

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0076

凌艳晨, 苏宇亮, 胡克武, 等. 珠海市饮用水水源藻类问题分析与解决方案[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 729-738. LING Y C, SU Y L, HU K W, et al. Analysis and solution of algae problems in drinking water sources in Zhuhai City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 729-738. (in Chinese)

# 珠海市饮用水水源藻类问题分析与解决方案

凌艳晨<sup>1,2</sup>, 苏宇亮<sup>3</sup>, 胡克武<sup>3</sup>, 袁汉鸿<sup>3</sup>, 吴斌<sup>3</sup>, 黄洪波<sup>3</sup>,  
方黎<sup>3</sup>, 吴杰<sup>3</sup>, 黄天寅<sup>1</sup>, 敖秀玮<sup>2</sup>, 孙文俊<sup>2</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084,  
3. 珠海水务环境控股集团有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:**为探究珠海市多水源供水体系下存在的水源水质问题,特别是藻类问题,采用单因子分析法评价2016—2019年珠海市4座典型水库的数项水质指标,并采用统计学方法分析水库水中藻类的时空分布特征;采用双变量分析及逐步回归分析的方法研究10项水质指标与藻密度间的相关性。基于对水质数据的分析发现:珠海市水源水存在较为突出的高藻密度及高嗅味问题,其中,藻密度从春季开始普遍出现上升,而嗅味物质的质量浓度则秋冬季达到峰值,二者存在较为明显的季节性变化。回归分析的结果表明:影响水库藻密度的主要因素有总氮、高锰酸盐指数和五日生化需氧量,影响嗅味物质产生的主要因素有氨氮、高锰酸盐指数和浊度;控制水库水体的氨氮和有机物含量可以有效减少藻类数量,改善嗅味物质的产生。建立的拟合优度较高的回归模型可以用于初步预测水库水质。通过点、面源污染的控制,调节水库水体流态,结合臭氧活性炭、紫外高级氧化等深度处理技术的应用,可以有效解决珠海市水源水存在的高藻及嗅味问题。

**关键词:**多水源;藻类问题;嗅味物质;逐步回归;深度处理

中图分类号:X524 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



珠海市是广东省省域副中心城市,是粤港澳大湾区的重要一极,在“珠中江(澳)水源互济”的建设背景下,高质量地保障珠海市供水水质安全具有重要的战略意义。为改善水资源短缺的现状,珠海市通过抽调江河水增加水库供水能力,形成了“江水为主、库水为辅、多点取水、江库联通”的多水源供水格局。调水成为珠海市水库供水的重要特征,水库在保障供水系统的稳定性方面也发挥了不可或缺的作用。近年来,虽然珠海市供水水质总体情况良好,但其水库水源水中仍存在较为突出的藻类问题<sup>[1-2]</sup>,给供水水质安全带来一定的风险。珠海市位于西江入

海口,其区域内江河水的氮、磷等营养盐水平普遍较高。因此,长期抽调高营养盐的江水入库,导致了珠海市水库富营养化发展较快,增加了蓝藻水华的爆发风险,造成水质型缺水<sup>[2]</sup>。藻类的大量繁殖会导致藻毒素的代谢分泌,嗅味物质的产生和藻类有机物的增加<sup>[3-5]</sup>。其中,藻毒素的生物累积性会对人类健康造成威胁,其稳定、耐高温、耐水解、难氧化等特性增加了对其有效去除的难度<sup>[6]</sup>;藻细胞和藻类有机物经过常规的氯/氯胺消毒还会产生消毒副产物,影响出水水质安全<sup>[7]</sup>;以土臭素(GSM)、2-甲基异莰醇(2-MIB)为代表的嗅味物质则会导致水体产生土

收稿日期:2020-09-13 修回日期:2021-02-25 网络出版时间:2021-03-04

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210304.1009.002.html

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX07108-002;2017ZX07502003;2012ZX07404-002);国家重点研发计划(2019YFC0408700);国家自然科学基金(51778323;51761125013)

作者简介:凌艳晨(1995—),女,江苏苏州人,主要从事紫外线消毒和高级氧化技术的研究。E-mail:lingyanchen2020@outlook.com

通信作者:孙文俊(1981—),男,辽宁大连人,副研究员,博士,主要从事饮用水深度处理技术、紫外线消毒和高级氧化技术研究。E-mail:wsun@tsinghua.edu.cn

霉味,降低饮用水感官性能<sup>[8-9]</sup>。此外,在水处理过程中,藻类及其衍生物还会导致膜污染,影响工艺去除效果<sup>[10-11]</sup>。因此,有效解决珠海市饮用水源的藻类问题势在必行。

虽然目前已有针对湖库水中藻类相关问题的研究,但多水源供水体系对湖库水源水质,尤其是藻类的影响则鲜有报道。早期研究<sup>[12]</sup>发现,沿海城市的多水源供水系统会引起水源水质的季节性交替变化,从而对给水厂出厂水中的氯化物、氨氮和藻类数量等产生影响。为有效解决珠海市多水源供水背景下湖库水中的藻类问题,以珠海市 4 个典型水库为研究对象,在研究水源水质特征及藻类分布规律的基础上,分析藻类及其衍生污染物与环境因子的相关性,建立可初步预测水库水质的拟合模型。最后,结合水源控制和工艺改造,提出适合珠海市应对藻类问题的解决方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

选取珠海市境内及西江上游至梧州断面以下流域为本研究水源范围,选取中西部地区 4 座典型水库作为本研究主要对象,其分别为:竹银水库、梅溪水库、大镜山水库及凤凰山水库。其中:竹银水库位于珠海市斗门区北部,磨刀门水道右岸;梅溪水库、大镜山水库、凤凰山水库均位于珠海市香洲区北部,彼此邻近且为互通水库。

### 1.2 分析方法

水库各项水质指标由珠海水控集团监测研究中心实测获得,各水源取水口设有监测点位,常规水质指标监测频率为每月 1 次。通过单因子分析法比对实测数据与国标限值说明水质达标情况,进行水质评价分析。水质数据的统计分析通过 SPSS 软件完成。采用描述统计的方法分析水库水的藻密度分布;通过双变量分析法研究总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、溶解氧(DO)、臭味物质(2-MIB 和 GSM)、浊度和藻密度之间的相关性;通过逐步回归分析,分别以藻密度和臭味物质为因变量,上述其他水质参数为自变量,研究最优解释变量集。

### 1.3 水质评价依据

各项水质指标监测结果依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中规定的Ⅲ类水体标准限值进行评价。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水源水质特征及藻密度分布

选取的 4 座水库均抽调西江水,根据 2015—2018 年西江原水水质调研结果,近年来西江源水质基本符合地表水Ⅲ类水体标准,但藻类含量较高。为进一步明确珠海市的水源水质特征,特别是与藻类问题相关的水质指标的特征,对 4 座水库水的藻密度、浊度、主要臭味物质(2-MIB 和 GSM)、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP、TOC、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub> 和 DO 等水质指标进行分析。

#### 2.1.1 水源水质特征

对于直接指向水源藻类问题的藻密度指标,4 座水库在 2016—2019 年的年平均藻密度变化情况见图 1,其中梅溪水库统计数据截至 2018 年 9 月,其余 3 座水库统计数据均截至 2019 年 7 月。由图 1 可以看出:在 2016—2018 年,4 座水库的平均藻密度均呈现先升高后降低的趋势,并均于 2017 年达到最高水平;截至 2019 年 7 月,竹银水库藻密度相对较低,约为 2018 年的 1/2,大镜山水库、凤凰山水库藻密度较 2018 年显著升高,增幅分别为 37.6% 和 12.7%。在统计年内,大镜山水库及凤凰山水库的年平均藻密度远高于梅溪水库及竹银水库。

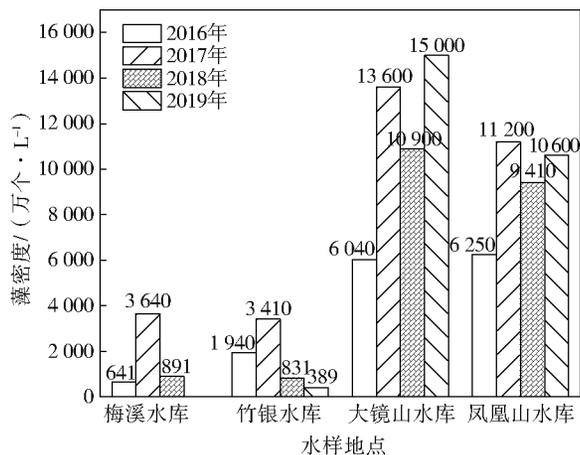


图 1 2016—2019 年水库年平均藻密度统计

Fig. 1 Statistical graph of annual mean algae concentration in four reservoirs from 2016 to 2019

对于其他可能与藻类问题存在相关性的水质指标,4 座水库在 2016—2019 年的水质监测结果见表 1。水质监测结果显示,依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),梅溪水库的各项指标基本符合Ⅲ类水体标准,其余 3 座水库的 TN、TP 两项存在不同程度的污染,其中竹银水库与大镜山水库的 TN 污染程度较高,指标合格率分别为 20.0%、

51.2%。陈纯等<sup>[13]</sup>研究表明:水库水体的氮磷主要来自水库底泥,而竹银水库底泥的总氮释放潜力远

超总磷,邻近农业种植区和畜牧养殖区的监测点可能存在总氮总磷质量浓度较高的情况。

表1 2016—2019年水库10项水质指标的监测结果

Tab. 1 Monitoring results of 10 water quality indicators in reservoirs from 2016 to 2019

水样地点	NH <sub>3</sub> -N			TN			TP		
	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	合格率/ %	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	合格率/ %	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	合格率/ %
竹银水库	41	0.02~0.33	100.0	30	0.64~2.05	20.0	41	0.010~0.096	75.0
梅溪水库	33	0.02~0.59	100.0	33	0.16~1.78	97.0	33	0.013~0.084	94.4
凤凰山水库	43	0.02~3.25	95.3	42	0.15~2.57	86.0	43	0.010~0.110	75.9
大镜山水库	42	0.02~0.13	100.0	40	0.33~3.86	51.2	42	0.010~0.103	72.4
合计	159	0.02~3.25	98.7	145	0.15~3.86	64.1	159	0.010~0.110	86.2

水样地点	BOD <sub>5</sub>			DO			浊度	
	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	合格率/ %	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	合格率/ %	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )
竹银水库	41	2.0~3.7	100.0	41	4.4~9.7	97.6	—	—
梅溪水库	33	2.0~3.2	100.0	33	4.6~7.3	97.0	—	—
凤凰山水库	43	2.0~3.6	100.0	43	4.0~8.2	90.7	43	1.43~5.59
大镜山水库	42	2.0~3.9	100.0	42	2.4~8.8	95.2	42	4.74~116.52
合计	159	2.0~3.9	100.0	159	2.4~9.7	95.0	85	1.43~116.52

水样地点	TOC		COD <sub>Mn</sub>		2-MIB		GSM	
	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	样本量/ 个	质量浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	样本量/ 个	质量浓度/ (ng·L <sup>-1</sup> )	样本量/ 个	质量浓度/ (ng·L <sup>-1</sup> )
竹银水库	40	0.9~1.9	41	0.50~2.30	41	1.00~6.14	41	1.00~8.33
梅溪水库	33	1.0~2.7	33	0.38~4.44	33	1.00~3.50	33	1.00~16.29
凤凰山水库	43	1.0~3.6	43	1.62~4.12	43	1.00~128.39	43	1.00~12.57
大镜山水库	42	0.6~3.9	42	1.60~3.01	42	1.00~168.28	42	1.00~25.63
合计	158	0.6~3.9	159	0.38~4.44	159	1.00~168.28	159	1.00~25.63

对上述10项水质指标的季节性变化进行对比分析,结果显示4座水库的10项水质指标中仅总氮、浊度及臭味物质的变化特征性较为突出,其余水质指标均无显著季节性变化。2016—2019年竹银水库月平均总氮质量浓度变化见图2,结果显示:竹银水库月均总氮质量浓度自春至夏逐渐降低,夏季8月达到最低值,秋季至冬季总氮质量浓度逐渐上升。2016—2019年凤凰山水库、大镜山水库月平均浊度变化见图3,结果显示:凤凰山水库月均浊度春季升高,夏季降低;大镜山水库月均浊度自春至冬先升高后降低,夏季7月达到最高值。此外,2座水库的月均浊度存在显著差异性( $P < 0.05$ ),大镜山水库月均浊度高出凤凰山水库1个数量级。2017—2019年水库月均臭味物质质量浓度变化见图4,结果显示:秋冬季水库臭味物质质量浓度较高,远超引发臭味问题的最大阈值;春夏季属于珠海的丰水期,秋冬季则为枯水期<sup>[14]</sup>,不同时期降雨量的差异可能是造成水质季节性变化的原因<sup>[15]</sup>。

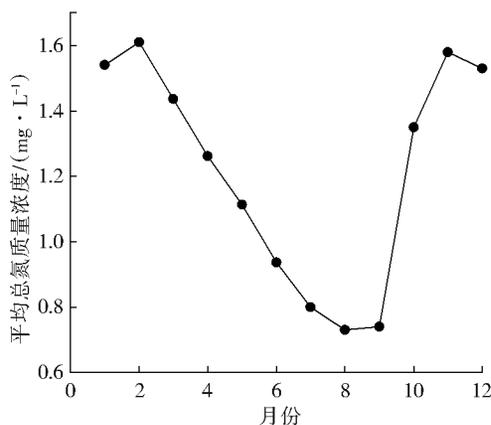


图2 2016—2019年竹银水库月均总氮质量浓度变化  
Fig. 2 Graph of monthly average total nitrogen mass concentration in Zhuyin reservoir from 2016 to 2019

### 2.1.2 水库藻密度分布

2016—2019年水库平均藻密度从低到高分别为梅溪水库1790万个/L、竹银水库1878万个/L、凤凰山水库9430万个/L、大镜山水库10839万个/L。

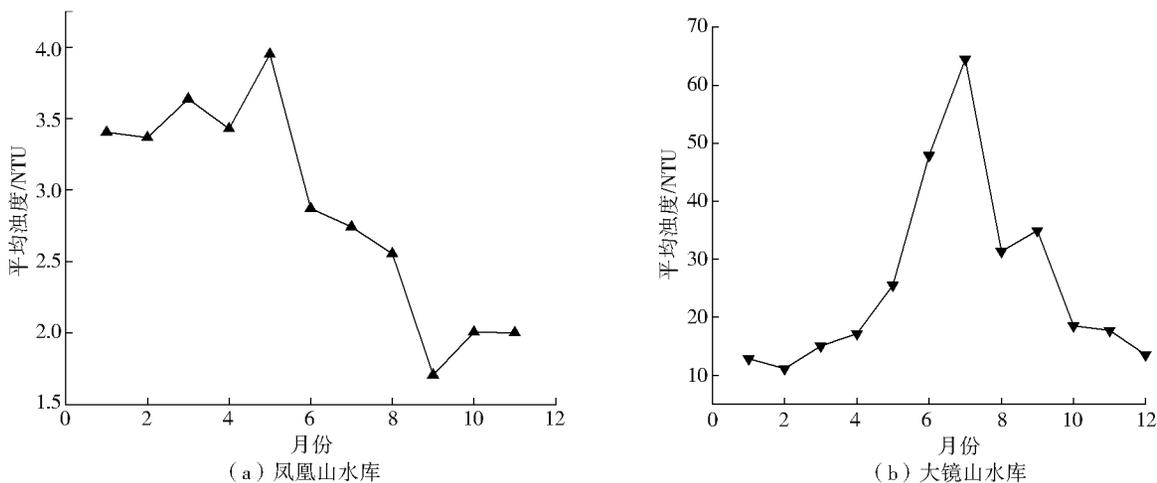


图 3 2016—2019 年凤凰山、大境山水库月均浊度变化

Fig. 3 Monthly average turbidity of Fenghuangshan and Dajingshan reservoirs from 2016 to 2019

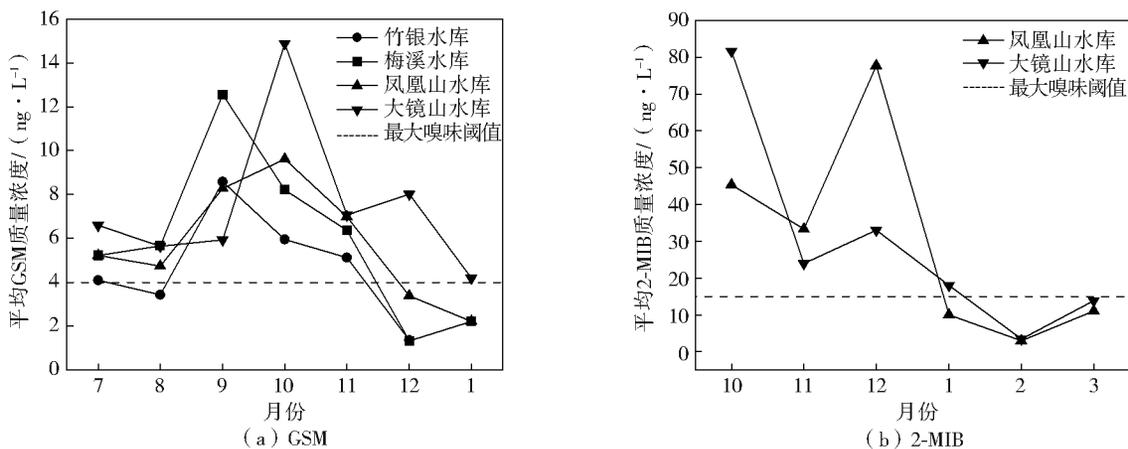


图 4 2017—2019 年水库月均嗅味物质质量浓度变化

Fig. 4 Change of monthly average mass concentration of odorants in reservoirs from 2017 to 2019

为探究水库藻类的季节性分布特征,分析了 2016—2018 年水库月平均藻密度的时间分布情况见图 5,其中,梅溪水库统计数据为 2016—2017 年月均藻密度,其他水库统计数据为 2016—2018 年月均藻密度。结果显示:竹银水库月均藻密度夏季略有上升;梅溪水库、凤凰山水库及大镜山水库自冬至春月均藻密度逐渐上升,3—4 月达到峰值,春末逐渐下降。

梅溪水库、凤凰山水库及大境山水库为互通水库,水道来水抽至大境山水库后,经周边水库群缓冲后进入凤凰山水库,汛期梅溪水库溢洪水也会排入大境山水库,因此上述 3 座水库的藻密度变化呈现类似的季节性特征。珠海属于典型的南亚热带季风海洋性气候,4—9 月为雨季,降水量可达全年降水的 85%,10 月至次年 3 月则为旱季;全年气温较高,四季温差相对较小,冬季最冷月平均气温 15℃,夏季最热月平均气温 28.5℃<sup>[14]</sup>。这一气候特征会导致春季水库底泥中的营养盐随水库水体出现的热分层现象进入表层水体,较高的营养盐含量和春季适宜的温度条件促进了藻类的繁殖<sup>[16]</sup>,春末水体分层达到稳

定,藻类生长条件受到限制,藻密度则随之下降。竹银水库与其他 3 座水库的地理区位不同,且竹银水库是珠海市目前规模最大的水库,水体有较强的纳污及自净能力,因此藻密度分布相对稳定,夏季丰水期降雨量的显著增加可能是影响藻密度的原因<sup>[17]</sup>。

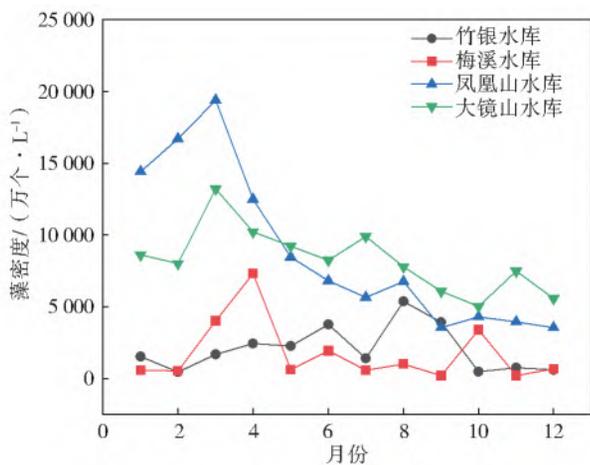


图 5 2016—2018 年水库月平均藻密度时间分布

Fig. 5 Time distribution diagram of average monthly algae density in the reservoirs from 2016 to 2018

## 2.2 藻密度与其他水质指标的相关性分析

氮磷和有机物是影响藻类生长的重要因素。藻类的过度繁殖会大量消耗水体溶解氧,引起浊度、异味、色度等指标上升。由放线菌和蓝藻产生并释放的次生代谢产物 GSM 和 2-MIB 是引起嗅味问题的主要化合物,在极低阈值(2-MIB 为 6.3~15 ng/L, GSM 为 1.3~4 ng/L)下就会导致水体产生土霉味<sup>[18-22]</sup>。GSM 和 2-MIB 还可能成为三卤甲烷(THMs)的前体物<sup>[23]</sup>。因此,分析藻密度与其他水质指标的相关性有助于更准确

地判断水源藻类污染的成因及对水源水质的影响。

2016—2019 年水库月均藻密度与其他水质指标的相关性见表 2。双变量分析结果显示:梅溪水库、大镜山水库月均藻密度与其他 10 项水质指标均无相关性( $P > 0.05$ );竹银水库月均藻密度与 TN 呈极显著负相关,与  $BOD_5$  呈极显著正相关;凤凰山水库月均藻密度与浊度呈显著正相关。4 座水库整体月均藻密度与  $BOD_5$  呈显著负相关,与 TOC、 $COD_{Mn}$  呈显著正相关。

表 2 2016—2019 年水库月均藻密度与其他水质指标的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of monthly mean algae density and other water quality indicators in the reservoirs from 2016 to 2019

指标	2016—2019 年月均藻密度					
	梅溪水库	竹银水库	凤凰山水库	大镜山水库	4 座水库整体(不区分水库)	
TN	皮尔逊相关性	0.128	-0.800**	-0.045	0.344	-0.012
	Sig. (双尾)	0.692	0.002	0.889	0.273	0.938
	个案数	12	12	12	12	48
TP	皮尔逊相关性	0.175	-0.266	-0.048	0.106	0.078
	Sig. (双尾)	0.630	0.403	0.888	0.743	0.610
	个案数	10	12	11	12	45
$BOD_5$	皮尔逊相关性	0.164	0.830**	-0.506	0.096	-0.326*
	Sig. (双尾)	0.629	0.006	0.136	0.767	0.035
	个案数	11	9	10	12	42
$NH_3-N$	皮尔逊相关性	-0.071	0.062	0.323	0.274	0.219
	Sig. (双尾)	0.828	0.848	0.306	0.388	0.135
	个案数	12	12	12	12	48
TOC	皮尔逊相关性	0.161	0.503	0.251	-0.134	0.296*
	Sig. (双尾)	0.616	0.095	0.432	0.678	0.041
	个案数	12	12	12	12	48
$COD_{Mn}$	皮尔逊相关性	-0.182	0.326	0.460	0.386	0.485**
	Sig. (双尾)	0.571	0.301	0.132	0.216	0
	个案数	12	12	12	12	48
DO	皮尔逊相关性	-0.1	-0.163	0.462	0.204	-0.282
	Sig. (双尾)	0.758	0.612	0.131	0.525	0.052
	个案数	12	12	12	12	48
$MIB_2$	皮尔逊相关性	-0.481	0.202	-0.557	-0.614	-0.094
	Sig. (双尾)	0.519	0.745	0.095	0.059	0.627
	个案数	4	5	10	10	29
GSM	皮尔逊相关性	0.145	0.314	-0.409	-0.412	-0.227
	Sig. (双尾)	0.733	0.448	0.275	0.237	0.189
	个案数	8	8	9	10	35
NTU	皮尔逊相关性			0.616*	0.105	0.003
	Sig. (双尾)			0.033	0.745	0.989
	个案数			12	12	24

注:“\*”表示在显著性水平  $\alpha = 0.05$  级别,相关性显著;“\*\*”表示在显著性水平  $\alpha = 0.01$  级别,相关性显著。

凤凰山水库月均藻密度与浊度的线性关系见图 6;  $P < 0.05$  表明拟合结果具有统计学意义,即在一定范围内,凤凰山水库水体浊度会随藻密度的升高而增加;较低的拟合系数表明,除藻密度与上述几项水质指标外,还存在其他影响水体浊度的环境因素。

对于藻密度与多个水质指标存在一定相关性的水库,在双变量分析结果的基础上,对上述水库藻密度及相关污染指标进行了逐步回归分析,结果如下。

竹银水库 ( $R^2 = 0.911, P \ll 0.001, n = 9$ )

$$Y_{ZY} = 7789.306 - 4367.495 \times X_{TN} + \epsilon \quad (1)$$

式中:  $Y_{ZY}$  为竹银水库月均藻密度,万个/L;  $X_{TN}$  为竹银水库月均总氮质量浓度,mg/L。

4 座水库整体分析 ( $R^2 = 0.326, P \ll 0.001, n = 42$ )

$$Y_{algae} = 3712.787 + 2594.730 \times X_{COD_{Mn}} - 2588.529 \times X_{BOD_5} + \epsilon \quad (2)$$

式中:  $Y_{algae}$  为水库月均藻密度,万个/L;  $X_{COD_{Mn}}$  为水库月均高锰酸盐指数,mg/L;  $X_{BOD_5}$  为水库月均五日生化需氧量,mg/L。

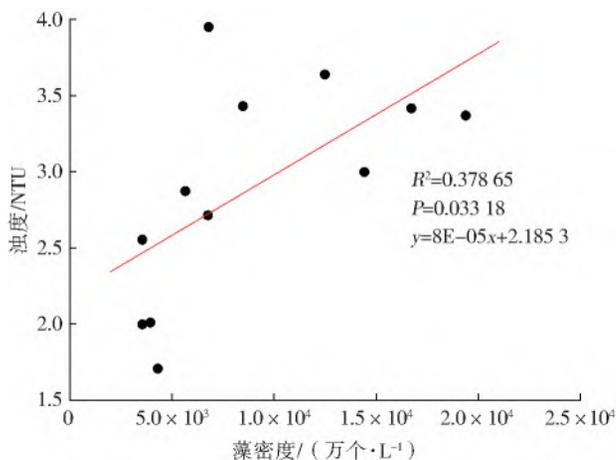


图 6 凤凰山水库月均藻密度与浊度的关系

Fig. 6 Relationship between monthly mean algae density and turbidity in Fenghuangshan reservoir

竹银水库的回归结果表明: TN 是影响竹银水库藻密度的主要因素,与藻密度呈负相关。回归模型较高的拟合系数表明:该模型可以定量地通过水体 TN 质量浓度初步判断水库藻密度。4 座水库整体的回归模型表明:影响珠海市水库藻密度的环境因素有  $COD_{Mn}$ 、 $BOD_5$ ,其中,  $COD_{Mn}$  与藻密度呈正相关,  $BOD_5$  与藻密度呈负相关。回归模型较低的拟合系数表明:除本文涉及的水质参数外,还存在其他影响珠海市水库水体藻密度的重要水质参数。

双变量分析结果显示,各水库月均藻密度与 2 种主要嗅味物质 2-MIB、GSM 均无显著相关性见表 2。为进一步探究水库嗅味物质的产生因素,扩大了

拟合模型的样本容量,将 4 座水库 2016—2019 年每月 GSM 质量浓度为自变量,其他 10 项水质指标为因变量,进行逐步回归分析,得到拟合优度较高的多元线性回归模型 ( $R^2 = 0.911, P \ll 0.001, n = 54$ ) 为

$$Y_{GSM} = -16.088 + 0.743 \times X_N + 4.267 \times X_{COD_{Mn}} + 38.609 \times X_{NH_3-N} + \epsilon \quad (3)$$

式中:  $Y_{GSM}$  为水库每月土臭素质量浓度,ng/L;  $X_N$  为水库每月浊度,NTU;  $X_{COD_{Mn}}$  为水库每月高锰酸盐指数,mg/L;  $X_{NH_3-N}$  为水库每月氨氮质量浓度,mg/L,以 N 计)。

结果表明,影响水库嗅味物质质量浓度的主要因素有浊度、 $COD_{Mn}$ 、 $NH_3-N$ ,藻密度对嗅味物质产生的直接影响弱于上述水质参数,其中  $NH_3-N$  为主导因素,与 GSM 呈正相关,这也说明通过控制水体氨氮质量浓度能有效减少嗅味物质的产生。

### 2.3 藻类问题的解决措施

由上述结果分析可知,目前珠海市水库水源存在的问题主要为高藻密度和高嗅味物质。总氮和有机物是影响藻密度的主要因素,而有机物和氨氮又是影响嗅味物质产生的重要原因。当前,高藻密度和高嗅味物质已经成为珠海市给水处理厂面临的主要水源水质污染问题。以珠海市 N 水厂为例,其源水主要来自西江磨刀门水道、竹银水库和南屏水库,采用混凝→沉淀→过滤→消毒的常规水处理工艺。N 水厂水源为水库水时,源水水质表现为藻密度、总氮和总磷质量浓度较高,易产生嗅味,而水厂目前工艺对溶解性小分子有机物、氨氮及嗅味物质的去除效果不佳,藻类峰值期部分出水指标无法满足卫生标准。为有效解决给水厂存在的上述运行问题,从源头控制和工艺改进两方面提出应对措施。

#### 2.3.1 源头控制

改善水源水质的首要措施是要对工业废水、城市生活污水、农业及畜牧业污水等点、面源污染的排放进行严格把控,可以从根本上减少氮磷、有机物等污染物总量。此外,小规模蓄水型水库由于水体流动性差,水体纳污、缓冲和自净能力较弱<sup>[24]</sup>,水质污染主要来自表层富营养化水体和底层含氮磷底泥<sup>[25]</sup>。引蓄结合的调水型水库水质污染则主要来自江河流域的面源污染和汛期携带大量污染物的暴雨径流<sup>[25]</sup>。相关研究<sup>[25-26]</sup>指出,通过改善水库水体流态,调节水库水体紊动强度,可以有效地从源头缓解水库富营养化现象。

#### 2.3.2 工艺改进

藻细胞过量会扰乱混凝,使水体中的胶体物质

不能达到理想的沉淀效果,甚至堵塞或穿透滤池,降低处理效果的同时提高了混凝剂的使用剂量和滤池反冲洗频率,增加了水处理成本。藻类代谢还会带来一系列次生问题,如臭味物质和藻毒素的产生,藻类细胞内外有机物还可能成为消毒副产物的前体<sup>[27]</sup>。常规给水处理工艺虽然在一定程度上可以去除源水中的部分藻细胞,但是对于藻类产生的溶解性有机物去除效果不佳,特别是对于含藻源水中 GSM 及 2-MIB 的去除率通常低于 20%<sup>[28-30]</sup>,而深度处理技术对难降解的藻类次生代谢产物去除效果显著<sup>[31-33]</sup>,因此针对当前珠海市面临的高藻密度和高臭味物质的水源水质问题,对给水厂现有水处理工艺的改造是十分必要的。臭氧活性炭工艺是目前发展较为成熟的深度处理工艺,在国内给水厂中已有广泛应用,通过臭氧氧化及活性炭吸附的双重作用可以高效地去除当前给水厂工艺无法有效去除的溶解性小分子有机物、氨氮及臭味物质等<sup>[31]</sup>,且该工艺实施改造较为简便,是可行性较高的工艺改进方案。紫外高级氧化工艺是目前用于处理饮用水中难降解有机微污染物的热门技术,具有高效、普适、二次污染少等工艺优势<sup>[34]</sup>,在解决珠海市水源高藻和臭味问题的同时,紫外线设备还能起到消毒作用,也是优选的方案之一。膜技术是一项具有绿色高效、节能低耗、操作简便等优点的新兴技术<sup>[35]</sup>,活性炭-膜或超(微)滤-纳滤的双膜组合工艺能显著提升对常规水质指标 COD<sub>Mn</sub>、TOC 等,以及臭味物质等小分子有机物的处理效果<sup>[33]</sup>,但在实际应用中纳滤技术可能面临膜污染<sup>[36]</sup>及尾水处理等问题。

### 3 结 论

(1) 2016—2019 年珠海市的水库藻密度较高,呈波动上升趋势,4 座典型水库的平均藻密度为 1 790~10 839 万个/L,春季水库藻密度普遍存在上升现象。水库常规水质指标基本符合地表水 III 类标准,但总氮的污染程度较高。水库中的臭味物质在秋冬季质量浓度较高,可以达到最大臭味阈值的 5 倍。

(2) 总氮和有机物是影响珠海市水库藻密度的重要因素,其中, COD<sub>Mn</sub> 与藻密度呈正相关, TN、BOD<sub>5</sub> 与藻密度呈负相关;浊度、有机物和氨氮是导致水库的藻类衍生物类臭味物质质量浓度高的重要因素,其中氨氮为主导因素,与典型臭味物质 GSM 呈正相关。

(3) 竹银水库藻密度拟合模型:  $Y_{ZY} = 7\ 789.306 -$

$4\ 367.495 \times X_{TN} + \epsilon$ ; 珠海市水库综合土臭素质量浓度拟合模型:  $Y_{GSM} = -16.088 + 0.743 \times X_N + 4.267 \times X_{COD_{Mn}} + 38.609 \times X_{NH_3-N} + \epsilon$ 。

(4) 目前珠海市给水厂面临的主要水源水质问题是高藻密度及高臭味物质:可以通过严格把控点、面源污染的排放;调节水库水体流态;增设臭氧活性炭、紫外高级氧化、纳滤膜等深度处理工艺,结合源头控制和末端治理的方法,解决上述藻类带来的水质问题。

### 参考文献(References):

- [1] 邹红菊. 珠海市三座调水水库浮游植物群落动态与藻类水华预警研究[D]. 广州,暨南大学,2010. (ZOU H J. Dynamics of phytoplankton community and early warning of algal blooms in three pumped storage reservoirs, Zhuhai, south of China[D]. Guangzhou: Jinan University, 2010. (in Chinese))
- [2] 赵锐. 基于 SWOT 分析的珠海市水库水资源的管理与对策[J]. 资源节约与环保, 2017(2): 39-41. (ZHAO R. Management and countermeasures of water resources in Zhuhai reservoir based on SWOT analysis[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2017(2): 39-41. (in Chinese)) DOI: 10. 16317/j. cnki. 12-1377/x. 2017. 02. 026.
- [3] CARMICHAEL W W, BOYER G L. Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes[J]. Harmful Algae, 2016, 54: 194-212. DOI: 10. 1016/j. hal. 2016. 02. 002.
- [4] SUURNAKKI S, GOMEZ-SAEZ G V, RANTALA-YLINEN A, et al. Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds[J]. Water Research, 2015, 68: 56-66. DOI: 10. 1016/j. watres. 2014. 09. 037.
- [5] LIU Y W, LI X, YANG Y L, et al. Fouling control of PAC/UF process for treating algal-rich water[J]. Desalination, 2015, 355: 75-82. DOI: 10. 1016/j. desal. 2014. 10. 020.
- [6] MOHAMED Z A, DEYAB M A, ABOU-DOBARA M I, et al. Occurrence of cyanobacteria and microcystin toxins in raw and treated waters of the Nile River, Egypt; Implication for water treatment and human health[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22 (15): 11716-11727. DOI: 10. 1007/s11356-015-4420-z.
- [7] ZONG W S, SUN F, PEI H Y, et al. Microcystin-associated disinfection by-products: The real and non-negli-

- gible risk to drinking water subject to chlorination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 279: 498-506. DOI:10.1016/j.cej.2015.05.048.
- [8] SHANG L X, FENG M H, XU X E, et al. Co-occurrence of microcystins and taste-and-odor compounds in drinking water source and their removal in a full-scale drinking water treatment plant[J]. *Toxins*, 2018, 10(1):17. DOI:10.3390/toxins10010026.
- [9] SU M, YU J W, ZHANG J Z, et al. MIB-producing cyanobacteria (*Planktothrix* sp.) in a drinking water reservoir: Distribution and odor producing potential[J]. *Water Research*, 2015, 68: 444-453. DOI: 10.1016/j.watres.2014.09.038.
- [10] VILLACORTE L O, EKOWATI Y, WINTERS H, et al. MF/UF rejection and fouling potential of algal organic matter from bloom-forming marine and freshwater algae[J]. *Desalination*, 2015, 367: 1-10. DOI: 10.1016/j.desal.2015.03.027.
- [11] LIU B, QU F S, LIANG H, et al. Algae-laden water treatment using ultrafiltration: Individual and combined fouling effects of cells, debris, extracellular and intracellular organic matter[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 528: 178-186. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.01.032.
- [12] 王婵, 张锡辉, 冯兆敏, 等. 沿海城市复杂水源对城市安全供水的影响[J]. *给水排水*, 2009, 45(11): 135-139. (WANG C, ZHANG X H, FENG Z M, et al. The influence of complex water sources on safe water supply in coastal cities[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 45(11): 135-139. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2009.11.050.
- [13] 陈纯, 刘红涛, 吴孟李, 等. 竹银水库库底氮磷营养盐释放潜力研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(10): 1701-1705. (CHEN C, LIU H T, WU M L, et al. Nutrient release from different soils in Zhuyin, a newly commissioned reservoir in Macao, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1701-1705. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2013.10.015.
- [14] 胡韧. 珠海水库富营养化现状、浮游植物群落特征与蓝藻水华风险分析[D]. 广州: 暨南大学, 2009. (HU R. Eutrophication, phytoplankton assemblage and blue-green algal blooms in Zhuhai reservoirs[D]. Guangzhou: Jinan University, 2009. (in Chinese))
- [15] 王洁, 王景仕, 薛新娟. 降雨对密云水库水质影响分析[J]. *北京水务*, 2014(2): 14-17. (WANG J, WANG J S, XUE X J. Influence of rainfall on water quality of Miyun reservoir[J]. *Beijing Water*, 2014(2): 14-17. (in Chinese))
- [16] 张华俊, 李秋华, 韩博平. 南亚热带典型调水型水库: 广东大镜山水库的富营养化特征分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 291-299. (ZHANG H J, LI Q H, HAN B P. Eutrophication of a typical pumped storage reservoir, Dajingshan reservoir, subtropical China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 291-299. (in Chinese))
- [17] 朱毅, 关小桃, 王晓彬, 等. 珠海竹银水库入库污染现状评估及水环境容量分析[J]. *生态科学*, 2012, 31(2): 97-103. (ZHU Y, GUAN X T, WANG X B, et al. Evaluation of pollution status and analysis of water environmental capacity for Zhuyin reservoir flowing in Zhuhai[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(2): 97-103. (in Chinese))
- [18] DOEDERER K, GALE D, KELLER J. Effective removal of MIB and geosmin using MBBR for drinking water treatment[J]. *Water Research*, 2019, 149: 440-447. DOI: 10.1016/j.watres.2018.11.034.
- [19] LI L, ZHANG W J, ZHANG Y F, et al. Sulfate radical-based technology for the removal of 2-methylisoborneol and 2-methylisoborneol-producing algae in drinking water sources[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 43-52. DOI: 10.1016/j.cej.2018.08.180.
- [20] LI L, YANG S H, YU S L, et al. Variation and removal of 2-MIB in full-scale treatment plants with source water from Lake Tai, China[J]. *Water Research*, 2019, 162: 180-189. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.066.
- [21] SHIN J, LEE D, HWANG T-M, et al. Oxidation kinetics of algal-derived taste and odor compounds during water treatment with ferrate(VI)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1065-1073. DOI: 10.1016/j.cej.2017.10.057.
- [22] JO J O, KIM S D, LEE H J, et al. Decomposition of taste-and-odor compounds produced by cyanobacteria algae using atmospheric pressure plasma created inside a porous hydrophobic ceramic tube[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 247: 291-301. DOI: 10.1016/j.cej.2014.03.018.
- [23] KIM T-K, MOON B-R, KIM T, et al. Degradation mechanisms of geosmin and 2-MIB during UV photolysis and UV/chlorine reactions[J]. *Chemosphere*, 2016, 162: 157-164. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.07.079.
- [24] 刘格辛, 吴孟李, 尹娟, 等. 西江调水对珠海市供水水库富营养化的影响及其管理对策[J]. *生态科学*, 2013, 32(4): 494-499. (LIU G X, WU M L, YIN J, et al. Influence of pumping water from Xijiang River on

- eutrophication of water supply reservoirs and its management strategy in Zhuhai City[J]. *Ecological science*, 2013, 32(4): 494-499. (in Chinese))
- [25] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提[J]. *给水排水*, 2017, 43(1): 1-3, 69. (HUANG T L. In-situ control and improvement of water pollution in water source reservoir is the primary premise of water quality safety [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(1): 1-3, 69. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwel964. 2017. 0035.
- [26] 胡培, 邱静. 水动力影响下的调水水库营养物质变化规律研究: 以珠海市大镜山水库为例[J]. *中国农村水利水电*, 2015, 9: 58-61. (HU P, QIU J. Research on the nutrients change of pumped storage reservoir under hydrodynamics: A case study of Dajingshan reservoir in Zhuhai City [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015, 9: 58-61. (in Chinese))
- [27] 丁昌龙. 逆境下高藻水中含氮消毒副产物前体物释放规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. (DING C L. Study on the release of nitrogenous disinfection by-products precursors of algal water under environment stress conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese))
- [28] BAI M D, YU Y X, CHENG J G, et al. • OH degraded 2-Methylisoborneol during the removal of algae-laden water in a drinking water treatment system: Comparison with ClO<sub>2</sub> [J/OL]. *Chemosphere*, 2019-07-13.
- [29] BAI M D, ZHENG Q L, ZHENG W, et al. • OH inactivation of cyanobacterial blooms and degradation of toxins in drinking water treatment system [J]. *Water Research*, 2019, 154: 144-152. DOI: 10. 1016/j. watres. 2019. 02. 002.
- [30] ZAMYADI A, HENDERSON R, STUETZ R, et al. Fate of geosmin and 2-methylisoborneol in full-scale water treatment plants [J]. *Water Research*, 2015, 83: 171-183. DOI: 10. 1016/j. watres. 2015. 06. 038.
- [31] GUO Q Y, YANG K, YU J W, et al. Simultaneous removal of multiple odorants from source water suffering from septic and musty odors: Verification in a full-scale water treatment plant with ozonation [J]. *Water Research*, 2016, 100: 1-6. DOI: 10. 1016/j. watres. 2016. 05. 017.
- [32] 岳思阳, 张爱红, 谢鹏超, 等. 紫外/PS、紫外/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解 2-MIB 和土臭素对比 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(19): 6-9. (YUE S Y, ZHANG A H, XIE P C, et al. Comparative study on UV/persulfate and UV/hydrogen peroxide for degradation of 2-MIB and geosmin [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(19): 6-9. (in Chinese)) DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2016. 19. 003.
- [33] 倪先哲, 殷祺, 王刚, 等. 超滤-纳滤组合工艺对东太湖原水的处理效果 [J]. *净水技术*, 2020, 39(1): 94-97, 103. (NI X Z, YIN Q, WANG G, et al. Effect of combined processes of ultrafiltration-nanofiltration (UF-NF) on treatment of raw water from east Taihu Lake [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(1): 94-97, 103. (in Chinese)) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2020. 01. 016.
- [34] 朱欢欢, 孙韶华, 冯桂学, 等. 紫外联用高级氧化技术处理饮用水应用进展 [J]. *水处理技术*, 2019, 45(3): 1-7, 13. (ZHU H H, SUN S H, FENG G X, et al. Research progress of ultraviolet combined advanced oxidation technology for drinkingwater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(3): 1-7, 13. (in Chinese)) DOI: 10. 16796/j. cnki. 1000-3770. 2019. 03. 001.
- [35] 赵向阳, 许锋. 膜技术在饮用水处理行业的研究进展及应用 [J]. *广东化工*, 2017, 44(16): 152-153, 151. (ZHAO X Y, XU F. Progress and application of membrane technology in drinking water treatment [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(16): 152-153, 151. (in Chinese))
- [36] 李艾铎, 朱云杰, 朱昊辰, 等. 纳滤技术在饮用水处理中的应用 [J]. *净水技术*, 2019, 38(6): 51-56. (LI A H, ZHU Y J, ZHU H C, et al. Application of nanofiltration technology in drinking water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(6): 51-56. (in Chinese)) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2019. 06. 010.

### Analysis and solution of algae problems in drinking water sources in Zhuhai City

LING Yanchen<sup>1,2</sup>, SU Yuliang<sup>3</sup>, HU Kewu<sup>3</sup>, YUAN Hanhong<sup>3</sup>, WU Bin<sup>3</sup>, HUANG Hongbo<sup>3</sup>, FANG Li<sup>3</sup>,

WU Jie<sup>3</sup>, HUANG Tianyin<sup>1</sup>, AO Xiuwei<sup>2</sup>, SUN Wenjun<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology,

Suzhou 215009, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Zhuhai Water Environment Holdings Group Ltd., Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** The water supply system in Zhuhai City presents the characteristics of multiple water sources. The Xijiang River is the main drinking water source, and various reservoirs are auxiliary water sources. The reservoirs are responsible for the important

function of water storage and water diversion. The water supply system combing the river and reservoirs in Zhuhai City makes the water quality not only affected by point and non-point source pollution in the river basin, but also interfered by the internal source pollution in the reservoir, which leads to the difficulty in controlling the stability of the water quality. The water quality of reservoirs in Zhuhai has gradually declined in recent years, and the algae content of the water body has continued to be high. The trend of eutrophication is becoming more and more obvious. However, there is still a lack of theoretical research into the impact of complex water supply system on algae in water sources, and technical guidance for algae control is therefore difficult and highly needed.

The single factor analysis was used to compare the measured data and the regulated values of national standard, which aims to evaluate the water quality of four typical reservoirs (Meixi, Zhuyin, Dajingshan and Fenghuangshan reservoirs) in Zhuhai City from 2016 to 2019. The water quality characteristics and the spatial and temporal distribution of algae density in each reservoir were analyzed by the statistical method. The correlation between algae density and 10 water quality indexes (total nitrogen, total phosphorus, 5-day biochemical oxygen demand, ammonia-nitrogen, total organic carbon, permanganate index, dissolved oxygen, 2-methylisoborneol, geosmin, and turbidity) was studied by the bivariate analysis. The stepwise regression analysis was used to study and establish a regression model for preliminarily predicting the water quality of the reservoirs, with algae density, taste and odor compounds as dependent variables, and other environmental factors mentioned above as independent variables, respectively. Considering the current operational and problems of water plans in Zhuhai City, suitable solutions for solving the algae problems were analyzed and proposed from two perspectives: pollution source control and process transformation.

The water quality of the reservoirs in Zhuhai City basically conformed to the standard of Class III surface water bodies from 2016 to 2019. However, the contents of total nitrogen and total phosphorus in some reservoirs exceeded the standard. From 2016 to 2019, the average algae density in the four reservoirs were 17.90 million cells/L in Meixi reservoir, 18.78 million  $L^{-1}$  in Zhuyin reservoir, 9.43 million  $L^{-1}$  in Fenghuangshan reservoir and 108.39 million  $L^{-1}$  in Dajingshan reservoir, respectively. Under the influence of climate and water environment quality, the increase of algae density mostly occurred in spring, while the content of taste and odor compounds in the reservoirs were higher in autumn and winter, which could reach 5 times of the maximum odor threshold. Regression analysis showed that the water quality factors affecting algae density in Zhuhai reservoir involved total nitrogen and organic matter. The permanganate index was positively correlated with algal density, while total nitrogen and 5-day biochemical oxygen demand had negative correlation with the algal density. In addition, turbidity, organic matter and ammonia-nitrogen may contribute to the formation of taste and odor compounds in the reservoirs. And ammonia-nitrogen was the dominant factor and positively correlated with geosmin. Taking the monthly mean algae density of Zhuyin reservoir as the dependent variable while total nitrogen as the independent variable, a well-fitting regression model was established ( $R^2 = 0.911, P < 0.001, n = 9$ ). Furthermore, taking geosmin as the dependent variable while turbidity, permanganate index ammonia-nitrogen as the independent variables, a well-fitted regression model was developed ( $R^2 = 0.911, P < 0.001, n = 54$ ).

High algae density, high taste and odor substances were the main water pollution problems in Zhuhai City. Ammonia-nitrogen and organic matter were the key factors affecting algae density and the production of taste and odor compounds in the reservoirs, algae problems in drinking water sources in Zhuhai City can be effectively solved by source control combined with the end treatment of ozone activated carbon or other advanced treatment technologies.

**Key words:** multiple water resource; algae problem; taste and odor substance; stepwise regression analysis; advanced treatment