45%)、大观河-西坝河-船房河流域(44%)。

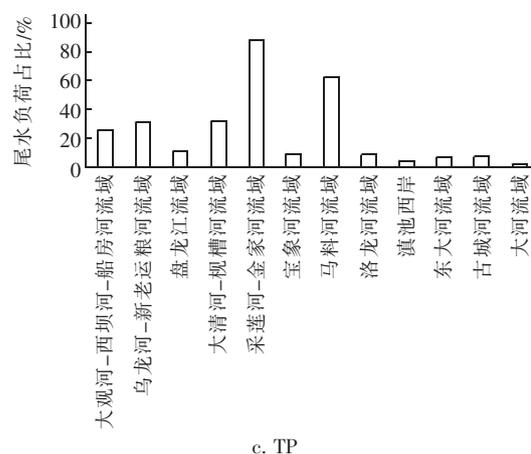
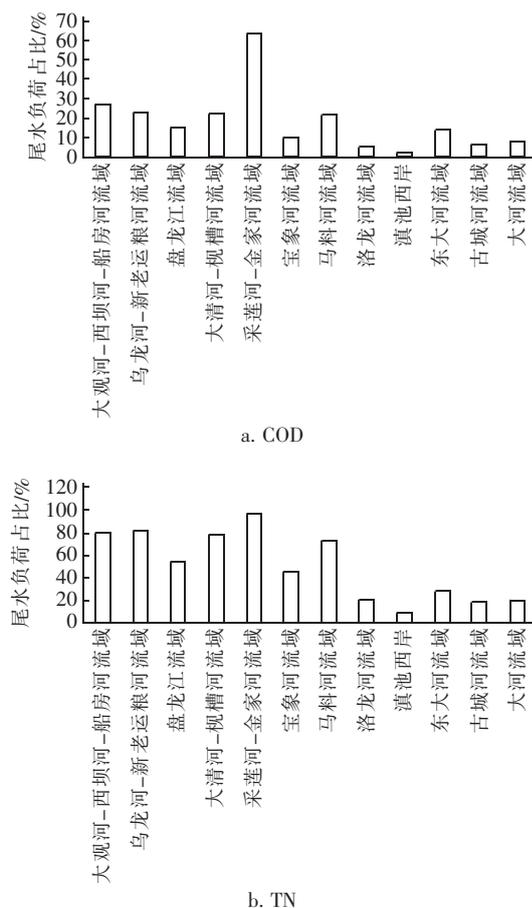


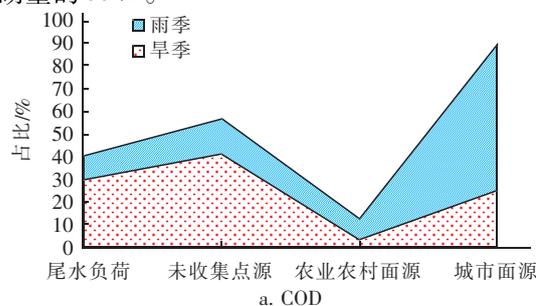
图 2 子流域尾水负荷占比

Fig. 2 Proportion of tail water pollution load of sub-basins

## ② 尾水负荷的季节变化

滇池流域降雨量年内分布十分不均匀,雨季降雨量占全年的 87% 左右,每年 5 月—10 月为雨季,11 月—次年 4 月为旱季。对滇池流域尾水负荷的季节变化进行分析,有利于采取有针对性的措施,实现流域内水资源的优化利用。

在旱季,由于降雨量少,降雨对城市和农村地表冲刷程度明显减轻,来源于城市面源和农业农村面源的污染负荷显著减少,尾水负荷和未收集的点源则由于其产生方式而不呈现明显的季节差异。经核算,2015 年旱季滇池流域污染物入湖总量 COD 为 10 220 t、TN 为 2 755 t、TP 为 186 t,仅为全年入湖污染负荷的 26%、39%、31%,说明滇池流域面源污染较为严重。滇池流域旱季、雨季入湖污染负荷构成呈现明显区别(见图 3)。在旱季,滇池流域入湖 COD 和 TP 主要来自未收集的点源,分别占总入湖量的 41%、64%,TN 主要来自污水厂的尾水负荷,占总入湖量的 74%;在雨季,COD 主要来自城市面源,占总入湖量的 64%;TN 主要来自尾水负荷,占总入湖量的 50%;TP 主要来自农业农村面源,占总入湖量的 35%。



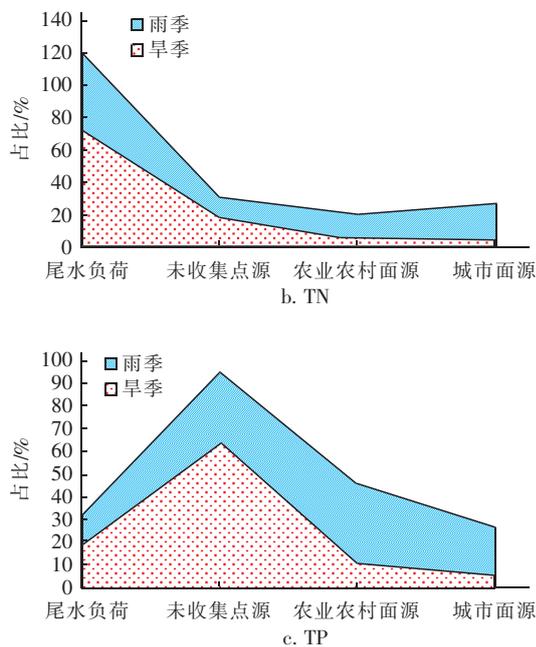


图3 2015年滇池流域污染负荷旱季、雨季入湖量构成

Fig.3 Composition of pollutant load into Dianchi watershed in dry and rainy seasons of 2015

尽管污水厂尾水负荷在旱季和雨季的入湖量没有明显区别,但从污染负荷构成来看,尾水负荷在旱季对总入湖污染负荷的贡献更大。旱季尾水负荷对COD、TN、TP的贡献率分别为30%、74%和19%,而雨季则分别为11%、50%和15%。旱季污水厂尾水负荷占比较高,如果能够采取尾水外排等措施消除入湖尾水负荷,可以大幅削减污染负荷入湖量<sup>[8]</sup>,这有助于滇池流域旱季的水质保障。

### 2.3 尾水污染负荷对水环境的影响

滇池流域水资源匮乏,自然补水量十分有限,污水厂尾水是流域内河道的主要补给水源。2015年,滇池流域接受污水厂尾水补给的12条入滇河道中,劣V类水体所占比例达到25%,50%的河流不能达到水环境功能区划的水质目标要求,除淤泥河以外TN浓度均超过《地表水环境质量标准》中的V类水标准(2 mg/L),其中老运粮河、乌龙河、新运粮河的TN浓度更是高达12 mg/L以上,采莲河、大清河、新宝象河的TN浓度也在7 mg/L左右。尽管现行的《地表水环境质量标准》中规定的总氮质量标准主要针对湖库设置,TN不作为河流考核指标之一,但入湖河流较高的总氮浓度将直接影响滇池湖体水质,且根据国家《水污染防治行动计划》的要求,汇入富营养化湖库的河流应实施总氮排放控制。

从滇池湖体来看,污水厂尾水是滇池湖体的重要水资源之一,特别是草海流域,污水厂尾水占草海入湖水量的60%以上。2015年,草海主要超标污染物为TN,年均浓度达到5.1 mg/L,超标倍数为2.5。

### 2.4 尾水外排后入湖污染负荷分布特征

为改善滇池水环境,在牛栏江-滇池补水工程通水的情况下,2014年11月24日,昆明市主城污水厂尾水外排及资源化利用建设工程正式通水,将尾水资源外排至流域外以减轻尾水负荷对流域水环境的影响<sup>[9]</sup>。尾水外排工程将来自第二、五、七(八)、十水质净化厂尾水及第一水质净化厂部分尾水经西园隧道排至螳螂川,外排尾水量共计 $77.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。随着尾水的外排,进入滇池的污染负荷相应减少,污染负荷构成也发生了一定的变化。

经过对2015年尾水外排的几个水质净化厂出水水质和水量的监测统计分析,计算得出2015年尾水外排工程削减进入滇池的污染负荷量COD为2962 t、TN为2120 t、TP为49 t。尾水外排后,原本流经采莲河-金家河流域的第一水质净化厂 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 尾水的污染负荷及第七(八)水质净化厂的尾水负荷、大清河-柁槽河流域的第二水质净化厂和第十水质净化厂尾水负荷、盘龙江流域的第五水质净化厂尾水负荷不再入湖。来自尾水的入湖污染负荷相应地减少到COD为3068 t、TN为2073 t、TP为47 t,较尾水外排前减少了50%。

尾水外排后,全流域污染负荷入湖总量减少到COD为35672 t、TN为4963 t、TP为546 t,其中COD主要来源于城市面源,占总入湖量的58%;TP主要来源于未收集的点源,占总入湖量的45%;TN主要来源于尾水负荷,占总入湖量的42%。

原本尾水负荷占比较高的采莲河-金家河流域、大清河-柁槽河流域、盘龙江流域的污染负荷构成发生了较大变化,其中大清河-柁槽河以及采莲河-金家河流域不再有尾水负荷入湖,盘龙江流域尾水负荷占比由原来的27%降低到9%。

## 3 结论与建议

在大力建设城镇生活污水处理厂的同时,由于现行污水排放标准与地表水环境质量标准之间尚有较大差距,滇池流域污水处理厂尾水已经成为主要的入湖污染源之一。2015年,尾水负荷贡献的COD、TN、TP入湖量分别占到了滇池流域入湖污染负荷总量的16%、59%、16%。空间分布上,采莲河

- 金家河流域、马料河流域、乌龙河-新老运粮河流域、大清河-柘槽河流域、大观河-西坝河-船房河流域等子流域的尾水负荷占比高于40%;季节分布上,尾水负荷在旱季对总入湖污染负荷的贡献更大,尤其旱季来源于尾水负荷的TN占到滇池流域TN入湖总量的74%。尾水对滇池流域水环境的影响主要在于其较高的TN浓度,2015年接纳污水厂尾水的12条入滇河流中,50%不能达到水环境功能目标的要求,且河流TN浓度远高于地表水V类水标准,对滇池富营养化的贡献不容小觑。

尽管2014年末,昆明主城尾水外排及资源化利用工程通水,每天将 $77.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 尾水通过西园隧道排入螳螂川,使得尾水负荷入湖量减少了50%,但仍有一半的污水厂尾水进入滇池,且纳入尾水外排工程的污水处理厂大部分也是先就近排入河道,再通过泵站取水外排,对滇池流域水环境造成的影响仍然难以避免。为了进一步保护区域水环境,持续减排水污染物,滇池流域应尽快制定出台地方污水厂排放标准,进一步降低尾水污染物浓度,促进入湖河流和滇池湖体水质提升。

#### 参考文献:

- [1] 徐晓梅,吴雪,何佳,等. 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策[J]. 湖泊科学,2016,28(3):476-484.  
Xu Xiaomei, Wu Xue, He Jia, *et al.* Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed (1988-2014) and identification of countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3):476-484 (in Chinese).
- [2] 郝昊,王晓昌,张琼华,等. 宜兴市城市污水处理厂的水污染特征分析[J]. 环境工程学报,2015,9(2):567-571.  
Hao Hao, Wang Xiaochang, Zhang Qionghua, *et al.* Analysis of water pollution characteristics of Yixing wastewater treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2):567-571 (in Chinese).
- [3] 徐腊梅,黄炳峰. 深圳河湾流域的污染负荷分布预测[J]. 中国给水排水,2010,26(13):68-70.  
Xu Lamei, Huang Bingfeng. Prediction of watershed pollution load distribution of Shenzhen river and Shenzhen bay[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13):68-70 (in Chinese).
- [4] 郝薇. 城市污水处理厂对周边环境的污染及治理[J]. 给水排水,2004,30(4):15-18.  
Hao Wei. Environmental conservation in adjacent area of urban wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(4):15-18 (in Chinese).
- [5] 邱明海,王海玲. 滇池环湖截污工程设计技术方案[J]. 中国给水排水,2015,31(12):56-59.  
Qiu Minghai, Wang Hailing. Design scheme of wastewater interception project around Dianchi Lake[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(12):56-59 (in Chinese).
- [6] Zhang D, Tao Y, Liu X, *et al.* Spatial and temporal variations of water quality in an artificial urban river receiving WWTP effluent in South China[J]. Water Sci Technol, 2015, 73(6):1243-1252.
- [7] 何佳,徐晓梅,杨艳,等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题[J]. 湖泊科学,2015,27(2):195-199.  
He Jia, Xu Xiaomei, Yang Yan, *et al.* Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2):195-199 (in Chinese).
- [8] Privette C V, Smink J. Assessing the potential impacts of WWTP effluent reductions within the Reedy River watershed[J]. Ecol Eng, 2017, 98:11-16.
- [9] 张志斌. 滇池水污染治理的分析及思考[J]. 环境工程,2014,32(12):26-29,35.  
Zhang Zhibin. Analysis and thinking of control of the Dianchi Lake water pollution[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(12):26-29,35 (in Chinese).



作者简介:吴雪(1986-),女,云南个旧人,硕士,工程师,研究方向为湖泊科学与环境系统分析。

E-mail:stellawu7@126.com

收稿日期:2018-01-12