

珠江流域西江、北江河流溶解无机碳及其 稳定同位素组成特征*

焦树林^{1,2}, 高全洲¹, 刘 昆¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;
2. 贵州师范大学地理与生物科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 为了探讨珠江流域西江、北江河流溶解无机碳(DIC)及其稳定同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)特征, 分别于2007年春季和夏季对流域低水期、高水期的西、北江及思贤滘河道 DIC 及其稳定同位素组成进行了实测调查。结合实测河道水体理化参数, 采用碳的稳定同位素示踪技术和多参数相关分析法, 对西、北江流域及其河口的河流 DIC 组成、性质及其碳源汇机制进行了分析。结果表明, 西、北江的河流 DIC 的组成、性质都有明显的差异且存在显著的季节变化。春季, 西、北江的河道 DIC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分别为 $1\,942\ \mu\text{mol/L}$ 、 $1\,637\ \mu\text{mol/L}$ 和 -11.75‰ 、 -12.44‰ ; 而夏季, 西、北江的河道 DIC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分别为 $1\,986\ \mu\text{mol/L}$ 、 $1\,383\ \mu\text{mol/L}$ 和 -13.03‰ 、 -12.77‰ 。河道 DIC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的这种差异反映出西、北江流域结构特性对 DIC 侵蚀、输移的显著影响。夏季汛期, 流域的高温多雨环境致使大量有机质汇入河道、强烈分解、释放大量的轻碳, 使得西、北江河道 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 都低于春季; 由于汛期高温和径流的共同作用使得北江 DIC 远远小于春季, 而西江 DIC 却略高于春季。思贤滘水道的 DIC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 受西、北江来水的控制发生季节变化。

关键词: 河流溶解无机碳; 稳定同位素组成; 珠江流域

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)02-0099-07

Riverine DIC and Its $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of the Xijiang and the Beijiang tributaries in the Pearl River Basin, South China

JIAO Shulin^{1,2}, GAO Quanzhou¹, LIU Kun¹

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Geography and Biology, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to research the characteristics of the riverine DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of the Xijiang and the Beijiang tributaries in the Pearl River, investigations were carried out in the spring and summer 2007, corresponding to the low flow and high flow periods, respectively. The riverine DIC and its sources in the Xijiang, Sixianjiao and the Beijiang tributaries were analyzed by using tracing technique of carbon stable isotopic composition and physicochemical parameters. The research shows that there are striking variations in the properties of riverine DIC with seasonal changes of runoffs. The concentrations of DIC in the Xijiang River and the Beijiang River are $1\,942\ \mu\text{mol/L}$ and $1\,637\ \mu\text{mol/L}$, respectively, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values are -11.75‰ and -12.44‰ , respectively, in spring, while the concentrations of DIC in the Xijiang River and the Beijiang River are $1\,986\ \mu\text{mol/L}$ and $1\,383\ \mu\text{mol/L}$, respectively, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values are -13.03‰ and -12.77‰ , respectively, in summer. The variations of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ are consistent with the basin characteristics impacting the weathering and transporting of DIC in the Xijiang and

* 收稿日期: 2008-05-26

基金项目: 中国水利水电科学研究院开放研究基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目(40671027, 40471120);
广东省自然科学基金资助项目(7003669)

作者简介: 焦树林(1969年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 高全洲; E-mail: eesgqz@mail.sysu.edu.cn

the Beijiang tributaries. The concentrations of DIC are slightly higher and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values are much lower in summer than in spring in the Xijiang tributary. The concentrations of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in summer are slightly lower than those in spring in the Beijiang tributary. This result from organic matter decomposition, higher temperature and the dilution of high water flow. The DIC concentrations and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Sixianjiao water way were controlled by the discharge of the Xijiang River and the Beijiang tributaries.

Key words: riverine dissolved inorganic carbon; carbon stable isotopic composition; the Pearl River basin

随着 LOZIC 计划的实施, 珠江三角洲水网的陆海作用开始得到重视。河网区域河流碳的行为规律研究逐渐展开, 研究工作正在从河口的海洋端^[1-5]和三角洲入网河流的顶点端^[6-15]两个方向, 向河网区推进^[16-18]。西北江三角洲面积 8033 km², 约占珠江三角洲总面积的 93.4%, 是珠江三角洲的主体。三水、马口两站是西、北江三角洲地区的顶点, 其实测资料分别代表了西江和北江流域的水文及水化学特性, 是研究西、北江三角洲河网区域碳的陆—海作用的背景资料。位于北江下游的三水站和位于西江下游的马口站通过思贤滘水道相连(图1), 其滘口水道的水流方向因西、北江来水的不同而变化, 其水道水体的性质随西、北江径

流量的变化而变化^[19]。该区域的碳行为规律是研究西、北江水体碳行为特征及其入网后变化规律研究的基础。本文利用稳定碳同位素示踪技术结合实测的水体理化参数, 分析西、北江及其滘口河道水体溶解无机碳的时空变化特征及其源汇规律。

1 研究区域概况

珠江流域是由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河等四个水系所组成的复合流域。西江和北江在广东省三门市思贤滘相汇后进一步分汊注入西、北江三角洲水网(图1), 经虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门及崖门等八大口门汇入南海, 素有“诸水汇集、八口入海”之称^[20]。

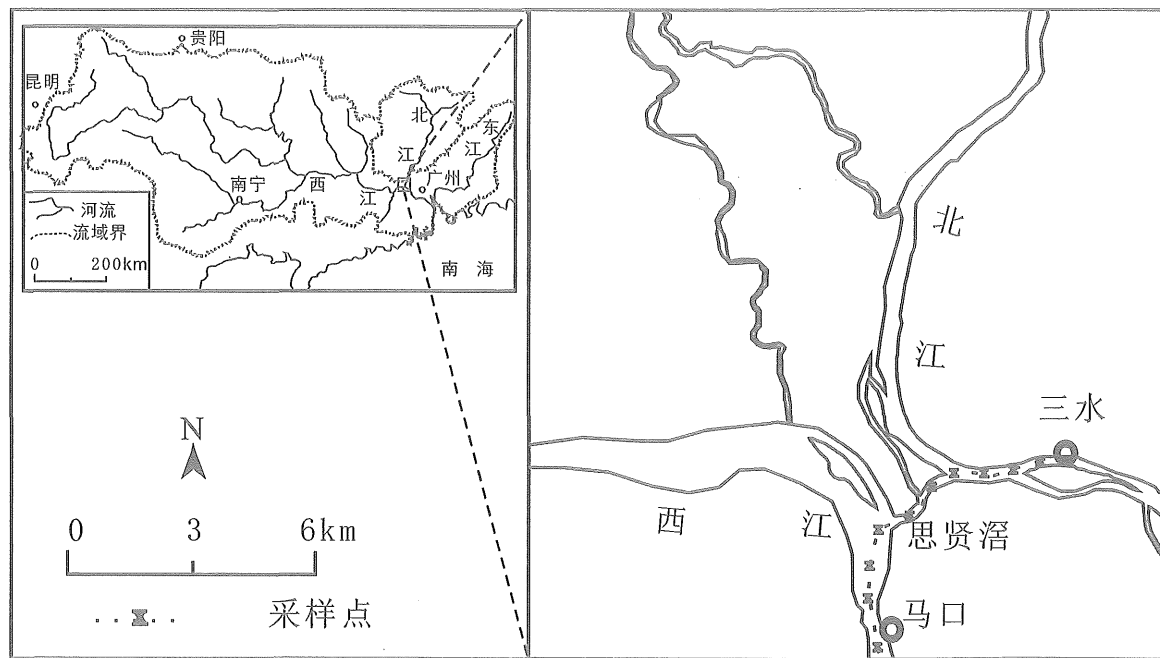


图1 采样点位置示意图

Fig. 1 The sketch of sampling sites

西江是珠江的主流, 发源于云南省曲靖市境内的马雄山, 在广东省珠海市的磨刀门企人石入注南海, 全长 2 214 km, 思贤滘以上河长 2 075 km, 流域面积 353 120 km², 占珠江流域面积的 77.8%, 喀斯特地貌广泛发育。北江是珠江流域第二大支

流, 上游淡水发源于江西信丰县大庾岭石溪湾, 流经广东南雄、始兴、仁化等县, 至韶关与支流武水汇合始称北江; 沿途接纳南水、潏江、连江、滢江、滨江、绥江等支流, 至思贤滘与西江相通, 进入珠江三角洲网河区。思贤滘以上北江干流河长

468 km, 总落差 310 m, 流域面积 46 710 km², 占珠江流域总面积的 10.3%^[20]。

西、北江流域降水量主要集中在 4-10 月份。西江年径流量主要集中在 5-9 月, 约占全年的 71%, 而北江则主要集中在 4-9 月, 约占全年的 76%, 故北江流域比西江流域约提前 1 个月进入汛期。北江流域的径流集中于 4-6 月, 约占全年的 49%, 6 月最高, 约占 18.3%; 西江径流集中于 6-8 月, 约占全年的 50%, 7 月最高, 约占 18%^[20]。

根据上述西、北江流域的水文特点, 选取流域主汛期前的 3 月下旬、汛期的 6 月下旬进行采样实测, 分别作为研究流域低水期和高水期的河道溶解无机碳 (DIC) 的典型代表。通过采样分析, 以揭示西、北江在洪、枯水期的河道溶解无机碳的组成性质及其稳定同位素组成特征。

2 样品的采集与处理

2.1 采样过程

春季采样时间为 2007 年 3 月 23 日, 起始点位于马口水文站下游的金马大桥附近 (23.093°N, 112.805°E), 时间为上午 11:05。夏季的采样时间为 2007 年 6 月 25 日, 起始点位于马口水文站下游的金马大桥附近 (23.088°N, 112.810°E), 时间为上午 11:08。两次采样都使用采样船沿西江主河道逆水而上, 经思贤滘水道直达三水的西南镇码头 (如图 1), 沿途采集河道表层水样并用 GPS 确定采样点位置。

2.2 数据的采集与计算处理

两次采样都沿金马大桥—思贤滘—西南码头的线路进行 (如图 1), 利用 GPS 记录每次采样点 (n) 的经、纬度坐标和时间, 再根据地理坐标计算第 n 采样点的航程 (D_n)。根据船的航距, 每隔一段时间, 采集表层水样, 并按早上 6:00 起计算水体接受日照的时间 (DS)。水样观测时, 采用现场取水过滤后马上用待测水样冲洗仪器探头三次后再进行观测读数, 每个样品连续观测三次取其均值。水样的各理化参数的测算过程如下: 水样的 pH 值、水温 (T)、电导率 (Cond)、总溶解固体物含量 (TDS) 和氧化还原电位 (ORP) 使用 Myron L. Company 生产的 Ultrameter II (6P) 仪器现场测得。水样的碱度 (ALK) 采用稀盐酸滴定法获取, 具体过程如下: 取过滤了的 100 cm³ 水样, 用预先标定的标准稀盐酸溶液滴定, 直到 pH < 3.9 为止, 记下所加入的标准稀盐酸溶液的体积及其对

应的 pH 值, 计算水样的总碱度。根据 pH 值、碱度以及与温度相关的碳酸盐平衡体系的反应常数 K_1 、 K_2 和 K_{CO_2} , 计算水体 DIC 各组分的摩尔浓度。利用河道碳酸盐平衡体系中的碱度、温度和 pH 值为参数计算水中 CO₂ 分压^[21-23]。

采用“直间沉淀法”采集 $\delta^{13}C_{DIC}$ 样品, 具体过程如下: 先将 600 mL 聚乙烯瓶用滤过的水样洗刷 3 次后, 先加入 300 mL 左右经过过滤的水样, 再加入适量预先配制的 NaOH 溶液使得加满水样后 pH 值大于 12, 然后加入适量的 BaCl₂ 粉末, 最后再加满水样密封, 低温避光带回实验室处理。带回实验室的水样, 在 4 °C 低温下静置 24 h 后, 快速过滤、烘烤、再在 850 °C 的马弗炉烘烤 8 h 去除有机杂质得到不纯的 BaCO₃ 样品, 整个过程尽量避免大气 CO₂ 的混入。经上述处理过的样品采用不纯碳酸盐的碳氧同位素分析方法进行测试^[24]。全部 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室进行。碳氧同位素值均相对于国际通用的 V-PDB 标准, 测得的 $\delta^{13}C_{DIC}$ 、 $\delta^{18}O_{DIC}$ 结果均为千分比单位 (‰), 其外部精度分别是 $\delta^{13}C$ 好于 0.05‰、 $\delta^{18}O$ 好于 0.08‰。

3 结果与讨论

3.1 水体理化参数分析

西、北江水体理化参数具有明显的差异, 不但同一采样季节沿河道的空间差异明显, 而且高、低水期水体理化的季节差异也较大。主要表现在春季西江河道的 Cond、TDS、ALK 和 t 明显高于北江, 思贤滘与北江相似 (表 1); 夏季西江河道的 Cond、TDS 和 ALK 明显高于北江, 水体温度差异不大, 思贤滘水体理化参数与西江水体相近 (表 1, 图 2)。

在春季, 西江河道的 Cond、TDS、ALK 和 t 的平均值分别为 234 $\mu S/cm$ 、159.7 mg/L、1 848.5 $\mu mol/L$ 和 18.9 °C, 明显高于北江, 思贤滘水体与北江相似 (表 1)。西、北江理化参数的上述差异表明, 喀斯特面积广泛分布的西江流域, 其 Cond、TDS、ALK 高于喀斯特面积分布相对较少的北江流域, 尤其是西、北江流域的碱度差异明显表征了喀斯特流域碳酸盐岩的溶蚀作用对 Cond、TDS 的重要影响。思贤滘的水体理化特征反映滘口水道在春季主要受北江水体的影响, 表现为北江水体向西流动的过程中与高浓度 TDS 的西江水体混合作用使得水体碱度由靠近北江端的 1 522.10 $\mu mol/L$ 逐渐

过渡为西江端的 $1\,768.15\ \mu\text{mol/L}$ (图 2)。另外,从河道水体的氧化还原电位来看,思贤滘 ($108\ \text{mV}$) 和西江水体的氧化还原电位 ($107\ \text{mV}$) 比北江水体的平均值略小 (表 1), 其主要原因在于西江的采样时间早于北江、水体接受日照的时间较短, 水体光合作用及其复氧程度不高。

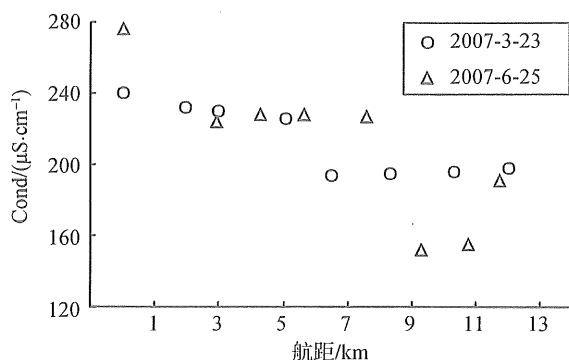


图 2 2007 年春、夏季西、北江水体电导率

Fig. 2 The conductivity of riverine surface water in the Xijiang and the Beijiang tributaries in the spring and summer, 2007

表 1 2007 年 3 月 23 日 (春季) 和 6 月 25 日 (夏季) 西、北江河道水体理化参数的平均值

Table 1 The average values of physicochemical parameters of riverine surface water of the Xijiang and the Beijiang on the 23 Mar and 25 Jun 2007, respectively

季节	河段	t °C	Cond ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH	ORP mV	ALK ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
春季	西江	18.6	234	159.7	7.5	107	1812
	思贤滘	17.3	210	143.2	7.6	108	1645
	北江	17.1	196	133.7	7.5	112.3	1520
夏季	西江	30.4	243	151.3	7.8	12.67	1917
	思贤滘	29.6	227	151.8	7.8	-22.5	1936
	北江	30.2	166	109.4	7.7	33.33	1324

从理化参数的季节变化来看, 夏季河道水体温度明显大于春季, pH 略大于春季。由于高水期径流的冲淡稀释作用与流域高温高湿的溶蚀加剧共同作用, 夏季河道 TDS 略低于春季; 又由于水体温度对电导率的影响出现 Cond 却略高于春季 (表 1)。夏季河道有机质的氧化分解消耗大量的溶解氧, 使得夏季河道水体的 ORP 大大低于春季。

3.2 溶解无机碳的变化

河道水体中的碳主要包括溶解无机碳、颗粒无机碳 (PIC)、溶解有机碳 (DOC) 和颗粒有机碳 (POC) 4 种形态, 它们的性质及其来源和去向各不相同。在河流碳循环中, 它们相互转化并与河道系统碳的输移和交换活动相联系, 参与地球系统的碳循环。河道水体 DIC 不仅是河流碳输出通量的

在夏季, 西江水体理化参数与思贤滘相近, 其河道的 Cond、TDS 和 ALK 比北江要高, 其中, 西江 ALK 比北江 ($1\,324\ \mu\text{mol/L}$) 高出约 $600\ \mu\text{mol/L}$ 。从采样实际来看, 夏季, 正值珠江流域的主汛期, 思贤滘水体主要受西江水体控制, 使得思贤滘水体的理化性质与西江相近, 表现为很高的 Cond、TDS 和 ALK (表 2, 图 2)。夏季, 西、北江及思贤滘河道水体的温度和 pH 的差异不大, 说明 6 月 25 日采样期间, 珠江流域已全面进入主汛期, 全流域处于高温高湿的环境中, 河道水体的温度差异不大。思贤滘河道水体的 ORP ($-22.5\ \text{mV}$) 明显低于西江和北江 (表 1), 反映出思贤滘作为联结西江和北江的水道, 水流速度较慢, 大量有机质在夏季高温的条件下, 氧化分解释放二氧化碳、消耗溶解氧, 而西北江相对来说水流速度快, 水体复氧和二氧化碳排放速度较快, 其 ORP 相对较高, 但比起春季来说要低很多 (表 1)。

主要组分, 约占 45% 左右^[25], 而且是联系河道系统其它碳组分的重要环节, 在河流碳循环研究具有十分重要的意义。

通过对西、北江流域河道水体 DIC 的调查分析, 西、北江流域河道水体的 DIC 组成都以碳酸氢根离子为主, 其次为溶解二氧化碳, 碳酸根离子含量极少, 其西、北江 DIC 的各组成比例有一定的差异 (表 2)。因西、北江流域的结构特征不同, 河流 DIC 的来源存在差异, 导致其水体 DIC 的性质存在较大的区别。西江的 DIC 浓度比北江高, 且夏季比春季差异更大, 其中, 夏季西江河流 DIC 比北江约高出 $600\ \mu\text{mol/L}$, 春季约高出 $300\ \mu\text{mol/L}$ (表 2)。另外, 从西、北江流域河道 DIC 浓度的季节变化来看, 春季西江河道的 DIC 浓度与夏季

相差不大；而北江的 DIC 浓度春、夏之间的季节差异较大，其春季的浓度比夏季约大 250 $\mu\text{mol/L}$ 。由于春、夏季节的水体来源不同，思贤滘河道水体 DIC 同样表现出明显的季节差异（表 2，图 3）。

从 TDS 与 DIC 的关系来看，西江总溶解固体物浓度夏季比春季低 8.4 mg/L 而 DIC 却增加了 44 $\mu\text{mol/L}$ ，其 DIC/TDS 的比值提高了 1.04 个百分点，而北江夏季的 DIC/TDS 的比值（12.64%）比春季（12.24%）仅提高了 0.4 个百分点，说明夏季的高温不仅加速了流域有机质的氧化分解，而且大大促进了流域碳酸盐岩的溶蚀输出，使得西江比北江河道溶解无机碳占 TDS 的比例增加较大。

3.3 DIC 稳定同位素组成的季节差异

自然界不同来源的碳具有不同的稳定同位素组成，人们经常利用碳的稳定同位素组成的这种示踪

作用来判断碳的来源和运移规律。河流 DIC 稳定同位素组成往往用来示踪 DIC 的源、汇规律，揭示河流系统碳的输移转换机制。西江下游梧州至马口河段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 介于 -14.75‰ ~ -8.25‰ 之间，年平均值为 -11.32‰ [26]，而马口以下至磨刀门河口段的河道 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的春季 -12.44 ~ -10.82‰ 之间，平均 -11.71‰ ，而夏季介于 -16.57 ~ -12.78‰ 之间，平均 -13.91‰ ，具有显著的时空差异 [17]，表明西江河口段河流 DIC 较上游变轻，下游河道有机质的氧化分解是 DIC 的重要来源之一。西江和北江水体的理化参数及其 DIC 的浓度具有明显的差异，而且这种差异随季节变化，导致西、北江河道 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 出现明显的时空差异（表 2，图 3）。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的这种时空差异可以反映出河道 DIC 的源、汇规律。

表 2 2007 年 3 月 23 日和 6 月 25 日西、北江河道各种形态 DIC 及其同位素组成的平均值
Table 2 The average values of the concentration of the DIC concentrations content and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of the Xijiang River and the Beijiang tributaries on the 23 Mar. and 25 Jun. 2007, respectively

季节	河段	$[\text{CO}_2]$	$[\text{HCO}_3^-]$	$[\text{CO}_3^{2-}]$	DIC	p_{CO_2}	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	$\delta^{18}\text{C}_{\text{DIC}}$
		$(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$				Pa	(‰)	
春季	西江	128	1 812	$4\text{E}-13$	1 942	313	-11.75	-27.61
	思贤滘	109	1 645	$4\text{E}-13$	1 757	257	-12.84	-27.55
	北江	115	1 520	$3\text{E}-13$	1 637	268	-12.44	-28.52
夏季	西江	62	1 917	$6\text{E}-13$	1 986	215	-13.03	-29.84
	思贤滘	60	1 937	$6\text{E}-13$	2 004	203	-12.77	-31.52
	北江	54	1 325	$4\text{E}-13$	1 383	186	-12.77	-30.45

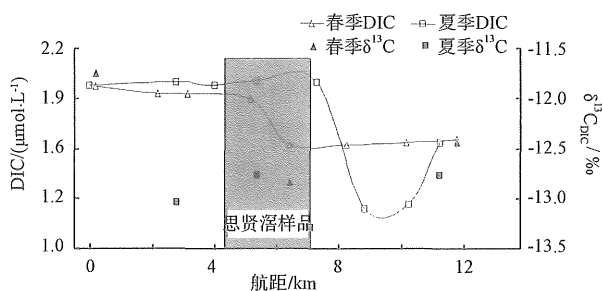


图 3 西、北江溶解无机碳及其稳定同位素时空变化

Fig. 3 The spatio-temporal variations of DIC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Xijiang and Beijiang tributaries

从春季采样的结果来看，北江和思贤滘河道水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的值分别为 -12.44‰ 、 -12.84‰ 明显低于西江 (-11.75‰)（表 2，图 3）。这反映出春季西、北江流域河道 DIC 具有显著的有机源特征，亦即，河道 DIC 有相当大的一部分来源于河流有机碳的氧化分解作用，因为源于碳酸盐岩石溶蚀作

用的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的值较重。同时也反映出，西江强烈的喀斯特溶蚀作用对河道 DIC 的贡献率比北江大，因为喀斯特作用对碳酸盐岩的溶蚀作用给河道注入大量的重碳，使得 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的值变大，出现春季北江 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值明显低于西江的现象（表 2，图 3）。同时，由于春季思贤滘河道水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 略低于北江，明显低于西江，反映出春季思贤滘水体主要受北江来水的控制。这与上述理化参数的变化特征反映出来的规律相一致，使得春季思贤滘水道 DIC 具有北江来水的性质。

夏季，珠江流域全面进入主汛期，全流域处于高温多雨的湿热环境中，流域有机质随径流大量汇入河道系统，并在河道碳的输移过程中不断氧化分解释放大量轻碳；同时，夏季，河道 p_{CO_2} 的平均值介于 186 ~ 215 Pa 之间是大气的 5 倍左右，虽然低于春季的平均值，但由于夏季河道水流速度快、水-气界面的 CO_2 扩散加剧，河道通过水-气界面向大气排放大量二氧化碳气体，使得西、北江河道

水体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值差异不大, 分别为 -13.03‰ 、 -12.77‰ , 明显低于春季。从上述 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 数据来看: 夏季温度较高, 有机质分解强烈, 西、北江的碳稳定同位素组成较枯水期的春季来说, 明显地受到了河道有机质氧化分解来源的控制。从河道 DIC 浓度及其输出通量来看: 北江流域, 夏季丰富的降水 and 高温环境, 使得流域无机碳的侵蚀输出量增大, 但由于丰水期河道径流的冲淡稀释作用, 使得北江河道 DIC 的浓度低于春季; 而对于喀斯特特别发育的西江流域, 夏季的高温多雨加剧了流域碳的侵蚀以及有机碳向无机碳的转化速度, 使得流域无机碳的侵蚀输出量增大, 但是丰水期的河道径流冲淡稀释作用并没有使得河道 DIC 的浓度低于枯水期的春季, 而是略高于春季(表2, 图3)。这反映出西、北江流域无机碳的输出特性对流域温度和降水的反应存在较大的差异, 这种差异与流域的物质组成特性密切相关。

上述分析表明: 夏季, 西江河道 DIC 的浓度略高于春季、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值低于春季而北江河道 DIC 的浓度略低于春季、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值低于春季的无机碳侵蚀输出差异说明了西、北江流域结构对高温多雨环境的反应规律存在明显的差异。

4 结 论

通过上述西、北江流域入网河道 DIC 的特征分析, 认为西、北江流域的结构特征影响了河道 DIC 的输移特性, 从而使得其入网河道水体的 DIC 浓度及其稳定同位素组成具有明显的差异, 且这种差异随流域水文情势的不同而变化, 具体表现如下:

(1) 由于西、北江流域特征的不同, 使得西江河道的 Cond、TDS 和 ALK 明显高于北江, 而思贤滘的水体理化特性受西、北江来水的控制出现季节性的更换。

(2) 西江河道 DIC 浓度比北江高且夏季比春季差异更大, 西江河道 DIC 浓度的春、夏季节差异 ($44\text{ }\mu\text{mol/L}$) 远远小于北江的春、夏之间的季节差异 ($250\text{ }\mu\text{mol/L}$)。

(3) 春季, 由于喀斯特作用的差异, 北江的 DIC 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值明显低于西江; 夏季, 流域高温多雨的环境下, 河道有机碳强烈分解和排放以及径流的冲淡稀释作用, 使得西、北江河道水体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值略低于春季且差异不大, 同时 DIC 浓度却是西江略高于春季、北江略低于春季。

参考文献:

- [1] 韩舞鹰, 林洪瑛. 珠江口的碳通量与碳循环[J]. 海洋学报, 1992, 14(1): 56-63.
HAN Wuying, LIN Hongying. The carbon fluxes and the carbon cycle of the Estuary of the Zhujiang River[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(1): 56-63.
- [2] 韩舞鹰, 林洪瑛, 蔡艳雅. 南海的碳通量研究[J]. 海洋学报, 1997, 19(1): 50-54.
HAN W Y, LIN H Y, CAI Y Y. A study on the carbon fluxes of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(1): 50-54.
- [3] ZHAI W, DAI M, CAI W J, et al. The partial pressure of carbon dioxide and air-sea fluxes in the Northern South China Sea in spring, summer and autumn[J]. Marine chemistry, 2005, 96: 87-97.
- [4] ZHAI W, DAI M, CAI W J, et al. High partial pressure of CO_2 and its maintaining mechanism in a subtropical estuary, the Pearl River estuary[J]. China Marine Chemistry, 2005, 93: 21-32.
- [5] DAI Minghan, GUO Xianghui, ZHAI Weidong, et al. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River Estuary during a winter drought[J]. Marine Chemistry, 2006, 102: 159-169.
- [6] 高全洲, 沈承德. 河流碳通量与陆地侵蚀研究[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 369-375.
GAO Quanzhou, SHEN Chengde. Riverine carbon flux and continental erosion[J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(4): 369-375.
- [7] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 西江流域的有机碳侵蚀通量[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 639-645.
GAO Quanzhou, SHEN Chengde, SUN Yanmin, et al. The organic carbon weathering fluxes in Xijiang River Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 639-645.
- [8] GAO Quanzhou, TAO Zhen, SHEN Chengde, et al. Riverine organic carbon in the Xijiang River (South China): seasonal variation in content and flux budget[J]. Environmental Geology, 2002, 41(7): 826-832.
- [9] GAO Quanzhou, TAO Zhen, XIE Meiqi, et al. Effects of hydrological processes on the chemical composition of riverine suspended sediment in the Zhujiang River, China[J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 2365-2373.
- [10] 高全洲, 陶贞. 河流有机碳的输出通量及性质研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 1000-1002.
GAO Quanzhou, TAO Zhen. Advances in studies on transported flux and properties of riverine organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 1000-1002.

- [11] 魏秀国, 沈承德, 孙彦敏, 等. 珠江水体中 POC 稳定同位素分布特征[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 471 - 476.
WEI Xiuguo, SHEN Chengde, SUN Yanmin, et al. Characteristic of the organic carbon - isotope composition and contribution of suspended matter in the Pearl River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(4): 471 - 476.
- [12] 陶贞, 高全洲, 姚冠荣, 等. 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5): 769 - 795.
TAO Z, GAO Q Z, YAO G R, et al. The sources, seasonal variation and transported fluxes of the riverine particulate organic carbon of the Zengjiang River, Southern China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(5): 789 - 795.
- [13] GAO Quanzhou, TAO Zhen, YAO Guanrong, et al. Elemental and isotopic signatures of particulate organic carbon in the Zengjiang River, southern China [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(10): 1318 - 1327.
- [14] YAO Guanrong, GAO Quanzhou, WANG Zhengang, et al. Dynamics of CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China [J]. Science of the Total Environment, 2007, 376: 255 - 266.
- [15] 魏秀国, 沈承德, 孙彦敏, 等. 珠江水体悬浮物碳稳定同位素组成与流域土壤侵蚀研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 151 - 157.
WEI Xiuguo, SHEN Chengde, SUN Yanmin, et al. The study of stable carbon isotope composition of riverine suspended matter and soil erosion of the Pearl River Drainage Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 151 - 157.
- [16] 焦树林, 刘昆, 高全洲. 西江河口段秋季表层水体 CO₂ 分压的变化特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 356 - 361.
JIAO Shulin, GAO Quanzhou, LIU Kun, et al. Variation of p(CO₂) in the surface water along the waterway of the Xijiang River inner estuary in fall [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(2): 356 - 361.
- [17] 焦树林, 陶贞, 高全洲, 等. 西江河口段溶解无机碳稳定同位素组成的时空变化[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 553 - 560.
JIAO Shulin, TAO Zhen, GAO Quanzhou, et al. Spatio-temporal variation of the stable isotopic composition of riverine dissolved inorganic carbon of the Xijiang River Inner Estuary [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 553 - 560.
- [18] JIAO Shulin, TAO Zhen, GAO Quanzhou, . Spatio-temporal variation of the stable isotopic composition of riverine dissolved inorganic carbon of the Xijiang River Inner Estuary [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 363 - 372.
- [19] 罗宪林, 杨清书, 贾良文, 等. 珠江三角洲河网河床演变[M]. 广州: 中山大学出版社, 2002: 213.
- [20] 珠江志编委. 珠江志第一卷[Z]. 广州: 广东科技出版社, 1991, 104 - 142; 186 - 191.
- [21] CLARK I D, FRITZ P. Environmental Isotopes in Hydrogeology [M]. New York: Lewis Publishers, 1997: 328.
- [22] 聂麦茜, 吴蔓莉编. 水分析化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 43 - 77.
- [23] 刘再华, DREBORDT W. 岩溶作用动力学与环境 [M]. 北京: 地质出版社, 2007: 642.
- [24] 邓文峰, 韦刚健, 李献华. 不纯碳酸盐碳氧同位素组成的在线分析[J]. 地球化学, 2005, 34(5): 495 - 500.
DENG Wenfeng, WEI Gangjian, LI Xianhua. Online analysis of carbon and oxygen isotopic composition of impure carbonate [J]. Geochemica, 2005, 34(5): 495 - 500.
- [25] MEYBECK M. Riverine transport of atmospheric carbon: Sources, global typology and budget [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1993, 70: 443 - 463.
- [26] 姚冠荣. 西江溶解无机碳变异时空特征及其物源的同位素示踪[D]. 广州: 中山大学, 2007.