

稳定性氮同位素技术研究太湖梅梁湾区域营养盐差异

曾庆飞¹, 孔繁翔^{1*}, 毛志刚^{1,2}, 孙明波^{1,2}, 谷先坤^{1,2}

(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)

摘要: 稳定同位素技术通常用于指示外源输入对环境的影响, 采用该技术分析了太湖北部不同湖区悬浮颗粒有机物和浮游动物的碳氮稳定同位素比值的差异。结果表明, 不同粒径的悬浮颗粒有机物和浮游动物稳定同位素比值存在显著的季节变化, 夏季普遍高于冬季, 其中 $\delta^{13}\text{C}$ 高 3.19‰~7.21‰, $\delta^{15}\text{N}$ 高 4.20‰~9.36‰。各有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 不能有效区分各湖区的环境差异, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 在各湖区存在显著差异。 $\delta^{15}\text{N}$ 聚类分析显示, 河口区由于受外源输入的影响, 其 $\delta^{15}\text{N}$ 显著低于其他湖区, 单独聚为一类, 而交汇处和湖心区影响较小, 同河口区存在显著差异。整体来讲, 总颗粒有机物和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 同水体 TP 浓度呈显著正相关, 同总溶解性无机氮浓度、铵根离子浓度呈显著负相关。可见, 太湖北部悬浮颗粒有机物和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 受环境营养盐差异的影响强烈, 悬浮颗粒有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 可以作为指示湖区区域差异的有效指标。

关键词: 稳定同位素比值; 区域差异; 悬浮颗粒有机物; 太湖; 梅梁湾

中图分类号: S524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)04-0813-06

Evaluation of Nitrogen Isotopes as Indicators of Spatial Nutrient Difference in Meiliangwan Bay, Tai Lake, China

ZENG Qing-fei¹, KONG Fan-xiang^{1*}, MAO Zhi-gang^{1,2}, SUN Ming-bo^{1,2}, GU Xian-kun^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stable isotope ratios were usually used as suitable indicators to study the anthropogenical effect on water environment. Carbon and nitrogen isotope ratios were measured in suspended organic matter and zooplankton collected from four sites along a contamination gradient in the north part of Tai Lake. Obvious seasonal variability was found in organic matter sources because of the effect of cyanobacterial blooms. The isotope ratios in collected organic matter sources were 3.19‰~7.21‰ heavier in $\delta^{13}\text{C}$ and 4.20‰~9.36‰ heavier in $\delta^{15}\text{N}$ during summer season than that collected in winter season. There existed very high spatial variability in the N isotope composition of the organic matter sources compared with that of $\delta^{13}\text{C}$. Cluster analysis showed that seston and zooplankton $\delta^{15}\text{N}$ at Zhihugang River mouth was depleted compared to that at sites where have less anthropogenical effect, and also has a significant different with the $\delta^{15}\text{N}$ collected at Cross and Lake Center. Bulk suspended organic matter and zooplankton $\delta^{15}\text{N}$ was positively correlated with the concentration of total phosphorus, negatively correlated with the concentration of total inorganic nitrogen and ammonia nitrogen. The results showed that the water nutrient difference had a great effect on the suspended organic matter and zooplankton $\delta^{15}\text{N}$ in the north part of Tai Lake, proving the use of a stable nitrogen isotopic method for predicting wastewater input.

Keywords: stable isotope ratios; spatial difference; suspended organic matter; Tai Lake; Meiliangwan Bay

近几十年来, 稳定性碳氮同位素广泛地应用于水生生态系统的营养生态学研究。同位素方法提高了人们

对食物网结构、营养物质分配、食性转变和食物来源、动物迁徙和栖息地利用等生态问题的认识^[1-5]。近年来, 随着频繁的人类活动加剧了对水生生态系统的压力, 迫切需要有有效的指示体系评价生态环境质量。由于不同来源(粪肥、化肥、生活污水等)和不同形态(NH_4^+ 、 NO_3^-)的氮稳定同位素比值的差异, 稳定性氮同位素技术可以用于指示外源输入对生态系统的影

收稿日期: 2011-10-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30900207); 江苏省自然科学基金资助项目(SBK201021370); 所长专项基金项目(09SL021002)

作者简介: 曾庆飞(1979—), 女, 助研, 主要研究方向为湖泊污染生态。

E-mail: zq-fly@sohu.com

* 通讯作者: 孔繁翔

响^[4,6-7]。以氮素污染为例,当外源输入进入湖泊、河流等生态系统后,一方面被藻类吸收利用,通过食物网传递到更高一级的营养级;另一方面,直接被杂食性消费者利用。可见,人类的外源输入直接或间接的影响生态系统不同营养级生物(初级生产者、底栖生物或浮游生物)。但同时,这种影响的强度和范围也受其他因素的制约,例如污染物来源、总量、水文、水利及其他可能的环境条件(水深、水体和底泥物理化学条件)^[9]。

有研究表明,化肥的 $\delta^{15}\text{N}$ 较低(约为 0‰),而动物粪肥来源和生活污水中的 $\delta^{15}\text{N}$ 相对较高(新鲜样品提取物中约为 5‰)^[8-9]。但由于微生物活动,单纯用这一点来鉴定外源物质来源是欠妥的。当含氮的化工肥料和动物粪肥由于挥发或脱氮作用,以气态形式损失一部分氮素后,剩余物的 $\delta^{15}\text{N}$ 就较高。所以,在水生态系统中测得的这些物质其 $\delta^{15}\text{N}$ 高于其最初值(农田化肥 $\delta^{15}\text{N}$ 达到约 14‰;动物排泄物 $\delta^{15}\text{N}$ 达到 10‰~25‰)^[8-9]。外源氮被藻类光合固定或者通过消费者直接摄食的途径进入水生生态系统食物网,从而引起受干扰地区水生生物同位素比值的差异。稳定氮同位素比值的区域差异是物源信息、生物地球化学过程影响的综合体现^[1,7]。

太湖是我国第三大浅水湖泊,湖泊流域工业化程度高,农田径流、生活污水、工业排污、畜禽养殖排放等经由河道入湖,成为太湖外源污染输入的主要途径。据报道,直湖港是太湖地区受污染最为严重的河流之一,其总氮入湖量在所统计的流域 13 条河流中最高,占总河道入湖量的 23.64%^[10]。受入湖河道的影响,各湖区营养盐存在差异。本文选择直湖港港口-梅梁湾-大太湖为研究区域,分析不同粒级有机物质碳氮稳定同位素地球化学特征,探讨悬浮颗粒稳定 N 同位素能否作为太湖区域环境差异的指示指标。

1 材料与方法

样品于夏季(2006 年 6 月—8 月)和冬季(2006 年 11 月—2007 年 3 月)两季采自直湖港河口(简称河口,31°30'N,120°07'E),梅梁湾湾心(简称湾心,31°28'N,120°11'E)、梅梁湾湾口(简称交汇,31°25'N,120°11'E)和太湖湖心(简称湖心,31°20'N,120°10'E)4 点。分别于夏冬两季各采集 3 次(夏季:6、7、8 月上旬各 1 次;冬季:1、3、11 月上旬各 1 次),所有水样采自表层 20 cm 处,经 500 μm 尼龙网筛预滤,盛装在经 pH 2 盐酸浸泡过的干净聚乙烯塑料桶内。在实验室

内,依次经 200、50、20 μm 尼龙网筛,经预灼烧的 Whatman GF/D 玻璃纤维滤膜(450 $^{\circ}\text{C}$, 4 h)过滤,得到不同粒级悬浮颗粒有机物(POM)。总悬浮颗粒有机物(BPOM)直接过滤 1 L 湖水到经预灼烧的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(450 $^{\circ}\text{C}$, 4 h)。所有颗粒样品滴加 5% HCl 酸化,直至没有气泡产生,离心(5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 5 min,去除上覆水,−20 $^{\circ}\text{C}$ 保存。甲壳类浮游动物用标准 64 μm 浮游生物网采集,蒸馏水清养 2 h 以排除其消化道内含物,人工活体挑选枝角类。

以上样品冷冻干燥 24 h 后研磨备用。所有样品经 Flash EA1112 元素分析仪燃烧,所得 CO_2 和 N_2 气体分别送入 Finnigan MAT 公司的 Deltaplus advantage 型稳定同位素比值质谱计上测定,碳、氮同位素分别以 VPDB 国际标准和大气氮为参考标准,实验室的测定精度是 0.1‰。

总氮 TN、铵根 NH_4^+ 、亚硝酸根 NO_2^- 、硝酸根 NO_3^- 、总磷 TP、正磷酸根 PO_4^{3-} 和叶绿素 Chl *a* 浓度的分析参照标准方法^[11]。溶解性无机氮 DIN 浓度为 $[\text{NH}_4^+]+[\text{NO}_2^-]+[\text{NO}_3^-]$ 之和。采样季节各采样点水体部分理化指标见表 1。

数据统计分析在 SPSS 13.0 下进行。运用 GLM 过程的 Univariate 命令检验所采集的有机样品的碳氮稳定同位素比值在各点位及样品间的差异显著性,运用分层聚类的类间平均链锁法对冬、夏两季 4 点样品的氮稳定同位素比值进行聚类分析,并对同位素比值与环境因子间进行简单的线性相关分析。

2 结果与分析

4 个采样点,夏季和冬季颗粒有机物和枝角类的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 如图 1 所示。各粒级 POM(含 BPOM) $\delta^{13}\text{C}$ 夏季的变化幅度为 $(-25.69\pm 2.80)\text{‰}$ (BPOM,湾心)到 $(-22.80\pm 1.06)\text{‰}$ (>50 μm POM,湾心);冬季的变化幅度为 $(-32.90\pm 5.87)\text{‰}$ (>200 μm POM,湾心)到 $(-25.99\pm 1.35)\text{‰}$ (BPOM,湖心),总体水平低于夏季。枝角类 $\delta^{13}\text{C}$ 夏季的变化范围为 $(-25.47\pm 3.66)\text{‰}$ (河口)到 $(-23.87\pm 0.71)\text{‰}$ (湾心);冬季的变化范围为 $(-32.59\pm 2.01)\text{‰}$ (河口)到 $(-29.63\pm 3.88)\text{‰}$ (交汇)。其 $\delta^{13}\text{C}$ 和各粒级 POM 比起来,略为贫化。

方差分析表明,所采集的 6 种有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 间差异不显著,每种有机物在各采样点间的差异也不显著。颗粒有机物和枝角类 $\delta^{15}\text{N}$ 在各采样点间的差异较大。河口,由于受直湖港入湖污染物的影响,夏季各有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 比值为 $(9.11\pm 4.71)\text{‰}$ (>2.7 μm POM)~

(13.80 ± 0.73)‰($>200 \mu\text{mPOM}$);而在其他各点,各有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 比值均较河口区富集。冬季,河口和湾心各有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 比值差异不明显,变化幅度在 (-0.25 ± 2.56)‰(BPOM,河口)到(4.88 ± 3.74)‰(枝角类浮游动物,河口);相对于河口和湾心,交汇和湖心各有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 较为富集,变化幅度在 (11.42 ± 3.60)‰($>50 \mu\text{mPOM}$,交汇)到(9.90 ± 3.03)‰(BPOM,交汇)。方差分析显示,各有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 在 4 个采样点存在显著差异(ANOVA,夏季: $F=2.840, P=0.048$;冬季: $F=30.811, P<0.001$)。聚类分析表明(图 2),冬季河口区和湾心 $\delta^{15}\text{N}$ 可以聚为一类,交汇处和湖心区聚为一类;夏季湾心、交汇处和湖心可以聚为一类,河口区和它们存在显著差异,单独一类。由此可见,河口区由于受外源输入,其 $\delta^{15}\text{N}$ 和其他湖区存在显著差异;POM $\delta^{15}\text{N}$ 可以作为指示湖区区域差异的有效指标。各粒级 POM 和 BPOM 间存在显著的相关性(数据没有显示, $P<0.05$)。

$\delta^{15}\text{N}_{\text{Cladocera}}$ 随湖水营养盐浓度的变化趋势同 BPOM 类似。同 TP 浓度呈显著正相关关系($r=0.369, P=0.038$),同 DIN($r=-0.593, P<0.001$)和 $[\text{NH}_4^+]$ 浓度($r=-0.614, P<0.001$)呈显著负相关关系(图 3)。以 BPOM 作为代表,可以看到 $\delta^{15}\text{N}_{\text{BPOM}}$ 同 TP 浓度呈显著正相关关系($r=0.409, P=0.02$),同 DIN($r=-0.643, P<0.001$)和 $[\text{NH}_4^+]$ ($r=-0.686, P<0.001$)呈显著负相关关系,随 DIN 和 $[\text{NH}_4^+]$ 浓度的增加而降低(图 3)。

3 讨论

湖水表层颗粒有机物通常来自原位生产力、陆源输入、底泥再悬浮或这几种的混合物。颗粒碎屑和藻类在个体大小上重叠,实际操作中很难将它们分开^[12],特别是在冬季。有研究表明, $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 随湖泊初级生产力的变化而变化^[13]。Gu 等^[14]认为温带和亚寒带的富营养化湖泊 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 存在典型的季节波动。太湖位于亚热

带和温带的交界地区,气候季节特征明显,通常水温周年变化幅度为 $5 \sim 30^\circ\text{C}$ 。在本研究中,各粒级颗粒物随湖泊生产力呈现显著的季节变化,夏季各粒级 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 同藻类接近[藻类 $\delta^{13}\text{C}$ 在($-23.7 \sim -20.8$)‰之间]。

太湖是典型的藻型湖泊,水生高等植物稀疏,藻类为 POM 的贡献提供了基础。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 的季节变化主要受湖水温度、湖泊初级生产力、溶解性无机碳 DIC 等因素影响。初夏,太湖藻类光合作用随水温的增加而逐渐增强。高的 CO_2 吸收率导致湖水 pH 上升,而引起 C 平衡向 HCO_3^- 偏移,成为水体 DIC 的主要组成部分^[15]。由于 HCO_3^- 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均比自由态的 CO_2 高 8‰ ^[16],很有可能是因蓝藻吸收了 C 同位素比值较高的 HCO_3^- 而引起自身同位素比值的提高。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 同 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 存在显著的相关性($r=0.759, P=0.048$, 数据没显示)。Mariotti 等^[17]发现 North Sea 悬浮颗粒物的 N 稳定同位素比值随湖水温度的升高而增加。Goering 等^[18]也有类似的报道,他们认为主要是由于夏季藻类快速生长其 $\delta^{15}\text{N}$ 的同位素分馏降低引起的。太湖藻类 N 同位素分馏没有测定,但我们发现它同 DIN 浓度存在显著负相关。在 Childs River 也发现了类似的现象^[5]。Ferber 等^[19]报道了蓝藻对 DIN 的吸收率高于固氮作用,而引起 $\delta^{15}\text{N}$ 的升高。太湖是以非固氮的微囊藻为优势藻类,微囊藻对 DIN 高的利用率是引起夏季 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 较高的原因。

受河道污染物排放的影响,各粒级颗粒有机物和浮游动物 C、N 同位素比值存在区域差异,方差分析显示,仅 $\delta^{15}\text{N}$ 区域差异显著。这同许多研究结论相吻合,即 $\delta^{15}\text{N}$ 是指示人类外源输入对食物网结构影响的良好指示指标^[4,6-7]。底栖动物迁移力小,能够很好反映既定区域的同位素特征,所以 Vizzini 和 Mazzola^[1]认为非游泳底栖消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 的区域差异指示效果优于游泳生物。Anderson 和 Cabana^[2]的研究表明,初级消费者,如浮游动物,由于直接摄食固定环境氮源的

表 1 2006 年至 2007 年太湖水体部分理化指标的平均值和变化范围

Table 1 Annual means and ranges of selected limnological variables during sampling dates

采样点	河口	湾心	交汇	湖心
$\text{Chla}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	23.13(0.70~84.97)	33.52(0.45~74.41)	31.55(0.43~82.26)	22.40(1.41~79.14)
$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.455(1.452~5.738)	2.974(0.430~6.854)	2.809(0.376~3.381)	2.733(0.361~4.166)
$\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.081(0.018~0.349)	0.055(0.015~0.157)	0.047(0.012~0.213)	0.033(0.012~0.060)
$[\text{PO}_4^{3-}]/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	20.174(3.530~47.577)	17.828(3.535~52.848)	10.677(1.374~33.079)	6.596(1.462~13.620)
$[\text{NH}_4^+]/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.289(0.030~3.634)	1.119(0.020~4.369)	1.116(0.020~2.419)	0.694(0.020~0.423)
$[\text{NO}_3^-]/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.610(0.220~3.180)	0.453(0~1.160)	0.311(0.020~1.000)	0.742(0~0.690)
$\text{DIN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.898(0.290~4.584)	1.572(0.084~6.529)	1.427(0.077~3.119)	1.436(0.031~3.843)

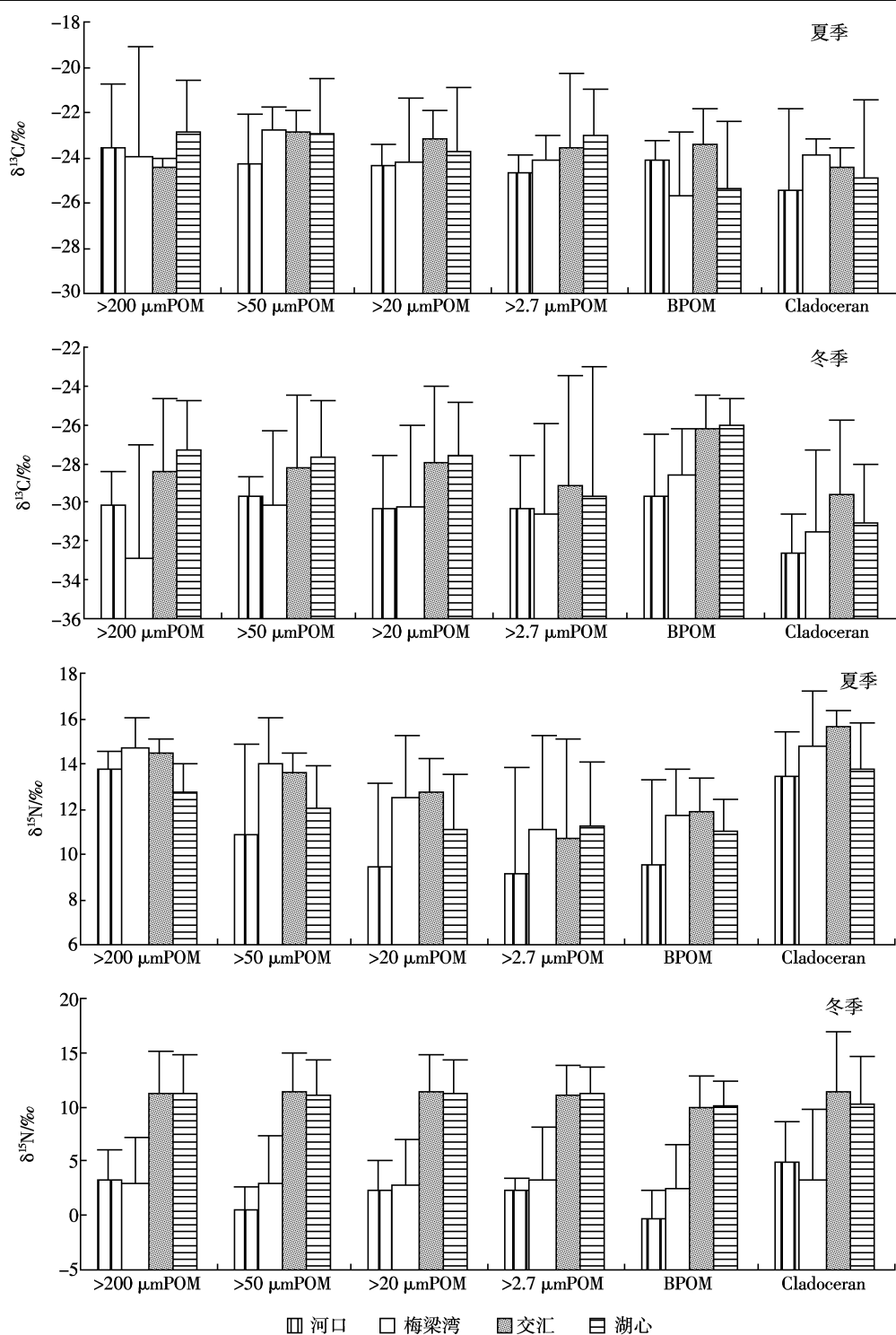
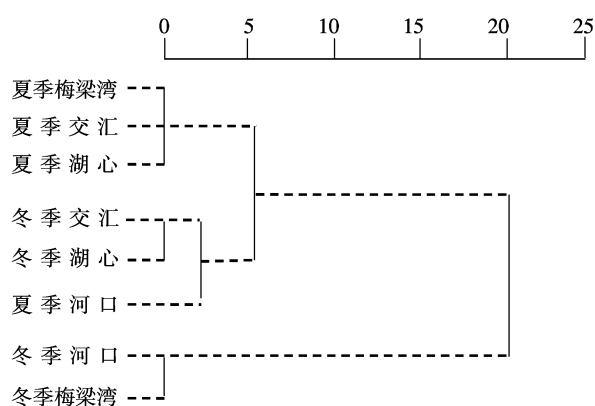


图 1 太湖 4 个采样点冬夏两季有机物和枝角类浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$

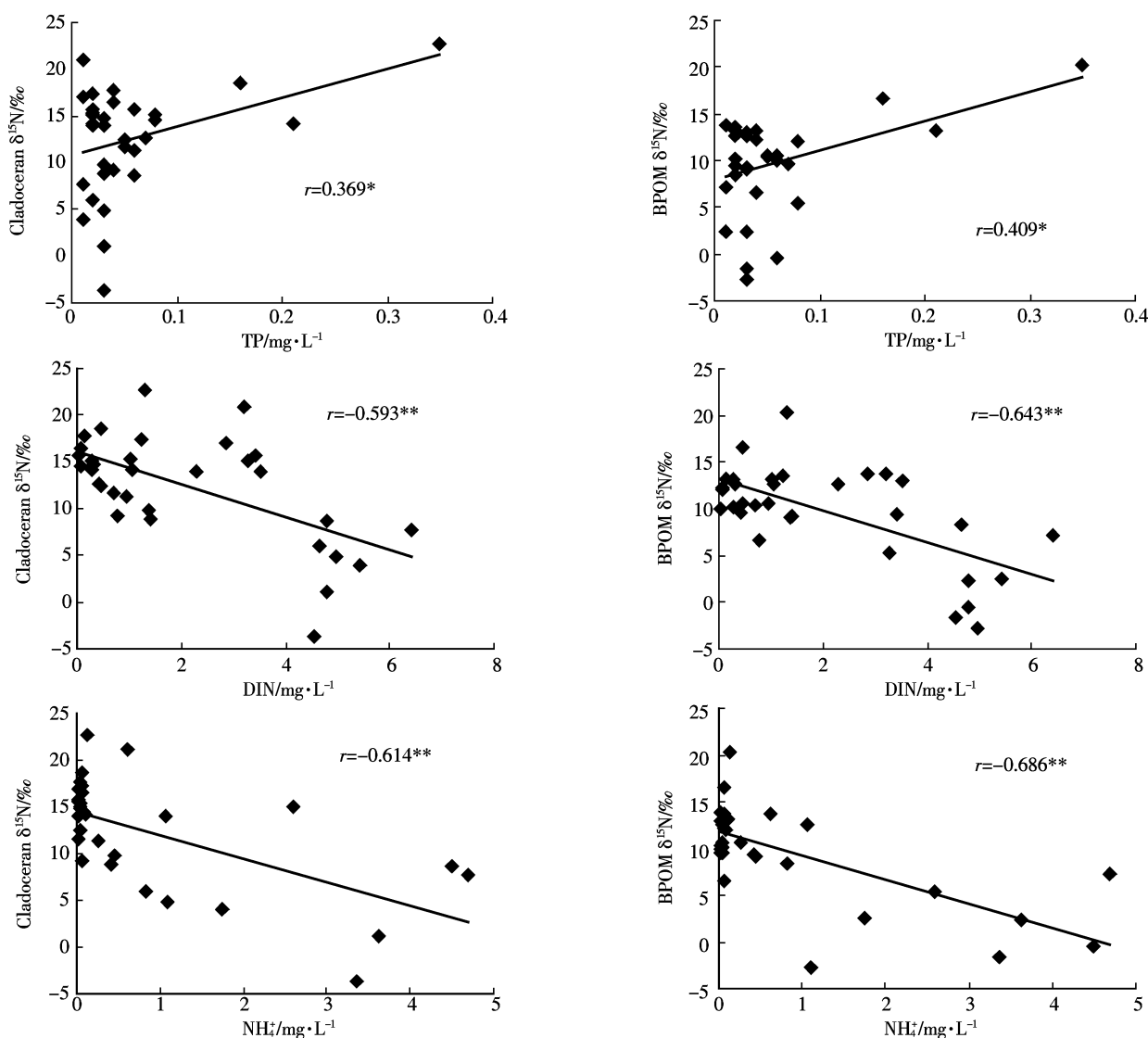
Figure 1 Stable isotope composition of organic matter sources and cladoceran sampled at four locations in Tai Lake in winter and summer, respectively

藻类或水生植物,且迁移力小,其 $\delta^{15}\text{N}$ 的外源指示效果较杂食类生物和鱼类等消费者好。在本研究中,我们采用了 POM 和浮游动物作为代用指标,其 N 同位素比值存在季节差异,同时与水体 N 素营养盐浓度

存在显著相关,在各点差异显著。所以,以 POM 和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 作为环境的代用指示指标是可行的。但由于没有测定其他生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 与其进行比较,我们还不能说它是最优的。

图 2 太湖 4 个采样点有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 的聚类分析Figure 2 Hierarchical cluster analysis of the organic matter sources and cladoceran $\delta^{15}\text{N}$ from Taihu Lake

本研究中,在河口受人类外源输入影响最大的区域,悬浮颗粒有机物和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 较低,随着向太湖湖心的深入,外源影响逐渐减弱,N 同位素比值逐渐增加,同 DIN 浓度成显著负相关,同 TP 浓度成显著正相关。Anderson 和 Cabana^[3]的研究表明,河流生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 同流域人口密度、总的氮输入量、家畜粪便和化肥来源氮量呈显著正相关。Cole 等^[7]调查了北美、巴西等地 11 个海湾不同种类的水生植物,发现其 $\delta^{15}\text{N}$ 随河口污水排入量和水体 DIN 浓度的增加而增加。Pruehl 等^[20]报道了 Narragansett 海湾食物网生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 呈现离河口越远其值越低的趋势^[16]。以上研究结论和本文截然相反,但也有研究表明较高浓度的尿素、氨根离子和未经处理的污水会引起悬浮颗粒和生物 N 同位素比值的降低^[21-23]。在新西兰 Moa Point 海

图 3 太湖悬浮颗粒有机物和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 同水体 TP、DIN、 $[\text{NH}_4^+]$ 浓度的线性相关分析Figure 3 Relationship between the $\delta^{15}\text{N}$ of BPOM and cladoceran and TP, DIN, and $[\text{NH}_4^+]$ concentration in Tai Lake, respectively

湾污水排放口,贝类肌肉的 $\delta^{15}\text{N}$ 较海域区的低^[21]。Anderson和Cabana^[3]发现,污水未经处理 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 在 $(-0.13\sim 1.15)\text{‰}$ 之间,平均 $(0.35\pm 0.57)\text{‰}$;而处理后的污水 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 在 $(2.21\sim 8.18)\text{‰}$ 之间,平均 $(5.16\pm 3.29)\text{‰}$ 。太湖河口的铵根离子浓度明显高于其他区域,可能浮游藻类因吸收了N同位素较低的氨态而 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 较低。

4 结论

研究期间,由于受太湖蓝藻水华的影响,悬浮颗粒有机物和浮游动物稳定性碳、氮同位素比值具有明显的季节性变化,夏高冬低。统计分析表明, $\delta^{13}\text{C}$ 不能有效区分各湖区的环境差异,而 $\delta^{15}\text{N}$ 在各湖区差异显著。聚类分析表明,冬季,河口区和湾心差异不显著,聚为一类,交汇处和湖心区差异不显著,但同河口区和湾心存在显著差异;夏季,湾心、交汇处和湖心差异不显著,河口区由于受外源输入,其 $\delta^{15}\text{N}$ 显著低于其他湖区,单独聚为一类。悬浮颗粒有机物和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 同水体营养盐浓度存在显著相关性。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{POM}}$ 可以作为指示湖区区域营养盐差异的有效指标。

参考文献:

- [1] 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[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368: 723–731.
- [2] Anderson C, Cabana G. $\delta^{15}\text{N}$ in riverine food webs: Effects of N inputs from agricultural watersheds[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2005, 62: 333–340.
- [3] Anderson C, Cabana G. Does $\delta^{15}\text{N}$ in river food webs reflect the intensity and origin of N loads from the watershed?[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367: 968–978.
- [4] McClelland J W, Valiela I. Changes in food web structure under the influence of increased anthropogenic nitrogen inputs to estuaries[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, 168: 259–271.
- [5] York J K, Tomasky G, Valiela I, et al. Stable isotopic detection of ammonium and nitrate assimilation by phytoplankton in the Waquoit Bay estuarine system[J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(1): 144–155.
- [6] Heikoop J M, Risk M J, Lazier A V, et al. Nitrogen-15 signals of anthropogenic nutrient loading in reef corals[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 628–636.
- [7] Cole M L, Valiela I, Kroeger K D, et al. Assessment of a $\delta^{15}\text{N}$ isotopic method to indicate anthropogenic eutrophication in aquatic ecosystems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33: 124–132.
- [8] Heaton T H E. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A review[J]. *Chemical Geology*, 1986, 59: 87–102.
- [9] Kendall C. Tracing nitrogen sources and cycling in catchments[M]// Kendall C, McDonnell J J. Isotope tracers in catchment hydrology. Amsterdam, 1998: 519–576.
- [10] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 24–25.
- QING Bo-qiang, HU Wei-ping, CHEN Wei-min, et al. Process and mechanism of environmental changes of the Taihu Lake[M]. Beijing: Science Press, 2004: 24–25.
- [11] 金相灿, 屠清瑛编著. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 138–207.
- JING Xiang-can, TU Qing-ying. Specifications of limnology eutrophication survey[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 138–207.
- [12] Martineau C, Vincent W F, Frenette J J, et al. Primary consumers and particulate organic matter: Isotopic evidence of strong selectivity in the estuarine transition zone[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(5): 1679–1686.
- [13] Lehmann M F, Bernasconi S M, McKenzie J A, et al. Seasonal variation of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of particulate and dissolved carbon and nitrogen in Lake Lugano: Constraints on biogeochemical cycling in a eutrophic lake[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49: 415–429.
- [14] Gu B H, Alexander V, Schell D M. Seasonal and interannual variability of plankton carbon isotope ratios in a subarctic lake[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 42: 417–426.
- [15] Gu B H, Chapman A D, Schelske C L. Factors controlling seasonal variations in stable isotope composition of particulate organic matter in a soft water eutrophic lake[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(6): 2837–2848.
- [16] Mook W G, Bommerson J C, Stavermen W H. Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1974, 23: 169–176.
- [17] Mariotti A, Lancelot C, Billen G. Natural isotopic composition of nitrogen as a tracer of origin for suspended organic matter in the Scheldt estuary[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 549–555.
- [18] Goering J, Alexander V, Haubenstock N. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific Bay[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, 30: 239–260.
- [19] Ferber L R, Levine S N, Lini A, et al. Do cyanobacteria dominate in eutrophic lakes because they fix atmospheric nitrogen?[J]. *Freshwater Biology*, 2004, 49: 690–708.
- [20] Pruell R J, Taplin B K, Lake J L, et al. Nitrogen isotope ratios in estuarine biota collected along a nutrient gradient in Narragansett Bay, Rhode Island, USA[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52: 612–620.
- [21] Rogers K. Effects of sewage contamination on macro-algae and shellfish at Moa Point, New Zealand, using stable carbon and nitrogen isotopes[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1999, 33: 181–188.
- [22] Tucker J, Sheats N, Giblin A E, et al. Using stable isotopes to trace sewage-derived material through Boston Harbor and Massachusetts Bay[J]. *Marine Environmental Research*, 1999, 48: 353–375.
- [23] Debruyn A H, Rasmussen J B. Quantifying assimilation of sewage-derived organic matter by riverine benthos[J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(2): 511–520.