

# 水源型水库的氮形态分布特征与水体富营养化的关系

詹志薇<sup>1</sup>, 谭志<sup>1</sup>, 金腊华<sup>2</sup>, 谢宏琴<sup>1</sup>, 张一凡<sup>2</sup>, 陈秋强<sup>1\*</sup>

(1. 广东省东莞市环境监测中心站, 广东东莞 523009; 2. 暨南大学环境学院, 广东广州 510632)

**摘要** 根据实测水质数据,对东莞市某备用水源水库的氮形态分布特征及其与叶绿素 a 及水体综合营养指数(TLI)的关系进行了分析,旨在为预防或减轻水体富营养化提供理论依据。结果表明:水源型水库易受到营养性污染,呈中度或低度富营养化状态;氮形态在水库进水区以氨氮和硝酸盐氮为主,且占比均在 45% 以上,出水区以硝酸盐氮为主,且占比在 75% 以上,从进水区到出水区氨氮占比下降 80% 以上,季节变化对氮形态空间分布有一定影响,但影响程度不大;氨氮与叶绿素 a 和 TLI 无明显的相关性,不对水体富营养化产生直接作用;硝酸盐氮与叶绿素 a 和 TLI 呈负相关,对水体富营养化有一定的抑制作用;亚硝酸盐氮和有机氮同叶绿素 a 以及 TLI 呈正相关,对水体富营养化有促进作用。降低排入水库的氨氮和有机氮含量是有效预防或减轻水体富营养化的主要途径。

**关键词** 水源型水库;氮形态;叶绿素 a;水体富营养化

中图分类号 S181.3 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)10-0059-04

## The Relationship between the Distribution of Nitrogen Forms and Eutrophication of Water Source Reservoirs

ZHAN Zhi-wei<sup>1</sup>, TAN Zhi<sup>1</sup>, JIN La-hua<sup>2</sup>, CHEN Qiu-qiang<sup>1</sup> et al (1. Environmental Monitoring Center Station of Dongguan, Dongguan, Guangdong 523009; 2. College of Environment, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632)

**Abstract** Based on detected water quality data, the distribution characteristics of different form nitrogen and its relationships to chlorophyll a (Chl-a) and comprehensive nutrition status index of water body (TLI) in a reservoir as drinking water source in Dongguan were analyzed to provide theoretical bases for prevention and reduction of the eutrophication. The results showed that reservoirs of this kind may easily be polluted nutritionally and present moderate or low level of eutrophication and the nitrogen form was given priority to ammonia nitrogen and nitrate nitrogen whose proportion was more than 45% respectively in the inflow area, but priority to nitrate nitrogen whose proportion was as high as 75% and above in the outflow area of the reservoir, also the proportion of ammonia nitrogen drops by 80% and above during the process from the inflow area to the outflow area, and moreover seasonal variation gives little impact to the spatial distribution of nitrogen forms. It has been found from the analyses that ammonia nitrogen has no obvious correlation with Chl-a and TLI and doesn't give direct contribution to the eutrophication, and nitrate nitrogen presents negative correlation with Chl-a and TLI and has a certain inhibitory effect to the eutrophication, but nitrite nitrogen and organic nitrogen positively relate with Chl-a and TLI so that it stimulates the eutrophication. To reduce the input amount of ammonia nitrogen and organic nitrogen into the reservoir was the main way to effectively prevent or mitigate eutrophication of water body in reservoirs.

**Key words** Water source reservoir; Nitrogen form; Chlorophyll a; Water body eutrophication

氮污染不仅对水库水体富营养化有促进作用,而且会在饮用水氯消毒过程中生成具有强“三致”作用的含氮消毒副产物(N-DBPs),严重影响饮用水的安全。水中的氮形态包括无机氮和有机氮,其中无机氮以氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的形态出现。探明水库水中不同形态氮的数量和变化特征,分析不同形态氮对水体富营养化的影响,对指导饮用水制取过程中科学选择脱氮工艺及指导科学规划与实施饮用水水源保护具有重要的理论意义。

目前,国内外对水源型水库氮形态特征的研究较少。葛晓立等<sup>[1]</sup>分析了密云水库总氮和总磷浓度比,高廷进等<sup>[2]</sup>对高原水库百花湖富营养化特性和总氮、总磷及叶绿素 a 的表底层浓度进行了分析;林悦涓等对湖泊的氮、磷形态分布特征进行了分析<sup>[3-5]</sup>;于红蕾<sup>[6]</sup>对景观水体溶解性有机氮的分布进行了监测分析。目前对水源型水库的氮形态研究较少,对氮形态的转化特性及成因缺乏系统分析。笔者以东莞市某备用水源水库为例,根据实测水质资料,分析水库水体中氮形态的分布规律及时空变化特征,并从反应动力学角度,分析其成因,以期为该水库的水质保护提供理论依据。

## 1 水库概况

东莞市某备用水库位于东莞市东南方向 8.5 km 处,集水面积 100 km<sup>2</sup>,总库容 0.652 亿 m<sup>3</sup>。2006 年该水库被确定为东莞市备用水源。黄免彦等<sup>[7]</sup>研究表明,该水库处于轻度污染状态。韩娇<sup>[8]</sup>分析了该水库的环境容量。

根据东莞市环境监测中心站 2014 年 4 月至 2015 年 4 月期间对该水库的定期监测数据,采用 GB 3838—2002 中 III 类水的水质要求作为评价标准,计算其单因子标准指数(表 1)。由表 1 可知,除 COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、TP 和氨氮外,其余 16 项常规监测因子均满足 III 类水要求,这表明该水库已经受到有机污染。

根据东莞市环境监测中心站 2014 年 4、9、11 月和 2015 年 1、4 月对该水库的实地监测结果,选取叶绿素 a、TP、TN、透明度和 COD<sub>Mn</sub> 作为评价因子,计算该水库综合营养状态指数(TLI)<sup>[9]</sup>。结果见图 1。由图 1 可见,该水库现状 TLI 为 60~65,属于中度富营养化状态,主要污染形式是氮、磷污染,从 2014 年 4 月至 2015 年 4 月 TLI 呈下降趋势,表明该水库污染程度有降低趋势。

## 2 水库的氮形态分布特征

**2.1 不同形态氮占总氮百分比** 根据东莞市环境监测中心站 2014 年 11 月和 2015 年 1、4、7 月对该水库不同形态氮的监测数据,分析不同形态氮占总氮的百分比。结果表明,水库氮形态包括氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和有机氮,监测期

基金项目 广东省科技计划项目(2015A020215015);东莞市高等院校科研机构科技计划重点项目(201210820140028);东莞市社会科技发展项目(2014108101042)。

作者简介 詹志薇(1971—),女,广东东莞人,硕士,从事环境监测与保护研究。\* 通讯作者,工程师,硕士,从事环境分子研究。

收稿日期 2017-01-31

内全库各形态氮的平均占比为硝酸盐氮 60.6%、氨氮 26.9%、有机氮 8.5%、亚硝酸盐氮 4.0%。由此可见,水库主要氮形态是硝酸盐氮,其次是氨氮,有机氮和亚硝酸盐氮占比较少。

表1 东莞市某备用水库常规水质因子标准指数现状

Table 1 Present status of water quality standard indexes of a reserve reservoir in Dongguan City

监测项目 Monitoring project	进水区 Inlet area	出水区 Effluent area	平均 Average	评价 Evaluation
pH	0.085	0.098	0.091	达标
DO	0.273	0.204	0.239	达标
COD <sub>Mn</sub>	1.080	0.963	1.022	超标
COD <sub>Cr</sub>	1.020	1.370	1.195	超标
氨氮 Ammonia nitrogen	2.768	1.498	2.133	超标
BOD <sub>5</sub>	1.265	1.690	1.478	超标
TP	2.960	2.240	2.600	超标
石油类 Petroleum	0.800	0.800	0.800	达标
阴离子表面活性剂 Anionic surface active agent	0.150	0.150	0.150	达标
挥发酚 Volatile phenol	0.100	0.100	0.100	达标
硫化物 Sulfide	0.015	0.015	0.015	达标
氰化物 Cyanide	0.003	0.003	0.003	达标
Zn	0.010	0.008	0.009	达标
Cu	0.004	0.003	0.004	达标
Pb	0.001	0.001	0.001	达标
Cd	0.006	0.006	0.006	达标
Se	0.010	0.010	0.010	达标
Hg	0.050	0.050	0.050	达标
As	0.023	0.024	0.024	达标
Cr <sup>6+</sup>	0.040	0.040	0.040	达标
氟化物 Fluoride	0.672	0.538	0.605	达标

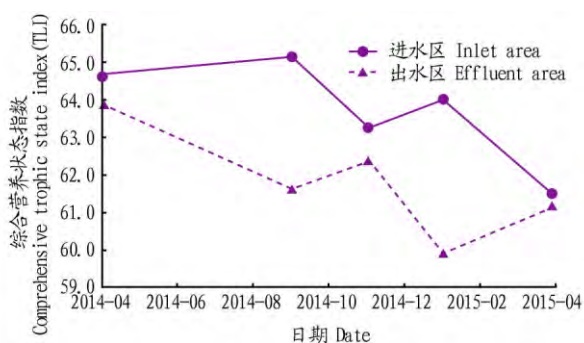


图1 东莞市某备用水库综合营养状态指数(TLI)变化

Fig. 1 Change of TLI of a reserve reservoir in Dongguan City

**2.2 不同形态氮空间分布特征** 根据实测数据,对该水库进水区与出水区各形态氮的分布进行了分析。分析结果(图2)表明,水库南部进水区与北部出水区不同形态氮占比有很大不同,具体表现为从进水区到出水区氨氮显著降低82%、亚硝酸盐氮下降18%、硝酸盐氮增大65%、有机氮显著增高186%;进水区的主要氮形态是氨氮和硝酸盐氮,而出水区的主要氮形态为硝酸盐氮。这种空间分布规律说明进入水库的含氮污染物在水库中大部分被硝化菌硝化和被反硝化菌转化,水库水质呈好转趋势,表明该水库水体的自净能力强。

**2.3 不同形态氮的季节性分布特征** 根据实测数据,对该水库进水区与出水区各形态氮占比随时间的变化进行了分析,结果(图3)表明,2014年11月到2015年7月水库进水区各形态氮变化状况:氨氮占比在41.5%~48.6%,呈小幅波动,且浓度超标;硝酸盐氮在37.2%~55.8%,且波动方向

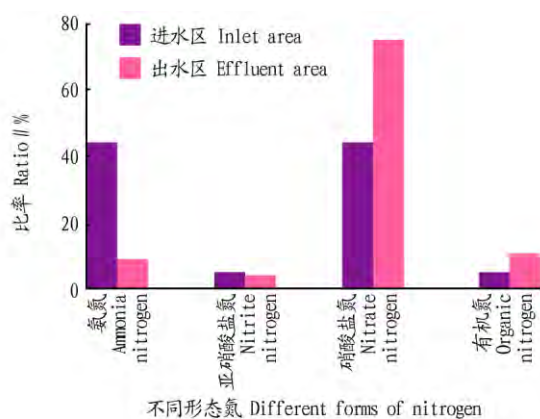


图2 东莞市某备用水库进水区与出水区不同形态氮占比

Fig. 2 Proportion of different form nitrogen in the inlet area and effluent area of a reserve reservoir in Dongguan City

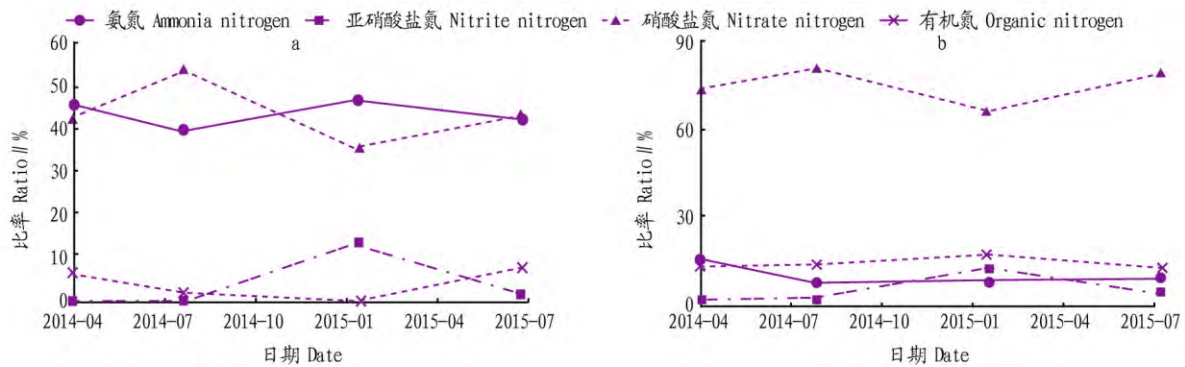
与氨氮相反;亚硝酸盐氮仅在氨氮增高时略有增高;有机氮波动较小。在水库出水区各形态氮的变化状况:硝酸盐氮在66.0%~81.6%小幅波动,且波动趋势与进水区硝酸盐氮波动同步;氨氮、亚硝酸盐氮和有机氮较稳定且占比均在15%以下,且氨氮浓度稳定达标。这表明季节变化会引起水库进水区氨氮的小幅波动,但对出水区各形态氮的影响很小。

### 3 水库不同形态氮与叶绿素a的关系

**3.1 不同形态氮与叶绿素a的相关性** 从图4可知,不同形态氮与叶绿素a具有明显的分区特征,即进水区氨氮与叶绿素a的关系点较散乱,无明显规律,但在出水区随着氮

氮浓度的增大叶绿素 a 呈递增趋势,这可能与氨氮不能被藻类等直接利用有关;进水区与出水区的硝酸盐氮与叶绿素 a 均呈负相关  $R^2$  分别为 0.829 3 和 0.998 2,表明硝酸盐氮对叶绿素 a 有明显的抑制作用;在进水区亚硝酸盐氮与叶绿素 a 几乎不相关,但在出水区亚硝酸盐氮与叶绿素 a 呈正相关,

$R^2$  达 0.863 5,表明亚硝酸盐氮对叶绿素 a 有明显的促进作用;进水区和出水区,有机氮与叶绿素 a 均呈正相关  $R^2$  分别为 0.674 2 和 0.953 1,表明硝酸盐氮对叶绿素 a 有明显的促进作用。



注: a. 进水区; b. 出水区  
Note: a. Inlet area; b. Effluent area

图 3 2014 年 4 月至 2015 年 7 月东莞市某备用水库进水区与出水区不同形态氮占比

Fig. 3 Proportion of different form nitrogen in the inlet area and effluent area of a reserve reservoir in Dongguan City from April 2014 to July 2015

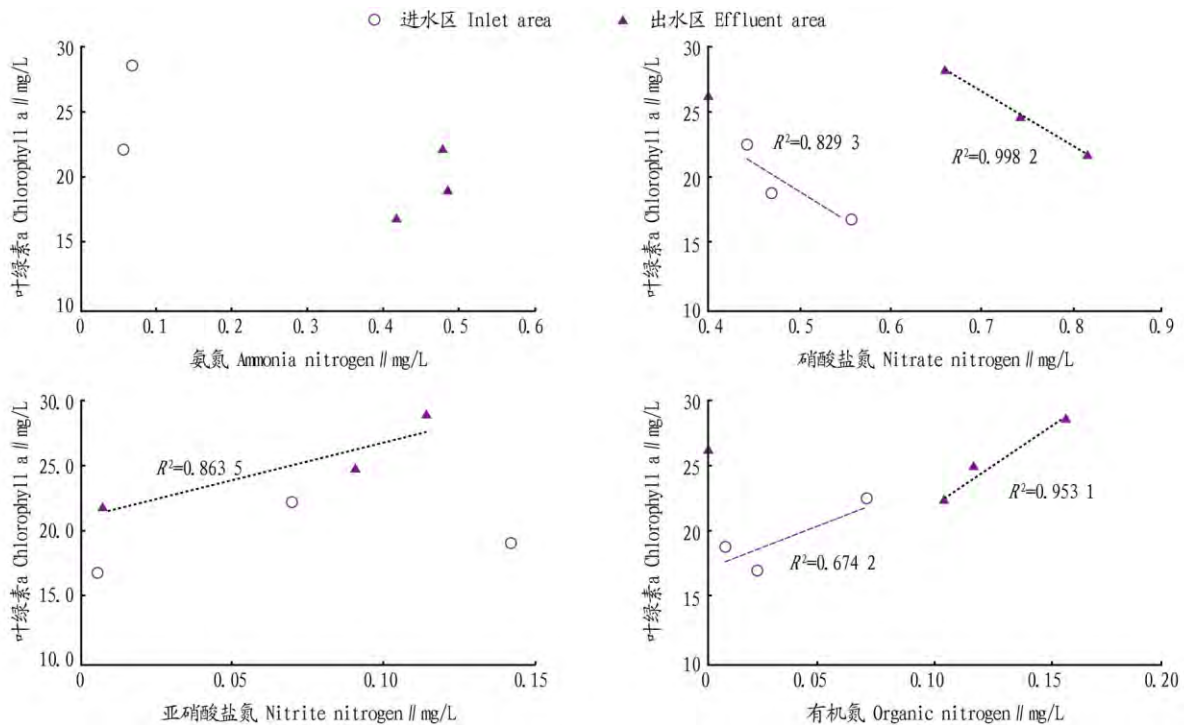


图 4 东莞市某备用水库不同形态氮与叶绿素 a 的关系

Fig. 4 Relationship between different form nitrogen and chlorophyll a of a reserve reservoir in Dongguan City

3.2 不同形态氮对水体富营养化的影响 水库水体富营养化是由于人类生产和生活活动排放大量的氮、磷等营养物质进入水库,引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖、水体溶解氧量下降、水质恶化、鱼类及其他生物大量死亡<sup>[10]</sup>。其中,藻类及水生植物的生长状况可用叶绿素 a 来反映<sup>[11]</sup>。根据前文研究结果,氨氮不能被藻类等直接利用,不对水体富营养化产生直接影响,故在进水区氨氮浓度高低对叶绿素 a 不产生直接影响。但是,氨氮可被硝化菌或亚硝化菌硝化<sup>[12]</sup>转

化为硝酸盐氮和亚硝酸盐氮,而亚硝酸盐氮对叶绿素 a 有促进作用,故氨氮对水体富营养化有间接促进作用,同时在氨氮的硝化过程中需消耗大量的溶解氧,并释放氨离子使 pH 降低<sup>[13]</sup>,促使水质恶化;硝酸盐氮对藻类及水生植物生长有抑制作用<sup>[14]</sup>,对水体富营养化有一定的抑制;有机氮可被藻类和其他大多数水生植物直接利用<sup>[15]</sup>,故有机氮对水体富营养化有促进作用。根据实测数据,笔者构建不同形态氮与 TLI 之间的关系,结果见图 5~7。

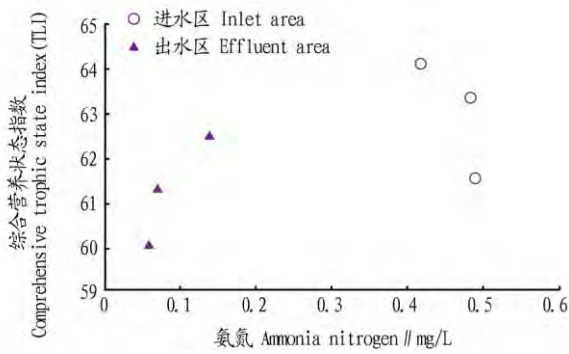


图5 氨氮与 TLI 的关系

Fig. 5 Relationship between ammonia nitrogen and TLI

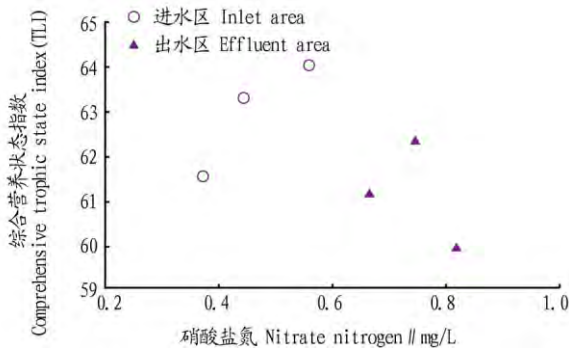


图6 硝酸盐氮与 TLI 的关系

Fig. 6 Relationship between nitrate nitrogen and TLI

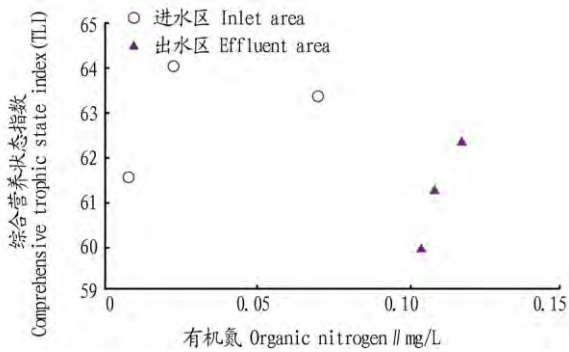


图7 有机氮与 TLI 的关系

Fig. 7 Relationship between organic nitrogen and TLI

从图5可知,氨氮与水库水体 TLI 无明显的相关性,证实了氨氮不会对水体富营养化产生直接作用。从图6可知,硝酸盐氮与 TLI 总体呈负相关,这说明硝酸盐氮对水体富营养化有一定的抑制作用,但由于硝酸盐氮有可能被亚硝化菌转化为亚硝酸盐,而亚硝酸盐对叶绿素 a 有促进作用,在一定程度上削弱了硝酸盐氮对富营养化的抑制作用,也造成了硝酸盐氮与水体 TLI 的关系不显著。从图7可见,有机氮与水体 TLI 呈正相关,这表明有机氮对水体富营养化有促进作用。

由此可见,预防与控制水体富营养化应当减少排入水体的总氮量,特别是减少氨氮和有机氮含量,真正从源头上削

减营养性污染物的排入量,以有效预防和控制水体的富营养化。

#### 4 结论

(1) 水源型水库氮的主要形态是硝酸盐氮,其次是氨氮和有机氮,亚硝酸盐氮占比不足 5%,且不稳定。

(2) 在水源型水库中,不同形态氮的空间分布具有分区特征,即进水区以氨氮和硝酸盐氮为主,出水区以硝酸盐氮为主,从进水区到出水区氨氮发生显著降解,水质明显好转;不同季节氮形态占比有一定波动,但波动幅度不大。

(3) 氨氮与叶绿素 a 无明显的相关性,硝酸盐氮与叶绿素 a 呈明显负相关,亚硝酸盐氮、有机氮与叶绿素 a 呈正相关,这表明氨氮不能被藻类等水生植物利用,硝酸盐氮对藻类等具有一定的抑制作用,亚硝酸盐氮和有机氮可被藻类等水生植物利用。

(4) 氨氮与水库综合营养状态指数(TLI)无明显的相关性,不会对水体富营养化产生直接作用;硝酸盐氮与水库 TLI 呈负相关,对水体富营养化有抑制作用;亚硝酸盐氮和有机氮同水库 TLI 呈正相关,对水体富营养化有促进作用。

(5) 水源型水库受库区周边工农业生产和居民生活活动的影响易于遭受营养性污染,水体呈中度或低度富营养化状态,减少入库氨氮和有机氮数量是预防或减轻水库水体富营养化的有效途径。

#### 参考文献

- [1] 葛晓立,刘晓端,潘小川,等.密云水库水体的地球化学特征[J].岩矿测试,2003,22(1):44-48.
- [2] 高廷进,李秋华,陈峰峰,等.贵州高原水库百花湖富营养化特征分析[J].环境保护科学,2014,40(2):22-29.
- [3] 林悦涓.东湖沉积物及上覆水体氮磷形态分布特征[D].武汉:武汉大学,2005.
- [4] 王凤娇.呼伦湖氮磷的地球化学特征[D].呼和浩特:内蒙古大学,2010.
- [5] 董云仙,洪雪花,谭志卫,等.高原深水湖泊程海氮磷形态分布特征及其与叶绿素 a 的相关性[J].生态环境学报,2012,21(2):333-337.
- [6] 于红蕾.污水及景观水体中溶解性有机氮特征研究[D].芜湖:安徽师范大学,2013.
- [7] 黄彦彦,曾睿,黎晓薇,等.同沙水库水环境质量的模糊数学综合评价[J].工业用水与废水,2011,42(1):42-44.
- [8] 韩娇.同沙水库水环境容量分析[J].河南科技,2013(4):180-181.
- [9] 张蕊,高良敏,席北斗,等.改进的 TLI 指数法及其在巢湖营养状态评价中的应用[J].环境工程学报,2013,7(6):2127-2133.
- [10] YANG X E, WU X, HAO H L, et al. Mechanisms and assessment of water eutrophication[J]. Journal of Zhejiang University: Science B, 2008, 9(3): 197-209.
- [11] 王晓芳,马振,冷冰琦,等.水中叶绿素和藻类含量及环境因子的相关分析[J].城镇供水,2014,29(S1):205-208.
- [12] 张芳.不同运行模式下同步硝化反硝化过程的脱氮和 N<sub>2</sub>O 释放特征研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [13] 高景峰,彭永臻,王淑莹.SBR 法去除有机物、硝化和反硝化过程中 pH 变化规律[J].环境工程,2001,19(5):21-24.
- [14] 陈学民,朱阳春,罗永清,等.青海湖氮素分布特征及其对藻类生长的影响[J].安全与环境学报,2012,12(2):119-123.
- [15] 吴轩浩,高佳逸,严杨蔚,等.无机氮和有机氮对铜绿微囊藻生长和产毒影响的比较[J].环境科学学报,2015,35(3):677-683.