

# 广东韩江流域化学风化作用及大气 CO<sub>2</sub> 消耗的分析\*

丁 健<sup>1,3</sup>, 周永章<sup>2,3</sup>, 高全洲<sup>1,2</sup>, 陶 贞<sup>1</sup>, 钟莉莉<sup>2,3</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;

3. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 岩石的风化作用与碳循环有着极为密切的联系。韩江流域处于湿热地区, 是广东省除珠江流域以外的第二大流域。对韩江水系进行了系统采样、测试分析显示, 河水水化学组成以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 为主, 其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Na<sup>+</sup>。Gibbs 图分析表明, 韩江流域河水离子成分主要来源于岩石的风化释放; 相关分析和因子分析则表明, 蒸发盐岩、碳酸盐岩、硅酸盐岩风化过程对河水离子的贡献率分别为 33.4%、27.7% 和为 10.5%。大气中的 CO<sub>2</sub> 通过参与岩石的化学风化过程对河水中溶解质的贡献率为 20.2%。韩江流域河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 有 50.2% 来自大气 CO<sub>2</sub>, 由此估算韩江流域岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗量为 73.33 × 10<sup>8</sup> mol/a。在主要支流中, 由大到小的顺序是汀江、石窟河、宁江、五华河和梅潭河, 分别为 28.08 × 10<sup>8</sup>, 13.26 × 10<sup>8</sup>, 10.22 × 10<sup>8</sup>, 5.17 × 10<sup>8</sup> 和 2.90 × 10<sup>8</sup> mol/a。韩江流域岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗率为 252.2 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a)。各主要支流中岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 消耗率最高的是宁江, 为 718.55 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 其次是石窟河 360.14 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 再依次递减的是五华河 282.04 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 汀江 237.73 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 梅潭河 181.18 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a); 韩江流域的平均化学风化率为 54.11 t/(km<sup>2</sup>·a), 各主要支流由高到低依次为, 宁江最高 140.5 t/(km<sup>2</sup>·a), 石窟河 71.2 t/(km<sup>2</sup>·a), 汀江 52.39 t/(km<sup>2</sup>·a), 五华河 51.02 t/(km<sup>2</sup>·a), 梅潭河 38.04 t/(km<sup>2</sup>·a)。

**关键词:** 水化学特征; 化学风化; CO<sub>2</sub> 消耗; 韩江流域

**中图分类号:** P592 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2013) 03-0117-11

## Chemical Weathering Processes and Atmospheric CO<sub>2</sub> Consumption in the Hanjiang River Basin, Guangdong Province

DING Jian<sup>1,3</sup>, ZHOU Yongzhang<sup>2,3</sup>, GAO Quanzhou<sup>1,2</sup>, TAO Zhen<sup>1</sup>, ZHONG Lili<sup>2,3</sup>

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration,  
Guangzhou 510275, China;

3. Research Center for Earth Environment and Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The weathering of the rock has a very close relationship with the carbon cycle. The Hanjiang River is the second largest river in Guangdong Province. A hot and humid climate prevails in the Hanjiang River basin. Based on tests and analysis of the samples from the Hanjiang River Basin, it is found that the chemical compositions of waters of the Hanjiang River and its tributaries are dominated by HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup>. Gibbs graph analysis showed that the ion compositions were mainly from chemical weathering of rocks. Correlation analysis and principal composition analysis showed that weathering processes of evaporates, carbonates, and silicate rocks contributed to the total dissolved mass of the

\* 收稿日期: 2012-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41071054); 广东省自然科学基金资助项目 (7003669)

作者简介: 丁健 (1972 年生), 男, 博士研究生, 工程师; E-mail: eesdj@163.com

Hanjiang River water by 33.4%, 27.7% and 10.5%, respectively, and atmospheric CO<sub>2</sub> by 20.2%. The contribution proportion of atmospheric CO<sub>2</sub> to the HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the river water is about 50.2%, from which the quantity of CO<sub>2</sub> consumption is calculated to be  $73.33 \times 10^8$  mol/a. The descending order of atmospheric CO<sub>2</sub> consumptions of main tributaries of the Hanjiang River is the Tingjiang River, Shikuhe River, Ningjiang River, Wuhuahe River, Meitanhe River, with  $28.08 \times 10^8$ ,  $13.26 \times 10^8$ ,  $10.22 \times 10^8$ ,  $5.17 \times 10^8$  and  $2.90 \times 10^8$  mol/a, respectively. The total CO<sub>2</sub> consumption rate is about  $252.2 \times 10^3$  mol/(km<sup>2</sup>·a). The descending order of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption rates of main tributaries of the Hanjiang River is the Ningjiang River ( $718.55 \times 10^3$  mol/(km<sup>2</sup>·a)), Shikuhe River ( $360.14 \times 10^3$  mol/(km<sup>2</sup>·a)), Wuhuahe River ( $282.04 \times 10^3$  mol/(km<sup>2</sup>·a)), Tingjiang River ( $237.73 \times 10^3$  mol/(km<sup>2</sup>·a)), and the Meitanhe River ( $181.18 \times 10^3$  mol/(km<sup>2</sup>·a)). The average chemical weathering rate of the Hanjiang River is 54.11 t/(km<sup>2</sup>·a). The chemical weathering rates of main tributaries are 140.5 t/(km<sup>2</sup>·a) in the Ningjiang River, 71.2 t/(km<sup>2</sup>·a) in the Shikuhe River, 52.39 t/(km<sup>2</sup>·a) in the Tingjiang River, 51.02 t/(km<sup>2</sup>·a) in the Wuhuahe River and 38.04 t/(km<sup>2</sup>·a) in the Meitanhe River.

**Key words:** hydro-chemical characteristics; chemical weathering; atmospheric CO<sub>2</sub> consumption; Hanjiang River Basin

化学风化是发生在岩石圈、生物圈、水圈和大气圈之间界面上的重要过程,是联系陆地与海洋、流域与湖泊、反演气候及环境的重要纽带。岩石的风化作用与碳循环有着极为密切的联系。岩石化学风化作用是大气 CO<sub>2</sub> 消耗的一个重要途径,它从大气或土壤中摄取 CO<sub>2</sub>,并转化为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (或 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) 溶解于地表径流中,最后汇入海洋,形成地表碳汇的一部分,其中主要是通过硅酸盐风化所引起的 CO<sub>2</sub> 消耗进而影响大气 CO<sub>2</sub> 平衡,最终影响全球气候变化和碳循环<sup>[1]</sup>。据 Suchet 等研究<sup>[2-3]</sup>,每年约有  $0.7 \times 10^9$  t 的碳通过陆地岩石的风化过程从大气——生物圈转移到海洋中,从而对全球气候变化产生重要的影响。根据 Gaillardet 等<sup>[4]</sup>的研究,全球河流流域内岩石化学风化消耗的 CO<sub>2</sub> 量约占全球岩石化学风化消耗量的 87%,流域内岩石化学风化是全球岩石化学风化的主体。河流是海陆间物质能量交换的重要通道,流域内岩石、土壤等在雨水的淋滤下发生化学风化反应,淋溶离子输入河流,因此河流的水化学特征反映了流域内元素的地球化学行为、岩石化学风化与机械剥蚀作用的强弱及岩石风化所消耗的 CO<sub>2</sub> 量等重要信息。通过研究河流水化学的离子组成来揭示流域岩石化学风化过程并估算流域岩石风化消耗 CO<sub>2</sub> 量是当前国际研究的热点<sup>[5-22]</sup>,我国不少学者在这方面进行研究<sup>[23-36]</sup>。

本文通过对韩江流域河水溶解离子组成特征以及河水主要离子间的关系进行分析,重点探讨韩江

流域的主要化学风化反应、化学风化速率并估算岩石风化过程中对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗。

## 1 研究区域概况

韩江流域位于粤东、闽西南,处在北纬 23°20′ - 26°02′、东经 115°15′ - 117°15′ 之间,是广东省除珠江流域以外的第二大流域<sup>[37-39]</sup>。其流域地层以燕山期的岩浆岩分布最广(主要为花岗岩,部分为流纹岩),其次是侏罗系的陆相安山岩、火山碎屑岩夹砂页岩;在流域北部汀江及西部五华河、宁江流域有少量的前泥盆系变质岩和碳酸盐岩,此外宁江流域还分布有白垩系碎屑岩,其中含有石膏;在韩江河口区主要分布第四纪冲积层。流域地势自西北和东北向东南倾斜,地势海拔高程自 20 ~ 1 500 m 不等,在地貌上表现为中上游为低山、丘陵、盆地相间分布,下游为冲积——海积平原的二元结构。流域地形以多山地丘陵为其特点,其中山地占总流域面积的 70%,多分布在流域的北部和中部;丘陵占总流域面积的 25%,多分布在梅河流域和其它干支流谷地;平原占总面积的 5%,主要分布在韩江下游三角洲。韩江干流长 470 km,流域面积 30 112 km<sup>2</sup>,年平均气温 21.0 ℃ 左右,年降雨量 1 300 ~ 2 200 mm,多年平均降雨量为 1 539 mm,多年平均年水面蒸发量为 1 069 mm,汛期 4 - 9 月的降雨量为 1 181 mm,占全年降雨量的 77%,多年平均径流量为  $262.70 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。从源头到大埔县三河坝为韩江上游段,河长 305 km,三河坝至潮州为中游段,河长 110 km,潮州以下至

入海口为下游段, 五华河、宁江、石窟河、汀江和梅潭河为韩江水系主要河流。其中, 五华河全长为 105 km, 流域面积为 1 832 km<sup>2</sup>, 多年平均径流量为 14. 735 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 宁江河长 107 km, 流域面积为 1 423 km<sup>2</sup>, 多年平均径流量为 11. 445 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 石窟河全长 179 km, 流域面积 3 681 km<sup>2</sup>, 多年平均径流量为 34. 158 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 汀江干流总长 323 km, 流域面积 11 802 km<sup>2</sup>, 多年平均径流量为 112. 185 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 梅潭河干流总长 137 km, 流域面积 1 603 km<sup>2</sup>, 多年平均径流量为 14. 717 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。(注: 以上河流多年平均径流量为 1956 - 2000 年平均值, 数据来源于广东省水文局。)

## 2 样品采集与分析

本研究的样品采集工作于 2009 年 7 月 31 日至 8 月 3 日丰水期及 2010 年 1 月 4 - 12 日枯水期分别进行, 共设 12 个采样点, 分别选择在韩江上游琴江、梅江至潮安水文站主流上及各主要支流汇入干流前约 0.3 ~ 2 km 处, 见图 1。采样时, 尽量远离污染源, 到河中心断面或在河流湍流带于水下 15 cm 处采样。现场用美国 MYRON L 公司生产的

便携式 6P 型多参数水质检测仪测试水温、pH 值、电导率。样品使用聚乙烯塑料瓶盛装, 带回实验室分析, 用 Whatman GF/F 玻璃纤维微孔滤膜过滤, 待测试样在 4 °C 冷藏箱中保存。其中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子用稀 HCL 滴定法测定 (测定终点的 pH 值取 4. 2), Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 和可溶性硅 (DSi) 含量采用美国 TJA 公司生产的全谱直读等离子体原子发射光谱议测定, Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 用美国 Dionex D600 型离子色谱仪测定, 径流数据来源于广东省水文局。

## 3 结果与讨论

### 3.1 韩江流域水化学特征

韩江流域水体呈中性偏碱, 大部分样品的 pH 值大于 7. 0 (表 1), 丰水期河水的 pH 值在 6. 99 ~ 7. 29, 枯水期 pH 值为 6. 76 ~ 7. 63。流域河水电导率在 77. 44 ~ 351. 7 μS/cm 之间, 各采样点枯水期间河水电导率均高于丰水期间的电导率。韩江各主要支流中宁江水样电导率最高, 丰水期为 306. 5 μS/cm, 枯水期为 351. 7 μS/cm, 比韩江下游潮安站水样的电导率高近 3 倍, 主要是因为宁江流域白垩系碎屑岩中含有石膏, 河水中离子含量较高; 其次是石窟河, 为 135. 8 ~ 219. 5 μS/cm, 而五华河、石窟河、汀江、梅潭河的电导率比较接近, 多在 78. 37 ~ 136 μS/cm 之间。韩江流域河水的氧化还原电位势较高, ORP 值在 129 ~ 306 mV 之间, 丰水期间 ORP 值高于枯水期。

天然水体中无机正负电荷的平衡程度可以衡量水化学分析数据的可信程度或水体污染程度<sup>[40]</sup>。在没有污染的情况下, 河流水体中的正电荷总量可表达为<sup>[41]</sup>:  $TZ^+ = Na^+ + K^+ + 2Mg^{2+} + 2Ca^{2+}$ ; 负电荷总量可以表达为:  $TZ^- = Cl^- + 2SO_4^{2-} + HCO_3^- + NO_3^-$ , 将其进行无机电荷平衡标准化  $[NICB = (TZ^+ - TZ^-) / TZ^+]$ , NICB 的值在 - 0. 057 ~ 0. 098 之间, 说明韩江水系大多数样品中总溶解阳离子电荷与总溶解阴离子电荷基本平衡。

韩江干流潮安站的河水总溶解盐 (TDS) 含量在 75. 1 ~ 107. 75 mg/L 之间, 平均值为 91. 43 mg/L, 低于长江 (205. 9 mg/L)、西江 (303. 52 mg/L) 和北江 (121. 03 mg/L), 但高于东江 (66. 10 mg/L)<sup>[42-43]</sup>, 稍高于全球河流的 TDS 均值 69 mg/L<sup>[44]</sup>, 主要是因为长江、西江及北江流域分布有较大面积的碳酸盐岩, 而韩江流域碳酸盐岩分布较少。韩江流域各支流中, 宁江流域因分布有碳酸盐岩及石膏, 导致其水样 (韩 1 - 4、韩 2 - 4) 总溶解盐含



图 1 韩江水样品采集地点分布

Fig. 1 Sampling locations of the Hanjiang River water system

量 (231.25 ~ 257.5 mg/L) 明显高于其它支流。韩江流域河水中优势阳离子是  $\text{Ca}^{2+}$ , 占离子当量浓度总量的 26.63% ~ 27.73%, 其次是  $\text{Na}^+$  ( $\text{K}^+$  已计入), 占 15.63% ~ 15.76%,  $\text{Mg}^{2+}$  含量占总离子比例最少, 在 7.81% ~ 8.7% 之间, 即  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ; 优势阴离子是  $\text{HCO}_3^-$ , 占离子当量浓度总量的 24.61% ~ 29.35%, 而  $\text{SO}_4^{2-}$  占

8.70% ~ 10.94%,  $\text{Cl}^-$  占 5.98% ~ 8.20%,  $\text{NO}_3^-$  变化较小, 占离子总量的 4.89% ~ 5.08%; 河水中可溶性硅含量变化范围不大, 为 4.97 ~ 7.487 mg/L, 平均值为 6.23 mg/L。从以上主要离子所占比例来看, 韩江流域控制河水地球化学作用的主要是  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的平衡作用, 河水水化学类型为重碳酸盐钙组 II 型水, 表示为。

表 1 韩江流域河水主要化学成分

Table 1 Chemical compositions of the Hanjiang river

采样地点	样品编号 <sup>1)</sup>	采样时间	pH	电导率/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	ORP/ mV	TDS										TZ' ( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	TZ	NICB
						$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	可溶 Si ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$				
五华县安流大桥	韩 1-1	2009.8.3	7.24	77.44	301	62.14	5.997	1.19	3.19	5.276	6.963	26.29	3.58	4.46	5.20	0.708	0.712	-0.006
	韩 2-1	2010.1.4	6.76	108.6	186	72.77	7.53	1.583	3.55	6.42	6.998	26.75	4.55	4.49	10.90	0.876	0.866	0.011
五华县城琴江大桥	韩 1-2	2009.8.3	7.25	80.51	295	65.3	6.311	1.256	3.39	5.953	7.452	27.48	4.43	3.91	5.12	0.764	0.745	0.024
	韩 2-2	2010.1.5	7.40	97.77	129	75.17	8.16	1.477	3.6	6.72	7.175	27.44	4.65	4.25	11.70	0.913	0.893	0.022
五华大桥	韩 1-3	2009.8.3	7.1	111.3	304	86.37	11.54	2.647	3.63	4.66	5.772	41.71	4.39	4.88	7.14	1.089	1.035	0.050
	韩 2-3	2010.1.5	7.12	136	129	97.45	14.98	2.679	4.11	5.7	5.018	45	5.16	未检出	14.80	1.321	1.192	0.098
宁江与梅江交汇处上游	韩 1-4	2009.8.2	7.17	306.5	301	231.25	31.38	5.39	10.01	19.72	6.605	111.30	14.00	5.05	27.80	3.123	2.880	0.078
	韩 2-4	2010.1.5	7.29	351.7	179	257.5	40.03	6.494	7.62	20	5.579	101.32	14.4	8.66	53.4	3.596	3.319	0.077
兴宁市水口二桥	韩 1-5	2009.8.2	7.25	102.9	299	78.83	9.283	2.128	3.85	6.35	6.801	34.81	8.07	3.92	7.16	1.013	0.911	0.101
	韩 2-5	2010.1.5	7.46	177.1	147	138.1	18.62	3.082	4.66	9.95	5.994	52.74	13.57	5.96	23.52	1.735	1.834	-0.057
石窟河与梅江交汇处上游	韩 1-6	2009.8.2	7.02	135.8	306	100.14	16.18	2.67	3.25	4.1	5.402	45.67	5.95	6.21	10.70	1.289	1.240	0.038
	韩 2-6	2010.1.6	7.19	219.5	179	147.81	27.59	3.653	3.52	5.96	4.97	51.12	13.90	19.60	17.5	2.027	1.911	0.057
梅江距三合坝交汇处 1.5km	韩 1-7	2009.8.1	7.12	119.7	304	91.81	12.96	2.76	3.57	4.76	5.574	41.73	4.91	5.44	10.1	1.172	1.121	0.044
	韩 2-7	2010.1.6	7.28	192.6	186	136.54	21.27	3.502	4.04	8.56	5.672	52	11.50	12.40	17.60	1.825	1.744	0.045
福建上杭水文站	韩 1-8	2009.8.2	7.29	92	302	77.31	9.361	1.765	2.52	5.26	5.042	41.60	2.58	2.64	6.54	0.906	0.934	-0.031
	韩 2-8	2010.1.12	7.25	102	144	71.9	9.71	1.656	3.22	4.94	4.922	17.63	7.93	11.90	9.99	0.918	0.913	0.006
汀江距三河坝交汇处 1.8km	韩 1-9	2009.8.1	6.99	94.2	308	70.11	9.764	1.755	2.77	3.92	5.427	27.75	2.93	4.89	10.90	0.873	0.844	0.034
	韩 2-9	2010.1.6	7.54	139.4	178	93.68	12.44	1.415	3.96	6.82	5.747	36.1	5.19	9.47	11.8	1.195	1.137	0.049
梅潭河与汀江交汇处 1.5km	韩 1-10	2009.8.1	7.26	78.37	296	60.87	6.278	1.592	3.31	4.22	7.487	20.45	3.17	10.70	3.66	0.712	0.673	0.055
	韩 2-10	2010.1.6	7.54	85.5	186	70.64	7.37	2.148	3.44	5.72	7.004	33.73	3.09	5.35	3.52	0.821	0.8	0.026
三合坝水文站	韩 1-11	2009.8.1	6.99	92.23	305	67.75	9.182	2.008	2.8	3.89	5.645	25.66	2.99	6.14	9.43	0.864	0.801	0.074
	韩 2-11	2010.1.6	7.53	137.9	186	98.31	13.83	2.379	3.81	7	6.042	39.25	6.25	8.65	11.10	1.288	1.19	0.075
潮州市潮安水文站	韩 1-12	2009.7.31	7.14	100.8	306	75.1	10.22	2.272	2.98	4.18	5.701	30.25	3.60	5.30	10.60	0.955	0.904	0.054
	韩 2-12	2010.1.7	7.63	146.9	162	107.75	15.44	2.674	3.86	7.49	5.301	44.03	6.28	7.47	15.2	1.415	1.336	0.056

1) 韩 1 为 2009 年 7 月 31 日 - 8 月 3 日采样, 韩 2 为 2010 年 1 月 4 - 12 日采样

### 3.2 韩江流域主要岩石化学风化过程及来源成因分析

3.2.1 Gibbs 图分析 河水中溶解离子主要来源有流域岩石和土壤矿物的化学风化与溶解释放、大气降水和人类影响。为确定影响韩江流域水化学组成的控制因素, 对其进行了 Gibbs 图分析<sup>[45]</sup>, 根据该图可定性判断区域岩石、大气降水、蒸发-浓缩作用等对河流水化学的影响, 了解河流的离子特征及成因。如图 2 所示, 韩江流域河水样品的  $[\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})]$  和  $[\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)]$  的比值投点都落在小于 0.5 的范围内, 均分布在图的中部左侧, 说明其离子成分主要来源于岩石的风化释放, 属岩石风化类型; 同时  $[\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})]$  最低值为 0.16, 最高值为 0.45,  $[\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)]$  最低值为 0.1, 最高值为 0.44, 在 Gibbs 图中的位置稍往右偏, 说明在韩江流域河水成分一定程度上还受海洋性降水的影响。

3.2.2 主要风化过程 对于大部分河流来讲, 河

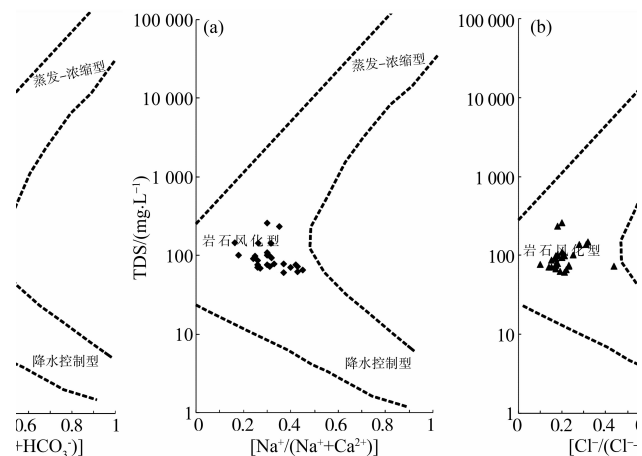


图 2 韩江流域河水 Gibbs 图

Fig. 2 The Gibbs graph of the Hanjiang river water

水中的主要离子除来自于岩石风化作用外, 还有雨水及大气的输入和人为污染的影响。由于雨水中离子含量较低, 如距韩江较近的广东流溪河地区降雨中主要离子  $\text{Cl}^-$  含量为 0.022 8 mmol/L<sup>[46]</sup>, 进入

水体在被稀释情况下认为其影响较小, 可以忽略不计。大气对河水的输入主要是指在岩石风化过程中有大气 CO<sub>2</sub> 参与, 以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 形式存在于河水中。对人为污染的影响, 经调查, 流域上游无明显的人为扰动影响, 因此在分析韩江流域主要风化过程时忽略人为影响因素。

韩江流域河水中优势阳离子是 Ca<sup>2+</sup> 和 Na<sup>+</sup> (K<sup>+</sup> 已计入), 优势阴离子是 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。对韩江河水中的主要离子进行相关性分析, 发现 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Ca<sup>2+</sup> 的相关性明显 ( $r^2 = 0.8327$ ,  $p < 0.0001$ , 见图 3 (a)), 而且以韩江下游潮安水文站河水中 Ca<sup>2+</sup> 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的摩尔浓度比在枯水期和丰水期分别为 1:1.95 和 1:1.88, 接近 1:2, 说明方解石的溶解对它们的贡献最大; 而河水中 Na<sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 相关性明显 ( $r^2 = 0.7575$ ,  $p < 0.0001$ , 见图 3 (b)), 潮安水文站河水中 Na<sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 摩尔浓度比在枯水期和丰水期分别为 2.05:1 和 1.65:1, 接近 2:1, 表明蒸发盐 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的溶解反应是韩江流域化学风化的一个重要过程。韩江河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 除了碳酸盐岩风化来源外, 硅酸盐岩在风化时消耗大气 CO<sub>2</sub> 也产生 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 但是 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 Si 的相关关系不明显, 见图 3 (c), 说明韩江流域河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要来自于碳酸盐岩的风化贡献, 仅少量的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 来自于硅酸盐岩风化贡献。天然水中的 Si 主要来自硅酸盐和铝硅酸盐矿物的水解, 水体中 Si 的含

量可以作硅酸盐矿物风化的直接证据。韩江流域河水中可溶 Si 含量较少, 丰水期平均为 6.16 mg/L, 枯水期为 5.87 mg/L, 河水中可溶 Si 与阳离子 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 的相关性不明显, 见图 3 (d) (e), 而与 Ca<sup>2+</sup> 的相关性稍高, 见图 3 (f), 说明韩江流域硅酸盐岩风化主要是钙硅酸盐的风化, 钾钠硅酸盐 (钠长石、钾长石) 的风化很少。整体而言, 虽然韩江流域内硅酸盐岩的分布面积较广, 而碳酸盐岩分布面积较少, 但据前人研究在湿热地区, 流域尺度上碳酸盐类矿物的化学溶蚀性是硅酸盐类矿物的 7 倍左右<sup>[47]</sup>, 所以流域内少量分布的碳酸盐岩对河流水体的离子贡献率较高, 因此韩江流域内碳酸盐岩和蒸发盐岩的风化作用占主导地位, 而硅酸盐岩的风化作用相对较微弱, 对韩江河水水化学的影响较小。综上所述, 推断韩江流域所发生的主要化学风化反应如表 2。

表 2 韩江流域主要风化反应

Table 2 Major chemical reactions in weathering processes along Hanjiang river basin

$\text{CaCO}_3$ (方解石) + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → Ca <sup>2+</sup> + 2HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (芒硝) → 2Na <sup>+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 10H <sub>2</sub> O
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$

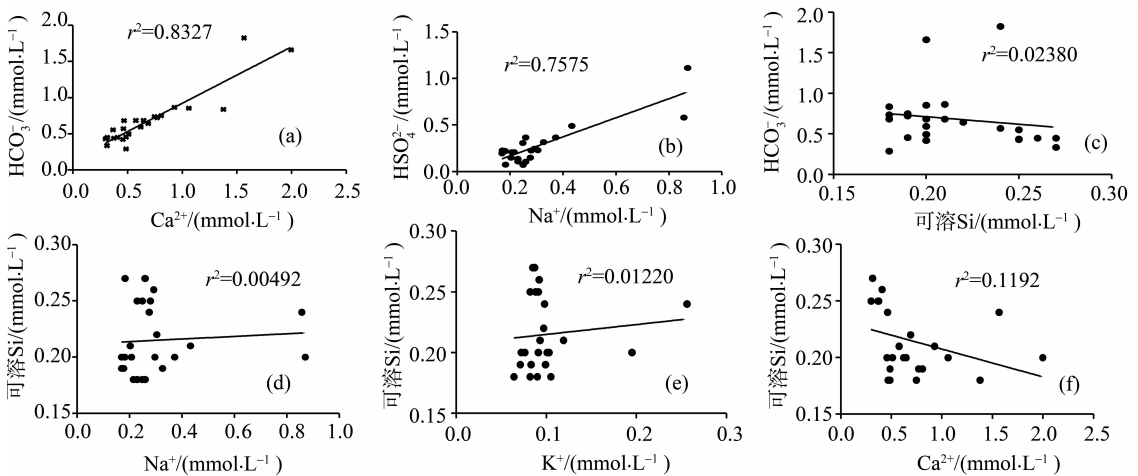


图 3 韩江流域河水主要离子之间的关系

Fig. 3 The correlation plots between major ions in the Hanjiang River water

3.2.2 主成分分析和因子分析 为了进一步分析韩江流域不同岩石类型对韩江河水中主要离子的影响, 对河水化学进行了主成分分析。该分析采用 varimax 最大正交旋转法使具有较大因子负载的变

量减少到最低限度, 提取公共因子, 分析不同因素的贡献。表 3 展示了旋转前后各因子的特征值和累积贡献率。根据计算, 前二个变量的累计贡献率达到 85.71%, 其中第一因子占 69.28%, 第二因子

占 16.43%，这两个提取因子的特征值都大于 1，说明第一、第二因子的信息不重叠且无损失，所以

表 3 韩江流域水化学主成分分析的特征值和累积贡献率

Table 3 Eigenvalues of principal component analysis and their cumulative contribution rates of chemical compositions in the Hanjiang 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/%
1	6.235	69.276	69.276	5.958	66.203	66.203
2	1.479	16.430	85.707	1.755	19.504	85.707
3	.826	9.174	94.881			
4	.192	2.132	97.012			
5	.137	1.522	98.535			
6	.088	.980	99.515			
7	.031	.343	99.858			
8	.011	.117	99.974			
9	.002	.026	100.000			

提取的这二个因子能很好的反映韩江流域河水的化学特征；第三因子占 9.174%，因其提取因子的特征值小于 1，说明第三因子代表的信息有重叠和损失，故未提取。提取的二个因子代表了 9 个因子的综合信息，对其旋转，使因子载荷值向两极端趋近，以明确各因子的含义，对初始因子载荷矩阵施以 25 次的正交旋转，得到的因子载荷矩阵（表 4），从中可看出因子分类明确。因子 1 与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  的相关性较大，表示方解石等碳酸盐岩的溶解和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  等蒸发盐类矿物的溶解对河水溶解质的贡献率较大；因子 2 与可溶 Si、 $\text{Ca}^{2+}$  的相关性较大，代表硅酸盐类的溶解。

旋转后的载荷矩阵见表 4，每个变量因子载荷的平方除以公共性方差即为每类岩石的溶解对各变量的相对方差贡献率。通过计算得出：碳酸盐岩和蒸发盐岩溶解对流域河水中  $\text{Ca}^{2+}$  的相对方差贡献率为 83.4%，由于  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的相关性明显且很接近（ $r^2$  分别为 0.832 7 和 0.829 9， $p < 0.000 1$ ），所以碳酸盐岩和蒸发盐岩溶解对流域河水中  $\text{Ca}^{2+}$  的贡献比率接近，硅酸盐的贡献率为 16.6%；河水中  $\text{K}^+$  97.1% 来自第一因子，由于碳酸盐岩风化不产生  $\text{K}^+$ ，因此全部来自蒸发盐岩的溶解；碳酸盐岩和蒸发盐岩对  $\text{Mg}^{2+}$  的相对方差贡献率为 91.25%，硅酸盐岩为 8.85%；蒸发盐岩和碳酸盐岩对韩江河水中  $\text{Na}^+$  的相对方差贡献率很高，达 98.91%，根据前面韩江的主要风化过程，主要由蒸发盐贡献；硅酸盐岩对韩江河水中可溶 Si 的相对方差贡献率为 99.66%，基本没有碳酸盐和蒸发盐来源；韩江流域中  $\text{HCO}_3^-$  约有 99.6% 来自

于第一因子，因蒸发盐岩风化不产生  $\text{HCO}_3^-$ ，所以都来自碳酸盐岩的贡献，而硅酸盐岩来源所占的比例极少，占 0.4%，由于蒸发盐类风化过程基本不消耗  $\text{CO}_2$ ，碳酸盐类有一半的  $\text{HCO}_3^-$  来自于大气  $\text{CO}_2$ ，所以韩江流域河水中  $\text{HCO}_3^-$  有 50.2% 的来自大气  $\text{CO}_2$ ，大气  $\text{CO}_2$  对河流中溶解质的贡献率为 20.2%，低于世界平均值 37%<sup>[4]</sup>；韩江河水中  $\text{Cl}^-$  主要来自于蒸发盐岩，其相对方差贡献率为 76.9%，硅酸盐岩的相对方差贡献率为 0.232%，其余的通常为污染所引起；河水中  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来自蒸发盐岩，其相对方差贡献率达 93.74%，硅酸盐岩贡献率为 6.26%； $\text{NO}_3^-$  在整个方差中，主要来自硅酸盐岩，其相对方差贡献率达 98.6%，由于岩石风化产生的  $\text{NO}_3^-$  量极少，分析河水中  $\text{NO}_3^-$  主要是由人为污染或次生原因引起。

表 4 韩江流域水化学主成分分析的载荷矩阵

Table 4 Component loadings of principal component analysis of the Hanjiang river water

变量	因子载荷		公共性方差
	因子 1	因子 2	
$\text{Ca}^{2+}$	0.904	0.404	0.980
$\text{K}^+$	0.953	-0.165	0.935
$\text{Mg}^{2+}$	0.933	0.289	0.954
$\text{Na}^+$	0.976	-0.096	0.963
可溶 Si	-0.048	-0.772	0.598
$\text{HCO}_3^-$	0.967	0.056	0.939
$\text{Cl}^-$	0.807	.0443	0.847
$\text{NO}_3^-$	0.091	0.790	0.633
$\text{SO}_4^{2-}$	0.901	0.232	0.866

根据上述相关分析和因子分析，得到大气 CO<sub>2</sub> 和三大类岩石对河水各种离子的相对贡献率（表 5）。对比世界流域的平均值，韩江流域的显著特点是蒸发盐岩对河水离子的贡献率较高，达 33.4%，远高于世界平均值，这与韩江流域碎屑岩中含有石膏，同时人为因素对河水中 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的影响较大，而它们与蒸发盐岩溶解

组分一致，会导致统计分析时蒸发盐溶解贡献率增加；碳酸盐岩对韩江河水的溶质贡献率为 27.7%，低于世界平均值 35%；硅酸盐风化对河水溶质贡献率为 10.5%，低于世界平均水平 15%；而大气 CO<sub>2</sub> 对河流中溶解质的贡献率为 20.2%，约是世界平均值（37%）的一半左右。

表 5 韩江河水化学的物质来源与世界流域平均值的比较

Table 5 Sources of chemical compositions in the Hanjiang river water and their comparison with average values of the world watersheds

来源	流域	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Si	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	贡献率
碳酸盐岩	韩江	41.7	0	45.62	0	0	49.8	0	0	0	27.7
	世界 <sup>[4]</sup>	67	0	42	0	0	0	0	0	0	35.0
蒸发盐岩	韩江	41.7	97.1	45.62	98.91	0	0	76.9	0	93.74	33.4
	世界 <sup>[4]</sup>	7	5	10	54.0	0	0	100	0	42.0	11.0
硅酸盐岩	韩江	16.6	2.9	8.76	0.96	100	0.4	0.232	0	6.22	10.5
	世界 <sup>[4]</sup>	26	95	48		100	0	0	0	58.0	15.0
大气 CO <sub>2</sub>	韩江	0	0	0	0	0	50.2	0	0	0	20.2
	世界 <sup>[4]</sup>	0	0	0	0	0	67.0	0	0	0	37.0
污染等	韩江	0	0					22.87	100.0		8.2
	世界 <sup>[4]</sup>										2.0

上述分析得到的定量化结果（相对贡献率）可能存在着一定的偏差，原因主要有：① 河水 PCA 分析过程中 2 个因子的方差总贡献率和各种离子的因子提取率均未达到 100%；② 提取得到的 2 个因子并不能完全地分别代表 3 大类岩石矿物，而且因子 1 代表了碳酸盐和蒸发盐，说明碳酸盐和蒸发盐对韩江河水离子的贡献较大；③ 人为因素对河水中离子特别是 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的影响较大，而它们与蒸发盐岩溶解组分一致，会导致统计分析时显示蒸发盐岩溶解贡献率增加；④ 岩石的化学风化作用是十分漫长而复杂的地质过程，对河水溶解质统计分析得到的物质相对贡献率只是在某种程度上反映了离子来源，定量化结果虽粗略，但可以很好的体现出相对贡献的大小程度。

### 3.3 韩江流域岩石化学风化的大气 CO<sub>2</sub> 消耗量和消耗率

在地表化学风化过程中，大气中的 CO<sub>2</sub> 被转化为溶解态的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>，随径流进入海洋，从而使地表化学风化与全球碳循环之间建立了密切联系。流域盆地岩石风化作用对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗的主要依据是大气中 CO<sub>2</sub> 对河水中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的贡献比例的

大小。根据碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化反应，在碳酸盐岩风化过程中产生的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>，只有一半来自于大气 CO<sub>2</sub>，另一半由碳酸盐类的碳酸根本身所提供；硅酸盐岩风化过程中，所有的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 均来源于大气 CO<sub>2</sub>；蒸发盐类风化过程中基本不消耗 CO<sub>2</sub>。流域盆地岩石化学风化的大气 CO<sub>2</sub> 消耗量  $\Phi$  (CO<sub>2</sub>)<sub>量</sub> 和消耗率  $\Phi$  (CO<sub>2</sub>)<sub>率</sub> 分别为计算如下式<sup>[24-26]</sup>：

$$\Phi (CO_2)_{量} = ZQ (X + 0.5Y)$$

$$\Phi (CO_2)_{率} = \frac{1}{A}ZQ (X + 0.5Y)$$

其中，Z 为河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的平均浓度（mol/m<sup>3</sup>），Q 为年均径流量 m<sup>3</sup>，X 和 Y 分别是流域盆地内硅酸盐岩和碳酸盐岩化学风化对河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的相对贡献率（X + Y = 100%），A 为流域面积（km<sup>2</sup>）。

根据前面分析，碳酸盐岩化学风化对河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的相对贡献率为 99.6%，硅酸盐岩化学风化仅为 0.4%，即韩江流域河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 有 50.2% 来自大气 CO<sub>2</sub>，结合韩江流域河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子含量（注：为流量加权离子浓度，根据 1956 至 2000 年韩江及各主要支流 4 - 9 月丰水期、枯水期流量

占全年流量的比例计算, 其中韩江上游水口站丰水期径流量占全年径流量的 72.58%, 枯水期占 27.42%, 代表韩江上游琴江及其附近主要支流五华河、宁江、石窟河; 溪口站是汀江的控制站, 丰水期径流量占全年径流量的 68.42%, 枯水期占 31.58%; 潮安站控制韩江流域 29 077 km<sup>2</sup> 的集水面积, 其丰水期径流量占全年径流量的 73.4%, 枯水期则占 26.6%, 代表韩江中游段、支流梅潭河及全流域平均值的计算比例, 资料来源: 广东省水文局)、多年平均流量及流域面积, 估算了韩江流域各段及主要支流的岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗量和消耗率, 见表 6。

从表 6 可看出, 韩江流域岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗量达 73.33 × 10<sup>8</sup> mol/a, 而我国每年岩石风化消耗大气 CO<sub>2</sub> 量为 4.72 × 10<sup>8</sup> t<sup>[27]</sup>, 韩江流域岩石化学风化消耗大气 CO<sub>2</sub> 的量占我国的 0.684%, 占全球岩石化学风化消耗大气 CO<sub>2</sub> 的

0.0306%。韩江各主要支流岩石化学风化消耗大气 CO<sub>2</sub> 的量由大到小的顺序是, 汀江、石窟河、宁江、五华河、梅潭河, 分别为 28.08 × 10<sup>8</sup>, 13.26 × 10<sup>8</sup>, 10.22 × 10<sup>8</sup>, 5.17 × 10<sup>8</sup>, 2.90 × 10<sup>8</sup> mol/a。

韩江流域岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗率为 252.2 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 比长江流域 611 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a) 的低, 但比黄河流域 144 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a) 的高, 与世界平均水平 246 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a) 比较接近。在各主要支流中, 岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗率最高的是宁江, 为 718.55 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 依次递减则为石窟河 360.14 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 五华河 282.04 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 汀江 237.73 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a), 梅潭河 181.18 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup>·a)。各支流中宁江流域岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗率较高, 与其流域内分布有较大面积的碳酸盐岩有关。

表 6 韩江流域化学风化过程中大气 CO<sub>2</sub> 消耗量

Table 6 The amounts of CO<sub>2</sub> consumed in chemistry weathering in the river basin

流域	流域面积/km <sup>2</sup>	多年平均径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> )	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 浓度 (mg·L <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 消耗量/(10 <sup>8</sup> mol·a <sup>-1</sup> )			CO <sub>2</sub> 消耗率 (10 <sup>3</sup> mol·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
				碳酸盐岩	硅酸盐岩	总消耗量	
琴江	1 578	14.4	26.42	3.11	0.02	3.13	198.41
五华河	1 832	14.735	42.61	5.13	0.04	5.17	282.04
宁江	1 423	11.445	108.56	10.14	0.08	10.22	718.55
石窟河	3 681	34.158	47.16	13.15	0.11	13.26	360.14
汀江	11 802	112.185	30.39	27.83	0.22	28.06	237.73
梅潭河	1 603	14.717	23.98	2.88	0.02	2.90	181.18
韩江	29 077	262.7	33.92	72.75	0.58	73.33	252.20
黄河 <sup>[26]</sup>	750 000	580.2				1 080	144
长江 <sup>[4, 26]</sup>	1 830 000	9 200				11 040	611
世界 <sup>[4]</sup>	101 000 000	374 000		123 000	87 000	240 000	246

### 3.4 韩江流域岩石化学风化速率

根据前面对韩江流域水化学的因子分析, 在扣除河水中由大气 CO<sub>2</sub> 形成的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量、人为污染产生的 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子含量后, 剩余溶解质来自于岩石的化学风化作用, 结合韩江及各主要支流的多年平均径流量和流域面积, 估算韩江流域的化学风化率 (见表 7)。

韩江流域的化学风化率为 54.11 t/(km<sup>2</sup>·a), 高于我国黄河流域的化学风化率 (33.6 t/(km<sup>2</sup>·a)), 低于长江流域的化学风化率 (85 t/(km<sup>2</sup>·a)), 比世界平均化学风化率 (36 t/(km<sup>2</sup>·a)) 高。在韩江各主要支流中, 化学风化率最高的是宁江 140.5 t/(km<sup>2</sup>·a), 其次是石窟河 71.2 t/(km<sup>2</sup>·a), 其他支

流再依次递减汀江 52.39 t/(km<sup>2</sup>·a), 五华河 51.02 t/(km<sup>2</sup>·a), 梅潭河 38.04 t/(km<sup>2</sup>·a)。各支流中宁江流域化学风化率较大, 主要是因为其流域内白垩系碎屑岩中含有石膏, 且分布有较大面积的碳酸盐岩, 易被溶蚀的原因。

## 4 结 论

通过对韩江流域河水溶解质化学组成的分析, 得出如下结论:

1) 韩江流域河水中溶质浓度较低, 河水化学组成以 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 为主, 其次是 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Na<sup>+</sup>, 水化学类型为重碳酸盐钙组 II 型水; 河水离子成分主要来源于岩石的风化释放, 其中蒸发盐岩对河水离子的贡献率较高, 达 33.4%, 碳酸盐岩对韩

表7 韩江流域化学风化率

Table 7 The chemistry weathering rates along the Hanjiang river basin

流 域	流域面积 km <sup>2</sup>	多年平均径流量 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> )	TDS	TDS <sup>1)</sup>	化学风化率 (t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
			(mg · L <sup>-1</sup> )		
琴江	1 578	14. 4	65. 05	46. 44	42. 38
五华河	1 832	14. 735	89. 41	63. 43	51. 02
宁江	1 423	11. 445	238. 45	174. 69	140. 5
石窟河	3 681	34. 158	113. 21	77. 80	72. 2
汀江	11 802	112. 185	77. 55	55. 12	52. 39
梅潭河	1 603	14. 717	63. 47	41. 43	38. 04
韩江	29 077	262. 7	83. 78	59. 89	54. 11
黄河 <sup>[26]</sup>	750 000	580. 2			33. 6
长江 <sup>[4]</sup>	1 830 000	9 200			85
世界 <sup>[4]</sup>	101 000 000	374 000			36

1) 扣除污染及大气 CO<sub>2</sub>

江河水的溶质贡献率为 27.7%，硅酸盐岩风化对河水溶质贡献率为 10.5%，大气 CO<sub>2</sub> 对河流中溶解质的贡献率为 20.2%。

2) 韩江流域河水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 有 50.2% 来自大气 CO<sub>2</sub>，岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗量达 73.33 × 10<sup>8</sup> mol/a，各主要支流中汀江、石窟河、宁江、五华河、梅潭河化学风化消耗大气 CO<sub>2</sub> 的量分别为 28.08 × 10<sup>8</sup>，13.26 × 10<sup>8</sup>，10.22 × 10<sup>8</sup>，5.17 × 10<sup>8</sup> 和 2.90 × 10<sup>8</sup> mol/a。韩江流域岩石化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗率为 252.2 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup> · a)；各主要支流中，化学风化对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗率最高的是宁江，为 718.55 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup> · a)，其次是石窟河，为 360.14 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup> · a)，第三是五华河，为 282.04 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup> · a)，第四是汀江，为 237.73 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup> · a)，第五为梅潭河，为 181.18 × 10<sup>3</sup> mol/(km<sup>2</sup> · a)。

3) 扣除大气 CO<sub>2</sub> 贡献的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和污染产生的 Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子含量，韩江流域的平均化学风化率为 54.11 t/(km<sup>2</sup> · a)；在韩江各主要支流中，化学风化率最高的是宁江，为 140.5 t/(km<sup>2</sup> · a)，其次是石窟河，为 71.2 t/(km<sup>2</sup> · a)，第三是汀江，为 52.39 t/(km<sup>2</sup> · a)，第四是五华河，为 51.02 t/(km<sup>2</sup> · a)，最少的是梅潭河，为 38.04 t/(km<sup>2</sup> · a)。

#### 参考文献:

- [1] FRANCE-LANORD C, DERRY L A. Organic carbon burial forcing of the carbon cycle from Himalayan erosion [J]. *Nature*, 1997, 390(6655): 65 - 67.
- [2] SUCHET P A, PROBST J L. Modeling of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical weathering of rocks: Appli-

cation to the Garonne, Congo and Amazon basins [J]. *Chemical Geology*, 1993, 107(3/4): 205 - 210.

- [3] SUCHET P A, PROBST J L. A global model for Present-day atmospheric/soil CO<sub>2</sub> consumption by chemical erosion of continental rocks [J]. *Tellus*, 1995, 47B: 273 - 280.
- [4] GAILLARDET J, DUPRE 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(1-4): 3 - 30.
- [5] MEYBECK M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. *American Journal of Science*, 1987, 287: 401 - 428.
- [6] GAILLARDET J, DUPRE B, ALLEGRE C J. A global geochemical mass budget applied to the Congo basin rivers; Erosion rates and continental crust composition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(17): 3469 - 3485.
- [7] GAILLARDET J, DUPRE B, ALLEGRE C J. Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(23/24): 4037 - 4051.
- [8] DATTA D K, SUBRAMANIAN V. Nature of solute loads in the rivers of the Bengal drainage basin, Bangladesh [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 198(1-4): 196 - 208.
- [9] BOEGLIN J, PROBST J. Physical and chemical weathering rates and CO<sub>2</sub> consumption in a tropical lateritic environment; the upper Niger basin [J]. *Chemical Geology*, 1998, 148(3/4): 137 - 156.
- [10] POKROVSKY O S, SCHOTT J. Iron colloids/organic matter associated transport of major and trace elements in small boreal rivers and their estuaries (NW Russia)

- [J]. *Chemical Geology*, 2002, 190(1-4): 141-179.
- [11] 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 CO<sub>2</sub> consumption in the Himalaya[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3397-3416.
- [12] MORTATTI J, PROBST J. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations[J]. *Chemical Geology*, 2003, 197(1-4): 177-196.
- [13] YANG S, JUNG H, LI C. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins; geochemical evidence from river sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 164(1/2): 19-34.
- [14] RIEBE C S, KIRCHNER J W, FINKEL R C. Erosional and climatic effects on long-term chemical weathering rates in granitic landscapes spanning diverse climate regimes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(3-4): 547-562.
- [15] RIEBE C S, KIRCHNER J W, FINKEL R C. Sharp decrease in long-term chemical weathering rates along an altitudinal transect[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 218(3/4): 421-434.
- [16] DAS A, KRISHNASWAMI S, BHATTACHARYA 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] HREN M T, CHAMBERLAIN C P, HILLEY G E, et al. Major ion chemistry of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra river; Chemical weathering, erosion, and CO<sub>2</sub> consumption in the southern Tibetan plateau and eastern syntaxis of the Himalaya[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(12): 2907-2935.
- [18] PAWAN KUMAR JHAA B J T U. Chemical weathering and associated CO<sub>2</sub> consumption in the Godavari river basin, India[J]. *Chemical Geology*, 2009, 264(1-4): 364-374.
- [19] HARTMANN J. Bicarbonate-fluxes and CO<sub>2</sub>-consumption by chemical weathering on the Japanese Archipelago - Application of a multi-lithological model framework[J]. *Chemical Geology*, 2009, 265(3/4): 237-271.
- [20] STEVEN T. GOLDSMITHA B A E C. Stream geochemistry, chemical weathering and CO<sub>2</sub> consumption potential of andesitic terrains, Dominica, Lesser Antilles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(1): 85-103.
- [21] BLUTH G J S, KUMP L R. Lithologic and climatologic controls of river chemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1994, 58(10): 2341-2359.
- [22] JEAN-SéBASTIEN MOQUETA A C J V. Chemical weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Andean and Foreland Amazon basins[J]. *Chemical Geology*. 2011, 287: 1-26.
- [23] HU MING-HUI R F S J. Major ion chemistry of some large Chinese rivers[J]. *Nature*, 1982, 298(5): 550-553.
- [24] 李晶莹, 张经. 流域盆地的风化作用与全球气候变化[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 411-419.
- [25] 李晶莹, 张经. 中国主要流域盆地风化剥蚀率的控制因素[J]. *地理科学*, 2003, 23(4): 434-440.
- [26] 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.
- [27] 邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 等. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算[J]. *地球科学 - 中国地质大学学报*, 2004, 29(2): 177-190.
- [28] 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.
- [29] 吴卫华, 杨杰东, 徐士进. 青藏高原化学风化和对大气 CO<sub>2</sub> 的消耗通量[J]. *地质论评*, 2007, 53(4): 515-528.
- [30] 秦建华, 冉敬, 杜谷. 青藏高原东部长江流域盆地陆地化学风化研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2007, 27(4): 1-6.
- [31] 秦建华. 青藏高原东部长江流域盆地地表化学剥蚀通量剥蚀速率大气 CO<sub>2</sub> 净消耗率研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 2008((01)): 1-6.
- [32] 张龙军, 温志超. 黄河流域硅酸盐风化的讨论[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009(5): 988-994.
- [33] QUANZHOU GAO Z T X H. Chemical weathering and CO<sub>2</sub> consumption in the Xijiang River basin, South China[J]. *Geomorphology*, 2009, 106(3/4): 324-332.
- [34] 陶贞, 高全洲, 王振刚, 等. 湿热山地丘陵流域化学风化过程的碳汇估算[J]. *科学通报*, 2011, 56(26): 2188-2197.
- [35] 翟大兴, 杨忠芳, 柳青青, 等. 鄱阳湖流域岩石化学风化特征及 CO<sub>2</sub> 消耗量估算[J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 169-181.
- [36] 张龙军, 王宝森, 薛明, 等. 黄河流域硅酸盐风化的讨论(2)——流域耗水量对化学风化消耗大气 CO<sub>2</sub> 的贡献[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2011,

41(4): 109 – 115.

- [37] 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队主编. 广东山区水资源[M]. 广州: 广东科技出版社, 1990: 1 – 7.
- [38] 广东省地方志编纂委员会编. 广东省志. 地理志[M]. 广州: 广东人民出版社, 1999: 198 – 200.
- [39] 曾昭璇, 黄伟峰 主编. 广东自然地理[M]. 广州: 广东人民出版社, 2001: 178 – 181.
- [40] 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 CO<sub>2</sub> consumption in the Himalaya[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3397 – 3416.
- [41] HUH Y, TSOI M, ZAITSEV A, ET AL. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia: I. tributaries of the Lena River draining the sedimentary platform of the Siberian Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica*

*Acta*, 1998, 62(10): 1657 – 1676.

- [42] 陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 74 – 85.
- [43] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2006: 180 – 181.
- [44] MEYBECK MICHEL C D H R. Global fresh water quality: A first assessment[M]. Oxford: Blackwell Reference, 1989: 306.
- [45] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170: 1088 – 1090.
- [46] 周光益, 田大伦, 杨乐苏, 等. 广州流溪河降水化学成分及其海洋源分析[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 4924 – 4933.
- [47] AMIOTTE-SUCHET P A, PROBST J L. Modelling of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins[J]. *Chem Geol*, 1993, 107: 205 – 210.

(上接第116页)

#### References:

- [1] JAEGER K E, GRAF F. The control of flowering in time and space[J]. *J Exp Bot*, 2006, 57(13): 3415 – 3418.
- [2] KOMEDA Y. Genetic regulation of time to flower in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2004, 55: 521 – 535.
- [3] QUAIL P H. Phytochrome photosensory signalling networks[J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2002, 3(2): 85 – 93.
- [4] CHEN M, GALVAO R M, et al. Arabidopsis HEMERA/pTAC12 initiates photomorphogenesis by phytochromes[J]. *Cell*, 2010, 141(7): 1230 – 1240.
- [5] ENDO M, NAGATANI A. Flowering regulation by tissue specific functions of photoreceptors[J]. *Plant Signal Behav*, 2008, 3(1): 47 – 48.
- [6] BRIGGS W R, CHRISTIE J M. Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors[J]. *Trends Plant Sci*, 2002, 7(5): 204 – 210.
- [7] CASHMORE A R, JARILLO J A. Cryptochromes: blue light receptors for plants and animals[J]. *Science*, 1999, 284(5415): 760 – 765.
- [8] LI Q H, YANG H Q. Cryptochrome signaling in plants[J]. *Photochem Photobiol*, 2007, 83(1): 94 – 101.
- [9] LIU L J, ZHANG Y C. COP1-mediated ubiquitination of CONSTANS is implicated in cryptochrome regulation of flowering in *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell*, 2008, 20(2): 292 – 306.
- [10] CERDAN P D, CHORY J. Regulation of flowering time by light quality[J]. *Nature*, 2003, 423(6942): 881 – 885.
- [11] JANG S, MARCHAL V. Arabidopsis COP1 shapes the temporal pattern of CO accumulation conferring a photoperiodic flowering response [J]. *EMBO J*, 2008, 27(8): 1277 – 1288.
- [12] KANG C Y, LIAN H L. Cryptochromes, phytochromes, and COP1 regulate light-controlled stomatal development in *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell*, 2009, 21(9): 2624 – 2641.
- [13] REED J W, NAGPAL P. Mutations in the gene for the red/far-red light receptor phytochrome B alter cell elongation and physiological responses throughout *Arabidopsis* development[J]. *Plant Cell*, 1993, 5(2): 147 – 157.
- [14] MOGLICH A, YANG X. Structure and function of plant photoreceptors[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2010, 61: 21 – 47.
- [15] CHIU F Y, CHEN Y R. Electrostatic interaction of phytychromobilin synthase and ferredoxin for biosynthesis of phytyochrome chromophore[J]. *J Biol Chem*, 2010, 285(7): 5056 – 5065.
- [16] KOHCHI T, MUKOUGAWA K. The Arabidopsis HY2 gene encodes phytychromobilin synthase, a ferredoxin-dependent biliverdin reductase[J]. *Plant Cell*, 2001, 13(2): 425 – 436.
- [17] VOSS I, KOELMANN M. Knockout of major leaf ferredoxin reveals new redox-regulatory adaptations in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Physiol Plant*, 2008, 133(3): 584 – 598.
- [18] JEONG S, CLARK S E. Photoperiod regulates flower meristem development in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Genetics*, 2005, 169(2): 907 – 915.