

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.08.005

# 扬水曝气技术在调水型水库水质改善中的应用

翟振起<sup>1</sup>, 黄廷林<sup>2</sup>, 陈凡<sup>2</sup>

(1. 深圳市北部水源工程管理处 茜坑水库管理所, 广东 深圳 518110; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为探究扬水曝气技术在调水型水库水质改善中的应用效果,在茜坑水库扬水曝气强化生物改善工程运行前、后一个月(2021年6月28日—9月2日)进行了全库水质监测。结果显示,扬水曝气系统成功提升了水体含氧量,提高了水体流动性,强化了水库自净能力。作用范围内水体热分层完全消失,底层溶解氧升高到6 mg/L以上,藻密度降低到 $5 \times 10^6$  cells/L且优势种由蓝藻转变为硅藻,铁和锰释放得到显著抑制,TP削减率增加了21%。此外,运行成本最多仅为0.02元/m<sup>3</sup>,远低于水厂处理成本。

**关键词:** 扬水曝气; 茜坑水库; 热分层; 水质改善

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)08-0031-07

## Application of Water-lifting Aeration Technology in Water Quality Improvement of Water Diversion Reservoir

ZHAI Zhen-qi<sup>1</sup>, HUANG Ting-lin<sup>2</sup>, CHEN Fan<sup>2</sup>

(1. Xikeng Reservoir Management Institute, North Water Resources Engineering Management Office, Shenzhen 518110, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** To explore the application performance of water-lifting aeration (WLA) technology in water quality improvement of water diversion reservoirs, the water quality of the whole Xikeng reservoir was monitored before and after the operation of WLA enhanced biological improvement project from June 28 to September 2, 2021. The WLA system successfully increased the oxygen content of the water body, improved the fluidity of the water body and strengthened the self-purification capacity of the reservoir. The water thermal stratification disappeared completely, the bottom dissolved oxygen increased to more than 6 mg/L, the algae density decreased to  $5 \times 10^6$  cells/L, and the dominant species changed from cyanobacteria to diatoms. The release of iron and manganese was significantly inhibited, and the TP reduction rate increased by 21%. In addition, the operating cost was 0.02 yuan/m<sup>3</sup> at most, much lower than the treatment cost of waterworks.

**Key words:** water-lifting aeration; Xikeng reservoir; thermal stratification; water quality improvement

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100101)

通信作者: 黄廷林 E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

## 1 研究背景

水源保护是生态文明建设的重要组成部分,粤港澳大湾区快速发展必然对水源提出更高要求。深圳作为大湾区重要城市之一,市内无大江大河大湖,本地水资源供给严重不足,饮用水原水80%来自东江<sup>[1]</sup>。调水型水库水质安全成为保障深圳供水安全的核心内容。然而,人工构筑物水库对原有水动力条件和周围环境影响较大,可能对水质产生不利影响<sup>[2]</sup>。同时,东江水源水质季节性波动较强,总体呈现出低浊、高藻、微污染特征<sup>[3]</sup>。这些因素对深圳水源水库水质保障提出更高要求。

近年来,具有高效、稳定、经济等特点的水源水质原位改善技术已成为供水安全重要保障手段之一,在国内外得到广泛应用<sup>[4]</sup>。其中以混合充氧为主要功能的物理改善技术,由于其安全性和经济性优势而在多地进行了实践,例如:国外使用机械混合扬水筒混合、气泡混合、等温层充氧等技术成功改善水质<sup>[5]</sup>。国内以扬水曝气(WLA)技术为代表,已经在西安金盆黑河水库、太原汾河水库、山东周村水库成功应用,使藻类得到控制,污染物明显削减,水质逐步改善<sup>[6-8]</sup>。但以上扬水曝气应用主要集中在温带地区峡谷河流型水库,对于全年气温较高且季节性变化不显著、全年降水极不均匀、污染物受调水影响明显的亚热带调水型水库效果尚不明确。以深圳茜坑水库为例,对扬水曝气技术在亚热带调水型水库水质改善中的应用效果进行分析,为同类工程提供实践参考。

## 2 工程概况

### 2.1 茜坑水库

茜坑水库作为一级水源保护地和深圳市西北部片区最重要的供水调蓄水库,1993年建成旧库区,2000年扩建新库区。水库总库容 $1.98 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,洪水位75.2 m,死水位55.3 m,水面面积 $1.6 \text{ km}^2$ ,其水源主要来自市外引水,通过北线引水工程引取东江水注入。近年来,水库由于外部引水水质较复杂等原因导致水体富营养化程度日益加重,藻类暴发事件时有发生,严重影响供水安全和水厂净水工艺的正常运行和净化效果。

### 2.2 扬水曝气强化生物水质改善技术原理

扬水曝气强化生物水质改善技术同时兼备了底层高效充氧控制内源污染、上层混合抑制藻类繁

殖、全层去除污染物和提高生物净化效能等多种原位改善水质功能。通过压缩空气连续通入装置,以小气泡形式向曝气室释放,将氧气溶解到水体中,增加底层水中的溶解氧。充氧水体在无氧区形成局部循环,既实现了充氧功能,又抑制了沉积物中污染物的释放。压缩空气形成大型气弹快速上升,带动底层缺氧水体与表层水体混合,在一定范围内形成垂向流动,既控制了藻类的生长,又改善了水体水质。顶部放入定制填料,高效驯化本土菌种,强化水库土著微生物群代谢活性,良好的水体含氧量及流动性提升水库生态系统微生物代谢活性与自净功能,综合实现多种污染物的强化去除。

### 2.3 扬水曝气强化生物水质改善工程

为改善茜坑水库水环境现状,提升供水安全性,在供水口所在区域进行扬水曝气系统安装。扬水曝气器布置在水库主库区,共11台,通过分析计算得到各台最适间距为80 m(见图1)。扬水曝气强化生物水质改善工程核心部分由扬水曝气单元和空气压缩制备与输送单元组成,如图2所示。



图1 茜坑水库示意

Fig.1 Schematic diagram of Xikeng reservoir

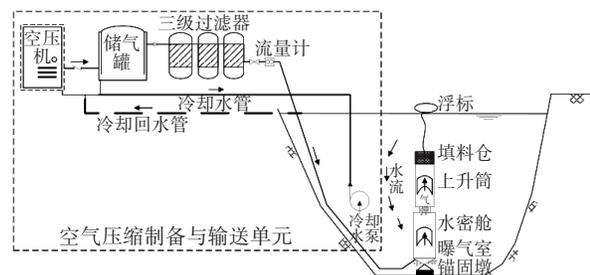


图2 扬水曝气系统示意

Fig.2 Schematic diagram of water-lifting aeration

单台设备直径800~2 000 mm,总长度5.0 m,设计最大供气量 $390 \text{ m}^3/\text{h}$ ,充氧量不低于 $100 \text{ kg/d}$ 。空气压缩制备与输送单元主要由螺杆式空压机、冷却

器、储气罐、过滤器等组成。空压机共3台,根据运行情况合理启用。单台空压机额定供气量不低于1 452 m<sup>3</sup>/h,额定压力不低于0.8 MPa,功率132 kW。每台空压机单独配置储气罐。空压机出气连接空气总管,经过前置空气过滤器+精密过滤器+高效除油器过滤。从压缩空气总管分出11条输气管向每台扬水曝气器供气,陆地采用不锈钢管,水下采用聚乙烯管。空压机冷却水系统选用两台深井潜水泵(1用1备,  $Q=40$  m<sup>3</sup>/h,  $H=500$  kPa)。冷却水回水用无压管道自流回水库。空压机、储气罐、过滤器排污经管道收集至集污池,定期处理。

茜坑水库扬水曝气系统从2021年7月30日开始运行,单台曝气器空气流量保持在40~50 m<sup>3</sup>/h左右,压强稳定在0.20 MPa左右,气弹周期保持在30 s左右,全天连续运行。

### 3 水质改善效果分析

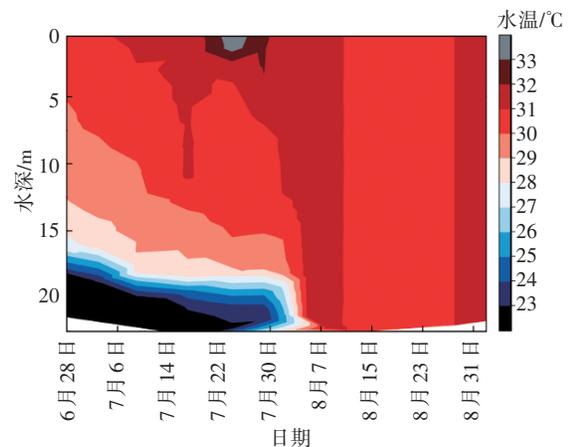
为分析系统运行期间水库水质改善效果,选取引水口附近D1、扬水曝气系统所在核心区域最深点D2、库湾D3、往鹅颈出水口D4和受系统运行影响较小新库区最深点非直接影响区域D5为五个监测点(见图1)。每点采集表层(水面下0.5 m处)、中层(斜温层中部,混合期时为10 m水深处)和底层(沉积物上部水体0.5 m)三个不同水深水样。监测时间为2021年6月28日—9月2日,监测频率根据情况3~7 d一次。水温( $T$ )、溶解氧(DO)由哈希Hydrolab DS5多功能水质分析仪现场测定,总磷(TP)、铁(Fe)、锰(Mn)指标参考《水和废水监测分析方法》,在实验室完成测定。

#### 3.1 热分层的消除及DO提升

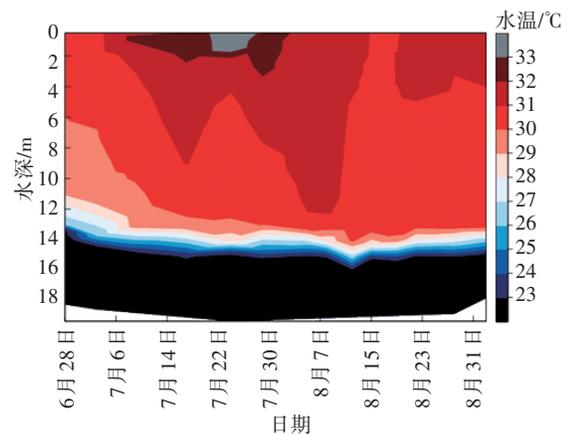
水库水深一般较大,由于热传导局限性易造成表底温度不一致,形成热分层。一旦形成稳定热分层,水体中DO、营养盐等物质上下交换将会受到阻碍。若热分层强度超过一定界限,在底部还会形成厌氧区,造成各种污染物释放。消除水体热分层是扬水曝气主要功能之一。

温差是形成热分层直接原因,水温变化可以直接反映扬水曝气消除热分层效果。扬水曝气影响区域D2水温变化如图3(a)所示。扬水曝气运行(7月30日)前水体保持稳定热分层,表底温差超过10℃。系统开启后,水体发生明显扰动,温跃层快速下潜,底层温度上升明显,4 d后底层温度与表层

温度一致,水体实现混合。对比同时间段扬水曝气影响较小的新库区D5[见图3(b)],表层温度虽然受气温影响略有波动,但表底温差始终保持10℃以上,底部等温层厚度保持4 m基本不变,热分层极其稳定。由此看来,扬水曝气混合作用明显,实现了消除热分层。



a. D2(直接作用区域)



b. D5(非直接作用区域)

图3 扬水曝气系统运行前、后水温分布

Fig.3 Water temperature distribution before and after operation of WLA

水体DO对水质影响巨大,充足的氧含量有利于生物、化学等作用对污染物的转化。研究认为DO小于2 mg/L即厌氧,会引起沉积物中污染物大量释放<sup>[9]</sup>。由于热分层存在底层难以获得氧交换,且光合作用复氧极少,另一方面,底层耗氧较多,因而底层易出现厌氧状态。影响区域D2点运行前、后DO变化见图4(a)。系统运行前,表层由于藻类大量繁殖,部分时段出现氧过饱和,底层由于热分层阻碍出现明显厌氧层,深度稳定在12 m左右。随着系统开启,上下水体开始交换且设备不断曝气,底层

DO 迅速增加,3 d 后底部溶解氧大于 2 mg/L,5 d 后上升到 6 mg/L 以上。8 月中旬由于上游降雨短时间内汇入耗氧物质较多,造成 DO 略有下降,但此后溶解氧进一步上升,到 9 月 2 日全层大于 7 mg/L。与此相比,D5 由于没有系统干预,稳定热分层造成底层 DO 得不到补充,两个月内始终保持 8 m 左右厚度厌氧层[见图 4(b)]。可见,在系统混合充氧直接作用下,系统影响区域厌氧层消失,水体 DO 显著提升。

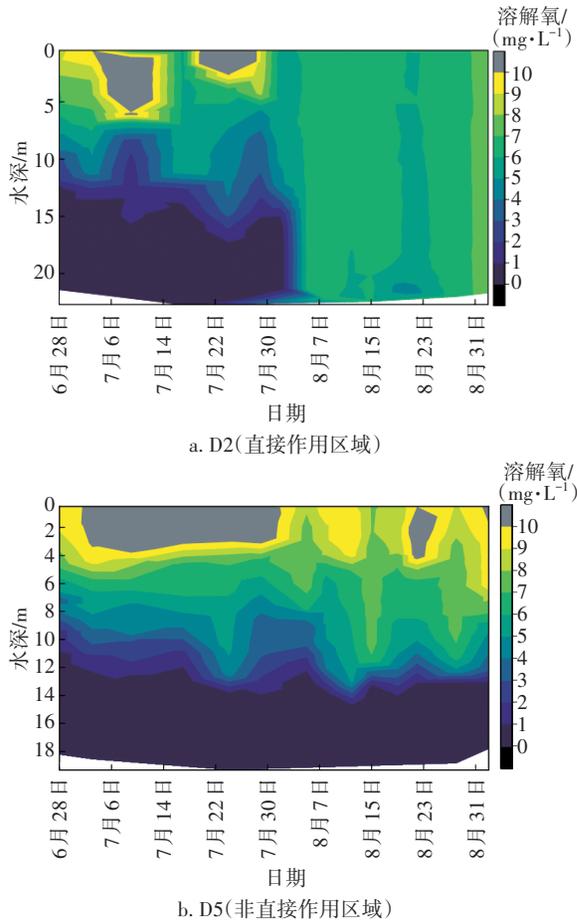


图 4 扬水曝气系统运行前、后 DO 分布  
Fig.4 Dissolved oxygen distribution before and after operation of WLA

### 3.2 藻类的去除

水库由于水动力条件较弱,水体停留时间较长,有利于藻类繁殖<sup>[10]</sup>,一旦发生水华,会引起水体臭味、缺氧等各种问题,特别是蓝藻会释放有毒物质,严重影响供水安全。茜坑水库为亚热带地区调水水库,常年温度较高,营养盐全年较为充足,更易暴发水华。由于藻类主要生活在光照充足的表层,因此以表层为例分析扬水曝气对藻类的去除效果。

D2 和 D5 藻密度变化见图 5。扬水曝气系统运

行前 D2 和 D5 藻密度均达到  $9 \times 10^6$  cells/L 以上。系统运行后,D2 藻密度下降到  $5 \times 10^6$  cells/L,同期 D5 藻密度维持在  $1 \times 10^7$  cells/L 以上。从 D2 藻密度变化可知,运行一个月时间系统对藻类去除率稳定保持 65% 以上。扬水曝气运行后,表层藻类被输送到中下层,中下层的光可利用性大大减弱,因而抑制了藻类的生长,使藻密度明显下降。从藻类群落结构组成变化来看,系统运行前由于处在分层期,D2 和 D5 均以蓝藻为优势种属,占 40%~50%。运行后,D2 优势种属由蓝藻转变成硅藻,达到 45% 以上,D5 群落分布未发生明显变化。主要原因是系统混合作用直接抑制了蓝藻向表层迁移,削弱了其繁殖速度。硅藻由于对恶劣环境适应能力较强,受影响小于蓝藻,竞争力提升而成为优势种属。该结果与自然分层水体中,在混合期硅藻易成为优势种情况一致<sup>[11]</sup>。系统运行使藻密度降低并改善了水生态结构,优势种属的改变进一步消除了蓝藻对供水安全的影响。

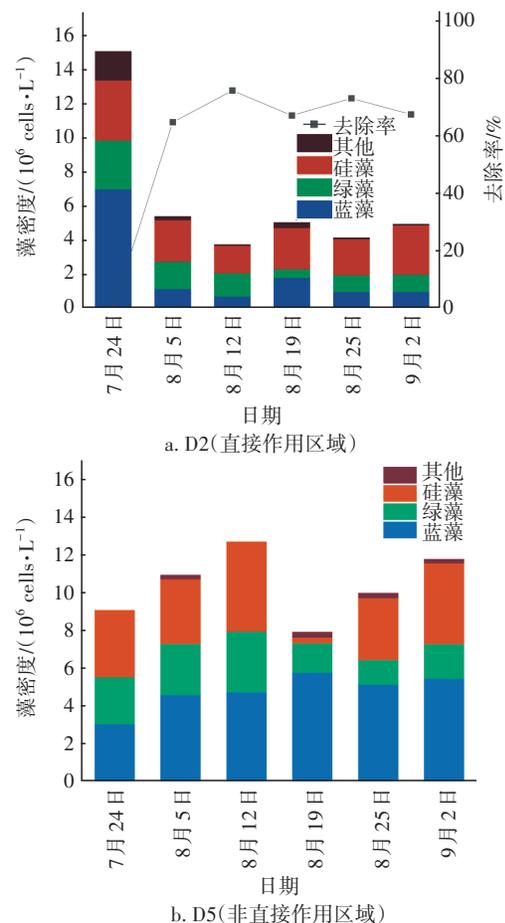


图 5 扬水曝气系统运行前、后藻密度变化  
Fig.5 Algae density distribution changes before and after operation of WLA

### 3.3 污染物的削减

扬水曝气系统运行后,一方面底部溶解氧含量大大提升,抑制了沉积物污染释放,另一方面水体流动性和含氧量得到改善后,水体自净能力也得到了加强,有利于削减污染。

在水体DO小于1 mg/L时,Fe和Mn会从沉积物中氧化沉淀态被还原溶解于水体<sup>[12]</sup>。系统运行前、后D2和D5表层、中层和底层Fe和Mn分布分别见图6、7。运行前,两点表层和中层Fe和Mn浓度均较低。由于两点底层均处于厌氧状态,Fe和Mn都出现明显释放,甚至部分时段超过国家标准(Fe<0.3 mg/L, Mn<0.1 mg/L)。运行后,水体底层DO浓度得到根本性提升,抑制了沉积物中Fe和Mn的释放,同时水中已有Fe和Mn被氧化沉淀于沉积物中,使得D2底层Fe和Mn浓度明显下降。未受到系统影响的D5底层变化不大,依然出现释放。由此可见,扬水曝气对沉积物中污染物释放抑制明显。

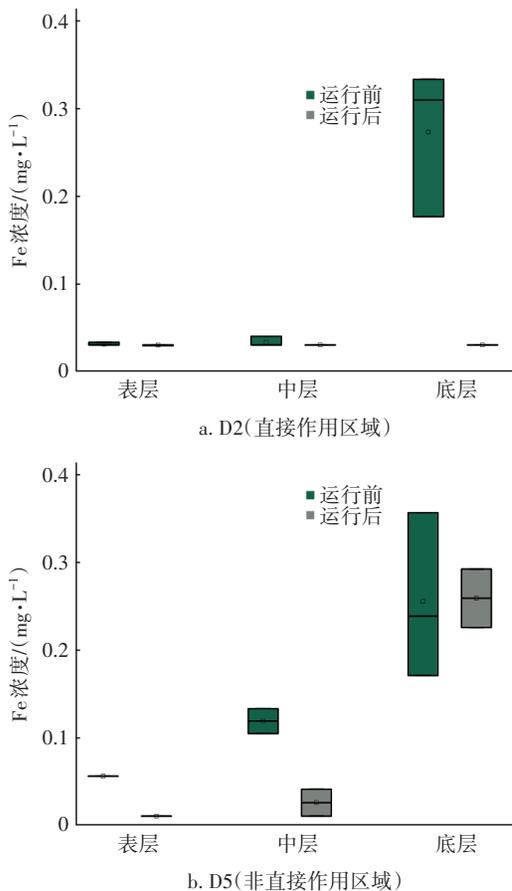


图6 扬水曝气系统运行前、后铁浓度变化

Fig.6 Iron concentration changes before and after operation of WLA

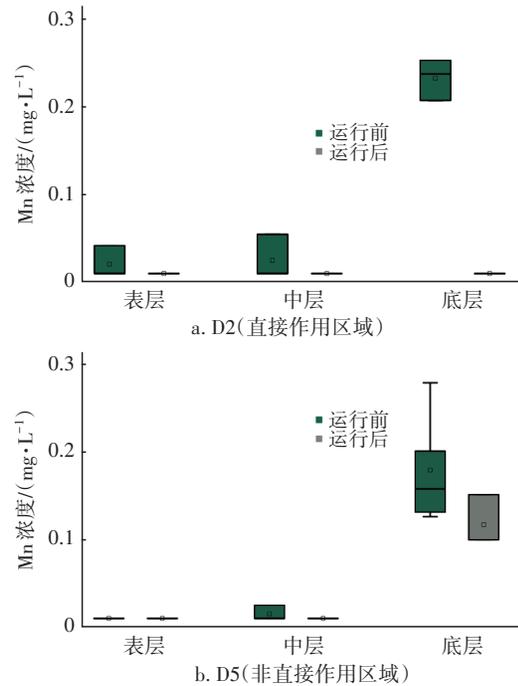


图7 扬水曝气系统运行前、后锰浓度变化

Fig.7 Manganese concentration changes before and after operation of WLA

TP作为水体富营养化主要物质之一,对水华发生起到重要促进作用<sup>[13]</sup>。作为调水型水库,来水负荷对水库水质影响巨大,因而从整个水库TP负荷平衡角度更能说明系统对TP的削减效果。对茜坑水库而言,TP变化主要包括水体TP存量变化、输入(引水汇入、大气沉降、地表径流)和输出(转输鹅颈、水厂供水)。水库TP存量变化可通过五个点表层、中层、底层平均值和库容估算。引水汇入可通过泵站流量和TP浓度计算。由于深圳空气质量和降水水质较好,故大气沉降可忽略。水库集雨面积较小,地表径流基本对水质无影响<sup>[14]</sup>。转输鹅颈和水厂供水可分别通过D4和D2点浓度及对应流量进行计算。

系统运行前、后一个月(6月28日—7月29日,7月30日—9月2日)水库TP负荷变化情况如表1所示。运行前,水库TP在自身沉降、生物消耗、沉积物释放增加等综合作用下削减0.82 t。运行后,一方面水体充氧提高生物活性,增加TP消耗和抑制沉积物释放,另一方面,输入TP通过混合和氧化作用加速沉积,水体浓度得到降低,一个月内共削减TP负荷0.99 t,较运行前提升了21%,水体自净功能得到加强。与TP类似,其他污染物在系统运行影响下也

得到了不同程度削减。

表1 TP负荷变化

Tab.1 TP load change t·月<sup>-1</sup>

项目	泵站输入	水厂输出	鹅颈输出	存量变化	TP削减
运行前	1.42	0.18	0.44	-0.02	0.82
运行后	1.84	0.20	0.54	0.11	0.99

#### 4 经济效益分析

茜坑水库扬水曝气强化生物水质改善工程直接性项目投资约1900万元,设计使用年限20年以上,折算每年成本低于95万元。主要运行费用为电费和系统管理及维护费用。按2台空压机每年最多满负荷连续运行6个月计算(实际每年根据水质1~2台间歇式运行),年耗电总量最多约为1153152kW·h(132×2×24×182),每年总电费约为80万元[电价按深圳工业用电均价0.69元/(kW·h)计算]。系统管理及维护费用按每年10万元计算,故全年折算成本为185万元。按2020年引水量9×10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>计算,茜坑水库通过扬水曝气技术原位改善水质成本最多为0.02元/m<sup>3</sup>。

水厂去除单一典型污染物所需增加费用如表2所示,可见,扬水曝气技术不仅在污染物去除种类和效果上具有明显优势,而且处理成本大大低于其他工艺。扬水曝气技术可以使典型污染物在源头得以有效削减,水厂常规处理工艺基本可保证水质稳定达标,从而大幅度降低处理成本。

表2 不同工艺去除污染物成本比较

Tab.2 Cost comparison of different technologies for pollutant removal 元·m<sup>-3</sup>

项目	处理方法	工程	增加成本
藻类	预氧化+絮凝气浮	珠海市乾务水厂 <sup>[15]</sup>	0.31
Mn	预氧化+砂滤	西安某水厂 <sup>[16]</sup>	0.19
COD <sub>Mn</sub>	臭氧+生物活性炭	杭州南星水厂 <sup>[17]</sup>	0.20
NH <sub>3</sub> -N	预氧化+强化混凝	佛山北江某水厂 <sup>[18]</sup>	0.30
综合改善	扬水曝气技术	茜坑水库	0.02

#### 5 结论

扬水曝气强化生物水质改善技术在茜坑水库运行一个月后,作用范围内水体热分层完全消失,底层溶解氧升高到6mg/L以上,藻密度降低到5×10<sup>6</sup>cells/L且优势种由蓝藻转变为硅藻,还原性物质(如Fe和Mn)释放得到明显抑制,TP削减率增加了21%。对比非作用区域,扬水曝气系统对水质改善效果显著。运行成本最多仅为0.02元/m<sup>3</sup>,具有良好经

济效益。随着运行时间的延长,水体自净能力进一步强化,预计会表现出更加良好的改善效果。

#### 参考文献:

- [1] 李婷,董志峰,张松芳,等. 东江水源和本地水库水源原水混用的给水厂运行实践[J]. 中国给水排水, 2020,36(22):23-28.  
LI Ting, DONG Zhifeng, ZHANG Songfang, et al. Operation practice of mixing raw water from Dongjiang River and local reservoir in a waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2020,36(22):23-28 (in Chinese).
- [2] 徐进,黄廷林,李凯,等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3049-3057.  
XU Jin, HUANG Tinglin, LI Kai, et al. Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe reservoir[J]. Environmental Science, 2019, 40(7):3049-3057(in Chinese).
- [3] 陈奕涵. “河流-水库”系统水环境典型污染物赋存特征的研究[D]. 上海:上海交通大学,2018.  
CHEN Yihan. Occurrence Characteristics of Typical Pollutants in the Aquatic Environment of River-Reservoir System [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018 (in Chinese).
- [4] WEN C C, HUANG T L, WEN G, et al. Controlling phytoplankton blooms in a canyon-shaped drinking water reservoir via artificial and induced natural mixing: taxonomic versus functional groups [J]. Chemosphere, 2022,287: 131771.
- [5] 温成成,黄廷林,李楠,等. 人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析[J]. 环境科学, 2020, 41(3):1227-1235.  
WEN Chengcheng, HUANG Tinglin, LI Nan, et al. Effects of artificial destratification and induced-natural mixing on water quality improvement in a drinking water reservoir [J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1227-1235 (in Chinese).
- [6] 周子振,黄廷林,李扬,等. 扬水曝气器对水源水库水质改善及沉积物控制[J]. 中国环境科学, 2017,37(1):210-217.  
ZHOU Zizhen, HUANG Tinglin, LI Yang, et al. Improvement of water quality and sediment control by WLAs in a source water reservoir [J]. China Environmental Science, 2017, 37(1): 210-217 (in Chinese).

- [7] 黄廷林,朱倩,邱晓鹏,等. 扬水曝气技术对周村水库藻类的控制[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2255-2260.  
HUANG Tinglin, ZHU Qian, QIU Xiaopeng, *et al.* Algae control by water-lifting aerator in Zhoucun reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2255-2260(in Chinese).
- [8] 马越,黄廷林,丛海兵,等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用[J]. 给水排水, 2012, 38(4): 7-13.  
MA Yue, HUANG Tinglin, CONG Haibing, *et al.* Application of the technology of water-lifting and aeration on water quality *in-situ* restoration in a deep channel reservoir [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(4): 7-13(in Chinese).
- [9] 张甜娜,周石磊,陈召莹,等. 白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3176-3185.  
ZHANG Tianna, ZHOU Shilei, CHEN Zhaoying, *et al.* Analysis of water quality and exchange flux of interstitial water-overlying water in sediments of Baiyangdian entrance area in summer [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3176-3185 (in Chinese).
- [10] 王远飞,周存通,赵增辉,等. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4010-4022.  
WANG Yuanfei, ZHOU Cuntong, ZHAO Zenghui, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4010-4022 (in Chinese).
- [11] 闫苗苗,张海涵,黄廷林,等. 分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 221-233.  
YAN Miaomiao, ZHANG Haihan, HUANG Tinglin, *et al.* Mechanism of algal community dynamics driven by the seasonal water bacterial community in a stratified drinking water reservoir [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 221-233(in Chinese).
- [12] 路林超,黄廷林,李楠,等. 金盆水库沉积物铁锰释放规律[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3231-3239.  
LU Linchao, HUANG Tinglin, LI Nan, *et al.* Release mechanisms of iron and manganese from sediments in Jinpen reservoir [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3231-3239(in Chinese).
- [13] XU H, PAERL H W, QIN B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [14] 杨滢,王艳,黄文辉,等. 深圳某水库水华藻类及相关环境因子逐步回归统计分析[J]. 水资源研究, 2016, 5(1): 33-39.  
YANG Ying, WANG Yan, HUANG Wenhui, *et al.* Statistical regression analysis of water-bloom algae and related environment factors of a reservoir in Shenzhen City [J]. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(1): 33-39(in Chinese).
- [15] 吴艳华,杨墨,刘泰铃,等. 给水厂针对低浊高藻原水的工程实践[J]. 给水排水, 2018, 44(10): 11-15.  
WU Yanhua, YANG Mo, LIU Tailing, *et al.* Engineering practice of water supply plant for low turbidity and algae-laden raw water treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 11-15 (in Chinese).
- [16] 韩晓刚,黄廷林,陈秀珍. 铁、锰、氨氮污染地下水源水厂净水工艺改造试验研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(5): 108-111.  
HAN Xiaogang, HUANG Tinglin, CHEN Xiuzhen. Study on Fe, Mn and ammonia nitrogen removing from groundwater for technological renovation of water plant [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(5): 108-111(in Chinese).
- [17] 代荣,汪利军. 臭氧-生物活性炭滤池运行及水厂成本变化研究[J]. 给水排水, 2006, 32(10): 12-19.  
DAI Rong, WANG Lijun. Research on operation of O<sub>3</sub>/BAC facility and operating cost of waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(10): 12-19 (in Chinese).
- [18] 周玉钗. 以北江某水厂为例讨论水源污染的应急措施[J]. 给水排水, 2018, 44(3): 33-36.  
ZHOU Yuchai. Discuss on emergency measures for water pollution: a case study of Beijiang waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(3): 33-36 (in Chinese).

作者简介:翟振起(1982-),男,河北衡水人,本科,工程师,研究方向为水利工程管理。

E-mail: zhaizhenqi@sohu.com

收稿日期: 2021-11-06

修回日期: 2022-02-11

(编辑:孔红春)