

滴水湖水体中各形态氮的时空分布特征

张焕焕, 毕春娟*, 陈振楼 (华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要 [目的] 探讨滴水湖各形态氮的时空分布特征。[方法] 从2012年冬季至2013年秋季, 采集上海市最大人工湖表层水样品55个、沉积物样品49个, 测定其各形态氮及总氮含量。[结果] 滴水湖水体TN污染水平较高, TN浓度在夏季最高; 底泥中TN浓度在整个采样期间呈现上升趋势, 在秋季达到最大值。表层水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在夏季最高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在春秋季节比较高, $\text{NO}_2\text{-N}$ 在冬季最高; 底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在冬季达到最高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在秋季达到最高, $\text{NO}_2\text{-N}$ 在春季最高。[结论] 滴水湖底泥中各形态无机氮在4个季节空间差异性均大于上覆水体中的无机氮的空间差异性。

关键词 滴水湖; 表层水体; 底泥; 氮形态; 时空分布特征

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)19-06330-04

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Nitrogen in Water and Sediments of Dishui Lake

ZHANG Huan-huan, BI Chun-juan et al (Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241)

Abstract [Objective] The research aimed to investigate the spatial and temporal distribution characteristics of nitrogen in Dishui Lake. [Method] Fifty-five surface water and forty-nine sediment samples were collected from the largest man-made lake in Shanghai from the winter of 2012 to the fall of 2013. The contents of nitrogen of these samples were examined then. [Result] The results showed that the average content of nitrogen in Dishui Lake system was high. The concentration of TN in the water was highest in summer. The concentration of TN in sediments was rising during the whole sampling and reached the highest in autumn. In water, the concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ was highest in summer, the concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ was higher in spring and autumn, and the concentration of $\text{NO}_2\text{-N}$ was highest in winter. In sediments, the concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ was highest in winter, the concentration of $\text{NO}_3\text{-N}$ was highest in autumn, and the concentration of $\text{NO}_2\text{-N}$ was highest in spring. [Conclusion] The spatial difference of nitrogen in the surface water was smaller than that in the sediments.

Key words Dishui Lake; Overlying water; Sediments; Nitrogen form; Spatial and temporal distribution characteristics

湖泊水体污染是热点的环境问题^[1], 尤其是浅水湖泊污染日益成为主要的环境问题, 目前已有许多关于湖泊污染的研究^[2-5]。作为中国最大人工湖, 滴水湖扮演着上海郊区水域景观和生态缓压区的角色, 对上海生态系统具有很大意义, 随着附近大量人口迁入, 城市的建设以及游客的增加, 向滴水湖排放的污染物增多, 滴水湖水体污染问题加重。田华等已指出近几年滴水湖中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^[6]。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^[7], 内源释放^[8-11]是上覆水体中氮的主要来源之一^[12-15]。关于滴水湖的研究, 王延洋^[16]、李晓波等^[17]、刘水芹等^[18]和朱梦洁等^[19]曾对其水质生态系统及动植物结构进行研究; 何玮等对滴水湖水体的理化指标进行过探讨^[20]。这些研究多于几年前进行并且仅限于对滴水湖表层水体水质问题的研究, 对底泥-水中各形态氮的含量、时空分布特征等研究鲜有报道。为此, 笔者对滴水湖水体中氮的含量及时空分布特征进行探究, 研究了滴水湖水体沉积物-表层水体中的氮赋存形态特征及其时空分布特征。这不仅可为滴水湖氮循环研究提供基础数据, 而且还对合理控制湖泊生态系统具有指导意义^[21-23]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 滴水湖位于上海市东南方, 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^[6]。滴水湖呈圆形, 中心在 30.896°N , 121.934°E , 面积为 5.56 km^2 。平均水深 3.7 m , 最深处 6.2 m 。湖中有3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^[24]。

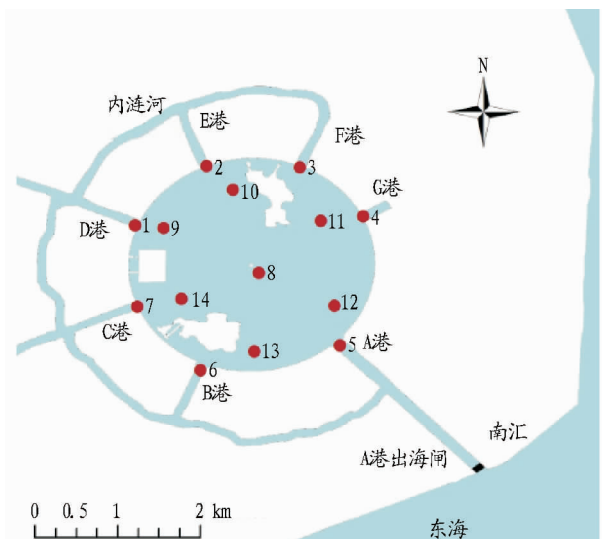


图1 滴水湖采样点分布示意

1.2 样品采集 于2012年冬季至2013年秋季, 对滴水湖水体进行季度性采集沉积物样和表层水样(图1)。每处设置3个平行样, 水样采集方法为用2 L有机玻璃采水器(永安有

基金项目 上海市科委社会发展重点项目(12231201900); 国家自然科学基金项目(41271472); 上海市自然科学基金项目(12ZR1409000)。

作者简介 张焕焕(1988-), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向: 城市资源与水环境。*通讯作者。

收稿日期 2014-05-26

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0.45 μm 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目的尼龙筛取沉积物样品,用于测定各形态氮。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、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,沉积物中总氮(TN)采用元素分析仪测定,氨氮(NH₃-N)水样采用纳氏试剂分光光度法,底泥样采用次溴酸钠氧化分光光度法,硝酸盐氮(NO₃⁻-N)水样及底泥样均采用紫外(双波)分光光度法,亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)水样及底泥样均采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法^[25-26]。沉积物样测定前的预处理方法:用1 mol/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2 h,取出离心管在4 000 r/min条件下离心10 min,用0.45 mm滤膜过滤,取上清液分析底泥中的上述各形态氮含量。

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 采样和试验过程中所用容器均经10%的盐酸溶液浸泡24 h,用自来水冲洗干净,最后用一级水清洗3遍以上,每个指标于24 h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,每批试验均设1个平行样,3个空白样,8个标准样进行同步试验。数据分析显示,各指标标准曲线的R²值均达0.999 6以上,平行样误差均在2%以内。

2 结果与分析

2.1 滴水湖水体各项理化指标 滴水湖水体主要理化指标季节变化的监测结果(表1)显示,滴水湖表层水中溶解氧DO含量范围为6.47~10.58 mg/L,各季节DO浓度表现为2012年冬季>2013年春季>2013年秋季>2013年夏季。这是由于水体溶解氧和温度有关系,温度越高溶解氧含量越低^[20],夏季温度较高,水体中的氧气会大量向空气逸出,导致DO降低。pH变化范围7.70~8.55,显示滴水湖水体呈现出弱碱性,此环境比较适合藻类繁殖。温度*T*变化范围为8.13~31.98℃。总悬浮物颗粒(TSS)变化范围为141.69~462.77 mg/L,其中2012年冬季<2013年秋季<2013年春季<2013年夏季,总悬浮颗粒物在一定程度上反映水体的浊度。盐度变化范围为1.50~2.96,显示滴水湖并非淡水湖,这可能是由于滴水湖受到东海海水的影响。沉积物pH变化范围7.23~7.85,较表层水体小,但也均呈现弱碱性,温度*T*变化范围为7.85~31.48℃。

表1 滴水湖水体TN及各项理化指标含量变化

水样	样品来源	DO//mg/L	pH	<i>T</i> //℃	TSS//mg/L	盐度	TN//mg/L
表层水样	2012 冬季	10.58	8.25	8.13	141.69	1.60	0.94
	2013 春季	9.19	7.70	16.95	238.78	1.50	3.34
	2013 夏季	6.47	8.55	31.98	462.77	2.96	3.59
	2013 秋季	9.17	8.16	19.35	237.60	2.68	1.36
沉积物样	2012 冬季	/	7.85	7.85	/	/	427.71
	2013 春季	/	7.53	19.36	/	/	579.28
	2013 夏季	/	7.32	31.48	/	/	3 368.17
	2013 秋季	/	7.23	18.87	/	/	26 334.37

2.2 滴水湖水体中TN的含量水平 滴水湖2012年冬季、2013年春季、夏季和秋季水体中各形态氮含量分析(表1)显示,滴水湖表层水中TN浓度在0.94~3.59 mg/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427.71~26 334.37 mg/kg。结合美国EPA^[27]中沉积物TN污染的评价标准,滴水湖沉积物TN属中轻度污染水平,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^[11,28-31],另外,城市湖泊可能会定期清淤使得沉积物氮积累时间较短,积累量较少^[13]。

2.3 滴水湖表层水中各形态氮的季节变化特征 滴水湖表层水中各形态氮每个季度的含量分析(图2)显示,表层水体中TN浓度由高到低依次出现在夏季、春季、秋季和冬季,这可能与温度有关。NH₃-N浓度变化范围为0.36~1.03 mg/L,表层水中NH₃-N浓度由高到低依次出现在夏季、秋

季、春季、冬季,这可能是由于底泥随温度升高向上覆水体中释放氨氮强度逐渐增强^[12]。NH₃-N在各个季节(除了春季)

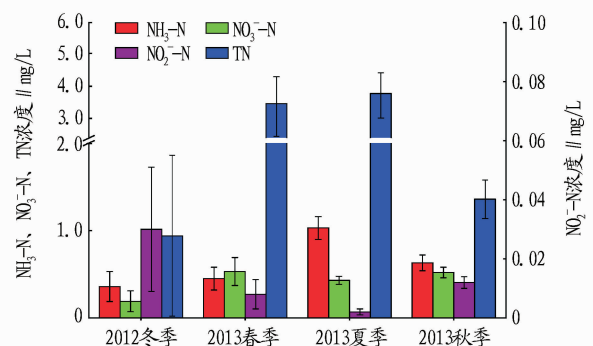


图2 滴水湖表层水中各形态氮的季节变化

均显示出高于NO₃⁻-N浓度,且在夏季最明显(近2倍)。这可能是由于一方面夏季水中溶解氧最低,氨化作用逐渐强于

硝化作用^[32];另一方面夏季湖水对流比较强,水中氨氮向空气逸出,致使表面水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度明显比 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度高。表层水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化范围为 0.19~0.53 mg/L,在春秋季节相对比较高,冬季最低。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为硝化作用的中间产物,含量特别低,浓度范围在 0.008~0.030 mg/L,在冬季浓度最大,各样点间的差异性也比最大。

2.4 滴水湖底泥中各形态氮的季节变化特征 滴水湖底泥中各形态氮每个季度的含量分析(图3)显示,底泥中 TN 浓度在整个采样期间呈现上升趋势,在秋季达到最大值,这可能是由于秋季滴水湖中的大量动植物遗体在沉积物中富集,使得底泥 TN 浓度明显高于其他3个季节。底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 3.76~10.80 mg/L 之间,在冬季达到最高,在春季达最低。可能由于冬季温度较低,底泥向上覆水体中释放的较

少,使得底泥中富集的氨氮较高于其他季节;而在春季随着温度升高,释放氨氮增多,且水体溶解氧的增多,氨化作用减弱,使得底泥 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在春季浓度最低。底泥 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 2.54~4.76 mg/L,在秋季时达到最高,秋季由于动植物的遗体在底泥富集,底泥中的硝化作用明显,使得 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在底泥中的富集达到最大值。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为硝化和氨化作用的中间产物,浓度与水体中表现一致较低,浓度在 0.024~0.086 mg/L,其中在春季达到最大值,其余3个季节差别不大。

2.5 滴水湖表层水中各形态氮的空间分布特征 滴水湖表层水中各形态氮的空间分布特征(图4)显示,滴水湖表层水样中 TN 在秋冬季节较低,在春夏季较高,这可能是由于春夏季温度相对较高,滴水湖中动植物的活性较大,底泥向上覆水体中释放氮能力较强等原因使得表层水中 TN 浓度较高。

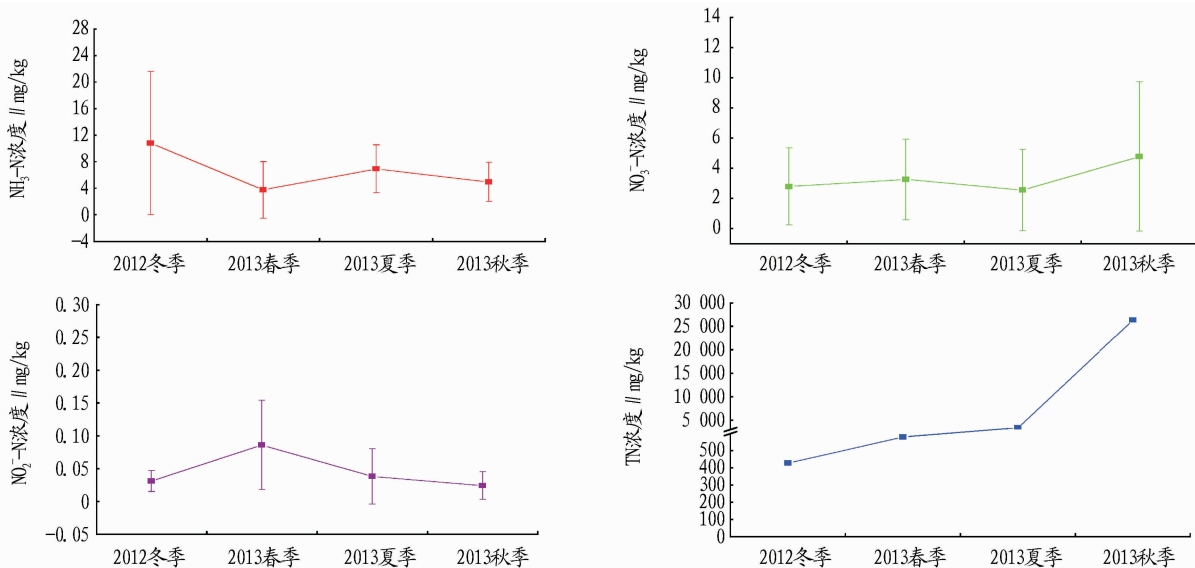
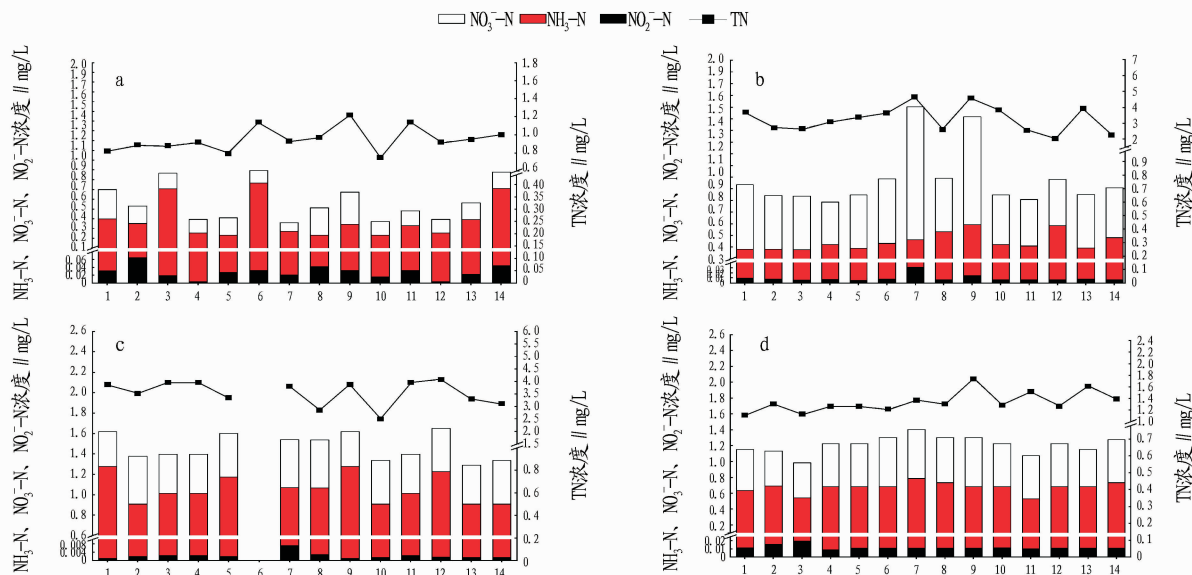


图3 滴水湖底泥中各形态氮的季节变化



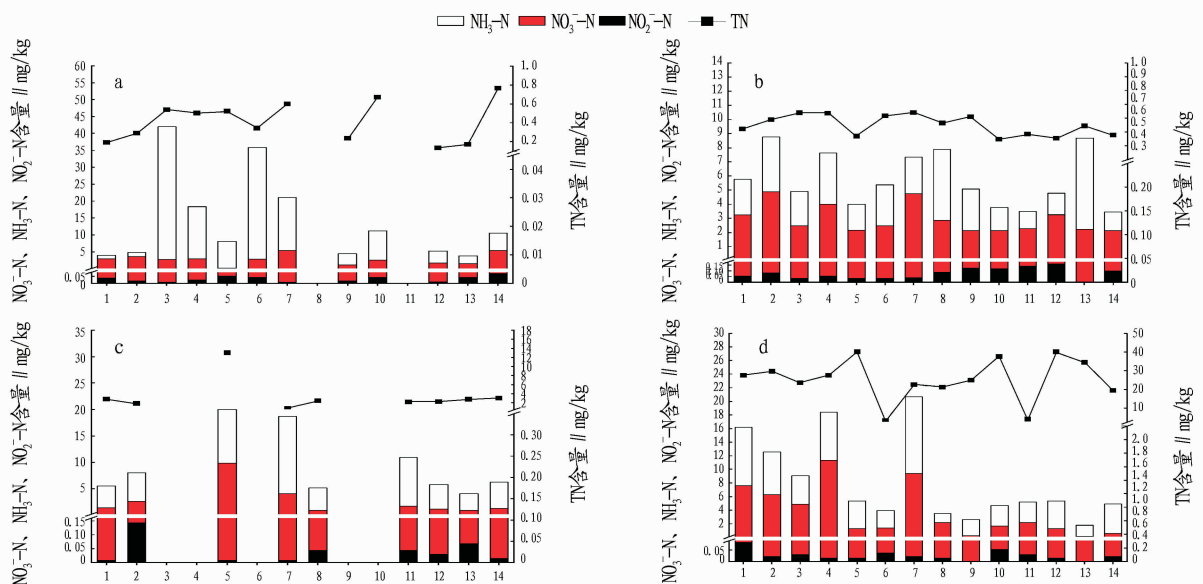
注:a. 2012年冬季表层水样;b. 2012年春季表层水样;c. 2012年夏季表层水样;d. 2012年秋季表层水样。

图4 滴水湖表层水样中各形态氮的空间变化特征

无机氮在冬季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的空间差异性大于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 的空间差异性,冬季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 B 港、F 港及 C 港附近的样点 14 中浓度较高,冬季表层水中无机氮以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主。在春季表层水体中无机氮 $\text{NO}_3\text{-N}$ 空间差异性最大,其他形态氮在表层水中分布比较均匀,表层水中无机氮以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主,其中在 C 港和 D 港附近的样点 9 处明显高于其他处表层水样。夏季表层水中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 空间差异性较大, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度明显高于所有形态氮浓度,这可能是由于夏季温度较高,底泥向上覆水体中释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量增多。在秋季滴水湖表层水中各形态无机氮的空间差异性均较小, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度亦相近。

2.6 滴水湖底泥中各形态氮的空间分布特征 滴水湖底泥中各形态氮的空间分布特征(图 5)显示,滴水湖底泥中 TN

在秋季空间差异性最大,在 A 港浓度最高,在 B 港和 G 港附近的样点 11 处含量最低,其余 3 个季节空间差异性较小,其中在夏季 A 港底泥 TN 明显高于其他样点。冬季滴水湖底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的空间差异性较大,其中在 B、C、F、G 港底泥中含量很高,底泥无机氮以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为主;春季滴水湖底泥中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量略高于 $\text{NH}_3\text{-N}$,可能是由于春季温度升高底泥向上覆水释放量增加,而且底泥微生物活性随春季到来增强,硝化作用增强;夏季底泥无机氮在 A、C 港较高,各无机氮的空间差异性也较大;秋季在 C 港无机氮含量较高。滴水湖底泥无机氮在 4 个季节均显示出空间差异性较大,这是由于底泥中的物质相对于水体中的物质不易扩散。



注:a. 2012 年冬季底泥样;b. 2013 年春季底泥样;c. 2013 年夏季底泥样;d. 2013 年秋季底泥样。图 5 中含量未显示值的样点是由于采样过程中风力以及底泥厚度的影响未采集到底泥样品。

图 5 滴水湖底泥中各形态氮的空间变化特征

3 结论

(1) 滴水湖表层水体 TN 浓度在 $0.94 \sim 3.59 \text{ mg/L}$, 属劣 V 类水体;沉积物 TN 含量在 $427.71 \sim 26334.37 \text{ mg/kg}$ 。表层水体中 TN 浓度在夏季最高;底泥中 TN 浓度在整个采样期间呈现上升趋势,在秋季达到最大值。

(2) 表层水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在夏季浓度最高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在春秋季节相对比较高, $\text{NO}_2\text{-N}$ 在冬季浓度最高;底泥中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在冬季达到最高,在春季浓度最低;底泥 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在秋季时达到最高, $\text{NO}_2\text{-N}$ 在春季浓度最高,其余 3 个季节差别不大。

(3) 滴水湖表层水中无机氮在冬季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的空间差异性较大,在春季 $\text{NO}_3\text{-N}$ 空间差异性最大,其他形态氮在表层水中分布比较均匀;在夏秋季各形态氮分布相对均匀。滴水湖底泥中各形态无机氮在 4 个季节空间差异性均较大,这是由于底泥中的物质相对于水体中的无机氮的空间差异性。

参考文献

[1] JIN X, XU Q, HUANG C. Current status and future tendency of lake eu-

- trophication in China [J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2005, 48(22): 948-954.
- [2] CHENG X, LI S. An analysis on the evolution 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, 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] NIXON S W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns [J]. Ophelia, 1995, 41: 199-219.
- [6] 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]. 水生生态学杂志, 2011, 32(6): 26-31.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] FELLMAN J B, D'AMORE D V. Nitrogen and phosphorus mineralization in three wetland types in southeast Alaska, USA [J]. Journal of the Society of Wetland Scientists, 2007, 27(1): 44-53.

(下转第 6357 页)

首次发现时报告的株数(4~5株)明显增多,表明该点的生境条件适宜堇叶紫金牛的生长,且该处的人为干扰弱,本地管理部门对该点的保护工作到位。

3.3 海滨木槿 海滨木槿为锦葵科木槿属落叶灌木,属省级重点保护植物。海滨木槿一般生长于海滨盐碱地,具有良好的防风固沙作用。这次调查发现,海滨木槿在定海区的分布较分散(表1)。临城街道王家墩村有两处分布点,东蟹峙岛与凤凰山一带有两处,环南街道五联村小五奎山有一处。对照上一次调查记录的地点,东蟹峙岛有一处分布点现已为船厂,海滨木槿未见,而总体上,此次调查中发现的海滨木槿分布点有所增加。这说明,在经济发展、土地资源匮乏的背景下,生长于人为活动频繁地点的重点保护野生植物面临着随时消失的危险,并且保护难度极大,而同时,采取适时的迁地保护和实时调查等措施,依然可以有效地保护它们。

3.4 红山茶 红山茶为山茶科山茶属,属省级重点保护野生植物,据记载,定海区于览镇双庙村有一株古树名木,为浙江省最大红山茶古树(表1),并有挂牌保护。在调查中发现,由于该分布点位置偏僻,人为干扰少,该树目前生长状况良好,树高达10 m,胸径41.6 cm,并且,由根部分生出两株小红山茶,树高分别为5 m和4 m。

表2 舟山定海区重点保护野生植物属的分布区类型

分布区类型	属数	占总属数百分比/%
2. 泛热带分布	2	50
7. 热带亚洲分布	2	50
合计	4	100

4 定海区重点保护野生植物属的区系特征

根据吴征镒关于中国种子植物属的分布区类型划分^[4],舟山定海区重点保护野生植物可划分为2个分布区类型(表2),均为热带成分,其中,堇叶紫金牛和海滨木槿属泛热带分

布,舟山新木姜子和红山茶属热带亚洲分布,两种分布区类型的植物属,各占总属数的50%。

5 小结与建议

5.1 现有管理工作的不足之处 调查过程中发现,虽然大多数古树名木的生长状态良好,但不排除存在古树名木缺乏养护管理,例如大猫村病死的舟山新木姜子古树。古树名木由于树龄较大,健康状况易出现问题,这使得短期与长期的交互监管显得尤其重要。除了十年一次的全国、全省范围内的大规模调查,本地的管理部门还应协同基层部门,及时发现登记古树名木的生长问题或状况,以便及早发现问题、解决问题,真正做到对古树名木的保护工作,而不是放任其自生自灭。

5.2 海岛开发对于重点野生植物保护的威胁 舟山海岛新区的建设已拉开序幕,在此前提之下,如何应对海岛开发与野生植物的保护,是对本地管理部门的考验。此次调查中发现的,东蟹峙岛记录分布点的消失,是一个警示。大部分重点保护野生植物因为株数少,分布面积小,并未专门设立保护标牌或划立保护区,使得这些重点保护野生植物极易在土地征用施工过程中被毁坏。

因此,一方面,本地管理部门应展开针对性的保护重点野生植物的宣传活动,提高人民群众保护野生植物的意识和法制观念,使其能自觉主动地珍惜身边的野生植物;另一方面,在本地相关部门执行管理功能的基础上,调动起民间团体的参与积极性,发挥民间团体的组织优势,扩大野生植物保护教育宣传的影响力,形成全民保护重点野生植物的社会风气。

参考文献

- [1] 于永福. 中国野生植物保护工作的里程碑——《国家重点保护野生植物名录(第一批)》出版[J]. 植物杂志, 1995(5): 3-11.
- [2] 王国明, 赵慈良. 舟山群岛国家重点保护野生植物区系与分布特征[J]. 浙江林业科技, 2009, 29(3): 43-47.
- [3] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型[J]. 云南植物研究, 1993(SVI): 1-139.
- [5] 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.
- [6] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3382-3386.
- [7] 王书航, 姜霞, 钟立香, 等. 巢湖沉积物不同形态氮季节性赋存特征[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 946-953.
- [8] 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子[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(12): 1499-1506.
- [9] 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.
- [10] 国家环保总局. 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.
- [11] A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems[S]. US EPA, 2002.
- [12] 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.
- [13] 逢勇, 韩涛, 李一平, 等. 太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 87-95.
- [14] 秦伯强, 朱广伟. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2005(S2): 33-44.
- [15] BLOM G, WINKELS H J. Modeling sediment accumulation and dispersion of contaminants in Lake IJsselmeer(the Netherlands)[J]. Water Science Technology, 1998, 37(6/7): 17-24.
- [16] 王明学, 于建胜. 网湖春季水质及底质状况的研究[J]. 淡水渔业, 1997, 27(4): 7-10.

(上接第6333页)

- [10] BOOTSMA M C, BARENDREGT A, VAN ALPHEN J C A. Effectiveness of reducing external nutrient load entering a eutrophicated shallow lake ecosystem in the Naardermeer nature reserve, The Netherlands [J]. Biological Conservation, 1999, 90(50): 193-201.
- [11] 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.
- [12] 刘静董, 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]. 生态学学报, 2012, 32(24): 7932-7939.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] SARAZIN G, GAILLARD J F, PHILIPPE L, et al. Organic matter mineralization in the pore water of an eutrophic lake [J]. Hydrobiologia, 1995, 315: 95-118.
- [16] 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, 2008.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 朱梦杰, 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.
- [20] 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.