厦门两水库冬季水体氮的空间分布及相关环境因子*

汪 剑 郭沛涌** 钟燕华 邱有信 赵晓艳
(华侨大学化工学院环境科学与工程系,福建厦门 361021)

摘 要 探讨了厦门市湖边、石兜-坂头两座水库冬季水体氮的空间分布特征,并分析了各形态氮与环境因子间的相关性,揭示了水库水体中氮形态的迁移转化,为水库水污染防治提供科学依据。研究表明:湖边水库水体 TN 的平均含量为 1.36 mg·L^{-1},石兜-坂头水库的石兜、坂头库区水体 TN 的平均含量分别为 1.44、1.45 mg·L^{-1}。湖边水库潜在污染为外源污染,但石兜-坂头水库潜在污染为内源污染。湖边水库和石兜-坂头水库水体氮形态都以无机氮为主,占 TN 的比例分别为 61.7% 和 58.0%。湖边水库主要无机氮为 NO_3^-,石兜-坂头水库主要无机氮是 NH_4^+。湖边水库 NH_4^+ 与 NO_3^- 存在显著正相关性,NH_4^+ 与 DO 存在负相关性;石兜-坂头水库坂头库区 NH_4^+ 与透明度存在正相关性,与 pH 存在负相关性。

关键词 水库;氮形态;空间分布;相关性;环境因子
中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)8-1751-06

Spatial distributions of water body nitrogen and their relations with environmental factors in two reservoirs in Xiamen during winter. WANG Jian, GUO Pei-yong**, ZHONG Yan-hua, QIU You-xin, ZHANG Xiao-yan (*Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen* 361021, *Fujian, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(8): 1751-1756.

Abstract: This paper probed into the spatial distribution patterns of nitrogen (N) in the water bodies of Hubian and Shidou-Bantou reservoirs in Xiamen during winter, and analyzed the relationships of the N forms in the water bodies with environmental factors, aimed to provide scientific bases for the prevention and treatment of the water pollution of the reservoirs. The average concentrations of total N in the water bodies of Hubian reservoir and of the Shidou and Bantou sections of Shidou-Bantou reservoir were 1.36, 1.44, and 1.45 mg·L^{-1}, respectively, with the pollution source being exogenous for the Hubian reservoir whereas endogenous for the Shidou-Bantou reservoir. Inorganic N was the major N form in the two reservoirs, accounting for 61.7% and 58.0% of the total N in Hubian and Shidou-Bantou reservoirs, respectively. The inorganic N in Hubian reservoir was mainly NO_3^--N, and that in Shidou-Bantou reservoir was mainly NH_4^+-N. In Hubian reservoir, the NH_4^+-N was positively correlated with NO_3^--N but negatively correlated with DO; and in the Bantou section of Shidou-Bantou reservoir, the NH_4^+-N was positively correlated with transparency but negatively correlated with pH.

Key words: reservoir; nitrogen form; spatial distribution; correlation; environmental factor.

随着社会和经济的高速发展以及人为活动的加剧,污染排放增加,河流污染相对严重,供水水质退化较为明显。水库成为了重要的供水水源,水库功能由发电、防洪转向供水也已成为世界性的趋势(Straskraba *et al.*, 1993;汪恕诚,2003;韩博平,2010)。因此,对水库水质的监测成为重要的项目。氮是水生生态系统中最主要的营养元素之一,通过氨化、硝化和反硝化作用,氮以多种形态参与水体中的生物过程,并能与大气发生交换,成为水体初级生产力关键的限制性因素之一(金相灿和屠清瑛,1990;Hamilton *et al.*,2001;沈志良,2003;Galloway *et al.*,2004;曾巾等,2007)。铵和硝酸盐不仅是引起

*国家自然科学基金项目(20777021)、教育部科学技术研究重点项目(210253)和福建省自然科学基金项目(D0610012 和 2010J01043)资助。
**通讯作者 E-mail: peiyongguo@163.com
收稿日期:2010-01-04 接受日期:2011-04-25

水体富营养化的重要因子,而且超标会对动、植物产生危害,并使水体生态环境恶化,硝酸盐还影响人类的健康,流行病学研究表明,当硝酸盐浓度高于10 mg·L^{-1}时会引发肿瘤问题(Fields,2004)。因此,研究水库水体氮的空间分布特征,探讨水体中氮形态与环境因子之间的相关性,为揭示水库水体中氮形态的迁移转化和对水库水质的预测、水污染防治等提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

湖边水库位于厦门本岛东北部,是厦门本岛集水面积最大的一座小型淡水水库,汇水面积为9.11 km^2,水库设计正常蓄水位为14.7 m。石兜-坂头水库位于厦门集美区后溪镇西北部。其中坂头库区于1956年建成,经多次扩建后,现正常蓄水位49.26 m,正常库容6.28×10^7 t,石兜库区位于石兜村下游1 km处的埔尾村,截引苎溪河长10.70 km,集雨面积59.30 km^2,正常蓄水位为40.40 m,总库容8.06×107 m^3,正常库容4.55×10^7 m^3,是座基城市供水、农田灌溉和防洪为一体的中型水利工程(肖云雪,2005;刘启明等,2009)。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点的布设 根据水库库区的形态学特征,用GPS对采样点进行定位,于2009年12月在湖边水库选取具有代表性的9个采样点(图1),H1位于水库出水口(大坝前),H2位于水库东北部,H3位于库心,北面为水厂进、出水口,H4位于水库东部,H5和H6位于水库南部湖湾,H7和H8、H9位于水库西南部湖湾,H9为水库进水口。同样在石兜-坂头水库依据上述采样点的布点原则,选取具有代表性15个采样点(图1)。包括石兜库区S1位于大坝处,S2位于水库的水质监测点,S3、S4、S6位于水库中部,S5位于水库南面,S7、S8位于水库上游,其中S6采样点北面有山间小溪流下。坂头库区包括B1位于水库进水口和大坝处,B2、B3、B4位于水库中部和B5、B6、B7位于水库下游。整个石兜-坂头水库无水生植物生长。

1.2.2 样品的采集和分析 现场使用便携式多参数水质分析仪(日本,HORIBA W-23)测定表层水的温度、pH、溶解氧、浊度等环境因子,用透明刻度盘现场测定透明度。使用2.5 L采水器采集距离表层50 cm的水样,采集的水样尽快运回实验室分析。

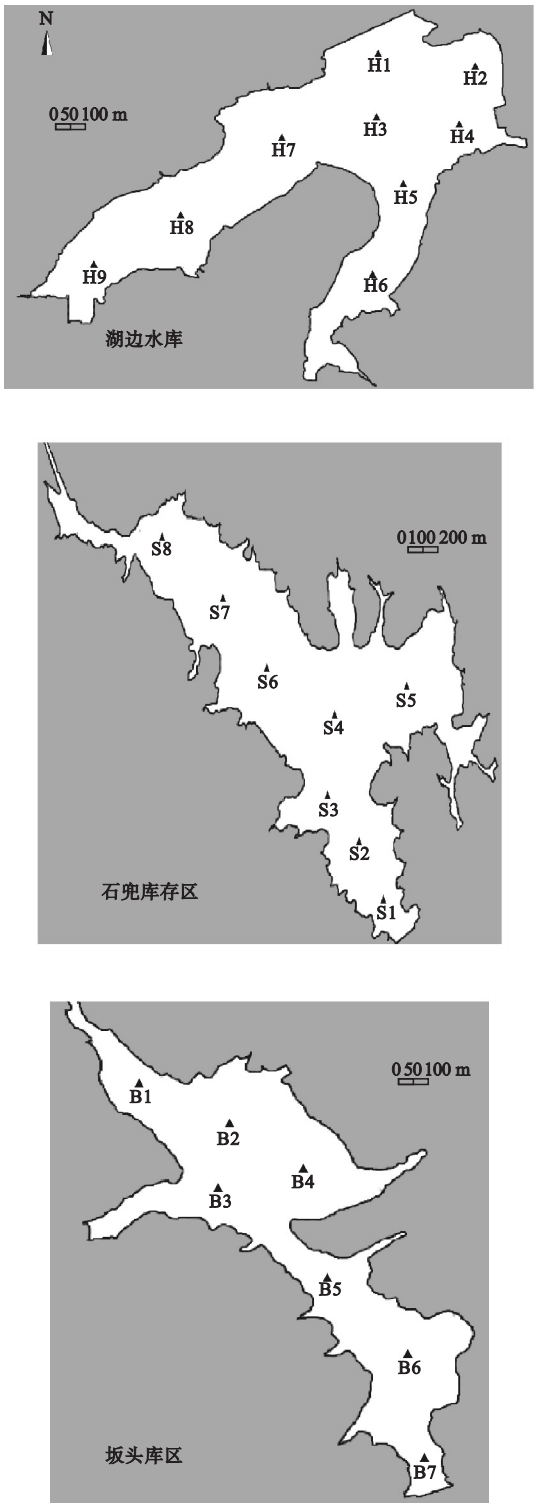


图1 湖边、石兜-坂头水库采样点分布示意图
Fig. 1 Sampling sites in Hubian and Shidou-Bantou reservoirs

直接取水库原水样用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定总氮;纳氏试剂光度法测定氨氮;酚二磺酸光度法测定硝酸盐氮(《水和废水监测分析方法(第4版)》,2000)。

2　结果与分析

2.1　厦门湖边水库冬季水体氮的空间分布特征

湖边水库 TN 含量在 1.06 ~ 1.95 mg · L^{-1},平均为 1.36 mg · L^{-1}(图 2)。最大值出现在 H9 号采样点为 1.95 mg · L^{-1},H9 号采样点处于水库西南部湖湾角落,与厦门湖里区冬季的风向一致,水库里的杂物都随风飘到 H9 号采样点附近角落,且不容易降解造成的;最低点出现在 H6 号采样点,可能与其远离快速公交路线和人为活动带有关。湖边水库 NH_4^+ 含量在 0.23 ~ 0.29 mg · L^{-1},平均含量为 0.26 mg · L^{-1}(图 2)。H4 ~ H6、H9 号采样点略偏高,NH_4^+ 含量在 H9 号采样点偏高和 TN 的分布趋势一样。H4 ~ H6 号采样点偏高与该处环境因子透明度低有关,透明度低表明浮游植物活动频繁,造成 NH_4^+ 含量偏高(方涛等,2004)。水库 NO_3^- 含量在 0.25 ~ 0.65 mg · L^{-1},平均含量为 0.50 mg · L^{-1}(图 2)。水库 H1 号采样点偏低,H4 ~ H6、H9 号采样点偏高,H9 号采样点偏高与 TN 一样受到一定污染有关,和总氮一样,H1 号采样点偏低和 H4 ~ H6 采样点偏高,与其 DO 高于 H1 号采样点有关,湖边水库平均 DO 为 11.0 mg · L^{-1},在有氧状态下,DO 越高,NO_3^- 形态越稳定(范成新和相崎守弘,2001)。

2.2　厦门石兜-坂头水库冬季水体氮的空间分布特征

石兜-坂头水库的石兜库区 TN 含量在 1.18 ~ 1.69 mg · L^{-1},均值为 1.44 mg · L^{-1};坂头库区 TN 含量在 1.37 ~ 1.59 mg · L^{-1},均值为 1.45 mg · L^{-1}(图 3)。石兜库区 TN 最大值出现在 S1 号采样点,与 1 号采样点处于大坝边,人为影响较严重有关。

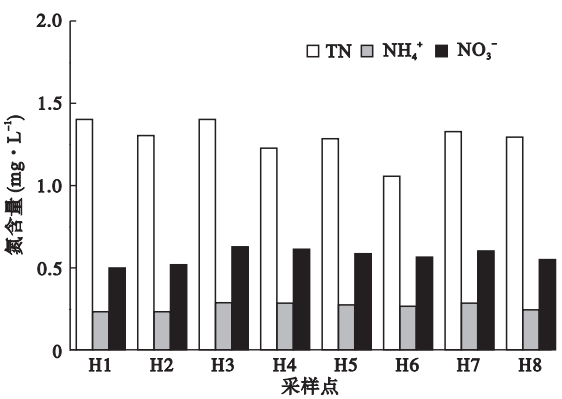


图 2　湖边水库水体氮的空间分布特征

Fig. 2　Spatial distribution of nitrogen forms in the water of Hubian reservoir

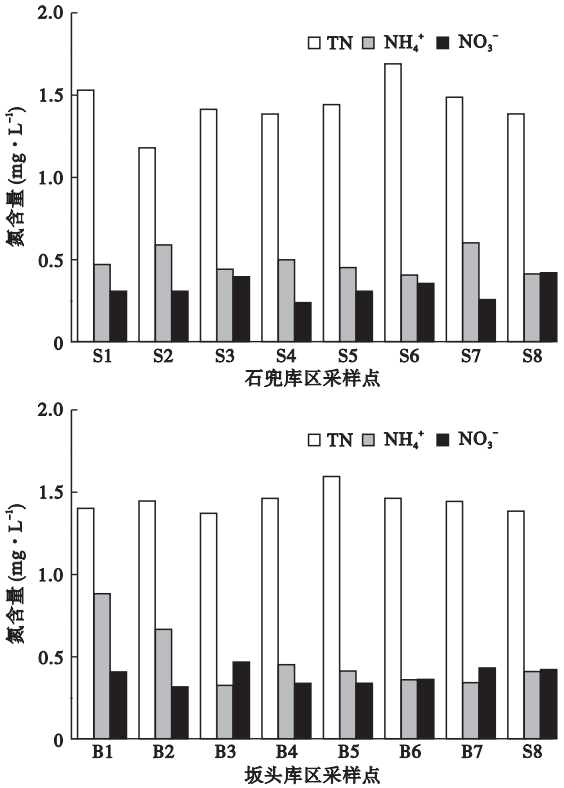


图 3　石兜-坂头水库水体氮的空间分布特征

Fig. 3　Spatial distribution of nitrogen forms in the water of Shidou-Bantou reservoir

湖库上游 H8 号采样点到 S6 号采样点,TN 含量逐渐上升,在 S6 号采样点达到最大,可能与水流自入库口 S8 号采样点流下,随着流速下降,悬浮颗粒物在 S6 号采样点的沉降速率达到最大(Brzakova *et al.*,2003),因此,内源污染可能是造成 S6 点氮含量偏大的原因。坂头库区 TN 含量偏差不大,这与整个坂头库区水势平坦,没有较强的点源污染有关。

石兜库区 NH_4^+ 含量在 0.40 ~ 0.61 mg · L^{-1},平均含量为 0.49 mg · L^{-1}。坂头库区 NH_4^+ 含量在 0.33 ~ 0.87 mg · L^{-1},均值为 0.49 mg · L^{-1}(图 3)。石兜库区最高点出现在 S2 号采样点和 S7 号采样点,可能与 S7 号采样点受到从入库口处排放的外源污染有关。S2 号采样点处在大坝的最深处,可能与长期的沉积物积累,有机氮矿化成 NH_4^+ 有关(玉坤宇等,2001)。坂头库区从上游大坝 B1 号处到下游总体 NH_4^+ 含量的趋势是减小的,可能与 B1、B2 号采样点处于外来水源的进水口有关。

石兜库区 NO_3^- 含量在 0.24 ~ 0.42 mg · L^{-1},平均含量为 0.32 mg · L^{-1}。最大值出现在入库口 S8 号采样点。坂头库区 NO_3^- 含量在 0.31 ~ 0.47

mg·L^{-1},平均含量为0.37 mg·L^{-1},最大值出现北面的B3号采样点,B3号采样点偏大可能与山上有一处小溪流下有关,另外B7号采样点NO_3^-含量也偏高,B7号采样点处于水库下游与其水位较浅有关(图3)。

3 讨 论

3.1 两水库冬季水体氮的空间分布特征

水库是一种半人工半自然的水体类型,兴建水库是人类调节自然水资源在时间和空间上分布的主要手段(汪恕诚,2003)。而氮是浮游植物生长必需的营养元素,但过高的氮浓度会引起水体浮游植物群落结构和种群数量发生改变,浮游植物种类多样性减少而优势种生物数量剧增,甚至形成"水华",从而导致水质恶化,影响水库的供水功能(Straskraba *et al.*,1993)。湖边水库TN的平均含量为1.36 mg·L^{-1},石兜-坂头水库的石兜库区和坂头库区TN的平均含量分别为1.44和1.45 mg·L^{-1}。氮污染分内源污染和外源污染,二者均不可忽略。水库的外源性氮主要来自入库河流,与降水量和流域面积直接相关(Hart *et al.*,2002)。湖边水库2009年初经过疏浚,内源污染暂时得到有效控制;但水库地处市中心,外源氮污染严重,而且有研究表明,疏浚湖泊随着时间的推移,良好的水质状态不能得到较好的保持,个别甚至于比原先的污染程度还有所加重(濮培民等,2000)。石兜-坂头水库四面环山,属于山谷水库,周围人为活动偏少,主要外源污染来至于游客、垂钓、入库的自然小溪。但对大多数水库而言,外源既使得到有效控制,底泥内源也可使水体污染得到较长时间的延续,其主要原因是内源负荷的影响(马红波,2003;Lu *et al.*,2004),因为长期沉降于湖底的内源污染物在生物以及化学或者物理的作用下发生的营养物质释放,可能会导致水体的富营养化(Sondergaard *et al.*,1999)。因此,湖边水库潜在污染源为外在污染,石兜-坂头水库潜在污染为内源污染。

天然水体中的氮主要以溶解的N_2、NH_4^+、NO_3^-、NO_2^-及有机氮等形式存在,其中溶解的无机氮是可被植物直接吸收利用的最重要的形式,NH_4^+和NO_3^-是水体中最主要的2种无机氮形态(沈志良,2003)。无机氮中亚硝态氮是氮循环的中间产物,本次研究的3座水库中的NO_2^-含量均低于化学检测下限0.01 mg·L^{-1}。因此,厦门两水库冬季水体中无机氮(DIN)主要是氨氮和硝态氮之和,湖边水库DIN的平均含量为0.84 mg·L^{-1},占TN含量的61.7%。石兜-坂头水库的石兜库区和坂头库区DIN的平均含量分别为0.81和0.87 mg·L^{-1},分别占TN的56.2%和59.7%。DIN占TN的百分比略低于徐宁2000年对广东大中型水库的氮污染调查(徐宁等,2004)。可以看出,DIN是水库主要的氮形态,但2座水库DIN相差不大。水体中的NO_3^-在有氧条件下是最稳定的形态(范成新和相崎守弘,2001)。湖边水库NO_3^-含量占DIN的68.6%。石兜-坂头水库的石兜库区和坂头库区NO_3^-含量分别占DIN的40.0%和43.6%。表明湖边水库主要DIN是NO_3^-,受硝酸盐类污染较严重,可能与水库处于市中心的地理位置有关。湖边水库NH_4^+含量占DIN的31.4%。石兜-坂头水库的石兜库区和坂头库区NH_4^+含量分别占DIN的60.0%和56.0%。表明石兜-坂头水库的石兜库区和坂头库区主要DIN形式是NH_4^+,而NH_4^+是异养细菌分解含氮有机物质的主要终产物(Zhong *et al.*,2010)其在DIN所占的比例可作为水库是否受到DIN污染的重要指标。石兜库区和坂头库区NH_4^+含量过大可能与水库内源污染释放有关。

3.2 两水库水体氮与环境因子间的相关性

水体不同的环境因子(如T、DO、pH等)对水库氮的迁移转化存在明显的影响(Desprez,2000)。湖边水库NH_4^+和NO_3^-存在显著正相关性($P<0.01$),NH_4^+与DO存在负相关性($P<0.01$)(图4),湖边水库的平均DO是11.0 mg·L^{-1},有研究表明,水库在有氧状态下,NH_4^+经亚硝酸细菌和硝酸细菌的作用转化为NO_3^-,水体由于硝化作用,NH_4^+和NO_3^-含量呈相反的变化趋势(Desprez,2000),但湖边水库NH_4^+和NO_3^-存在显著正相关性,水库中NH_4^+和NO_3^-受到其他因素影响,表明水体中NH_4^+和NO_3^-在内部迁移转化时,同时受到其他外在因素的影响,其中外来氮源的污染可能是导致NH_4^+和NO_3^-呈现正相关性的直接原因。

石兜库区氮含量与环境因子不存在明显相关性。坂头库区NH_4^+与pH存在负相关性($P<0.01$),与透明度存在正相关性($P<0.01$)(图4)。坂头库区pH在7.44~7.74,均值为7.6,pH值越低,表明水体中氢离子含量越高,会引起NH_4^+离子减少,直接导致氮含量偏低。NH_4^+与透明度的正相关性,与

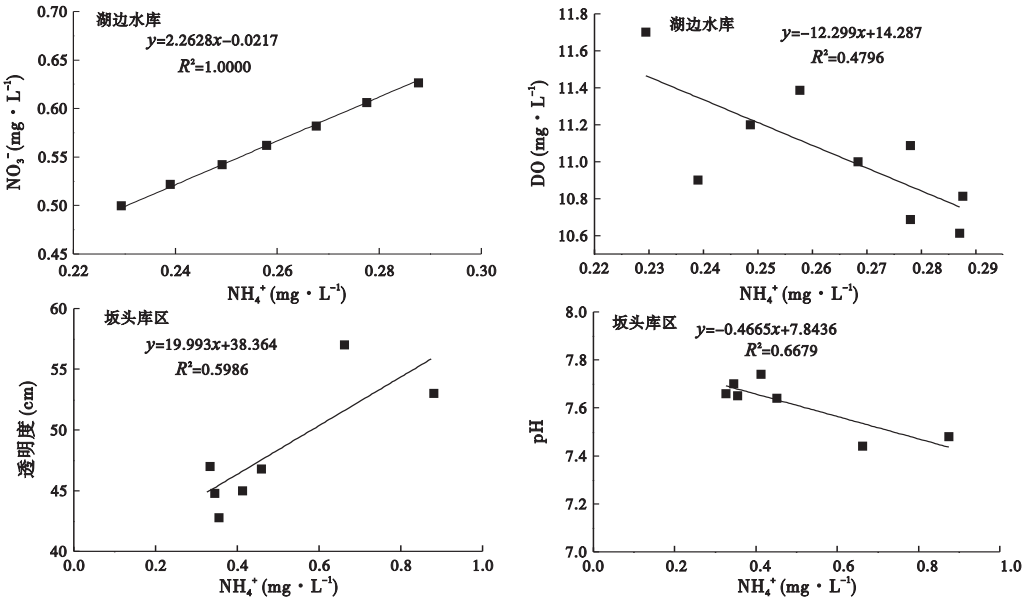


图 4　两水库水体中氮含量与环境因子间的相关性
Fig. 4　Relationship between nitrogen and environmental factor in two reservoirs

方涛等(2004)的研究相反,通常透明度越低,NH_4^+含量越高,说明坂头库区 NH_4^+含量还受到其他因素的影响。另外,石兜-坂头水库的平均电导率为 58 μS · cm^{-1},低于湖边水库(327 μS · cm^{-1}),较高的电导率通常与周边环境的外源污染排放有关,与李秋华等(2005)的研究结果相似。

4　结　论

湖边水库 TN 的平均含量为 1.36 mg · L^{-1},石兜-坂头水库的石兜和坂头库区 TN 的平均含量分别为 1.44 和 1.45 mg · L^{-1}。湖边水库潜在污染为外源污染,但石兜-坂头水库潜在污染为内源污染。

湖边水库 NH_4^+平均含量为 0.26 mg · L^{-1},NO_3^-平均含量为 0.50 mg · L^{-1}。石兜-坂头水库的石兜和坂头库区 NH_4^+的平均含量分别为 0.49 和 0.49 mg · L^{-1},NO_3^-的平均含量分别为 0.32 和 0.37 mg · L^{-1}。湖边水库和石兜-坂头水库水体都是无机氮占据主要形式,湖边水库主要无机氮是 NO_3^-,而石兜-坂头水库主要无机氮是 NH_4^+。

湖边水库 NH_4^+和 NO_3^-存在显著正相关性,NH_4^+与 DO 存在负相关性。石兜-坂头水库坂头库区 NH_4^+与透明度存在正相关性,与 pH 存在负相关性。

参考文献

范成新, 相崎守弘. 2001. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响. 湖泊科学, **20**(5): 425-431.

方　涛, 敖鸿毅, 刘剑彤, 等. 2004. 滇池水体理化环境状况时空分布格局研究. 水生生物学报, **28**(2): 124-130.

韩博平. 2010. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, **22**(2): 151-160.

金相灿, 屠清瑛. 1990. 湖泊富营养调查规范(第 2 版). 北京: 中国环境科学出版社.

李秋华, 林秋奇, 韩博平. 2005. 广东大中型水库电导率分布特征及其受 N、P 营养盐的影响. 生态环境, **14**(1): 16-20.

刘启明, 王莹莹, 黄　宁, 等. 2009. 厦门坂头水库扩容对土壤氮磷浸出的模拟试验研究. 水土保持研究, **16**(3): 238-240.

马红波, 宋金明, 吕晓霞, 等. 2003. 渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用. 地球化学, **32**(1): 48-54.

濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 2000. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? 湖泊科学, **12**(3): 269-279

沈志良. 2003. 长江无机氮的分布变化和迁移. 海洋与湖沼, **34**(14): 355-363.

汪恕诚. 2003. 资源水利-人与自然和谐相处. 北京: 中国水利水电出版社.

肖云雪. 2005. 厦门市坂头水库下游洪水风险分析及应用. 水利科技, (3): 3-5.

徐 宁, 段舜山, 林秋奇, 等. 2004. 广东大中型供水水库的氮污染与富营养化分析. 生态学杂志, **23**(3): 63-67.

玉坤宇, 刘素美, 张 经, 等. 2001. 海洋沉积物-水界面营养盐交换过程的研究. 环境科学, **20**(5): 425-431.

曾 巾, 杨柳燕, 肖 琳, 等. 2007. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用. 湖泊科学, **19**(4): 381-389.

Brzakova M, Hejzlar J, Nedoma J. 2003. Phosphorous uptake by suspended and settling seston in a stratified reservoir. *Hydrobiologia*, **504**: 30-49.

Desprez M. 2000. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: Short and long-term post-dredging restoration. *ICES Journal of Marine Science*, **57**: 1428-1438.

Fields S. 2004. Global nitrogen: Cycling out of control. *Environmental Heath Perspectives*, **112**: A556-A563.

Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, *et al*. 2004. Nitrogen cycles, present, and future. *Biogeochemistry*, **70**: 153-226.

Hamilton SK, Tank JL, Raikow DF, *et al*. 2001. Nitrogen uptake and transformation in a Midwestern U. S. Stream: A stable isotope enrichment study. *Biogeochemistry*, **54**: 297-724.

Hart BT, von Dok W, Djuangsih N. 2002. Nutrient budget for Saguling reservoir, west java, Indonesia. *Water Research*, **36**: 2152-2160.

Lu XX, Song JM, Li XG, *et al*. 2004. Characteristics of nitrogen forms in the Southern Yellow Sea surface sediments. *Acta Oceanologica Sinica*, **23**: 473-481.

Sondergaard M, Jensen JP, Jeppeden E. 1999. Internal phosphorus loading in shallow Danish Lakes. *Hydrobiologia*, **408/409**: 145-152

Straskraba M, Tundisi JG, Duncan A. 1993. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management// Straskraba M, Tundisi JG, Duncan A, eds. Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers: 213-288.

Zhong JC, Fan GX, Liu GF, *et al*. 2001. Seasonal variation of potential denitrification rates of surface sediment from Meiliang Bay Lake, China. *Journal of Environmental Sciences*, **22**: 961-967.

作者简介 汪 剑,男,1987年生,硕士研究生。主要从事水库水生态学研究。E-mail: jianwanghqu@163.com

责任编辑 魏中青