

技术总结

## 阳澄湖水源地水质调查及微污染原因浅析

俞蕴芳<sup>1</sup>, 丁根宝<sup>1</sup>, 应琦琰<sup>2</sup>, 符策竿<sup>2</sup>, 关永年<sup>1</sup>, 刘玉红<sup>1</sup>, 刘洪波<sup>2</sup>

(1. 苏州工业园区清源华衍水务有限公司, 江苏 苏州 215021; 2. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 阳澄湖属于典型的淡水养殖水源,微污染问题长期存在,这对饮用水厂的水质安全存在威胁。因此,对阳澄湖开展微污染因子筛查十分必要。根据长期的水质数据,确定了基本微污染因子为高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总磷、总氮和氨氮,特征微污染因子为藻类、土臭素和2-甲基异莰醇(2-MIB)。另外,对水源地、周边水域及养殖区同步采样,利用德国BBE公司提供的三维荧光检测分析仪FluoSens进行腐殖质(HS)、生物聚合物和SAK<sub>255</sub>检测,结合藻类等其他常规指标,多层次分析发现养殖业带来的有机污染是主要污染源,且浓度水平较高;养殖区内富营养化程度也比周边水域高。微污染因子是动态变化的,缺乏预见性,因此微污染因子的确定势必是长期、细致和艰巨的工作。

**关键词:** 阳澄湖; 微污染; 淡水养殖水源; 因子筛查

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0035-08

## Water Quality Investigation and Micro-pollution Analysis of Yangcheng Lake Water Source

YU Yun-fang<sup>1</sup>, DING Gen-bao<sup>1</sup>, YING Qi-yan<sup>2</sup>, FU Ce-gan<sup>2</sup>, GUAN Yong-nian<sup>1</sup>,  
LIU Yu-hong<sup>1</sup>, LIU Hong-bo<sup>2</sup>

(1. Suzhou Industrial Park Qingyuan Hong Kong & China Water Co. Ltd., Suzhou 215021, China;  
2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Yangcheng Lake is a typical water source of freshwater aquaculture, and the micro-pollution problem exists for a long time, which has the potential hazard to water quality safety of drinking water plants. Therefore, it is necessary to screen the micro-polluted factors in Yangcheng Lake. According to analysis of long-term water quality data, the basic micro-polluted factors, including the permanganate index, total phosphorus, total nitrogen and ammonia nitrogen, were determined, and the characteristic micro-polluted factors were algae, geosmin and 2-methylisodecyl alcohol (2-MIB). Besides, simultaneous sampling of water source areas, surrounding water areas and culture areas was carried out. The humus (HS), biopolymer and SAK<sub>255</sub> were tested by using a three-dimensional

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21206092); 水处理技术研究以及相关领域虚拟合作平台创建协议资助项目(201608)

通信作者: 刘洪波 E-mail: liuhb@usst.edu.cn

fluorescence detection analyzer provided by BBE in Germany. Combined with other conventional items such as algae, it was found that organic pollution brought by aquaculture industry was the main pollution source and the concentration level was higher through multi-level analysis. The eutrophication level in the culture area was also higher than that of the surrounding water. The micro-polluted factors are dynamic and lack of predictability, so the determination of micro-polluted factors is bound to be a long-term, meticulous and arduous work.

**Key words:** Yangcheng Lake; micro-pollution; source of freshwater aquaculture; factors screening

饮用水水源地安全不仅关系到制水企业的安全生产和安全供水,更关乎人们的生命健康和社会稳定<sup>[1]</sup>。有效保护水资源是保证饮用水安全的最根本要素<sup>[2]</sup>。

阳澄湖地跨苏州市相城区、工业园区和昆山市,位于昆山市西北边缘,分为东湖、中湖和西湖,三湖之间由河港贯通而汇成一体。阳澄湖水厂建成于2014年7月,取水口位于重要水产养殖地——东湖,因此养殖引起的水质污染无法避免。阳澄湖作为典型的淡水养殖水源,其水质透明度低、浮游植物和藻类易繁殖和暴发,微污染水源特点尤为突出<sup>[3-6]</sup>。微污染水源水的污染指标以高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )和氨氮为主,具有有机物综合指标高、氨氮浓度高、嗅和味明显等特点。

实践证明,保证饮用水厂的安全运行,依赖于水源地的管理,重中之重是持续进行水源水质监控,筛查微污染因子,科学性、前瞻性、针对性地为日常生产形成预警,以利于及早采取应对措施<sup>[7]</sup>。具体而言,就是确定重要监控指标,保障一湖“好水”。笔者重点研究在有效管理机制保障下,制定水质调查方案,通过分析积累的水源水质数据,确定微污染因子,探讨原因,提出建议和应对措施,以期对动态管理阳澄湖水源地水质提供依据。

## 1 材料和方法

阳澄湖水厂投产运行后,通过每天原水监测、定期水源地污染调查、生产过程突发状况分析等手段,开展阳澄湖微污染因子筛查。

在阳澄湖进行定点采样,并分析检测的微污染因子。微污染因子筛查的污染调查点位方案包括重点监控取水口(一级保护区)、二级保护区、准保护区、养殖区和入湖河道。点位的确定方法主要包括:①实地踏勘、排查水流流向;②咨询水利、水文部门,获取参考资料;③定期结合“苏州市阳澄湖生态优

化行动断面水质状况通报”的反馈信息。目前环保部门和我司已确认有影响的入湖河道主要是山东港(系娄江水系)。

污染因子中的基本微污染因子,包括高锰酸盐指数、总磷、总氮、氨氮和铁;特征微污染因子,包括藻类、土臭素和2-甲基异莰醇(2-MIB)。本研究重点利用德国BBE公司提供的三维荧光检测分析仪FluoSens开展腐殖质(HS)、生物聚合物和SAK<sub>255</sub>的分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质调查和分析

#### 2.1.1 阳澄湖原水总体水质状况

根据2015年—2017年阳澄湖原水水质数据和水厂实际运行情况来看,阳澄湖水质不容乐观,养殖业水质特点明显,基本为Ⅲ类及Ⅲ类以下水质,如表1所示。

表1 阳澄湖原水水质情况

Tab.1 Quality of raw water in Yangcheng Lake

| 项 目        | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年上半年 |
|------------|--------|--------|-----------|
| Ⅲ类水质/次     | 127    | 61     | 7         |
| Ⅲ类水质占比/%   | 35.5   | 16.7   | 3.9       |
| Ⅲ类以下水质/次   | 230    | 305    | 174       |
| Ⅲ类以下水质占比/% | 64.2   | 83.3   | 96.1      |

#### 2.1.2 基本微污染因子

根据目前积累的水质资料,对出现过Ⅲ类以下的水质指标进行统计分析,结果见表2。可以看出, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TP、TN、氨氮是阳澄湖主要微污染因子。虽然氨氮超标率不高,但超标倍数不容小觑,且随季节变化明显,可对工艺运行中余氯的控制造成影响;尽管铁是地表水源地的补充项目,但无论超标率和超标倍数均显著,在实际生产中对感官指标造成了影响,因此应加以关注。其他特定水质指标基本小于标准限值,且保持平稳。

表2 2015年—2017年阳澄湖原水Ⅲ类水质以下指标和天数

Tab.2 Indicators and days of Yangcheng Lake under class Ⅲ water quality from 2015 to 2017

| 项 目               | Ⅲ类水质以下天数/d |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     | 累计超标<br>天数/d | 超标率/<br>% | 最大超标<br>倍数/倍 |
|-------------------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|--------------|-----------|--------------|
|                   | 1月         | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |              |           |              |
| COD <sub>Mn</sub> | 7          | 5  | 5  | 1  | 7  | 11 | 28 | 73 | 35 | 10  | 6   | 4   | 192          | 17.5      | 1.5          |
| TP                | 23         | 30 | 47 | 51 | 46 | 58 | 60 | 91 | 69 | 76  | 74  | 56  | 681          | 62.2      | 10.2         |
| TN                | 83         | 62 | 53 | 36 | 34 | 31 | 68 | 65 | 54 | 61  | 67  | 68  | 682          | 62.3      | 3.1          |
| 氨氮                | 0          | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 4  | 0  | 0   | 0   | 0   | 6            | 0.6       | 4.1          |
| 铁                 | 93         | 85 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 62 | 60 | 62  | 34  | 60  | 609          | 55.6      | 13.8         |

注: 铁是补充项目(不分类),因实际生产中出现过突发情况而列入表中统计。

图1为2015年—2018年5月阳澄湖取水口COD<sub>Mn</sub>、TN、TP和氨氮的月均值变化。从图1(a)可知,2015年—2017年COD<sub>Mn</sub>的变化趋势基本一致,无显著规律性。但相比于2015年和2016年,2017年1月—7月的COD<sub>Mn</sub>平均浓度均有大幅升高,且7月和8月的平均值超过7 mg/L,为Ⅳ类水质。

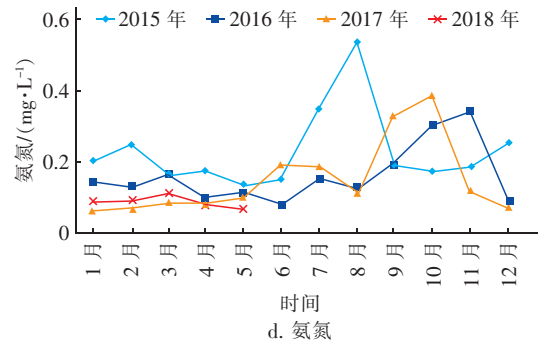
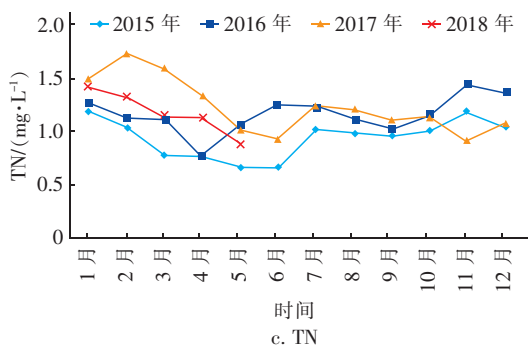
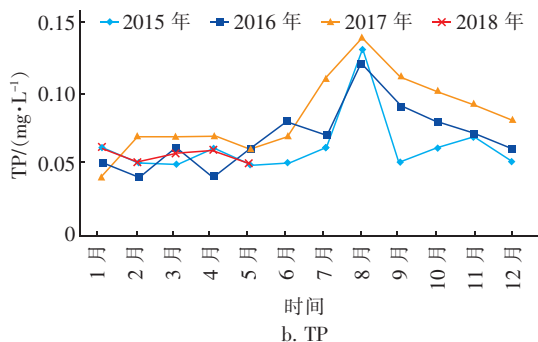
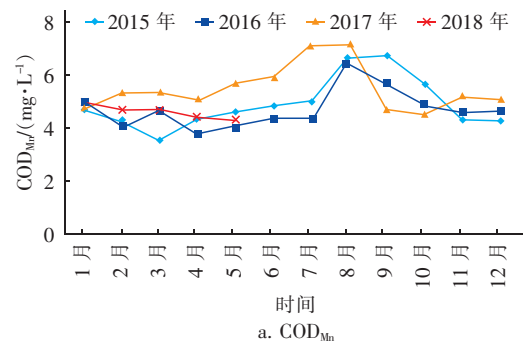


图1 2015年—2018年5月阳澄湖取水口COD<sub>Mn</sub>、TN、TP和氨氮的月均值变化

Fig.1 Change of monthly average values of COD<sub>Mn</sub>, TN, TP and ammonia nitrogen from 2015 to May 2018 in Yangcheng Lake intake

从图1(b)可以看出,2015年—2017年,TP的平均浓度变化无显著年度规律性,但2017年的最高;从每一年的变化趋势来看,一般1月—5月TP的变化趋势较平稳,从6月份开始逐渐升高,且在夏季高峰供水期达到最高,至9月份均回落。2017年TP平均浓度基本达到Ⅳ类水标准。

从图1(c)可以看出,每一年的TN平均浓度变化规律相似,但是平均浓度呈逐年升高趋势,春、夏季TN浓度较高,且春季之初浓度最高,春、夏交替期间TN浓度有所下降。2017年总氮平均值为Ⅳ类水质。

从图1(d)可以看出,仅管2015年7月—8月氨氮月平均浓度骤升,但平均氨氮浓度并不高。说明阳澄湖原水的氨氮浓度较小,尽管相对于2011年(0.1~0.2 mg/L)升高较大。这是由于出现氨氮升高的现象是突发性的,如2015年7月氨氮最高浓度接近1.5 mg/L,2016年8月最高浓度为4 mg/L,而当年的其他月份氨氮的最高浓度基本平稳。实践证明,氨氮异常会影响加氯消毒的稳定性,因此必须重

点关注该指标的变化。

图2为2015年—2017年阳澄湖取水口铁月均浓度的变化。可以看出,阳澄湖原水的铁浓度逐年升高,并无明显规律性。2016年8月至今,铁浓度均大于限值(0.3 mg/L),最高达3.42 mg/L。一般情况下8月份的铁平均浓度为当年最高值。水源地周边污染源调查显示,附近并无污染企业,原因有待进一步分析。

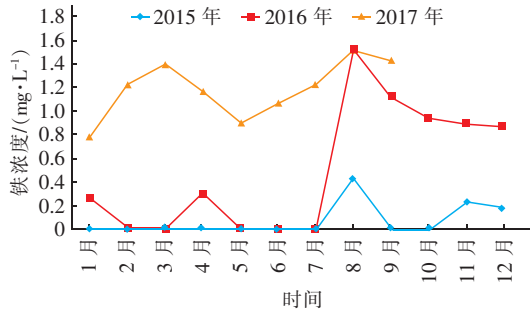


图2 2015年—2017年阳澄湖取水口铁月均浓度的变化

Fig. 2 Change of iron concentration from 2015 to 2017 in Yangcheng Lake intake

### 2.1.3 特征微污染因子

阳澄湖作为内陆湖和典型的水产养殖场,面临的主要污染物包括:有机污染物、藻类及其代谢产物、氨氮等<sup>[8]</sup>。

根据阳澄湖淡水养殖特点以及水厂实际工艺运行中出现过的异常情况,选择藻类、土臭素、2-甲基异莰醇为特征微污染因子,它们是影响工艺参数调整、净水水质感官性状恶化和消毒副产物可能超标的最直接因素。

图3为2015年—2018年5月阳澄湖取水口藻类、土臭素、2-MIB的月均值变化。从图3(a)可知,每年藻类的月均值变化趋势具有相似性,从每年6月开始藻类数量逐渐升高,8月达到最高,然后开始下降。随着水温升高,即夏季高峰供水期间,藻类浓度明显升高。特别是2017年8月,最高值和月均值均创新高,分别为 $6\,700 \times 10^4$ 和 $3\,000 \times 10^4$ 个/L。从图3(b)可以看出,土臭素变化规律基本与藻类相同,每年6月开始逐渐升高,特别在夏季高峰供水期间,同样在2017年攀升至有数据记录的最高值,8月份平均值已达到 $0.075 \mu\text{g/L}$ 。从图3(c)可以看出,2017年出现2-MIB峰值的时间与藻类、土臭素并不同步,其提前到了5月;2016年7月和8月由于藻类和土臭素浓度升高,2-MIB浓度较高。

2017年3月—5月的2-MIB月平均浓度比前两年均有大幅升高,且5月份2-MIB的平均浓度最大。可见,土臭素和2-MIB每年产生嗅味的时间和浓度都在变化。

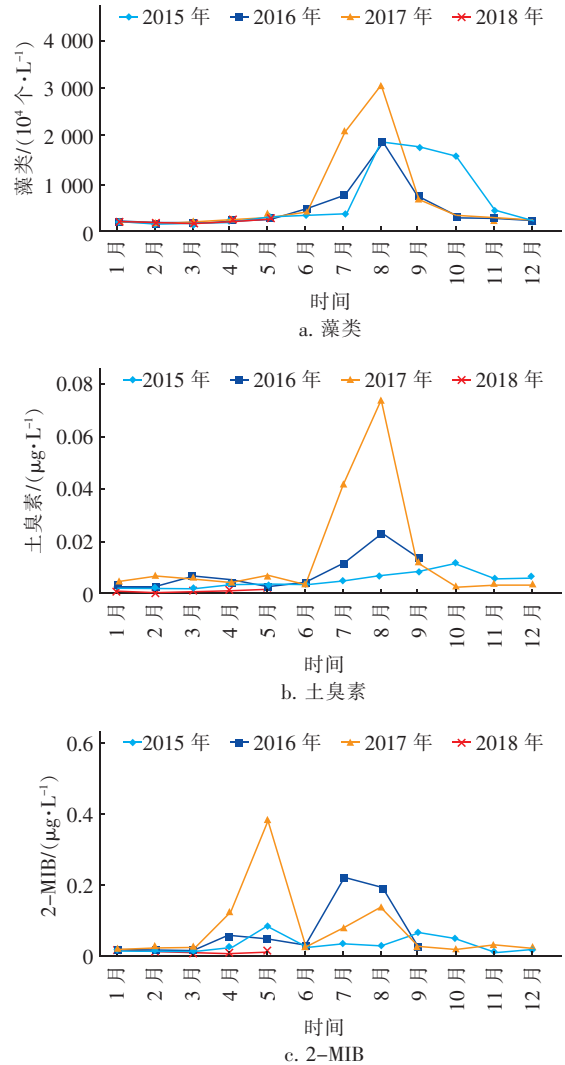


图3 2015年—2018年5月阳澄湖取水口藻类数量、土臭素和2-MIB的月均值变化

Fig. 3 Change of monthly average values of algae, geosmin and 2-MIB from 2015 to May 2018 in Yangcheng Lake intake

### 2.1.4 阳澄湖水体微污染现状分析

通过以上分析,对阳澄湖的原水水质总结如下:

①根据筛查结果,目前基本微污染因子包括 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、总磷、总氮和氨氮;特征微污染因子包括藻类、土臭素和2-MIB。②因淡水养殖业的发展,使有机物污染成为了关键影响因素,目前阳澄湖水水质较2011年已发生明显的变化,并呈现恶化趋势,特别是湖泊富



营养化的主要指标总磷、总氮和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  等呈现逐年上升的态势。③微污染因子是动态变化的,无预见性和规律性,特别是特征微污染因子,例如从两嗅味物质的对比发现,每年产生嗅味的时间和浓度都在变化,2015年又出现过短时间的锑超标、氨氮和铁无规律性变化等。

## 2.2 原因浅析

作为典型的淡水养殖地,养殖投放的饲料主要为海产品,其可能残留在水体中,水产品排泄的大量粪便也会进入到水体中,且每年的6月—7月为饲料投放密集期,水体流动会对附近及周边水域产生影响<sup>[9]</sup>。

综上所述,多重因素导致了水体环境趋于复杂化,加剧了富营养化程度,引发了藻类过度生长,而藻类及其代谢物和养殖业特征污染物等内源污染则加剧了原水受污染的风险<sup>[10-12]</sup>。为了深入探究原因,从2017年5月开始,苏州工业园区清源华衍水务有限公司与德国尤里希研究中心环境分析化学研究所、德国BBE Moldaenke公司、上海理工大学共同开展了养殖区水质研究,除对氨氮、总磷、总氮、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、藻类等水质指标进行跟踪外,重点采用了德国BBE公司的FluoSens荧光检测进行数据分析。在确立一级保护区(位于阳澄东湖)采样点的基础上,扩展到二级保护区,并同步对阳澄东湖和中湖养殖区进行了调查(2017年6月7日—10月26日,每月1次)。

### 2.2.1 数据分析

#### ① 腐殖质

水体中腐殖质的分子结构大而且复杂,一般都带有羧基、酚基、酮基等活性基团,并不是单一有机化合物的混合物,其中腐殖酸和富里酸是水体腐殖质的主要组成部分。腐殖质是消毒过程中产生三氯甲烷类(THMs)物质的前驱物,也是加氯消毒过程中产生致嗅物质的根源。因此,研究腐殖质的变化规律,有利于预警消毒副产物超标<sup>[13]</sup>。本研究利用三维荧光检测分析仪FluoSens检测腐殖质的变化,结果如图4所示。从图4可以看出,腐殖质高发季节为温度较高的季节,特别是夏季。5月—9月,其呈高斯正态分布,且6月—7月较高。从图4(b)可以看出,东湖养殖区的腐殖质比中湖的高。除了9月份,东湖取水口的腐殖质浓度较高,应引起足够的关注。

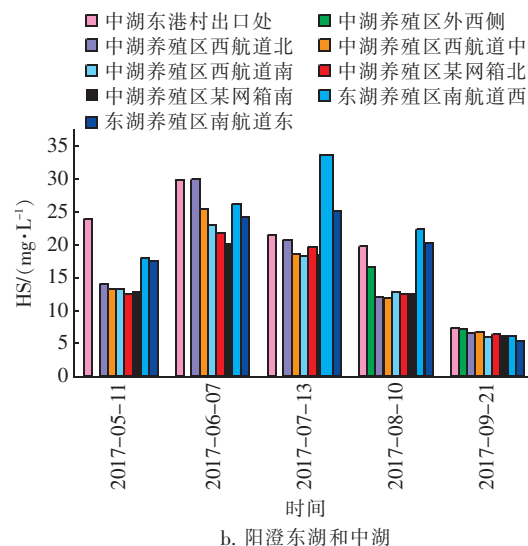
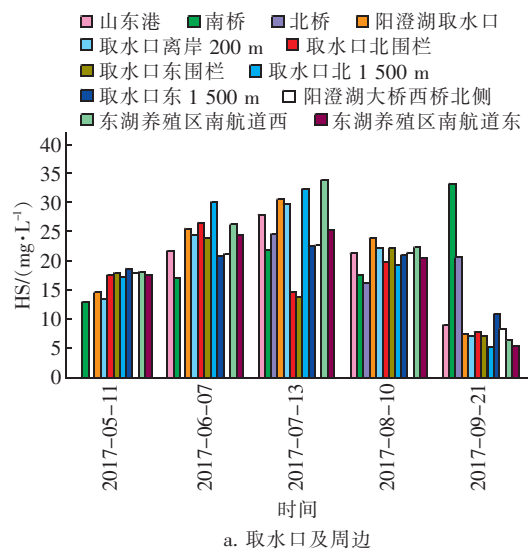


图4 阳澄湖取水口及周边腐殖质浓度的变化

Fig. 4 Change of humus concentration in water intake and surrounding area of Yangcheng Lake

#### ② 生物聚合物

生物聚合物主要是含有蛋白质、多肽和氨基酸等的一类有机物。三维荧光检测分析仪FluoSens检测生物聚合物的结果如图5所示。从图5可以看出,中湖的生物聚合物浓度普遍比东湖高,尤其在6月和7月投放饲料的高频次月份。同时,东湖养殖区的生物聚合物浓度比周边及紧邻水域的高,取水口也有较高的浓度。因此,除水产品自身排泄物外,人工水产养殖活动,特别是投放饲料(大都为海产品类)残留物都会使水源中生物聚合物浓度增加,影响原水水质。

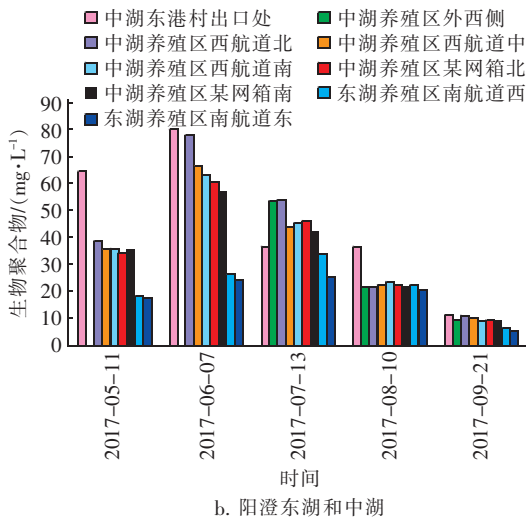
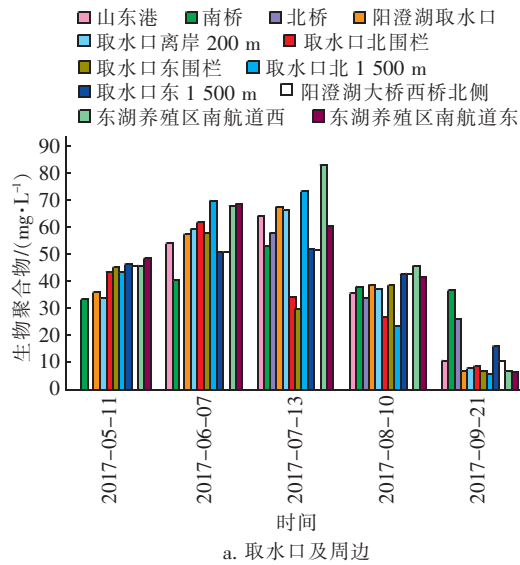


图5 阳澄湖取水口及周边生物聚合物浓度的变化

Fig. 5 Change of biopolymer concentration in water intake and surrounding area of Yangcheng Lake

### ③ SAK<sub>255</sub>

SAK<sub>255</sub>的检测原理类似于UV<sub>254</sub>,即对在特征波长为255 nm处具有一定荧光吸收强度的一类有机物进行分析的一种方法,可以从另一个角度了解水中含有的C=C和C=O这一类芳香族化合物的含量。因此,SAK<sub>255</sub>同样是客观反映和衡量水中某一类型有机物浓度指标高低的重要参数。三维荧光检测分析仪FluoSens检测SAK<sub>255</sub>的结果如图6所示。可以看出,SAK<sub>255</sub>养殖区采样点设置的关联度不大,但有季节因素的影响。一般取水口及邻近水域的SAK<sub>255</sub>荧光强度较高。因此,通过SAK<sub>255</sub>荧光强度和季节特点,并结合HS和生物聚合物的浓度

变化,便于在制水过程中利用前处理(如预臭氧投加)等手段来减轻后续工艺的负荷,对减少和避免消毒副产物的产生具有指导意义。

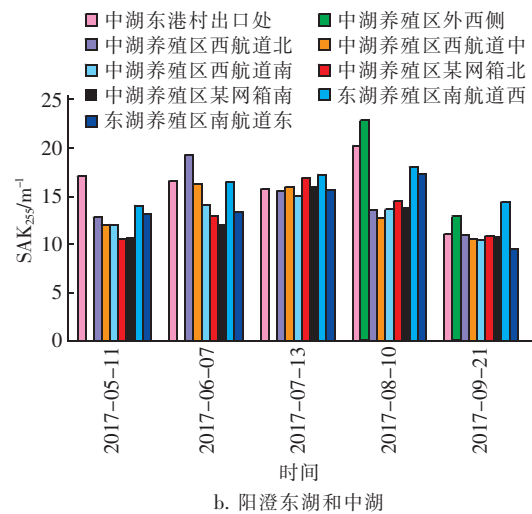
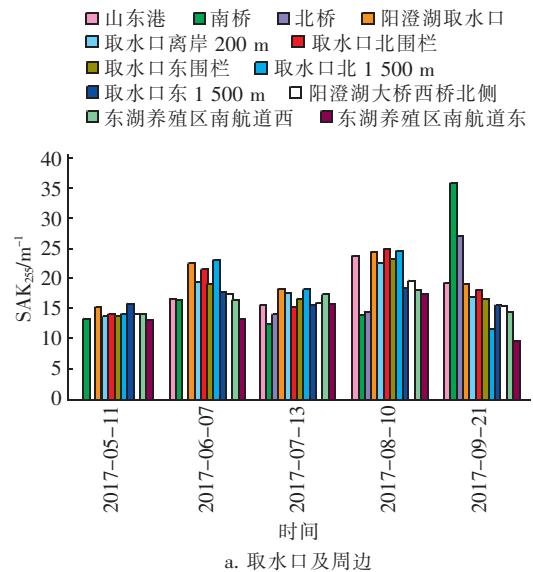


图6 阳澄湖取水口及周边生物SAK<sub>255</sub>荧光强度的变化

Fig. 6 Change of fluorescence intensity of SAK<sub>255</sub> in water intake and surrounding area of Yangcheng Lake

### 2.2.2 淡水养殖对水质影响的原因浅析

腐殖质、生物聚合物和SAK<sub>255</sub>均是致嗅物质和消毒副产物前体物。三维荧光检测结果显示,SAK<sub>255</sub>与养殖活动的关联性不大,但是养殖区的腐殖质和生物聚合物的浓度较高,且东湖比中湖高,呈季节性变化,这对取水口位于东湖的阳澄湖水厂的运行产生了风险。

东湖和中湖的COD<sub>Mn</sub>浓度普遍较高,且受季节的影响较大。在6月—7月养殖区饲料投放高峰

期,取水口的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较高,充分说明人工养殖活动对水质造成了影响。

氨氮的变化与养殖活动关联性不大(偶发极端值除外),基本保持正常水平,一般8月—9月的浓度较高。

总磷和总氮季节性变化较大,东湖和中湖的浓度均较高。这是由于该两湖水产养殖密集,饲料残留多,因此富营养化程度高。

藻类高发于7月—8月,且中湖普遍较高,东湖在8月份达到高峰,养殖区均比非养殖区的高。位于东湖取水口的藻类数量相对较低,这与取水口一级保护区围栏采取挂网拦藻等物理手段密不可分,凸显了加强日常水源地管理的重要性。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

对阳澄湖水质进行调查分析,可为水厂的安全生产提供技术保障,使水厂及时采取前置应急处置方法,更重要的是提升水质预测预警水平。通过长期的水质数据分析,确定了高锰酸盐指数、总磷、总氮和氨氮为阳澄湖基本微污染因子,藻类、土臭素和2-MIB为特征微污染因子。同时对水源地、周边水域及养殖区同步采样检测了腐殖质、生物聚合物和 $\text{SAK}_{255}$ 等水质指标,并结合藻类等其他常规指标分析水质。多层次分析发现,人工养殖业带来的有机污染是主要的污染源,且浓度水平较高,使得近年阳澄湖水质呈恶化趋势,养殖区内富营养化程度比周边水域高。微污染因子的检测对水厂的运行至关重要,因其无预见性和规律性,因此需要长期、细致、艰巨地开展工作。

#### 3.2 建议

地表水源是复杂的综合体,特别是阳澄湖水质既有养殖业的特点,又具有浅水位的特殊性,既有点污染,又有面污染和外来因素的影响。因此,在分析原水水质影响时,不能孤立地从单方面、单个指标来衡量,而应探寻各类指标的关联性,并结合历年积累数据从水文和自然条件的变化、养殖业和其他人类活动规模与范围等多层面进行客观、综合的评价。这既是技术问题,也是管理问题,更是政府与企业互助互通、信息共享、有效联动的全方位保障体系。

① 在技术层面,有待进一步深入和持续进行上述研究,密切关注HS、生物聚合物和藻类等的季节性变化,随时掌握水产养殖动态。

② 制定合理的消毒方法,在防范臭味物质超标的同时,削减消毒副产物的产生。只有掌握这些物质的变化规律和内在联系,才能更好地进行水源水质的管理和预警,科学合理地调整制水工艺参数。

③ 政府部门应合理规划养殖水域和养殖规模,引导水产养殖户合理使用饲料,避免过度养殖和滥用防病害药物。

④ 进一步健全水质监测预警系统,从实验室检测、在线监测和移动监测等全方位、连续水质监测与分析中,精准定位污染物情况、水质变化趋向,为水厂制定有效应急措施提供依据,也为水源地原位净化技术的实施提供决策依据。

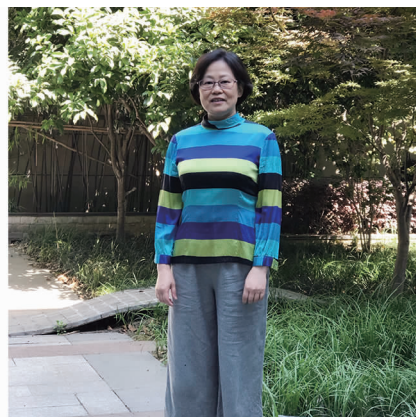
⑤ 加强与政府部门沟通,建立政府层面的环保、水利、水文、海事、渔政等相关部门的信息共享平台,完善水质、水文等信息共享机制,发挥各自所长,共同保障供水安全。

⑥ 加强水源地维保单位管理,切实做好巡查、打捞水草、清淤、维护等管理工作,完善政府监管职能,使供水安全、经济发展、生态保护共赢互惠。

#### 参考文献:

- [1] 朱党生,张建永,程红光,等. 城市饮用水水源地安全评价(I):评价指标和方法[J]. 水利学报,2010,41(7):778-785.  
Zhu Dangsheng, Zhang Jianyong, Cheng Hongguang, et al. Security assessment of urban drinking water sources I: Indicators system and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 778-785 (in Chinese).
- [2] 颜世杰,梅亚东,张文杰. 我国饮用水水源地保护存在的主要问题及其研究展望[J]. 江西水利科技, 2011,37(2):79-82,90.  
Yan Shijie, Mei Yadong, Zhang Wenjie. The main problems and prospects of drinking water source protection in China[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2011, 37(2): 79-82, 90 (in Chinese).
- [3] 桂智凡,薛滨,姚书春,等. 阳澄湖水质现状及原因探讨[J]. 地理科学,2011,31(12):1487-1492.  
Gui Zhifan, Xue Bin, Yao Shuchun, et al. Water quality status and influencing factors of Yangcheng Lake, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(12): 1487-1492 (in Chinese).
- [4] 黄龙,焦锋. 阳澄湖水源地健康风险评价及污染源分析[J]. 环境科学与管理,2010,35(6):190-194.

- Huang Long, Jiao Feng. Health risk assessment and sources analysis of Yangcheng Lake water resources[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(6): 190-194 (in Chinese).
- [5] 刘洋, 姚敏, 辛玉婷, 等. 阳澄湖水污染成因分析及整治对策研究[J]. 污染防治技术, 2014, 27(4): 55-59.
- Liu Yang, Yao Min, Xin Yuting, *et al.* Study on the causes and comprehensive improvement counter measures of Yangcheng Lake pollution[J]. Pollution Control Technology, 2014, 27(4): 55-59 (in Chinese).
- [6] 杨积德, 沈桢, 陈美丹, 等. 阳澄湖水环境综合整治对策研究与分析[J]. 中国给水排水, 2010, 26(6): 6-10.
- Yang Jide, Shen Zhen, Chen Meidan, *et al.* Research on comprehensive improvement countermeasures of Yangcheng Lake water environment[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(6): 6-10 (in Chinese).
- [7] 黄斌, 施周, 俞贤毅, 等. 微污染原水水质变化预警指标的选择[J]. 水处理技术, 2015, 41(11): 47-49.
- Huang Bin, Shi Zhou, Yu Xianyi, *et al.* The selection of early warning indexes for the changes of slightly polluted water quality[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 47-49 (in Chinese).
- [8] 蔡继晗, 李凯, 郑向勇, 等. 水产养殖对环境的影响及其防治对策分析[J]. 水产养殖, 2010, 31(5): 32-38.
- Cai Jihan, Li Kai, Zheng Xiangyong, *et al.* The influences of aquaculture on environment and the prevention strategy analysis[J]. Journal of Aquaculture, 2010, 31(5): 32-38 (in Chinese).
- [9] Auffret M, Yergeau E, Pilote A, *et al.* Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavours in recirculating aquaculture systems[J]. FEMS Microbiol Ecol, 2013, 84(2): 235-247.
- [10] Cai C F, Gu X H, Ye Y T, *et al.* Assessment of pollutant loads discharged from aquaculture ponds around Taihu Lake, China[J]. Aquaculture Research, 2013, 44(5): 795-806.
- [11] 吕哲, 倪志凡, 肖德茂, 等. 生态坝对阳澄湖养殖水体的原位修复研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1): 22-26.
- Lu Zhe, Ni Zhifan, Xiao Demao, *et al.* In-situ remediation of polluted aquaculture water in Yangcheng Lake by ecological dam [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1): 22-26 (in Chinese).
- [12] 倪志凡, 黎岭芳, 陆嘉麒, 等. 生态坝微生物与水生植物的水质净化机制研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5): 32-37.
- Ni Zhifan, Li Lingfang, Lu Jiaqi, *et al.* Mechanism of water quality purification by microorganisms and of aquatic plant in eco-dam [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 32-37 (in Chinese).
- [13] 郝晓地, 周鹏, 曹亚莉. 污水处理中腐殖质的来源及其演变过程[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 1-11.
- Hao Xiaodi, Zhou Peng, Cao Yali. Origins and evolution processes of humic substances in wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 1-11 (in Chinese).



作者简介: 俞蕴芳(1967-), 女, 江苏苏州人, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为环境监测和污水处理技术。

E-mail: yuyf@sz-hkew.com

收稿日期: 2019-02-11