

# 红枫湖碳同位素变化指示的湖泊碳循环过程

王仕禄, 刘丛强, 万国江

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, 贵阳 550002

**关键词:** 碳同位素; 湖泊; 碳循环; 红枫湖

碳同位素是示踪湖泊碳循环最有力的工具, 其所有的生物地球化学过程只要碳的流动发生分异, 并有同位素分馏效应, 都可以利用同位素变化进行示踪。反过来, 湖泊碳同位素与碳循环的相互关系研究也可以进一步提高对湖泊碳同位素的认识, 揭示碳同位素变化指示的地球化学意义。

红枫湖位于贵州喀斯特区一个封闭的小流域, 入湖河水主要来自几处泉水。泉水中 DIC(溶解无机碳)碳同位素组成接近土壤  $\text{CO}_2$  与碳酸盐岩溶解平衡的同位素变化曲线, 同位素比值轻微偏正代表与空气存在部分交换过程, 或者表层土壤中大气  $\text{CO}_2$  的混入。从泉水到河水  $\text{DIC}\delta^{13}\text{C}$  增加, 向着大气  $\text{CO}_2$  的方向变化, 一方面反映了受大气平衡过程的影响, 另一方面 DIC 浓度降低也与河水中进行的光合作用有关。地下水中只有有机质的分解过程, 不存在光合作用, 而河流中的光合作用使河水 DIC 浓度降低,  $\delta^{13}\text{C}$  增加。

湖水 DIC 碳同位素与浓度呈负相关关系, 反映了光合作用与呼吸作用是影响湖水 DIC 同位素变化的主要因素。光合作用形成有机质时, 大量的  $^{12}\text{C}$  被优先利用, 使湖水 DIC 浓度降低的同时, 剩余 DIC 的  $\delta^{13}\text{C}$  增加; 相反, 呼吸作用增强时, 有机质分解释放大量的  $^{12}\text{C}$  进入湖水, 使湖水 DIC 浓度增加,  $\delta^{13}\text{C}$  降低。在 DIC 同位素的垂直剖面上, 秋冬季节湖水混合均匀, 上下层水的碳同位素差异很小; 在湖水分层期间, 表层光合作用为主, 同位素偏正, 底层以呼吸作用为主, 同位素较负。7 月份表层水的碳

同位素出现异常, 是因为在光合作用极强的情况下, 湖水 pH 达到 9.5 以上, 此时湖水对大气  $\text{CO}_2$  的吸收存在  $\text{CO}_2$  与  $\text{OH}^-$  的反应, 这一过程存在较大的同位素分馏, 使表层湖水 DIC 的碳同位素变负。

有机质分解要消耗  $\text{O}_2$ , 水体的表观耗氧量 (AOU) 与 DIC 的碳同位素必然存在一定的关系。在 10 月份有机质分解作用最强时, 整个水体从上到下, AOU 都是正值, 有机质分解消耗的氧超过光合作用放出的氧, 而放出的  $\text{CO}_2$  超过同时期光合作用对  $\text{CO}_2$  的消耗。随着 AOU 增大, 水体  $\text{CO}_2$  含量增加, DIC 同位素明显降低。

不同环境形成的 POC(颗粒有机碳)碳同位素明显不同, 无论是冬季还是夏季, 湖水、河水和地下水中的 POC 同位素变化都很大, 湖水相对于河水和地下水中的 POC 同位素明显偏负, 这也说明湖泊中的 POC 不是由河流输入的, 而是湖泊中光合作用的产物。而入湖河水中 POC 碳同位素与地下水中 POC 同位素一致, 显示了二者 POC 都是流域来源的。

在湖泊内部, POC 浓度和同位素随季节、月份的变化也很大。在 7 月生长季节, 表层湖水中 POC 碳同位素变化为  $-26\% \sim -28\%$ , 秋冬季节(1 月份和 10 月份), 同位素一般都小于  $-30\%$ 。POC 同位素在深度剖面上, 7 月份从上到下逐渐降低, 1 月份则垂向变化不明显, 而在秋季 10 月份, 从上到下逐渐增加。

不同季节和月份, POC 浓度和同位素变化很

大,原因之一是受湖泊内部生物地球化学过程的控制。理论上 POC 和 DIC 的同位素变化能相互指示产生过程,更好地示踪湖泊 POC 的来源。红枫湖同时测得的 DIC 和 POC 碳同位素比值只在夏季 7 月份时呈正相关关系,其他月份基本都呈负相关关系。原因就在于 7 月份,光合作用强于呼吸作用,而在其余几个采样时段,湖水发生较强的有机质分解过程。

除了 POC 来源和变化过程,水体  $\text{CO}_2$  的同位素组成也是影响 POC 碳同位素一个因素。红枫湖水体中  $\text{CO}_2$  的同位素和 DIC 的同位素变化相似,主要反映了湖泊  $\text{CO}_2$  来源和  $\text{CO}_2$  发生的变化。受多种因素的综合影响,湖水中 DIC 和  $\text{CO}_2$  同位素的季节性变化其实并不大,因此,对于 POC 碳同位素变化而言,只有很少一部分继承了  $\text{CO}_2$  和 DIC 的碳同位素变化,POC 碳同位素变化主要是由光合作用过程中同位素分馏效应所致。

环境参数对 POC 同位素分馏的影响主要体现在水生生物生长时,细胞内部的  $\text{CO}_2$  分压变化: $c_i = c_e - Q_s(r/D_T R + 1/p)$ ,对同位素变化影响较大的因素包括与温度有关的  $\text{CO}_2$  扩散系数( $D_T$ )、细胞的大小( $r$ )、藻类生长速率( $Q_s$ )等。无论是温度还是  $\text{CO}_2$  浓度,最终都是通过这几个因素的综合效应,体现到 POC 的碳同位素变化上。

温度:为了去除有机质分解对同位素变化的影响,研究只取表层 5~6 m 内湖水的同位素变化。温度对同位素分馏的影响表现为两种不同的变化:在温度较低时(主要是 1 月份的样品),同位素分馏随温度的升高而增大;在较高温度范围内(20~

25℃)(7、8、9 月份样品),同位素分馏随温度升高而减弱( $-0.5874\text{‰}/^\circ\text{C}$ ),与理论模型的敏感性分析结果( $-0.3\text{‰}/^\circ\text{C}$ )有一些差距, $-0.3\text{‰}/^\circ\text{C}$  的敏感性是基于海洋藻类的分析结果。

$\text{CO}_2$  浓度的影响:同样,在表层 5~6 m 湖水深度内,七八月份光合作用比较强的季节, $\text{CO}_{2(\text{aq})}$  与 POC 间的同位素分馏( $\epsilon^{13}\text{C}_{\text{CO}_{2(\text{aq})}\text{-POC}}$ )与  $\text{CO}_{2(\text{aq})}$  浓度间存在线性关系:

$$\epsilon^{13}\text{C}_{\text{CO}_{2(\text{aq})}\text{-POC}} = 6.2054 \lg[\text{CO}_{2(\text{aq})}] + 5.0242$$

( $R^2 = 0.6382, n=9$ )。

相对而言,7 月份的分馏值较 8 月份小,10 月份最大。这主要是由藻类的变化所致,夏季以绿藻和蓝绿藻为主,同位素分馏较小,早秋季节,各种藻类的混合,同位素分馏会增大,10 月份以硅藻为主,同位素分馏最大。

湖泊水—沉积物界面不仅有物质交换,化学反应也最活跃。冬季湖水的充分混合使整个水体都含氧,有机质在有氧环境中分解,放出  $\text{CO}_2$ ,使界面的 DIC 同位素最低( $-16.7\text{‰}$ ),与之同位素平衡的  $\text{CO}_{2(\text{aq})}$  约为  $-25\text{‰}$ ,这与有机质的同位素很接近。夏季的湖泊热分层使底层水处于完全的缺氧环境,此时,界面 DIC 的碳同位素最大( $4.0\text{‰}$ ),对应的  $\text{CO}_2$  同位素为  $-4\text{‰}$  左右,如此偏正的碳同位素指示了界面的成甲烷作用过程。从冬夏季节空隙水的碳同位素剖面可以看出,界面 1 cm 内是生物地球化学活动最活跃、最剧烈的场所。