

## 嘉陵江梯级水库群溶解无机碳同位素的时空变化特征

李晓东<sup>1</sup>, 刘小龙<sup>2</sup>, 杨周<sup>1,3</sup>, 李亲凯<sup>1,3</sup>, 黄俊<sup>1,3</sup>

(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. 天津师范大学 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 以嘉陵江流域及其梯级开发河段为研究对象, 通过在 2008 年 8 月(雨季)及 2009 年 2 月(旱季)进行密集采样, 分析测定了河水中溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)含量及其同位素组成, 探讨了河水中 DIC 的来源及其季节与空间变化特征。结果表明: 嘉陵江河水 DIC 及其同位素  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成的平均值, 雨季时为 2 018  $\mu\text{mol/L}$  和  $-8.6\%$ , 旱季时为 3 150  $\mu\text{mol/L}$  和  $-6.0\%$ , 二者均存在显著的季节变化; 嘉陵江水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的值旱季(枯水期)高于雨季(丰水期), 与自然河流的季节变化特征相似, 而与水库、湖泊不同, 表明嘉陵江梯级水库群水体“湖沼学反应”并不明显。

**关键词:** 嘉陵江; 溶解无机碳同位素; 梯级水库; 时空变化

**中图分类号:** X 142

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-2861(2015)03-0286-08

## Spatial and seasonal variation of dissolved inorganic carbon isotope compositions in the cascade reservoirs of the Jialing River

LI Xiao-dong<sup>1</sup>, LIU Xiao-long<sup>2</sup>, YANG Zhou<sup>1,3</sup>, LI Qin-kai<sup>1,3</sup>, HUANG Jun<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Jialing River and its cascade reservoirs were investigated. Widesely collected water samples along the Jialing River in August 2008 (rain season) and February 2009 (dry season). We determine the contents and isotopic compositions of dissolved inorganic carbon (DIC), and discuss the sources and spatio-temporal variations of DIC. The results show that the average DIC and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  were 2 018  $\mu\text{mol/L}$  and  $-8.6\%$  in a rainy season, and 3 150  $\mu\text{mol/L}$  and  $-6.0\%$  in a dry season, showing obvious seasonal variations. The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  values in winter were heavier than in summer, similar to undammed rivers but different from lakes and reservoirs. This indicates that the hydro-geochemical characteristics of waters in the cascade reservoirs of Jialing River are similar to natural rivers

收稿日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41373136, 40703004)

通信作者: 李晓东(1973—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为环境地球化学. E-mail: lixiaodong@vip.skleg.cn

rather than traditional reservoirs.

**Key words:** the Jialing River; dissolved inorganic carbon isotope; cascade reservoir; spatial and seasonal variation

河流是连接陆地和海洋生态系统的桥梁,河流的营养元素(C, N, P, Si等)输送对海洋水生生态系统具有极其重要的意义<sup>[1-3]</sup>. 近一个世纪以来,人类活动强烈影响着河流营养元素物质的迁移转化与输送. 除了污染物输入外,水利大坝的修建对河流系统的扰动最为显著而广泛<sup>[4-7]</sup>. 河流筑坝影响了水、沉积物、营养盐、生物群系等的“流动”,导致其水生生态系统逐渐由异养型为主的“河流型”向自养型为主的“湖沼/水库型”演化,从而显著改变了河流营养元素C, N, P, Si的生物地球化学循环过程与输出<sup>[2,6,8-13]</sup>. 碳作为重要的生源要素,在“河流—水库—河流”体系中与其他营养元素的循环、能量流动、二氧化碳动力学以及营养状况等密切相关<sup>[14-16]</sup>. 研究表明,经历不同过程或不同来源的碳具有独特的稳定碳同位素组成,溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)含量及其碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ )的变化能够表征水库水体中光合作用、呼吸作用、有机质氧化分解等生物地球化学过程,这对于探讨河流多次拦截后所形成的梯级水库群的营养元素地球化学行为和生物地球化学特征等具有重要的指示意义<sup>[17-22]</sup>.

嘉陵江是长江水系中流域面积最大的支流. 依据嘉陵江渠化开发规划,在嘉陵江中下游从广元到重庆,计划修建15个梯级航电枢纽,嘉陵江中下游河段已成为完全意义上的梯级开发“蓄水河流”,是研究梯级开发河流中“河流—水库—河流”体系营养元素内在生物地球化学循环过程的最佳“试验体”与“模型地”. 基于此,本工作以嘉陵江流域及其梯级开发河段为研究对象,分析水体溶解无机碳DIC含量及其碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ )的时空变化特征,研究辨识梯级水库内以碳为核心的营养元素主要转化过程及受控要素,以期深刻理解“河流—水库—河流”体系对流域营养元素生物地球化学循环的总体效应.

## 1 嘉陵江流域概况

嘉陵江是长江主要支流之一,发源于陕西省凤县秦岭南麓,自北向南流至重庆市朝天门注入长江. 嘉陵江全长1 120 km,流域面积约16万 $\text{km}^2$ ,平均流量为2 165  $\text{m}^3/\text{s}$ . 流域内主要有嘉陵江干流、渠江、涪江三大水系及干流西岸的支流西汉水和白龙江. 嘉陵江流域属亚热带季风气候,全年降水分配不均,夏秋季长而冬春季短. 嘉陵江上游人口密度相对低,但进入四川盆地后周边人口密度显著升高,中下游区段主要流经四川盆地,人居较多,工、农业生产发达<sup>[23]</sup>. 20世纪末到本世纪初,嘉陵江航电工程逐步展开,计划在中下游共建设15级航电枢纽. 至本工作采样时,已建成金银台、红岩子、新政、金溪、马回、小龙门、东西关、桐子壕等8个航电枢纽. 嘉陵江流域主要位于扬子准地台,上游有地槽褶皱带;地层从元古界至新生界均有出露,以志留系、泥盆系和三叠系、侏罗系、白垩系较为发育;岩性以砂岩、页岩和碳酸盐岩为主,其中四川盆地内广泛分布侏罗纪红色砂岩<sup>[23]</sup>.

## 2 样品采集和分析

河水水样共采集了2次,分别在丰水期(雨季)2008年8月及枯水期(旱季)2009年2月. 沿嘉陵江干流源头至下游大约每间隔50 km设一采样点,从源头(秦岭)至与长江汇合口(重庆朝天门)共采集干流水样23个(编号00~22);在支流西汉水、白龙江、涪江、渠江汇入干流前10~20 km处各设一个采样点. 嘉陵江流域主要水系及干、支流采样点分布见图1.

河水水样主要利用渡船(或桥梁)在断面主流处水下0.5 m采集,现场用HORIBA D54

(日本堀场公司) 便携式水质参数仪测定 pH 值、电导率和温度, 并用 0.02 mol/L 的稀盐酸现场滴定碱度, 结果以  $\text{HCO}_3^-$  (DIC) 含量计算. 用针头式过滤器正压(尽量减少大气  $\text{CO}_2$  混入)缓慢过滤 100 mL 水样于玻璃瓶中, 加入  $\text{HgCl}_2$  毒化剂抑制微生物活动, 不留气泡, 用封口胶 (Parafilm 膜) 密封后盖紧、冷藏, 用于溶解无机碳同位素分析.

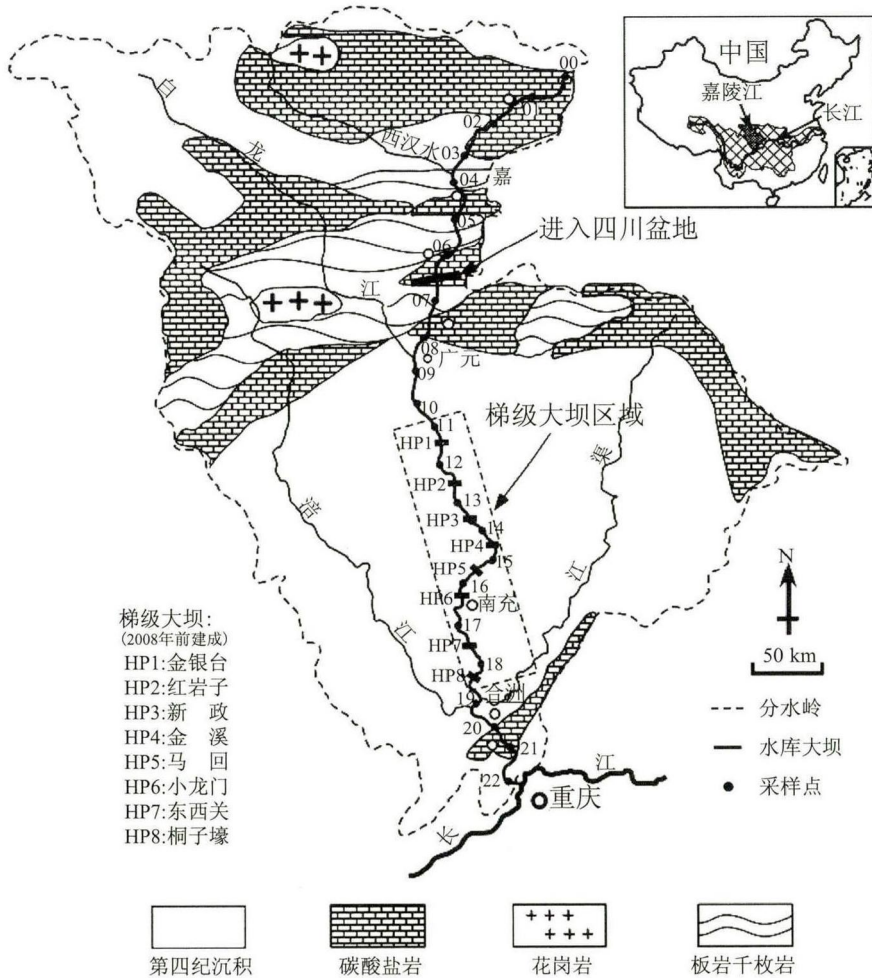


图 1 嘉陵江流域采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the Jialing River

按照 Atekwanae 和 Krishnamurthy 的方法<sup>[24]</sup>在实验室中测定  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ , 具体步骤如下: 将水样注入已抽真空并放有浓磷酸和小磁棒的玻璃瓶中, 水浴  $50^\circ\text{C}$  加热, 经高真空线萃取, 通过冷阱分离, 收集纯  $\text{CO}_2$  气体再用 MAT252 质谱仪测定溶解无机碳同位素值. 测定的值以千分比 (%) 为单位, 以  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  符号表示, 并与国际标准物质 (Pee Dee Belemnite, PDB) 相对应, 具体为

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = [(R - R_{\text{PDB}})/R_{\text{PDB}}] \times 1000 \%, \quad (1)$$

式中,  $R$  为样品的碳同位素比值,  $R_{\text{PDB}}$  为标准的碳同位素比值. 整个流程分析误差为 0.1%.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 水化学一般组成

有关嘉陵江河水主要离子化学组成的时空变化特征我们已经报道<sup>[25]</sup>. 嘉陵江水系河水离子化学组成主要受碳酸盐岩控制, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ , 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 其次是  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ . 嘉陵江干流离子含量受降雨及人类活动的影响较大, 雨季时离子浓度降低, 中游以下区域由于人口密度逐渐增大, 工农业相对发达, 人为排放物增多, 河流中的离子浓度逐渐升高. 综合分析表明, 嘉陵江中的硝酸盐主要来自于农业面源污染, 硫酸盐的增加主要是由当地的干湿酸沉降及工业与生活废水输入引起的.

#### 3.2 溶解无机碳 (DIC) 含量的时空变化特征

河流 DIC 通常包括  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  组分. 嘉陵江河水的 pH 值为 7~8, 总体偏弱碱性, DIC 主要以  $\text{HCO}_3^-$  的形式存在,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  组分含量极少, 因此可以利用现场滴定获得的  $\text{HCO}_3^-$  浓度值代表水体 DIC 含量. 嘉陵江河水中的 DIC 含量和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成在两季节 (夏冬季) 时的沿程分布如图 2 所示.

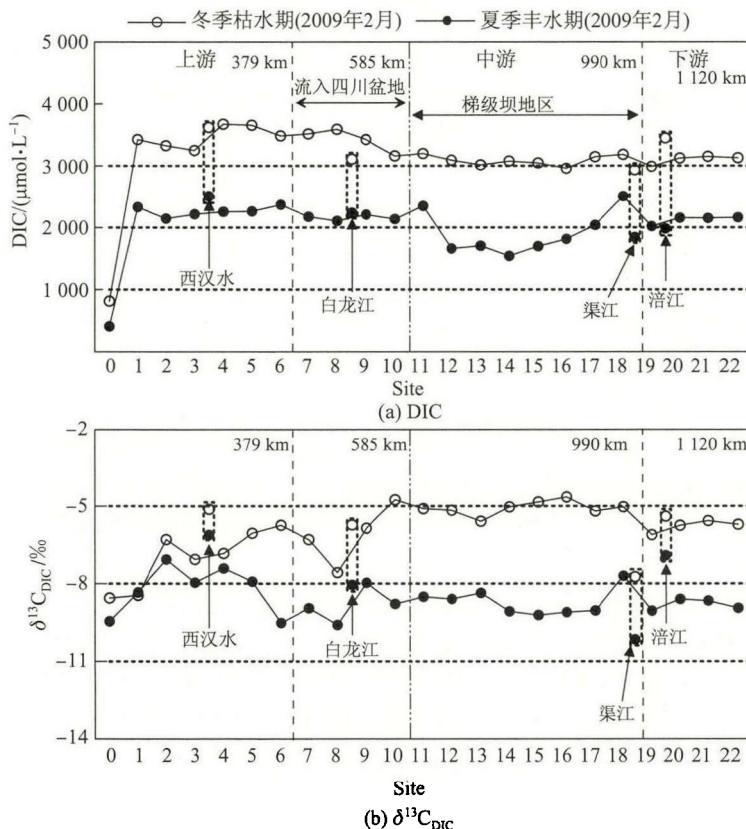


图 2 嘉陵江河水中 DIC 含量和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  两季节的沿程分布

Fig. 2 Spatial and seasonal variations of DIC and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  values in the Jialing River

分析结果表明: 夏季丰水期 (2008 年 7 月) 嘉陵江流域 DIC 含量为 410 ~2 506  $\mu\text{mol}/\text{L}$ , 平均值为 2 018  $\mu\text{mol}/\text{L}$ ; 冬季枯水期 (2009 年 2 月) DIC 含量为 814 ~3 674  $\mu\text{mol}/\text{L}$ , 平均含量为 3 150  $\mu\text{mol}/\text{L}$ . 夏季丰水期 DIC 浓度明显低于冬季, 这主要是因为 5—9 月是嘉陵江

流域的雨季,大量雨水输入产生的稀释作用导致夏季河水中的 DIC 含量降低.刘从强<sup>[26]</sup>对乌江和沅江水系的 DIC 研究表现出相同的季节变化特点,即乌江、舞阳河、清水江 3 条河流的平均 DIC 在冬季枯水期分别为 2 940, 4 250 和 2 230  $\mu\text{mol/L}$ ,而夏季丰水期分别是 2 490, 2 960 和 1 230  $\mu\text{mol/L}$ ,夏季时河流的 DIC 均低于冬季.喻元秀等<sup>[21]</sup>在乌江流域上游新建洪家渡水库的 DIC 研究结果中指出,夏天 DIC 浓度为 1 840  $\mu\text{mol/L}$ ,而冬季为 2 240  $\mu\text{mol/L}$ .同样,对长江三峡水库坝前水体的 DIC 研究也呈现出类似的结果,夏季 DIC 浓度 (2 000  $\mu\text{mol/L}$ ) 小于冬季时的浓度 (2 200  $\mu\text{mol/L}$ )<sup>[27]</sup>.

嘉陵江源头的 DIC 含量在 2 个季节时都明显小于下游 (见图 2(a)). DIC 的形成主要受土壤生物地球化学过程所控制,该过程与岩性、气候、人类的扰动,以及土壤的物理、生物特性如土壤水分、土壤有机质浓度和微生物活动强度有关<sup>[14,16,26]</sup>.嘉陵江源头气温低,人类扰动极少,河水低 DIC 含量 (夏季 410  $\mu\text{mol/L}$ ,冬季 814  $\mu\text{mol/L}$ ) 表明其主要受到岩性和土壤有机质的影响.进入四川盆地后, DIC 含量变化不大;进入梯级水库开发的河段后 DIC 含量均有不同程度的降低.在夏季时河水中的 DIC 含量呈现出先降低后升高的现象,表明了水库的梯级开发对 DIC 有一定的影响.

### 3.3 溶解无机碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ) 的时空变化特征

夏季丰水期 (2008 年 7 月) 嘉陵江流域  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成为  $-9.6\text{‰}\sim-7.1\text{‰}$ , 平均值为  $-8.6\text{‰}$ . 冬季枯水期 (2009 年 2 月)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成为  $-8.6\text{‰}\sim-4.7\text{‰}$ , 平均值为  $-6.0\text{‰}$ . 与 DIC 含量的季节变化特征类似, 夏季丰水期嘉陵江河水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成明显低于冬季 (见图 2(b)), 这一变化特征与天然河流  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成的冬夏季节变化特征表现出一致性. 闫慧等<sup>[28]</sup>对贵州省贵阳市花溪河水溶解无机碳同位素的季节变化进行了研究, 结果表明冬季花溪河水具有较高的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值. 刘从强<sup>[26]</sup>对乌江和沅江水系 3 条河流乌江、舞阳河、清水江的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值测定结果显示, 冬季枯水期分别为  $-7.9\text{‰}$ ,  $-8.4\text{‰}$ ,  $-5.9\text{‰}$ , 而夏季丰水期分别是  $-9.2\text{‰}$ ,  $-9.7\text{‰}$ ,  $-8.7\text{‰}$ , 夏季  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值均低于冬季. 贾国东等<sup>[29]</sup>和焦树林等<sup>[30-31]</sup>的研究证实, 珠江流域西江、北江河流溶解无机碳同位素的组成也存在显著的季节变化, 即夏季  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值变低. 上述结果与乌江梯级水库 (洪家渡水库、东风水库、乌江渡水库)<sup>[20]</sup>和贵州亚高原湖泊 (红枫湖、百花湖)<sup>[22]</sup>表现出的季节变化规律不同. 对上述 3 个水库和 2 个湖泊的研究结果表明, 夏季水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值普遍略高于冬季. 若从空间上分析, 从源头往下河水中的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值波动范围较大, 在进入梯级水库开发的河段后变化较小, 进而先后受支流渠江和涪江的影响,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  的值先降低再升高, 尔后基本保持不变.

河流水体中溶解无机碳的同位素组成主要受以下因素控制: ① 流域碳酸盐岩矿物的风化溶解; ② 流域土壤有机质的分解; ③ 水-气界面  $\text{CO}_2$  交换; ④ 光合作用与呼吸作用<sup>[14,16-17,20,26]</sup>. 一般地, 来源于流域土壤有机质分解形成的 DIC 具有最负的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值, 而流域碳酸盐岩风化形成的 DIC, 其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值最为偏正. 对于水-气界面的  $\text{CO}_2$  交换而言, 大气  $\text{CO}_2$  溶于水形成的 DIC (pH 中性条件下主要为  $\text{HCO}_3^-$ ), 其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值约为  $0\sim 2.5\text{‰}$ <sup>[17,26]</sup>. 淡水中水生生物光合作用主要利用溶解  $^{12}\text{C}-\text{CO}_2$ , 使得剩余水体内的 DIC 富集  $^{13}\text{C}$ ; 呼吸作用使有机质分解释放大量的  $^{12}\text{C}$ , 可以使水体中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值偏负. 在夏季, 嘉陵江进入丰水期, 气温升高, 降雨量增加, 土壤有机质分解速率增加且由此形成的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值偏负的 DIC 随径流进入主河道; 而在冬季, 由于温度降低, 降雨量较少, 土壤有机质分解速率降低, 从土壤进入水体的 DIC 也减少<sup>[27]</sup>. 因此, 夏季丰水期嘉陵江河水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值偏负的主要原因之一, 可能是夏季来自土壤有机质分解的 DIC 对河流总 DIC 的影响要高于冬季.

另外, 在嘉陵江流域, 冬季 (2009 年 2 月采样) 是典型的干凉月份, 河水处于枯水期, 水流

浅而缓, 有利于河水 DIC 与大气 CO<sub>2</sub> 之间建立同位素平衡, <sup>12</sup>C-CO<sub>2</sub> 优先释放进入大气, 从而使河水 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值往正向偏移. 同时, 冬季枯水季节的河水比较清澈, 适于浮游植物生长, 光合作用增强 (或大于呼吸作用), DIC 中的 <sup>12</sup>C 被优先合成为有机质, 从而使河水 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值往正向偏移<sup>[19,29]</sup>. 同样, 这也可以解释嘉陵江河水夏季 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值低于冬季.

### 3.4 梯级水库群中 DIC 与 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 的时空变化特征

与整个嘉陵江流域一致, 从时间变化上, 嘉陵江梯级水库群水体 DIC 含量和 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值均是冬季高于夏季; 但从空间变化上, 其水体 DIC 含量和 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值又呈现出独自的特点 (见图 2). 图 3 为嘉陵江河水中 DIC 和 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 的关系, 其中图 3(b) 只给出了梯级水库群中的 8 个样点. 一般情况下, 水坝的建立不仅打乱了河流的连续性, 也使得河流的水动力条件减弱, 透明度增加, 这为浮游植物的生产创造了有利条件, 造成了水体 DIC 含量的降低 (见图 2(a)), 也使河水 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值升高 (见图 2(b)), 这在嘉陵江的冬季样品中体现得较为明显 (见图 3(b)).

然而, 夏季嘉陵江梯级水库群水体 DIC 含量和 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值的空间变化却比较复杂, 整体趋势表现为随 DIC 含量升高而 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值变正 (见图 3(b)). 梯级水库群处于嘉陵江中游偏下, 天府之国核心区域, 工农业发达, 土壤耕作频繁且强度较大, 随降雨进入河流水体的土壤来源 DIC 的贡献份额增大; 另一方面, 高度发达的工业生产排放的酸性废气 (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) 致使酸雨频率增加<sup>[32]</sup>, 大量酸性降雨到达地表可能参与流域内碳酸盐岩的风化溶解<sup>[33]</sup>, 上述 2 种情况都可能导致梯级水库群水体 DIC 含量的升高. 夏季丰水期水体混浊, 在暂不考虑光合作用与呼吸作用的情况下, 梯级水库群水体 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值的变化, 是流域碳酸盐岩矿物的风化溶解、水-气界面 CO<sub>2</sub> 交换及流域土壤有机质分解共同作用的结果, 前 2 种因素使 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值变正, 后一种因素使其变负. 因而, 空间上夏季水体 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值的升高可能是前 2 种因素所起作用大于后一种.

嘉陵江中游地区地势较为平坦、落差不大 (大多小于 15 m), 且梯级水库的修建多是低坝, 主要是水量调节、农业灌溉和航运的需要, 而水力发电则为辅. 嘉陵江流域水体 DIC 含量和 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 值的季节变化特征, 与诸多自然河流和三峡水库坝前水体表现出一致性<sup>[26-31]</sup>, 而与乌江梯级水库和一些湖泊不相同<sup>[20,22]</sup>. 这可能与嘉陵江梯级水库与乌江梯级水库调度方式、水文条件不同有关, 也可能是因为嘉陵江梯级水库群建坝时间长短不一, 调度频繁, 水库的“湖泊效应”还没有体现出来<sup>[21,27]</sup>.

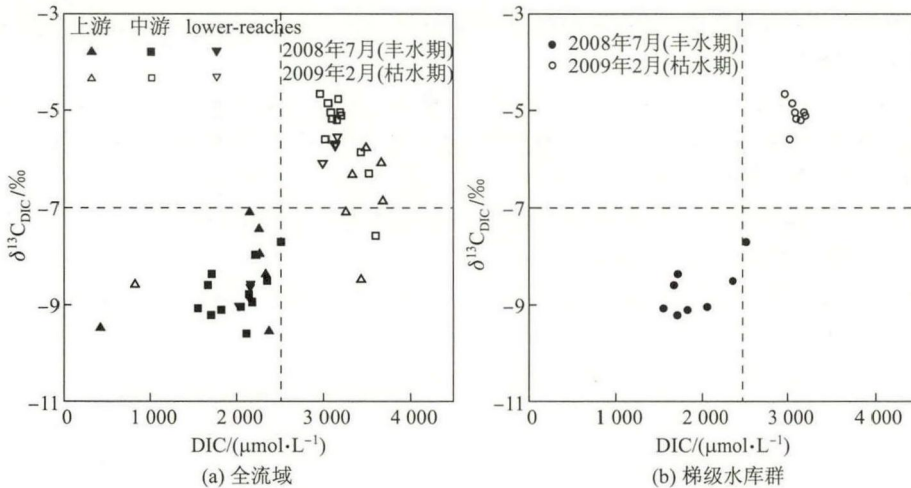


图 3 嘉陵江河水中 DIC 和 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 的关系

Fig. 3 Relationships between DIC and δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> values in the Jialing River

## 4 结束语

对嘉陵江流域及其梯级开发河段水体夏、冬 2 个季节进行采样分析, 研究结果表明嘉陵江河水 DIC 含量及其碳同位素  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成存在显著的季节变化, 均为冬季(枯水期)高于夏季(丰水期)。夏季(丰水期) DIC 浓度明显低于冬季, 主要是因为大量雨水输入产生的稀释作用所致; 丰水期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  组成偏负的主要原因可能是夏季来自土壤有机质分解的 DIC 对河流总 DIC 的影响高于冬季, 同时冬季河水 DIC 与大气  $\text{CO}_2$  之间的同位素交换平衡和光合作用增强, 亦可使河水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  值往正向偏移。这一变化特征与前人研究所证实的自然河流的季节变化特征相似, 而与水库、湖泊不同, 这可能是由于嘉陵江梯级水库群建坝时间长短不一、大坝落差低、水量调度频繁和水文条件不同等因素有关, 综合表明嘉陵江梯级水库群水体“湖沼学反应”并不明显。

## 参考文献:

- [1] MEYBECK M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers [J]. American Journal of Science, 1982, 282(4): 401-450.
- [2] JOSETTE G, LEPORCQ B, SANCHEZ N, et al. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France) [J]. Biogeochemistry, 1999, 47(2): 119-146.
- [3] SYVITSKI J P M, VÖRÖSMARTY C J, KETTNER A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. Science, 2005, 308: 376-380.
- [4] MILLIMAN J D. Blessed dams or damned dams? [J]. Nature, 1997, 386: 325-327.
- [5] ZHANG J, ZHANG Z F, LIU S M, et al. Human impacts on the large world rivers: Would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13: 1099-1105.
- [6] KELLY V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. Hydrological Processes, 2001, 15: 1227-1249.
- [7] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems [J]. Science, 2005, 308(5720): 405-408.
- [8] FRIEDL G, WÜEST A. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming [J]. Aquatic Sciences, 2002, 64(1): 55-65.
- [9] HUMBORG C, BLOMQUIST S, AVSAM E, et al. Hydrological alterations with river damming in northern Sweden: Implications for weathering and river biogeochemistry [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(3): 12-1-12-13.
- [10] 陈庆伟, 刘兰芬, 刘昌明. 筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(5): 578-582.
- [11] 刘丛强, 汪福顺, 工雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 384-396.
- [12] 冉祥滨, 于志刚, 姚庆祯, 等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 614-622.
- [13] 张恩仁, 张经. 三峡水库对长江 N、P 营养盐截留效应的模型分析[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1): 41-48.
- [14] AUCOUR A M, SHEPPARD S M F, GUYOMAR O, et al. Use of  $^{13}\text{C}$  to trace origin and cycling of inorganic carbon in the Rhône river system [J]. Chemical Geology, 1999, 159: 87-105.

- [15] BARTH J A C, VEIZER J. Carbon cycle in St. Lawrence aquatic ecosystems at Cornwall (Ontario), Canada: seasonal and spatial variations [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159: 107-128.
- [16] DAS A, KRISHNASWAMI S, BHATTACHARVA S K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236(1/2): 419-429.
- [17] HÉLIE J F, HILLAIER-MARCEL C, RONDEAU B. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River— isotopic and chemical constraint [J]. *Chemical Geology*, 2002, 186: 117-138.
- [18] WACHNIEW P, RÓŻAŃKI K. Carbon budget of a mid-latitude, groundwater-controlled lake: isotopic evidence for the importance of dissolved inorganic carbon recycling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(12): 2453-2465.
- [19] WANG X F, VEIZER J. Respiration-photosynthesis balance of terrestrial aquatic ecosystems, Ottawa area, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(22): 3775-3786.
- [20] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征 [J]. *科学通报*, 2008, 53(16): 1935-1941.
- [21] 喻元秀, 汪福顺, 王宝利, 等. 溶解无机碳及其同位素组成特征对初期水库过程的响应——以新建水库(洪家渡)为例 [J]. *矿物学报*, 2009, 29(2): 268-274.
- [22] 李干蓉, 刘丛强, 陈椽, 等. 猫跳河流域梯级水库夏-秋季节溶解无机碳 (DIC) 含量及其同位素组成的分布特征 [J]. *环境科学*, 2009, 30(10): 2891-2897.
- [23] 李铁松, 张桥英. 嘉陵江的起源及流域自然环境研究 [J]. *四川师范学院学报 (自然科学版)*, 1996, 20(2): 105-108.
- [24] ATEKWANAE 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]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3/4): 265-278.
- [25] 鲍丽然, 李晓东, 刘小龙. 嘉陵江河水主要离子化学组成的时间和空间变化特征 [J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(4): 35-40.
- [26] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 187-192.
- [27] 吴起鑫, 韩贵琳, 唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无机碳时空分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 654-661.
- [28] 闫慧, 李中轩, 陈杰. 花溪河水溶解无机碳同位素的季节变化 [J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 300-304.
- [29] 贾国东, 陈法锦, 邓文锋. 北江河水溶解无机碳同位素的季节变化 [J]. *地球科学*, 2012, 37(2): 365-369.
- [30] 焦树林, 高全洲, 刘昆. 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 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2009, 48(2): 99-105.
- [31] 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.
- [32] 马丽雅, 王斌, 杨俊国. 四川省酸雨时空分布特征 [J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(4): 26-29.
- [33] LI X D, LIU C Q, LIU X L, et al. Identification of dissolved sulfate sources and the role of sulfuric acid in carbonate weathering using dual-isotopic data from the Jialing River, Southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(3): 370-380.