

太湖不同湖湾中铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*) 的氮稳定同位素特征*

何 虎^{1,2}, 于谨磊³, 章 铭⁴, 刘正文^{1,3}, 李宽意^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

(4: 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘要: 进入湖泊中不同氮源氮稳定同位素值($\delta^{15}\text{N}$)的差异和生物对氮稳定同位素的记忆作用,可以反映流域人类活动输入的污染物对生态系统的影响程度. 本文调查了太湖4个湖湾(梅梁湾、贡湖湾、竺山湾和东太湖)中铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,结果表明环棱螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变幅为6.9‰~18.1‰,平均值为11.2‰,不同湖湾中环棱螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异极显著,从高到低依次为梅梁湾(17.7‰)、贡湖湾(13.2‰)、东太湖(10.2‰)和竺山湾(7.8‰). 分析认为,梅梁湾和贡湖湾接纳较多的人类活动产生的污染物,其周边城市如无锡、常州等地的污水处理效率有待提高;竺山湾水体氮素主要来自于农业面源污染,需降低农田化肥的使用量.

关键词: 铜锈环棱螺; 氮稳定同位素; 人类活动污染物; 太湖

Characteristic of nitrogen stable isotope in *Bellamya aeruginosa* in different bays of Lake Taihu, China

HE Hu^{1,2}, YU Jinlei³, ZHANG Ming⁴, LIU Zhengwen^{1,3} & LI Kuanyi¹

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(3: Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China)

(4: College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China)

Abstract: Nitrogen discharged into lake ecosystems typically has different nitrogen stable isotope ratios($\delta^{15}\text{N}$) and measurement of $\delta^{15}\text{N}$ in organisms can be useful indicators of anthropogenic impacts from the watershed. The $\delta^{15}\text{N}$ values of *Bellamya aeruginosa* were investigated in four bays of Lake Taihu. Results showed that $\delta^{15}\text{N}$ values in snail ranged from 6.9‰ to 18.1‰, with an average of 11.2‰. Snail $\delta^{15}\text{N}$ values displayed a significant variation among four bays. The highest average value was found in Meiliang Bay(17.7‰), followed by Gonghu Bay(13.2‰), East Taihu(10.2‰) and Zhushan Bay(7.8‰). Our investigation suggested that both Meiliang Bay and Gonghu Bay have received tremendous amount of domestic sewage derived from increasing human activities. Therefore, it's necessary to promote investment of sewage treatment plants in surrounding cities including Wuxi and Changzhou. Our research also indicated that Zhushan Bay, which is located in northwest part of Lake Taihu is mainly affected by agriculture non-point source pollution. So it's necessary to reduce the use of fertilizers to improve the water quality of that bay.

Keywords: *Bellamya aeruginosa*; nitrogen stable isotope; anthropogenic swage; Lake Taihu

输入到湖泊生态系统中的各种氮源的氮稳定同位素值($\delta^{15}\text{N}$)通常具有很大差异,如生活污水或动物粪

* 国家自然科学基金项目(31070419)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2008CB418104)联合资助. 2011-04-18 收稿; 2011-09-01 收修改稿. 何虎,男,1985年生,硕士研究生;E-mail: hehuabc@tom.com.

** 通信作者;E-mail: kyli@niglas.ac.cn.

便的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $10\text{‰} \sim 20\text{‰}$ ^[1-2], 明显高于大气降水 ($2\text{‰} \sim 8\text{‰}$) 和综合肥料 ($-3\text{‰} \sim 4\text{‰}$)^[3]. 人类活动产生的污染物的 $\delta^{15}\text{N}$ 较高, 输入到湖泊生态系统后, 会通过生产者吸收固定或者消费者直接摄食的方式进入生态系统食物网, 由于 $\delta^{15}\text{N}$ 信号能够沿着食物链向上传递, 所以各营养级生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 都会升高. 因此, $\delta^{15}\text{N}$ 是反映流域人类活动对水生生态系统影响的一个良好指标. 例如, Anderson 等^[4] 对 82 条不同营养水平河流的 3 个营养级生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 进行了调查分析, 结果表明生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与该流域人类活动产生的氮负荷量 (包括家畜粪便、化肥和人类废水) 显著相关. Benson 等^[5] 调查也发现纽约东北部 Upper Saranac 湖苦草 (*Valisneria americana*) 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与该流域的人口密度呈正相关. 在水生态系统中, 水体硝氮^[6]、沉积物^[7]、水生植物^[5] 和鱼类^[8] 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都可以用来指示氮源. 螺贝类等大型底栖动物作为初级消费者, 具有寿命长、机体组织周转率低^[9]、迁移能力差、活动场所相对固定^[10] 的特点, 其机体组织的 $\delta^{15}\text{N}$ 值反映了栖息地长时间、综合的氮素来源, 在研究流域人类活动对生态系统的影响上同样具有很好的指示效果. 例如, Karube 等^[11] 调查了日本琵琶湖沿岸带螺 *Semisulcospira* spp. 和双壳类 *Unio douglasiae biwae* Kobelt 的碳、氮稳定同位素值, 结果发现样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在较大的空间差异, 螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与流域人口密度显著相关. Fry^[12] 研究了旧金山湾 (San Francisco Bay) 蛤 *Potamocorbula amurensis* 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 发现受人类活动影响较大的南部湾 (South Bay) 中蛤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高.

太湖地处经济发达的上海、江苏和浙江两省一市交界处, 湖泊面积 2338 km^2 , 平均水深 1.9 m . 太湖流域面积达 36895 km^2 , 是我国人口最稠密和城市化程度最高的地区之一. 竺山湾、梅梁湾、贡湖湾是太湖北部相邻的三个湖湾, 东太湖则位于太湖东南部, 与北部湖湾相距较远. 由于太湖流域周边地区的土地利用方式和经济发展程度存在差异, 输入到湖湾中的氮分布具有较大的空间异质性^[13]. 本文调查了四个湖湾沿岸带大型底栖动物铜锈环棱螺 (*Bellamyia aeruginosa*) 的氮稳定同位素值, 拟通过螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值来指示人类活动对湖湾生态系统的影响, 研究成果对太湖的控源截污工作具有一定的指导意义.

1 材料和方法

2009 年 7 月 3 日和 4 日, 在太湖梅梁湾、贡湖湾、竺山湾以及东太湖采集水样及环棱螺样品. 其中东太湖布设 3 个采样点, 其余各湖湾布设 2 个采样点作为重复, 采样点尽量选取靠近河口的沿岸带区域 (图 1). 采用彼得森采泥器在沉积物表面收集大型底栖动物铜锈环棱螺. 每个采样点选取 3~4 个规格相近的环棱螺, 取肌肉组织放入烘箱, 60°C 烘干, 然后磨碎过 100 目筛, 称重, 包装后送入 DELTA plus Advantage 质谱仪 (Thermo Fisher) 分析氮稳定同位素丰度. 氮稳定同位素值以国际通用的大气氮作为参考标准, 以 δ 值形式表示, $\delta^{15}\text{N}$ 值的分析精度为 $\pm 0.1\text{‰}$. 水样分析指标为总氮 (TN)、总磷 (TP) 和叶绿素 a (Chl. a), 分别采用碱性过硫酸钾消解法、碱性过硫酸钾消解钼锑钨分光光度法和丙酮萃取分光光度法测定. 数据采用 SPSS 16.0 统计软件进行分析.

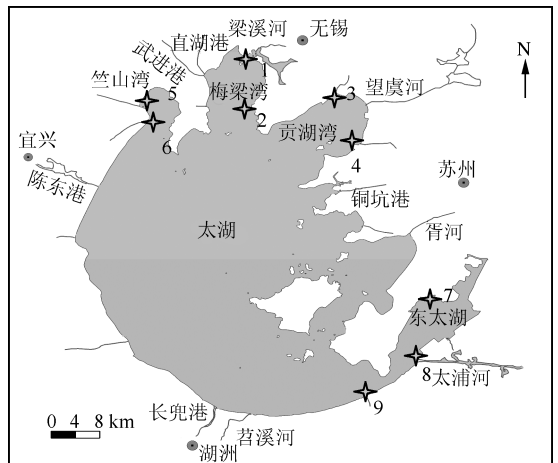


图 1 太湖采样点位分布

Fig. 1 Sampling sites in Lake Taihu

2 结果

各采样点铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最小为 6.9‰ , 出现在竺山湾的殷村港 (5[#]点); 最大为 18.1‰ , 出现在梅梁湾的山水游艇会 (2[#]点) (表 1). 方差分析表明, 铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在四个湖湾的分布具有较大的空间异质性 ($P < 0.05$). 两两比较 (LSD 法) 发现, 梅梁湾铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 (17.7‰) 最高, 其次是贡湖湾 (13.2‰), 而东太湖 (10.2‰) 和竺山湾 (7.8‰) 采集的铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均较低, 二者无显著差异 ($P > 0.05$).

表1 采样点铜锈环棱螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值及水体 TN、TP 和叶绿素 a 浓度Tab. 1 TN, TP and chlorophyll-a concentrations for waters and $\delta^{15}\text{N}$ values for *Bellamya aeruginosa* collected at each sites of Lake Taihu

湖湾	采样点	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	Chl. a/($\mu\text{g/L}$)
梅梁湾	1 [#]	17.2	2.51	0.07	111.36
	2 [#]	18.1	2.85	0.07	147.46
贡湖湾	3 [#]	13.2	1.83	0.09	96.69
	4 [#]	13.1	1.52	0.09	92.58
竺山湾	5 [#]	6.9	3.63	0.35	287.61
	6 [#]	8.7	3.48	0.35	384.68
东太湖	7 [#]	9.8	1.57	0.10	76.20
	8 [#]	10.5	1.95	0.04	64.94
	9 [#]	10.4	1.41	0.03	36.20

3 讨论

调查发现,在梅梁湾采集的铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值最高,已有研究也表明该湖湾水体中微囊藻和硝态氮的同位素值较高^[14],说明梅梁湾受人类活动的影响较大,接收了大量生活污水等高 $\delta^{15}\text{N}$ 值污染物.梅梁湾位于太湖北部,周边城市如无锡和常州具有较高的城镇化率和人口密度,人类活动剧烈.秦伯强等^[15]调查表明,无锡和常州是太湖水体污染物的主要来源地区,大量污染物通过直湖港、武进港和梁溪河等入湖河道排入梅梁湾和五里湖后^[15-16],使水体的氮磷浓度升高,造成水体富营养化,同时栖息地生物的氮同位素值也升高.近年来,由于太湖富营养化问题的日益突出,各地政府加大投资力度处理城市生活污水,但从本实验调查的结果来看,现阶段太湖流域城市的污水处理能力仍显不足.Townsend-Small 等^[6]研究也表明武进港和梁溪河水体硝氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高,暗示无锡和常州市生活污水的排放仍然是梅梁湾面临的主要问题.

贡湖湾位于太湖东北部,本研究发现该湖湾采集的铜锈环棱螺的氮稳定同位素值仅次于梅梁湾,远高于其它湖湾($P < 0.05$).这一方面是因为该湖湾与生活污染严重的梅梁湾紧邻,两个湖湾容易发生水量交换,从而受到梅梁湾接纳的污染物的影响较大;另一方面,虽然该湖湾河流多以出湖为主,但“引江济太”工程的通道——望虞河是以入湖为主的.所谓“引江济太”,即通过望虞河从长江大量引水入太湖,以求达到改善太湖水质的目的^[17].然而,望虞河在引水入太湖的过程中,同时也可能将沿岸带,特别是西岸地区大量的污染物排入太湖.研究表明望虞河西岸水体污染严重,几条主要支流总体均处于劣V类水平^[18],生活污染是主要的氮磷污染源,其排放的总氮和氨氮分别占河道总负荷量的52.5%和60.2%^[17].研究发现贡湖湾沿岸带采集的芦苇 $\delta^{15}\text{N}$ 值也较高^[13],与本研究对铜锈环棱螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值的调查结果一致,说明贡湖湾接纳了较多的人类活动产生的污染物.

竺山湾一直是太湖富营养化程度最严重的地区之一,水体氮磷浓度较高,水华暴发频繁^[19-20],然而,该湖湾采集的铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在四个湖湾中却最低,这说明该湖湾并没有接收过多的生活源污染物,输入到湖湾生态系统的氮素应该有其它来源.竺山湾位于太湖西北部,和其它三个湖湾不同,流域的土地利用方式以农田为主,林琳^[21]利用同位素示踪技术识别不同人类活动对太湖环境的影响时,发现宜兴小流域的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要受农业面源污染的影响,所以该湖湾水体氮素可能主要来源于农田化肥.据统计,太湖流域每亩地施用化肥38.5 kg,远高于全国平均的27.4 kg,有机肥和化肥的比例在1990s中期就达到了1:9^[22],大量低 $\delta^{15}\text{N}$ 值的综合化肥^[3]通过径流或其它途径进入湖湾后,不仅造成湖湾水质恶化,水体氮、磷营养盐浓度升高,同时也导致栖息地生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低.

东太湖3个采样点铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都较低,分析认为这可能有两方面的原因:首先,东太湖是太湖的出水通道,河流以出湖为主,这导致沿岸带人类活动产生的污染物不能通过河道进入湖湾,并且由于太湖南部较短的换水周期^[15],即使有少量污染物被输入湖湾,也会很快通过河道排泄至下游,所以湖湾中滞留的污染物较少.相关研究也发现东太湖水体氨氮^[14]、硝氮^[6]以及水生植物芦苇^[13]的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都较其它湖湾低.

其次,食物来源不同也可能是导致东太湖螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低的一个原因,铜锈环棱螺属前腮亚纲(Prosobranchia),田螺科(Viviparidae),环棱螺属(*Bellamyia*),主要以水体中的附着生物和有机碎屑为食^[23-24],也能摄食浮游藻类^[25].和太湖北部的三个湖湾已经发展成藻型湖湾不同,东太湖至今仍属于草型生态系统,沉水植被覆盖率较高^[19],所以栖息在东太湖的环棱螺可能摄食了较多的附植生物和水生植物碎屑,而其它湖湾的铜锈环棱螺则主要以沉积物表面的藻源有机质为食.由于水生高等植物和浮游藻类在生理结构和对水体氮素的利用上的差异,导致同一栖息地的某些水生高等植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值要显著低于浮游藻类.例如,林琳等^[14]调查发现太湖梅梁湾采集的菱的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(6.59‰)要显著低于该湖湾藻类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(16.79‰),因此,东太湖采集的环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低也有可能是因为该湖湾栖息的铜锈环棱螺摄食了较多的水生植物碎屑.

4 结论

本研究表明太湖沿岸带铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在较大的空间差异,梅梁湾和贡湖湾采集的铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 偏高,湖湾接收了大量人类活动所排放的污染物,说明周边城市如无锡、常州等地的污水处理效率还有待提高.竺山湾水体氮磷营养盐浓度较高,铜锈环棱螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低可能是因为外源氮素主要来自于低 $\delta^{15}\text{N}$ 值的农田化肥,这也说明湖湾受农业面源污染的影响相对较大,应该考虑减少综合化肥的使用量.东太湖铜锈环棱螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低,一方面是由于河流出湖污染物在湖湾中滞留时间较短;另一方面也可能是因为该湖湾铜锈环棱螺摄食了较多的水生植物碎屑.

5 参考文献

- [1] Kreitler CW, Jones DC. Natural soil nitrate: the cause of the nitrate contamination of ground water in runnels county, Texas. *Ground Water*, 1975, **13**(1): 53-62.
- [2] Gormly JR, Spalding RF. Sources and concentrations of nitrate-nitrogen in ground water of the central platte region, Nebraska. *Ground Water*, 1979, **17**(3): 291-301.
- [3] McClelland JW, Valiela I, Michener RH. Nitrogen-stable isotope signatures in estuarine food webs: A record of increasing urbanization in coastal watersheds. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(5): 930-937.
- [4] Anderson C, Cabana G. Does $\delta^{15}\text{N}$ in river food webs reflect the intensity and origin of N loads from the watershed? *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(2/3): 968-978.
- [5] Benson ER, O'Neil JM, Dennison WC. Using the aquatic macrophyte *Vallisneria americana* (wild celery) as a nutrient bioindicator. *Hydrobiologia*, 2008, **596**(1): 187-196.
- [6] Townsend-Small A, McCarthy MJ, Brandes JA *et al.* Stable isotopic composition of nitrate in Lake Taihu, China, and major inflow rivers. *Biomedical and Life Sciences*, 2007, **194**: 135-140.
- [7] 吴敬禄, 林琳, 刘建军等. 太湖沉积物碳氮同位素组成特征与环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, **25**(2): 25-30.
- [8] Xu J, Xie P, Zhang M *et al.* Icefish(*Salangidae*) as an indicator of anthropogenic pollution in freshwater systems using nitrogen isotope analysis. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **79**(3): 323-326.
- [9] Zanden MJ, Rasmussen JB. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 1999, **80**(4): 1395-1404.
- [10] Vizzini S, Mazzola A. The effects of anthropogenic organic matter inputs on stable carbon and nitrogen isotopes in organisms from different trophic levels in a southern Mediterranean coastal area. *Science of the Total Environment*, 2006, **368**(2/3): 723-731.
- [11] Karube Zi, Sakai Y, Takeyama T *et al.* Carbon and nitrogen stable isotope ratios of macroinvertebrates in the littoral zone of Lake Biwa as indicators of anthropogenic activities in the watershed. *Ecological Research*, 2010, **25**(4): 847-855.
- [12] Fry B. Using stable isotopes to monitor watershed influences on aquatic trophodynamics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **56**(11): 2167-2171.
- [13] 张雷燕. 太湖大型水生植物营养盐来源的稳定同位素研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2010.
- [14] 林琳, 吴敬禄. 太湖梅梁湾富营养化过程的同位素地球化学证据. *中国科学: D辑*, 2005, **35**(增刊II): 55-62.

- [15] 秦伯强, 罗激葱. 太湖生态环境演化及其原因分析. 第四纪研究, 2004, **24**(5): 561-567.
- [16] 罗 缙, 逢 勇, 林 颖等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, **33**(2): 131-135.
- [17] 张利民, 王 水, 韩 敏等. 太湖流域望虞河西岸地区氮磷污染源解析及控制对策. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 315-320.
- [18] 陈亚男, 逢 勇, 赵 伟等. 望虞河西岸主要入河支流污染物通量研究. 水资源保护, 2011, **27**(2): 26-34.
- [19] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 687-694.
- [20] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 21-26.
- [21] 林 琳. 人类活动驱动下太湖环境变化的碳氮同位素地球化学响应[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2008.
- [22] 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析. 湖泊科学, 2002, **14**(2): 111-115.
- [23] 李宽意, 文明章, 杨宏伟等. 螺-草的互利关系. 生态学报, 2007, **27**(12): 5427-5432.
- [24] Bronmark C. Interactions between epiphytes, macrophytes and freshwater snails; a review. *Journal of Molluscan Studies*, 1989, **55**(2): 299-311.
- [25] Shiqun H, Shaohua Y, Kaining C *et al.* ^{15}N isotopic fractionation in an aquatic food chain: *Bellamyia aeruginosa* (Reeve) as an algal control agent. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(2): 242-247.