

马来眼子菜和 POM 稳定同位素对污染源的指示作用

张雷燕¹, 安浩^{1,2}, 关保华³, 程寒飞¹

(1. 中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京 210019;

2. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210046;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊科学与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:为了探究大型植物马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)和颗粒有机物质(Particulate organic matter, POM)对湖泊主要污染源的指示作用,在贡湖湾选取14个样点,采集马来眼子菜和POM样品,分析其碳、氮稳定同位素的变化。结果显示,马来眼子菜和POM有相似的 $\delta^{15}\text{N}$ 值趋势,都是随着离入湖口距离越远,其 $\delta^{15}\text{N}$ 值逐渐增加,马来眼子菜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为10.8‰~14.1‰,POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为6.69‰~14.1‰;而马来眼子菜的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着离入湖口距离越远有下降趋势,变化范围为-17.6‰~-14.5‰;POM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则有增加趋势,变化范围为-26.9‰~-24.6‰。马来眼子菜较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值指示了人类生活污水来源的氮,表明贡湖湾的主要污染源为生活污水。相关分析表明,水中总溶解磷(TDP)与马来眼子菜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值有明显的负相关关系,总氮(TN)与POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值则呈很好的正相关关系;而POM的N占比和底泥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别与POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 值有明显的正相关性。研究表明,马来眼子菜和POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值能够指示太湖贡湖湾的主要污染源。

关键词:马来眼子菜;颗粒有机物质;稳定同位素;太湖;污染源

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)01-0079-07

湖泊富营养化近年来愈发加剧,由此可能导致大型水生植物群落和生物多样性的消失以及水质恶化等一系列严重问题(Conley et al, 2009)。大型植物是湖泊中主要的生产者,许多研究者用大型植物的稳定氮同位素比率来指示水生系统中氮的来源(Castro et al, 2007; Zhang et al, 2010)。虽然进入水生生态系统的氮有多种来源,但不同的来源均表现出不同的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。例如,生活污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在10‰~20‰,大气沉降的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在2‰~8‰,而肥料的 $\delta^{15}\text{N}$ 值则在-3‰~4‰(Kreitler et al, 1975; Gormly et al, 1979)。因此,在水生生态系统中,植物升高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值能够用来追踪人类生活污水来源的氮(Costanzo et al, 2001)。

植物组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 值被用来辨别主要光合作用路径和 CO_2 的相对限量。在某些条件和压力下(如水和营养的有效性),当气孔关闭时, CO_2 的扩散受到限制,限制了酶的分馏,使得植物组织有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(Osmond et al, 1981)。因此,植物组织的

$\delta^{13}\text{C}$ 值能够间接反映湖泊的营养状况。在水生生态系统中,颗粒有机物质(Particulate organic matter, POM)的一个主要来源是原位生长的浮游植物,另一个主要的来源则是浮游生物、陆地和外来碎屑的混合物(Cifuentes et al, 1988)。由于在水生生态系统的不同区域POM的组成不同,所以POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值在空间上表现出明显的差异。POM的碳、氮稳定同位素所受的影响因素不同,不同物种氮同位素的变化主要与各种生物地球化学转换相关,如反硝化、硝化、 NO_3^- 的同化和 N_2 的固定以及营养来源的同位素成分等(Mino et al, 2002);POM的C同位素值则主要受 CO_2 浓度、气温和营养变化的影响(Gu et al, 2011)。有研究表明,颗粒有机物质的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值能够追踪有机物质的来源和去向以及营养的利用(Gu et al, 2011)。

以往的调查表明,贡湖湾现分布有8种水生植物群落,其中马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)群落分布区面积和生物量最大(赵凯等, 2015),且受环境的影响较大,能够敏感地指示环境变化(张金美, 2016)。因此,本研究选择马来眼子菜和POM进行研究,通过分析马来眼子菜和POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值,描述贡湖湾水质的空间变化趋势,并且对湖湾的主要污染来源进行指示。

收稿日期:2018-06-28

基金项目:南京市科技计划项目(201608016);国家自然科学基金(51508263, 31270409)。

作者简介:张雷燕,1982年生,女,博士研究生,主要从事湖泊生态修复。E-mail: lyzhang27@126.com

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究点位于太湖东北部贡湖湾区(图1),长约19 km,宽7~8 km,水域面积147 km²,平均水深2 m,仅西南面开敞与太湖水体相通。贡湖湾邻接

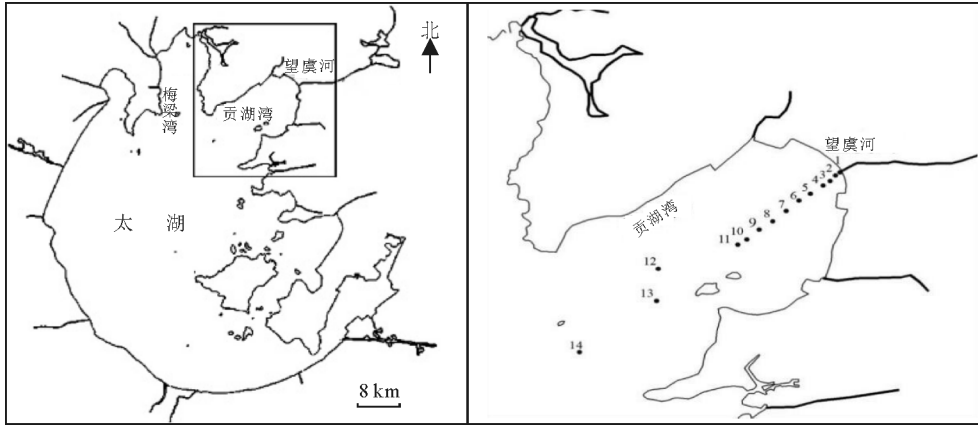


图1 贡湖湾在太湖中的位置以及采样点分布

Fig.1 Distribution of Gonghu Bay in Taihu Lake and the location of the sampling sites

1.2 样品采集

于2011年10月至2012年4月在贡湖湾沿着入湖河流入口处由近及远选取14个样点采集大型植物优势种群(马来眼子菜)和POM(图1)。其中1号样点记做入湖口处,2号样点距入湖口的距离是0.4 km,以此类推,14号距离是20.6 km。在每个采样点周围50 m²的区域,分别采集两份马来眼子菜、POM和表面底泥作为相应的重复样品。

1.2.1 植物样品 采样点采集的马来眼子菜带回室内,将植物的叶子、茎和根混合作为一份植物样品,于烘箱中60℃烘至恒重,磨碎,测其TN、TC、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 。

1.2.2 POM样品 将1.2 μm GF/C膜在马弗炉里450℃灼烧4 h备用,抽滤水样得到膜上的颗粒物质,在烘箱里烘干,刮下膜上的物质磨碎,同位素质谱仪测N稳定同位素。对于C稳定同位素,为了消除水中无机碳的影响,先向水样中滴加3滴pH 2的盐酸,随后抽滤,得到的膜先用蒸馏水冲洗3遍,去除酸对同位素值的影响,再烘干,刮下膜上物质磨碎,测C稳定同位素。

1.2.3 表面底泥样品 在采样点用彼得森采泥器采集得到,装入自封袋,带回室内。将取回来的沉积物样品,清除大颗粒的杂物,一部分放入烘箱中,60℃烘干,取出磨碎过100目筛,称取适量的样品放入小锡囊,在上述型号的质谱仪和元素分析仪上测

无锡市和常州市,周围工商业和农业发达,为人口聚居区域,陆域存在的污染物种类多、数量大、性质复杂、分布广泛。贡湖是长江水入太湖“引江济太”的通道,也是苏州、无锡两市金墅港、沙渚、锡东3处集中式饮用水水源地所在。望虞河是其主要入湖河流,每年有大量的长江水通过望虞河进入贡湖湾。

N稳定同位素以及沉积物中的总有机氮(Total organic nitrogen, TON)。

由于沉积物样品含有碳酸钙,对C稳定同位素的测定结果有很大的影响,所以对样品进行酸化。酸化好的样品在60℃干燥后研磨成粉,以保证样品完全均匀。然后称取沉积物样品放入小锡囊中,在质谱仪上测C稳定同位素。元素分析仪测定其内的总有机碳(Total organic carbon, TOC)。

1.3 化学和同位素分析

水样的总氮(TN)、总磷(TP)、总溶解磷(TDP)和总溶解氮(TDN)检测分析参考GB/T 5750-2006《生活饮用水标准检验方法》进行测定。

在DELTAplus Advantage质谱仪(Finnigan MAT)连接一个Flash EA1112型号的元素分析仪上测定C、N稳定同位素。同位素值用元素在样品中所占的千分值表示(δ),按照下式计算(Veuger et al, 2007):

$$\delta X = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000\%$$

式中: X表示¹³C或者¹⁵N; R表示¹³C/¹²C或者¹⁵N/¹⁴N, Vienna Pee Dee Belemnite的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是0.0‰, N₂的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为0.0‰。

1.4 数据统计

马来眼子菜和POM的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值与马来眼子菜、POM、底泥、水的营养浓度以及与底泥碳、氮同位素值的相关关系通过SPSS 19.0获得。

2 结果与分析

2.1 贡湖湾水体的总氮和总磷变化

采样期间贡湖湾年均水深 2.0 m, 平均透明度 0.6 m, 水质较好, 处于地表水 II-III 类(图 2)。随着离入湖口越远, TN 值越高, 变化范围是 0.71~0.99 mg/L; 而其 TP 则相反, 离入湖口越远, 其值越低, 变化范围是 0.036~0.077 mg/L。

2.2 植物和底泥 POM 的碳、氮含量变化

1 号样点为入湖口, 14 号样点距离入湖口最远, 距离为 20.6 km。从图 3-图 4 可以看出, 14 个采样点大型植物 N 的变化范围为 1.54%~2.68%, 变化趋势不明显; C 的变化范围为 50.38%~73.1%, 随着离入湖口越远其值逐渐增加。底泥的 N 从入湖口到湖心处降低了大约 79%, 变化范围是 0.28%~0.06%; 而 C 离入湖口越远, 其值越低, 变化范围是 3.12%~0.63%。POM 的 N 随着离入湖口越远, 增加越明显, 其较高值分布在样点 10、11、12; C 的值变化趋势与 N 趋势相似, 其最高值出现在样点 13, 为 5.62%。

2.3 植物和底泥的碳、氮同位素值变化

马来眼子菜、POM 和表面底泥的碳、氮同位素值沿着采样点的变化有明显的改变(图 5-图 6)。马来眼子菜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值是在 10.8‰~14.1‰; 而 POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化幅度较大, 在 6.69‰~14.1‰; 表面底泥 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围为 6.03‰~8.98‰。3 种样品的变化趋势相似, $\delta^{15}\text{N}$ 值均是随离入湖口越远其值逐渐升高。在所有采样点中, 马来眼子菜、POM 和表面底泥的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围分别为 -17.6‰~-14.5‰、-26.9‰~-24.6‰和 -25.4‰~-21.1‰; 其中, POM 和表面底泥的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势相似, 均是随着离入湖口距离越远其值逐渐升高; 而马来眼子菜 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势则相反, 随着离入湖口距离越远其值有下降趋势。相关分析表明, 马来眼子菜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与湖水的 TDP 有明显的负相关关系, 与底泥的 C 有明显的正相关关系(表 1, $n=14$)。POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 POM 的 N、底泥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值、水中的 TN 有明显的正相关关系。POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与马来眼子菜的 C 有较好的负相关关系, 而与湖水的 TN 和底泥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值则呈正相关关系。

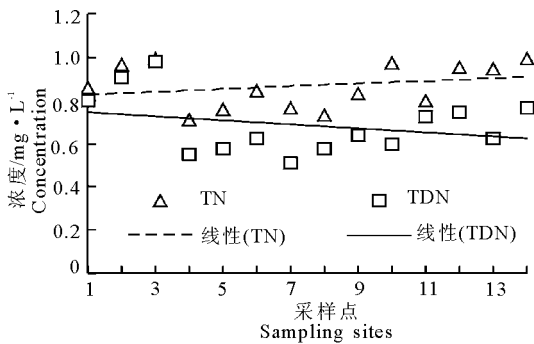


图 2 贡湖湾各采样点湖水中的 TN、TDN、TP 和 TDP 值的变化趋势

Fig.2 Variation trends of TN, TDN, TP and TDP in the water body of the sampling sites

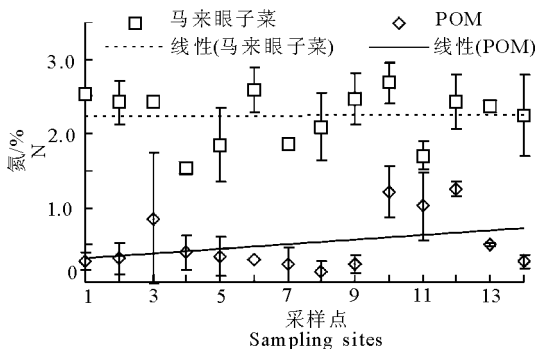
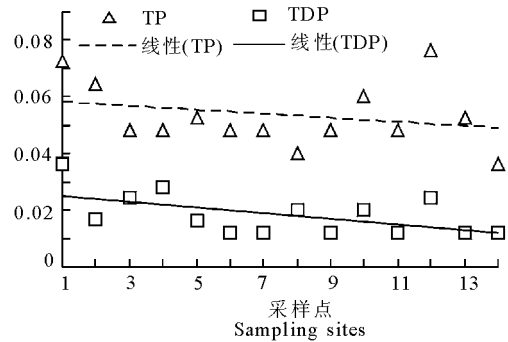
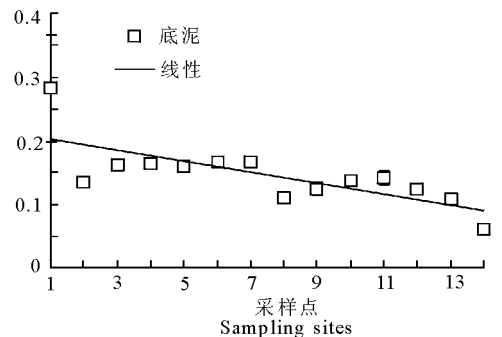


图 3 马来眼子菜、底泥和 POM 中的氮变化趋势

Fig.3 Variation trends of N in *P. malaiianus*, sediments and POM



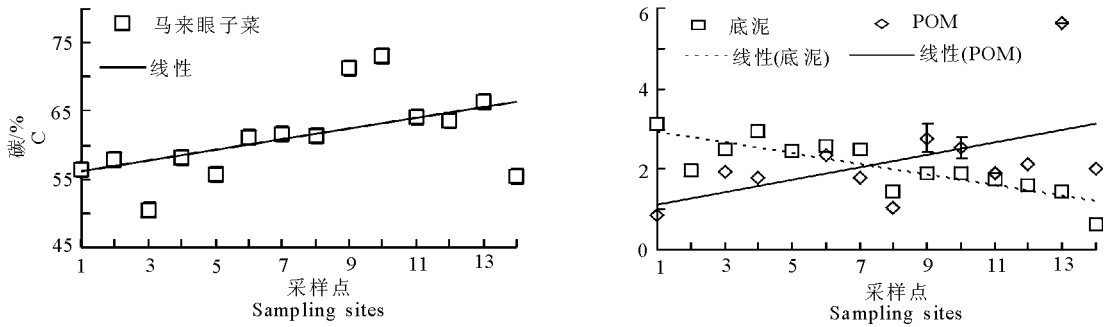


图4 马来眼子菜、底泥和 POM 中的碳变化趋势

Fig.4 Variation trends of C in *P. malaianus*, sediments and POM

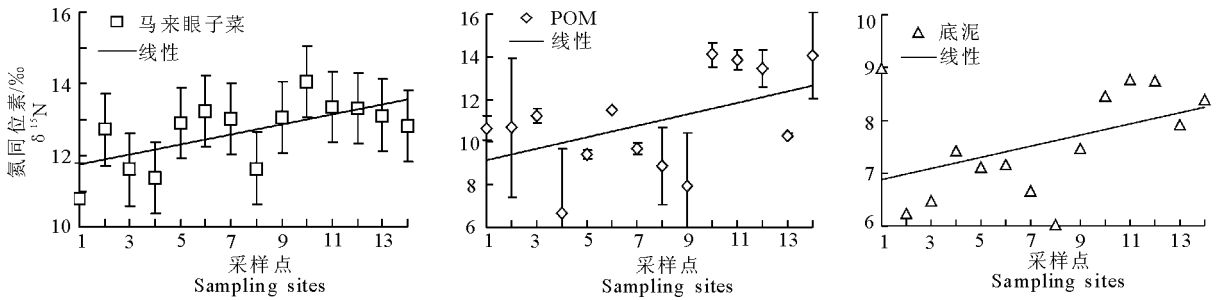


图5 马来眼子菜、POM 和底泥 δ¹⁵N 值的变化趋势

Fig.5 Variation trends of δ¹⁵N in *P. malaianus*, POM and sediments

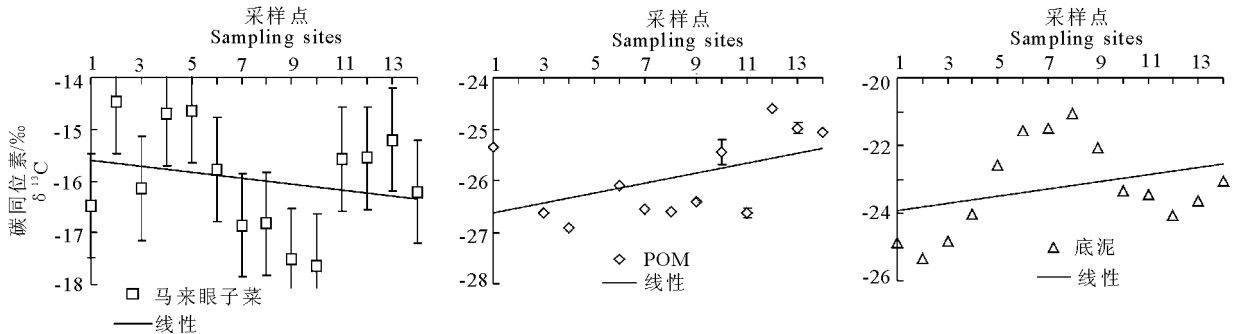


图6 马来眼子菜、POM 和底泥 δ¹³C 值的变化趋势

Fig.6 Variation trends of δ¹³C in *P. malaianus*, sediments and POM

表1 贡湖湾中马来眼子菜和 POM 与底泥的 δ¹⁵N、δ¹³C 及各营养指标的相关关系

Tab.1 Correlation coefficients (*r*) between δ¹⁵N and δ¹³C of *P. malaianus*, POM and the nutrient concentrations of *P. malaianus*, POM, sediments and water, δ¹⁵N and δ¹³C of sediments in the Gonghu Bay

项目	马来眼子菜		POM		底泥		湖水						
	N	C	N	C	δ ¹⁵ N	δ ¹³ C	N	C	TN	TDN	TP	TDP	
δ ¹⁵ N	马来眼子菜	0.18	-0.08	0.43	-0.21	0.22	0.29	-0.52	0.56*	0.28	-0.27	0.01	-0.72**
	POM	0.37	-0.48	0.65*	-0.23	0.56*	-0.21	-0.23	0.42	0.66*	0.36	0.21	-0.16
δ ¹³ N	马来眼子菜	-0.40	0.40	-0.05	0.47	-0.12	-0.43	-0.01	-0.20	-0.07	0.19	0.14	0.03
	POM	0.58	-0.68*	0.30	-0.44	0.65*	-0.32	-0.15	0.10	0.70*	0.20	0.54	0.07

注: * *P* < 0.05; ** *P* < 0.01.

3 讨论

3.1 δ¹⁵N 值在湖泊中的空间变化趋势不同

从图 5 看出,随着离入湖口距离的增加,马来眼子菜的 δ¹⁵N 值逐渐增大。POM 的 δ¹⁵N 值的变化

趋势与马来眼子菜的相似。在离入湖口 1 km 处,马来眼子菜和 POM 有较低的 δ¹⁵N 值,是由于长江水对太湖水的稀释作用。研究表明,长江主要的支流和干流的 POM 的 δ¹⁵N 值较低,在 2.7‰~5.7‰,且水中 NO₃⁻ 的 δ¹⁵N 值也表现出较低的水平,范围为 0.4‰~6.5‰(Quan et al,2012)。长江中大量含

有较低 $\delta^{15}\text{N}$ 值的水通过望虞河进入贡湖湾, 使得入湖口处 POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值表现出较低的水平。底泥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在接近入湖口处也较低, 马来眼子菜既能从湖水中获得营养, 又能从底泥中吸收营养, 因此表现出较低的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。

本研究中, 马来眼子菜在离入湖口大于 10 km 的样点处有较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 且 POM 和底泥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均在离入湖口较远处较高, 是因为这些样点靠近湖区和梅梁湾, 在风的作用下, 湖区和梅梁湾的颗粒物质和沉积有机物被大型植物床聚集捕获 (Wang et al, 2006; Wu et al, 2010)。研究发现, 梅梁湾的微囊藻和硝酸盐均有较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 且梅梁湾受生活污水影响较大 (Lin et al, 2006); 沉积有机质的碳、氮同位素能够指示其来源 (房吉敦等, 2018)。作为 POM 主要组成部分的浮游植物吸收了含有较高 $\delta^{15}\text{N}$ 值的氮, 表现出较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 因此 POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在远离入湖口处较高, 沉水大型植物能够吸收利用这类微粒营养氮 (Zhang et al, 2010)。因此, 马来眼子菜在远离入湖口的样点处表现出较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。Inglett 等 (2006) 通过研究得出相似的结论, 在越靠近污染的地方, 植物叶子的 $\delta^{15}\text{N}$ 值越高, 克拉莎属 (*Cladium*) 和香蒲属 (*Typha*) 两种植物分别富集 4% 和 6%。

人类生活污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高, 在 10%~20%, 这与污水的处理过程和人类所处食物链的顶级有直接的关系 (Kreitler et al, 1975; Townsend-Small et al, 2007)。在本研究中, 马来眼子菜 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化范围在 10.8%~14.1%。研究表明, 大型植物的氮稳定同位素受多种因素影响, 包括氮的可利用性、植物体内的生理过程等, 但最主要的影响因素还是外部氮源的同位素比率 (Evans et al, 1996)。因此, 马来眼子菜较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值主要受人类生活污水来源氮的较高 $\delta^{15}\text{N}$ 值影响, 充分说明在太湖的东北部贡湖湾内, 人类生活污水来源的氮占外源氮输入的主要部分。本研究结果表明, 生活污水仍然是太湖水环境的主要问题, 应最大程度减少生活污水输入, 保护太湖水质。

3.2 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随入湖口距离增加而降低

植物的碳稳定同位素是生态系统碳的自然指示者, 因为植物在光合作用固定 CO_2 和 HCO_3^- 时, 呈现不同的生物化学路径, 所表现出来的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同 (Stephenson et al, 1984)。研究表明, C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -21%~-35%, C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -9%~-20% (Badeck et al, 2005); 水生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

范围较宽, 在 -11%~-50% (Keely et al, 1992)。在本研究中, 马来眼子菜 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -14.5%~-17.6%, 且在距入湖口较远时有下降的趋势 (图 2-图 6)。近入湖口处, 马来眼子菜 $\delta^{13}\text{C}$ 值的升高可能是由于光合作用的增加所致 (Inglett et al, 2006); 因为从长江引入的水含有高的营养物质, 营养物质增多, 相应的光合作用也会增强。

POM 的碳稳定同位素能够用来研究碳的循环路径和湖泊中主要的生物地球化学循环过程 (Gu et al, 2011)。在本次研究中, POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 -24.6%~-26.9%, 在距入湖口较远时, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值有略微上升的趋势 (图 6), 是因为长江水中较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值对太湖湖水的稀释作用。在水生生态系统中, POM 的一个主要的来源是原位生长的浮游植物, 另一个主要的来源则是浮游生物、沉积有机物、陆源和外部碎屑的混合物 (Cifuentes et al, 1988); Wu 等 (2007) 研究表明, 长江主要支流中 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -25.1%~-26.8%, 且底泥的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在远离入湖口处有上升趋势 (图 6)。因此, 由于长江水的稀释作用, 在接近入湖口处 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低。

3.3 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值与植物生长的相关性

表 1 可见, 马来眼子菜的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与湖湾水的 TDP 有明显的负相关关系; 而 POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与 POM 的 N、水中的 TN 呈明显的正相关关系。由于浮游植物是水生生态系统中 POM 的主要成分, 因此水中 TN、TDP 的增加能够刺激浮游植物的生长, 使得浮游植物矿化更多的氮, 导致 ^{15}N 分馏减少, POM 的 ^{15}N 富集。相应地, 马来眼子菜与浮游植物形成营养竞争, 吸收相对较少的 N, 导致其 ^{15}N 亏缺。本研究发现, POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与底泥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值有明显的正相关性, 是因为表面底泥是 POM 的另一个主要的组分, 因此 POM 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随着底泥 $\delta^{15}\text{N}$ 值的增加而增加。

水中 TN 与 POM 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则呈明显的正相关关系, 是因为贡湖湾是一个以浮游植物占优势的湖湾, 浮游植物是水生生态系统中 POM 的主要组分。研究表明, 氮的供应能够限制浮游植物的生长, 水中 TN 的可利用性增加, 能够刺激藻类对 C 的固定, 同时使得 ^{13}C 的分馏减少, 导致浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加 (Gu et al, 1996)。

参考文献

房吉敦, 熊永强, 吴丰昌, 等, 2018. 典型水库沉积有机质

- 组成特征及其源解析[J]. 环境科学与技术, 41(2): 41 - 46.
- 张金美, 2016. 鄱阳湖区典型真水生植物组织中碳、氮同位素特性研究[D]. 南昌: 南昌大学.
- 赵凯, 李振国, 魏宏农, 等, 2015. 太湖贡湖湾水生植被分布现状(2012年)[J]. 湖泊科学, 27(3): 421 - 428.
- Badeck F W, Tcherkez G, Nogués S, et al, 2005. Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs—a widespread phenomenon[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 19: 1381 - 1391.
- Castro P, Valiela I, Freitas H, 2007. Eutrophication in Portuguese estuaries evidenced by $\delta^{15}\text{N}$ of macrophytes[J]. Marine Ecology Progress Series, 351: 43 - 51.
- Cifuentes L, Sharp J, & Fogel M, 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary[J]. Limnology and Oceanography, 33: 1102 - 1115.
- Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al, 2009. Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus[J]. Science, 323: 1014 - 1015.
- Costanzo S D, O'Donohue M J, Dennison W C, et al, 2001. A new approach for detecting and mapping sewage impacts[J]. Marine Pollution Bulletin, 42: 149 - 156.
- Evans R D, Bloom A J, Sukrapanna S S, et al, 1996. Nitrogen isotope composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. T-5) grown under ammonium or nitrate nutrition[J]. Plant Cell and Environment, 19: 1317 - 1323.
- Gormly J R, Spalding F R, 1979. Sources and concentrations of nitrate-nitrogen in ground water of the central Platte region, Nebraska[J]. Ground Water, 17: 291 - 301.
- Gu B H, Schelske C L, Brenner M, 1996. Relationship between sediment and plankton isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) and primary productivity in Florida lakes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 53: 875 - 883.
- Gu B, Schelske C L, Waters M N, 2011. Patterns and controls of seasonal variability of carbon stable isotopes of particulate organic matter in lakes[J]. Oecologia, 165: 1083 - 1094.
- Inglett P W, Reddy K R, 2006. Investigating the use of macrophyte stable C and N isotopic ratios as indicators of wetland eutrophication: Patterns in the P-affected Everglades[J]. Limnology and Oceanography, 51(5): 2380 - 2387.
- Keely J E, Sandquist D R, 1992. Carbon: freshwater plants [J]. Plant, Cell and Environment, 15: 1021 - 1035.
- Kreitler C W, Jones D C, 1975. Natural soil nitrate: The cause of the nitrate contamination of ground water in Runnels County, Texas[J]. Ground Water, 13: 53 - 61.
- Lin L, Wu J, Wang S, 2006. Evidence from isotopic geochemistry as an indicator of eutrophication of Meiliang Bay in Lake Taihu, China[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 49(S1): 62 - 71.
- Mino Y, Saino T, Suzuki K, et al, 2002. Isotopic composition of suspended particulate nitrogen ($\delta^{15}\text{N}_{\text{sp}}$) in surface waters of the Atlantic Ocean from 50°N to 50°S[J]. Global Biogeochemical Cycles, 16(4): 1059. doi: 10.1029/2001GB001635.
- Osmond C B, Valaane N, Haslam S M, et al, 1981. Comparisons of $\delta^{13}\text{C}$ Values in Leaves of Aquatic Macrophytes from Different Habitats in Britain and Finland; some Implications for Photosynthetic Processes in Aquatic Plants[J]. Oecologia, 50: 117 - 124.
- Quan W, Humphries A T, Shi L, et al, 2012. Determination of Trophic Transfer at a Created Intertidal Oyster (*Crassostrea ariakensis*) Reef in the Yangtze River Estuary Using Stable Isotope Analyses[J]. Estuaries and Coasts, 35: 109 - 120.
- Stephenson R L, Tan F C, Mann K H, 1984. Stable carbon isotope variability in marine macrophytes and its implications for food web studies[J]. Marine Biology, 81: 223 - 230.
- Townsend-Small A, McCarthy M J, Brandes J A, et al, 2007. Stable isotopic composition of nitrate in Lake Taihu, China, and major inflow rivers[J]. Hydrobiologia, 581: 135 - 140.
- Veuger B, Eyre B D, Maher D, et al, 2007. Nitrogen incorporation and retention by bacteria, algae, and fauna in a subtropical intertidal sediment: An in situ ^{15}N -labeling study[J]. Limnology and Oceanography, 52(5): 1930 - 1942.
- Wang H J, Wang W D, Lu J W, et al, 2006. Algae Trapping in Macrophyte-covered Littoral Zone and Water Sources Protection (Chinese) [J]. China Water & Wastewater, 22(7): 1 - 3, 8.
- Wu X D, Kong F X, Chen Y W, et al, 2010. Horizontal distribution and transport processes of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake (Taihu, China) [J]. Limnologia, 40: 8 - 15.
- Zhang L, Li K, Liu Z, et al, 2010. Sedimented cyanobacterial detritus as a source of nutrient for submerged macrophytes (*Vallisneria spiralis* and *Elodea nuttallii*): An isotope labeling experiment using ^{15}N [J]. Limnology and Oceanography, 55(5): 1912 - 1917.

Identification of Major Pollution Sources by Analysis of Stable Isotopic Shifts ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) in *Potamogeton malaianus* and POM

ZHANG Lei-yan¹, AN Hao^{1,2}, GUAN Bao-hua³, CHENG Han-fei¹

(1. Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, MCC, Nanjing 210019, P.R.China;

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment,
Nanjing University, Nanjing 210046, P.R.China;

3. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Science,
Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Gonghu Bay is located in the northeast of Taihu Lake. It is the channel of water diversion project from Yangtze River to the Taihu Lake basin and is an important water source for the cities of Suzhou and Wuxi. *Potamogeton malaianus* is the dominant macrophyte in Gonghu Bay, with the largest distribution area and abundance, and it is sensitive to environmental change. In this study, we measured shifts in the abundance of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values in *P. malaianus*, particulate organic matter (POM) and sediment collected in Gonghu Bay. The shifts in isotopic abundance were analyzed to evaluate their potential for indicating the major sources of pollution to Taihu Lake. From October 2011 to April 2012, *P. malaianus*, POM and sediment samples were collected at 14 sampling sites in the Gonghu Bay. *P. malaianus* was analyzed for total nitrogen (TN), total carbon (TC), $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$; POM was analyzed for $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$; sediment was analyzed for total organic nitrogen (TON), $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$. There were similar trends for $\delta^{15}\text{N}$ in *P. malaianus* and POM, with $\delta^{15}\text{N}$ values increasing with sampling site distance from the inlet channel of Gonghu Bay. The ranges of $\delta^{15}\text{N}$ for *P. malaianus* and POM were 10.8‰–14.1‰ and 6.69‰–14.1‰, respectively. The value of $\delta^{13}\text{C}$ for *P. malaianus* decreased with the distance from the diversion channel, (–17.6‰ to –14.5‰), while the $\delta^{13}\text{C}$ value of POM tended to increase (–26.9‰ to –24.6‰). The high $\delta^{15}\text{N}$ value for *P. malaianus* indicates human waste as the source, i.e., the main pollution source for Gonghu Bay is domestic sewage. Correlation analysis indicated a significant negative correlation between total dissolved phosphorus (TDP) in water and the $\delta^{15}\text{N}$ of *P. malaianus*, while total nitrogen (TN) in water was positively correlated with $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in POM. Further, the proportion of N in POM and the $\delta^{15}\text{N}$ of sediment was positively correlated with the $\delta^{15}\text{N}$ of POM. The results show that the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of *P. malaianus* and POM can reliably indicate the primary pollution sources for Gonghu Bay of Taihu Lake.

Key words: *Potamogeton malaianus*; particulate organic matter; stable isotope; Taihu Lake; pollution sources