

文章编号: 1008-2786-(2016)5-571-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000164

梅州山地化学风化过程及其碳汇效应

郑伟¹ 林培松¹ 高全洲^{1,2*}

(1. 中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室 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)

摘 要: 根据梅州山地丘陵区地表径流的化学组成,应用物质平衡法和扣除法进行化学风化过程中 CO_2 吸收通量的估算。结果表明:在硅酸盐岩分布面积为 84% 的湿热梅州山地丘陵区,河水总溶解性物质含量均值为 41.58 mg/L,远低于世界河流平均值。河水离子组成以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 以及溶解性硅(DSi)为主。岩石化学风化过程和大气降水作用对流域水化学特征的影响最为显著,其中硅酸盐岩的风化作用对水体离子的贡献率为 81.46%~86.03%;大气降水对水体离子的贡献率为 10.86%;碳酸盐矿物化学风化作用的贡献仅为 5% 左右。岩石化学风化过程对大气 CO_2 的吸收通量为 $(3.46 \sim 5.26) \times 10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,高于全球平均值 $2.46 \times 10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,说明北半球亚热带季风山区的表生地质作用构成全球碳汇的一个重要组成部分。

关键词: 化学风化;碳汇;侵蚀介质;硅酸盐矿物;山地丘陵

中图分类号: P512.1 P595

文献标志码: A

陆地岩石的化学风化作用可从大气中吸收大量 CO_2 ,构成全球碳循环的一个重要碳吸收环节^[1-2]。不同化学性质的岩石风化过程对大气 CO_2 的吸收量存在差异^[3]。碳酸盐岩出露较广泛的流域化学风化过程对大气 CO_2 吸收通量相对较高,而硅酸盐岩为主的流域岩石风化过程对大气 CO_2 吸收通量相对较低^[4-6]。但岩石的化学风化过程对 CO_2 的吸收通量不仅受岩石化学性质的影响,水热条件、土壤酸度等因素也造成了不同地域岩石化学风化过程对 CO_2 吸收通量的空间异质性^[7]。

在我国亚热带湿热地区,由于地表岩石性质、水热条件以及人类活动影响的差别,岩石化学风化的速率及其对 CO_2 的吸收通量不同。已有研究结果表明,虽然碳酸盐岩出露较广泛的西江流域以及青

藏高原东部边缘的一些以碳酸盐岩出露为主的流域,地质碳汇效应较为明显,但以硅酸盐岩为主的增江流域和东江流域的化学风化过程所构成的地质碳汇也不可忽视^[8-11]。

粤东梅州山地丘陵区碳酸盐岩出露面积小,但是,受分布密度较高的客家人农业生产方式的影响,历史上土地开发强度大,水土流失曾经很严重,是典型的“五华型”崩岗地貌过程的发生地。本研究以河流水体的化学组成为研究对象,通过物质平衡法和扣除法,探讨梅州山地丘陵区河流化学径流的来源,并据此估算流域化学风化过程对 CO_2 的吸收通量,从而揭示亚热带湿热季风山区的表生地质作用在全球碳循环中的意义。

收稿日期(Received date): 2015-06-05; 改回日期(Accepted): 2016-01-22。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41340019, 41071054); 广东省自然科学基金重点项目(2014A030311003)。[National Natural Science Foundation of China (41340019, 41071054), and Natural Science Foundation of Guangdong Province(2014A03031103).]

作者简介(Biography): 郑伟(1990-),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事全球变化与碳循环研究。[Zheng Wei(1990-), male, born in Yichang, Hubei Province, M. Sc candidate, major in global changes and carbon cycle.] E-mail: sysuzhengw@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 高全洲(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事全球变化与碳循环研究。[Gao Quanzhou(1965-), male, professor, engaged in the study of global changes and carbon cycle.] E-mail: eesgqz@mail.sysu.edu.cn

1 流域概况

研究区以低山、丘陵为主,为梅江水系的一部分,位于广东省东北部梅州市附近,地理位置界于 $115^{\circ}18' \sim 116^{\circ}56'E$ 、 $23^{\circ}23' \sim 24^{\circ}56'N$ 之间。莲花山脉主体以花岗岩和砂砾岩为主,莲花山脉以西主要由中酸性侵入岩、碎屑岩及部分浅变质岩组成(图1)。研究区属于亚热带湿热季风气候,常年湿热多雨,年均气温为 $21.2^{\circ}C$,年均降雨量为 1485.2 mm ,有明显的干湿季节之分^[12]。土壤类型主要包括赤红壤、紫色土、冲积土和耕作土壤等。植被为亚热带季风常绿针、阔叶混交林。由于历史上多次砍伐的影响,现存的多为次生林、人工林或残林^[13]。区域河网密集,水系发达。

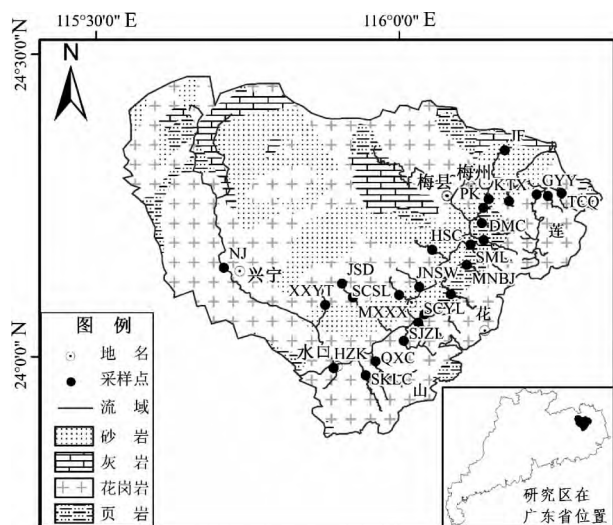


图1 梅州山地丘陵区岩性及采样点分布图

Fig. 1 Distribution of the lithology and sampling sites around the Meizhou City

2 材料和方法

2.1 采样

选取梅江中游水系25个控制断面,于2010年7月(丰水期)和2011年1月(枯水期)对表层水进行采样分析。采样点远离城镇水污染区,样品能准确反映河流的自然化学组成。

2.2 分析测试

现场使用 Myron L 公司生产的6P型便携式电导率仪测得pH值、水温、电导率、总溶解固体(TDS)和氧化还原电位,测量精度分别为 ± 0.01 、 \pm

$0.1^{\circ}C$ 、 $\pm 0.01\text{ }\mu\text{S/cm}$ 、 $\pm 0.01\text{ mg/L}$ 和 $\pm 1\text{ mV}$ 。采集样品密闭避光保存带回实验室,通过微孔孔径为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)减压过滤。滤液分为四份,一份滤液中加入1滴饱和 HgCl_2 溶液以抑制水样中微生物的活动,用来测定溶解有机碳(DOC)含量。DOC含量用TOC-V型总有机碳分析仪(日本岛津公司生产)测定,精度可达 0.0001 mg/L ;一份用来滴定碱度,将Digital Burette III型数字滴定仪和pH计相结合,用稀盐酸滴定法测定滤液的总碱度,用以代表 HCO_3^- 含量,滴定终点pH值是4.30;一份用来测定主要离子和DSi等元素的含量,阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+)和阴离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-})含量用ICS-900型离子色谱仪(美国DIONEX公司生产)进行测定,溶解性Si、Sr、Ba、Al、Mn和Fe含量用IRIS(HR)型全谱直读等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES,美国TJA公司生产)测定,水样各种离子和溶解性Si含量的测试精度均优于0.5%。除须马上分析的样品外,其他均放入冰箱在 $4^{\circ}C$ 条件下密封保存待测。离子含量分析在采样之后1周内完成。

本研究以实地采样分析所得的数据(表1)为主,同时结合梅州市水文局、气象局提供的水文气象资料,对水化学特征与化学风化过程 CO_2 消耗等进行综合分析。数据处理和统计分析采用SPSS19和Excel2013分析软件。制表制图主要采用Origin7.5、PowerPoint2013、CoreldrawX6等软件。

3 结果

梅州山地丘陵区1月的水体温度变化于 $9.8^{\circ}C \sim 14.6^{\circ}C$ 之间,均值为 $11.6^{\circ}C$;7月水温变化于 $22.5^{\circ}C \sim 30.2^{\circ}C$ 之间,均值为 $27^{\circ}C$ 。研究区水温的升降响应于太阳辐射以及大气温度环境的变化。1月水体的pH值在 $6.03 \sim 8.54$ 之间,均值为7.14;7月pH值在 $6.38 \sim 7.32$ 之间,均值为6.88。1月水体pH值稍高于7月,水体pH值的变化响应于降水量的季节变化和地下水的补给。

河水TDS均值为 41.58 mg/L ,水体矿化度远低于世界平均值 100 mg/L ^[14]。研究区河流主要阳离子 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 分别占阳离子总含量25.07%、16.13%和8.47%。样品中优势阴离子为 HCO_3^- ,占阴离子总含量35.37%。 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 在阴离子中所占的比例有7.29%和1.96%, Cl^- 的占比达到

7.88%。研究区河流主要离子按所占份额排序依次为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ 。1月DSi的含量在 $106.50 \mu\text{mol/L} \sim 467.50 \mu\text{mg/L}$ 之间,平均浓度为 $224.95 \mu\text{mol/L}$; 7月DSi的含量介于 $109.13 \mu\text{mol/L} \sim 406.62 \mu\text{mol/L}$ 之间,平均为 $209.93 \mu\text{mol/L}$,DSi 全年平均含量占水体离子总量的 20.75%。所有离子的 7 月当量浓度略低于 1 月。

河水水化学分析数据可信与否,可以通过比较水体中无机正负电荷平衡性来判断^[15]。假设梅州山地丘陵区水体中阳离子总量 $\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + 2\text{Ca}^{2+}$,阴离子总量 $\text{TZ}^- = \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + 2\text{SO}_4^{2-}$ ^[16]。通过分析河流样品水化学指数 NICB (normalized inorganic charge balance) 可知,研究区河流 NICB 值的范围是 $-5.41\% \sim 8.27\%$ 。水样中目标阴离子的含量较阳离子略多。虽然个别采样断面存在不明离子影响导致数据明显偏离的情况,但是总体阴阳离子之差在研究误差允许范围内,采样数据可信。

4 讨论

4.1 河水 pH

梅州山地丘陵区河水 pH 值在 $6.03 \sim 8.54$ 之间,均值为 6.98,接近中性。我国南亚热带滨海的花岗岩丘陵地区河水 pH 在 $5.2 \sim 7.2$ 之间,平均值 $6.5^{[17]}$ 。内陆的赣江上游花岗岩风化壳区域河水 pH 值在 $5.99 \sim 7.61$ 之间,平均值为 $7.10^{[18]}$ 。位于我国中部第二级阶梯以碳酸盐岩出露为主的乌江流域水样具有较高的 pH 值 ($7.61 \sim 8.94$, 平均 8.4),呈弱碱性,与本研究区域存在明显差异^[19]。本研究区域碳酸盐岩分布极为有限且地处亚热带湿热季风区,土壤的发育过程受高温多雨因素的影响,盐基离子流失严重,使得土壤偏酸性。同时,研究区植被发育好,河流沿岸和山区广泛分布河流草甸和低山草地,地表泥炭层较为发育,土壤中的微生物活动性强,植被凋落物的腐化以及泥炭沼泽的分解,产生大量有机酸,对水体 pH 值亦有影响。

4.2 水化学成份来源

在理论上,天然河水化学径流主要来源于流域内岩石的化学风化过程、大气降水携带的海盐沉降以及流域内蒸发岩的溶解三种途径^[20-21]。根据 Gibbs 图判断(图 2),本研究区河水化学组成明显偏

向“流域岩石风化型”,同时也受大气降水的影响。因此,本文对河流水化学成分来源的分析将分为大气降水作用和流域岩石的化学风化作用两个方面。

4.2.1 大气降水对河水化学性质的贡献

人类活动对流域中 Cl^- 的贡献很微小,可以认为流域中 Cl^- 来源于大气降水和蒸发岩溶解两种途径^[22]。梅州山地丘陵区河水 Gibbs 图表明蒸发岩溶解作用对流域化学径流影响作用十分微弱(图 2),因此利用 Cl^- 进行海盐校正就能准确估算大气降水对流域水化学性质的贡献。

假设研究区河流径流量完全受控于流域的降水量和蒸发量。在此引入 $(\text{Cl}^-)_{\text{max}}$ 即氯离子参考值^[17]的概念,它代表了大气降水对河水中 Cl^- 的最大输送浓度,计算方法为:

$$(\text{Cl}^-)_{\text{max}} = F (\text{Cl}^-)_{\text{rain}} \quad (1)$$

因子 F 代表流域水分蒸发蒸腾损失量,定义为: $F = P / (P - E)$ 。其中 P 为流域年均降水量 (mm),E 为流域年均陆面蒸发量 (mm); $(\text{Cl}^-)_{\text{rain}}$ 代表大气降水中 Cl^- 的摩尔浓度。

根据梅州山地丘陵区的降水量、多年平均径流深资料, F 值大约为 1.83。

粤东大气降水中 Cl^- 平均浓度 $15.51 \mu\text{mol/L}^{[18]}$,据此估算出大气降水中 Cl^- 向河水的最大输入量 $(\text{Cl}^-)_{\text{max}}$ 为 $28.38 \mu\text{mol/L}$,换算成质量浓度为 1.01 mg/L 。

大气降水对流域 i 离子的贡献率计算公式为:

$$(i) \% = 100 [i / \text{Cl}^-]_0 (\text{Cl}^-)_{\text{max}} / (i)_r \quad (2)$$

其中, $[i / \text{Cl}^-]_0$ 为海水中 i 离子与 Na^+ 的摩尔浓度比值, $(\text{Cl}^-)_{\text{max}}$ 为大气降水中 Cl^- 对流域河水的最大输入量, $(i)_r$ 为实测 i 离子在流域中的摩尔浓度。

经由公式 (1)、(2) 以及表 2 中其他离子的数据资料,计算得到梅州山地丘陵区大气降水对河水中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的贡献率分别占其离子总浓度的 13.80%、1.03%、0.65%、10.50% 和 6.31%。大气降水对流域水体 Cl^- 贡献率 $(\text{Cl}^-) \%$ 为 32.89%。平均之后得出,流域大气降水对河水化学径流的贡献为 10.86%。

相比全球其他地区(表 3),梅州山地丘陵区河水受大气降水伴随海盐沉降作用的影响偏大。研究区毗邻南海,受来自海洋的暖湿季风气流影响明显,大气降水作用对水体化学特征的贡献率为 10.86%,主要表现在对 Cl^- 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的输送作

表 1 研究区采样点水化学组成
Tab. 1 Chemical composition of surface water in Meijiang River

编号	T/°C	pH	Na ⁺ /(μmol/L)	Mg ²⁺ /(μmol/L)	Ca ²⁺ /(μmol/L)	Si /(μmol/L)	NO ₃ ⁻ /(μmol/L)	SO ₄ ²⁻ /(μmol/L)	HCO ₃ ⁻ /(μmol/L)	TZ ⁺	TZ ⁻	电导率 /(μC/cm)
TF	11.1/22.5	8.09/7.32	136.80/124.88	71.20/65.10	99.85/105.71	279.40/272.03	21.46/15.04	19.36/18.83	419.02/415.00	737.93/582.64	751.24/586.87	40.19/39.25
BEQ	10.6/25.5	6.83/7.14	103.32/80.64	73.31/33.63	168.67/90.58	192.73/177.07	19.85/20.37	95.71/19.04	412.50/296.69	858.59/458.66	907.01/482.49	60.77/32.47
BECP	10.4/26.4	6.93/6.70	64.20/52.85	49.54/39.29	108.80/90.64	139.32/125.37	7.22/7.33	23.31/16.55	312.63/274.85	640.16/423.82	634.10/428.96	36.54/28.56
GY	11.9/28.5	6.51/6.38	138.83/112.28	74.04/67.13	317.43/242.34	164.46/170.62	26.45/35.47	46.93/38.02	809.81/600.66	1 212.11/878.64	1 277.87/897.71	89.93/68.24
XYLK	11.9/26.6	6.63/6.79	101.98/56.78	48.09/30.33	246.45/177.59	160.97/166.78	23.09/6.61	19.02/13.31	677.37/409.54	1 011.88/581.71	1 036.44/559.27	70.16/40.62
KTX	11.8/24.0	8.54/7.20	21.63/34.07	22.55/47.95	60.93/147.13	134.55/131.56	12.80/24.35	21.20/23.58	149.80/362.22	458.53/551.78	461.41/544.47	19.21/36.19
PK	9.8/25.3	8.16/6.82	17.14/19.96	25.48/20.80	53.05/40.02	106.50/109.13	13.72/11.18	15.06/11.21	130.26/120.13	434.32/251.49	436.88/261.72	16.87/14.57
XMSK	11.2/25.5	7.75/6.64	94.12/76.48	33.82/35.17	87.74/92.04	204.13/159.58	15.54/15.13	21.95/17.86	275.73/274.85	604.20/444.50	611.09/448.00	28.36/32.72
DMC	11.0/27.0	6.89/6.74	104.67/79.94	50.10/43.37	151.47/115.62	203.66/161.26	16.72/8.80	25.40/19.36	458.10/354.94	795.93/529.74	823.07/532.20	43.56/41.32
SML	12.6/27.1	6.90/7.03	446.51/120.68	122.45/56.99	407.72/183.16	241.62/186.64	51.33/21.31	58.63/32.12	1 376.46/513.29	1 836.70/752.49	1 934.57/774.10	125.20/63.44
MBNJ	11.5/25.0	7.14/7.01	83.78/67.34	52.29/48.81	107.90/103.62	155.03/143.99	21.26/28.54	20.84/19.43	334.34/294.87	693.00/507.60	719.20/513.92	34.46/39.74
MBNL	10.9/27.1	6.90/6.82	65.78/50.65	54.36/43.02	142.19/95.64	147.98/112.94	24.90/26.00	25.31/20.82	414.67/260.29	745.78/455.84	795.78/478.79	40.39/34.21
SCSL	12.8/27.2	6.18/6.85	341.11/292.94	46.43/63.69	125.69/169.24	439.02/318.17	11.99/28.28	36.90/35.95	586.19/686.21	1 084.66/1 046.95	1 054.41/1 029.47	71.67/90.84
SCZX	12.5/28.9	6.03/6.90	132.71/107.78	65.83/66.36	166.27/172.21	188.85/151.25	19.85/28.08	33.57/33.14	440.73/453.23	909.52/762.68	899.36/772.52	54.82/64.09
SYL	11.6/26.9	6.24/6.93	167.38/123.46	53.23/53.60	99.42/100.80	277.83/200.32	14.31/18.01	26.89/25.89	362.57/360.40	787.07/597.05	761.27/622.65	42.61/46.48
SHZL	13.5/29.3	6.82/7.02	166.42/116.73	53.47/47.50	167.02/131.08	220.90/193.84	13.12/11.31	36.13/26.34	471.12/387.70	930.21/643.84	921.53/648.21	54.96/50.47
QXC	11.7/28.3	6.97/7.14	265.79/200.59	65.41/61.93	223.97/199.52	284.13/212.21	33.60/29.79	43.81/52.51	662.18/562.44	1 201.26/955.82	1 221.20/989.31	78.49/82.87
SKLC	11.1/27.5	7.21/6.88	185.78/164.45	38.38/43.65	102.99/112.74	295.92/217.66	28.31/22.20	22.11/22.09	375.60/380.42	826.10/673.68	824.14/673.14	46.67/53.11
BZK	11.8/27.6	7.33/6.98	292.25/291.41	58.60/75.51	163.98/193.69	225.85/217.69	38.94/32.55	37.81/40.28	733.82/879.15	1 306.38/1 322.82	1 304.64/1 349.33	89.38/115.10
XXYT	14.6/26.7	7.02/6.65	222.13/215.47	40.94/45.79	135.23/173.74	239.98/319.81	26.06/31.99	45.03/59.41	421.19/502.37	993.95/931.56	995.79/975.78	61.62/77.07
MXXX	12.3/27.1	7.41/6.61	296.19/285.51	39.51/43.46	163.22/162.64	467.50/347.01	17.34/16.51	31.98/38.27	610.07/597.02	1 139.91/1 007.33	1 124.17/1 027.20	71.54/82.60
JGD	10.9/30.2	8.05/6.54	214.40/134.63	16.28/8.76	72.88/36.26	399.85/266.61	4.11/0	20.07/18.50	373.42/243.91	794.08/437.80	753.68/449.19	43.11/27.01
HSC	9.89/27.9	7.14/7.02	203.70/182.75	84.66/91.62	235.76/286.11	261.77/201.06	37.68/40.73	48.37/70.63	660.01/729.90	1 268.87/1 227.37	1 266.77/1 263.17	84.91/98.47
JNSW	10.0/27.7	7.21/6.97	222.55/214.09	37.44/43.88	155.94/176.30	359.97/359.97	28.03/21.62	28.80/70.18	542.77/566.08	1 044.63/996.49	1 047.98/1 048.19	65.33/77.78
NJ	12.3/29.7	7.68/6.82	1 032.87/538.59	190.90/191.97	606.91/574.46	221.43/194.44	52.48/29.88	471.60/456.51	1 543.63/1 088.47	3 135.31/2 373.35	3 316.71/2 523.46	267.10/235.30
平均值	11.6/27.0	7.14/6.88	204.88/149.80	58.73/54.77	174.86/158.92	240.53/204.68	23.21/21.24	51.03/47.99	542.16/464.59	1 018.04/775.83	1 035.21/795.20	65.51/62.90
标准差	1.48/1.75	0.20/0.22	113.36/113.48	33.43/33.50	103.81/104.40	70.16/71.55	10.08/10.16	86.52/86.73	216.78/217.02	428.34/430.23	454.41/456.47	43.73/44.01

*表中“/”之前数据为2011年1月采集数据，“/”之后为2010年7月采集数据。

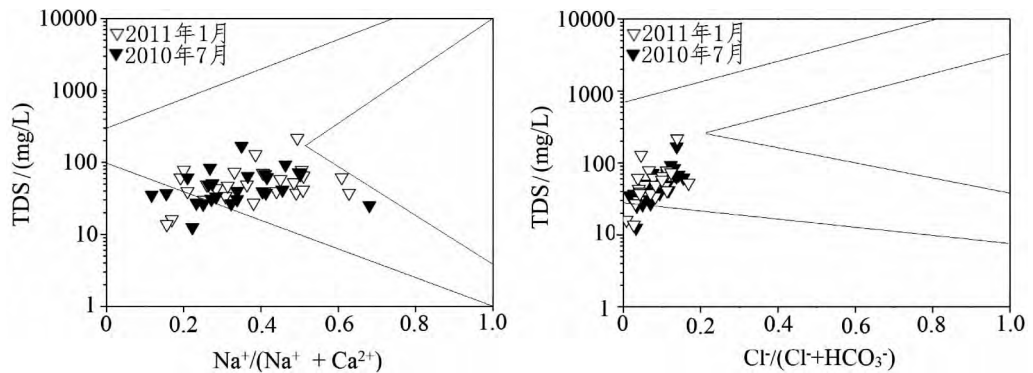


图 2 梅州山地丘陵区河水化学成分的 Gibbs 图

Fig. 2 Gibbs diagram for river water in the Meijiang River

表 2 海水中主要离子与 Cl⁻ 的摩尔浓度比值

Tab. 2 Molar concentration of the major ions in the sea water

离子摩尔浓度比值	Na ⁺ / Cl ⁻	K ⁺ / Cl ⁻	Ca ²⁺ / Cl ⁻	Mg ²⁺ / Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻
海水(Grosbois et al 2000) ^[20]	0. 86	0. 02	0. 04	0. 21	0. 11

用上,远大于全球陆地河水化学径流中海盐的平均贡献值 3%^[23]。处于研究区周边的五华河流域、赣江上游地区大气降水对河水溶解质的贡献率分别为 12%、11.5%,与本项研究结果相当。

表 3 部分区域大气降水对河水中主要离子的相对贡献率

Tab. 3 Relative portion of precipitation to the major ions in the river water / %

流域	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
本研究区	13. 80	1. 03	0. 65	10. 50	32. 89	6. 31
恒河 ^[15]	1. 70	2. 20	27. 0	1. 30	100	1. 60
亚马逊河 ^[24]	0. 10	1. 30	6. 90	0. 40	17. 60	3. 60
全球平均 ^[25]	6. 0	19. 0	53. 0	27. 0	72. 0	42. 0

4. 2. 2 流域岩石风化对河水化学组成的贡献

由图 3 可知,当流域水体中阳离子总量 $TZ^+ = Na^+ + 2Mg^{2+} + K^+ + 2Ca^{2+}$ 、阴离子总量 $TZ^- = HCO_3^- + Cl^- + NO_3^- + 2SO_4^{2-}$ 时,梅州山地丘陵区的地表径流中 TZ^+ 与 TZ^- 呈显著线性正相关关系 ($R^2 = 0.987$),表明流域水化学组成大部分来源于岩石风化侵蚀过程和大气降水过程,受其他因素影响较小;而当阳离子总量 $TZ^+ = Na^+ + 2Mg^{2+} + K^+ + 2Ca^{2+}$ 、阴离子总量 $TZ^- = HCO_3^- + Cl^-$ 时, TZ^+ 和 TZ^- 点偏向 TZ^+ 集聚,表现出极大的平衡趋势但是与平衡线存在偏差。极大的平衡趋势说明 CO_2 是流域化学风化过程中的主要侵蚀介质,而大气降水伴随的海盐沉降作用也十分明显。偏差表明 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 对流域水化学组成的贡献率不容忽视,硫酸和硝酸参与了流域岩石的化学风化。

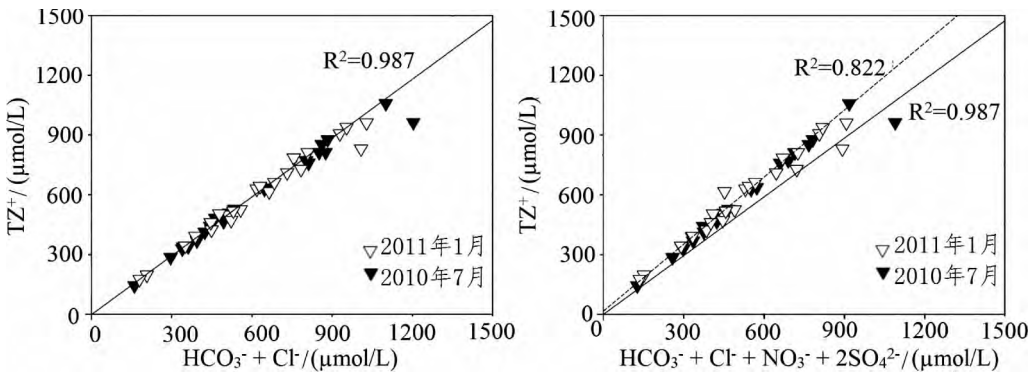
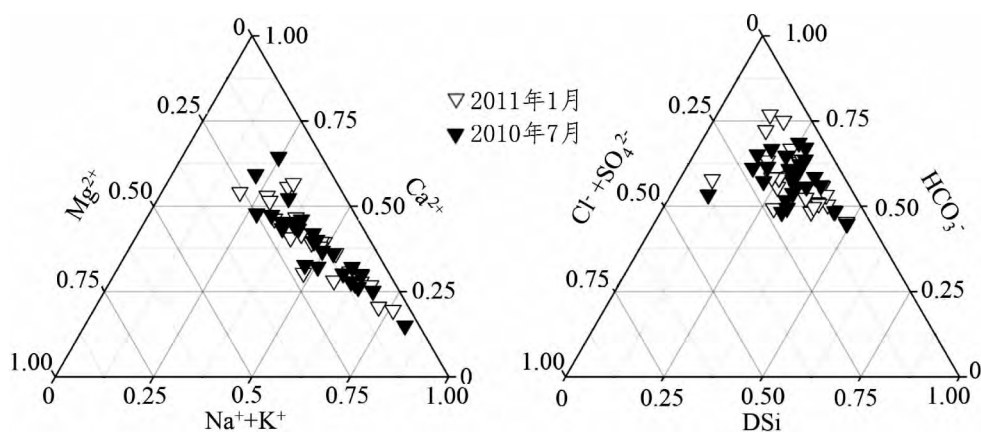


图 3 NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 对 TZ⁺ 与 TZ⁻ 平衡关系影响图

Fig. 3 NO₃⁻ and SO₄²⁻ affect the balance relationship between TZ⁺ and TZ⁻

图4 梅州山地丘陵区河流主要离子三角图($\mu\text{mol/L}$)Fig.4 Ternary diagrams showing ion compositions of the Meijiang River ($\mu\text{mol/L}$)

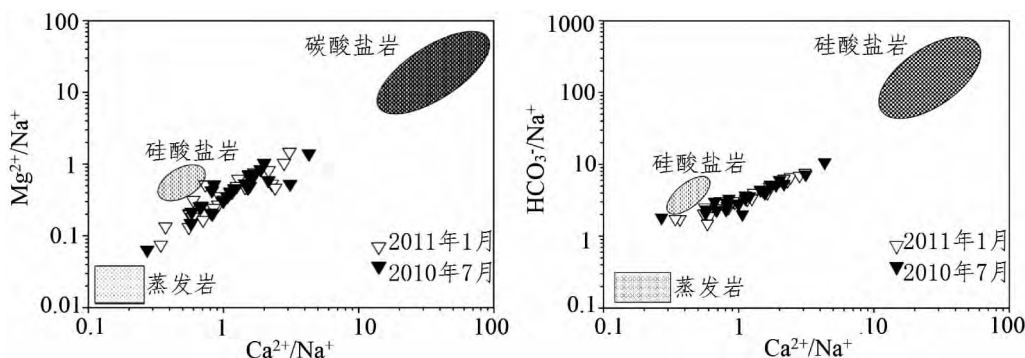
从图4可以看出,粤东北山区河流中阳离子大致分布在 Ca^{2+} — $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 线上,更多靠近 Ca^{2+} 端,说明研究区河流优势阳离子是 Ca^{2+} 。在兴宁盆地河流中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 超过 Ca^{2+} 含量($307.89 \mu\text{mol/L} > 147.04 \mu\text{mol/L}$),反映了该流域盆地的花岗岩化学风化作用对河水化学组成具有控制作用。在阴离子组分三角图中,研究区河流阴离子分布在 HCO_3^- 和DSi高浓度的位置,表明硅酸盐岩的风化过程对河流离子的贡献起主导作用。

河水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的对数关系图(图5)能大致判断影响河水水化学性质的岩石种类。由图5可知,梅州山地丘陵区1月和7月数据绝大多数分布在硅酸盐岩特征区周围,说明硅酸盐岩的化学风化作用对研究区水化学性质贡献最大。少部分数据靠近碳酸盐岩特征区,说明碳酸盐岩的风化作用对河水化学性质也有贡献。梅州山地丘陵区兴宁盆地的各小流域河流离子大部分

来源于硅酸盐岩风化,其 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 的比值相对较低,河流 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+ = 2.57$,表明硅酸盐岩的风化对兴宁盆地小流域河水化学组成有控制作用。而发源于莲花山脉地区的各小河流的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 比值较高,说明径流中来源于碳酸盐矿物风化的离子比重增加。

研究区属于湿热山地丘陵区。已有的研究结果表明,在流域尺度上,湿热地区碳酸盐类矿物的化学溶蚀性速率是硅酸盐类矿物的17倍左右^[22]。前文已经证明流域水体离子主要来源于岩石的化学风化及海盐沉降。在湿润地区,参与化学风化的岩石主要包括硅酸盐岩和碳酸盐岩两类,即硅酸盐矿物和碳酸盐矿物的化学风化过程。

本文结合电导率和 TZ^- 的相关性(0.99)以及海盐沉降作用对河水中 Cl^- 的贡献作用,估算大气降水伴随的海盐沉降作用对水体电导率的贡献为:

图5 河水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 及 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 关系图Fig.5 Plots of $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ versus $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ ratios of the river waters

$$G\% = (Cl^-)_r(Cl^-)\% / TZ^- \quad (3)$$

而除去大气降水对水体电导率的贡献,有

$$R_{car} + R_{si} = 1 \quad (4)$$

除去大气降水对水体电导率影响,有

$$E_{wat} = E_{car} R_{car} + E_{si} R_{si} \quad (5)$$

$$E_{car} = 17E_{si} \quad (6)$$

其中 $(Cl^-)\%$ 为大气降水对流域河水中 Cl^- 的贡献率, R_{car} 为流域内碳酸盐矿物对水体离子的贡献率, R_{si} 则是硅酸盐矿物对水体离子的贡献率, E_{wat} 为水体实测电导率, E_{car} 为单一碳酸盐支流流域电导率, E_{si} 为单一硅酸盐支流流域电导率。

根据式(1)~(6),参考研究区流经纯硅酸盐岩小流域水体(样号NJ)的电导率,计算 R_{car} 在1月趋于3.49%~4.44%;7月趋于8.28%~8.62%。在除去大气降水作用的影响之后,得出本研究区域硅酸盐岩的风化作用对水体离子的贡献率为81.46%~86.03%;碳酸盐岩的风化作用对水体离子的贡献率为3.11%~7.68%。而区域内84.19%为花岗岩和砂岩,在莲花山脉西南部以及梅州西洋镇附近还有小块的页岩出露,7.84%为含碳酸盐的地层。与之类似,距离研究区较近的增江流域花岗岩类岩石占流域面积的78%,含碳酸盐的地层占流域面积的15%,其中硅酸盐矿物对水体化学性质贡献率达到78.10%~93.97%;碳酸盐矿物对水体化学性质贡献率为6.03%~21.90%^[8]。而质纯层厚的碳酸盐岩占流域面积44%的西江流域,碳酸盐矿物的化学风化贡献了河流离子总量的70%以上^[6]。在以硅酸盐岩为主的湿热地区,含碳酸盐矿物地层的化学风化作用对河流离子的贡献率明显高于其面积所占比例。

从以上 R_{car} 和 R_{si} 的计算结果看,本研究地区河流水化学特性主要响应流域硅酸盐矿物的化学风化过程。然而7月碳酸盐矿物的风化作用比1月更为明显。其可能的原因是,河流水体7月主要靠地表径流补给,而地表径流可能与成土过程形成的次生碳酸盐矿物发生作用;1月地表径流缺乏,下伏硅酸盐岩中缺少碳酸盐矿物。

4.3 流域化学风化过程的碳汇效应

CO_2 是碳酸盐岩和硅酸盐岩类矿物化学风化过程的主要侵蚀介质,环境中的 CO_2 作为反应物参与到岩石的化学风化过程中,构成了重要的 CO_2 吸收过程,即碳汇^[23],全球不同流域尺度范围内对此项碳汇的测算成果已有很多(表4)。本文也利用实测

数据对研究区化学风化过程的碳汇效应进行测算。碳酸盐矿物的化学风化过程中, CO_2 与被风化的矿物同时向水体输送 HCO_3^- ,所以1当量 CO_2 对碳酸盐矿物的风化可形成2当量的 HCO_3^- ;而1当量 CO_2 对硅酸盐矿物的化学风化仅释放出1当量的 HCO_3^- 。

水体实测电导率 E_{wat} 与水体实测的 HCO_3^- 例子浓度($C_{HCO_3^-}$)存在以下关系(图6):

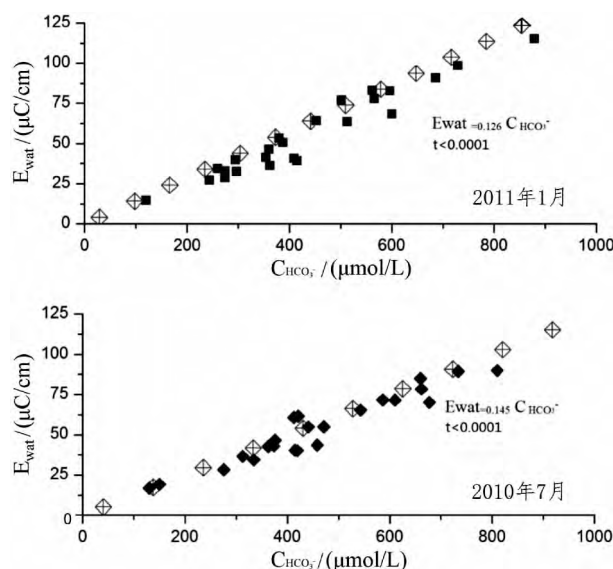


图6 梅江山地区丘陵区河水电导率和碳酸氢根离子关系

Fig.6 Relationship between E_{wat} and $C_{HCO_3^-}$

$$\text{即在1月,有 } E_{wat} = 0.126 C_{HCO_3^-} \quad (7)$$

$$\text{而在7月,有 } E_{wat} = 0.145 C_{HCO_3^-} \quad (8)$$

此线性拟合关系式经过 t 检验。

综上公式(1)~(8)以及反应式I和II,流域盆地岩石化学风化过程对大气 CO_2 的吸收通量($Flux$)为:

$$\text{在1月, } Flux = E_{wat} (R_{car}/2 + R_{si}) D / 0.126 \quad (9)$$

$$\text{在7月, } Flux = E_{wat} (R_{car}/2 + R_{si}) D / 0.145 \quad (10)$$

其中, D 为平均径流深(mm)。梅州市多年平均径流深为834 mm^[12]。经过计算得,在梅州山地丘陵区范围内,岩石化学风化对大气 CO_2 的吸收通量($Flux$)为 $(3.46 \sim 5.26) \times 10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,高于全球平均值 $2.46 \times 10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ^[18]。此计算结果与相同环境下的增江和东江流域相对照(表4)较为一致。湿热季风气候控制的北半球亚热带山区,地表化学风化过程所构成的 CO_2 吸收通

量高于全球平均值。

表 4 部分地区岩石化学风化过程特征值对比表

Tab. 4 Comparison chart of rock's chemical weathering in some areas

河流	年径流量 /(10^8 m^3)	硅酸盐贡献 率/%	CO ₂ 的吸收总量 /(10^8 mol)	CO ₂ 的吸收通量 /[$10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]
梅江	9.95	91.38 ~ 96.51	4.13 ~ 5.08	3.46 ~ 4.26
增江 ^[10]	2.13	78.10 ~ 93.97	10.02 ~ 10.92	3.50 ~ 3.81
东江 ^[11]	148.6	72.46 ~ 81.54	76.46 ~ 77.94	3.02 ~ 3.08
全球 ^[23]	374 000	36.25	240 000	2.46

5 结论

1) 梅州山地丘陵区河水矿化度远低于世界平均值,河水离子组成以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主,DSi 含量丰富。

2) 梅州山地丘陵区地表水体的化学组成受岩石化学风化作用和大气降水作用两方面的影响,其中硅酸盐岩的化学风化作用对水体离子的贡献率为 81.46% ~ 86.03%;大气降水作用和碳酸盐岩的风化作用对水体水化学组成的贡献分别为 10.86% 和 5%。

3) 梅州山地丘陵区岩石化学风化的主要侵蚀介质是 CO_2 ,但是人类活动或者自然条件下产生的硫酸和硝酸类物质对其影响也不容忽视。

4) 梅州山地丘陵区岩石化学风化过程形成的对大气 CO_2 的吸收通量为 $(3.46 \sim 5.26) \times 10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,高于全球平均值 $2.46 \times 10^5 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。这表明,北半球亚热带高温多雨的山地丘陵区的表生地质作用,构成全球碳循环的一个重要碳汇。

参考文献 (References)

[1] Yuan Daoxian. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources [J]. Quaternary Sciences 2001, 21(3): 223 ~ 232 [袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(3): 223 ~ 232]

[2] Yuan Daoxian. Modern karstology and global change study [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing) 1997, 4(1): 17 ~ 25 [袁道先. 现代岩溶学 and 全球变化研究 [J]. 地学前缘, 1997, 4(1): 17 ~ 25]

[3] Liu Zaihua. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(2): 95 ~ 102

[4] Gao Q Z, Tao Z. Chemical weathering and chemical runoffs in the seashore granite hills in South China [J]. Science China Earth Sci-

ences, 2010, 53(8): 1195 ~ 1204

[5] Xu Z, Liu C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the Yunnan - Guizhou Plateau, Southwest China [J]. Chemical Geology, 2007, 239(1): 83 ~ 95

[6] Gao Q Z, Tao Z, Huang X, et al. Chemical weathering and CO_2 consumption in the Xijiang River basin, South China [J]. Geomorphology, 2009, 106(3): 324 ~ 332

[7] Beaulieu E, Godd  ris Y, Labat D, et al. Impact of atmospheric CO_2 levels on continental silicate weathering [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2010, 11(7): 7007

[8] Wu W, Xu S, Yang J, et al. Silicate weathering and CO_2 consumption deduced from the seven Chinese rivers originating in the Qinghai - Tibet Plateau [J]. Chemical Geology, 2008, 249(3): 307 ~ 320

[9] Wu L, Huh Y, Qin J, et al. Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai - Tibet Plateau [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(22): 5279 ~ 5294

[10] Tao Zhen, Gao Quanzhou, Wang Zhengang et al. Estimation of carbon sinks in chemical weathering in a humid subtropical mountainous basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(35): 3774 ~ 3782

[11] Xie Chenji, Gao Quanzhou, Tao Zhen, et al. Chemical weathering and CO_2 consumption in the Dongjiang River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(8): 2123 ~ 2133 [解晨骥, 高全洲, 陶贞, 等. 东江流域化学风化对大气 CO_2 的吸收 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2123 ~ 2133]

[12] Luo Yingxin. Mei Zhou Geography [M]. Guang Zhou: Guangdong Map Press, 2001. [罗迎新. 梅州地理 [M]. 广州: 广东地图出版社, 2001.]

[13] Liao Fulin, Yang Qihe, Shi Lifang. Analysis of Main Plant Communities in Baisuishan Mountain, Meizhou, Guangdong Province [J]. Journal of Jiaying University (Natural Science), 2007, 24(6): 47 ~ 54 [廖富林, 杨期和, 石利芳. 梅州百岁山主要植物群落分析 [J]. 嘉应学院学报, 2007, 24(6): 47 ~ 54]

[14] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: from pristine stage to global pollution [J]. Global and Planetary Change, 1989, 1(4): 283 ~ 309

[15] 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_2 consumption in the Himalaya [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(19): 3397 ~ 3416

[16] Huh Y, Tsoi M Y, 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

[17] Gao Quanzhou, Tao Zhen. Chemical weathering and chemical runoffs in the seashore granite hills in South China. Science China Earth Sciences, 2010, 53(8): 1195 ~ 1204

[18] Sun Yuanyuan, Ji Hongbing, Luo Jianmei et al. Hydro-geochemistry and chemical weathering processes of small watersheds in the southern Jiangxi province [J]. Environmental Chemistry, 2006,

- 25(5): 550–557 [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]
- [19] Han Guilin, Liu Congqiang. Hydrogeochemistry of Wujiang River water in GuiZhou province. *Carsologica Sinica*. 2000, 19(1): 35–43 [韩贵琳, 刘丛强. 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]
- [20] Grosbois C, Negrel P, Fouillac C, et al. Dissolved load of the Loire River: chemical and isotopic characterization[J]. *Chemical Geology*, 2000, 170(1): 179–201
- [21] Ding Jian, Zhou Yongzhang, Gao Quanzhou, et al. Chemical Weathering Processes and atmospheric CO₂ consumption in the Hanjiang River Basin, Guangdong Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2013, 52(3): 117–127 [丁健, 周永章, 高全洲, 等. 广东韩江流域化学风化作用及大气 CO₂ 消耗的分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(3): 117–127]
- [22] Amiotte Suchet P, Probst J L. Modelling of atmospheric CO₂ consumption by chemical weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins[J]. *Chemical Geology*, 1993, 107(3): 205–210
- [23] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1): 3–30
- [24] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the Amazon: 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 1981, 86(C10): 9844–9858
- [25] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(5): 401–428

Chemical Weathering Processes and CO₂ Consumption in Mountainous and Hilly Areas around Meizhou City, China

ZHENG Wei¹, LIN Peisong¹, GAO Quanzhou^{1 2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

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

Abstract: Based on the chemical compositions of runoff in the Meijiang River system around Meizhou City, Guangdong Province, China where mountain and hilly areas dominated. Consumption flux CO₂ in the chemical weathering process was estimated using material balance method and deduction method. The results demonstrated that the average concentration of total dissolved solids in the Meijiang River system around Meizhou City, where silicate rock areas account for about 84%, is 41.58 mg/L, and that the mineralization of the Meijiang River water is much lower than the averages value of rivers worldwide (100 mg/L). Ca²⁺, HCO₃⁻ and dissolved Si are the main ion in the river water. The chemical weathering process of rocks and atmospheric precipitation significantly influenced the chemical composition of water in the Meijiang River system. The ion contribution rate from the chemical weathering of silicate mineral, atmospheric precipitation and carbonate mineral weathering is 81.46% ~ 86.03%, 10.86% and 5%, respectively. The consumption flux CO₂ in the rock chemical weathering processes is (3.46 ~ 5.26) × 10⁵ mol/(km² · a), which is higher than the global average value of 2.46 × 10⁵ mol/(km² · a), implying that the surface geological processes in humid monsoon subtropical mountainous areas of the Northern Hemisphere constitutes an important component of the global carbon sequestration.

Key words: chemical weathering; carbon sink; erosive medium; silicate minerals