

滴水湖水系中氮的污染特征及其影响因子

张焕焕, 毕春娟*, 陈振楼, 王薛平 (华东师范大学地理科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 为探讨滴水湖水系各形态氮的污染特征、不同水体间的各形态氮对比特征、滴水湖水体各形态氮与环境因子的关系, 2013年春季, 在上海市最大人工湖水系采集表层水样品 28 个、沉积物样品 22 个, 测定各形态氮及总氮含量, 并通过模拟实验着重探讨滴水湖水体盐度对沉积物向上覆水体释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响。结果显示, 滴水湖水体各氮污染水平较高, 表层水体氮的空间差异性相对沉积物中氮的差异性较小。滴水湖水体无机氮以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主, 沉积物中氮以有机氮为主。周围水系含氮量较高, 其中引入水源氮是滴水湖水体中氮的主要来源之一。盐度模拟实验显示, 随着上覆水体盐度的增大, 底泥中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的释放量会增加并趋于平衡, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放量则有降低并趋于稳定的趋势。

关键词: 滴水湖; 氮; 氮形态; 盐度; 表层水; 沉积物

中图分类号: X142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2014)10-2646-07

Pollution characteristics of nitrogen and its influence factors in water and sediments of Dishui Lake water system.

ZHANG Huan-huan, BI Chun-juan*, CHEN Zhen-lou, WANG Xue-ping (Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China). *China Environmental Science*, 2014,34(10): 2646~2652

Abstract: To investigate the characteristics of nitrogen, compare different nitrogen forms in different systems and analyze the relations of nitrogen and environmental factors, twenty-eight surface water samples and twenty-two sediment samples were collected from the largest man-made lake system in Shanghai in spring of 2013 to examine the contents of nitrogen. By simulating experiments on the effect of salinity in the overlying water, the exchange of ammonia and nitrate in the sediment-water was analyzed. The results indicated that average level of nitrogen in Dishui Lake system was high. The spatial differences of nitrogen in the surface water were smaller than that in the sediment. Nitrate was the main form of inorganic nitrogen in the water and organic nitrogen was the main nitrogen form in the sediment. The contents of nitrogen in rivers around the Dishui Lake were higher, suggesting that this river water was one of the main nitrogen sources of the Dishui Lake. The simulated experiments showed when the salinity in the overlying water was increased, the content of nitrate released from the sediments to the water would increase and tend to balance out with each other. but the content of ammonia released from the sediments to the water would decrease then reach a stable stage.

Key words: Dishui Lake; nitrogen; the nitrogen form; salinity; overlying water; sediments

湖泊水体富营养化是当今世界面临的一个严重的环境问题^[1]。尤其是浅水湖泊的富营养化日益成为各国的主要环境问题。目前已有很多关于湖泊富营养化因子的研究^[2]。现有研究表明氮磷是淡水湖泊富营养化的主要因子^[3-4]。田华等^[5]指出近来滴水湖湖泊中 N/P 在持续下降, 而 N/P 持续下降将会造成湖泊的营养状态由磷限制转化为氮限制。湖泊底泥是湖泊系统的重要组成部分, 是营养物的主要蓄积地^[6], 内源释放^[7-8]是上覆水体中氮的主要来源之一, 是维持湖泊富营养

化的主要原因之一^[9-10]。在适宜的条件下底泥向上覆水体中释放各种营养物质, 但不是所有形态氮都可以直接释放到水体中, 各形态氮含量及所占比例直接影响其参与地球化学过程以及对氮循环贡献的大小^[11]。因此研究湖泊底泥和水中各形态氮污染特征对理解水体氮循环过程以及合

收稿日期: 2014-02-15

基金项目: 上海市科委社会发展重点项目(12231201900); 国家自然科学基金(41271472); 上海市自然科学基金(12ZR140900)

* 责任作者, 副教授, cjbi@geo.ecnu.edu.cn

理控制湖泊富营养化具有指导意义。

滴水湖作为中国在海滩上开挖的最大人工湖,扮演着上海郊区生态缓压区和水域景观的双重角色,随着附近人口的迁入、城市的建设以及游客的增加,向滴水湖水系排放的污染物增多,滴水湖水体污染问题加重.王延洋等^[12]、李晓波等^[13]、刘水芹^[14]和朱梦洁等^[15]曾对滴水湖水质生态系统及动植物结构进行研究.何玮等^[16]对滴水湖水体理化指标进行探讨.这些研究多于几年前进行并且限于对滴水湖表层水体水质问题的研究,对其底泥—水中氮的污染特征鲜有报道.本文对滴水湖水系氮污染特征进行探究,研究了滴水湖水域沉积物—表层水体中的氮赋存形态特征及其影响因素,以期为后期生态修复和综合防治滴水湖富营养化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滴水湖(30.896°N, 121.934°E)位于上海市东南方,是上海浦东临港新城主城区的中心人工湖.滴水湖属于城市景观湖泊,承担着上海临港新城主城区生态、排涝、防汛和景观等重要功能^[5].滴水湖呈圆形,面积为 5.56km²,平均水深 3.7m,最深处 6.2m.湖中有三个小岛,周边水系呈“三链、七射”的网状格局,滴水湖湖水源于大治河引黄浦江水,引水周期不规律,近几年引水周期一年两次,水体补给主要靠降水和周边径流.滴水湖水源本身富营养化程度较高,背景底质是河口海滩滩涂,具有较高的土壤盐化程度,水质一直呈现富营养化趋势^[17].

1.2 样品采集

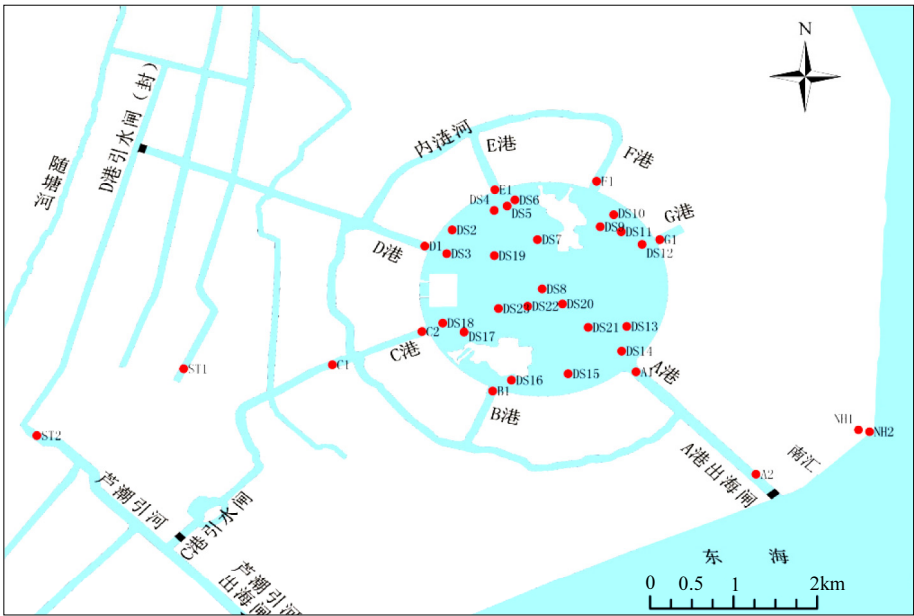


图 1 滴水湖水系采样点分布
Fig.1 Location of sampling sites in the Dishui Lake System

2013 年春季,对滴水湖湖区及其引河河流(ST1、ST2)、入湖河流进行沉积物样和表层水样采集(图 1).每个样点设置 3 个平行样,用 2L 有机玻璃采水器(永安有机玻璃有限公司)采取表层水样,装于聚乙烯瓶中,各样点的 3 个平行样在实验室经过 0.45μm 微孔滤膜过滤取得水样混合样

品,于-4℃下冷冻保存,用于测定水体中溶解性总氮(TN)以及 NH₃-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 浓度.底泥样采用采泥器(Ekman-Brige,德国 HYDRO-BIOS 公司)采集,采集的沉积物样品均装入聚乙烯密封袋中,带回实验室,用冷冻干燥机(CHRIST, Germany)冻干,冻干后除杂、混匀后进行研磨,最

后过 60 目的尼龙筛,用于测定各形态氮和有机碳(TOC).采样过程中手持 GPS 定位.现场用便携式仪器测定水样理化指标 pH 值、水温(T)、溶解氧(DO)、盐度、总悬浮物颗粒 TSS 等,以及沉积物的温度 T 、pH 值等.

1.3 分析方法

水中溶解性总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)采用纳氏试剂分光光度法,硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用紫外(双波)分光光度法,亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)采用 N-(1-萘基)-乙二胺 分光光度法^[18],水中 TOC 用 TOC 仪(liquTOC II, Germany)测定.

沉积物中总氮(TN)采用元素分析仪测定,氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)采用次溴酸钠氧化分光光度法,硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用紫外(双波)分光光度法,亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)采用 N-(1-萘基)-乙二胺 分光光度法,有机碳(TOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB7857-87)测定^[19].沉积物样测定前的预处理方法:用 1mol/L 的 KCl 溶液将筛得沉积物样按土液比 1:5 混合,在 25℃ 恒温下水浴振荡 2h,取出离心管于 4000r/min 离心 10min,用 0.45 μm 滤膜过滤,取上清液分析底泥中的上述氮含量.

1.4 数据处理

数据处理采用 SPSS 19.0、Excel 2013 和 Origin 8.0 软件处理,运用 ArcGIS10.0 作采样点图.

1.5 质量控制

采样和实验过程中所用容器均经 10%盐酸溶液浸泡 24h,用自来水冲洗干净,最后用超纯水清洗 3 遍以上,每个指标于 24h 内完成测定.测定过程中使用万分位天平,所用试剂均为优级纯,每批实验均设 1 个平行样,3 个空白样,8 个标准样进行同步实验.数据分析显示,各指标标准曲线的 R^2 值均达 0.9996 以上,平行样误差均在 2%以内.

2 结果与讨论

2.1 滴水湖水体中总氮与无机氮含量水平

由表 1 可知,目前滴水湖水体 TN 浓度在 2.045~4.601mg/L,平均值为 3.271mg/L.根据我国地表水环境质量标准,滴水湖水体含氮量属劣 V 类水体.沉积物 TN 含量在 399.602~1234.690mg/kg,平均值为 581.356mg/kg,各采样点沉积物 TN 含量差异比较大.表层水体中各形态氮在各采样点空间差异性比沉积物中各形态氮的空间差异性要小,这是由于水体中污染物更容易扩散,使得各采样点含量差异性不大.而沉积物中各氮空间差异性较大与沉积物中物质扩散较慢,且各样点质地^[17]及生物水体环境的差异性有关.滴水湖背景底质是河口海滩滩涂,沉积物样有泥质和粉砂质型,而且有的沉积物样中发现有海螺或贝壳,这些均会对沉积物中氮的含量分布产生影响.

表 1 滴水湖水体及沉积物中各形态氮的含量

Table 1 The contents of different nitrogen forms in the water and the sediment of the Dishui Lake

指标	滴水湖水体				滴水湖沉积物			
	范围 (mg/L)	平均含量 (mg/L)	标准差	变异系数	范围 (mg/kg)	平均含量 (mg/kg)	标准差	变异系数
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.344~0.579	0.438	0.06	0.14	1.225~6.825	3.002	1.62	0.54
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.365~0.923	0.516	0.12	0.24	1.613~14.783	3.171	2.74	0.86
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	0.004~0.021	0.008	0.003	0.39	0.007~0.280	0.090	0.069	0.73
TN	2.045~4.601	3.271	0.69	0.21	399.602~1234.690	581.356	0.1	0.28

将滴水湖表层水体中 TN 浓度和近几年研究^[16-17,20]比较可知,滴水湖表层水体中 TN 浓度近几年表现出增加的趋势,这主要与入湖水体氮浓度较高(本研究中入湖水体氮浓度为 4.665mg/L)、水

体更换周期缩短、附近居民大批迁入及生活污水的排放增加等有关.和国内主要湖泊^[21-24]相比,滴水湖水体中 TN 浓度比南湖和太湖水体 TN 低,比其余湖泊水体 TN 浓度要高.与国内主要湖泊^[7,9,25-27]沉积

物对比显示,滴水湖沉积物 TN 含量并不是很高;结合美国 EPA^[28]中沉积物 TN 污染的评价标准,滴水湖沉积物 TN(除港口 B1 浓度为 1234.690mg/kg 属中污染水平以外)属轻度污染水平,这可能是由于滴水湖为浅水湖泊,底泥容易受到风浪或游艇等动力扰动作用,在沉积物悬浮过程中沉积物中氮会向水体中释放^[8,29],另外,温度升高也促进了沉积物氮向上层水体中释放^[8];而且城市湖泊可能会定期清淤使得沉积物氮积累时间较短,累积量较少^[9]。

2.2 滴水湖水体中氮的空间分布特征

由图 2 可知,滴水湖表层水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化范围比较小且在各个样点分布较为均匀,其中 DS3 和 DS14 处较高(样点 DS7 是由于实验原因没测得)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度分布亦较为均匀,在 C2、DS4 和 DS14 处浓度明显较高。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 作为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 转化的中间产物,浓度很低。从形态来看,多数采样点 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度均略高于

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度,水体无机氮以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主。水体溶解性 TN 整体分布差异性较小,在湖区西北部和港口个别采样点 TN 浓度较高。可能是由于西北部是主要居民区,各港口游客停留较多,生活污水及周围径流排放对湖区水体氮影响较大。

滴水湖沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量在 DS7、DS16 样点处明显较高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量在 DS19 处最高, $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量特低,三形态氮在各采样处差异性均很大。从形态来看,在 B 港、F 港及它们附近样点和湖区中心及东南区多数采样点表现无机氮以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主,而在各个港口(除了 B1)均表现出无机氮以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主。这主要是由于港口沉积物受游艇扰动影响比较大,沉积物表层溶解氧较多,硝化反应强于氨化作用,而且沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 会伴随悬浮颗粒向上层水体发生释放^[30]。TN 在 B 港明显较高,其他样点也具有明显差异性。总体比较可知,沉积物中氮主要是以有机氮为主。

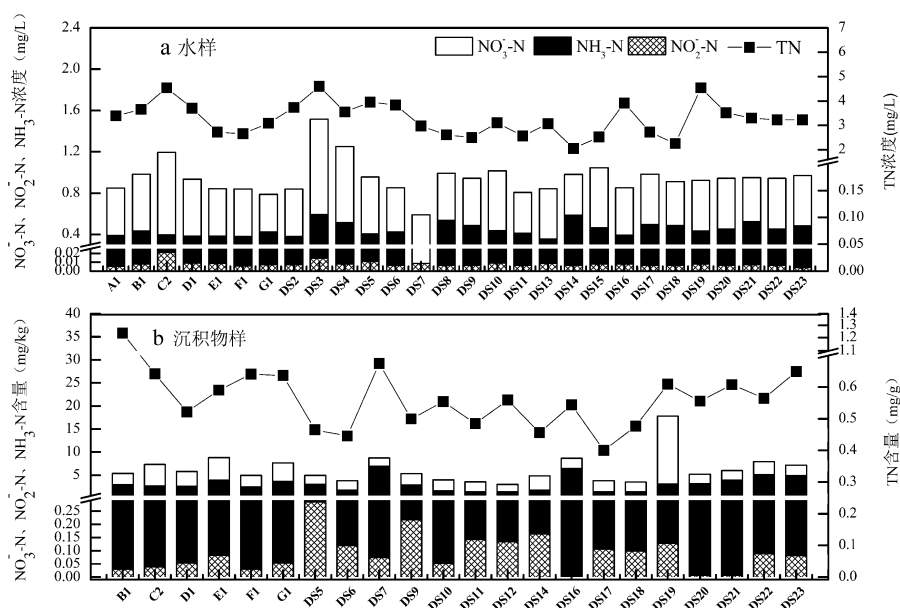


图 2 滴水湖水体中 TN 和不同形态氮的含量及分布

Fig.2 Distribution of the contents of TN and different nitrogen forms in the water and the sediment of Dishui Lake

2.3 不同水体氮污染特征对比

由图 3(a) 显示,引河河流(ST1、ST2)和入湖河流(C1、C2)TN 浓度较高,南汇嘴 TN 浓度较低。TN 浓度在各水体间呈现出沿引河河流-入湖河流-湖区-出湖河流-潮滩方向逐渐降低的趋势,表明水体

中氮沿水流流向底泥发生沉积富集现象,而且引入水体含氮量较高,是滴水湖水体中氮的来源之一。从形态氮特征来看,潮滩 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度明显要高。在其他水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度呈现沿水流流动方向:引河河流-入湖河流-湖区-出湖河流方向依次降低

的趋势. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度呈现相反变化趋势, 沿水流流动方向: 引河河流-入湖河流-湖区-出湖河流方向依次升高趋势, 在潮滩处出现降低现象. 但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度降低的幅度较 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高的幅度要小. 不同水体中各形态氮对比显示, 除出湖河流以外, 各水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均高于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度在各水体中均最低.

图 3(b) 显示, 滴水湖沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及 TN 含量均呈现沿引河河流-入湖河

流-湖区-出湖河流-潮滩方向依次降低的趋势. 主要原因可能是随水流流动方向, 河流沉积越来越弱, 各形态无机氮和总氮在沉积物中的附着量也逐渐降低; 春季温度回升, 底泥微生物作用增强, 加上各区沉积物(除湖区)受水流流动影响明显, 沉积物向上层水体中释放氮较多, 也会使沉积物含氮量降低. 不同水体沉积物形态氮对比显示, 除出湖河流以外, 各水体沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量均高于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 水体沉积物为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的蓄积库.

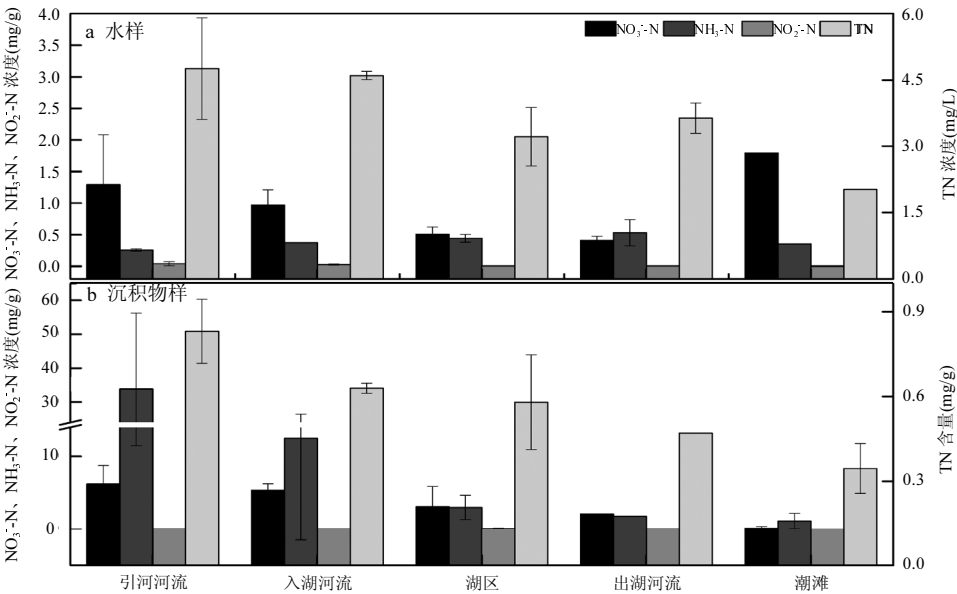


图 3 不同水体氮的含量分布

Fig.3 Distribution of nitrogen contents in different water and sediments of the Dishui Lake system

表 2 滴水湖水体各形态氮与理化指标相关性关系

指标	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	TN	TSS	DO	电导率	盐度	pH 值	TOC	T
$\text{NH}_3\text{-N}$	1										
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	-0.436*	1									
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.415*	0.674**	1								
TN	-0.218	0.680**	0.563**	1							
TSS	-0.293	0.461*	0.539**	0.827**	1						
DO	0.513*	-0.661**	-0.642**	-0.334	-0.209	1					
电导率	0.271	-0.347	-0.318	-0.163	0.116	0.504*	1				
盐度	0.274	-0.484*	-0.446*	-0.158	0.094	0.687**	0.804**	1			
pH 值	0.252	-0.320	-0.332	-0.438*	-0.441*	0.131	0.433*	0.125	1		
TOC	0.168	0.336	0.411*	0.155	0.064	0.336	-0.022	0.235	-0.294	1	
T	-0.475*	0.525*	0.559**	0.700**	0.775**	-0.188	-0.049	0.170	-0.608**	0.057	1

注:**在0.01水平(双侧)上显著相关;*在0.05水平(双侧)上显著相关.

2.4 水体与沉积物中氮浓度与环境因子的关系

Pearson 相关性分析结果(表 2)表明,水体中

各氮之间呈现出相关性, NO_3^- -N 与 TSS、DO、TOC、 T 及盐度均呈现显著相关性。 NH_3 -N 与 DO、 T 呈现显著相关性。 NO_2^- -N 与 TSS、DO、盐度及温度呈现显著相关性。主要是由于水体 TSS 影响水体氮的附着量,同时还可以通过影响水体的透明度、光照投射度、水生动植物的生长吸氮的迁移转化,间接得影响水体各形态氮含量;水体溶解氧 DO 通过影响微生物活性、而微生物活性影响有机质分解,产物 NH_3 含量将影响水体氮含量^[8,31],同时硝化反应和氨化作用的强度受水体 DO 的影响,对水体氮的形态分布产生影响;温度通过影响水生动植物的活性以及沉积物氮的释放量对上层水体氮产生影响^[31]。由于各氮会受到水体环境因子影响,在修复滴水湖生态系统的时候应考虑相关理化指标的控制。滴水湖沉积物各指标进行相关性分析显示, NH_3 -N 与 TOC 的含量表现出显著的正相关性(图4),这是由于有机质经微生物分解产物中含有 NH_3 -N^[31],而且沉积物中有机质含量反过来影响沉积物中微生物的活性,进而影响沉积物中氮的存在形态。

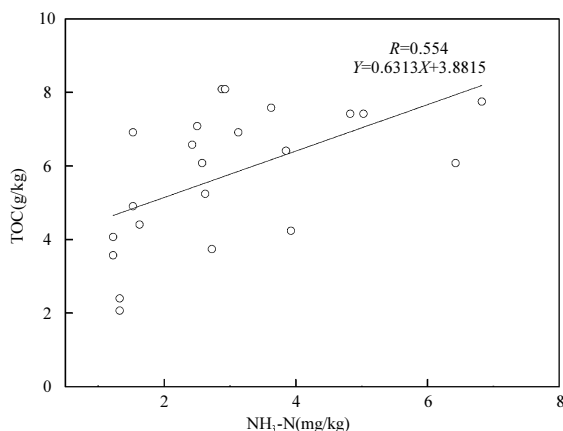


图4 滴水湖沉积物中 NH_3 -N 与 TOC 相关性分析
Fig.4 The correlation between contents of NH_3 -N and TOC in the sediment of the Dishui Lake

考虑到盐度与水体形态氮具有相关性,设置了不同盐度容液和滴水湖沉积物进行混合振荡提取,分析提取液中的 NO_3^- -N 和 NH_3 -N 的含量。由图 5 可知,上覆水体的盐度对沉积物向上覆水体中释放 NO_3^- -N 和 NH_3 -N 呈现不同的影响。随

着上覆水体盐度的增大,底泥中 NO_3^- -N 的释放量会增加并趋于平衡, NH_3 -N 的释放量有降低并趋于稳定的趋势。上覆水体中的盐度会影响湖泊沉积物和上覆水体之间氮的交换。另外,河流沉积物(ST1、ST2)和湖泊沉积物(DS20、DS21、DS22、DS23)表现出明显的差异性,上覆水体的盐度对河流沉积物的影响较湖泊沉积物明显,这主要是因为滴水湖为潮滩上人工开挖的大型湖泊,湖水盐度较高,沉积物中的 NO_3^- -N 和 NH_3 -N 经长期作用后已经发生了交换,所以盐度浸提实验中没有河流沉积物表现明显。

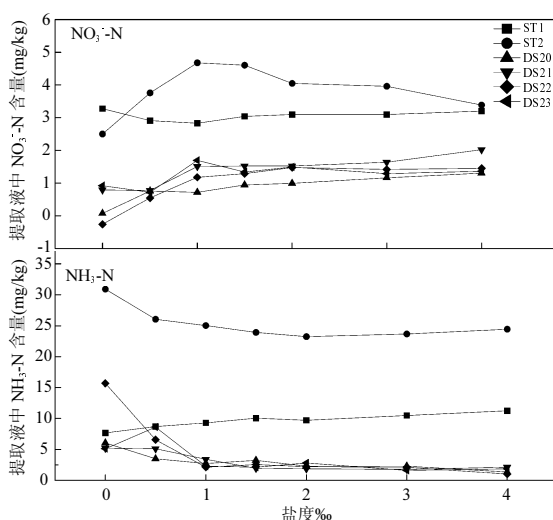


图5 滴水湖沉积物在不同盐度下释放 NH_3 -N 和 NO_3^- -N 含量特征

Fig.5 The NH_3 -N and NO_3^- -N releasing characteristics in Dishui Lake sediment under different salinity levels

3 结论

3.1 滴水湖表层水体 TN 浓度在 2.045~4.601mg/L,平均值为 3.271mg/L,沉积物 TN 含量在 399.602~1234.690mg/kg,平均值为 581.356mg/kg。滴水湖湖区表层水体中各形态氮的空间差异性均比沉积物中的小,而滴水湖湖区各形态氮的差异性小于不同水体单元间的差异性。近年来,滴水湖水体 TN 浓度呈现增加趋势,与国内主要湖泊水体中 TN 进行比较,滴水湖表层水体中氮污染比较严重,沉积物中氮污染比较轻。

3.2 滴水湖表层水体中的无机氮以 NO_3^- -N 为

主,沉积物中氮以有机氮为主,而无机氮在港口(除 B 港)主要以 NO_3^- -N 为主,在 B、F 港及它们附近样点和湖区中心及东南区多数采样点以 NH_3 -N 为主.氮形态空间差异性在沉积物中比表层水体中表现明显.不同水体中氮污染特征对比显示滴水湖水体中氮浓度较高的原因之一是引水水体中各氮含量较高.

3.3 针对相关性分析结果中盐度和水体中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 有显著负相关性展开盐度浸取实验,结果显示上覆水体中的盐度会影响到沉积物与上覆水体之间的氮交换作用,随着上覆水体盐度的增大,底泥中 NO_3^- -N 的释放量会增加并趋于平衡, NH_3 -N 的释放量有降低并趋于稳定的趋势.水体盐度对河流沉积物影响较明显于对湖泊沉积物.

参考文献:

- [1] Jin X, Xu Q, Huang C. Current status and future tendency of lake eutrophication in China [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005,48(Z2):948-954.
- [2] Cheng X, Li S. An analysis on the evolvement processes of lake eutrophication and their characteristics of the typical lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006,51(13):1603-1613.
- [3] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等.洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(3):235-242.
- [4] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988,33(4):796-822.
- [5] 田 华,刘水芹,方 伟,等.人工湖泊滴水湖水水质演变趋势及富营养化分析 [J]. *水生态学杂志*, 2011,32(6):26-31.
- [6] 李延鹏,杨 婕,肖 文,等.洱海及上游主要湖泊底泥营养盐的研究 [J]. *大理学院学报*, 2013,12(4):58-61.
- [7] 王圣瑞,何宗健,赵海超,等.洱海表层沉积物中总氮含量及氨氮的释放特征 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(3):256-261.
- [8] 王 政,赵 林,李 鑫,等.不同时间尺度下湖泊氮素内源释放强度影响因素的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2011,30(12):2542-2547.
- [9] 张亚楠,马启敏,岳宗恺,等.东昌湖表层沉积物中氮的赋存形态 [J]. *环境化学*, 2013,32(3):459-465.
- [10] Mortimer C H. Chemical exchanges between sediments and water in the Great Lake-Speculations on probable regulatory mechanism [J]. *Limnology and Oceanography*, 1971,16(2):387-404.
- [11] Athithan S, Ramanathan N. Chemical speciation of sedimentary nitrogen and phosphorous in integrated fish/pig farming system [J]. *Indian Journal of Fisheries*, 2009,56(2):107-114.
- [12] 王延洋.滴水湖浮游动物群落结构及水质生态学评价 [D]. 上海:上海师范大学硕士学位论文, 2008.
- [13] 李晓波,许夏玲,陈德辉,等.上海滴水湖小色金藻种群变化 [J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2009,38(2):193-196.
- [14] 刘水芹,田 华,梁国康.大型人工湖泊生态环境演变分析及对策探讨 [J]. *上海水务*, 2009,(3):25-29,33.
- [15] 朱梦洁,汤 琳,吴阿娜,等.滴水湖浮游植物群落结构特征初探 [J]. *科技信息*, 2009,(26):10312-10313.
- [16] 何 玮,薛俊增,方 伟,等.滩涂围垦湖泊滴水湖水水质现状分析 [J]. *科技通报*, 2010,26(6):869-878.
- [17] 童 琰,马明睿,林 青,等.滴水湖浮游植物时空分布动态及影响因素 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012,21(12):1499-1506.
- [18] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 国家环保总局《水和废水水质监测分析方法》编委会.水和废水水质监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002,254-281.
- [20] 童 琰,徐春燕,胡雪芹,等.滴水湖饮水河段组合型生态工程春季对水体净化效果研究 [J]. *上海海洋大学学报*, 2011,20(6):930-936.
- [21] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等.洱海上覆水不同形态氮时空分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(5):874-880.
- [22] 陈学民,朱阳春,伏小勇,等.青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2012,31(2):395-401.
- [23] Qin B Q, Gao G, Zhu G W, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013,58(9):961-970.
- [24] 刘倩纯,余 潮,张 杰,等.鄱阳湖水体水质变化特征分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2013,32(6):1232-1237.
- [25] 丁 静.太湖氮磷分布特征及其吸附/解吸特征研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2010.
- [26] 王雯雯,王书航,姜 霞,等.洞庭湖沉积物不同形态氮赋存特征及其释放风险 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(6):598-605.
- [27] 杨洪美.南四湖表层沉积物中氮形态及吸附释放研究 [D]. 济南:山东大学, 2012.
- [28] A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems [Z]. US EPA, 2002.
- [29] Reddy K R, Fisher M M, Ivanoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996,25:363-371.
- [30] 刘静静,董春颖,宋英琦,等.杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算 [J]. *生态学报*, 2012,32(24):7932-7939.
- [31] 朱 健,李悍东,王 平.环境因子对底泥释放 COD、TN 和 TP 的影响研究 [J]. *水处理技术*, 2009,35(8):43-49.

作者简介: 张焕焕(1988-),女,河南新乡人,华东师范大学资源与环境科学学院硕士研究生,主要研究方向为城市资源与水环境。