环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.9
第40卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第9期 2019年9月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素

史鹏程[1,2], 朱广伟[2], 杨文斌[1*], 许海[2], 朱梦圆[2], 邹伟[2], 胡林娜[1,2], 笪文怡[3], 季鹏飞[4]
(1. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241003; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637009; 4. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

摘要: 为认知水源地型水库异味发生风险及其规律, 本研究于异味风险高危期(夏季), 对江苏17个省级水源地型水库开展了水质、浮游生物和异味物质状况调查. 结果表明, 本次调查的17个水库普遍存在富营养化程度偏高(如藻类生物量偏大和水体透明度偏低)的问题, 约三分之一的水库出现部分水层异味物质2-甲基异莰醇(MIB)浓度超标, MIB平均浓度为(13.7 ±20.7) ng·L^{-1}, 表明江苏省水库型水源地普遍存在MIB风险; 多个水库检出土臭素(GSM), 但其浓度均没有超过10 ng·L^{-1}的饮用水标准浓度(最大浓度为4.6 ng·L^{-1}); 同步水质调查及统计分析表明, MIB浓度和水体叶绿素a浓度、水体透明度、悬浮颗粒物浓度、富营养化指数等重要水质指标及浮游植物生物量(特别是蓝藻生物量)相关性显著($P<0.05$), 其中MIB与叶绿素a、富营养化指数呈极显著的相关关系($P<0.01$). 因此, 水源地型水库的异味物质风险与水库的富营养化密切相关; 实施营养盐外源输入削减、提高流域植被覆盖度、科学调控渔业养殖规模等水体富营养化控制措施是水库异味物质控制的关键.

关键词: 水源地; 水库; 异味物质; 水质; 浮游植物; 2-甲基异莰醇(MIB)
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-4000-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201812024

Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province

SHI Peng-cheng[1,2], ZHU Guang-wei[2], YANG Wen-bin[1*], XU Hai[2], ZHU Meng-yuan[2], ZOU Wei[2], HU Lin-na[1,2], DA Wen-yi[3], JI Peng-fei[4]
(1. College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 4. College of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to recognize the risk of odorous compounds and its driving mechanisms in water source reservoirs, the water quality, plankton, and odorous compounds of 17 provincial water source reservoirs in Jiangsu Province were investigated during a high-risk period of odorous compounds. A high eutrophication status, such as high algal biomass and low transparency, were widely observed in our study reservoirs. In addition, 2-methylisoborneol (MIB) exceeded the standard in some water layers of one-third of the reservoirs, of which the average concentration was (13.7 ± 20.7) ng·L^{-1}. Geosmin (GSM) was also detected in several reservoirs, although the maximum concentration of 4.6 ng·L^{-1} did not exceed the drinking water quality standard. With respect to the relationships between odorous compounds and environmental conditions, significant correlation ($P<0.05$) was noted between the MIB concentration and eutrophication indicators, including chlorophyll-a, Secchi depth, suspended solids, and comprehensive nutrition state index (TLI), particularly for chlorophyll-a and TLI ($P<0.01$). These results indicate that the risk of odorous compounds in water source reservoirs depend largely on the eutrophic status. Therefore, nutrient reduction, improvement in vegetation coverage of the reservoir basin, reasonable fishing practices are considered as effective strategies to avoid the risk of the odorous compounds in reservoirs.

Key words: drinking water resource; reservoirs; odorous compounds; water quality; phytoplankton; 2-methylisoborneol (MIB)

水库是我国乃至全世界极为重要的可调控地表水资源, 我国水库数量与天然湖泊相近, 而蓄水量已达天然湖泊的3倍[1]. 近年来, 随着经济社会的高速发展, 人类活动加剧, 污染物大量排放, 使河流和湖泊的供水水质退化, 在很多省份, 水库成为主要的供水源[2,3], 因此水源地型水库的水质情况至关重要[4].

一般而言, 水库水质的主要威胁是富营养化导致的藻类异常增殖问题[5,6], 文献[7]指出, 我国52个重要水库90.4%处于轻度富营养和中营养状态, 情况不容乐观. 除此以外, 异味物质超标也是水质恶化的重要后果. 近年来, 对澳大利亚饮用水质量进行调查, 27%的人表示不满意, 不满意的人中60%表示饮用水中有异味[8]. 70年代末, 挪威

收稿日期: 2018-12-03; **修订日期**: 2019-04-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(41830757); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-3-4); 中国科学院南京地理与湖泊研究所一三五项目(NIGLAS2017GH04); 江苏省水文水资源勘测局项目
作者简介: 史鹏程(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类分布特征及影响因素, E-mail: spc1994@126.com
* 通信作者, E-mail: ywb1968@mail.ahnu.edu.cn

Mjosa 湖中颤藻水华暴发导致的霉味影响了约 20 万当地居民的正常供水[9]. 同时，水体中的异味物质对渔业养殖也有着极大的影响[10]. 在我国，虽然对水体异味物质的研究起步较晚，但是随着人们对水体异味的重视，近几年，大量科研工作者对全国各大湖泊如太湖、东湖和洞庭湖水体中的异味物质进行深入研究[11~13]. 在众多异味物质的研究中，2-甲基异莰醇(MIB)和土臭素(GSM)最为常见，并且有研究表明，水库的富营养化水平间接影响着水体中异味物质 MIB[14]. 因此研究水源地型水库中异味物质(特别是 MIB)发生风险，对水库水质风险评估意义重大.

江苏省地处我国东南沿海地区，水资源丰富，全省共有大小水库 900 余座，江苏省水资源公报指出，2017 年全省 6 座大型水库及 43 座中型水库蓄水总量分别为 5.34 亿 m^3 和 5.17 亿 m^3. 先后有学者对江苏水库的藻类群落结构和水质理化参数进行了较为详实的调查[15,16]. 这些调查可以为江苏省水库水质及浮游植物提供一定的背景资料，但是水库异味物质的相关研究却较为少见，并且目前关于水体异味物质的研究大多集中于湖泊中. 因此，于 2018 年 8 月异味风险高危期对江苏省 17 个水库进行采样，系统调查了水质理化参数、浮游生物群落以及异味物质含量，探究江苏省水源地型水库的异味物质空间分布以及影响因素，以期为该区域水源地型水库异味发生风险以及相关管理工作提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　采样水库概况及采样方法

本次调查的17个水源地型水库分别隶属于赣榆、连云港、盱眙、句容、六合、浦口、溧水、江宁、宜兴和溧阳，如图 1. 从水库规模来看，5 座为大型水库，10 座为中型水库，2 座为小型水库，水库的流域面积和总库容见表 1.

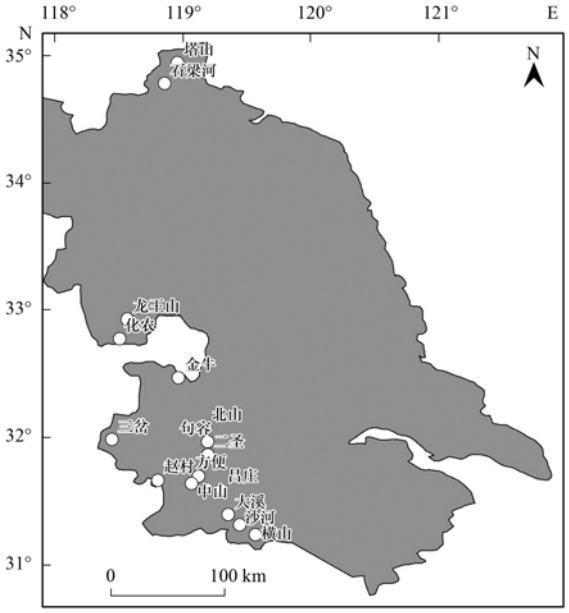

图 1　调查水库的地理位置示意

Fig. 1　Locations of our study reservoirs

样品的采集及处理方法见文献[17]. 采样点位于水库坝前水位最深处. 在测量采样点水深后，分别采取表层(0.5 m)、中层(水深 1/2 处)和底层(泥上 0.5 m)水样. 分层水样采集后，现场用 Whatman GF/F 滤膜进行叶绿素 a(CHL)、悬浮颗粒物(SS)的过滤，滤后水和原水立刻冷藏后当天送回实验室进行分析处理. 用采水器采集表层、中层、底层的水均匀混合后，用量筒量取1 L混合水

表 1　调查水库的基本信息

Table 1　Basic properties of the reservoirs

水库名称	东经/(°)	北纬/(°)	隶属区	库容类型	总库容/亿 m^3	水库面积/km^2	流域面积/km^2	采样点水深/m
塔山	118.959 32	34.945 91	赣榆	大(Ⅱ)	2.81	26.00	386	7.2
石梁河	118.853 37	34.779 54	连云港	大(Ⅱ)	5.31	90.90	724	10.4
龙王山	118.562 81	32.928 86	盱眙	中	0.91	15.00	197	5.2
化农	118.501 41	32.782 08	盱眙	中	0.4	9.00	54	11.2
二圣	119.195 68	31.867 95	句容	中	0.57	4.70	104	5.8
句容	119.197 04	31.973 48	句容	中	0.29	2.49	46	6.9
北山	119.180 22	32.079 25	句容	中	0.48	2.70	58	14.7
金牛	118.969 82	32.474 47	六合	中	0.93	16.67	124	9.1
三岔	118.444 89	31.986 99	浦口	小(Ⅰ)	0.08	0.60	14	5.4
中山	119.065 78	31.640 07	溧水	中	0.29	2.86	32	10.7
赵村	118.802 84	31.670 79	江宁	中	0.11	1.12	18	11.8
方便	119.122 17	31.703 74	溧水	中	0.50	4.72	77	9.2
老鸭坝	119.189 91	31.601 85	溧水	中	0.11	1.37	18	6.9
横山	119.565 8	31.242 5	宜兴	大(Ⅱ)	1.12	6.00	155	13.4
沙河	119.439 1	31.315 08	溧阳	大(Ⅱ)	1.09	9.29	150	10.8
大溪	119.360 06	31.391 68	溧阳	大(Ⅱ)	1.70	11.10	90	6.8
吕庄	119.300 56	31.596 83	溧阳	小(Ⅰ)	0.07	0.57	12	6.9

样用鲁戈试剂固定，用于浮游植物群落结构的鉴定. 浮游动物则分别采集表层、中层各 5 L 水样，用 25 号浮游生物网过滤浓缩至 30 mL 塑料方瓶中，现场加 1 mL 甲醛固定. 对于异味物质，将上述表、中、底这 3 层水样分别量取 25 mL 原水，现场用氯化钠固定，密封后带回实验室测定.

现场使用美国黄石仪器公司 YSI 6600V2 型多参数水质分析仪每隔 1 m 测定水温(WT)、电导率(EC)、溶解氧(DO)、浊度和 pH 等指标. 水体透明度(SD)使用直径 20 cm 的赛氏盘测定.

1.2 样品分析及实验方法

室内水质指标的测定方法参考文献[18]. 其中总氮(TN)采取碱性过硫酸钾消解、紫外(波长 210 nm)分光光度法测定；总磷(TP)采取碱性过硫酸钾消解、钼锑抗显色分光光度法(波长 700 nm)测定；NO_3^--N、NO_2^--N、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、DTN 和 DTP 则用荷兰 Skalar 流动注射分析仪测定；叶绿素 a (CHL)采取热乙醇提取、分光光度法(波长 665 nm、750 nm)测定；悬浮颗粒物(SS)采取 105℃烘干重量法，然后采用 550℃马弗炉灼烧，剩余灰分为无机颗粒物(ISS)重量；高锰酸盐指数采取高锰酸钾水浴氧化后草酸钠、高锰酸钾氧化滴定法；浮游植物群落结构的鉴定采取 Olympus CH 生物光学显微镜镜检，鉴定到属，在各属细胞数基础上，根据体积-重量经验公式换算为生物量(BM, $mg \cdot L^{-1}$). 浮游动物采取 Zeis 倒置显微镜镜检并估算生物[19].

异味物质采取固相微萃取气相色谱-质谱联用(SPME-GCMS)法分析[20]，仪器型号为 Agilent 7890-5975C. 萃取条件:65℃顶空萃取 30 min；起始温度 60℃，15 ℃·min^{-1}升至 220℃维持 2 min；进样口温度为 260℃不分流进样.

富营养化指数(TLI)参考文献[21]，分别计算出 TN、TP、高锰酸盐指数、SD、CHL 这 5 个指标的富营养化指数，再加权平均计算综合富营养化指数(TLI).

1.3 统计方法

数据图表及统计分析主要由 Excel 2016、ArcGIS 10.2 和 SPSS 23.0 完成. 异味物质与其他因子的相关关系用 Pearson 相关系数(P)表示. 浮游植物优势属用每个属的优势度(Y)来表示.

2 结果与分析

2.1 水环境背景

2.1.1 理化指标

本次调查的 17 个水源地型水库主要水质指标见表 2. 其中，总氮(TN)平均值为(1.33 ± 1.09) $mg \cdot L^{-1}$，其中超过地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中Ⅲ类标准限值(TN < 1.0 $mg \cdot L^{-1}$)的比例为 52.9%，分别为塔山、石梁河、龙王山、句容、北山、三岔、赵村、横山和吕庄水库；其余 8 座水库均处于地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中Ⅲ类标准(TN < 1.0 $mg \cdot L^{-1}$)，但未达到Ⅱ类标准(TN < 0.5 $mg \cdot L^{-1}$).

表 2 调查水库的主要水质指标

Table 2 Main water quality indicators of Jiangsu reservoirs

水库名称	TN /$mg \cdot L^{-1}$	TP /$mg \cdot L^{-1}$	DTN /$mg \cdot L^{-1}$	DTP /$mg \cdot L^{-1}$	NH_4^+-N /$mg \cdot L^{-1}$	COD /$mg \cdot L^{-1}$	CHL /$ug \cdot L^{-1}$	SD/m	SS /$mg \cdot L^{-1}$
塔山	1.273	0.092	0.586	0.012	0.127	5.256	60.860	0.750	7.258
石梁河	5.277	0.179	4.926	0.100	0.320	5.428	11.278	0.650	11.978
龙王山	1.133	0.087	0.507	0.012	0.119	5.083	53.005	0.600	28.175
化农	0.890	0.054	0.482	0.011	0.221	4.134	22.961	0.800	18.725
二圣	0.907	0.058	0.541	0.014	0.150	5.601	33.262	0.680	12.880
句容	1.260	0.066	1.015	0.014	0.143	7.068	34.379	0.550	17.467
北山	1.752	0.038	1.436	0.012	0.865	5.601	10.398	1.050	11.578
金牛	0.615	0.019	0.452	0.013	0.131	5.687	10.661	1.270	4.133
三岔	1.832	0.069	1.489	0.009	0.123	4.565	18.835	0.500	18.941
中山	0.669	0.018	0.514	0.004	0.195	4.565	6.475	1.650	6.452
赵村	1.395	0.022	1.068	0.004	0.366	4.565	9.696	1.400	5.667
方便	0.749	0.021	0.594	0.003	0.142	4.997	9.709	1.200	4.433
老鸭坝	0.797	0.021	0.713	0.005	0.170	4.824	11.640	1.400	5.794
横山	1.631	0.039	1.289	0.014	0.552	4.652	15.738	1.050	8.976
沙河	0.792	0.027	0.542	0.005	0.158	3.012	21.328	1.000	8.761
大溪	0.544	0.026	0.423	0.004	0.128	2.926	13.134	1.050	9.459
吕庄	1.041	0.017	0.946	0.004	0.172	3.443	8.309	1.200	11.600

总磷(TP)的平均值为(0.050 ± 0.040) $mg \cdot L^{-1}$，其中超过地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中Ⅲ

类标准限值(TP <0.05 mg·L^{-1})的比例为41.2%，分别为塔山、石梁河、龙王山、化农、二圣、句容和三岔水库；其余水库均低于Ⅲ类标准限值(TP <0.05 mg·L^{-1})，其中金牛、中山、赵村、方便、老鸭坝和吕庄水库处于Ⅱ类标准(TP <0.025 mg·L^{-1}).

氨氮(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数、浮游植物叶绿素 a(CHL)、透明度(SD)的平均值分别为(0.24 ± 0.35) mg·L^{-1}、(4.79 ± 1.32) mg·L^{-1}、(20.70 ± 16.85) μg·L^{-1}和(0.99 ± 0.33) m. 这些数据表明江苏 17 个水源地型水库普遍存在有机污染比较严重、藻类生物量偏高、透明度偏低的现象.

综合水质指标发现，塔山、石梁河、龙王山、化农、二圣、句容、北山和三岔这 8 个水库水质情况较其他水库差. 并且存在着水质指标由北向南逐渐变好的现象，即苏南水库水质比苏中和苏北好，究其原因，主要是对旅游业、渔业的规范化程度不同. 这与万成炎等[15]于 2000 年左右调查的结果基本相同，说明苏北和苏中水库水质背景值可能就比苏南水库要高.

2.1.2　富营养化指数

17 个被调查水库富营养化指数(TLI)平均值为 50，TLI 指数最高的是石梁河水库(60.3)，主要是 TLI(TN)严重超标(82.7)；其次是塔山水库(58.2)和句容水库(58.0)，分别是 TLI(CHL)和 TLI(SD)严重超标；TLI 指数最低的是中山水库(41.2)，这反映了江苏水源地型水库高营养盐的本底特征. 其中处于富营养化水平(TLI >50)的水库有 9 座，大多数为苏北、苏中水库，总体呈现由北到南 TLI 指数渐降的趋势(图 2). 17 个水库 TN、TP、COD、CHL 和 SD 对应的 TLI 平均值分别为 56.4、41.8、42.1、55.5 和 52.6，说明 TN 和 CHL 是 TLI 超标的主要因子.

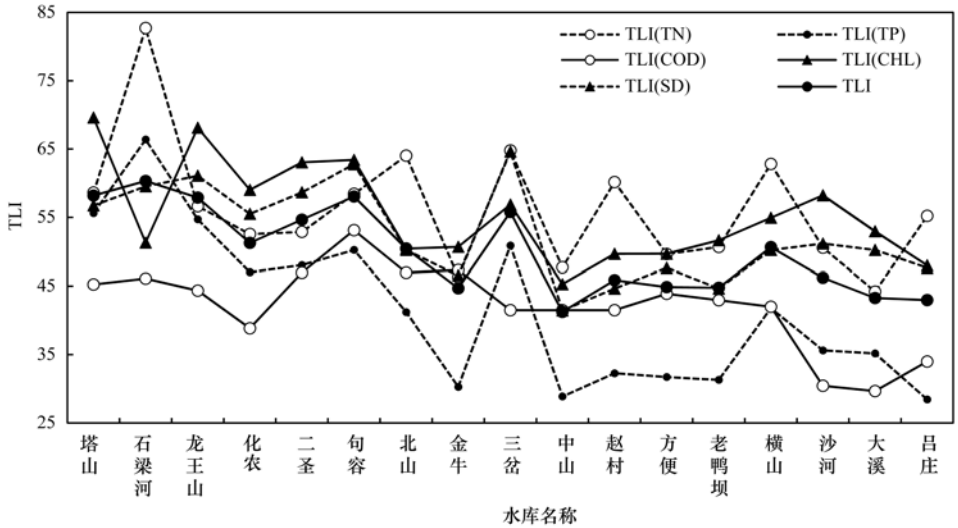

图 2　江苏水库富营养化指数

Fig. 2　TLI of Jiangsu reservoirs

2.2　浮游植物

在本次 17 个水源地型水库浮游植物中，共鉴定出 6 门 48 属，包括蓝藻(Cyanophyta)9 个属、硅藻(Bacillariophyta)8 个属、甲藻(Pyrrophyta)2 个属、隐藻(Cryptophyta)3 个属、裸藻(Euglenophyta)5 个属和绿藻(Chlorophyta)21 个属，其中蓝藻门和硅藻门生物量占据优势地位(图 3)，分别占藻类总生物量(BM_{phyto})的 25% 和 44%；甲藻门、隐藻门、裸藻门和绿藻门分别占 7%、5%、12% 和 7%.

异味物质主要受蓝藻门、硅藻门中某些产异味的藻影响较大[22]，故对 17 个水库蓝藻门和硅藻门中各属的优势度进行比较分析(表 3). 结果发现蓝藻门中束丝藻、席藻、颤藻占据优势；硅藻门中针杆藻、颗粒直链藻在每个水库都占据优势，这些优势属均是常见的产异味藻. 由此可见浮游植物的生物量和优势属(特别是蓝藻)的研究一定程度上可以反映水体异味情况.

2.3　异味物质

对江苏 17 座水源地型水库表层、中层、底层异味物质共 51 个样本进行分析发现，检出 2-甲基异莰醇(MIB)的占 84.3%，且所有水库至少有 1 层检出；检出土臭素(GSM)的占 41.2%，8 座水库表、中、底 3 层均未检出.

各水库表、中、底 3 层土臭素(GSM)均未超过其嗅阈值 10 ng·L^{-1}[23]. 而二甲基异莰醇(MIB)则有 10 座水库超过其嗅阈值 10 ng·L^{-1}，其中塔山、龙王山、二圣和句容水库表、中、底 3 层均超标；北山、赵村和横山有一层超标，但平均值并未超标；化农水库、大溪水库一层超标，平均值亦超标(图 4). 此外，仅塔山和龙王山水库检出 β-紫罗兰

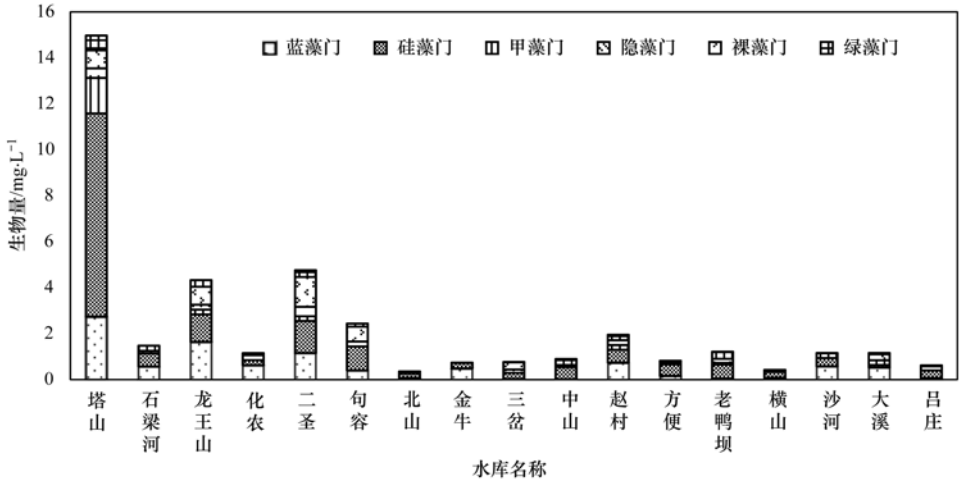

图 3 江苏水库浮游植物组成及生物量

Fig. 3 Composition and biomass of phytoplankton in Jiangsu reservoirs

表 3 江苏水库蓝藻硅藻各属优势度[1)]

Table 3 Dominance (Y) of different genera in Cyanophyta and Bacillariophyta in Jiangsu reservoirs

水库名称	蓝藻门							硅藻门				
	微囊藻	鱼腥藻	平列藻	束丝藻	席藻	颤藻	尖头藻	小环藻	针杆藻	颗粒直链藻	双菱藻	曲壳藻
塔山	−	−	−	+	+	+	−	−	+	+ + +	+	−
石梁河	−	−	−	+	+	+ +	+	+	+	+ + +	−	−
龙王山	−	−	−	+ +	+ +	+ +	−	−	+ +	+ +	−	−
化农	−	−	−	+ +	+ +	+ +	+	−	+ +	−	−	−
二圣	+	−	−	+ +	+	+	−	+	+ +	+	−	−
句容	−	−	−	+	+	+	−	−	+	+ + +	−	−
北山	−	−	−	+ +	+ +	−	−	−	+ + +	+ + +	−	−
金牛	−	−	−	+ +	+ + +	+	−	−	+	+ + +	−	−
三岔	−	−	−	−	+	−	−	+	+	+ + +	−	−
中山	−	−	−	−	−	−	−	+	+	+ + +	−	−
赵村	−	−	−	+ + +	+	−	−	−	+ +	+	−	+
方便	−	−	−	+	−	+ +	−	+	+	+ + +	−	−
老鸭坝	+	−	−	−	−	−	−	−	+	+ + +	−	−
横山	−	−	−	+	+	−	+	−	+ + +	+ + +	−	−
沙河	−	−	−	+ + +	+ +	−	−	−	+	+ +	−	+
大溪	−	−	+	+ + +	+	+	−	−	+	−	−	−
吕庄	−	−	−	−	−	+ +	−	+	−	+ + +	−	−

1)“ − ”: $Y<0.02$; “ + ”: $0.02\leqslant Y<0.1$; “ + + ”: $0.1\leqslant Y<0.2$; “ + + + ”: $Y\geqslant 0.2$

酮(β-ionone), 平均浓度分别为 0.46 ng·L^{-1}和 0.34 ng·L^{-1}; β-环柠檬醛(β-cyclocitral)各水库均未检出.

由此可见, 影响江苏水库水质的主要异味物质是 2-甲基异莰醇(MIB), 并且呈现苏北苏中水库高于苏南的现象, 值得关注; 少数水库检出土臭素(GSM), 但浓度较低. 虽然 MIB 和 GSM 在湖泊水体中也比较常见, 但是湖泊异味物质中往往会伴随着较高浓度的甲硫醚(DMS)、β-紫罗兰酮和 β-环柠檬醛[11,13], 因此在分析和治理水库异味问题时不能与湖泊一概而论.

3 讨论

3.1 异味物质影响因素

为了探究异味物质 MIB 和 GSM 浓度的影响因素, 对 17 个水源地型水库表、中、底 3 层 MIB、GSM 平均浓度与水质指标(TN、TP、NH_4^+-N、COD、CHL、SD、SS 和 TLI)、生物指标(浮游植物总生物量 BM、蓝藻生物量 BM_c、硅藻生物量 BM_b 和浮游动物总生物量 BM_z)分别作了相关性分析(表 4). 由表 4 可见, 异味物质 MIB 的浓度与 SD、TLI 和 BM_c 具有显著相关性, 与 CHL、SS 具有极显著相关性. GSM 浓度与 CHL、BM、BM_c 和 BM_b 具有极显著相关性, 这与 MIB 基本相同. 图 5 展示了 CHL、SS、SD、TLI 和 BM_c 与 MIB 的关系, 可以看出本次被调查水库水体异味物质 MIB 的浓度与 CHL、SS、TLI 和 BM_c 呈正相关, 与 SD 呈负相关, 与 CHL 相关性最好($R^2=0.56$), 相关性最差的是 TLI 和 BM_c ($R^2=0.32$).

本次被调查水库水体中 MIB 的浓度主要与水

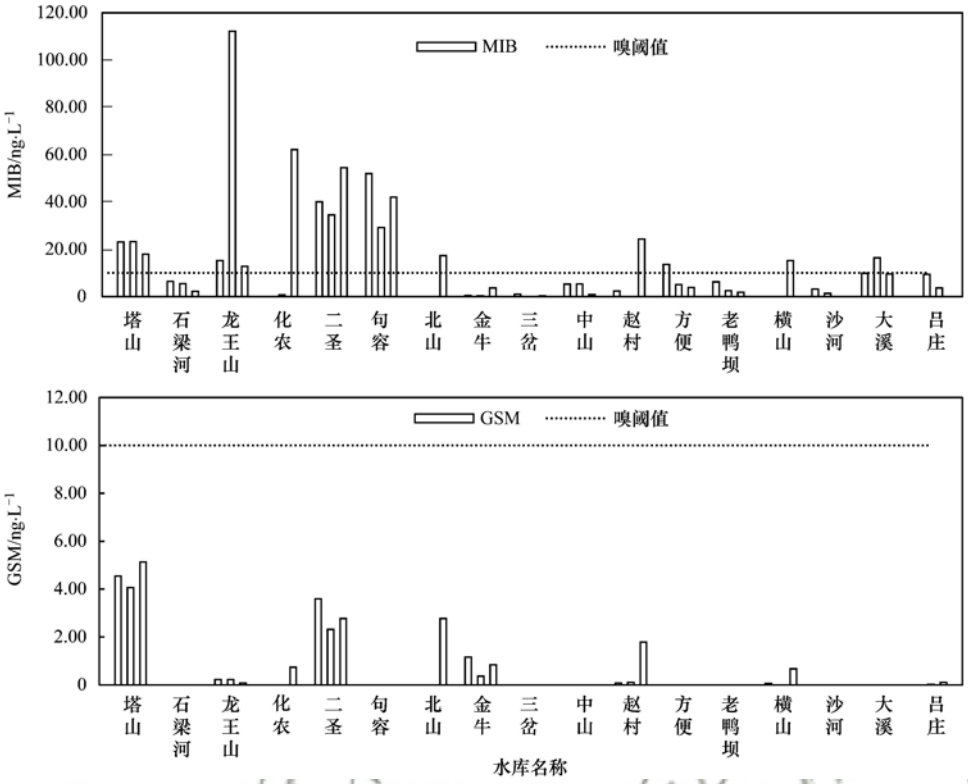

图 4　调查水库中 MIB 和 GSM 浓度

Fig. 4　Concentration of MIB and GSM in Jiangsu reservoirs

表 4　异味物质和水质生物指标的 Pearson 相关性[1)]

Table 4　Pearson correlation of odor compounds and water quality, and biological indicators

因子	TN	TP	NH_4^+-N	COD	CHL	SD	SS	TLI	BM	BM_c	BM_b	BM_z
MIB	−0.14	0.29	−0.26	0.45	0.75**	0.57*	0.63**	0.57*	0.44	0.56*	0.27	0.36
GSM	−0.08	0.2	−0.04	0.27	0.63**	−0.23	−0.15	0.36	0.88**	0.79**	0.85**	0.22

1) * 表示显著相关($P < 0.05$)；* * 表示极显著相关($P < 0.01$)

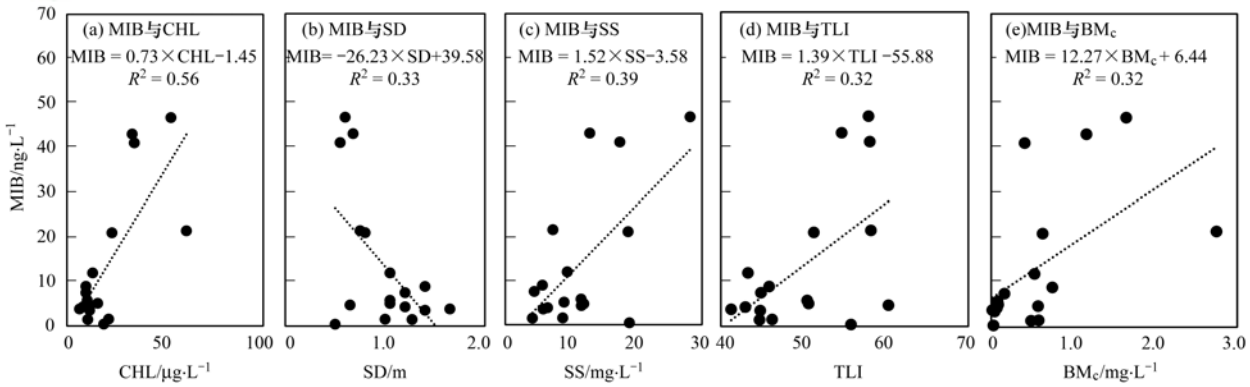

图 5　MIB 浓度与各因子的关系

Fig. 5　Relationship of MIB and related factors

质指标(CHL、SD、SS 和 TLI)和蓝藻生物量(BM_c)有关，这表明营养盐进入水库水体后，导致藻类异常增殖(特别是蓝藻)，引发一系列富营养化问题(透明度降低、悬浮颗粒物增加)，并最终诱发水体中 MIB 浓度升高，异味物质产生的机制与湖泊大体上类似[24,25]. 由此可见，虽然水库异味物质种类、浓度上与天然湖泊有所差异，但是产生的机制几乎相同.

3.2　异味物质发生风险预测

本次采样选在 8 月异味风险高危期，主要是消除低温的限制作用，但是不能忽略水温对异味物质的影响[26,27]. 有研究表明，异味情况在 4 月开始发生，MIB 和 GSM 浓度开始升高，7、8 月到达峰值[28]，因此在夏季高温期间更加应该注意异味物

质的发生风险. 此外, 降雨和异味物质之间有着明显的负相关[29], 低降雨量会显著增加水库水力停留时间, 进一步增加了藻类的富集(特别是蓝藻), 藻类代谢以及死亡往往会产生较大浓度的异味物质. 基于此, 可以得出一个初步结论, 在夏季高温少雨的情况下, 更加应该注意异味物质的发生风险.

由表4及图6可知, 异味物质浓度与几项基本水质指标以及浮游植物生物量具有较为显著的相关性. 有研究指出 TN/TP 会影响异味物质的浓度[14], 对本次被调查水库 TN/TP 与异味物质 MIB 浓度分析发现[图6(a)], TN/TP 与异味物质浓度有较好的负相关($R^2 = 0.38$). 这主要是因为低 TN/TP 有助于蓝藻的固氮作用, 而本次调查的水库蓝藻优势属是束丝藻这样的固氮藻类, 在一定程度上会导致蓝藻生物量增高, 并进一步影响异味物质. 前人研究表明, 异味物质 MIB 受颤藻影响较大, 而 GSM 受鱼腥藻和伪鱼腥藻影响[28], 本次被调查的17个水库仅塔山、二圣、金牛和中山观察到鱼腥藻, 其中除中山水库鱼腥藻生物量极低(仅0.005 4 mg·L^{-1})未检出 GSM 外, 其余3个水库均检出; 而 MIB 与颤藻生物量也有较好的相关性[图6(b)]. 由此可见, 对 TN/TP 以及蓝藻优势属的监测可以有效的预测异味物质的种类和风险.

3.3 异味物质风险应对措施

3.3.1 控制营养盐的输入

通过对17个水源地型水库采样分析可知, 被调查水库存在的主要风险是水体富营养化导致藻类异常增殖, 进而产生异味物质. 对17个水库浮游生物的研究发现, 水体中浮游动物生物量(BM_z)变化与浮游植物生物量(BM)基本一致(图7), 即浮游植物生物量高的水库浮游动物生物量也高, 这表明

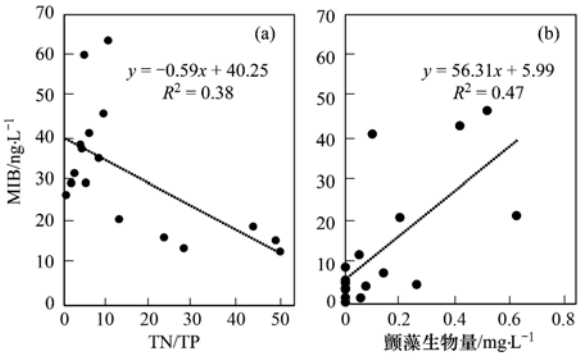

图6 异味浓度与 TN/TP 及颤藻的关系

Fig. 6 Relationship of odor concentration, TN/TP, and *Oscillatoria*

水库中浮游动物对浮游植物生物量的控制作用有限, 食物链的下行效应不强, 控制水体营养盐浓度的上行效应措施是藻类生物量控制的关键. 由此可见, 应对水库水质风险的关键在于控制营养盐的输入.

在采样调查中发现, 被调查水库周边基本上没有大型的工业和农业活动, 营养盐的输入主要是生活污水和渔业养殖. 苏北和苏中水库人类活动较苏南水库明显更多, 如塔山水库周边大力开发了旅游业和渔业养殖; 石梁河水库在采样期间有大量的采砂船在采砂; 龙王山和化农水库渔业活动十分频繁. 相较来说, 苏南水库周边人类活动较少, 水质状况也相对较好. 由此可见, 控制营养盐的输入关键在于科学规范地管理水库周边的各种人类活动.

3.3.2 对流域植被的保护

在对17个水库采样过程中发现, 苏北水库流域植被覆盖率比苏南水库要低, 并且存在着由北向南递增的情况, 表明苏南水库流域植被的保护总体高于苏北和苏中地区. 对密云水库研究表明, 水库流域水源涵养林与降雨之间的淋溶、交换、吸附等过程对降雨具有净化作用[30], 这也从侧面解释了

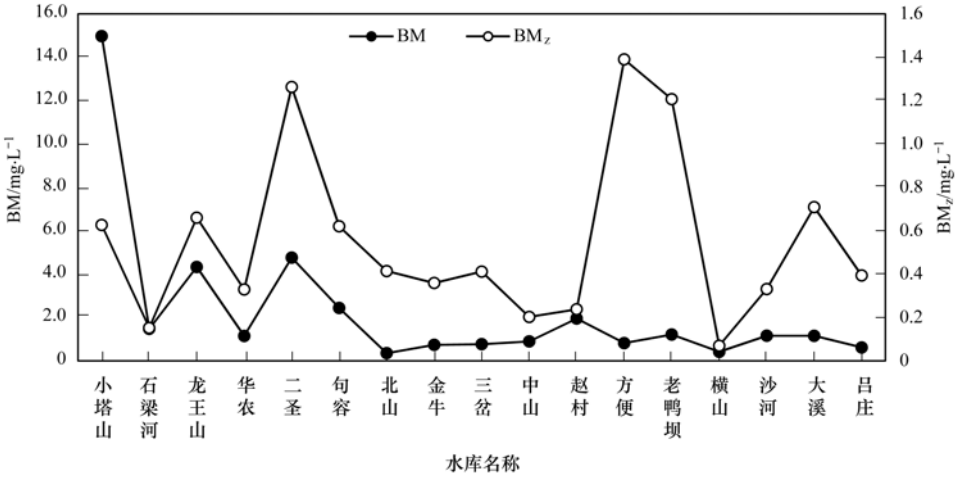

图7 江苏水库浮游植物与浮游动物生物量

Fig. 7 Phytoplankton and zooplankton biomasses in Jiangsu reservoirs

此次被调查的江苏省水库水质状况由北向南逐渐变好这一现象. 但是值得注意的是，果树和茶树等的种植虽然在一定时间会增加该流域的植被覆盖，但是过量施肥带来的面源污染以及降雨时大量氮磷的流失反而会增加水库氮磷等营养盐的浓度[31]. 注重流域生态系统整体的恢复，特别是禁止上游水源涵养区的开发，对水库整个流域的水质状况至关重要.

3.3.3　规范渔业管理

渔业养殖对水库水质状况有极为明显的影响，而水库水质状况直接影响水体异味程度. 刘建康先生等在对东湖的围隔实验中发现，鲢、鳙的大量放养可以有效地控制蓝藻(微囊藻)水华的发生[32,33]，水库亦是如此. 以天目湖沙河水库为例，由于旅游业的大力发展以及“沙河鱼头”的开发，导致鳙鱼成为沙河水库养殖的主要鱼种，据统计，1997 ~ 2001 年鳙鱼的逐年放养量为 54.9%、70.4%、72.4%、85.1% 和 94.4%，严重破坏了沙河水库的生物群落结构和食物链，导致了浮游动物生物量降低，以及随之而来的水质的恶化和浮游植物生物量快速增加[34]；但是从 2006 年开始沙河水库开始调整和控制渔业养殖，将鲢鱼和鳙鱼的投放比例提高到 9∶1，并降低总的投放量，在一系列规范化的控制下，浮游植物生物量得到了很好的控制[35].

通过天目湖沙河水库的案例可以发现，水库不合理渔业养殖会大幅度破坏水体的生物群落结构，从而引起水质的恶化，但是在经过科学规范的渔业管理后，水库水质特别是浮游植物生物量会得到明显的改善，进而降低水体中的异味风险. 沙河水库的成功经验也为江苏省其他水库(特别是苏北苏中水库)提供一个经典的案例.

4　结论

(1)在夏季异味风险高危期对江苏省 17 个省级水源地型水库进行采样分析发现，被调查水库普遍存在着富营养化、藻类生物量偏高、透明度偏低等问题；并且有三分之一的水库异味物质 2-甲基异莰醇(MIB)浓度超过嗅阈值，而土臭素(GSM)浓度均未超标. 本研究发现，水库中异味物质种类和浓度上与湖泊有所差异.

(2)被调查水源地型水库中 MIB、GSM 浓度与富营养化指标(CHL、SD、SS、TLI)和蓝藻生物量(BM_c)有关，这表明对水库富营养化的控制能很大程度上能降低水体中的异味风险.

(3)在高温少雨的夏季，并且水库水体中氮磷比较低时，异味发生风险较高；此外对蓝藻不同优势属的监测也可以预测异味物质的种类.

(4)通过采样发现，在工业、农业活动影响较小的江苏水源地型水库，旅游业、渔业、种植业是影响水库水质的主要人类活动，科学规范地管理这些活动，是应对江苏省 17 个水源地型水库异味物质风险的重点.

致谢：水质分析由胡春华副研究员和叶小锐实验员协助完成，在此一并感谢！

参考文献：

[1] Yang X K, Lu X X. Drastic change in China's lakes and reservoirs over the past decades[J]. Scientific Reports, 2014, **4**: 6041.

[2] 李崇巍，胡婕，王飒，等. 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报，2012，**32**(8)：2430-2438.
Li C W, Hu J, Wang S, *et al*. The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(8): 2430-2438.

[3] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学，2010，**22**(2)：151-160.
Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(2): 151-160.

[4] Yang J, Yu X Q, Liu L M, *et al*. Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, **19**(5): 1432-1442.

[5] 蔡庆华，胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究[J]. 水生生物学报，2006，**30**(1)：7-11.

[6] 赵孟绪，韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报，2005，**25**(7)：1554-1560.
Zhao M X, Han B P. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(7): 1554-1560.

[7] 2017年《中国生态环境状况公报》(摘录二)[J]. 环境保护，2018，**46**(12)：67-74.

[8] Kehoe M J, Chun K P, Baulch H M. Who smells? Forecasting taste and odor in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(18): 10984-10992.

[9] Holtan H. The lake mjøsa story[J]. Archiv für Hydrobiologie Beiheft, 1979, **13**: 242-258.

[10] Persson P E. Off-flavours in aquatic ecosystems-an introduction [J]. Water Science and Technology, 1983, **15**(6-7): 1-11.

[11] 邓绪伟，陶敏，张路，等. 洞庭湖水体异味物质及其与藻类和水质的关系[J]. 环境科学研究，2013，**26**(1)：16-21.
Deng X W, Tao M, Zhang L, *et al*. Relationships between odors and algae and water quality in Dongting Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(1): 16-21.

[12] 李维唯，郭康宁，刘莉文，等. 若干水华相关藻类对太湖水体异味物质贡献的初步研究[J]. 湖泊科学，2018，**30**(4)：916-924.
Li W W, Guo K N, Liu L W, *et al*. Relationship of odor compounds to some algal strains associated with bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 916-924.

[13] 胡宇飞，余得昭，过龙根，等. 武汉东湖水体异味物质及其与水环境因子相互关系[J]. 湖泊科学，2017，**29**(1)：87-94.
Hu Y F, Yu D Z, Guo L G, *et al*. Relationships of water taste

and odor compounds and their related environmental factors in Lake Donghu, Wuhan[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(1): 87-94.

[14] Olsen B K, Chislock M F, Wilson A E. Eutrophication mediates a common off-flavor compound, 2-methylisoborneol, in a drinking water reservoir[J]. Water Research, 2016, **92**: 228-234.

[15] 万成炎, 吴晓辉, 朱爱民, 等. 江苏省大中型水库水质的理化特性及其渔业评价[J]. 水利渔业, 2003, **23**(1): 43-45, 62.

[16] 任杰, 周涛, 朱广伟, 等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1742-1753.
Ren J, Zhou T, Zhu G W, *et al*. Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the South of Jiangsu Province, China and its control factors [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1742-1753.

[17] Zhu G W, Cui Y, Han X X, *et al*. Response of phytoplankton to nutrient reduction in Shahe Reservoir, Taihu catchment, China [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2015, **30**(1): 41-58.

[18] 崔扬, 朱广伟, 李慧赟, 等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系[J]. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 10-18.
Cui Y, Zhu G W, Li H Y, *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe Reservoir within Tianmuhu Reservoir and its relationship with phytoplankton community[J]. Journal of Hydroecology, 2014, **35**(3): 10-18.

[19] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[20] 李勇, 张晓健, 陈超. 水中嗅味评价与致嗅物质检测技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(16): 1-6.
Li Y, Zhang X J, Chen C. Research progress in evaluation of tastes and odors compounds in water and their detection technology[J]. China Water & Wastewater, 2008, **24**(16): 1-6.

[21] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.
Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002, **18**(5): 47-49.

[22] 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.

[23] Deng X W, Liang G D, Chen J, *et al*. Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2011, **1218**(24): 3791-3798.

[24] Zaitlin B, Watson S B. Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: myths, tenets and truths[J]. Water Research, 2006, **40**(9): 1741-1753.

[25] Smith V H, Sieber-Denlinger J, Denoyelles F Jr, *et al*. Managing Taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir[J]. Lake and Reservoir Management, 2002, **18**(4): 319-323.

[26] Uwins H K, Teasdale P, Stratton H. A case study investigating the occurrence of Geosmin and 2-methylisoborneol (MIB) in the surface waters of the Hinze Dam, Gold Coast, Australia[J]. Water Science & Technology, 2007, **55**(5): 231-238.

[27] 周洋, 代嫣然, 钟非, 等. 合肥塘西河异味物质及异味影响因子研究[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 312-318.
Zhou Y, Dai Y R, Zhong F, *et al*. Odor compounds and the related impact factors in Tangxi River, Hefei[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 312-318.

[28] Li L, Wan N, Gan N Q, *et al*. Annual dynamics and origins of the odorous compounds in the pilot experimental area of Lake Dianchi, China[J]. Water Science & Technology, 2007, **55**(5): 43-50.

[29] Winston B, Hausmann S, Scott J T, *et al*. The influence of rainfall on taste and odor production in a south-central USA reservoir[J]. Freshwater Science, 2014, **33**(3): 755-764.

[30] 李文宇. 北京密云水库水源涵养林对水质的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.

[31] 李恒鹏, 朱广伟, 陈伟民, 等. 中国东南丘陵山区水质良好水库现状与天目湖保护实践[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 775-784.
Li H P, Zhu G W, Chen W M, *et al*. Current situation of good water quality reservoirs in hilly region of south-east China: protection practices of Tianmuhu Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 775-784.

[32] 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境, 1999, **8**(3): 312-319.
Liu J K, Xie P. Unraveling the enigma of the disappearance of water bloom from the East lake (Lake Donghu) of Wuhan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, **8**(3): 312-319.

[33] 刘建康, 谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J]. 生态科学, 2003, **22**(3): 193-198.
Liu J K, Xie P. Direct control of microcystis bloom through the use of planktivorous carp-closure experiments and lake fishery practice[J]. Ecologic Science, 2003, **22**(3): 193-198.

[34] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖水环境与渔业生产及旅游发展的关系[J]. 生态科学, 2003, **22**(3): 271-274.
Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, *et al*. Relation of water environment of Tianmuhu Lake and fishery and tourism[J]. Ecologic Science, 2003, **22**(3): 271-274.

[35] 朱广伟, 陈伟民, 李恒鹏, 等. 天目湖沙河水库水质对流域开发与保护的响应[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 809-817.
Zhu G W, Chen W M, Li H P, *et al*. Response of water quality to the catchment development and protection in Tianmuhu Reservoir, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 809-817.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2019

CONTENTS