

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.08.2014122001

李团结, 马玉, 刘昆. 热带花岗岩海岛的化学风化及其环境效应——以东澳岛为例[J]. 环境化学, 2015, 34(8): 1490-1497

LI Tuanjie, MA Yu, LIU Kun. Chemical weathering and its environmental effects of tropical granite island: A case study in DongAo Island[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(8): 1490-1497

热带花岗岩海岛的化学风化及其环境效应 ——以东澳岛为例*

李团结^{1,2**} 马 玉² 刘 昆²

(1. 中国地质大学资源学院, 武汉, 430742; 2. 国家海洋局南海工程勘察中心, 广州, 510300)

摘 要 通过对珠江口花岗岩海岛-东澳岛小流域水体离子的实测分析, 揭示海岛小流域的离子来源与贡献量, 获得在相对封闭环境下的热带海岛地区花岗岩小流域的化学风化速率及过程对大气 CO₂ 的年消耗量. 研究表明, 东澳岛溪水总体为弱碱性, 总溶解固体均值为 68.14 mg·L⁻¹, 远低于世界河流均值, 非汛期溶解固体和电导率均高于汛期. 溪水离子组成以 Cl⁻、溶解 Si、Na⁺ 以及 HCO₃⁻ 为主, 体现了海盐沉降和硅酸盐岩化学风化过程对溪水化学组成的共同影响. 东澳岛岩石化学风化速率和 CO₂ 消耗通量分别为 1.09×10⁴ kg·km⁻²·a⁻¹ 和 1.12×10⁵ mol·km⁻²·a⁻¹, 均低于世界河流均值, 主要是由于花岗岩抗风化能力较强所致. 广东省热带花岗岩海岛年碳汇消耗 CO₂ 约 5218 t, 因此保护海岛表层土壤和生态环境对海岛的碳汇作用具有重要意义.

关键词 热带花岗岩海岛, 化学风化, 环境效应, 东澳岛.

Chemical weathering and its environmental effects of tropical granite island: A case study in DongAo Island

LI Tuanjie^{1,2**} MA Yu² LIU Kun²

(1. China University of Geosciences Faculty of Earth Resource, Wuhan, 430742, China;

2. South China Sea Marine Engineering Prospecting Center, State Oceanic Administration, Guangzhou, 510300, China)

Abstract: Through measurement and analysis of small watershed water ions from the Granite Island-DongAo Island, the study revealed the contribution and sources of the island's small watershed ions, and obtained the chemical weathering rate and atmospheric CO₂ consumption of the weathering processes of a small Granite tropical island regions in a relatively closed environment. The study showed the water was weak alkaline in the stream of DongAo Island. The mean dissolved solids was 68.14 mg·L⁻¹ much lower than the average of other rivers. And all dissolved solids and conductivity were high during the non-flood period. The main ions were Cl⁻, dissolved Si, Na⁺ and HCO₃⁻ in steam waters, which indicated that chemical composition of the stream water was the results of sea salt deposition and silicate rocks' chemical weathering. The weathering rate of rock and mineral in DongAo Island was 1.09×10⁴ kg·km⁻²·a⁻¹, and CO₂ consumption flux was 1.12×10⁵ mol·km⁻²·a⁻¹. Both were lower than the average of other Rivers, which might be caused by the strong anti weathering ability of granite. About 5218 tons of CO₂ were absorbed by chemical weathering of tropical granite islands in Guangdong province per year. Therefore, the protection of ecological environment and surface soil has important significance on the CO₂ sink of the island.

2014 年 12 月 20 日收稿.

* 国家海洋局青年海洋科学基金(2010302); 广东省“908”专项(GD908-01-02)资助.

** 通讯联系人, E-mail: ltj1005@126.com

Keywords:tropical granite island, chemical weathering, environmental benefits, DongAo Island.

碳循环是维持生命系统、气候系统、大气组分和海洋系统的重要过程.由于循环的时间尺度不一样,碳循环被分为长周期循环和短周期循环两大类^[1].在过去的 42 万年,大气中的 CO₂ 始终保持在一个较为稳定的状态.陆地岩石风化是改变地表形态和控制地球化学元素循环的重要地质过程,这个过程对全球碳循环的影响受到众多学者的重视^[1-8].根据化学风化的时间尺度,地球表层的化学风化研究分为两种:其一是在地质时间尺度上基于原岩的风化层中固态元素、同位素和矿物的相对改变,其二是在现代时间尺度上当今河流的溶解质构成和溶解质通量^[9].特别是后者,已成为研究流域现今风化速率的主要方法.对于全球风化量的推算则是通过溶解与悬浮在河流中的物质的量来估算.对于流域而言,假设其处于稳定状态,则可以根据阴阳离子的输入与输出平衡估算土壤的风化速率,研究流域范围内的平均化学风化速率^[10].

河流是联系陆地、海洋和大气三大活动碳库的纽带,是陆地物质向海洋物质转移和能量交换的主要通道^[11-12],在区域乃至全球碳循环研究中具有重要的作用.河流每年向海洋输入的总水量和悬浮态颗粒物分别为 $3.47\times10^{15}\text{ m}^3$ 和 $1.35\times10^{11}\text{ kg}$,每年约有来自大气 CO₂ 的 $2.8\times10^{11}\text{ kg}$ 碳通过陆地岩石风化作用从大气-生物圈转移到海洋中^[13-14].

相对于陆地河流流域来说,海岛小流域具有岩性单一、河流短小、流域水循环速度快、水体荷载量大的特点.海岛远离陆地,人类活动对海岛系统化学风化的影响可忽略不计,简化了海岛化学风化的来源,可以仅仅考虑内源岩石化学风化和外源气溶胶输入两种大类型.海岛河流的离子通量能反映海岛河流水体离子的自然本底特征,离子组合特征可揭示水体中各离子来源与贡献量.目前关于海岛流域化学风化的相关研究成果较少.因此,开展海岛化学风化特征研究,对比陆地与海岛环境下人类活动对硅酸盐岩化学风化的影响,估算热带海岛流域地表化学风化输入海洋的自然基准值具有重要意义.

1 样品采集及分析

样品采集点选择在珠江口东澳岛的两条溪流终端(图 1),具体位置为 DAD01(北纬 22°01′02.323″,东经 113°42′21.565″),DAD02(北纬 22°01′11.256″,东经 113°42′30.700″).东澳岛位于珠海香洲区东南部,万山群岛中部,距离香洲 30 km.全岛出露花岗岩,面积 4.73 km²,长 2.95 km,宽 2.88 km,地势北部高,南部次之,中间低,植被覆盖较好,雨水较为充足,发育多条小溪流.

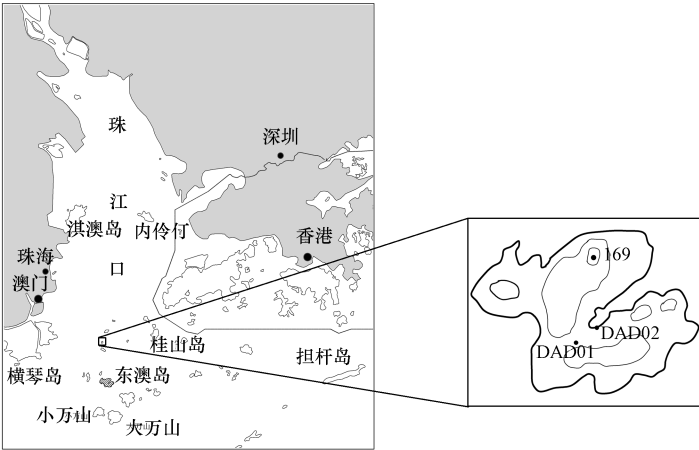


图 1 采样站位位置

Fig.1 Sampling station location

为研究溪流化学组分的季节变化,全年按月份共进行了 11 个航次的外业样品采集,每航次每站位采集 2 个样品.其中,2012 年 11 月 14 日和 2013 年 2 月 28 日进行样品采集时,DAD02 采样站点断流,未能采集到样品,故 11 个航次共采集 20 个样品,每个样品采集 2 L.样品分析项目包括温度、pH、电导率

(EC)、溶解无机碳(DIC)、总碱度(ALK)、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、溶解 Si、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 共 13 项,其中温度、pH、EC 现场测定.DIC 和 ALK 采用非色散红外光谱法及自动电位滴定仪测定, SO_4^{2-} 、阳离子、溶解 Si、 Cl^- 、 NO_3^- 分别采用硫酸钡浊度比色法、原子吸收(AAS)、硅钼蓝分光光度法、 $AgNO_3$ ($Hg(SCN)_2$)和酚二磺酸法测定.

2 结果与讨论

2.1 东澳岛溪水理化参数分析

河水的理化参数包括水温、pH、总溶解固体($TDS = Na^+ + Mg^{2+} + K^+ + Ca^{2+} + HCO_3^- + Cl^- + NO_3^- + SO_4^{2-} + SiO_2$)、EC 等,它们都在一定程度上表征了河水环境性状与功能.水温控制着河水中的物理化学反应及生物活动过程;pH 决定着水体元素的迁移与转化,是控制元素迁移与沉淀的最重要水环境要素之一;TDS 和 EC 则共同反映了水中离子强度.

东澳岛水样理化参数特征如表 1 所示.研究区水样水温介于 15.0—28.0 $^{\circ}C$,均值为 23.05 $^{\circ}C$,变异系数 0.17,总体而言变化较为平稳.汛期平均水温(23.87 $^{\circ}C$)高于非汛期均值(21.83 $^{\circ}C$),与研究区域同期的季风性雨热气候特征相符.pH 值介于 6.37—9.17,均值为 8.05,变异系数 0.11,总体而言东澳岛溪水表现为弱碱性,变化较为平稳.电导率(EC)介于 97.04—163.33 $\mu S \cdot cm^{-1}$,均值为 131.99 $\mu S \cdot cm^{-1}$,变异系数 0.14,总体而言变化较小.电导率均值远比位于碳酸盐岩区的乌江(269—651 $\mu S \cdot cm^{-1}$)^[15]要低,但比华南滨海花岗岩丘陵地表径流(均值 43.3 $\mu S \cdot cm^{-1}$)^[16]要高.造成这种现象有两方面的原因:第一,研究区地质构成以花岗岩为主,其风化能力明显弱于碳酸盐岩,因此溪水电导率与碳酸盐岩区相比明显较低;第二,研究区与滨海花岗岩丘陵相比,地质构成特征基本相同,但由于东澳岛溪水受海盐沉降的贡献更大导致电导率较高.此外,研究区汛期水样电导率(129.27 $\mu S \cdot cm^{-1}$)低于枯水期(136.08 $\mu S \cdot cm^{-1}$),也揭示了汛期降水量增加对径流中溶解物质的稀释效应.

表 1 水样理化参数特征值

Table 1 Characteristic value of water samples Physicochemical parameters					
理化参数	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数
水温/ $^{\circ}C$	28.0	15.0	23.05	4.01	0.17
pH	9.17	6.37	8.05	0.92	0.11
电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	163.33	97.04	131.99	18.19	0.14
TDS/($mg \cdot L^{-1}$)	89.47	44.34	68.14	12.38	0.18

天然水体中 TDS 指溶解于水中的矿物质总量,其含量大小受到流域气候、径流量、岩性、植被特征、地势及风化剥蚀速率等因素的共同影响^[17].如径流量增大将加速岩石矿物的物理剥蚀与化学风化,致使更多溶解物质进入水体,导致 TDS 值升高,同时由于径流的稀释作用,河水 TDS 亦会有所降低.若流域内岩石抗风化能力强(如砂岩和石英岩),径流的化学成分更依赖于降水,河流 TDS 一般较低.据本研究分析测试结果所示,东澳岛 TDS 的变化范围是 44.34—89.47 $mg \cdot L^{-1}$,均值是 68.14 $mg \cdot L^{-1}$,属于低矿化度水($TDS < 200 \text{ } mg \cdot L^{-1}$),远低于世界河流平均值(100 $mg \cdot L^{-1}$)^[18],这与流域以硅酸盐岩类矿物(花岗岩)为主的地质组成相符合(各站点离子浓度变化见图 2).汛期 TDS 均值(66.28 $mg \cdot L^{-1}$)低于非汛期(70.92 $mg \cdot L^{-1}$),体现了径流量增多对溶解质的稀释效应.

2.2 东澳岛溪水水化学特征

天然水体中无机正负电荷的平衡程度常被用来度量数据可信度或水体污染程度^[17].在未受污染的河流中,水体的正电荷总量($TZ^+ = Na^+ + K^+ + 2Ca^{2+} + 2Mg^{2+}$)与负电荷总量($TZ^- = HCO_3^- + 2SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-$)基本平衡,其平衡系数(NICB)可以表示为:

$$NICB = (TZ^+ - TZ^-) / TZ^+$$

东澳岛溪水样品总溶解阴阳离子电荷基本平衡($-10\% < NICB < 10\%$).溪水 TZ^+ 介于 735.86—1629.09 $\mu Eq \cdot L^{-1}$,均值为 1143.89 $\mu Eq \cdot L^{-1}$,远低于西江上游的 3456 $\mu Eq \cdot L^{-1}$ ^[19]和长江的

2800 $\mu\text{Eq}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[20],也低于世界河流均值 1250 $\mu\text{Eq}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[5],非汛期 TZ^+ 均值 (1288.92 $\mu\text{Eq}\cdot\text{L}^{-1}$) 明显高于汛期 (1047.21 $\mu\text{Eq}\cdot\text{L}^{-1}$),揭示了流域丰沛的降水和花岗岩地质条件对溪水水化学特征的影响。

从图 3 中可以看出,东澳岛溪水阳离子以 Na^+ 占绝对优势,占阳离子总量的 70.24%, Ca^{2+} 占 13.05%, K^+ 和 Mg^{2+} 在阳离子总量中所占比例接近,分别为 8.53% 和 8.18%。阴离子以 Cl^- 占绝对优势,占阴离子总量的 61.91%,其次为 HCO_3^- ,占 26.07%, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 总体而言所占比例较小,分别仅占 8.10% 和 3.92%,说明酸沉降对研究区溪水化学特征影响较为轻微。溶解 Si 浓度变化于 205.80—644.46 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2),均值为 331.13 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解 Si 平均含量占水体总离子含量的 14.18%,含量相对较高,该现象主要与研究区风化壳以硅酸盐岩为主有关,若将东澳岛溪水中非风化来源的离子扣除,研究区化学径流元素主要分布在硅酸盐岩端元附近 (图 4),从图 5 可看出,阴离子组合三角图中,如果扣除占 60% 以上的海盐沉降产生的 Cl^- ,则主要成分为硅酸盐的溶解 Si,这与东澳岛以硅酸盐岩矿物为主的地质组成特点是一致的。而且溶解 Si 表现出汛期大于非汛期的特征,说明汛期丰沛的径流量加速了硅酸盐岩的化学风化。

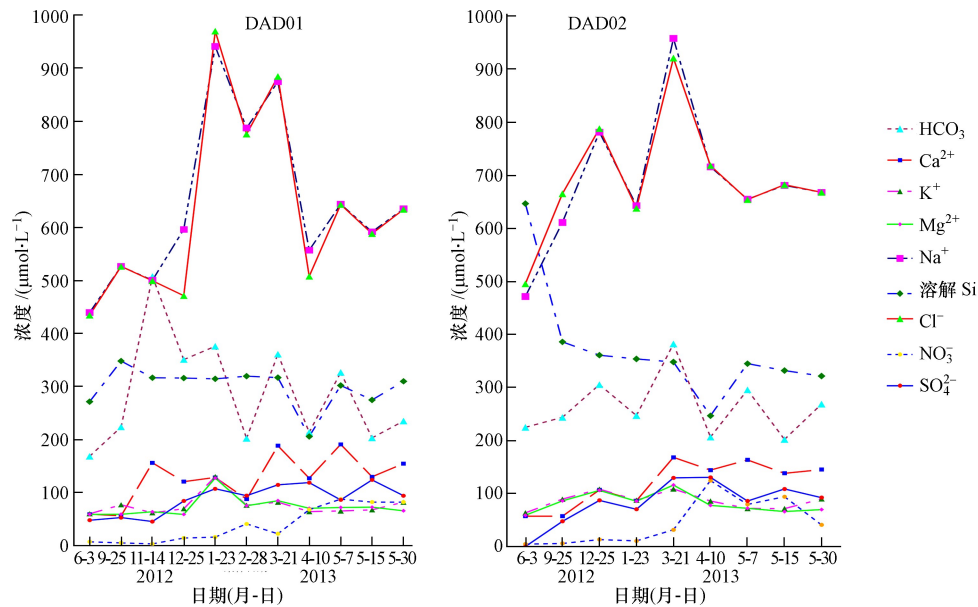


图 2 溪水离子浓度变化图
Fig.2 Temporal change of stream ion concentration

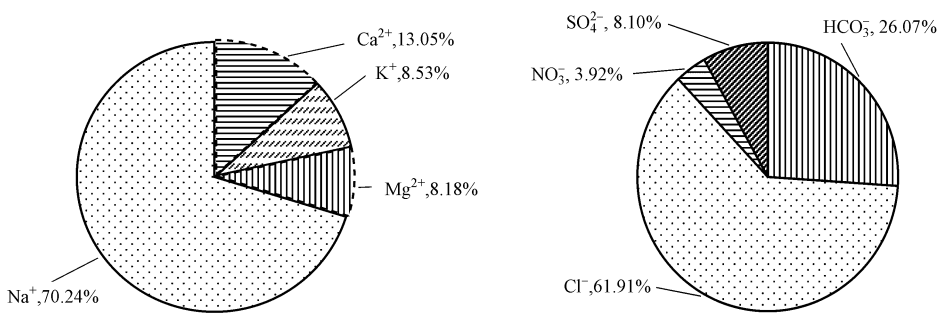


图 3 溪水阴/阳离子组成图
Fig.3 The stream anion/cationic composition diagram

2.3 各端元对溪水溶解质的贡献

量化河水中溶解物质 X (以摩尔浓度计算) 的质量平衡方程可用下式^[21-22]表示:

$$[X]_{\text{riv}} = [X]_{\text{cyc}} + [X]_{\text{eva}} + [X]_{\text{car}} + [X]_{\text{sil}} + [X]_{\text{anth}}$$

式中,riv 代表河流;cyc 代表循环源;eva 代表蒸发岩源;car 代表碳酸盐岩源;sil 代表硅酸盐岩源;anth 代表人类活动源。

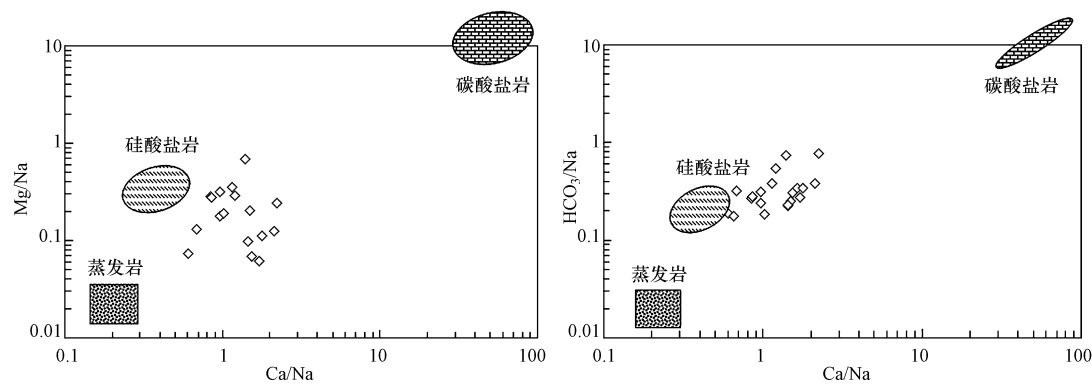


图 4 东澳岛溪水化学分析端元图
Fig.4 The end member diagram of the Dong Ao island stream chemical analysis

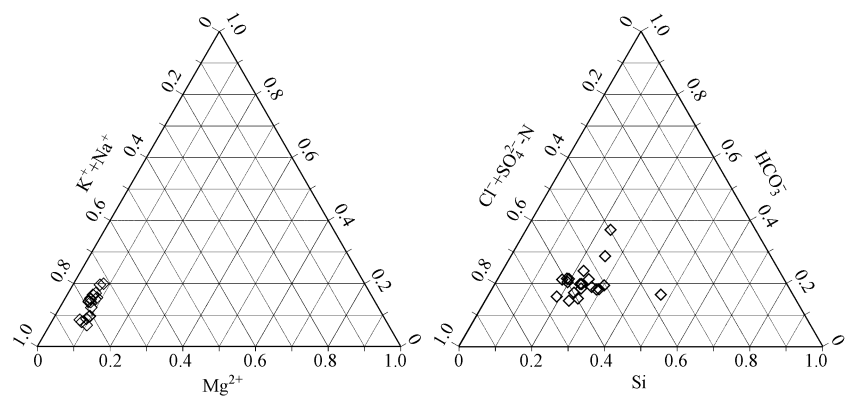


图 5 东澳岛溪水化学分析三角图
Fig.5 The Dong Ao island stream chemical analysis triangle

野外实地考察可知,东澳岛以及珠江口岛屿地质构成几乎都为花岗岩,因此研究区内基本没有蒸发岩和碳酸盐岩分布,从东澳岛溪水化学分析端元图上可见,样点远离碳酸盐岩端元,且研究区湿热多雨的气候条件也非常利于蒸发岩溶解,即使地质历史上流域内有一定的蒸发岩分布也将由于强烈的淋溶作用而所剩无几,不会对河水化学组成产生明显影响.因此蒸发岩源和碳酸盐岩源对东澳岛化学径流的贡献在此忽略不计,由此可将公式中的循环源记为海盐源,即东澳岛溪水离子来源主要为海盐沉降、人类活动和硅酸盐岩的化学风化.

由于研究区内没有工业分布,人类活动的贡献主要是通过酸沉降进入水体的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- ,且蒸发岩贡献可以忽略,因此,东澳岛溪水中的 Cl^- 来源较为单一,可认为全部来自于海盐沉降.利用标准海水离子比($\text{Cl}^-/\text{Na}^+=1.15, \text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+=0.02, \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+=0.11, \text{HCO}_3^-/\text{Na}^+=0.004$)^[18]对海盐贡献的离子进行扣除后,剩余的 $\text{Na}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}$ 、溶解 Si 和 K^+ 可认为都来自硅酸盐岩的化学风化.各离子来源具体计算方法如下:

$$\begin{aligned} [\text{Cl}^-]_{\text{溪水}} &= [\text{Cl}^-]_{\text{海盐}} \\ [\text{Na}^+]_{\text{溪水}} &= [\text{Na}^+]_{\text{海盐}} + [\text{Na}^+]_{\text{硅酸盐岩}} \\ [\text{K}^+]_{\text{溪水}} &= [\text{K}^+]_{\text{硅酸盐岩}} \\ [\text{Ca}^{2+}]_{\text{溪水}} &= [\text{Ca}^{2+}]_{\text{海盐}} + [\text{Ca}^{2+}]_{\text{硅酸盐岩}} \\ [\text{Mg}^{2+}]_{\text{溪水}} &= [\text{Mg}^{2+}]_{\text{海盐}} + [\text{Mg}^{2+}]_{\text{硅酸盐岩}} \\ [\text{SO}_4^{2-}]_{\text{溪水}} &= [\text{SO}_4^{2-}]_{\text{人类活动}} \\ [\text{NO}_3^-]_{\text{溪水}} &= [\text{NO}_3^-]_{\text{人类活动}} \\ [\text{HCO}_3^-]_{\text{溪水}} &= [\text{HCO}_3^-]_{\text{硅酸盐岩}} + [\text{HCO}_3^-]_{\text{海盐}} \\ [\text{Si}]_{\text{溪水}} &= [\text{Si}]_{\text{硅酸盐岩}} \end{aligned}$$

从离子角度来看,研究区海盐贡献的 Na^+ 汛期变化于 $377.72\text{--}622.36\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均占 Na^+ 总量的 57.21%,非汛期介于 $409.61\text{--}843.34\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均占 Na^+ 总量的 84.54%。海盐贡献的 Ca^{2+} 汛期变化于 $7.55\text{--}12.45\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均占 Ca^{2+} 总量的 12.37%,非汛期介于 $8.19\text{--}16.87\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均占 Ca^{2+} 总量的 10.53%。海盐贡献的 Mg^{2+} 汛期变化于 $41.55\text{--}68.46\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均占 Mg^{2+} 总量的 79.23%,非汛期介于 $45.06\text{--}92.77\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均占 Mg^{2+} 总量的 80.13%。汛期海盐贡献的 HCO_3^- 占总 HCO_3^- 的 0.83%,非汛期占 0.82%,均不足 1%。汛期海盐相对贡献总体高于非汛期,揭示海盐贡献主要通过湿沉降进入研究区水体。

从端元角度来看,海盐沉降对东澳岛溪水化学组成影响最大,其对溪水溶解质总量的贡献达到 56.17%,其次为硅酸盐岩化学风化,其贡献达到 39.53%,人类活动贡献极少,仅占 4.31%。这种现象说明虽然研究区地质构成以花岗岩为主,但由于海岛特殊的地理环境,导致海盐沉降对地表水体化学组成的影响较岩石风化更为显著。此与无海盐沉降的赣南花岗岩小流域明显不同,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和蒸发盐,二者对赣南流域溶解质的贡献率分别为 42.8% 和 29.2%,大气 CO_2 对河水溶解质的贡献率为 21.4%^[23]。

2.4 东澳岛岩石矿物的化学风化速率

岩石矿物的化学风化速率(CWR)通常是指单位面积内来自于岩石的河流溶解载荷的量。在估算化学风化速率时首先要对干湿沉降与人类活动来源的离子进行扣除,其次还应该把岩石风化过程中来自于大气和土壤的 CO_2 ,最终以 HCO_3^- 的形式进入河水中的这部分 HCO_3^- 排除在外。不同岩石类型的化学风化速率计算不一样,硅酸盐类岩石风化的主要产物是 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和溶解 Si,其 HCO_3^- 均来自大气和土壤 CO_2 。碳酸盐岩风化生成 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- ,且仅一半的 HCO_3^- 来自大气和土壤 CO_2 。蒸发岩风化作用生成 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} ,但风化过程中不产生 HCO_3^- ,也不消耗 CO_2 。蒸发岩和碳酸盐岩风化作用均不产生溶解 Si。由于研究区为岩性较为单一的花岗岩小流域,碳酸盐岩和蒸发岩化学风化可以忽略,仅需计算硅酸盐岩的化学风化速率,其计算方式如下:

$$\text{CWR} = \frac{([\text{K}^+]_{\text{硅酸盐岩}} + [\text{Na}^+]_{\text{硅酸盐岩}} + [\text{Mg}^{2+}]_{\text{硅酸盐岩}} + [\text{Ca}^{2+}]_{\text{硅酸盐岩}} + [\text{SiO}_2]) \times \text{Flow}}{A}$$

式中,各离子平均浓度以 $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 计,Flow 为东澳岛多年平均径流量 $(\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1})$,A 为东澳岛面积 (km^2) 。东澳岛面积为 4.73 km^2 ,采用上川岛气象站多年平均降水量 (2178.1 mm) 和平均蒸发量 (1769 mm) ,可近似地估算出东澳岛多年平均径流量为 $1.93 \times 10^6\text{ m}^3$,东澳岛 CWR 值为 $1.09 \times 10^4\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,与全球化学风化速率均值 $(3.6 \times 10^4\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ ^[18]、长江与黄河流域化学风化速率 $(8.5 \times 10^4\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 与 $3.36 \times 10^4\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ ^[24] 相比,研究区的岩石化学风化速率明显处于较低水平,这是由于花岗岩抗风化能力较强所致。

2.5 岩石矿物化学风化的碳汇效应

岩石/土壤通过风化作用消耗大气 CO_2 ,化学风化产物通过降水及地表径流的作用,使消耗大气 CO_2 的过程不断进行。全球岩石风化使得每年约有 0.7 Gt 的碳从大气-生物圈转移到海洋中^[14],这与海洋-大气间的净碳通量、化石燃料排放的碳通量、森林火灾排放的碳通量等近似处于同一个数量级上,而且化学风化同时参与了短时间尺度和长时间尺度的全球碳循环。因此,研究化学风化对碳循环影响的过程,估算其对大气 CO_2 的消耗通量,对全球碳循环研究具有重要意义。

碳酸盐岩风化产生的 HCO_3^- 一半来自于大气 CO_2 ,另一半由碳酸盐岩的碳酸根本身所提供;硅酸盐岩风化产生的 HCO_3^- 均来源于大气 CO_2 。东澳岛岩石矿物化学风化过程对大气 CO_2 消耗总量(Total)和通量(Flux)计算方法如下:

$$\text{Total} = [\text{HCO}_3^-]_{\text{硅酸盐岩}} \times \text{Flow} \quad \text{Flux} = \text{Total}/A$$

计算得出研究区化学风化过程对大气 CO_2 消耗总量为 $5.31 \times 10^5\text{ mol}$,消耗通量为 $1.12 \times 10^5\text{ mol}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,略高于皖南亚热带典型花岗岩小流域径碳汇能力 $((0.64\text{--}1.05) \times 10^5\text{ mol}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ ^[25],低于世界河流平均值 $(2.46 \times 10^5\text{ mol}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ ^[18]。与其它研究区对比,研究区岩石化学风化碳汇能力与赣江上游、南北盘江和珠海龙牙沟较为接近(图 6)。

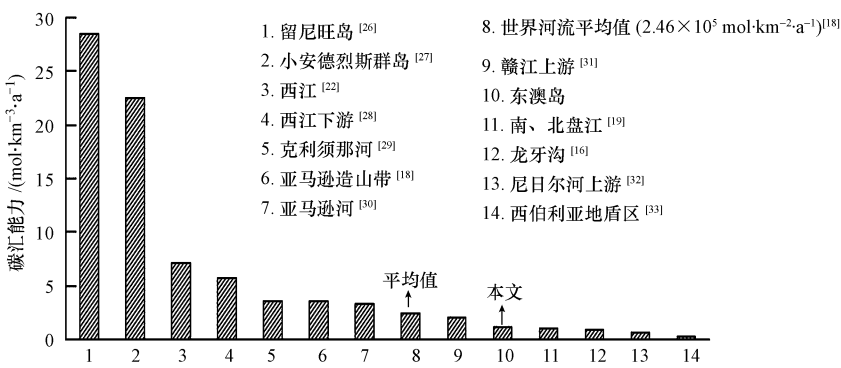


图 6 不同流域化学风化的碳汇能力对比
Fig.6 Comparison of carbon sequestration capacity of different basin chemical weathering

东澳岛是典型的热带花岗岩类型的海岛.根据广东省海岛地名普查,广东省基岩海岛共有1898个,面积共1059 km²,基本都属于热带花岗岩岩性海岛.按照上述CO₂消耗通量计算,每年碳汇消耗CO₂约5218 t.由于岩石风化的化学物理过程主要发生于海岛表层土壤和岩石强风化层上部,即海岛的碳汇功能除了植被外,海岛表层土壤和强风化层也是重要的因素.因此在全球CO₂浓度增加的背景下,保护海岛生态环境和表层土壤,加强海岛的治理修复具有重要意义.

3 结论

- (1)东澳岛溪水为弱碱性,TDS均值为68.14 mg·L⁻¹,远低于世界河流均值;溪水电导率低于乌江但高于珠海龙牙沟,非汛期TDS和电导率均高于汛期,体现了径流对溶解质的稀释效应.
- (2)受流域岩性特征的影响,溪水TZ⁺均值为1143.89 μEq·L⁻¹,也低于世界河流均值,离子组成以Cl⁻、溶解Si、Na⁺及HCO₃⁻为主,体现了同时受海盐沉降、岩石化学风化及人类活动共同影响的特点,其中以海盐沉降贡献为主,其贡献率达到56.17%,硅酸盐岩化学风化对溪水溶解质贡献达到39.53%,而人类活动的贡献较小.
- (3)东澳岛岩石矿物化学风化速率和CO₂消耗通量分别为1.09 × 10⁴ kg·km⁻²·a⁻¹和1.12 × 10⁵ mol·km⁻²·a⁻¹,均低于世界河流均值,这是由于花岗岩抗风化能力较强所致.广东省基岩海岛年碳汇消耗CO₂约5218 t.

致谢:国家海洋局海岛研究中心蔡锋研究员对本文提出了宝贵修改意见,国家海洋局南海工程勘察中心汤偲、梁佩喜、李晓明、蔡钰灿参与了外业样品采集和室内试验,周巨锁高工提供了的海岛数据,谨此谢意.

参 考 文 献

[1] Berner R A. The phanerozoic carbon cycle: CO₂ and O₂ [M]. New York: Oxford University Press, 2004

[2] Berner R A, Lasaga A C, Garrels R M. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on a atmosphere carbon dioxide over the past 100 million years[J]. Am J Sci, 1983, 283: 641-683

[3] Berner R A, Canfield D E. A new modele for atmosphereic oxygen over phanerozoic time[J]. Am J Sci, 1989, 289: 333-361

[4] Volk T. Feedbacks between weathering and atmospheric CO₂ over the last 100 million years[J]. Am J Sci, 1987, 287: 763-779

[5] Meybeck M. Total mineral dissolved transport by world major rivers[J]. Hydrological-Sciences-Bulletin-des, Sciences Hydrologiques, 1976, (126): 265-282

[6] Schwartzman D W, Volk T. Biotic enhancement of weathering and the habit-ability of Earth[J]. Nature, 1989, 340: 457-460

[7] Probst J L, Amiotte S P, Tardy Y. Global continental erosion and fluctuations of atmospheric CO₂ consumed during the last 100 years [C] // Kharaka Y K, Maest A (eds.) Proc 7th Int Symp. W R I. Park City, Utah, USA, Balkema, Rotterdam, 1992: 483-486

[8] Probst J L, Mortatti J, Tardy Y. Carbon river fluxes and weathering CO₂ consumption in the Congo and Amazon river basin[J]. Applied Geochemistry, 1993, 9: 1- 13

[9] White A F. Natural weathering rates of silicate minerals. In surface and ground water, weathering and soils(ed. J. I. Drever) [J]. Treaties on

- Geochemistry, 2003, 5: 133-168
- [10] Paces T. Rate constants of dissolution derived from the measurements of mass balance in hydrological catchments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1983, 47(11): 1855-1863
- [11] Meybeck M. Carbon, Nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. *Am J Sci*, 1982, 282: 401-450
- [12] Canfield D E. The geochemistry of river particulates from the continental USA: major elements[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 3349-3365
- [13] Suchet P S, Probst J L. Modeling of atmospheric CO₂ consumption by chemical weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins[J]. *Chem Geol*, 1993, 107: 205-210
- [14] Suchet P S, Probst J L. A global model for present-day atmospheric/soil CO₂ consumption by chemical erosion of continental rocks[J]. *Tellus*, 1995, 47B: 273-280
- [15] 韩贵琳. 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
- [16] Gao Q, Tao Z. Chemical weathering and chemical runoffs in the seashore granite hills in South China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(8): 1195-1204
- [17] 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 CO₂ consumption in the Himalaya. *Geochim[J]. Cosmochim Acta*, 2002, 66: 3397-3416
- [18] Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, et al.. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159: 3-30
- [19] Xu Z F, Liu C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China[J]. *Chemical Geology*, 2007, 239: 83-95
- [20] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river water draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 204: 1-21
- [21] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. *Am J Sci*, 1987, 287: 401-428
- [22] Gao Q Z, Tao Z, Huang X K, et al. Chemical weathering and CO₂ consumption in the Xijiang River basin, South China[J]. *Geomorphology*, 2009, 106: 324-332
- [23] 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
- [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: 411-419
- [25] 黄来明, 张甘霖, 杨金玲. 亚热带典型花岗岩小流域径流化学特征与化学风化[J]. *环境化学*, 2012, 31(7): 973-980
- [26] Louvat P, Allegre C J. Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 3645-3669
- [27] Rad S, Louvat P, Gorge C, et al. River dissolved and solid loads in the Lesser Antilles: New insight into basalt weathering processes[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88: 308-312
- [28] Sun H G, Han J T, Li D, et al. Chemical weathering inferred from riverine water chemistry in the lower Xijiang basin, South China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 4749-4760
- [29] Das A, Krishnaswami S, Sarin M M, et al. Chemical weathering in the Krishna Basin and Western Ghats of the Deccan Traps, India: Rates of basalt weathering and their controls[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 2067-2084
- [30] Mortatti J, Probst J L. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: Seasonal and spatial variations[J]. *Chemical Geology*, 2003, 197: 177-196
- [31] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源[J]. *地理学报*, 2007, 62(7): 764-775
- [32] Picouet C, Dupré B, Orange D, et al. Major and trace element geochemistry in the upper Niger river (Mali): Physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption [J]. *Chemical Geology*, 2002, 185: 93-124
- [33] Huh Y S, Edmond J M. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia: III. Tributaries of the Lena and Anabar draining the basement terrain of the Siberian Craton and the Trans-Baikal Highlands[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 967-987