

文章编号: 0379-1726(2002)06-0571-06

强水动力湖泊夏季分层期氮的生物地球化学循环初步研究: 以贵州红枫湖南湖为例

肖化云, 刘丛强, 李思亮, 王仕禄

(中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 湖泊在夏季由于藻类生长而消耗大量硝酸盐, 水体硝酸盐含量一般要低于春季。而红枫湖南湖水体硝酸盐含量却高于春季(比平均含量高 0.83 mg/L), 说明尚有其他重要的硝酸盐来源。据估算, 南湖水体硝酸盐含量升高 0.83 mg/L 约需要 1.66×10^5 kg 硝酸盐, 另外有约 10.1×10^5 kg 硝酸盐随下泻水输出南湖, 再加上夏季藻类生长(生产的 chl_a 量约为 640 kg)所消耗的硝酸盐 3.52×10^5 kg, 共消耗硝酸盐 15.28×10^5 kg。扣除河流输入的 4.42×10^5 kg 硝酸盐, 南湖尚存在约 10.86×10^5 kg 硝酸盐的亏空。利用氮稳定同位素示踪技术, 结合硝酸盐及叶绿素 a(chl_a) 含量、溶解氧(DO)等的变化, 认为这部分硝酸盐来自湖泊中下部(斜温层)有机质的大量矿化(硝化), 是水动力驱动高 DO 的上部水体下沉而引起下部有机质(硝化)的结果。南湖这种强水动力湖泊整个夏季分层期氮的生物地球化学循环是斜温层有机质矿化(硝化)释放硝酸盐和变温层藻类生长同化硝酸盐为有机质同时发生的特殊类型。

关键词: $\delta^{15}\text{NO}_3^-$; 分层; 氮; 生物地球化学循环; 强水动力湖泊; 红枫湖

中图分类号: P595; P593 **文献标识码:** A

0 引言

湖泊夏季分层期营养盐迁移情况不同于冬春混合期, 对氮的生物地球化学循环有着重要的影响。在分层期, 上部变温层和中下部斜温层之间营养盐交换和溶解氧(DO)扩散受到热分层阻碍, 成为两个相对独立的水体。在水动力较弱的湖泊(如瑞士 Baldeggersee 湖^[1])中, 受热分层的限制, 斜温层 DO 含量极低, 水体处于一个相对还原的环境, 有机质的矿化分解(硝化)微弱, 斜温层硝酸盐含量较低; 上部变温层由于分层导致斜温层硝酸盐输入受到限制, 随着藻类生长, 硝酸盐含量明显降低。斜温层硝酸盐被水生生物同化吸收, 最终以有机质的形式保存下来, 因此整个夏季分层期氮的生物地球化学循环以硝酸盐的同化吸收为主。

红枫湖位于贵州省贵阳市西 31 km 处, 为一山间人造水库, 水动力强。红枫湖周围农业及工业较发达, 农业和工业污水一直认为是湖水硝酸盐的主要输入源。湖泊夏季如果硝酸盐含量升高, 就会导致水生浮游植物的大量生长, 又可能增加秋季反硝

化作用的强度, 因为秋季水生浮游植物死亡降解, 消耗水体中大量 DO, 低 DO、高硝酸盐含量的环境非常有利于反硝化作用的进行。

本文拟利用氮稳定同位素示踪技术, 结合硝酸盐及叶绿素 a(chl_a) 含量等的变化, 对红枫湖南湖变温层藻类生长与 NO_3^- 的利用以及斜温层有机质的矿化分解(硝化)进行研究, 从而掌握强水动力下, 这类湖泊夏季分层期氮的生物地球化学循环规律。

1 采样与分析方法

采样在 2001 年 7 月份进行。对红枫湖南湖后五剖面进行了分层采样, 另外采集了网箱养鱼、知青农场、电厂灰场、将军湾表层及两岔河表层和底层水样, 采样工作在 3 d 内完成。为了解外源硝酸盐的输入情况, 采集了汇入南湖的 3 条主要河水样(羊昌河、麻线河和后六河)(图 1)以及贵阳地区的雨水样。每个水样量约为 6 L。采集现场测水样定 DO 及 pH 值, 并随即用 0.45 μm 混合纤维滤膜抽滤。湖水水样在抽滤前分出 1 L 用作 chl_a 含量测定。过滤后的水样少量用液相色谱测定 NO_3^- 含量, 少量用比色

收稿日期: 2002-01-28; 接受日期: 2002-06-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-105); 国家自然科学基金(40173012)

作者简介: 肖化云(1970-), 男, 副研究员, 环境地球化学和同位素地球化学专业。

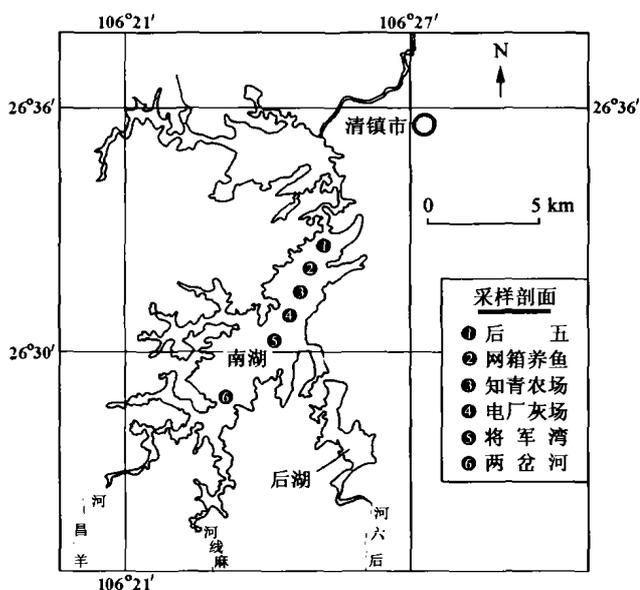


图 1 红枫湖位置及采样点分布图

Fig. 1 Location of Hongfeng Lake also showing the sampling sites

法测定 NH_4^+ 含量,其余部分用作 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 的测定。

chl_a测定采用丙酮萃取分光光度法^[2]。将过滤 1 L 水的醋酸纤维滤膜剪碎后在研钵中加适量 90% 丙酮研磨至足够细,移入比色管中暗处萃取 24 h。以 3 500 r/min 速度离心 15 min 后,将清液用 90% 丙酮定容。用分光光度计于 665 nm 和 750 nm 处分别测定其吸光度 (E_{665} 和 E_{750}),然后加几滴 1 mol/L HCl 溶液酸化,再测定吸光度 (A_{665} 和 A_{750})。chl_a 含量 ($\mu\text{g/L}$) 用下面公式进行计算:

$$\text{chl}_a = 27.3 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V_{\text{丙酮}} / V_{\text{水样}}$$

式中: $V_{\text{丙酮}}$ 为丙酮萃取液的体积 (mL); $V_{\text{水样}}$ 为水样的体积 (L)。

$\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 的测定方法采用过阴离子交换柱富集 NO_3^- 、扩散法转化成 NH_4^+ 、Rittenberg 法转化成 N_2 后上质谱 (气体稳定同位素质谱仪,型号 MAT 251) 的联合步骤^[3]。具体步骤为:将过滤后的水样及时过阴离子交换柱 (Dowex 1-X8, OH 型, 5 mL), 过柱后用 30 mL 2 mol/L KCl 溶液对交换柱进行洗脱;洗脱液转移至密封性能良好的一次性 120 mL 聚乙烯扩散瓶中,依次加 0.5~0.8 g 达氏合金, 0.5 g MgO 粉末、一个酸洗搅拌子和一个含 2.5 mL 0.1 mol/L H_2SO_4 溶液的 5 mL 接收瓶,盖紧瓶盖搅拌后于 50 °C 条件下扩散 10 d;对接收液进行低温干燥,再在真空条件下用 NaOBr 将其中的铵盐转化为 N_2 ; N_2 经纯化后用质谱分析 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 。质谱测定在中国科学院南京土壤研究所分析中心进行。水样 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 测定的标准偏差约为 $\pm 0.2\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 分层期间南湖 NO_3^- 、 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 及 chl_a 含量变化

红枫湖南湖水体夏季发生明显分层。从后五剖面 (图 2) 可以看出,在 6 m 处 (热分层) 水温、DO 和 pH 值均发生明显变化。水温和 DO 在 6 m 以上 (变温层) 基本保持恒定,而在 6 m 以下 (斜温层) 则快速下降,如水温从 26.3 °C 下降至 23.4 °C, DO 从 6.69 mg/L 下降至 1.17 mg/L。pH 值变化相对较小,整个剖面的变化只有 1。

分层期间, NO_3^- 含量随深度发生变化,如后五剖面 NO_3^- 含量以 6~16 m 最高 (平均 6.684 mg/L), 往上至变温层表层逐渐下降 (图 3)。斜温层底部出现一个最低值 (4.32 mg/L)。斜温层硝酸盐 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值变化规律与硝酸盐变化规律相反,往上逐渐减小,至 16 m 处减势基本消失,16~8 m 范围内保持恒定。往上至变温层突然变小,保持至 2 m 处往上至表层 (0 m) 又突然增大。chl_a 含量从下往上递增,12 m 往上增势较大。表层 chl_a 含量可至 10.9 mg/m³,

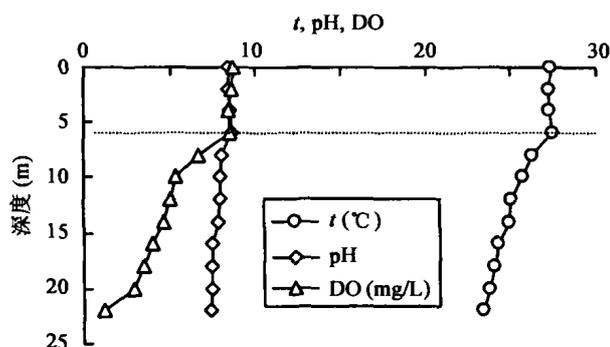


图 2 后五剖面分层图

Fig. 2 Thermal stratification at the Houwu Lake profile

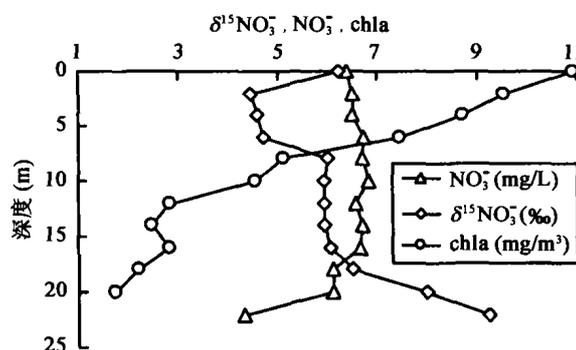


图 3 后五剖面 NO_3^- 、 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 、chl_a 随深度变化图

Fig. 3 Changes of NO_3^- , $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ and chl_a in the Houwu Lake profile as a function of depth

按照国外以 chl_a 作为湖泊营养类型划分标准, 应属中营养化类型 ($2 \sim 15 \text{ mg/m}^{3[4]}$)。

表 1 表明, 南湖表层 NO_3^- 含量从北往南 (后五→两岔河) 逐渐减小, 但在电厂灰场至将军湾处略有增大。 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值变化与 NO_3^- 含量变化基本相反, 但是在网箱养鱼和将军湾两处出现明显的低值。 chl_a 含量的变化与 NO_3^- 含量的变化非常一致, 异常值也出现在将军湾。

表 1 南湖表层 NO_3^- 、 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 、 chl_a 及 DO 含量变化

Table 1 Changes of NO_3^- , $\delta^{15}\text{NO}_3^-$, chl_a and DO in the epilimnion of South Lake

剖面	后五	网箱养鱼	知青农场	电厂灰场	将军湾	两岔河
$\text{NO}_3^- (\text{mg/L})$	6.40	6.18	6.09	5.48	5.68	4.97
$\delta^{15}\text{NO}_3^- (\text{‰})$	6.24	3.60	4.50	4.50	3.82	5.41
$chl_a (\text{mg/m}^3)$	10.94	10.45	9.98	6.65	7.60	6.18
DO (mg/L)	8.75	8.49	8.68	8.86	8.63	9.15

2.2 河流和雨水对南湖 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量与 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 值的贡献

与春季 (4 月) 平均 $5.20 \text{ mg/L}^{[1]}$ 相比, 7 月南湖 NO_3^- 含量 (平均 6.03 mg/L) 增加了 0.83 mg/L 。由于其周围农业及工业较发达, 农业和工业污水一直认为是红枫湖南湖夏季 NO_3^- 含量升高的主要原因。从表 2 可以看出, 河流硝酸盐 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 平均值为 7.97‰ , 明显高于南湖平均值 5.71‰ 。南湖藻类生长不会引起 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 值降低, 相反藻类生长引起水体硝酸盐 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 值升高。另外, 夏季南湖各输入河流的 NO_3^- 含量均较低, 说明河流硝酸盐输入不是引起南湖 NO_3^- 含量升高的主要原因。由于夏季各输入河流 NH_4^+ 含量均低于检测限 (0.01 mg/L), 河流 NH_4^+ 对湖泊的氮贡献可以忽略不计。

表 2 南湖输入河流夏季 DO、 NO_3^- 含量、 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值及流量

Table 2 Concentrations of DO and NO_3^- , $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ and fluxes of the rivers to South Lake

项目	流量 $F (\text{m}^3/\text{s})$	DO (mg/L)	$\text{NO}_3^- (\text{mg/L})$	$\delta^{15}\text{NO}_3^- (\text{‰})$
羊昌河	12.67	7.20	3.28	7.29
麻线河	4.13	7.04	2.00	7.63
后六河	1.87	7.34	1.85	8.96

注: 本表数据据文献[5]。

红枫湖地区夏季雨水硝酸盐氮同位素组成平均值为 3.5‰ , 低于南湖平均值 5.71‰ 。虽然 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$

值的升高可以用藻类生长机制来解释, 但雨水 NO_3^- 含量极低 (平均 0.49 mg/L), 对湖水硝酸盐贡献不大, 不可能使湖水的 NO_3^- 含量升高。而雨水 NH_4^+ 平均含量只有 0.61 mg/L , 因此, 雨水 NH_4^+ 对湖泊的氮贡献不大。

夏季为雨季, 河流和雨水注入是外源硝酸盐输入的主要形式。但从以上分析看出, 它们均不是夏季红枫湖南湖 NO_3^- 含量升高的原因。因此, 夏季湖水 NO_3^- 含量升高应与南湖本身的生物地球化学循环有关。

2.3 南湖夏季变温层藻类生长与 NO_3^- 的同化吸收

南湖表层 NO_3^- 含量从北往南 (后五→两岔河) 逐渐减小, 因而不可能是两岔河南部外源河流 (羊昌河和麻线河) 输入的结果, 相反可说明南湖变温层 NO_3^- 源在后五处, 这与夏季南湖表层水体回流 (北→南) 观察的结果一致。夏季河水浑浊, 含沙量大, 进入湖泊后重力下沉至斜温层, 同时带动变温层水体下沉。下沉水体在斜温层中往北下泻至后五时, 由于地貌的变化, 导致中下部湖水上涌, 部分沿变温层回流 (图 4), NO_3^- 正是来源于这股中下部上涌的水流。从后五处向南至两岔河, 随着藻类对硝酸盐的同化吸收, 变温层 NO_3^- 含量不断降低, 藻类生产出来的 chl_a 也不断降低, 其 chl_a 含量与 NO_3^- 含量变化规律非常一致 ($R^2 = 0.9148$, 图 5)。另一方面, 藻类光合作用大量释放 O_2 , 使表层水体 DO 含量逐渐上升 (表 1)。一般藻类同化吸收 NO_3^- 倾向于优先较轻的组分 (^{14}N), 从而使残余 NO_3^- 逐渐富 $^{15}\text{N}^{[6]}$ 。图 5 显示 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 与 $\ln [\text{NO}_3^-]$ 呈反相关关系 ($R^2 = 0.6361$), 分馏系数 $\varepsilon = -6.37$, 相似于前人有关硝酸盐吸收过程中的氮同位素分馏结果 ($\varepsilon = -4 \sim -6$)^[6]。该相关系数相对较小, 主要受网箱养鱼和将军湾后六河输入的影响。如网箱养鱼处人为投入的大量鱼食饵料, 在高 DO 环境下可以快速分解一部分, 从而释放出部分低 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 的硝酸盐, 并消耗大量的 DO, 这与该处测得的低 DO 值和低 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值一致。这种影响一直持续到两岔河。将军湾水体受后六河 (低 NO_3^- 含量、高 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值, 见表 2) 影响, 水动力发生改变, 使部分水体往北回流或发生漩流, 有可能混合部分较高 NO_3^- 含量、低 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值的中下部 (斜温层) 水体, 从而使 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 与 $\ln [\text{NO}_3^-]$ 投影点偏离趋势线。

受湖水透明度 ($< 3 \text{ m}^{[4]}$) 的影响, 藻类的生长主

1) 春季硝酸盐平均含量数据为肖化云等未发表数据。

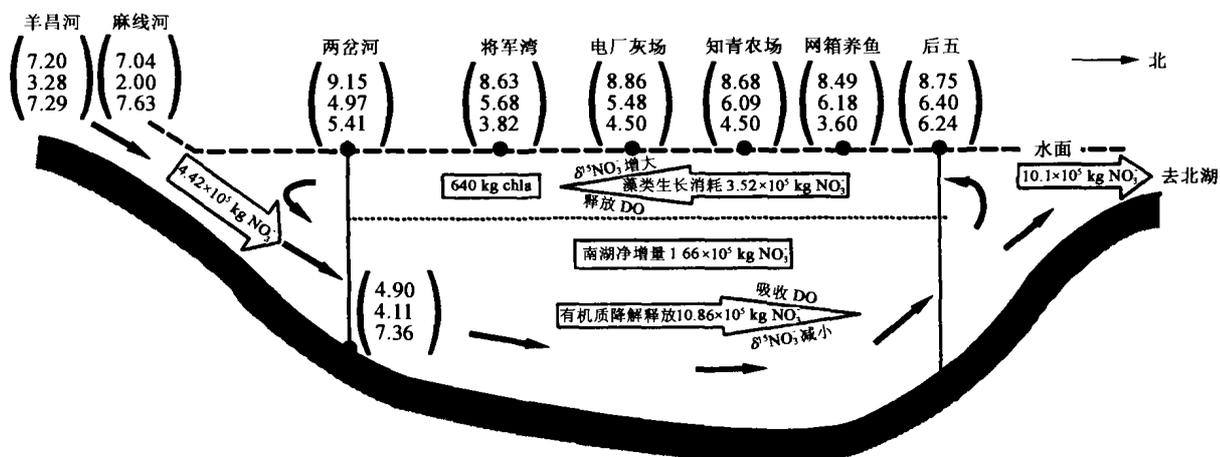


图4 南湖夏季氮的生物地球化学循环模式图

Fig. 4 Model of nitrogen biogeochemistry cycle in South Lake in summer
括号内的数值分别为 DO、NO₃⁻、δ¹⁵NO₃⁻。

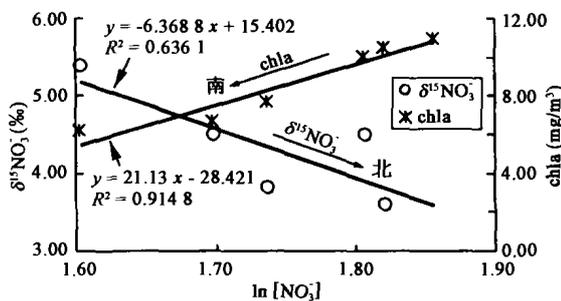


图5 变温层NO₃⁻含量与chla含量、δ¹⁵NO₃⁻变化关系
Fig. 5 Relationship between NO₃⁻ concentrations and chla and δ¹⁵NO₃⁻ in epilimnion

要局限于表层。在变温层水动力作用下，表层藻类(chla)被带至变温层中下部(2~6 m)，并存在向下递减的趋势(图3)。藻类在中下部位被迫停止生长，甚至死亡并矿化(硝化)，释放出低δ¹⁵NO₃⁻比值的NO₃⁻，结果使变温层中下部NO₃⁻的δ¹⁵NO₃⁻比值降低(图3)，变温层NO₃⁻含量向下递增趋势也反映了这种情况。如果只考虑表层(0~2 m)藻类生长，按照各个采样点所在区域表面积比(由北往南为1:0.92:0.71:0.67:3.42:0.67，用网格法计算，均未考虑浅水湖叉及后湖)，则整个南湖(面积约38 km²)变温层生产的净chla量约为640 kg。根据图5中NO₃⁻含量与chla含量关系，可计算生产640 kg chla需消耗硝酸盐约3.52 × 10⁵ kg。

2.4 南湖斜温层有机质的矿化分解(硝化)

水动力微弱的湖泊在夏季分层期，由于热分层的阻碍作用，下部斜温层DO含量一般较低，水体处于一个相对还原的环境，有机质矿化(硝化)困难。

相反，这些湖泊斜温层通常发生反硝化作用，进一步使水体硝酸盐含量降低(δ¹⁵NO₃⁻比值升高)。红枫湖南湖为一山间人造水库，水动力较强。在羊昌河和后六河入湖口两岔河处，上部变温层富DO的水体在河流(高DO含量，表1)浑浊水体作用下重力下沉，从而改变斜温层环境，导致斜温层有机质的矿化(硝化)。随着有机质的矿化(硝化)，大量DO被消耗，如从两岔河20 m深处的4.90 ml/L降至后五同深度的2.88 mg/L。后五底部NO₃⁻的δ¹⁵NO₃⁻比值升高(7.98‰)，可能是其极低DO含量引起反硝化作用的原因。

由于有机质的矿化(硝化)倾向于优先生成富¹⁴N的硝酸盐，结果使NO₃⁻的δ¹⁵NO₃⁻比值逐渐降低。从后五剖面(图6)可以看出，斜温层δ¹⁵NO₃⁻与ln[NO₃⁻]呈较好的反相关关系(R²=0.8443)，进一步确证了斜温层有机质的矿化(硝化)。整个过程分馏系数ε=-7.55，位于前人矿化(硝化)矿化分馏的范围(-29‰~0‰^[81])内。整个矿化(硝化)过程

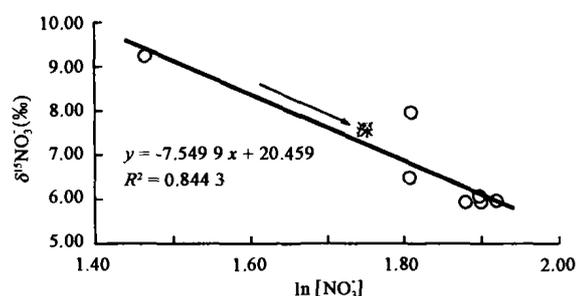


图6 后五剖面斜温层NO₃⁻含量与δ¹⁵NO₃⁻变化图
Fig. 6 Relationship between NO₃⁻ concentrations and δ¹⁵NO₃⁻ in the thermocline of Houwu Lake

一般分三步, 即有机质的氨化反应、氨的亚硝化反应和硝化反应。第一步氮同位素分馏十分微弱 ($\epsilon = \pm 1^{(9)}$), 而硝化反应相当迅速, 实际上氮同位素分馏也弱。氮同位素分馏主要发生在氨的亚硝化反应, 依赖于第一步氨化产物 (NH_4^+) 的数量。在 NH_4^+ 含量较低的环境 (一般 DO 含量较高) 中, 氮同位素分馏相对较弱, 红枫湖南湖斜温层 7 月 NH_4^+ 含量小于 0.2 mg/L , 正是引起整个分馏系数相对偏低的主要原因。

2.5 南湖夏季氮循环通量

利用南湖整个夏季 (5~7 月) 平均硝酸盐含量增量 0.83 mg/L 及夏季南湖库存 (约 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$), 可计算南湖整个夏季的硝酸盐净增量约为 $1.66 \times 10^5 \text{ kg}$ 。整个夏季河流本身携带的硝酸盐总量为 $F_{\text{羊昌河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{羊昌河}} + F_{\text{麻线河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{麻线河}} + F_{\text{后六河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{后六河}} = 55.64 \text{ g/s} = 4.42 \times 10^5 \text{ kg/夏季}$ 。若以后五剖面斜温层 NO_3^- 含量平均值 $[\text{NO}_3^-]_{\text{平均}}$ 作为向北湖输出水体的 NO_3^- 含量, 则整个夏季向北湖输出的硝酸盐总量为 $(F_{\text{羊昌河}} + F_{\text{麻线河}} + F_{\text{后六河}}) \times [\text{NO}_3^-]_{\text{平均}} = 126.97 \text{ g/s} = 10.1 \times 10^5 \text{ kg/夏季}$ 。该值有些偏大, 因为从 5 月到 7 月, 随着斜温层有机质的降解, 硝酸盐含量递增, 4、5 月往北湖输出的硝酸盐含量要低于 7 月的 $[\text{NO}_3^-]_{\text{平均}}$ 。因此, 整个夏季有机质矿化 (硝化) 产生的硝酸盐总量约为: $(1.66 \times 10^5 - 4.42 \times 10^5 + 3.52 \times 10^5 + 10.1 \times 10^5) \text{ kg} = 10.86 \times 10^5 \text{ kg}$ 。从上面可以看出, 有机质矿化 (硝化) 产生的硝酸盐主要输入至北湖, 进一步使北湖的硝酸盐负荷增大。

两岔河下沉水体除羊昌河和麻线河两条河的河水外, 还有沿变温层往南回流的表层水。这三股水体混合后在重力作用下下沉至两岔河斜温层。由于两岔河即是混合下沉部位, 该处斜温层可认为基本上是均匀的。两岔河附近湖面狭窄且为河流入湖口, 因而认为该处湖水以混合水体为主。假定变温层回流水流量为 $F_{\text{回流}} (\text{m}^3/\text{s})$, 则可以计算出混合水体对斜温层的相对贡献 f :

$$f = (F_{\text{羊昌河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{羊昌河}} + F_{\text{麻线河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{麻线河}} + F_{\text{回流}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{回流}}) / (F_{\text{羊昌河}} + F_{\text{麻线河}} + F_{\text{回流}}) \times [\text{NO}_3^-]_{\text{两岔河}}$$

$$f = (F_{\text{羊昌河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{羊昌河}} \times \delta^{15}\text{NO}_3^-_{\text{羊昌河}} + F_{\text{麻线河}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{麻线河}} \times \delta^{15}\text{NO}_3^-_{\text{麻线河}} + F_{\text{回流}} \times [\text{NO}_3^-]_{\text{回流}} \times \delta^{15}\text{NO}_3^-_{\text{回流}}) / (F_{\text{羊昌河}} + F_{\text{麻线河}} + F_{\text{回流}}) \times [\text{NO}_3^-]_{\text{两岔河}} \times \delta^{15}\text{NO}_3^-_{\text{两岔河}}$$

联合上两式, 解得 $F_{\text{回流}} = 0.96 \text{ m}^3/\text{s}$; $f = 0.557$

$f = 0.557$ 说明除混合水体的贡献外, 尚有两岔河本身因素引起的变化 (即无混合水体作用时有有机物的降解等, 约占 45%)。回流水体虽然流量不大, 但其高 DO 特征非常有利于有机质的降解。

3 结 语

综上所述, 可以建立南湖夏季分层期氮的生物地球化学循环模式, 即斜温层有机质矿化 (硝化) 释放硝酸盐和变温层藻类生长同化硝酸盐为有机质同时发生 (图 4)。高 NO_3^- 含量 (低 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值) 和低 DO 含量的斜温层水体在南湖最北端后五处受地貌影响上涌, 一部分继续下泻至红枫湖北湖, 另一部分则沿斜温层往南回流。高 NO_3^- 含量的水体引起表层藻类大量生长, 并释放出 O_2 , 使表层回流水体 DO 含量逐渐增大, 但 NO_3^- 含量逐渐降低 ($\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值增大)。回流至两岔河处, 已经成为低 NO_3^- 含量 (高 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值)、高 DO 含量的水体, 在羊昌河和麻线河浑浊河水 (低 NO_3^- 含量、高 $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值、高 DO 含量) 的带动下重力下沉至斜温层, 往北流动。混合水体下沉过程中对底部表层沉积物的搅扰及较高的 DO 含量非常有利于斜温层有机质的矿化 (硝化)。随着有机质的矿化 (硝化), DO 被逐渐消耗, 但 NO_3^- 含量却逐渐增大 ($\delta^{15}\text{NO}_3^-$ 比值降低)。这部分 NO_3^- 含量逐渐增大的水体在后五上涌后, 继续提供给藻类生长所必需的营养盐。

虽然南湖外源河流硝酸盐含量低于下泻水体的硝酸盐含量, 但是并不表示南湖夏季分层期整个南湖总有效氮负荷 (硝酸盐 + 有机质) 是降低的。因为外源河流携带大量的外源有机质 (主要是陆源) 进入湖泊, 南湖湖水硝酸盐含量的升高可能有较大部分是这部分有机质降解 (矿化 + 硝化) 的结果。在这种情况下, 上述生物地球化学循环模式将导致外源有机质 (陆源) 不能完全直接保存在沉积物中 (沉积保存), 而是部分转化为硝酸盐, 继而被水生浮游植物同化吸收转化为水生有机质后再保存, 从而影响沉积物有机 C:N 比值及有机碳同位素对沉积有机物源头的判断^[10, 11], 以及古环境、古气候重建^[12] 的理论在强水动力湖泊中的应用。另外, 随着秋季的到来, 水生浮游植物死亡、降解, 水体中 DO 大量消耗, 湖泊高含量的硝酸盐经反硝化作用将最终转化为温室气体 N_2O 释放进入大气, 因此探讨这一类型湖泊夏季氮的生物地球化学循环具有十分重要的意义。

中国科学院南京土壤研究所邢光熹研究员、曹亚澄高级工程师等为本文氮同位素分析给予了大力支持,在此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Teranes J L, Bernasconi S M. 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[J]. *Limnol Oceanogr*, 2000, 45: 801 ~ 813.
- [2] 金相灿, 屠清瑛. 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. 268 ~ 270.
Jin Xiang-can, Tu Qing-ying. Investigation Criterion of Eutrophication in Lakes[M]. 2nd ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990. 268 ~ 270 (in Chinese).
- [3] 肖化云, 刘丛强. 水样硝酸盐氮同位素分析预处理方法探讨 [J]. 岩矿测试, 2002, 21(2): 105 ~ 108.
Xiao Hua-yun, Liu Cong-qiang. Discussion on a method to prepare nitrate in water samples for $\delta^{15}\text{N}$ analysis[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2002, 21(2): 105 ~ 108 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 104.
Wang Su-min, Dou Hong-shen. Records of Lakes in China[M]. Beijing: Science Press, 1998. 104 (in Chinese).
- [5] 张维. 红枫湖、百花湖环境特征及富营养化 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1999. 20 ~ 58.
Zhang Wei. Environmental Characteristics and Eutrophication of Hongfeng Lake and Baihua Lake[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1999. 20 ~ 58 (in Chinese).
- [6] Fogel M L, Cifuentes L A. Isotope fractionation during primary production[A]. Macko S A, Engel M H. *Organic Geochemistry* [C]. New York: Plenum Press, 1993. 73 ~ 94.
- [7] Sigman D M, Altabet M A, McCorkle D C, et al. The $\delta^{15}\text{N}$ of nitrate in the Southern Ocean: Consumption of nitrate in surface waters[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 1 149 ~ 1 166.
- [8] Kendall C. Tracing nitrogen sources and cycling in catchments [A]. Kendall C, McDonnell J J. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1998. 519 ~ 576.
- [9] Létole R. Nitrogen-15 in the natural environment[A]. Fritz P, Fontes J Ch. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (v. 1A)[C]. Amsterdam: Elsevier, 1980. 407 ~ 433.
- [10] Jasper J P, Hayer J M. A carbon isotope record of CO_2 levels during the Late Quaternary[J]. *Nature*, 1990, 347: 462 ~ 464.
- [11] Meyers P A, Lallier-Vergès E. Lacustrine sedimentary organic matter records of late Quaternary paleoclimates [J] *J Paleolimnol*, 1999, 21: 345 ~ 372.
- [12] Stuiver M. Climate versus change in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the Lake Quaternary[J]. *Quat Res*, 1975, 5: 251 ~ 262.

Nitrogen biogeochemical cycles in lakes with strong hydraulic power during summer stratification: A case study of Hongfeng Lake in Guizhou Province, Southwest China

XIAO Hua-yun, LIU Cong-qiang, LI Si-liang, WANG Shi-lu

(State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Nitrogen stable isotopic technique, combined with the concentration changes of nitrate, chlorophyll a (chl_a) and dissolved oxygen (DO), is used to study nitrogen biogeochemistry cycles during summer stratification in Hongfeng Lake. In general, nitrate concentrations in lakes are lower in summer than in spring because algae consume nitrate in summer. However, nitrate concentrations in South Lake of Hongfeng Lake increase by 0.83 mg/L. This indicates that there are other important sources of nitrate to the lake in summer. It is calculated that the net yield of chl_a is about 640 kg, and 3.52×10^5 kg nitrates is assimilated. The increase of 0.83 mg/L in the lake waters also needs about 1.66×10^5 kg nitrates. And about 10.1×10^5 kg nitrates are discharged into North Lake of Hongfeng Lake. Apart from the import of 4.42×10^5 kg nitrates from inflow steams, there is a margin of 10.86×10^5 kg nitrates. It is suggested that they come from the thermocline of the lake due to mineralization (and nitrification) of organic matters. With the help of hydraulic power, waters with high DO from inflow steams and from the epilimnion of the lake sink at the inlet of the lake. Mineralization (and nitrification) is the result of the hydraulic pattern. The nitrogen biogeochemistry cycles in the lakes with strong hydraulic power, such as the South Lake, is a special type, with the concurrence of mineralization (and nitrification) of organic matters in thermocline and uptake of nitrate by algae in epilimnion.

Key words: $\delta^{15}\text{NO}_3^-$; stratification; nitrogen; biogeochemistry cycles; strong hydraulic power lakes; Hongfeng Lake