

人类活动对太湖水环境影响的稳定氮同位素示踪*

林 琳^{1,2}, 吴敬禄³, 曾海鳌³, 刘 文³

(1: 山东省水利科学研究院, 济南 250013)

(2: 山东省水资源与水环境重点实验室, 济南 250013)

(3: 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)

摘 要: 人类活动对湖泊环境变化的影响是目前全球变化研究的热点之一。识别水体中人为氮源的贡献对于研究人类活动对湖泊环境变化的影响十分重要。稳定氮同位素组成($\delta^{15}\text{N}$)是水环境中人为氮源的有效示踪剂。太湖是我国典型的大型浅水富营养湖泊, 位于人口稠密、经济发达的长江三角洲地区, 是研究人类活动对水环境影响的理想对象。太湖水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间分异规律大致反映了不同湖区人类活动影响水环境的方式, 上游宜兴小流域及河口主要受农业活动影响, 胥口湾和东太湖则主要是水产养殖的贡献, 梅梁湾受城市生活污水影响较大。而且水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的水平反映了人类活动的影响从南部湖区到北部湖区逐渐加强的趋势, 表现为南部河口—东太湖—梅梁湾不同水体从草型水体到藻型水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加的趋势。另外, 夏季(6月)太湖水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化响应于初级生产力的变化, 体现了生物作用的影响。在蓝藻水华暴发时期, 利用水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值识别人为氮源的结果可能会受到生物过程的干扰。

关键词: 稳定氮同位素; 人类活动; 太湖; 河流氮输入

Stable nitrogen isotope tracing anthropogenic influence on Lake Taihu

LIN Lin^{1,2}, WU Jinglu³, ZENG Hai'ao³ & LIU Wen³

(1: *Water Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250013, P. R. China*)

(2: *Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Water Environment, Ji'nan 250013, P. R. China*)

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

Abstract: Anthropogenic influence on lake environmental change is one of the focus of global change research. It is necessary to identify anthropogenic sources of nitrogen in rivers and lakes. Stable nitrogen isotope ratios ($\delta^{15}\text{N}$) have been widely used in tracer studies of anthropogenic nitrogen sources in aquatic environments. Lake Taihu is a large, eutrophic, shallow freshwater lake in China, and is located in the Yangtze delta with high population density and economic development. It serves as an ideal site for examining human impacts on aquatic environment in China. Results of $\delta^{15}\text{N}$ values measured in inorganic nitrogen fractions (INF) showed that a small river basin and its estuary in Yixing city were characterized by agricultural origin, while INF in Xukou Bay and East Taihu Bay by aquaculture, and INF in Meiliang Bay by discharge of human sewage. $\delta^{15}\text{N}$ values in the macrophyte-dominated zones were much lower than those in the phytoplankton-dominated zones of the studied water body of southern estuary—East Taihu Bay—Meiliang Bay, indicating the progressive intensification of human pressure on the lake from south to north. However, elevated $\delta^{15}\text{N}$ values in lake water which were consistent with high primary production in summer (June) suggested the consequence of biological processes. Using these values for tracing anthropogenic sources of nitrogen during algae blooms might be misled.

Keywords: Stable nitrogen isotope; human activities; Lake Taihu; nitrogen inputs from rivers

人类活动已经改变了全球氮循环, 不仅增加了氮的输入, 而且通过大气和水加速了全球各种形态氮的迁移^[1]。由于氮迁移率的增加, 人类活动产生的氮对全球大部分地区都造成严重的环境污染^[2], 特别是经河

* 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2008CB418005)和国家自然科学基金项目(41073010, 40673015)联合资助。2011-03-08 收稿; 2012-02-07 收修修改稿。林琳, 女, 1979年生, 博士, 工程师; E-mail: llin_mail@126.com.

流向河口和湖泊等生态系统迁移的氮迅速增加,地表水体中氮的富集导致水体富营养化和水质恶化,严重威胁到赖以生存的物种以及未来的水资源供应^[3].但是由于缺乏有效的技术方法对水体中氮素来源、迁移和转化过程的示踪,氮素在湖泊水体中的生物地球化学循环过程仍然不清楚.近几十年来,人们逐渐认识到氮稳定同位素记录是判识氮素来源的有效指标,并且在水体氮的转化和生物的硝化、反硝化等过程中也发挥了重要作用^[4-7].Mayer等^[4]利用氮稳定同位素技术对美国东北部16个不同水系河流的氮源进行了研究,李思亮等^[7]进行了地下水氮污染源以及转化过程的同位素示踪,肖化云等^[8]利用氮稳定同位素对贵州省红枫湖的氮污染状况进行了研究,并对湖泊外源氮输入与内源氮释放进行了辨析^[9].由于不同来源氮的同位素组成不同,因此氮稳定同位素可以用来较好地示踪氮素的来源^[4].如人工化肥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较低(接近0‰)^[10-11],其中硝态氮(NO_3^- -N)肥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值一般在 $-2.5\text{‰} \sim 2.0\text{‰}$ 之间,铵态氮(NH_4^+ -N)肥的 $\delta^{15}\text{N}$ 值一般在 $-4\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 之间^[12].而牲畜排泄物和污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高,生活污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 $10\text{‰} \sim 25\text{‰}$ 左右,人畜排泄物中 NH_4^+ -N的 $\delta^{15}\text{N}$ 值约为 49.7‰ ^[13].河流、湖泊中人为成因的氮主要来自化肥、人畜排泄物和城市污水.据此,利用氮稳定同位素方法并结合其它指标可以示踪人类活动对湖泊水环境的影响.本文通过对太湖不同营养类型湖区入湖河道及河口水体 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N的 $\delta^{15}\text{N}$ 值的分析,结合相关水化学参数,揭示太湖水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间分布规律,探讨人类活动对太湖水环境的影响,以为太湖富营养化治理提供科学依据.

1 研究区概况

太湖是我国典型的大型浅水富营养湖泊,位于人口稠密、经济发达的长江三角洲地区,是研究人类活动对水环境影响的理想对象.太湖流域地跨江苏、浙江、安徽、上海三省一市,流域面积 36500 km^2 ,水体面积 2338 km^2 ,平均水深 1.9 m ,最大水深 2.6 m ,是周边城市主要的饮用水源地,兼有灌溉、旅游、航运、水产养殖等功能^[14].伴随着流域城市化、工业化进程加速和农业集约化程度的不断提高,大量污染物质排放入湖,导致水体营养盐浓度过高,富营养化程度不断加重,水华暴发现象频繁出现,严重制约了流域社会经济的发展,甚至危及人们的日常生活.太湖流域水网复杂密集,环湖河道共172条,河道纵横交错,且流向顺逆不定,许多河道既是入湖河道,又是出湖河道.入湖河道水质污染严重是太湖水环境恶化的根本原因.太湖自西向东有五大湖湾,分别是竺山湾、梅梁湾、贡湖湾、胥口湾和东太湖,不同湖区的富营养化程度也各不相同^[15].其中梅梁湾位于太湖北部,东北与五里湖相连,西隔马山与竺山湾相邻,靠近无锡市,面积约 124 km^2 ,是重污染河道直湖港、武进港和梁溪河的入口,也是太湖富营养化最严重的湖区之一,近年来蓝藻水华频繁出现,已经严重影响水体功能.胥口湾位于太湖东部,面积 55 km^2 ,水草生长茂盛,夏季有时有轻度蓝藻水华,呈中—富营养水平,通过大缺口与东太湖连通^[16].东太湖位于太湖东南部,面积 131 km^2 ,是典型的草型湖区,呈中—中富营养水平^[14,17].

2 材料和方法

2.1 采样点布设和样品采集

由于不同来源的氮主要通过河流进入太湖,于2006年秋季(11月)选取太湖上游宜兴地区、藻型湖区梅梁湾和五里湖、草型湖区胥口湾和东太湖五个湖区的典型河道和河口采集表层水样.其中宜兴地区水样2个,分别为水库(A1)和大港河口(A2);梅梁湾水样8个,分别是马山河道(A3)、宝界桥附近河道(A4)及其河口(A5)、梁溪河口(A6)、直湖港口(A7)、太湖站近岸平台(A8)、梅梁湾口附近(A9、A10);胥口湾水样2个,分别是大缺口北(A11)和胥口港(A12);东太湖水样2个,分别是东山河道(A13)和大缺口南(A14)(图1).另外,不同来源的氮进入水体中被浮游植物、其它水生植物以及细菌等吸收利用,许多研究认为在生物作用的过程中具有同位素分馏效应^[18-19],从而增加了运用 $\delta^{15}\text{N}$ 示踪氮来源的复杂性.根据研究资料,1990年以来梅梁湾5—10月都发生蓝藻水华^[15].为了解生物作用对太湖氮载荷的 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响,选择太湖蓝藻水华集中暴发的夏季(6—8月)在藻型湖区梅梁湾进行采样点布设.由于7—8月为汛期,来自湖面直接降水和入湖径流的氮将直接影响水体稳定氮同位素组成,特别是2007年5—6月无锡市自来水因市域内太湖蓝藻水华大面积暴发受到污染,造成数百万市民的饮水困难,因此采样时间定于2007年夏季(6月)水华大面积暴发时期.本文夏季(6月)是针对秋季(11月)比较而言,两个时期的生物地球化学特征存在明显差异,

从而分别以人类影响和生物影响的角度分析稳定氮同位素的变化.

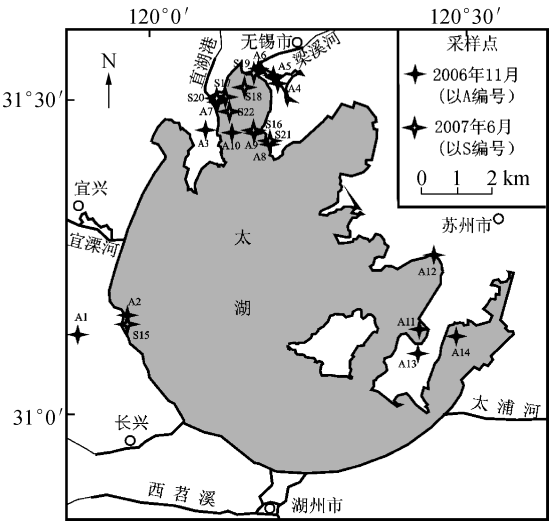


图 1 太湖表层水样采样点

Fig. 1 Sampling sites of surface water in Lake Taihu

采样点的选择则根据藻类空间分布特征差异以及便于与秋季采样点进行对照的思路,一方面保留了上游宜兴地区、梅梁湾区河口、湾口、太湖站平台等秋季采样点,另一方面增加了河口入湖方向上的样点,以获取生物效应的同位素信息. 夏季采样点分别为:梅梁湾口(S16)、太湖站平台(S21)、梁溪河口(S19)及其入湖方向(S18)、直湖港河口(S20)及其入湖方向(S17、S22),以及宜兴大港河口(S15)等点位,用采水器采集 2.5 L 水深 0~50 cm 左右的表层水样,装入聚乙烯桶中密封保存,现场加入少量 $HgCl_2$ 以抑制微生物活动. 2007 年 6 月 7 日—16 日在太湖站用降尘缸收集 2 L 雨水样品.

2.2 水样分析方法

将河湖表层水样取 100 ml 用于总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl. a)、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分析. 水化学分析参照陈伟民等^[20]的方法. 剩余河水样品及雨水样品用直径 50 mm、孔径 0.45 μm

的混合纤维滤膜抽滤后,通过阴离子和阳离子交换树脂分离和浓缩 NH_4^+-N 和 NO_3^--N ,并以 2 mol/L 的 HCl 洗脱,洗脱液用 Kjeldahl 法转化为 NH_4^+-N 后水浴浓缩,在 MAT-251 型质谱仪上测定 $\delta^{15}N$ 值,以大气 N_2 为标准^[21].

3 结果与讨论

3.1 秋季太湖河流氮输入及其同位素特征

太湖不同湖区 NH_4^+-N 的 $\delta^{15}N$ 值在 9.22‰~20.31‰之间,平均为 15.19‰,其中最高值出现在东太湖湖区(A14),而最低值出现在梅梁湾马山河道(A3). NO_3^--N 的 $\delta^{15}N$ 值在 7.93‰~18.71‰之间,平均为 12.15‰,其中最高值出现在宝界桥附近河道(A4),而最低值出现在梅梁湾梁溪河口(A6)(图 2). 太湖水体 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的 $\delta^{15}N$ 值反映湖泊水环境以及不同人类活动影响的特征.

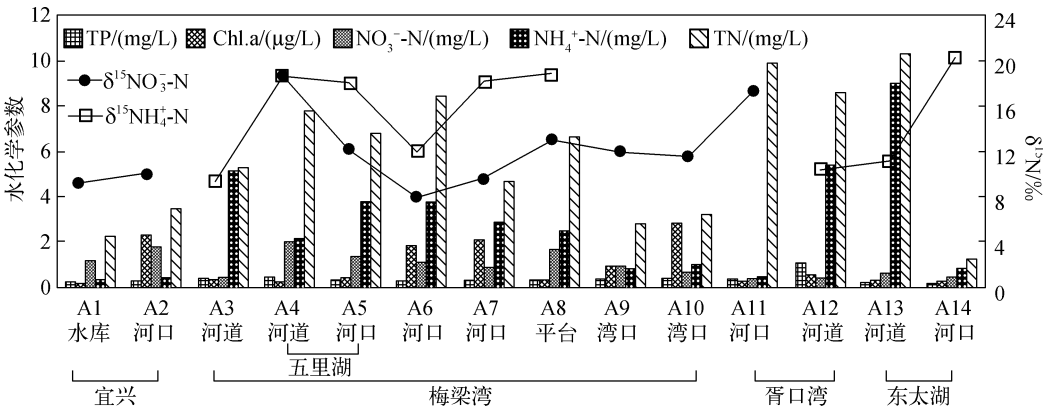


图 2 秋季太湖水化学参数和水样氮同位素特征

Fig. 2 Chemical factors of water and $\delta^{15}N$ values of NH_4^+-N and NO_3^--N of river water and lake water of Lake Taihu in autumn

3.1.1 上游宜兴地区 上游水库(A1)的TP、 NH_4^+ -N、Chl. a 含量均较低,Chl. a 浓度仅为 $0.08 \mu\text{g/L}$,而 NO_3^- -N 浓度为 1.14 mg/L ,TN 浓度超过 2 mg/L .水库的溶解态氮主要由 NO_3^- -N 组成, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 9.1‰ ,接近土壤 NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值($-3\text{‰} \sim 8\text{‰}$),低于生活污水的 $\delta^{15}\text{N}$ 值($10\text{‰} \sim 25\text{‰}$)^[10-11].大港河口(A2)各水化学参数比水库高,特别是Chl. a 和TN 浓度,分别为 $2.25 \mu\text{g/L}$ 和 3.44 mg/L ,溶解态氮也是以 NO_3^- -N 为主, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比水库略高.宜兴水库和河口的水化学指标和 NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值反映人类活动的影响较弱,主要以农业活动为主.

3.1.2 梅梁湾及五里湖 梅梁湾及五里湖湖区的水化学参数普遍比宜兴高,但不同采样点的差别较大.马山河道(A3)TP、Chl. a、 NO_3^- -N 含量较低,而 NH_4^+ -N 浓度达到 5.09 mg/L ,与TN 浓度接近, NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 9.22‰ ,为梅梁湾湖区最低值,与宜兴接近.马山镇自1969 年开始围湖造田、侵占河道、围网养鱼^[22].2001 年深秋后,马山内河水面几乎全被水生植物覆盖.由水化学指标及 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值来看,该河道受到的人类活动影响相对较弱,而且方式较为单一,水体氮污染的主要来源是水产养殖.

五里湖宝界桥河道(A4)TP 含量为所有湖区的最高值,Chl. a 为梅梁湾湖区最低值, NO_3^- -N 浓度为梅梁湾湖区的最高值,略低于 NH_4^+ -N 浓度,TN 浓度达到 7.77 mg/L ,主要以有机氮组成. NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 18.71‰ 和 18.68‰ ,符合生活污水的范围($10\text{‰} \sim 25\text{‰}$)^[10-11].宝界桥河道位于无锡市区,大量城市生活污水的排入导致水体氮污染较重, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高.宝界桥河口(A5)的Chl. a 和 NH_4^+ -N 含量均比河道高,其它指标均比河道低,特别是 NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比河道低 6.34‰ .

梁溪河口(A6)Chl. a 和TN 含量比宝界桥河道和河口高,分别为 $1.77 \mu\text{g/L}$ 和 8.4 mg/L ,其它指标则比宝界桥河道和河口低, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 7.93‰ , NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值超过 12‰ .直湖港口(A7)的水化学参数除TP 和Chl. a 比梁溪河口略高外,其它指标都较低,但 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高,与宝界桥河口接近.

太湖站近岸平台(A8)的水化学参数以及 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都与宝界桥河口接近.梅梁湾与太湖交界附近的两个样点(A9 和A10)除Chl. a 外,水化学参数的水平非常接近, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值都在 12‰ 左右.

3.1.3 胥口湾 胥口湾样品(A11 和A12)的TN 含量比宜兴、梅梁湾和五里湖都高,分别为 9.9 mg/L 和 8.6 mg/L .大缺口北(A11)的溶解态氮含量较低,TN 以有机氮为主, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高,达到 17.18‰ .胥口港(A12)TP 含量为所有样品的最高值,达到 1.02 mg/L ; NH_4^+ -N 也较高,达到 5.35 mg/L ,其 $\delta^{15}\text{N}$ 值超过 10‰ .

3.1.4 东太湖 东太湖样品的TP 和Chl. a 含量比胥口湾低.东山河道(A13)两侧河岸为居住区,是东山镇重要的航道之一. NH_4^+ -N 和TN 含量分别达到 8.98 mg/L 和 10.29 mg/L ,为所有样品的最高值, NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值超过 10‰ .大缺口南(A14)的TN 含量为 1.18 mg/L ,远低于大缺口北的水平,而且主要由 NH_4^+ -N 组成, NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值超过 20‰ .

3.2 太湖河流氮输入及其同位素季节变化特征

夏季太湖大港河口和梅梁湾各点Chl. a 含量为 $2.6 \sim 98.6 \mu\text{g/L}$,明显高于秋季.其中梅梁湾东部梁溪河口及其入湖方向和太湖站平台的Chl. a 含量较低,不超过 $10 \mu\text{g/L}$,大港河口及梅梁湾西部各点的Chl. a 含量较高.大港河口(S15)的 NH_4^+ -N 和TN 含量与秋季相比变化很小,但Chl. a 含量比秋季增加了15 倍,达到 $34.46 \mu\text{g/L}$, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也比秋季增加了 2‰ .梅梁湾梁溪河口(S19)的TP 含量与秋季接近,Chl. a 含量比秋季高4.26 倍,TN 含量比秋季低近1 倍,而且以 NH_4^+ -N 为主, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显比秋季高,分别升高了 8.63‰ 和 7.53‰ .梁溪河口入湖方向(S18)的水化学参数均比河口低,特别是 NH_4^+ -N 含量比河口低1 倍左右, NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值低 2.30‰ ,只有 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比河口约高 1.00‰ .直湖港口(S20)的TP 和TN 含量都比秋季略高, NH_4^+ -N 含量与秋季接近,Chl. a 含量比秋季高8.33 倍, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别比秋季高 5.26‰ 和 25.99‰ .直湖港口入湖方向距河口较近的点S17 的Chl. a 和 NH_4^+ -N 含量明显高于距河口较远的S22,而TN 和TP 含量则相反.入湖方向S17 的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显低于河口,S22 的 NO_3^- -N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于河口.太湖站平台(S21)TP 和TN 含量明显比秋季低,是梅梁

湾样品中的最低值, TN 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高, 比秋季高 13.36‰, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比秋季高 1.82‰, 接近梅梁湾各点的平均水平. 梅梁湾与大太湖交界附近 (S16) 的水化学参数除 Chl. a 外都较低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值接近梅梁湾各点的平均水平 (图 3).

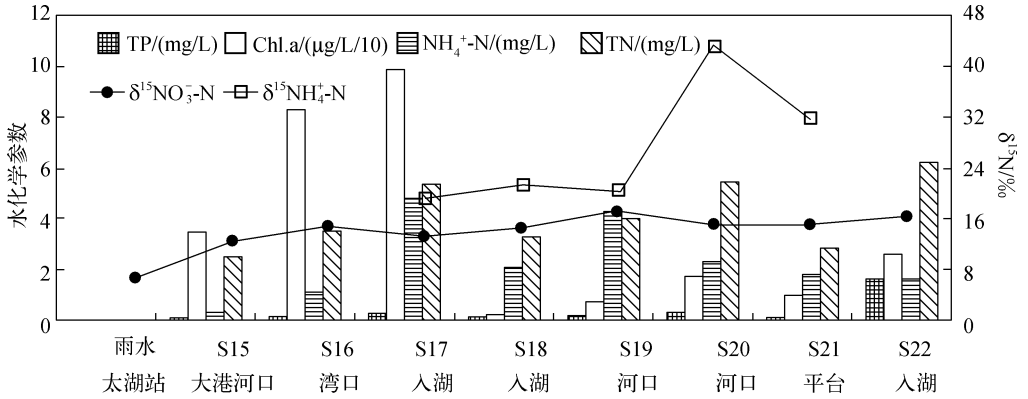


图 3 夏季太湖水化学参数和水样氮同位素特征

Fig. 3 Chemical factors of water and $\delta^{15}\text{N}$ values of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ of lake water and rainfall from Lake Taihu in summer

3.3 人类活动对不同湖区水体环境的 $\delta^{15}\text{N}$ 值示踪

秋季太湖上游宜兴水库的氮载荷以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和有机氮为主, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 9.1‰, 接近土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 范围 (−3.0‰ ~ 8.0‰) [11], 反映了农业活动的影响. 梅梁湾马山河道以及胥口湾和东太湖等草型湖区河道的氮载荷以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 9.22‰ ~ 11.10‰ 之间, 反映了水产养殖的影响. 藻型湖区梅梁湾及五里湖河道的氮载荷中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较高, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本都超过 10‰, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本都超过 18.0‰, 主要反映了城市生活污水的影响, 特别是夏季直湖港口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值超过 40.0‰, 与人畜排泄物的值 (49.7‰) 基本一致 [13, 23]. 因此太湖水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间分异规律大致反映了不同湖区人类活动影响水环境的方式, 而且结合水化学参数的变化, 水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的水平反映了人类活动的影响从南部湖区到北部湖区逐渐加强的趋势, 表现为南部河口—东太湖—梅梁湾从草型水体到藻型水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值增加的趋势. 但秋季大港河口 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其上游水库接近, 均小于 10.0‰; 而夏季河口 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值大于 12.0‰, 且 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化与 Chl. a 含量的增加一致, 说明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化与湖泊初级生产力变化有关.

在梅梁湾湖区选择夏、秋两季都取样的采样点进行对比, 分别是梅梁湾口 (S16)、太湖站平台 (S21) 和直湖港河口 (S20) (图 4). 三个点夏季 Chl. a 含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均比秋季高, 其它水化学参数的变化则都不相同, 体现了水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化响应于初级生产力的变化, 而不是营养载荷的变化, 可能反映了生物吸收利用无机氮过程中的同位素分馏作用. 这也与 McCarthy 等 [24] 发现的夏季太湖水华暴发期间生物作用对于氮载荷影响较大的结果一致. 因此, 在蓝藻水华暴发时期, 利用水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值识别人为氮源的结果可能会受到生物过程的干扰.

Townsend-Small 等对太湖梅梁湾和东太湖以及部分入湖河道水体冬、春季 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 变化进行分析 [25], 认为 $\delta^{15}\text{N}$ 变化指示了水体氮源的变化, 冬季河流及湖泊水体氮主要受流域人类活动产生的污水影响, 而春季与农业生产以及大气固氮产生的效应有关, 体现了不同季节同位素变化的差异. 我们的研究重点在夏、秋季节, 一方面通过秋季太湖不同水体 $\delta^{15}\text{N}$ 的分析证实了不同湖区氮素来源的差异, 并存在较明显的空间分异, 尤其是受水产养殖影响为主的草型湖区东太湖 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 (10.33‰ ~ 11.10‰) 明显低于受城市生活污水影响的梅梁湾湖区水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值 (18.0‰ 以上), 揭示了从南部湖区到北部湖区不同人类活动方式和强度对水环境影响的特征和差异, 与 Townsend-Small 等对东太湖及梅梁湾冬季 (1 月) 水

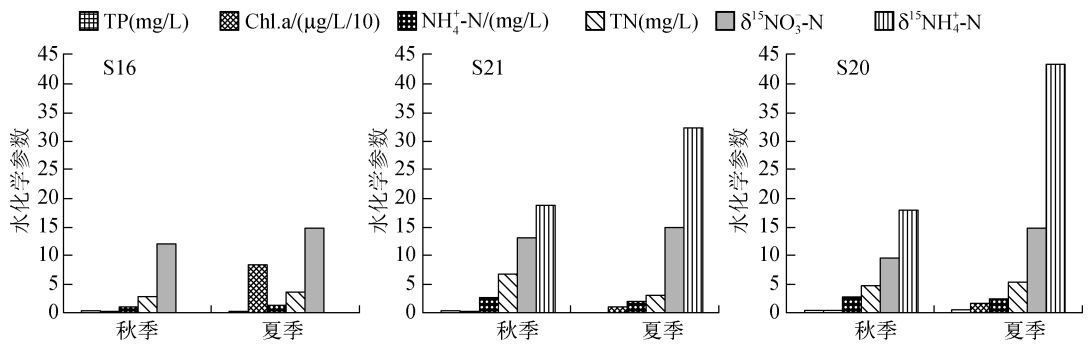


图 4 太湖水化学参数和水样氮同位素特征的季节变化

Fig. 4 Seasonal changes of chemical factors and $\delta^{15}\text{N}$ values of NH_4^+-N and NO_3^--N of water from Lake Taihu

体同位素的结论一致;另一方面通过夏季样品的分析考证了生物效应的问题.湖泊生物作用也是引起水体氮素及其同位素变化的重要因素之一,由于水体生物作用对水体同位素有选择性吸收效应,尤其是水华暴发期间生物作用强烈,使得水体同位素值偏正^[4,6,9,26].通过与 Townsend-Small 等的结果比较可知,太湖不同湖区稳定氮同位素时间变化上的差异,即夏季高于秋季,秋季高于春季以及春季高于冬季^[25],说明 $\delta^{15}\text{N}$ 与生物作用有较密切的关系.因此,利用水体 $\delta^{15}\text{N}$ 变化定量或半定量确定不同人类活动对水环境影响的贡献份额难度较大,需要在生物效应较为稳定或较弱的环境条件才可获得可靠的定量区分.

4 结论

利用水体氮同位素记录对太湖不同水体环境特征进行示踪研究,初步揭示了太湖水体 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化特征和空间分异规律,反映了不同湖区人类活动影响水环境方式的差异.宜漂河流域及其河口水体 NO_3^--N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 9.1‰,接近土壤 NO_3^--N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 范围,反映了农业活动所产生的影响.草型湖区胥口湾和东太湖氮载荷以 NH_4^+-N 为主, NH_4^+-N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在 10.33‰~11.10‰之间,主要受水产养殖为主的人类活动影响,藻型湖区梅梁湾及五里湖河道的氮载荷中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度较高, NO_3^--N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值基本都超过 10‰, NH_4^+-N 的 $\delta^{15}\text{N}$ 值超过 18‰,主要反映了城市生活污水的影响.因此,从南部河口—东太湖—梅梁湾,水体 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化反映了人类活动对水环境影响逐渐加强的趋势.另外,不同季节水体 $\delta^{15}\text{N}$ 变化存在较大差异,主要体现了生物作用的同位素效应,尤其是在蓝藻水华暴发时期,水体 $\delta^{15}\text{N}$ 受生物选择性吸收效应影响,使得水体氮同位素偏高,限制了 $\delta^{15}\text{N}$ 进行氮素来源的正确判识,但这也为拓展同位素记录开展水环境变化的生物效应研究提供了可能的途径.

致谢:中国科学院南京地理与湖泊研究所杨龙元研究员提供雨水样品和部分水化学数据,在此表示衷心的感谢.

5 参考文献

[1] Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG *et al.* Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, **70** (2): 153-226.

[2] Galloway JN, Cowling EB. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *Ambio*, 2002, **31**(2): 64-71.

[3] Rabalais NN. Nitrogen in aquatic ecosystems. *Ambio*, 2002, **31**(2): 102-112.

[4] Mayer B, Boyer EW, Goodale C *et al.* Sources of nitrate in rivers draining sixteen watersheds in the northeastern U. S. : isotopic constraints. *Biogeochemistry*, 2002, **57/58**(1): 171-197.

[5] Segal-Rozenhaimer M, Shavit U, Vengosh A *et al.* Sources and transformations of nitrogen compounds along the Lower Jordan River. *J Environ Qual*, 2004, **33**(4):1440-1451.

[6] Deutsch B, Voss M, Fischer H. Nitrogen transformation processes in the Elbe River; distinguishing between assimilation

- and denitrification by means of stable isotope ratios in nitrate. *Aquat Sci*, 2009, **71**(2): 228-237.
- [7] 李思亮, 刘丛强, 肖化云等. $\delta^{15}\text{N}$ 在贵阳地下水氮污染来源和转化过程中的辨识应用. 地球化学, 2005, **34**(3): 257-262.
- [8] 肖化云, 刘丛强. 氮同位素示踪贵州红枫湖河流季节性氮污染. 地球与环境, 2004, **32**(1): 71-75.
- [9] 肖化云, 刘丛强. 湖泊外源氮输入与内源氮释放辨析. 中国科学: D 辑, 2003, **33**(6): 576-582.
- [10] Heaton THE. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chem Geol*, 1986, **59**: 87-102.
- [11] Kendall C. Tracing nitrogen sources and cycling in catchments. In: Kendall C, McDonnell JJ eds. Isotope tracers in catchment hydrology. Amsterdam: Elsevier, 1998: 519-576.
- [12] Cao YC, Sun GQ, Xing GX *et al.* Natural abundance of ^{15}N in main N-containing chemical fertilizers of China. *Pedosphere*, 1991, **1**(4): 377-382.
- [13] Xing GX, Cao YC, Shi SL *et al.* Denitrification in underground saturated soil in a rice agroecosystem at Taihu Lake region. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34**(11): 1593-1598.
- [14] Qin BQ, Xu PZ, Wu QL *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 3-14.
- [15] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004: 19-143.
- [16] 林海涛. 太湖梅梁湾和胥口湾多环芳烃、有机氯农药和多溴联苯醚的沉积记录研究[学位论文]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [17] 杨清心, 李文朝, 俞 林等. 东太湖围栏养殖及其环境效应. 湖泊科学, 1995, **7**(3): 256-262.
- [18] Teranes JL, Bernasconi SM. The record of nitrate utilization and productivity limitation provided by $\delta^{15}\text{N}$ values in lake organic matter—A study of sediment trap and core sediments from Baldeggersee, Switzerland. *Limnol & Oceanogr*, 2000, **45**: 801-813.
- [19] Johannsen A, Dahnke K, Emeis K. Isotopic composition of nitrate in five German rivers discharging into the North Sea. *Organic Geochemistry*, 2008, **39**(12): 1678-1689.
- [20] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 1-259.
- [21] 杜丽鹃, 施书莲. 水体系中硝酸态氮的富集和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的测定. 土壤, 1994, **26**(4): 332-334.
- [22] 胡维平, 秦伯强, 濮培民. 太湖水动力学三维数值试验研究——3. 马山围垦对太湖风生流的影响. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 335-342.
- [23] Xie YX, Xiong Q, Xing GX *et al.* Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region. *Pedosphere*, 2007, **17**(2): 200-208.
- [24] McCarthy JM, Lavrentyev PJ, Yang LY *et al.* Nitrogen dynamics and microbial food web structure during a summer cyanobacterial bloom in a subtropical, shallow, well-mixed, eutrophic lake (Lake Taihu, China). *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 195-207.
- [25] Townsend-Small A, McCarthy MJ, Brandes JA *et al.* Stable isotopic composition of nitrate in Lake Taihu, China, and major inflow rivers. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 135-140.
- [26] Wu JL, Lin L, Gagan MK *et al.* Organic matter stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) response to historical eutrophication of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2006, **563**: 19-29.