

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0122

王晶晶,李雅慧,李海明,等.天津某水库无机氮分布规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):116-121. WANG J J, LI Y H, LI H M, et al. Distribution of inorganic nitrogen in a reservoir in Tianjin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 116-121. (in Chinese)

天津某水库无机氮分布规律

王晶晶,李雅慧,李海明,肖瀚

(天津科技大学 滨海地下水利用与保护研究室,天津 300457)

摘要:以天津某水库为研究对象,分析水库不同季节无机氮的分布规律和库水环境因子的相关性,探讨无机氮的形态变化。研究表明:库中位置的温度低于进水和出水。溶解氧质量浓度进水高于出水方向,中间位置的溶解氧质量浓度最高。夏季 ORP 低于秋季,氧化性越强则硝化反应越强,氨氮质量浓度低于夏季。TDS 随深度增加而降低,出水方向离海岸更近,水体的 TDS 更高。秋季 pH 高于夏季。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 西岸高于东岸,进水方向质量浓度高于出水方向。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 多数站点随深度增加质量浓度减小,盐度与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 呈现出显著正相关性。氨氮和硝态氮质量浓度占比都是春季>夏季>秋季。溶解态无机氮(DIN)以硝态氮为主,平均占比 81.97%。

关键词:水库;无机氮;季节;空间分布

中图分类号:TV1;X824 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Distribution of inorganic nitrogen in a reservoir in Tianjin

WANG Jingjing, LI Yahui, LI Haiming, XIAO Han

(*Binhai Groundwater Utilization and Protection Research of Fice, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China*)

Abstract: Taking a reservoir in Tianjin as the research object, the distribution law of inorganic nitrogen in different seasons and the correlation of reservoir water environmental factors were analyzed, and the morphological changes of inorganic nitrogen were discussed. The results show that the temperature of the reservoir was lower than that of the inlet and outlet. The dissolved oxygen mass concentration was higher in the inlet water than in the outlet water, and the dissolved oxygen content was highest in the middle position. In summer, ORP was lower than in autumn, while stronger the oxidization and the nitrification, and lower the ammonia nitrogen mass concentration. The TDS decreased with the increase of depth, the water outlet was closer to the coast, and the TDS of water was higher. The pH was higher in autumn than in summer. The west bank of $\text{NH}_3\text{-N}$ was higher than the east bank, and the mass concentration in the inlet direction was higher than that in the outlet direction. The mass concentration of $\text{NO}_2\text{-N}$ decreased with the increase of depth at most of the sites, and the salinity showed a significant positive correlation with $\text{NO}_2\text{-N}$. The main form of inorganic nitrogen as nitrate-nitrogen, whose mass concentration was higher at the outlet compared to the inlet. Ammonia nitrogen and nitrate-nitrogen mass concentration were spring>summer>autumn, respectively. Dissolved inorganic nitrogen(DIN) was mainly nitrate nitrogen, accounting for 81.97% on average.

Key words: reservoir; inorganic nitrogen; season; spatial distribution

收稿日期:2019-12-11 修回日期:2020-04-15 网络出版时间:2020-05-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200506.1317.008.html>

基金项目:国家自然科学基金(40872156);天津市自然科学基金重点项目(11JCZDJC24700)

作者简介:王晶晶(1994—),女,河南开封人,主要从事水资源利用与保护研究。E-mail: wangjjzs17@163.com

通信作者:李海明(1971—),男,山西临县人,教授,博士,主要从事地下水资源利用与污染控制研究。E-mail: lhm99044@163.com

天津某水库是滨海新区的水源地,引水供给市区、工业园区和环境用水。水库调度十分频繁,水资源分布的时间和空间都体现出了不均匀的特点,蓄水面大、深度浅、水量经常锐减等因素导致水位波动很大、水质下降、生态不断恶化、增殖面积起伏不定等现象^[1]。常素云等^[2]研究表明 TN 和 COD 大于地表水Ⅲ类水质标准,缴建华等^[3]研究了北大港水库水质指标以及浮游生物的监测和评价结果,指出水库的 5、7 和 9 月的水质都是Ⅳ类水, TN 检测值超过了Ⅴ类水的水质,认为是水库内沿岸水产养殖场的生产活动导致鱼类等的残饵粪便的大量积累超过了水库的自净能力所致。王盼^[4]研究表明北大港水库富营养化水平较高,水质状况劣于Ⅲ类水体的标准值,且由于水库面积广阔,水体流动缓慢,混合不均,库周富营养化程度高于库中, TN 是主要污染因子之一,面源污染、湿沉降、引水入库等是入库污染物的主要来源, TN 的主要污染来源是湿沉降以及面源污染,分别占总量的 44% 和 34%。祁艳丽等^[5]研究 11 个采样点的综合污染状况整体上水库中心的沉积物污染程度大于库周。据报道,湖中反硝化与硝化作用的结合,有可能去除水生态系统中大量的生物利用氮,从而提供了有价值的转化途径^[6-8]。上覆水中大部分为溶解氮的外部含氮养分,可以通过湖泊水流水平输送到生物量高,垂直水动力扰动较小的水域,其中沉积物氮的富集主要通过生物沉积实现^[9]。水库不同位置的营养盐释放通量具有空间差异性,释放通量的最小值出现在入库口附近,最大值出现在出库口附近^[10]。

本文以天津某水库为研究对象,通过调查、取样,识别了水库不同季节无机氮分布特征,分析不同季节无机氮形态变化和影响因素。研究结果为防治水库水污染、保证城市饮用水源供水安全提供科学支撑。

1 水库概况

水库坐落在天津市的滨海新区,北接独流减河,南望北大港油田,东临渤海湾,西至马厂减河,距入海口有 6 km。水库设计的目的是担负引黄济津、调蓄南运河来水和大清河、承洪调蓄等任务,发挥蓄水、供水、防洪等作用。

蓄供水建筑物有南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄闸、沙井子闸、排咸闸、3 号泄水闸和 10 号口门调节闸^[11]。

2 取样点的布设与样品采集

在水库布设 9 个站点,其中入库口方向的南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄

闸位于水库的西岸,位于库中间的是小道和沙井子闸。3 号泄水闸和 10 号口门调节闸位于水库的出口。用分层取水器在每个水闸分别取水,取水深 0.5 m 为表层水,取水深 1~2 m 为中层水,取 3~4 m 为底层水。其布点的方法和原则、样品的采集、制备以及保存都参照了《地表水与污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)的规定。

本文样品采集时间为 2019 年夏季、秋季。测试组分包括氨氮、亚硝氮和硝氮的质量浓度,温度、溶解氧质量浓度、ORP、TDS、pH 值。温度和溶解氧质量浓度使用 WTW 公司的 Oxi3205 测定,氧化还原电位采用 YSI Pro Plus 测定,用雷磁 PHS-3CpH 计测定 pH 值, TDS 采用雷磁 DDSJ-308A 电导率仪,氨氮和硝态氮质量浓度测定采用 WTW 公司的 WTW DIQ/S 182,使用 MAPADA UV-1100 型紫外可见分光光度计、N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定。

3 结果与讨论

3.1 库水环境因子特征

水库夏季温度最低 26.1 ℃,最高温度 32.3 ℃,平均温度 29.27 ℃,标准差 1.66。夏季温度高于秋季温度,水库中间的位置温度低于进水口和出水口。进水口中赵连庄的温度高于其他点位,可能的原因是赵连庄闸水流动性差,水体交换慢。秋季的最低温度是 21.9 ℃,最高温度是 25.3 ℃,平均温度是 23.48 ℃,标准差是 0.77。随着深度的增加温度越低。

夏季溶解氧质量浓度变化范围为 0.62~12.46 mg/L,平均质量浓度 5.12 mg/L,标准差 3.58。溶解氧质量浓度最大的是位于库中间的小道和沙井子闸,大于水库进水口,大于出库口方向。秋季溶解氧质量浓度变化范围 0.62~12.78 mg/L,平均质量浓度 5.07 mg/L,标准差 1.78。秋季溶解氧质量浓度进水口>库中间>出水口。

夏季 ORP 变化范围为 75.7~255.6 mv,平均值 190.67 mv,标准差 50.62。夏季 ORP 较高的点位是南岸进水闸、库中间位置和 3 号泄水闸、秋季 ORP 的变化范围是 230.4~259.5 mv,平均值 245.79 mv,标准差 8.42。秋季电位变化不大。

夏季 TDS 变化范围是 1.28~25.8 g/L,平均值 4.93,标准差 6.70。TDS 可以反应咸化程度。水体距海岸距离越近,水体的 TDS 越高。赵珺^[12]指出,水库库底高程不均,地势高低变化较大,整体西高东低,库内中东部较低,西部较高。排咸闸处地势最低,这是水库为排除库底积存的咸水而预留的排咸沟。秋季 TDS 的变化范围是 1.83~5.70 g/L,平

均值 3.22, 标准差 1.14。进水方向南岸进水闸和马圈进水闸随深度增加 TDS 增大。进水方向到出水方向大致的规律是 TDS 逐渐增大。

水库夏季站点 pH 范围是 6.53~7.74, 平均值 7.19, 标准差 0.39, 与地表水环境质量标准(GB 3838—2002)相比, 各站点均未超标。秋季 pH 的范围是 7.56~8.43, 平均值是 7.93, 标准差 0.26。秋季 pH 高于夏季, 两季都表现出水口略高于水库中间高于进库口。

3.2 氨氮的分布规律

夏季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度范围在 1.06~5.54 mg/L, 平均质量浓度 2.25 mg/L, 标准差 1.11。其中南岸

进水闸、赵连庄闸和出口的氨氮超出了地表水环境质量标准 V 类水体的标准(GB 3838—2002)。空间分布上出水口高于进水和库中间方向(图 1)。进水口方向南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄闸表层氨氮最高, 南岸进水闸、赵连庄闸、刘岗庄闸随深度增加质量浓度减小。马圈进水闸和大港农场闸表层高于底层高于中层。库中间沙井子闸和小道也是表层氨氮最高。质量浓度随深度递减。出库口 10 号口门调节闸和 3 号泄水闸都是底层氨氮质量浓度最高, 规律都是底层>表层>中层。排咸闸的氨氮质量浓度最大, 表层>底层>中层。

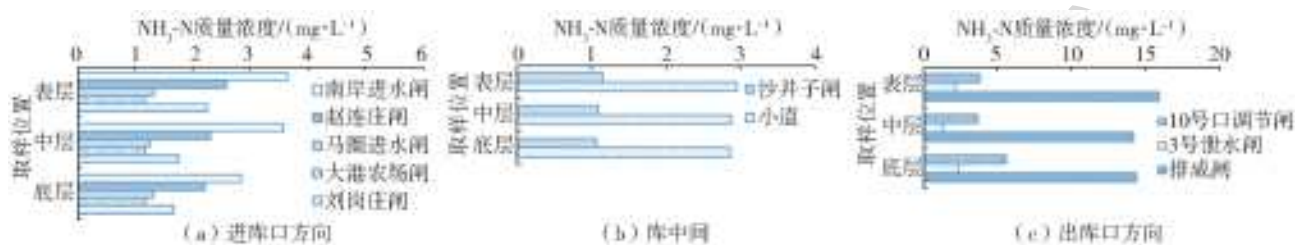


图 1 各站点 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution characteristics of $\text{NH}_3\text{-N}$ mass concentration at each site

3.3 亚硝酸盐氮的分布规律

夏季 $\text{NO}_2\text{-N}$ 质量浓度范围 0.06~0.82 mg/L, 平均质量浓度 0.08 mg/L, 标准差 0.02。排咸闸最大 0.82 mg/L, 沙井子底最小为 0.065 mg/L(图 2)。进水口方向的南岸进水闸和刘岗庄闸随深度增加质量浓度变大, 赵连庄闸、马圈进水闸和大港

农场闸随深度增加质量浓度减小。库中间沙井子闸的中层最大, 大于表层大于底层。小道表层>底层>中层。出库口 10 号口门增大, 3 号泄水闸递减。空间分布上没有明显规律, 但是根据排咸闸的数据可以看出, 盐度与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 呈现出显著的正相关性。

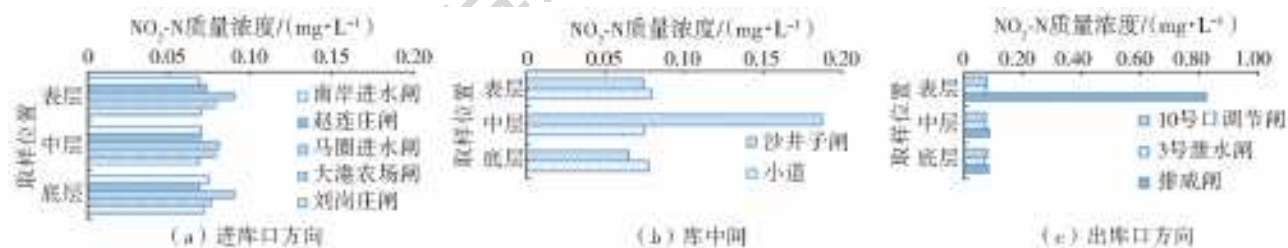


图 2 各站点 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度质量垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of $\text{NO}_2\text{-N}$ mass concentration at each site

3.4 硝酸盐氮的分布规律

夏季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度范围是 4.15~17.61 mg/L, 平均质量浓度 10.92 mg/L, 标准差 4.75。最大质量浓度出现在排咸闸, 其次是马圈进水闸。质量浓度最小的点位是南岸进水闸。观察数据可以发现, 整体表现出出水位置质量浓度高于进水位置(图 3)。进水口方向, 南岸进水闸中>底>表, 赵连庄闸和刘岗庄闸随深度增加质量浓度减小, 马圈进水闸中>表>底, 大港农场闸底>表>中。库中间位置规律一致, 随深度增加质量浓度也随之增加。出水口位置也都表现出底层质量浓度最

大的特点。

3.5 影响无机氮质量浓度的环境因子相关性分析

利用皮尔逊相关分析了氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮上覆水理化因子影响因素的关系, 用相关系数的大小表示(表 1)。可以看出, 氨氮与亚硝氮、硝氮、TDS 呈显著正相关, 与温度成正相关。与 ORP、溶解氧、pH 呈负相关, 其中与 ORP 相关性为显著水平。亚硝酸盐氮与硝酸盐氮、TDS 呈显著正相关, 与温度、pH 呈正相关, 与溶解氧、ORP 呈负相关。硝态氮与 TDS 呈显著正相关, 与温度呈正相关。

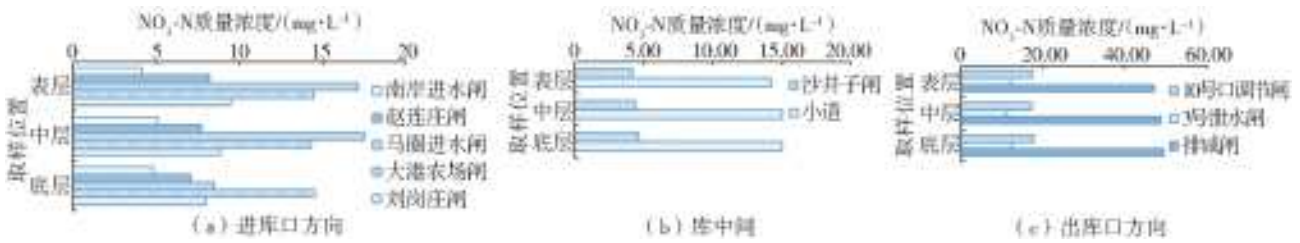


图3 各站点 NO₃-N 质量浓度垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of NO₃-N mass concentration at each site

表1 氮形态和理化因子相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis of nitrogen morphology and physical and chemical factors

相关因子	氨氮	亚硝氮	硝氮	温度	溶解氧	ORP	TDS	pH
氨氮	1							
亚硝氮	0.576**	1						
硝氮	0.905**	0.488**	1					
温度	0.207	0.117	0.282	1				
溶解氧	-0.342	-0.070	-0.336	-0.323	1			
ORP	-0.465**	-0.207	-0.504**	-0.664**	0.458**	1		
TDS	0.966**	0.528**	0.971**	0.226	-0.304	-0.468**	1	
pH	-0.020	0.002	-0.148	-0.621**	0.450**	0.750**	-0.037	1

注: * 表示在 0.05 水平(双尾),相关性显著。 ** 表示在 0.01 水平(双尾),相关性显著。

溶解氧夏季比秋季高 0.07 mg/L,低溶解氧条件下,NO₂-N 的质量浓度增多,溶解氧与 NO₂-N 呈现出显著的负相关性,溶解氧比较低,硝酸菌的活性受到了抑制,在硝化过程中亚硝酸菌占优势地位^[13]。研究^[14]表明好氧条件会抑制反硝化作用,使 NO₃-N 消耗减少。同时,好氧条件能够抑制 NO₃⁻ 异化还原为 NH₄⁺,促进硝化作用。

夏季的 ORP 比秋季低,说明夏季上覆水的还原性更强,硝化作用被抑制,反硝化作用和矿化作用增强,所以硝氮质量浓度下降^[15]。氨氮升高说明氨氮的形成速率远大于氨氮的消耗速率。

对比盐度分析,支霞辉等^[16]发现高盐度能够促进氨氮的降解,会导致亚硝酸盐的积累,夏季排咸闸盐度高。Cl⁻ 与 NO₃⁻ 竞争吸附位点,导致了硝酸盐氮质量浓度的增加^[17],TDS 与硝酸盐氮呈显著正相关。盐度升高,则 pH 降低,此时反硝化作用会减弱,氨氮释放增强^[18-19]。

秋季的 pH 大于夏季,离子的交换吸附和化学平衡的机制受到 pH 的影响^[20]。当 pH 偏高时,游离氨的比例较大,但当其质量浓度超过平衡质量浓度时,NH₃-N 挥发到大气中,平衡会向右移动,氨氮质量浓度降低^[21]。研究^[22]表明,pH 较大时,OH⁻ 会促进反应的化学平衡向右侧的方向进行,水体 NH₄⁺ 质量减少,沉积物-水界面 NH₄⁺ 质量浓度差就增大了,铵态氮由底泥向上覆水中释放量增加^[23-25]。

3.6 无机氮形态变化分析

图 4~6 从左到右依次为进水口(南岸进水闸、赵连庄闸、马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄闸)、库中间(沙井子闸、小道)和出水口(10 号口门调节闸、3 号泄水闸、排咸闸)。分析图 4~6 可知,硝态氮在无机氮中占据绝对的优势,春季和夏季基本都达到 50% 以上,秋季硝态氮占比更大,达到 70%。不同季节的氨氮平均质量浓度对比为秋季>夏季>春季,位于水库西北方向进水口氨氮质量浓度均高于西南方向出水口的质量浓度。进水位置氨氮普遍偏高的原因是西北部的农田施肥和渔业养殖,使氮质量浓度较高。沙井子闸春、夏、秋氨氮质量浓度分别为 1.6、1.2、1.9 mg/L,位于水库东南部的沙井子闸分布有芦苇,春夏水生植物快速生长,对有机氮有明显的去除作用,而在秋季随着植物开始腐烂,随之微生物活性降低水体氮质量浓度增加。不同季节亚硝酸盐氮质量浓度对比为秋季>夏季>春季。不同季节硝态氮浓度的对比为春季>夏季>秋季。由图 7 可以看出秋季的硝态氮质量浓度波动较小,空间分布差异小于春夏两季。春季硝态氮占比最高的是出水口处的 3 个闸。夏季硝态氮质量浓度占比最高的是马圈进水闸和大港农场闸,秋季刘岗庄闸硝态氮质量浓度占比最大。氨氮和硝态氮质量浓度都是春季>夏季>秋季。



图 4 水库春季氮形态变化

Fig. 4 Change of nitrogen morphology in reservoir in spring



图 5 水库夏季氮形态变化

Fig. 5 Change of nitrogen morphology in reservoir in summer



图 6 水库秋季氮形态变化

Fig. 6 Change of nitrogen morphology in reservoir in autumn

氨氮、亚硝酸态氮、硝态氮之和是水体中溶解态无机氮(DIN)。占 DIN 的比例可以作为水库受 DIN 污染的重要指标。水库中硝态氮占比最高,春季硝态氮占比 83.8%,夏季硝态氮占比 80.2%,秋季硝态氮占比 81.9%。分析春、夏、秋季无机氮的占比发现:从春季到夏季,进水方向氨氮占比春季高于夏季,库中间占比差别不大,出水方向氨氮占比夏季高于春季;从夏季到秋季,进水方向氨氮占比夏季高于秋季,库中间氨氮占比略有减小,出水方向 3 号泄水闸氨氮占比有升高,其他点位变化不大。

4 结 论

(1)由天津某水库夏季和秋季的温度对比发现:温度上游比下游略高,库中间的位置温度略低于进水和出水方向;进水方向溶解氧质量浓度高于出水方向,夏季库中间位置的溶解氧质量浓度最高,秋季进水的溶解氧质量浓度最大;秋季 ORP 高于夏季,氧化性越强则硝化反应越强,氨氮质量浓度低于夏季;与海岸距离越近,水体的 TDS 越高;秋季 pH 高于夏季,随深度增加 pH 降低。

(2)对比氨氮的质量浓度分析,夏季水样的马圈进水闸、大港农场闸、刘岗庄闸的氨氮超出了地表水环境质量标准 V 类水体的标准;对秋季水样分析,南岸进水闸、赵连庄闸、排咸闸、小道的氨氮超出了地表水环境质量标准 V 类水体的标准。

(3)比较无机氮的空间分布规律发现:氨氮质量浓度水库西岸高于东岸,进水方向质量浓度高于出水方向;硝态氮作为无机氮的主要形式,质量浓度进水口小于出水口;在垂直方向上,大多数点位是表层氨氮质量浓度最高,随深度增加氨氮质量浓度递减;排咸闸表层的亚硝氮质量浓度明显高于其他点位;深度增加则硝氮质量浓度降低。

(4)水库 DIN 占比最高的是硝态氮,春季硝态氮占比 83.8%,夏季硝态氮占比 80.2%,秋季硝态氮占比 81.9%。不同季节氨氮和硝态氮占比为春季>夏季>秋季。亚硝态氮占比为秋季>夏季>春季。

参考文献:

[1] 王居印,何宗保,李新丽,等.关于北大港水库生态保护与渔业发展的调研报告[J].天津水产,2013(2):3-6. DOI:CNKI:SUN:TJSC.0.2013-02-001.

[2] 常素云,程群,任必穷,等.天津滨海新区水库水质状况分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(6):54-57. DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.06054.

[3] 缴建华,于洁,白明,等.天津北大港水库渔业生态环境调查与评价[J].水资源与水工程学报,2015(3):90-95. DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.03.19.

[4] 王盼.天津北大港水库水环境容量研究[D].天津:南开大学,2015. DOI:10.7666/d.Y2939988.

[5] 祁艳丽,唐永杰,蔡树伯,等.淡水湖泊沉积物污染评价方法比较:北大港水库为例[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):26-30,38. DOI:10.117505/j.issn.167-643X2016.06.05.

[6] SCHLESINGER W H. On the fate of anthropogenic nitrogen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(1):203. DOI:10.1073/pnas.0810193105.

[7] JEPPESEN E, SONDERGAARD M, JENSEN J P, et al. Lake responses to reduced nutrient loading: An analysis of contemporary long-term data from 35 case studies[J]. Freshwater Biology, 2010, 50(10):1747-1771. DOI:10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x.

[8] JENSEN J P, JEPPESEN E, KRISTENSEN P, et al. Nitrogen loss and denitrification as studied in relation to reductions in nitrogen loading in a shallow, hypertrophic lake (Lake Sobygard, Denmark)[J]. Interna-

- tionale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1992, 77(1): 29-42. DOI: 10. 1002/iroh. 19920770104.
- [9] WU T, QIN B, BROOKES J D, et al. Spatial distribution of sediment nitrogen and phosphorus in Lake Taihu from a hydrodynamics-induced transport perspective[J]. Science of The Total Environment, 2019, 650 (PT. 1 (835-16)): 1554-1565. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2014. 0710.
- [10] 周骏, 陈小兰, 李松, 等. 典型山区轻度营养型水库底泥氮磷释放规律[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 65-72. DOI: 10. 16351/j. 1672-6987. 2018. 01. 011.
- [11] 朱慧芳. 北大港水库水质安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. DOI: 10. 7666/d. y1676587.
- [12] 赵珺. 北大港水库生态修复技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2016. DOI: CNKI; CDMD; 2. 1017. 128218.
- [13] 周丹丹, 马放, 董双石, 等. 溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. 环境工程学报, 2007, 1(4): 25-28. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-9108. 2007. 04. 006.
- [14] JANTTI H, HIETANEN S. The effects of hypoxia on sediment nitrogen cycling in the baltic sea[J]. Ambio, 2012, 41 (2): 161-169. DOI: 10. 3354/meps191001.
- [15] 沈帅, 马腾, 杜尧, 等. 江汉平原典型地区季节性水文条件影响下氮的动态变化规律[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 674-684.
- [16] 支霞辉, 丁峰, 彭永臻, 等. 常温条件下短程硝化反硝化生物脱氮影响因素的研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(4): 254-256. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3865. 2006. 04. 005.
- [17] BLACKBURN T H, HENRIKSEN K. Nitrogen cycling in different types of sediments from Danish waters[J]. Limnology and Oceanography, 1983, 28(3): 477-493. DOI: 10. 4319/lo. 1983. 28. 3. 0477
- [18] GREEN S M, MACHIN R, CRESSER M S. Effect of long-term changes in soil chemistry induced by road salt applications on N-transformations in roadside soils[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(1): 20-31. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2007. 06. 005.
- [19] LANCASTER N A, BUSHEY J T, TOBIAS C R, et al. Impact of chloride on denitrification potential in roadside wetlands[J]. Environmental Pollution, 2016, 212(5): 216-223. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2016. 01. 068.
- [20] 梁淑轩, 贾艳乐, 闫信, 等. pH 值对白洋淀沉积物氮磷释放的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(36): 20859-20862. DOI: CNKI; SUN; AHNY. 0. 2010-36-133.
- [21] 员建, 陈轶, 李琼, 等. pH 对剩余污泥中氮、磷释放的影响[J]. 中国给水排水, 2010, 26(1): 96-98. DOI: CNKI; SUN; GSPS. 0. 2010-01-032.
- [22] MORMILE M R, ROMINE M F, GARCIA M T, et al. Halomonas campisalis sp. nov., a Denitrifying, Moderately Haloalkaliphilic Bacterium[J]. Systematic and Applied Microbiology, 1999, 22(4): 551-558. DOI: 10. 1016/S0723-2020(99)80008-3.
- [23] 扈传昱, 潘建明, 刘小涯, 等. 南大洋沉积物间隙水中营养盐分布及扩散通量研究[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 102-107. DOI: 10. 3321/j. issn: 0253-4193. 2006. 04. 013.
- [24] KEMP W M, SAMPOU P, CAFFREY J, et al. Ammonium recycling versus denitrification in Chesapeake Bay sediments [J]. Limnology & Oceanography, 1990, 35(7): 1545-1563. DOI: 10. 4319/lo. 1990. 35. 7. 1545.
- [25] 宋洪旭, 邢荣莲, 陈丽红, 等. 温度和 pH 对刺参养殖池塘沉积物营养盐释放的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 835-842. DOI: 10. 14088/j. cnki. issn0439-8114. 2015. 04. 017.