

# 赣江河水主成分及锶同位素地球化学研究

王海峰<sup>1,2</sup>, 王中良<sup>1</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. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**于2007年11月,系统采集赣江流域枯水期河水样品22个;对其主要离子成份组成和锶同位素比值进行了分析测定,以期获得赣江流域化学风化过程及物质来源信息。研究结果显示,赣江流域河水的离子成分主要来源于硅酸岩和碳酸盐岩两端元混合组成的岩石和土壤的化学风化或溶解,且风化作用在近地表环境中进行。流域水体的化学组成基本代表了典型的硅酸岩地区河流的相应化学组成,显示出与碳酸盐岩地区河流及世界主要河流水化学组成的差异性,如Si、Na、K等含量较高。其次,赣江河水还显示了受人类活动对水体化学组成的影响较大、以及大气CO<sub>2</sub>消耗率较高等特点。

**关键词:**赣江流域;水化学组成;锶同位素;化学风化

**中图分类号:**P592; P595 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2009)04-0326-07

对河流地球化学特征的研究可以获得有关流域化学风化以及化学元素在地球表生系统中循环的相关信息,同时流域风化作用也是全球长期碳循环及与其有关的环境效应的一个重要组成部分。长江是中国第一、世界第三大河,由长江水体和悬浮物携带输送的各类物质组分是全球生物地球化学循环的重要组成部分,对全球环境变化研究有重要意义。目前为止,我国学者对几个大流域的风化过程进行了较多研究,但专门针对典型硅酸岩地区的研究相对薄弱。上世纪80年代初,胡明辉等(1985)根据对我国长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江及鸭绿江等的研究指出:中国河流水的离子组成主要受碳酸盐岩风化作用和蒸发岩溶蚀作用的影响,受铝硅酸岩风化作用的影响较弱。而硅酸岩的风化产物在一定程度上也控制着地表水系的物质组成,因而对硅酸岩区河流地球化学的研究,有助于我们了解硅酸岩地区的化学风化作用与水文地球化学特征的关系,以及控制河流水体组成变化的多种因素。赣江是长江的主要支流之一,在江西省国民经济、生态环境保护和社会生活中占有重要地位。而且更重要的是,赣江流域广泛分布有硅酸岩岩石和土壤,是世界上硅

酸岩连片分布的典型地区之一,具有研究的典型性。本文将重点讨论赣江流域的水化学特征、主要离子来源,并由此来探讨流域主要的化学风化反应。

## 1 样品采集与分析

赣江流域地处中亚热带南缘,是我国亚热带气候条件下发育的花岗岩风化壳的典型代表区域,发育有深厚的红色风化壳。赣南陆壳以重熔型花岗岩岩体较多,岩石类型主要为黑云母(二云母)花岗岩、二长花岗岩等<sup>[1]</sup>。流域绝大部分为富水程度中等或弱的碎屑岩类含水岩组,赣州至万安段有部分变质岩类含水岩组。新干至南昌段主要为岩浆岩类裂隙含水岩,混合少量松散岩类孔隙含水岩。赣江贯穿江西省南北,全长751 km,流域面积达 $8.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,年平均入鄱阳湖水量约 $6.60 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。水系径流的补给属雨水补给型,其径流量与降雨量的变化趋势一致。

研究区为赣江干流及其主要支流,详细采样位置见图1。于2007年11月在赣江流域各支流及干流河道采集22个河水样品(图1)。采样期间河流正处于枯水期,经调查采样前10天以上无降雨过

收稿日期:2009-04-12;改回日期:2009-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(40773011;40721002)资助

第一作者简介:王海峰(1982-),男,硕士研究生,环境地球化学专业。E-mail: wanghaifenghaha@126.com

\* 通讯作者:王中良,研究员,环境地球化学专业。E-mail: zlwang@mails.gyig.ac.cn

程。枯水期河流主要靠地下水补给, 地下水与岩石和土壤的作用较充分<sup>[2]</sup>。现场测定河水的 pH 值、溶解氧(DO)、总溶解性固体(TDS)和电导率(EC)等物理化学参数, 水样通过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜减压过滤, 用于测定阳离子的样品立即加入超纯 HCl, 酸化至 pH < 2, 并在密封、黑暗中保存。用于测定阴离子的样品也密封于暗箱中保存。用浓度较低的 HCl 滴定法分析河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量。在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, 用离子色谱仪测定主要阴离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等)含量, 用 ICP-OES 测定主要阳离子(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)以及 SiO<sub>2</sub>、Sr<sup>2+</sup> 含量。采用高效阳离子树脂分离富集锶元素进行同位素测定, 使用 MC-ICP-MS 进行锶同位素比值分析。各项具体分析测试结果见表 1。

## 2 结果与讨论

### 2.1 赣江河水主离子组成与来源分析

赣江河水 pH 值为 6.68 ~ 7.80, 平均 7.26, 接近中性环境。TDS 平均值为 63.53 mg/L, 低于世界平均值 100mg/L<sup>[3]</sup>。电导率(EC)变化范围为

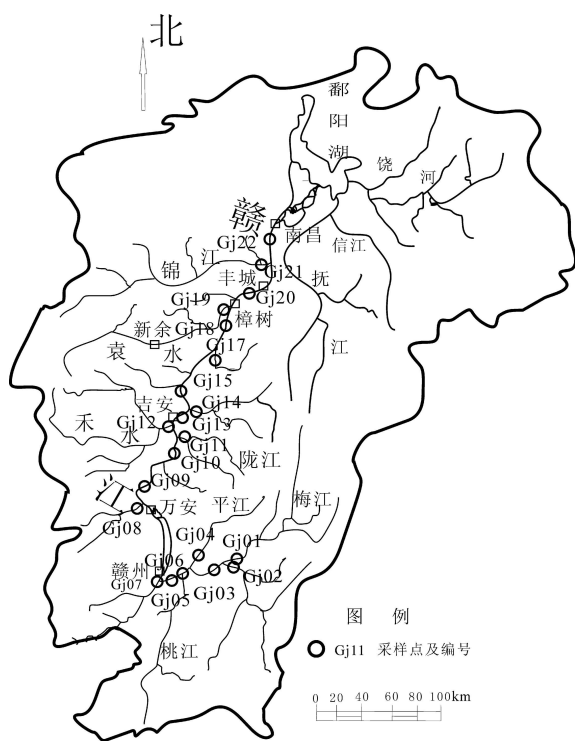


图 1 赣江流域采样点分布

Fig. 1. The map of the Ganjiang River Basin and sampling sites

表 1 赣江河水主要离子及 Sr 同位素组成以及主要物化参数

Table 1. Major ions and Sr isotopic composition and the hydrographic parameters of the Ganjiang river water

样号	EC (μs/cm)	DO (mg/L)	pH	TDS (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Sr <sup>2+</sup> (mg/L)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
GJ01	147.8	9.68	6.84	73.0	12.83	1.84	2.46	11.87	14.1	32.0	21.26	6.36	3.73	27.1	0.7216
GJ02	79.8	9.18	7.20	40.3	10.99	1.46	1.88	3.57	13.7	37.4	3.49	4.01	0.90	23.7	0.7205
GJ03	103.3	9.77	7.05	51.7	11.50	1.70	2.07	6.02	13.8	36.6	9.77	5.49	2.45	24.8	0.7221
GJ04	83.9	10.53	7.57	41.4	11.57	1.62	1.10	3.22	12.4	38.1	4.81	5.34	0.84	20.9	0.7237
GJ05	137.7	8.16	6.68	67.3	17.97	1.99	3.40	4.04	14.2	13.0	11.37	21.05	19.00	42.7	0.7219
GJ06	120.7	9.64	7.09	60.4	14.40	1.72	2.57	5.83	13.4	26.7	12.22	11.91	8.47	31.0	0.7213
GJ07	109.3	8.76	7.09	54.4	11.75	1.52	2.26	7.02	11.2	36.6	8.78	8.83	3.48	22.4	0.7224
GJ08	118.9	9.87	7.48	64.3	16.55	1.82	2.47	6.15	13.1	23.6	13.69	11.40	9.60	27.9	0.7218
GJ09	68.7	9.3	7.33	40.8	12.19	1.29	1.72	3.28	13.6	32.8	4.92	2.93	1.02	17.2	0.7235
GJ10	98.1	12.27	6.90	54.3	15.69	1.40	3.42	2.40	7.7	17.5	6.64	20.95	8.76	35.0	0.7203
GJ11	121.4	10.11	7.28	65.1	17.44	1.83	2.93	5.50	13.0	29.0	11.99	11.22	9.54	34.0	0.7277
GJ12	56.7	10.59	7.24	34.8	11.03	1.02	2.21	2.07	9.4	22.9	3.71	4.41	2.47	13.8	0.7246
GJ13	108.0	10.19	7.10	56.7	13.01	1.76	2.44	5.57	12.7	27.5	12.32	10.79	8.55	26.4	0.7218
GJ14	159.1	10.55	7.26	81.3	26.92	1.46	5.94	3.46	6.9	73.2	8.43	13.41	1.62	70.3	0.7120
GJ15	84.0	8.35	6.96	41.5	10.28	1.45	2.57	3.04	13.2	37.4	5.03	5.43	0.56	30.2	0.7204
GJ16	128.8	11.1	7.63	64.1	23.78	1.49	3.10	2.94	10.4	61.8	6.61	4.21	1.09	29.9	0.7165
GJ17	107.4	9.34	7.36	57.2	13.82	1.63	2.48	4.94	12.0	29.0	1.96	2.27	1.29	27.3	0.7206
GJ18	119.6	10.13	7.52	59.6	17.32	1.73	3.01	4.57	11.2	35.8	10.65	9.97	5.64	34.8	0.7185
GJ19	269.0	10.92	7.57	136.0	48.20	3.08	5.67	7.50	5.2	95.3	15.25	32.68	7.13	168.1	0.7106
GJ20	149.3	10.04	7.47	75.6	18.50	1.94	3.18	7.75	10.9	42.7	17.09	13.50	6.32	40.9	0.7183
GJ21	207.0	11.33	7.80	102.0	37.10	2.27	4.95	5.46	6.7	89.2	12.89	11.62	2.86	82.4	0.7137
GJ22	149.2	8.86	7.35	75.8	19.30	1.89	3.20	7.40	10.9	45.0	16.79	12.96	6.17	46.0	0.7172

56.7~269  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 平均值为 123.98  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 也低于世界河流 EC 平均值。较低的 TDS 和 EC 值, 都暗示了硅酸岩地区相对较低的化学风化速率<sup>[4]</sup>。赣江河水总阳离子当量浓度  $\text{TZ}^+$  的变化范围是 0.85~3.3 meq/L, 平均 1.41 meq/L, 高于世界河流平均值(0.725 meq/L, Meybeck, 1981), 但低于长江水均值 2.8 meq/L<sup>[3]</sup>。总阴离子当量浓度  $\text{TZ}^-$  的变化范围是 0.60~2.79 meq/L, 平均为 1.24 meq/L。

赣江河水阳离子中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量最高, 占阳离子总量的约 84%, 其次是  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  含量最低。阴离子中,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$  占主导地位,  $\text{SO}_4^{2-}$  次之,  $\text{NO}_3^-$  含量最低。溶解性硅的含量变化范围不大, 为 5.23~14.20 mg/L, 平均为 11.35 mg/L。在图 2 所示主要阳离子和阴离子组成三角图中, 阳离子组成适度富集  $\text{Ca}^{2+}$ , ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ )、 $\text{Mg}^{2+}$  含量低。阳离子三角图中, 一般蒸发盐矿物风化产物应落在 ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) 峰值一端, 石灰岩风化产物应落在  $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$  线上, 白云岩风化产物落在  $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$  线中间 ( $\text{Ca}:\text{Mg} = 1:1$ ), 硅酸盐矿物风化产物落在  $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$  线向 ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) 一端。水体阴离子中, 水体中富含  $\text{HCO}_3^-$ , 且 Si 的含量明显较高, 可能主要源于背景区硅酸岩的风化。纯碳酸盐的风化物质以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 因此数据点均落在靠近  $\text{HCO}_3^-$  峰值一端, 蒸发盐矿物风化产物落在 ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ) 一端, 硅酸盐矿物风化导致河水同时含  $\text{HCO}_3^-$  和 Si, 数据点一般落在了三角图中间。从河水化学组成上看, 赣江流域河水的化学组成具有典型的硅酸岩化学风化作用特征。但是从仍然较高的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  浓度来看, 零星分布于硅酸岩之间的碳酸盐岩的化学风化贡献依然十分重要, 这主要与后者相对较快的化学风化速率有关。

赣江流域各支流中, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  居多, 对河水中  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Ca}^{2+}$  进行相关性分析, 发现两者

的相关性明显 ( $R^2 = 0.740$ ), 且比  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{Mg}^{2+}$  ( $R^2 = 0.579$ ) 的相关性要好, 表明方解石的溶解对它们的贡献最大, 其次是白云岩的溶解, 即它们主要来自碳酸盐岩的化学风化过程。另外, 根据赣江河水中  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  的相关性 ( $R^2 = 0.478$ ) 一般以及  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$  比值远大于 1, 说明镁硫酸盐水解的同时,  $\text{Ca}^{2+}$  的碳酸盐在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的作用下也发生了反应。

赣江流域中含量最高的阳离子  $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$  呈明显正相关 ( $R^2 = 0.72$ ), 而  $\text{Na}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  几乎不存在相关性, 说明  $\text{NaCl}$  的溶解反应是赣江流域重要的化学风化过程。当蒸发岩在水体中占据主导地位时,  $\text{Cl}^-:\text{Na}^+$  应为 1:1, 赣江流域河水中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$

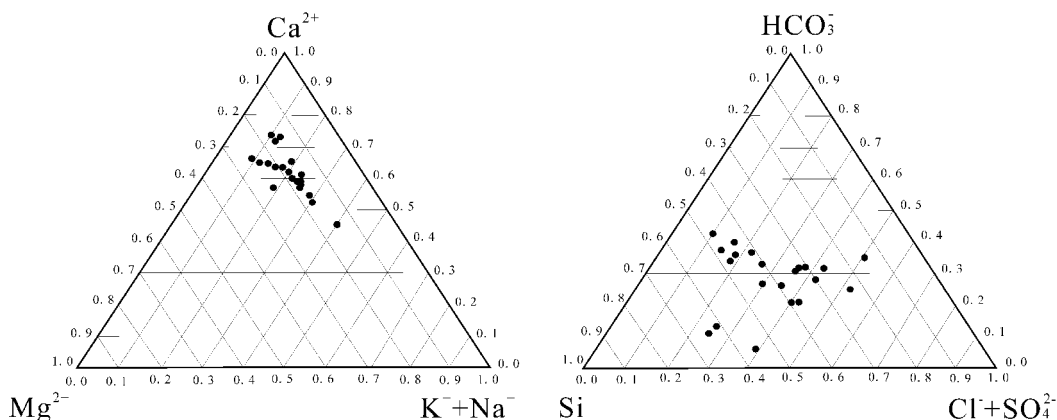


图 2 赣江流域水化学三角分析图(离子浓度  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Fig. 2. Triangle analysis diagrams of main ions of the Ganjiang River water (ion concentration in  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )

比值高于 1, 但相关性显著, 说明  $\text{Cl}^-$  来源除了  $\text{NaCl}$  的溶解外, 其它来源较少, 也从中看出了蒸发盐风化的重要作用。

## 2.2 人类活动对赣江河水化学组成的影响

人为活动产物可以通过两种途径输入水体: 废物直接排放和通过大气输入。由于赣江流域距离海洋较远, 其化学组成受海洋输入的影响相对较小。此外, 本次研究采样期间, 赣江水系正处于枯水期, 降雨量少, 河流主要靠地下水补给, 而地下水补给部分受流域岩石和土壤的影响较大, 因此可以不考虑大气降水对河水中溶质的影响。人为活动产物的特征是富含 K、Ca、S、Cl 和  $\text{N}^{[5]}$ , 其中 K、Ca、S 和 Cl 同时又是岩石/土壤风化作用的产物。因此作为 N 在河水中的存在形式以及  $\text{NO}_3^-$  的变化, 则能指示人为活动对水体化学组成的影响。

河水中的  $\text{NO}_3^-$  往往与农业生产活动施用氮肥

及工业污染有关, 因为人为的污秽和缺氧条件有利于氨的产生。且  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  以及  $\text{SO}_4^{2-}$  分别具有正相关关系, 而与  $\text{HCO}_3^-$  则没有<sup>[9]</sup>。这说明  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  以及  $\text{SO}_4^{2-}$  有共同的来源。特别是采集于临近赣州市区的章水的 5 号样品可以看出, 水化学组成明显含有高的  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  值, 可能较强烈的受到来自于临近的生活废水的排放。

### 2.3 硅酸岩风化对锶同位素比值影响

根据目前的研究, 人们普遍认为全球范围内硅酸岩风化来源的 Sr 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值应为 0.716 ~ 0.720 左右, 而碳酸盐岩风化来源 Sr 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值通常为 0.708 ~ 0.709 左右, 远比前者的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值低。本次研究结果显示, 赣江枯水期河水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值平均为 0.7202, 而且全部 22 个样品中有 19 个样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值大于 0.716, 表明了赣江流域河水 Sr 来源的硅酸岩风化特征。考虑到进入河水的溶解性流域风化物质主要来源于碳酸盐岩、硅酸岩风化输入与人为活动输入, 其中河水  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  对人为活动不敏感<sup>[7]</sup>, 受污染影响小, 故此我们选用  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  比值与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的变化的来判断赣江河水溶质的来源(图 3)。

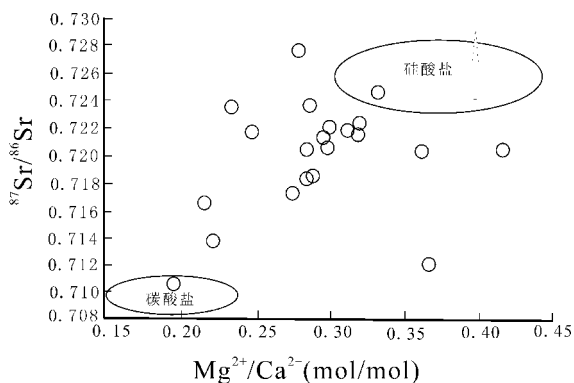


图 3  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  与  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  变化关系

Fig. 3.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  versus  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  mixing diagram of dissolved loads in the Ganjiang River water. The carbonate and silicate water end-members were also inserted

从图 3 可以看出, 数据点分布在石灰岩和硅酸岩混合端元线附近, 表明赣江枯水期河水的 Sr 来源于硅酸岩和碳酸岩盐两个端元混合作用的风化或溶解, 硅酸岩风化起主要作用, 人为活动输入可以忽略。白云岩端元应具有高的  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  比值 (约为 1), 从图上看赣江河水化学组成变化基本不受白云岩端元控制。赣江流域高  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值及比较适中的  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  比值的特点, 与其地层受碎屑岩

控制以及具有很好的植被覆盖和人为活动影响相对较小有关, 也与世界硅酸岩河流的化学组成是一致的<sup>[8]</sup>。

在赣江流域岩石—土壤—植被—大气系统中, 由于岩性、温度和植被变化较小, 可以认为锶同位素的组成主要是大气沉降和矿物风化来源的影响。假设大气降水和矿物风化产生的锶向河流供给的百分比分别为 A 和 B, 其含量组成和同位素组成关系表示如下:

$$A + B = 1$$

$$A \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{大气降水}} + B \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{矿物风化}} = \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{赣江}}$$

$$\text{则: } A = (\Delta^{87}\text{Sr}_{\text{赣江}} - \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{矿物风化}}) / (\Delta^{87}\text{Sr}_{\text{大气降水}} - \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{矿物风化}})$$

$$B = (\Delta^{87}\text{Sr}_{\text{赣江}} - \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{大气降水}}) / (\Delta^{87}\text{Sr}_{\text{矿物风化}} - \Delta^{87}\text{Sr}_{\text{大气降水}})$$

其中,  $\Delta^{87}\text{Sr}_{\text{大气降水}}$  取 0.709<sup>[9,10]</sup>。矿物风化中的  $\Delta^{87}\text{Sr}$  矿物风化取原岩数据的平均值 0.722<sup>[11]</sup>。计算得到  $A = 0.167$ ,  $B = 0.833$ , 也就是说大气降水对赣江流域的锶同位素贡献约为 16.7%, 矿物风化贡献约为 83.3%。赣江流域 Sr 元素来源是大气降水和岩石风化的混合型, 岩石风化特别是硅酸岩风化最为主要。

### 2.4 流域风化对 $\text{CO}_2$ 源汇效应影响

了解碳酸盐岩区域侵蚀的地球化学过程, 揭示其变化规律, 是当今大气  $\text{CO}_2$  浓度增加导致增温效应的全球变化研究以及全球生物地球化学循环研究的一个重要环节<sup>[12]</sup>。从短时期尺度上来说, 碳酸盐岩的化学风化会消耗大气  $\text{CO}_2$  并导致  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$  的溶蚀搬运<sup>[13]</sup>。而硅酸岩矿物的化学风化, 无论对地质历史的长时期还是环境尺度的短时期来说, 都会消耗自然产生的矿物酸类, 其中包括碳酸。因为天然水体中碳酸是通过大气  $\text{CO}_2$  与水的相互反应而控制, 所以消耗碳酸的反应可以去除大气圈中的  $\text{CO}_2$ 。硅酸盐风化作用可以使大陆风化作用消耗掉一多半 (58%) 碳酸, 是引起大气  $\text{CO}_2$  浓度水平下降的主要控制过程之一<sup>[14]</sup>, 并由此影响着全球气候变化。

赣江流域硅酸岩的风化过程消耗大气  $\text{CO}_2$  产生的  $\text{HCO}_3^-$  与 Si 的相关关系不明显 ( $R^2 = 0.524$ ), 这说明仅少量的  $\text{HCO}_3^-$  来自于硅酸岩的风化过程。为了排除碳酸盐岩和蒸发盐的影响, 利用 Si 与  $(\text{Na}^* + \text{K} = \text{Na} - \text{Cl} + \text{K})$  的比值来表征硅酸岩的风化<sup>[2]</sup>。赣江流域 14 个样品  $\text{Si}/(\text{Na}^* + \text{K})$  范围在

1.12~2.86之间,低比值表明风化作用是在近地表环境中进行的, Si 浓度受生物影响很小,主要是岩性的作用。

为进一步确定赣江流域的风化过程和风化反应,利用 SPSS 统计软件对赣江河水 9 个主要离子组分为变量进行了主成分分析和因子分析,采用 Varimax 最大正交旋转法后,得到因子的特征值和累积贡献率如表 2 所示。三个因子为 9 种离子的统

计分析综合信息,为明确因子含义,因子分析得到的因子载荷如表 3 所示。各主要离子的因子提取率通常达到 80%以上,第一因子与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的相关性较大,代表碳酸岩盐类的风化溶解。第二因子与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、Si 有关,代表硅酸盐类和以硅酸盐碎屑为主要成分的蒸发沉积岩如钠长石等矿物的溶解。第三因子与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  有关,则主要代表了人为活动输入对河水的影响。

表 2 赣江流域水化学主成分分析和累积贡献率

Table 2. Principal component analysis and the cumulative contribution rate of the main compositions in the Ganjiang river water

变量	旋转前			旋转后		
	特征值	变量	累计贡献率	特征值	变量	累计贡献率
$\text{K}^+$	4.736	52.618	52.618	4.736	52.618	52.618
$\text{Na}^+$	2.224	24.933	77.552	2.244	24.933	77.552
$\text{Ca}^{2+}$	1.264	14.045	91.596	1.264	14.045	91.596
$\text{Mg}^{2+}$	0.368	4.094	95.691			
Si	0.194	2.151	97.841			
$\text{Cl}^-$	0.089	0.992	98.833			
$\text{NO}_3^-$	0.066	0.731	99.565			
$\text{SO}_4^{2-}$	0.025	0.276	99.841			
$\text{HCO}_3^-$	0.014	0.159	100.000			

表 3 赣江流域水化学主成分分析的载荷矩阵

Table 3. The load matrix of principal component analysis of the main compositions in the Ganjiang river water

变量	因子 1	因子 2	因子 3	特征值
$\text{K}^+$	0.581	0.616	0.348	0.837
$\text{Ca}^{2+}$	0.935	0.227	0.169	0.954
$\text{Na}^+$	-0.029	0.974	-0.006	0.949
$\text{Mg}^{2+}$	0.910	0.082	0.236	0.890
Si	-0.910	0.152	-0.028	0.852
$\text{Cl}^-$	0.132	0.890	0.307	0.903
$\text{NO}_3^-$	-0.112	0.184	0.961	0.970
$\text{SO}_4^{2-}$	0.580	0.199	0.745	0.932
$\text{HCO}_3^-$	0.907	0.199	-0.307	0.957

根据  $\text{HCO}_3^-$  的方差推算,赣江流域河水中约 86%的  $\text{HCO}_3^-$  来自碳酸盐的风化作用,而 14%来自硅酸盐的风化过程。而硅酸盐类风化过程中,所

有的  $\text{HCO}_3^-$  均来自大气  $\text{CO}_2$ ,碳酸盐类只有一半的  $\text{HCO}_3^-$  来自于大气  $\text{CO}_2$  (风化反应:  $\text{CaCO}_3$  (方解石) +  $\text{H}_2\text{O}$  +  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+}$  +  $2\text{HCO}_3^-$ )。因此,赣江河水中约 57%的  $\text{HCO}_3^-$  是在岩石风化作用过程中消耗的大气  $\text{CO}_2$ ,其余 43%的  $\text{HCO}_3^-$  来自于碳酸盐本身。通过主成分分析和因子分析,可以得到赣江流域碳酸盐、硅酸盐、大气  $\text{CO}_2$  及人为污染对各离子的贡献率(表 4)。虽然赣南流域受硅酸盐风化作用强烈,但主要影响因素仍是碳酸盐风化。碳酸盐和硅酸盐对赣南流域溶解质的贡献率分别达到了 40.0%和 25.7%,大气  $\text{CO}_2$  对河水溶解质的贡献率为 21.8%。此外,人类活动输入对赣江河水的影响达到了 12.5%,这与枯水期水量小流速慢导致的自净能力降低以及工农业的快速发展有关。

表 4 赣江流域水化学的物质来源及其贡献率

Table 4. The potential sources and relative contributions of the main ions in the Ganjiang river water

来源	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	Si	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	贡献率 %
碳酸盐	40.3	91.6		93.0		1.9	3.5	36.1	43.0	40.0
硅酸盐	45.3	5.4	100.0	0.8	100.0	87.7		4.2		25.7
大气 $\text{CO}_2$									57.0	21.8
人类活动	14.4	3.0		6.2		10.4	95.2	59.7		12.5

值得注意的是,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  的最大方差贡献率应为蒸发盐类, 而一般硅酸岩中  $\text{Cl}^-$  的含量甚微,  $\text{Na}^+$  可能是钠长石类硅酸岩风化。第 2 因子中因为变量 Si 的方差贡献者几乎全为硅酸岩的溶解, 这与前面的分析结果一致, 所以认为其来源为硅酸岩风化, 实际情况可能是硅酸岩混合一些蒸发盐类风化。绝大部分  $\text{Cl}^-$  来源于第 2 因子, 其余的是由于人类活动输入还是次生过程的影响还有待深入研究。

根据前面的分析, 赣江河水中约 57% 的  $\text{HCO}_3^-$  是在岩石风化作用过程中消耗的大气  $\text{CO}_2$ , 而 43% 的  $\text{HCO}_3^-$  来自于碳酸盐本身。测得赣江流域枯水期河水中  $\text{HCO}_3^-$  的平均浓度为 40.135 mg/L (折合成 0.658 mol/m<sup>3</sup>)。根据赣江流域的径流量和流域面积, 计算得到每年赣江流域岩石风化作用的大气  $\text{CO}_2$  消耗约为  $520.2 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 与世界流域盆地风化作用中的大气  $\text{CO}_2$  消耗率平均值  $246 \times 10^3 \text{ mol}/\text{km}^2/\text{年}$  相比(表 5), 赣江流域水体化学风化的  $\text{CO}_2$  消耗率明显偏高。结合赣江流域水化学和主要化学风化过程, 可以认为较强烈的碳酸盐、蒸发盐溶解和明显的硅酸岩风化导致了赣江流域岩石风化作用的  $\text{CO}_2$  消耗率很高。

表 5 赣江流域与世界流域大气  $\text{CO}_2$  消耗对比

Table 5. Comparison of consumption amounts of atmospheric  $\text{CO}_2$  between the Ganjiang River Basin and global river basins

流域	面积 ( $10^6 \text{ km}^2$ )	径流量 ( $10^8 \text{ m}^3$ )	$\text{HCO}_3^-$ 浓度 (mol/m <sup>3</sup> )	大气 $\text{CO}_2$ 消耗( $10^3 \text{ mol}/$ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )
赣江	0.0835	660.1	0.658	520.2
世界 <sup>[8-15]</sup>	101	374000		246

通过以上分析计算可知, 岩石风化后会将化学

物质带入河流, 最后沉积在海底。赣江流域风化, 特别是高硅酸岩风化的特点, 会成为重要的大气  $\text{CO}_2$  消耗过程, 在当今的全球模式中是一个不容忽视的汇项。

### 3 结 论

赣江河水 pH 值平均约为 7.26, 呈中性环境。赣江流域河水  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  相对富集, Mg 含量较低, 与典型碳酸盐流域河水相比, 该流域河水溶解态 Si 含量较高, 占阴离子总量的 10%~30%, 体现了赣江流域硅酸岩地区河水化学组成的特征。离子成分主要来源于流域岩石和土壤的化学风化, 高<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值及相对适中的  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  比值特点, 表明溶质来源于硅酸岩和碳酸岩盐两个端元混合作用的风化或溶解。大气降水对赣江流域河水的锶元素贡献约为 16.7%, 矿物风化贡献约为 83.3%。枯水期样品降雨补给少, 少数市区附近样点受人类活动对水体化学组成的影响。大多数样品  $\text{Si}/(\text{Na}^+ + \text{K})$  比值较低, 说明风化反应在近地表环境中进行, Si 浓度受生物影响较小, 主要是岩性的作用。计算得到碳酸岩盐和硅酸岩对赣江流域河水溶质贡献率分别为 40.0% 和 25.7%, 大气  $\text{CO}_2$  及其河水平衡反应对河水溶质贡献率约为 21.8%, 人类活动输入的影响达到 12.5%。赣江流域风化作用的大气  $\text{CO}_2$  消耗为  $520.2 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 与世界平均值和长江及黄河等河流相比,  $\text{CO}_2$  消耗率明显偏高。

致 谢: 感谢中国科学院地球化学研究所白莉博士、韩宇捷博士、黄荣生副研究员和范宇红工程师在采样及样品测试过程中给予的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 孙媛媛, 季宏兵, 罗建美, 等. 赣南小流域的水文地球化学特征和主要风化过程[J]. 环境化学, 2006, 25(5): 550—557.
- [2] 夏星辉, 张利田, 陈静生. 岩性和气候条件对长江水系河水主要离子化学的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(2): 246—252.
- [3] Dalai T K, Krishnaswami S, Sarin M M. Major Ion chemistry in the headwaters of the Yamuna river system: Chemical Weathering, its temperature dependence and  $\text{CO}_2$  consumption in the Himalaya[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 2002, 66(19): 3397—3416.
- [4] Chen J, Wang F, Xia X, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River)[J]. Chemical Geology, 2002, 187: 231—255.
- [5] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the Amazon. I. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge[J]. J. Geophys. Res., 1981, 86: 9844—9858.

- [ 6 ] 韩贵琳, 刘从强. 贵州乌江水系的水文地球化学研究[ J ]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 35—43.
- [ 7 ] 郎赞超, 刘从强, 韩贵琳, 等. 贵阳市区地表/地下水化学与锶同位素研究[ J ]. 第四纪研究, 2005, 25: 655—662.
- [ 8 ] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[ J ]. *Chemical Geology*, 1999, 159: 3—30.
- [ 9 ] Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, *et al.* Variation of seawater <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr through Phanerozoic[ J ]. *Geology*, 1982, 10: 316—322.
- [ 10 ] Mueller A G, De Laeter J R, Groves D I. Strontium isotope systematic of hydrothermal minerals from Epigenetic Archean Gold Deposits in the Yilgarn block, Western Australia[ J ]. *Econ. Geol.*, 1991, 86: 165—183.
- [ 11 ] 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 中国东南部花岗岩类 Nd—Sr 的同位素研究[ J ]. 高校地质学报, 1999, 5(1): 22—31.
- [ 12 ] 万国江, 等著. 碳酸盐岩与环境(卷一)[ M ]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [ 13 ] 韩贵琳, 刘从强. 贵州喀斯特地区河流的研究—碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[ J ]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 394—406.
- [ 14 ] Brady P V, Carroll S A. Direct effects of CO<sub>2</sub> and temperature on silicate weathering: Possible implications for climate control[ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(7): 1853—1856.
- [ 15 ] 李晶莹, 张经. 黄河流域化学风化作用与大气 CO<sub>2</sub> 的消耗[ J ]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 43—49.

## Geochemical Studies on the Main Ions and Strontium Isotopes in the Ganjiang River Water

WANG Hai-feng<sup>1,2</sup>, WANG Zhong-liang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Twenty-two water samples were collected from the Ganjiang River during the dry season in November 2007, and major ions and Sr isotope ratios were measured to investigate the potential sources and chemical weathering information of the Ganjiang River Basin. The results showed that major ions in the Ganjiang River water were mainly derived from both end-member mixed composition of the weathering of silicate rocks and carbonate rocks, and also showed that the weathering process mainly occurred in the near-surface environment. The main composition of the Ganjiang River water was representative of the typical chemical composition of the silicate rock area, showing significant differences between the rivers that drainage from carbonate rock areas and those from global major rivers, for example, the high concentrations of dissolved Si, Na, K. Secondly, the main composition of the Ganjiang River water also demonstrated the influence by human activities, as well as a higher consumption rate of atmospheric CO<sub>2</sub>.

**Key words** Ganjiang Drainage Basin; ion composition; <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr; chemical weathering