

技术总结

# 泉州某水库水质季节变化原因及对策探究

赵 雷, 廖晓斌, 周真明, 李 飞

(华侨大学土木工程学院 市政与环境工程研究所, 福建 厦门 361021)

**摘 要:** 对泉州某水库水质的多项指标(水温、pH值、DO、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP、铁、锰)进行为期一年的监测,分析主要水质指标随季节的变化规律。结果表明,该水库水质总体良好,符合Ⅰ、Ⅱ类地表水水质标准,但某些指标超出Ⅲ类地表水水质标准;该水库水质指标随季节波动明显,夏季水体中氨氮、TN、TP浓度显著增加,且出现铁、锰污染问题。该水库水温与pH值无明显关系,DO含量与水温呈显著负相关。该水库TN含量较高,TP浓度相对较低,TN/TP值为14~540。总磷是限制该水库藻类生长的营养源,需控制好总磷浓度以防止富营养化。内源污染是该水库水质季节变化的首要原因。

**关键词:** 水库水质; 季节性变化; 内源污染

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0036-07

## Seasonal Changes of Water Quality of a Reservoir in Quanzhou City and Countermeasures

ZHAO Lei, LIAO Xiao-bin, ZHOU Zhen-ming, LI Fei

(Institute of Municipal and Environmental Engineering, College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Multiple indicators (temperature, pH, DO, COD<sub>Mn</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, TP, Fe and Mn) were selected to characterize the seasonality in the water quality of a reservoir in Quanzhou City over a year. The results showed that the water quality of the reservoir was good, and most of the indicators had met class I or II specified in the *Environmental Quality Standards for Surface Water*. However, some indicators exceeded class III limits. The water quality indicators varied significantly with seasons. In summer, the concentration of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP greatly increased, and Fe and Mn pollutions were identified. There was insignificant correlation between water temperature and pH, but DO demonstrated a significant negative correlation with water temperature. The reservoir had high concentration of TN and low concentration of TP. The ratio of TN/TP was in range of 14-540. TP was the nutrition restriction for the growth of algae and needed to be controlled to prevent eutrophication. The endogenous pollution caused by reservoir sediments was the main cause for the seasonal changes of water quality.

**Key words:** reservoir water quality; seasonal change; endogenous pollution

基金项目: 国家自然科学基金资助青年项目(51508209); 华侨大学培育型青年科技创新人才项目(ZQN-PY413); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划项目

通信作者: 廖晓斌 E-mail: liaoxb@hqu.edu.cn

水库是半河、半湖的人工水体,但由于其水体置换时间相对较长,生产力低于天然湖泊,易发生富营养化<sup>[1]</sup>。很多水库不仅是城市集中供水的重要水源地,也能起到灌溉、防洪抗旱、发电的作用<sup>[1-2]</sup>。某水库地处福建省东南部,总库容为  $6.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,调节库容为  $4.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,水库正常蓄水位为 96.48 m,相应库容为  $4.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,水面面积为 23.75  $\text{km}^2$ ,常年平均水深在 40 m 左右,是一个以灌溉为主,兼防洪、发电的大型水利工程,同时也是所处地区自来水厂水源。水厂供水能力为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,供水范围为 55  $\text{km}^2$ ,用水人口为 38 万人。随着该流域经济迅速发展,水库面临着水质污染及富营养化等问题。为了确保水库供水区域内的饮用水安全与水资源的可持续性开发利用,急需掌握该水库水质的季节性变化规律。水源水质影响后续净水厂处理工艺效果,比如絮凝沉淀、消毒等<sup>[3-5]</sup>,了解水质变化便于采取相应的应对措施。为此,笔者从水温、pH 值、溶解氧(DO)、浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、总氮(TN)、氨氮、总磷(TP)、铁和锰等方面对该水库水质进行了为期一年的监测,主要分析水库水质季节性变化规律,旨在为以该水库为水源的水厂提出应对原水水质季节变化的对策。

## 1 试验材料与方法

由于水库存在严重的热分层现象(夏季某次取样监测发现水面至水下 16 m;温度由 32  $^{\circ}\text{C}$  下降至 23.6  $^{\circ}\text{C}$ ,pH 值由 8.7 降至 7.0,DO 浓度由 8.0  $\text{mg/L}$  降至 0.26  $\text{mg/L}$ , $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度在 1.56 ~ 1.85  $\text{mg/L}$  之间波动,氨氮由零升至 0.45  $\text{mg/L}$ ,铁、锰由零分别升至 0.35、0.38  $\text{mg/L}$ ),本研究采样点设置在净水厂取水口处,采样深度距离水面 12 m,取样频率除突发状况外基本为每天 1 次,叶绿素 a 检测为每月 1 次,严格按照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)中的要求采样,且所取水样基本能反映水库水质状况及污染特征。水温、DO、pH 值及浊度现场测定,其余水质指标取水样回实验室测定。

水温和 DO:HQ30d 型便携式溶解氧测定仪;pH 值:STARTER3100 型便携式 pH 计;铁、锰离子:SpectrAA-220FS 型原子吸收光谱仪; $\text{COD}_{\text{Mn}}$ :库仑法;总氮:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;氨氮:纳氏试剂分光光度法;总磷:过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法。试验所用药品均采购于国药集团化学试剂有限公司。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质指标季节性变化

#### 2.1.1 水温、pH 值与溶解氧

该水库水温与溶解氧有很好的相关性,水温越高,DO 浓度越低;水温与 pH 值无明显直接关系。该水库最高水温为 31.6  $^{\circ}\text{C}$ ,最低水温为 8.6  $^{\circ}\text{C}$ 。DO 浓度波动范围较大,为 2.17 ~ 11.98  $\text{mg/L}$ ,平均为 9.5  $\text{mg/L}$ ,与温度呈负相关。pH 值在 6.16 ~ 9.8 范围内波动,最高 pH 值出现在春季。

冬季向春季过渡时(2 月—3 月),一方面,水温升高,改变水体酸碱平衡,水中溶解的  $\text{CO}_2$  逸出,pH 值升高;另一方面,水中微生物及藻类代谢加快,导致水体 pH 值逐渐回升。春季到夏季水温持续增高(5 月中旬—7 月底),温跃层阻止 DO 的扩散而形成厌氧环境,厌氧细菌活跃,分解有机物产生了大量有机酸<sup>[6]</sup>,导致 pH 值逐渐下降,而此时水中的 DO 浓度也逐渐降低。秋季降雨多,导致水体 pH 值降低,雨天比晴天气压低,导致 DO 浓度变大。秋季向冬季过渡时(11 月—12 月),温度逐渐降低,气压逐渐变大,生物消耗溶解氧量下降,溶解氧浓度增大,水中溶解的  $\text{CO}_2$  气体多,藻类代谢缓慢,对  $\text{CO}_2$  的消耗量少,但这种变化导致 pH 值的降低有限。

#### 2.1.2 浊度

浊度是影响混凝的重要因素之一<sup>[7]</sup>。该水库水的浊度季节性变化规律如图 1 所示。

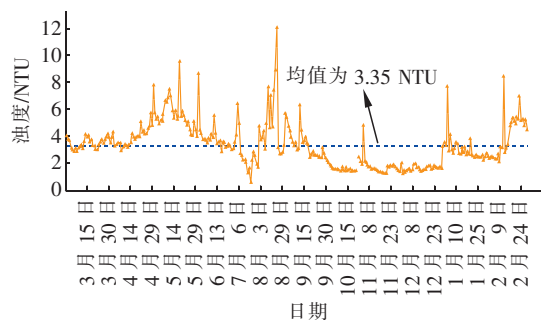


图1 水库水浊度的季节性变化

Fig.1 Seasonal change of turbidity of reservoir water

水库水的浊度在 0.35 ~ 12.1 NTU 之间,冬季浊度普遍较低且稳定,而春季开始逐渐变大并出现突变。冬季(12 月—次年 1 月),水温低,微生物藻类代谢极低,代谢产物少;降雨量少,面源污染少;水温低,底泥释放溶解性有机物少,水体纵面交换缓慢,造成水体浊度低<sup>[8]</sup>。春季降雨多,面源污染大,水库水的浊度增加。春季到夏季时(5 月—7 月),

降雨少,面源污染少,故而浊度降低。夏季到秋季时(7月—9月),温度较高,微生物和藻类的代谢最旺盛,导致浊度增大<sup>[8]</sup>。

### 2.1.3 $COD_{Mn}$

$COD_{Mn}$ 可反映水库受有机物污染程度。试验结果表明,该水库水质相对较稳定,受污染不严重, $COD_{Mn}$ 浓度大多在0.55~4.4 mg/L,全年平均浓度为1.97 mg/L,大部分时间符合Ⅰ、Ⅱ类地表水水质标准,部分时间段超出Ⅲ类地表水水质标准限值。

该水库冬、春季节水温低,有机物含量较平稳, $COD_{Mn}$ 浓度在2 mg/L左右,这是由于水温低,微生物和藻类代谢缓慢,底泥释放溶解性有机物量减少<sup>[8]</sup>。夏季(7月—8月)水温较高, $COD_{Mn}$ 浓度更低,这是因为此时微生物和藻类生长旺盛,消耗更多溶解性有机物<sup>[9]</sup>,使得 $COD_{Mn}$ 浓度降低。秋季(9月—10月)一些水草腐烂释放出有机物,水中藻类和微生物代谢缓慢,溶解氧浓度较低,水体自净能力下降,导致 $COD_{Mn}$ 浓度升高<sup>[10]</sup>。

### 2.1.4 氨氮、总氮

氨氮与总氮是衡量水体水质状况的两个重要条件,也能反映水体的富营养化程度<sup>[11]</sup>。该水库水的氨氮及总氮季节性变化如图2所示。

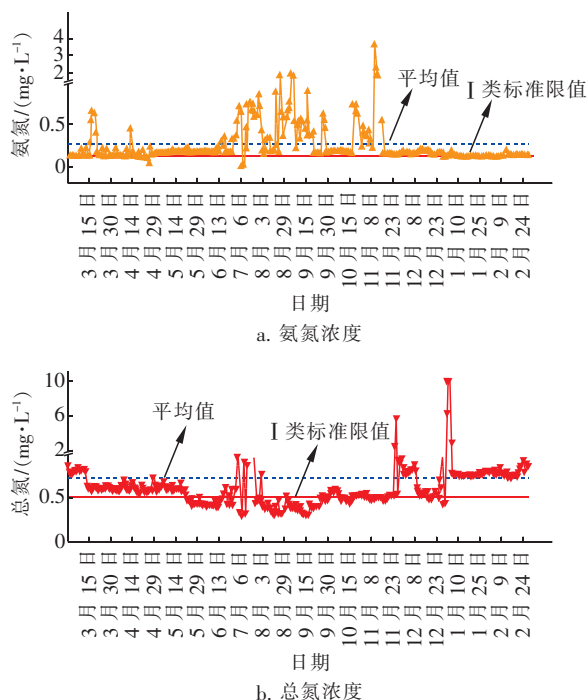


图2 水库水中氨氮及总氮的季节性变化

Fig. 2 Seasonal change of  $NH_4^+ - N$  and TN of reservoir water

水库水的氨氮值在0.15~3.58 mg/L之间,平均值为0.27 mg/L,超过Ⅰ类地表水标准限值(0.15 mg/L);总氮的平均值为0.717 mg/L,超过Ⅱ类地表水标准限值(0.5 mg/L),最大值高达10 mg/L。

该水库水的氨氮浓度总体较稳定,而夏季氨氮浓度变化较大,这是由于夏季温度高,形成了温跃层,对上下层的物质和能量交换阻碍加大,导致底部水体溶解氧浓度不断降低,底泥的氮释放量加大;此外厌氧细菌活跃,产生大量有机酸,导致底部水体pH值降低, $H^+$ 与铵盐中的 $NH_4^+$ 发生竞争,底泥中吸附铵盐的位置易被 $H^+$ 争夺而释放出 $NH_4^+$ 。

该水库水总氮浓度变化较大,冬、春季节总氮浓度较高,夏、秋季节较低。冬季和春季水温低,微生物整体代谢缓慢,对总氮的降解率低,水体底部DO浓度低,底泥释放的总氮增加<sup>[12]</sup>,此外水中微生物及藻类的死亡也会造成总氮浓度升高。夏季随着水温增加,微生物、藻类及植物代谢变快,对总氮的消耗增加,且此时水体底层温度并不高,底泥释放总氮量较少。但由于水库夏季出现温跃层(7月—8月),阻止溶解氧扩散,造成厌氧环境,对总氮的降解不利;此外,底泥持续释放出的 $NH_4^+ - N$ 也是导致总氮浓度升高的原因之一<sup>[13]</sup>。

### 2.1.5 总磷、TN/TP值及叶绿素a

磷是造成水库富营养化的关键因素之一<sup>[14]</sup>。该水库水的总磷、TN/TP值随季节的变化见图3。可以看出,该水库水TP浓度基本在0.001~0.094 mg/L之间,大多符合Ⅰ类地表水水质标准(0.01 mg/L),但7月该水库出现总磷浓度突增情况(最高达到6.8 mg/L),平均值达到0.127 mg/L,超出Ⅱ类标准限值。该水库水春季总磷浓度比较稳定,由于水温回升,底泥磷释放量增加,而此时微生物及藻类代谢仍然较慢,所以总磷呈少量增加趋势。到5月中旬时,微生物、藻类代谢加快,对TP的消耗变大,而此时水中溶解氧浓度下降,底部厌氧菌产生无机酸使pH值下降,底泥释磷被抑制<sup>[15]</sup>,水中总磷浓度逐渐下降。夏季高温期时,由于温跃层的存在,在底部产生厌氧环境,底泥释放出的磷增加<sup>[16]</sup>,同时厌氧反应比例加大,pH值进一步降低,潘成荣等人认为pH值对底泥释磷呈抛物线影响,磷释放量进一步增加<sup>[15]</sup>。秋冬时节,水温逐步降低,温跃层变薄,底泥释磷被削弱,水温进一步降低,藻类及微生物代谢死亡,总磷有小幅上升。

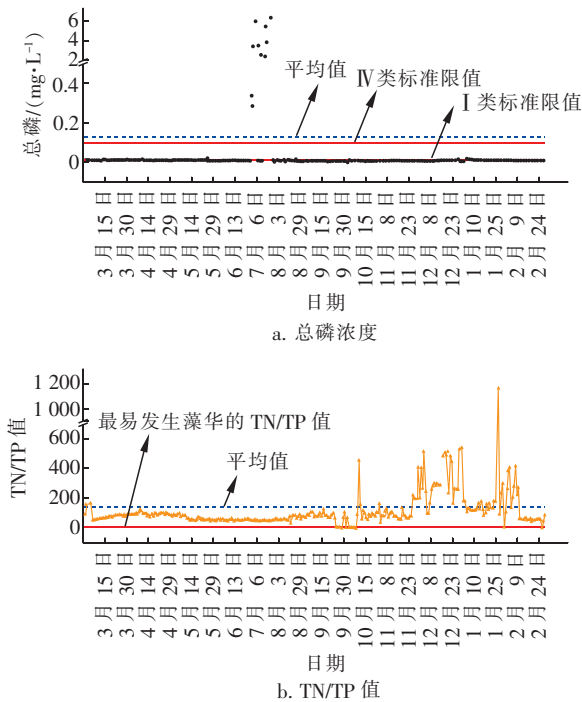


图 3 水库水总磷、TN/TP 值的季节性变化  
Fig.3 Seasonal change of TP and TN/TP ratio of reservoir water

该水库水的 TN/TP 值在 14 ~ 540 之间,平均值为 143.9;叶绿素 a 浓度在 0.004 ~ 0.045 mg/L,平均值为 0.012 mg/L。根据藻类的经验分子式计算得出临界氮磷质量比应为 7.2,而该水库的氮磷质量比远高于临界比,可见磷是该水库藻类暴发的限制因子。目前该水库叶绿素 a 浓度相对较低是受磷浓度的限制,该水库要避免进一步富营养化,一定要防止底泥磷释放或者外源磷进入。

2.1.6 铁、锰

水库水 Fe、Mn 浓度的季节性变化如图 4 所示。可知,该水库水铁浓度在 0.05 ~ 1.32 mg/L,平均值为 0.1 mg/L,低于地表水源 0.3 mg/L 的标准限值;锰浓度在 0.05 ~ 0.77 mg/L,平均值为 0.2 mg/L,远超生活饮用水地表水源 0.1 mg/L 的标准限值。水库水的 Fe、Mn 浓度在其他季节相对稳定,浓度大多在 0.1 mg/L 以下,但在夏季高温时急剧增大,最大浓度分别可达 1.32、0.77 mg/L。这是由于冬季和春季水体上、下层大致趋于等温状态时,水库水的溶解氧及 pH 值高,这时整个水体处于氧化状态,在氧化环境条件下,Fe、Mn 处于高价态而形成难溶化合物。而夏秋季存在温跃层,温跃层以下的水体因缺氧而呈现还原状态,库底沉积物中的高价态 Fe、Mn

被还原为低价态而溶于水中。

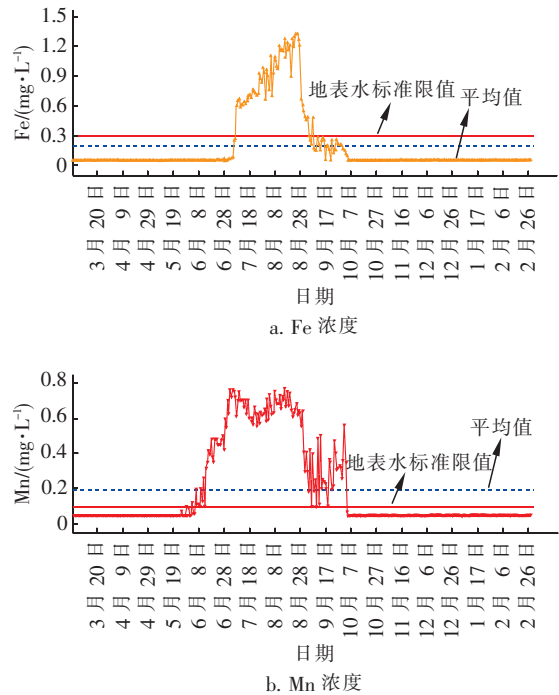


图 4 水库水中铁、锰浓度的季节性变化  
Fig.4 Seasonal change of Fe and Mn of reservoir water

2.2 存在问题及应对措施

原水水质影响水厂处理工艺,有必要对该水库水质季节变化做深入分析。该水库水质水文年变化导致的问题及应对策略如表 1 所示。

表 1 水库水质变化导致的问题及应对策略

Tab.1 Problems caused by water quality change and countermeasures

项 目	存在问题	应对策略及依据
pH 值	春夏处于弱碱性,秋冬处于弱酸性	全年可采用聚合氯化铝 (PAC) 混凝剂,因为 PAC 适宜的 pH 值范围较宽,对弱碱、弱酸性水体有较好的耐受性 <sup>[17]</sup> ;也可分别采用天然阴、阳离子有机高分子絮凝剂,有利于絮凝剂分子链的伸展,提高其网捕絮体的能力,增强其絮凝效果 <sup>[18-19]</sup>
浊度	秋冬低温低浊,不利于混凝 <sup>[20]</sup>	联合采用 PAC 与活化硅酸 <sup>[21]</sup> ,PAC 可在低温条件下水解,且大分子质量的链状结构可起到有效的架桥作用,使得小团簇成长为大絮体而能够更快沉降;活化硅酸除作为助凝剂外,还有利于去除 COD <sub>Mn</sub>
COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Mn</sub> 大多符合地表水 II 类水质标准,有时出现突增情况	活性炭对有机物的吸附效果好,可通过投加粉末活性炭应对有机物突增问题 <sup>[22]</sup>



续表1 (Continued)

项 目	存在问题	应对策略及依据
氨氮	夏秋季氨氮浓度较高	常规工艺无法应对季节性氨氮问题,偶发性高氨氮可通过改进消毒工艺(如增加氯投加量将氨氮转成氯胺)来应对;还可设置生物预处理单元 <sup>[23]</sup> ,或进行滤池升级改造,将砂滤池改为活性炭滤池 <sup>[24]</sup>
总氮	总氮浓度总体较高,有富营养化风险	滤池升级改造,除可应对氨氮问题,也可解决总氮问题 <sup>[24]</sup>
总磷	总磷浓度较低,但出现季节性(夏初)总磷增大问题	滤池升级改造,或采取防止底泥释磷的有效措施;防止底泥释磷,可采用底泥疏浚技术、底泥覆盖、原位钝化、种植沉水植物或投加絮凝剂等方法 <sup>[25-26]</sup>
藻类	夏季藻类浓度较高,影响混凝过滤 <sup>[27]</sup> ,增加后续消毒副产物 <sup>[28]</sup> ,释放毒素 <sup>[29]</sup>	由于该水库总氮浓度高,为避免藻类暴发,一定要防止底泥磷释放或外源磷进入水库 <sup>[27]</sup>
铁、锰	铁、锰浓度较低,季节性(夏季)铁、锰剧增	高锰酸钾预氧化 <sup>[30]</sup> ;生物活性炭滤池能很好地去除水中的铁、锰 <sup>[31]</sup> ,所以可将滤池升级改造来应对

水库水质季节变化,导致水处理工艺难度加大,可通过适当改进水处理工艺或治理水库改善水质来解决这一问题。针对该水库水质的季节性变化,对水厂提出如下建议:①若不进行基本设施升级改造,综合考虑经济可行性,可采用高锰酸钾预处理、强化混凝、投加粉末活性炭等方式来应对季节性的水质问题;②进行基本设施升级改造,将砂滤池改为活性炭滤池,可以解决很多水质问题。针对水库治理:可种植沉水植物或底泥覆盖以减少底泥释磷;夏季高温采取一些必要的工程技术措施(如扬水曝气技术),加速水体对流。当然,应对水质季节性变化更根本的措施是保护好水源,采取有效措施治理水库水,提高水源水质。

### 3 结论

① 该水库水总体水质良好,各水质指标大多符合Ⅰ、Ⅱ类地表水水质标准,但出现季节性(夏季)铁、锰、氨氮等污染问题。

② 各水质指标随季节变化发生明显波动。

③ 氮营养物超标及其所引发的局部季节性暴发水华是该水库水环境潜在的问题,要严格控制限制性因子磷的浓度。

④ 该水库水质季节性变化的主要原因是内源

问题,可采用底泥疏浚技术、底泥覆盖及其他一些必要的工程技术措施(如扬水曝气技术)抑制底泥中氮、磷物质向水体释放,当然也要进一步防止外源污染进入水库,防止水体富营养化。

### 参考文献:

- [1] 陈森林,梁斌,李丹,等. 水库中长期发电优化调度解析方法及应用[J]. 水利学报,2018,49(2):168-177.  
Chen Senlin, Liang Bin, Li Dan, *et al.* Derivation and application of analytic method for reservoir mid-long term optimal operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(2):168-177(in Chinese).
- [2] 李燕,马晓婷,焦键,等. 外源污染对山美水库总氮和总磷的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):93-98.  
Li Yan, Ma Xiaoting, Jiao Jian, *et al.* Influence of exogenous pollution on total nitrogen and total phosphorus in Shanmei reservoir[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015,26(4):93-98(in Chinese).
- [3] Liao X B, Wang C K, Wang J, *et al.* Nitrosamine precursor and DOM control in an effluent-affected drinking water[J]. J AWWA, 2014, 106(7):307-318.
- [4] 苏航,徐慧,王东升,等. 水源水质对混凝过程的影响及无机复合絮凝剂应用[J]. 中国给水排水,2016,32(23):16-21.  
Su Hang, Xu Hui, Wang Dongsheng, *et al.* Effect of source water quality on coagulation process and application of inorganic composite coagulants[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(23):16-21(in Chinese).
- [5] 林韵,叶沛茵,涂常青,等. 天然有机物氯消毒副产物的生成及影响因素研究[J]. 中国给水排水,2016,32(5):49-54.  
Lin Yun, Ye Peiyin, Tu Changqing, *et al.* Formation and its influence factors of chlorine disinfection by-product[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(5):49-54(in Chinese).
- [6] 董春颖,虞左明,吴志旭,等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学,2013,34(7):2574-2581.  
Dong Chunying, Yu Zuoming, Wu Zhixu, *et al.* Study on seasonal characteristics of thermal stratification in

- lacustrine zone of Lake Qiandao [J]. Environmental Science, 2013, 34 (7): 2574 - 2581 (in Chinese).
- [7] 万巧玲, 王良超. 我国给水处理技术出厂水控浊措施研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (12M): 167 - 172.
- Wan Qiaoling, Wang Liangchao. Research progress of turbidity control on water treatment technology in China [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36 (12M): 167 - 172 (in Chinese).
- [8] 韩琦, 薛爽, 刘影, 等. 河流底泥中溶解性有机物的释放途径及影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36 (12): 3737 - 3749.
- Han Qi, Xue Shuang, Liu Ying, *et al.* Release pathway and influencing factors of dissolved organic matter in river sediments [J]. China Environmental Science, 2016, 36 (12): 3737 - 3749 (in Chinese).
- [9] 袁辉洲, 朱佳, 高静思, 等. 南方水库水质和底泥调查及底泥释放规律研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (15): 95 - 98.
- Yuan Huizhou, Zhu Jia, Gao Jingsi, *et al.* Survey of reservoir water quality and sediment and research on sediment release law [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (15): 95 - 98 (in Chinese).
- [10] 原海燕, 张永侠, 刘清泉, 等. 不同季节部分鸢尾属植物对富营养化水体的净化研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31 (1): 165 - 170.
- Yuan Haiyan, Zhang Yongxia, Liu Qingquan, *et al.* Study on purification of some species of *Iris L.* for different eutrophic water in different seasons [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31 (1): 165 - 170 (in Chinese).
- [11] 尚佰晓, 王莉, 王爽, 等. 铁岭莲花湖水体富营养化评价[J]. 湿地科学, 2014, 12 (1): 97 - 101.
- Shang Baixiao, Wang Li, Wang Shuang, *et al.* Eutrophication evaluation on waters in Lianhua Lake wetland in Tieling County [J]. Wetland Science, 2014, 12 (1): 97 - 101 (in Chinese).
- [12] 孙昕, 王雪, 许岩, 等. 一个分层水库温跃层的模拟与验证[J]. 湖泊科学, 2015, 27 (2): 319 - 326.
- Sun Xin, Wang Xue, Xu Yan, *et al.* Numerical simulation and verifications on thermal stratification in a stratified reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27 (2): 319 - 326 (in Chinese).
- [13] 周成, 杨国录, 陆晶, 等. 河湖底泥污染物释放影响因素及底泥处理的研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34 (5): 113 - 117, 94.
- Zhou Cheng, Yang Guolu, Lu Jing, *et al.* Research progress about sediment disposal and factors influencing release of sediment pollutants in rivers and lakes [J]. Environmental Engineering, 2016, 34 (5): 113 - 117, 94 (in Chinese).
- [14] Lake B A, Coolidge K M, Norton S A, *et al.* Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, USA, lakes [J]. Science of the Total Environment, 2007, 373 (2/3): 534 - 541.
- [15] 潘成荣, 张之源, 叶琳琳, 等. 环境条件变化对瓦埠湖沉积物磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (6): 148 - 152.
- Pan Chengrong, Zhang Zhiyuan, Ye Linlin, *et al.* Effects of environmental factor on phosphorus release from sediments in Wabuhu Lake [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (6): 148 - 152 (in Chinese).
- [16] 卢俊平, 马太玲, 刘廷玺, 等. 大河口水库底泥释磷强度环境影响机理研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (7): 72 - 78.
- Lu Junping, Ma Tailing, Liu Tingxi, *et al.* Study on sediment phosphorus release mechanism of the environmental impact in Dahekou Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40 (7): 72 - 78 (in Chinese).
- [17] 李浩, 刘衍波, 马卫江, 等. 聚铝铁基复合絮凝剂强化处理高 pH 值、低藻源水[J]. 中国给水排水, 2015, 31 (9): 64 - 65, 69.
- Li Hao, Liu Yanbo, Ma Weijiang, *et al.* Enhanced treatment of source water with high pH and low algae by new poly aluminium ferric chloride [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (9): 64 - 65, 69 (in Chinese).
- [18] 古昌红. 有机高分子絮凝剂絮凝机理的研究进展[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2007, 24 (6): 573 - 576.
- Gu Changhong. Research progress in coagulation mechanism of organic macro-molecular coagulants [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2007, 24 (6): 573 - 576 (in Chinese).
- [19] 侯兴汉, 刘雅莉. 胺化接枝聚丙烯酰胺阳离子絮凝剂的合成与应用[J]. 中国给水排水, 2012, 28 (15): 68 - 70.
- Hou Xinghan, Liu Yali. Synthesis and application of amino-grafted cationic polyacrylamide flocculant [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (15): 68 - 70 (in Chinese).

- Chinese).
- [20] Vigil R D, Vermeersch I, Fox R O. Destructive aggregation: Aggregation with collision-induced breakage [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 302 (1): 149 – 158.
- [21] 张立东, 李彦文. 处理低温低浊水的混凝剂及助凝剂的对比应用研究[J]. *吉林化工学院学报*, 2014, 31 (11): 35 – 37, 56.  
Zhang Lidong, Li Yanwen. Application for contrast of low temperature and low turbidity water coagulant treatment [J]. *Journal of Jilin Institute of Chemical Technology*, 2014, 31 (11): 35 – 37, 56 (in Chinese).
- [22] 王占生, 刘文君. 我国给水深度处理应用状况与发展趋势[J]. *中国给水排水*, 2005, 21 (9): 29 – 33.  
Wang Zhansheng, Liu Wenjun. Application of advanced treatment of drinking water and its perspective [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21 (9): 29 – 33 (in Chinese).
- [23] 杨家轩, 马军, 时玉龙, 等. 气浮/复合滤料生物滤池工艺处理低温、高氨氮原水[J]. *中国给水排水*, 2013, 29 (21): 5 – 10.  
Yang Jiaxuan, Ma Jun, Shi Yulong, *et al.* Combined process of sedimentation, dissolved air flotation and biofilter with multi-layer media for treating raw water with heavy pollution and high ammonia nitrogen at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29 (21): 5 – 10 (in Chinese).
- [24] 廖晓斌, 赵雷, 陈超, 等. 升/降流式生物活性炭滤池处理微污染湖泊水比较[J]. *中国给水排水*, 2017, 33 (19): 1 – 5.  
Liao Xiaobin, Zhao Lei, Chen Chao, *et al.* Comparison of up-flow and down-flow BAC for micro-polluted lake water treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (19): 1 – 5 (in Chinese).
- [25] 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 等. 紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制[J]. *环境科学*, 2016, 37 (10): 3835 – 3841.  
Huang Xuejiao, Shi Wenhao, Ni Jiupai, *et al.* Efficiency and mechanism of capping with purple parent rocks to control phosphorus release from sediments [J]. *Environmental Science*, 2016, 37 (10): 3835 – 3841 (in Chinese).
- [26] 胡小贞, 金相灿, 卢少勇, 等. 湖泊底泥污染控制技术及其适用性探讨[J]. *中国工程科学*, 2009, 11 (9): 28 – 33.  
Hu Xiaozhen, Jin Xiangcan, Lu Shaoyong, *et al.* Techniques for sediment pollution control and discussion on the applicability in lakes of China [J]. *Engineering Science*, 2009, 11 (9): 28 – 33 (in Chinese).
- [27] 张翀, 赵亮, 张莹, 等. 藻类爆发危害及其控制技术研究进展[J]. *环境保护科学*, 2015 (3): 107 – 112.  
Zhang Chong, Zhao Liang, Zhang Ying, *et al.* Research progress of the hazard and control technology of algae bloom [J]. *Environmental Protection Science*, 2015 (3): 107 – 112 (in Chinese).
- [28] Fang J Y, Yang X, Ma J, *et al.* Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor(am)ination [J]. *Water Res*, 2010, 44 (20): 5897 – 5906.
- [29] Papadimitriou T, Armeni E, Stalikas C D, *et al.* Detection of microcystins in Pamvotis lake water and assessment of cyanobacterial bloom toxicity [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184 (5): 3043 – 3052.
- [30] 袁德玉, 杨开, 张荣勇, 等. 高锰酸钾预处理微污染地表水研究[J]. *中国给水排水*, 2005, 21 (2): 59 – 60.  
Yuan Deyu, Yang Kai, Zhang Rongyong, *et al.* Study on potassium permanganate for pretreatment of micro-polluted surface water [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21 (2): 59 – 60 (in Chinese).
- [31] 叶恒朋, 陆少鸣, 杜冬云, 等. 臭氧-生物活性炭深度处理工艺对微污染原水中营养物的去除研究[J]. *水处理技术*, 2010, 36 (2): 88 – 91.  
Ye Hengpeng, Lu Shaoming, Du Dongyun, *et al.* Study on nutrition removing from water by O<sub>3</sub> – BAC advanced treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36 (2): 88 – 91 (in Chinese).



作者简介: 赵雷 (1994 – ), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理技术。

E-mail: 1063808712@qq.com

收稿日期: 2019 – 05 – 12