

河蚬壳体 $\delta^{13}\text{C}$: 由水体溶解无机碳重建过去环境变化的代用指标

周会^{①②}, 刘丛强^①, 蒋倩^{①②}, 江伟^{①②}, 赵彦龙^{①②}, 丁文慈^{①②}, 闫慧^{①②}

① 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;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: zhouhui@mails.gyig.ac.cn

2010-07-12 收稿, 2010-10-13 接受

国家自然科学基金资助项目(40721002, 40403010)

摘要 溶解无机碳(DIC)是陆地生态系统水体重要的组成物质. 其含量、组成以及碳的来源决定于汇水区域环境条件和流域水体碳循环特征. 如果能够反演水体 DIC 的地球化学特征, 则可以为重建过去环境变化提供一条新途径. 河蚬是陆地生态系统水体中广泛分布的底栖双壳类动物, 其壳体由碳酸盐矿物构成, 是软体在生长过程中依次分泌的结果, 因而具有 DIC 代用指标的潜质. 通过对中国西江流域河蚬壳体及其环境水体 DIC 的分析, 发现了二者碳同位素组成之间显著的相关关系($P < 0.01$, $r = 0.63$), 表明河蚬壳体碳同位素组成的变化记录环境水体 DIC 的相应变化, 其时间分辨率很容易达到季节变化的水平. 新陈代谢作用虽然使壳体的碳同位素组成平均低于水体 DIC 同位素组成 1.4‰ , 但整体上并未改变壳体与水体 DIC 同位素组成变化的相关性. 分水岭地区小溪流 DIC 同位素组成在时间上变化较大, 因而对壳体样品选取的空间分辨率要求较高, 不宜作为代用指标的首选. 该结果为利用湖泊滨岸和/或河流阶地沉积物中河蚬化石的分析重建流域过去环境变化和碳循环提供了科学基础和技术途径.

关键词

碳同位素
陆地生态系统
河蚬
水环境
生物碳酸盐
西江

溶解无机碳(DIC)是陆地生态系统水体(河流和湖泊)主要的化学组成物质之一. 在每年经河流输入海洋的 0.8 Pg 碳通量中^[1], 超过半数以 DIC 的方式完成^[2,3]. DIC 由 CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} 和 H_2CO_3 组成, 彼此之间处于动态平衡之中. 其来源主要包括碳酸盐矿物和大气 CO_2 的溶解、有机质的降解和矿化以及水生植物的光合和呼吸作用等^[4-6]. 虽然 DIC 的总量及其组成受流域岩石类型和水体 pH 的控制^[4,6-8], 但在一定的 DIC 总量之下却存在着活跃的碳来源的变换. 对一个具体的水体而言, 何种来源是 DIC 的主要贡献者因流域环境条件的不同而不同^[4-6,9]. 对此可利用 DIC 的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)进行识别^[10]. 如流域岩石以碳酸盐岩为主, 则碳酸盐矿物的溶解决定了流域水体整体上较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ^[4,11]; 在一定岩石

背景之下, 一个流域的 DIC 如受有机质降解和矿化控制, 则 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相对较低, 变化范围在 $-7\text{‰} \sim -26\text{‰}$ 之间, 因地区不同而存在较大差异^[3,4,12]; 如水体 DIC 主要来自于大气 CO_2 的溶解, 则 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 可高至 $-1\text{‰} \sim +3\text{‰}$ ^[5]; 水生植物、尤其是富营养化水体中藻类的光合作用消耗大量溶解 $^{12}\text{CO}_2$, 同时促进大气 CO_2 向水中的溶解, 从而显著提高 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ^[13]. 水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化历史是其汇水盆地上述主要控制因素变换的结果, 而这些变换又与流域环境变迁密切相关. 如流域土地的大量开垦会增强土壤有机物质的分解和矿化, 季风气候的增强会引起 C_3/C_4 植物比例的变化从而改变有机质的 $\delta^{13}\text{C}$, 而气候变暖和蒸发量的增加会造成汇水盆地面积和区域的变化从而改变流域岩石类型. 这些变化最终都导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变

英文版见: Zhou H, Liu C Q, Jiang Q, et al. Stable carbon isotopes in the shell of *Corbicula fluminea* (Müller 1774): Implications for understanding environmental changes in drainage basins. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 4162–4167, doi: 10.1007/s11434-010-4227-8

化. 如果能够重建水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化历史, 则可为认识区域环境和气候变化提供新途径. 为此需要有重建陆地生态系统水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化的代用指标.

河蚬(*Corbicula fluminea* Müller, 1774)是生活于陆地生态系统水体中的一种底栖双壳类动物, 隶属软体动物门. 广泛分布于江河湖泊中, 且常具有较大的种群密度, 是世界各地许多淡水和河口生态系统的关键物种之一^[14-17]. 其壳体具有 3 层结构, 其中内、外 2 层分别由片状和棱柱状文石矿物构成, 表层是一层薄而透明的几丁质. 碳酸盐矿物成分的壳体是河蚬在生长过程中由软体的外套膜在生长过程中依次分泌而成, 且能够在地质沉积序列中保存下来, 从而成为湖泊滨岸和河流阶地沉积物中常见的化石种类^[18-20]. 如果河蚬壳体的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$)与环境水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 之间存在某种联系, 则可以利用河蚬壳体的分析来重建区域环境变化. 但由于新陈代谢作用对碳同位素组成的可能影响^[21,22], 利用软体动物壳体碳同位素组成的分析重建过去环境变化还存在不确定性^[23]. 然而这些研究很少涉及河蚬壳体同位素组成的分析^[24,25]. 有鉴于此, 我们对中国西

江流域水体和河蚬壳体进行了大量的碳同位素组成分析, 从二者空间变化的角度研究河蚬 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与环境水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的关系.

1 研究区域和样品分析方法

1.1 采样路线及其地质背景

研究区域主要位于西江流域, 少部分位于贵州高原的清水江上游, 属长江水系. 采样于 2005 年 12 月完成. 样品采集利用路线采样法, 即根据研究目的设计采样路线, 沿线布点进行样品采集. 由于本研究旨在认识河蚬与环境水体地球化学信息之间的关系, 水体的环境条件变化越大, 越有利于目标的实现. 据此, 采样路线的设计不仅兼顾了流域的主河道, 更着重流域的支流系统. 如图 1 所示, 采样路线北起贵州省贵阳市龙洞堡的鱼梁河(第 1 采样点), 沿 321 国道向东至马场坪后转而向南沿 210 国道经独山依次穿过黔江上游的都柳江、打狗河和红水河支流系统(第 1~21 点). 沿线河流发育或流经的岩石类型以碳酸盐岩为主; 从红水河继续向南经广西南宁市转而向东

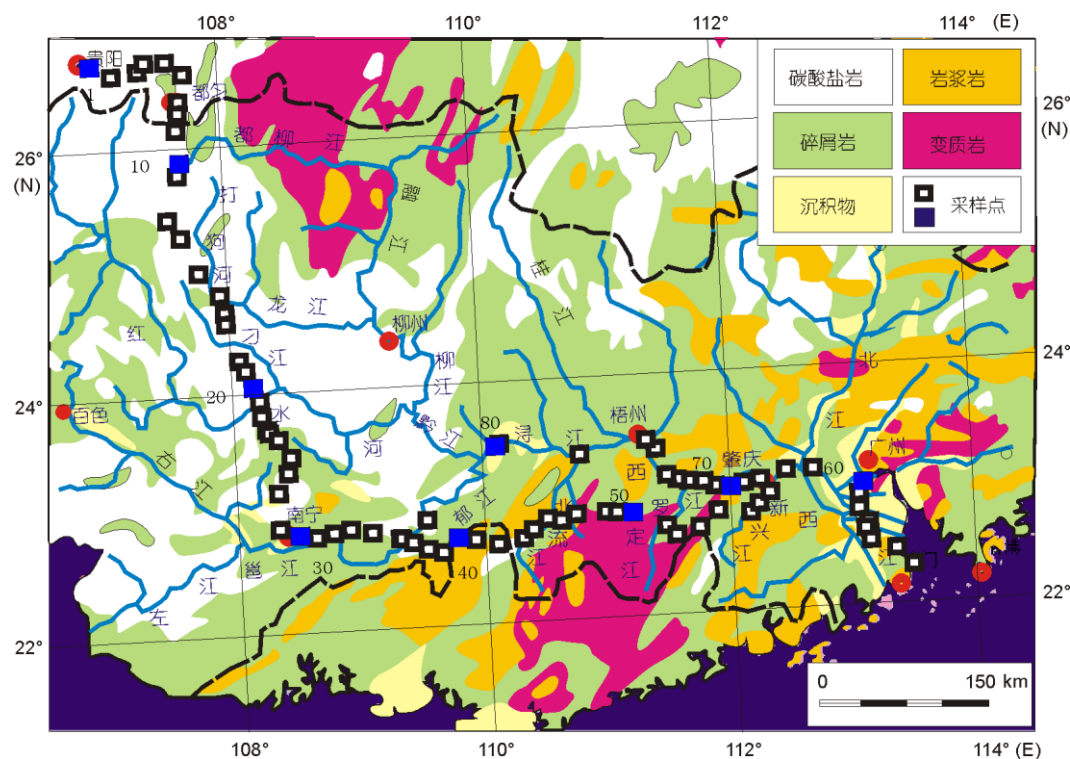


图 1 西江流域采样路线、采样点及其与区域岩石和水系关系图

图中数字表示采样顺序和采样点的空间分布

至横县(第 22~35 点), 碳酸盐岩逐渐减少而碎屑沉积岩逐渐增多. 继续向东穿过西江干流南侧的北流江、罗定江和新兴江等支流系统至广东省肇庆市(第 36~57 点), 岩石以岩浆岩和变质岩为主, 其次为碎屑沉积岩, 偶尔出露碳酸盐岩. 而广州市以南至珠江口淇澳岛的珠江流域(第 60~66 点)、以及自肇庆沿西江干流而上至思怀(第 67~81 点)的西江干流, 区域岩石主要为第四系沉积物、碎屑沉积岩和部分岩浆岩. 沿采样路线所穿过的河流或湖泊, 相距 10 km 左右无论大小均为采样对象.

1.2 样品采集和分析方法

采样所用聚乙烯瓶均经 10%硝酸溶液浸泡, 并用超纯水冲洗、晾干. 水样用 Millipore 针头式过滤器(Swinnex-47)和 Whatman 玻璃纤维滤膜(Whatman Glass Microfibre GF/F: $\Phi 47$ mm)现场过滤. 用于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分析的样品装满 60 mL 样品瓶后加入数滴 HgCl_2 溶液, 并置于 4℃ 冰箱中冷藏. 河蚌样品(图 2)用滤网采集, 所采河蚌大小主要为 1~3 cm 长, 年龄为 1~3 龄. 个别长度达到 4 cm, 年龄为 3~5 龄.

河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的测定方法参照文献[13], 即在一个具橡皮塞的 30 mL 玻璃瓶中放入磁力搅拌子和 1 mL 浓磷酸, 然后在真空系统上将样品瓶抽成高真空. 取下样品瓶并注入 10 mL 水样后再将样品瓶连接到真空系统中, 用具有加热功能的磁力搅拌器对样品边加热边搅拌, 所产生的 CO_2 气体通过冷阱纯化后收集到样品瓶中. CO_2 碳同位素的测定用 Finnigan MAT-252 质谱仪完成, 结果以‰PDB 方式表述. 多次重复分析的标准偏差为 0.1‰.

河蚌 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的测定用连续流同位素质谱仪(CF-IRMS)完成. 为此先将整个壳体用双氧水在 50℃ 条件下去除表层几丁质(图 2), 然后取壳体腹部 1 mm 宽的外缘(由棱柱状文石矿物构成)研磨至 200 目, 烘干后进行测定. 标准样品(GBW4405)多次重复分析的标准偏差为 0.05‰.

2 结果与讨论

2.1 环境水体中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 变化特征

西江流域地表水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 范围为 -16‰~0‰, 多集中于 -13‰~-2‰ 之间(图 3), 平均值为 -7.9‰, 显著高于世界其他河流, 如加拿大渥太华河(-17.4‰~

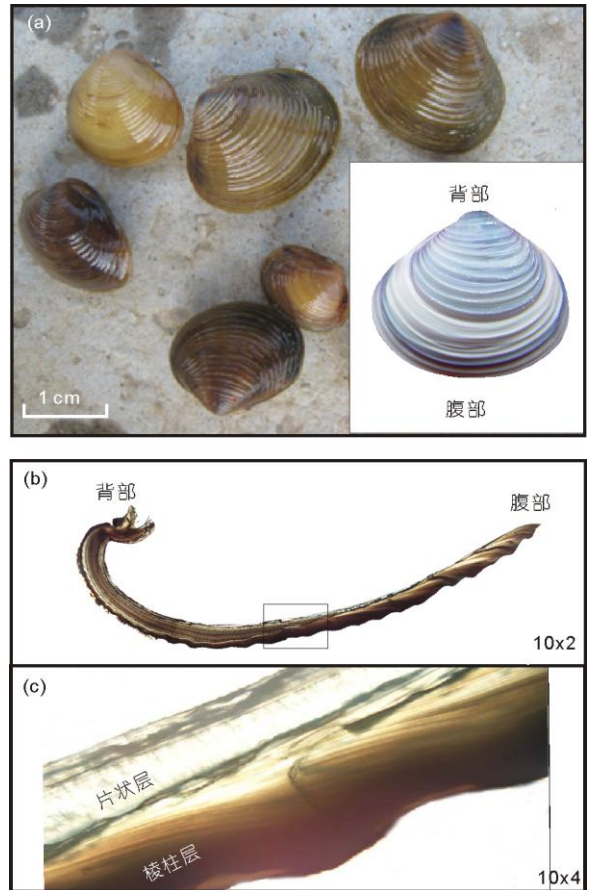


图 2 河蚌样品外部形貌、定向(a)以及壳体在偏光显微镜下的显微结构特征(b), (c)

(a)中内插图片为去除表层几丁质后的文石质壳体右瓣外部特征; (b)显示壳体纵切面显微结构特征, 切片方向位于自背部向腹部壳体最大宽度处; (c)是(b)中方框所示壳体结构进一步放大的结果, 显示壳体的片状文石层(内层)和棱柱状文石层(外层)

-7.3‰)^[4]、欧洲莱茵河(-14.4‰~-6.7‰)^[12]和南美洲亚马孙河(-26‰~-12‰)^[3]等. 有机质的降解和矿化是世界上述几大河流 DIC 的主要贡献者, 而西江流域总体上较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 源于上游大面积的碳酸盐岩出露及其较高的溶解速率^[26]. 这一点从与斯洛文尼亚萨瓦河的对比中可以得到进一步的证实. 后者也位于碳酸盐岩地区, 碳酸盐矿物的溶解所输送的碳占流域水体中碳的 26% 以上, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 范围为 -13.5‰~-3.3‰^[11], 与西江流域十分相近.

但在总体较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 基础上, 存在着显著的区域变化特征. 这是由于区域环境条件的差异所致. 沿采样线出现了两个 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的低值区域, 分别位于广西五圩-南宁之间的红水河流域(第 18~26 点)和兴

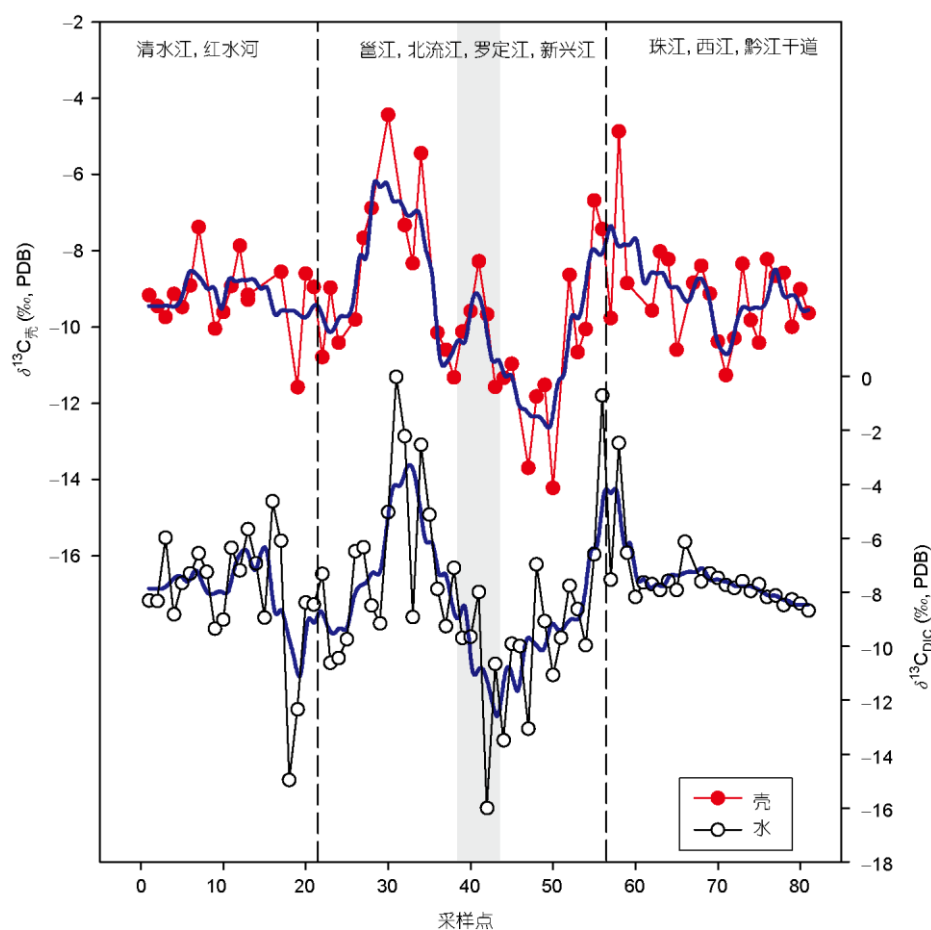


图 3 西江流域河蚬壳体与环境水体 DIC 中 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征对比图

图中蓝色实线是数据平滑结果, 以突出其区域变化特征; 阴影条指示广西寨圩镇与玉林市之间河蚬壳体与水体 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征

业与镇安之间的北流江和罗定江流域(第 41~54 点). 前一区域的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 平均为 -9‰ . 该地区碳酸盐岩地下河系统发育, 当地下河出露地表时水体具有很低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. 这是因为地下环境是一个相对封闭系统, 来自于地表有机质矿化所产生的碳酸对地下水系统碳酸盐矿物的溶解所产生的 CO_2 没有被释放到大气之中, 因此有机碳的低 $\delta^{13}\text{C}$ 特征始终保留在水体之中, 从而显著降低地下水系统 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. 以该地区澄江地下河出口点(第 18 点)为例, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 低至 -15‰ , 与正常碳酸盐岩地区(如贵阳-五圩之间, 第 1~17 点)地表水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的平均值 -7‰ 相比, 偏低 8‰ . 这种地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相对偏低的现象在世界其他地区地下河系统也被观察到^[27]. 但地下水一旦出露地表, CO_2 的逸出所产生的碳同位素的分馏作用会造成水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的升高. 澄江地下河水在下游 10 Km 处(第 19 点) $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 升高到了 -12.3‰ , 增加了近 3‰ . 发育的

地下河系统是这一地区地表水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 较低的一个重要原因. 与该区域相比, 北流江和罗定江流域的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 更低, 平均在 -10‰ 以下. 广泛出露的变质岩和岩浆岩使碳酸盐矿物的溶解对流域水体 DIC 的贡献很小, 而有机物质的降解和矿化成为水体 DIC 的主要来源^[28]. 与两个低值区域相间, 分别在南宁至那阳(第 29~36 点)之间的镇安腰鼓河至广州附近的北江之间(第 55~59 点)出现了两个 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的高值区域, 其值在 -2‰ ~ 0 之间. 水体中浮游植物光合作用以及由此而引起的大气 CO_2 的溶解是这两个高 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 形成的原因. 两个区域地表水多为严重富营养化水体, 藻类的大量繁盛曾给野外水样的现场过滤造成了极大困难. 除此之外, 西江流域干流(包括珠江、西江、浔江、黔江、邕江和红水河)具有较为稳定的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, 平均为 -8‰ . 但从上游到下游具有约 0.5‰ 的升高现象, 这应是河流向大气释放 CO_2 所造成的同位素分

馏所致^[27]。

2.2 河蚬壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 变化特征及其与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的关系

河蚬壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的变化范围为 $-14\text{‰} \sim -4\text{‰}$, 平均值为 -9.3‰ 。其区域变化特征与水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 显著相关($P < 0.01$, $r = 0.63$) (图 3), 表明河蚬壳体中碳的来源与水体 DIC 有关。但与水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相比, $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 平均低于后者 1.4‰ 。非生物成因文石形成过程中与水体 HCO_3^- 的碳同位素分馏值为 2.7‰ ^[29], 表现为 ^{13}C 在碳酸盐矿物中有相对富集。研究区域水体中 HCO_3^- 含量高出于其他形式 DIC 两个数量级, 因而占 DIC 成分的绝对优势。然而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 却低于水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, 这是河蚬软体组织新陈代谢作用所造成的碳同位素分馏的结果。双壳类动物呼吸作用所产生的 CO_2 相对贫 ^{13}C , 这种 CO_2 可以部分被用于壳体的构成, 其对壳体碳的贡献量与新陈代谢的强度有关^[30], 而后者又与食物^[31]和 水体环境条件^[32,33]等有关。由此造成壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 不同程度地偏离水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的现象^[34]。如以非生物成因文石形成过程中与 HCO_3^- 的碳同位素平衡分馏值为对比点, 则西江流域河蚬新陈代谢作用造成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 偏离平衡值 -4.1‰ 。而见诸报道的其他软体动物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 偏离平衡值达 $-5\text{‰} \sim -10\text{‰}$ ^[34], 平均约为 -8‰ 。相比之下, 河蚬 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 受新陈代谢作用的影响远小于其他双壳类。

但在局部地区出现了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相近甚至高于后者的情况。如在广西寨圩镇与玉林市之间(第 39~42 采样点), $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 出现了一个显著的次级峰, 但与之相对应的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 并无明显升高。这种现象的出现可能与样品壳体形成时间段内环境水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 发生了较大变化有关。水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 因季节不同存在程度不同的变化^[35], 虽然这种时间序列上的差异远小于空间上的变化^[28], 但由于壳体样品是一定时间段内河蚬分泌而成的结果, 如果环境水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在样品壳体形成时间内因某些原因而降低, 就可能形成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相近甚至高于后者的现象。本研究虽然取壳体外缘 1 mm 作为分析样品以尽可能地保证样品是采样季节分泌的产物, 但不能完全排除某些采样点水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在样品壳体形成时间段内发生较大变化的可能。这一点从罗定江流域水体 DIC 含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的长期观测中得到了证实。该流域支流系统的个别点位 DIC 含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在时间上的变化

显著高于其他观测点^[28]。广西寨圩镇与玉林市之间的采样点位于西江流域与南流江的分水岭地区, 溪流很小, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在时间上的变化可能较大, 样品壳体形成过程中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 可能高于采样时的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, 因而造成了该地区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 相近的现象; 再如在西江下游干道, $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的波动大于水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的相应变化, 也可能出于类似原因。要进一步证实上述现象发生的原因需要减小河蚬壳体取样的宽度, 即提高样品的时间分辨率。

尽管存在新陈代谢作用对河蚬 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的影响, 以及局部地区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 关系的不一致性, 但这些因素都没有改变 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在区域变化上的显著一致性。相关分析显示出如下的线性关系:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = 0.9 \times \delta^{13}\text{C}_{\text{shell}} + 0.2.$$

据此, 可以将河蚬壳体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 作为一个代用指标来重建流域水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化。

本研究 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 数据虽然来自 12 月份水体的分析, 但从罗定江流域不同季节水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 总体上变化不大的事实看^[28], 12 月份的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 代表西江流域枯水期水体 DIC 碳同位素组成应该不会对结果产生重要影响。西江流域绝大多数采样点 12 月份水温仍在 16°C 左右, 依然适合河蚬的生长^[17,36]。常见河蚬的大小在 20 mm, 其年生长速率应该在 10 mm/a 左右^[37,38], 平均每月 0.8 mm。即便 12 月份的生长速率低于平均生长速率^[36,39], 由于秋季是河蚬的生长旺季, 所以 10~11 月份的生长速率应该高于年平均值。据此推算, 1 mm 宽度的河蚬壳体形成时间最多不应超出秋末冬初, 也即此部分壳体为采样前 1~2 个月内生长的结果。由此可见, 利用河蚬壳体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 作为流域 DIC 及其环境变化的代用指标, 其时间分辨率很容易达到季节变化的水平。

3 结论

西江流域大量河蚬壳体及其环境水体中 DIC 碳同位素组成的分析数据显示, 二者之间存在显著相关性。因此可以利用壳体的碳同位素组成反演水体 DIC 的同位素变化特征, 从而为重建环境变化提供一个 新的代用指标。新陈代谢作用造成河蚬 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 的降低, 但程度较小, 并未改变 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 之间的一致性。分水岭地区的一些小溪流 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 在时间上变化较大, 要恢复其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化需要提高河蚬壳体样品选取时的空间分辨率。如用一般的壳体

样品选取方法,则小溪流河蚬 $\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 不宜作为代用指标的首选.河蚬是陆地生态系统水体中广泛分布的底栖双壳类动物,在湖泊滨岸和河流阶地沉积物

中常常保存有丰富的化石.本研究结果为利用这些化石记录重建过去流域环境和碳循环的变化历史提供了科学基础和技术途径.

致谢 感谢程红光博士、王兵博士、程建中博士和江俊杰硕士在本工作中的帮助.

参考文献

- Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 500—587
- Johnson M S, Lehmann J, Couto E G, et al. DOC and DIC in flowpaths of Amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils. Biogeochemistry (Dordrecht), 2006, 81: 45—57
- Quay P D, Wilbur D O, Richey J E, et al. Carbon cycling in the Amazon River: Implications from the ^{13}C compositions of particles and solutes. Limnol Oceanogr, 1992, 37: 857—871
- Telmer K, Veizer J. Carbon fluxes, $p\text{CO}_2$ and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives. Chem Geol, 1999, 159: 61—86
- Parker S R, Gammons C H, Poulson S R, et al. Diel behavior of stable isotopes of dissolved oxygen and dissolved inorganic carbon in rivers over a range of trophic conditions, and in a mesocosm experiment. Chem Geol, 2010, 269: 22—32
- Sun H G, Han J, Lu X X, et al. Modeling the relations between riverine DIC and environmental factors in the lower Xijiang of the Pearl River, China. Quat Int, 2008, 186: 65—78
- Guo X, Cai W-J, Zhai W, et al. Seasonal variations in the inorganic carbon system in the Pearl River (Zhujiang) estuary. Cont Shelf Res, 2008, 28: 1424—1434
- Chen J, Wang F, Xia X, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River). Chem Geol, 2002, 187: 231—255
- Lee K S, Ryu J S, Ahn K H, et al. Factors controlling carbon isotope ratios of dissolved inorganic carbon in two major tributaries of the Han River, Korea. Hydrol Process, 2007, 21: 500—509
- Tan F C. Stable carbon isotopes in dissolved inorganic carbon in marine and estuarine environment. In: Fritz P, Fontes J C, eds. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1989. 171—190
- Kanduc T, Szramek K, Ogrinc N, et al. Origin and cycling of riverine inorganic carbon in the Sava River watershed (Slovenia) inferred from major solutes and stable carbon isotopes. Biogeochemistry, 2007, 86: 137—154
- Buhl D, Neuser R D, Richter D K, et al. Nature and nurture: Environmental isotope story of the river Rhine. Naturwissenschaften, 1991, 78: 337—346
- Atekwana E A, Krishnamurthy R V. Seasonal variations of dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ of surface waters: Application of a modified gas evolution technique. J Hydrol, 1998, 205: 265—278
- Korniushin A V. A revision of some Asian and African freshwater clams assigned to *Corbicula fluminalis* (Müller, 1774) (Mollusca: Bivalvia: Corbiculidae), with a review of anatomical characters and reproductive features based on museum collections. Hydrobiologia, 2004, 529: 251—270
- Britton J C, Morton B. Corbicula in North America: The evidence reviewed and evaluated. In: Britton J C, ed. Proceedings of the First International Corbicula Symposium. Texas Christian University Research Foundation (Ft. Worth), 1979. 250—287
- Araujo R, Moreno D, Ramos M A. The Asiatic Clam *Corbicula-Fluminea* (Müller, 1774) (Bivalvia, Corbiculidae) in Europe. Am Malacol Bull, 1993, 10: 39—49
- Karatayev A Y, Burlakova L E, Padilla D K. Contrasting distribution and impacts of two freshwater exotic suspension feeders, *Dreissena polymorpha* and *Corbicula fluminea*. In: Dame R F, Olenin S, eds. Comparative Roles of Suspension-Feeders in Ecosystems, Netherlands: Springer, 2005. 239—262
- Isaji S, Ugai H. Freshwater molluscan fossil assemblages of the Middle Pleistocene Kiyokawa Formation, Shimosa Group, with special reference to the pH conditions of their habitat. Quat Res (Tokyo), 2006, 45: 169—178
- Zhang H, Lei G, Chang F, et al. Chronology of the shell bar section and a discussion on the ages of the Late Pleistocene lacustrine deposits in the paleolake Qarhan, Qaidam basin. Front Earth Sci Chin, 2008, 2: 225—235
- McMahon R F, Williams C J. A unique respiratory adaptation to emersion in the introduced Asian freshwater clam, *Corbicula fluminea*

- (Lamellibranchia: Corbiculacea). *Physiol Zool*, 1984, 57: 274—279
- 21 Geist J, Auerswald K, Boom A. Stable carbon isotopes in freshwater mussel shells: Environmental record or marker for metabolic activity? *Geochim Cosmochim Acta*, 2005, 69: 3545—3554
 - 22 Schöne B R, Rodland D L, Surge D M, et al. Comment on “Stable carbon isotopes in freshwater mussel shells: Environmental record or marker for metabolic activity?” by J. Geist et al. (2005). *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 2658—2661
 - 23 McConnaughey T A, Gillikin D P. Carbon isotopes in mollusk shell carbonates. *Geo-Marine Lett*, 2008, 28: 287—299
 - 24 Aucour A M, Sheppard S M F, Savoye R. C-13 of fluvial mollusk shells (Rhône River): A proxy for dissolved inorganic carbon? *Limnol Oceanogr*, 2003, 48: 2186—2193
 - 25 Bucci J P, Showers W J, Genna B, et al. Stable oxygen and carbon isotope profiles in an invasive bivalve (*Corbicula fluminea*) in North Carolina watersheds. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 3234—3247
 - 26 Cai W-J, Guo X, Chen C-T A, et al. A comparative overview of weathering intensity and HCO_3^- flux in the world's major rivers with emphasis on the Changjiang, Huanghe, Zhujiang (Pearl) and Mississippi Rivers. *Cont Shelf Res*, 2008, 28: 1538—1549
 - 27 Doctor D H, Kendall C, Sebestyen S D, et al. Carbon isotope fractionation of dissolved inorganic carbon (DIC) due to outgassing of carbon dioxide from a headwater stream. *Hydrol Process*, 2008, 22: 2410—2423
 - 28 Zhang S R, Lu X X, Sun H G, et al. Major ion chemistry and dissolved inorganic carbon cycling in a human-disturbed mountainous river (the Luodingjiang River) of the Zhujiang (Pearl River), China. *Sci Total Environ*, 2009, 407: 2796—2807
 - 29 Romanek C, Grossman E, Morse J W. Carbon isotopic fractionation in synthetic aragonite and calcite Effects of temperature and precipitation rate. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 419—430
 - 30 Gillikin D P, Hutchinson K A, Kumai Y. Ontogenic increase of metabolic carbon in freshwater mussel shells (*Pyganodon cataracta*). *J Geophys Res-Biogeosci*, 2009, 114: G01007
 - 31 Lartaud F, Emmanuel L, de Rafelis M, et al. Influence of food supply on the delta C-13 signature of mollusc shells: implications for palaeoenvironmental reconstitutions. *Geo-Marine Lett*, 2010, 30: 23—34
 - 32 Wanamaker A D, Kreutz K J, Borns H W, et al. Experimental determination of salinity, temperature, growth, and metabolic effects on shell isotope chemistry of *Mytilus edulis* collected from Maine and Greenland. *Paleoceanography*, 2007, 22: 2217—2229
 - 33 Gillikin D P, Lorrain A, Meng L, et al. A large metabolic carbon contribution to the $\delta^{13}\text{C}$ record in marine aragonitic bivalve shells. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 2936—2946
 - 34 McConnaughey T A, Burdett J, Whelan J F, et al. Carbon isotopes in biological carbonates: Respiration and photosynthesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 611—622
 - 35 Jiao S, Tao Z, Gao Q, et al. Stable isotopic composition of riverine dissolved inorganic carbon of the Xijiang River Inner Estuary. *J Geogr Sci*, 2008, 18: 363—372
 - 36 Welch K J, Joy J E. Growth rates of the Asiatic clam, *Corbicula fluminea* (Müller), in the Kanawha River, West Virginia. *Freshwat Invertebr Biol*, 1984, 3: 139—142
 - 37 Dreier H, Tranquilli J A. Reproduction, growth, distribution, and abundance of *Corbicula* in an Illinois cooling lake. *Illinois Nat Hist Surv Bull*, 1981, 34: 378—393
 - 38 Ituarte C F. Growth dynamics in a natural population of *Corbicula fluminea* (Bivalvia Sphaeriacea) at Punta Atalaya, Rio de la Plata, Argentina. *Stud Neotrop Fauna Environ*, 1985, 20: 217—226
 - 39 Buttner J K, Heidinger R C. Seasonal-variations in growth of the asiatic clam, *Corbicula-fluminea* (bivalvia, corbiculidae) in a southern Illinois fish pond. *Nautilus*, 1980, 94: 8—10