

中国西南三江流域风化的季节性变化特征

黄 露^{1,2}, 刘丛强^{1,*}, CHETELAT Benjamin¹, 陶正华^{1,2},
张丽丽^{1,2}, 岳甫均¹, 赵志琦¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 青藏高原的风化可能影响着全球碳循环和长时间尺度气候变化, 其风化速率和影响机制一直受到科学界的关注。本研究对发源于青藏高原东部的三江——金沙江、澜沧江和怒江干流进行每月两次, 为一水文年的定点观测研究。结果表明三江水样的 pH 总体呈弱碱性, 水中主要阴阳离子组成和 TDS 变化明显并且都有明显的季节性变化特征。本研究首先用正演模型评估了不同端元对三江水化学的贡献比例, 并估算出金沙江石鼓以上、澜沧江维登以上和怒江六库以上流域的净 CO₂ 消耗速率分别为 $76.3 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $238.9 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $189.3 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 雨季净 CO₂ 消耗速率可达旱季的 2~4 倍; 反演法估算出的净 CO₂ 消耗速率与正演法的相差均在 25% 以内, 表明估算结果的可靠性。

关键词: 青藏高原; 三江流域; 水化学; 化学风化作用; CO₂ 消耗速率

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2015)05-0512-10 doi:10.14050/j.cnki.1672-9250.2015.05.005

陆地化学风化消耗大气中的 CO₂, 从而影响全球碳循环和长时间尺度气候变化^[1-2]。青藏高原雄踞亚洲大陆中部, 总面积 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$, 平均海拔 4 500 m, 作为欧亚大陆最高最大的地貌单元, 其化学风化在亚洲气候乃至全球气候变化中扮演着重要角色^[3]。青藏高原孕育着许多世界级大河, 包括三江: 金沙江、澜沧江和怒江。河流体系的水文地球化学性质可以反映流域岩石或者土壤的化学风化特征, 常被用来估算化学风化速率和大气 CO₂ 的消耗速率^[4-7]。三江流域地处印度板块与欧亚板块的碰撞挤压区, 地质作用复杂, 河流流经区域的母岩岩性在较小空间范围内差异较大。另外该区域受高原季风气候影响, 干湿季分明, 雨量较为充沛。这些因素和植被类型、气候等都将影响河水的化学性质^[8], 因此三江流域解析是青藏高原高化学风化速率及其控制机理的天然研究地^[9]。

过去, 国际上对青藏高原大河流域化学风化的研究主要集中在喜马拉雅山南坡^[10-13], 国内对于流

域化学风化的研究则主要集中在长江和黄河流域^[14-16]。近年来, 随着技术的进步和交通条件的改善, 对青藏高原东部大河流域的研究逐渐加强^[9, 17-23], 但是这些研究使用的是单一时间点的样品来评估年平均风化速率, 而本研究将使用一水文年内时间序列样品结合多年月平均径流量以期得到三江流域风化速率的季节性变化特征, 为准确估算流域化学风化和 CO₂ 消耗提供理论依据。

1 研究区域概况

金沙江、澜沧江和怒江均发源于青藏高原唐古拉山, 其中金沙江直达门以上、澜沧江昌都以上和怒江嘉玉桥以上位于青藏高原, 流域内海拔高程在 4 000 m 以上, 河谷宽坦, 水流缓慢; 金沙江石鼓、澜沧江维登和怒江六库则位于横断山脉地带, 流域河谷较窄, 水流湍急^[24-27]。

根据水文和地质学特征, 三江均被分为上、中和下游, 其中金沙江石鼓以上的区域通常被认为是上

收稿日期: 2015-03-02; 改回日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(41210004); 国家自然科学基金重点项目(41130536, 41103011, 41372376); 国家重大科学研究计划(2013CB956401)。

第一作者简介: 黄露(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为地表地球化学。E-mail: huanglu900609@163.com.

* 通讯作者: 刘丛强(1955—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为环境地球化学。E-mail: liucongqiang@vip.skleg.cn.

游^[21, 28-30],维登位于澜沧江中游^[31-32],六库常被认为是怒江干流中游和下游的分界点^[33]。石鼓、维登和六库均位于横断山脉区,处在云南省境内的三江并流区域^[34],本研究分别选择石鼓、维登和六库作为金沙江、澜沧江和怒江的采样点。

1.1 地质背景

青藏高原东部的三江(金沙江、澜沧江、怒江)地区,属阿尔卑斯-喜马拉雅造山带的组成部分,在大构造位置上处于欧亚板块和印度板块结合部位的特提斯构造域东段,呈北北西至近南北向展布^[35]。

三江流域盆地由几个外来地块镶嵌而成,从西到东,包括保山地块、腾冲地块、昌宁-孟连缝合带、临沧块体、思茅地块、金沙江-哀牢山缝合带和华南地块,这些单元以断裂或缝合带为界,缝合带区域分布的蛇绿混杂岩主要由基性、超基性岩以及石灰岩组成。金沙江源区分布着从前寒武纪到第四纪时期的蒸发岩和陆地沉积物,出露的碳酸盐岩在这个区域分布较少,金沙江上游广泛分布着古生代碳酸盐岩和碎屑岩类,此外,金沙江缝合处出露着中生代花岗岩类、火山岩和蛇绿混杂岩,石鼓附近还可以看到前寒武纪高级变质岩^[21];澜沧江源头的羌塘板块有古生代-三叠纪沉积岩和中生代弧的碎屑沉积岩分布,流域分布着不同年龄的火成侵入岩,澜沧江上游流域主要由碎屑岩、石灰岩和火山岩组成^[22];怒江上游沿着班公-怒江缝合带,上游流域主要由碎屑岩、石灰岩、浅变质岩、花岗岩侵入岩和前寒武纪高

级变质岩组成。

1.2 气候和植被特征

研究流域的三江区域纵跨纬度多,地形起伏大,导致气候差异很大,流域气温和降水均由北向南递增。三江源头地区属于高寒气候带,地势高,气温低,空气干燥,雨量稀少,年降雨量在 500 mm 左右。而石鼓、维登和六库河段的大部分区域属高原高寒带到亚热带过渡性气候,属典型季风气候,主要受西南季风控制和受东南季风影响,暖湿气流不断输入本流域,水汽充沛,多年平均降水量在 650~1 100 mm,多数地区 80% 以上的降雨量集中在 5~10 月,冬季降水最少,春季次之。研究区域河流的径流量主要是由大气降水补给,融雪和地下水补给辅之,因此径流量与降雨量变化趋势一致^[36-42],年内分配不均。

三江上游区域的植被有典型的垂直分带特征,从源区向下依次分布有高山草原、高山灌丛草甸、北方针叶林、混合针叶林和亚热带森林,金沙江、澜沧江和怒江流域的植被也各不相同。此外,三江流域的居民也会根据地形和气候等因素修筑梯田种植适宜的农作物,如大麦、玉米、土豆、水稻等^[20]。

2 样品采集、分析方法

于 2013 年 4 月至 2014 年 4 月分别在石鼓、维登和六库对金沙江、澜沧江和怒江的干流进行每月两次的现场监测和样品采集(图 1),共采集样品 74 个。用水质参数仪(WTW, pH3210/Cond3210,德

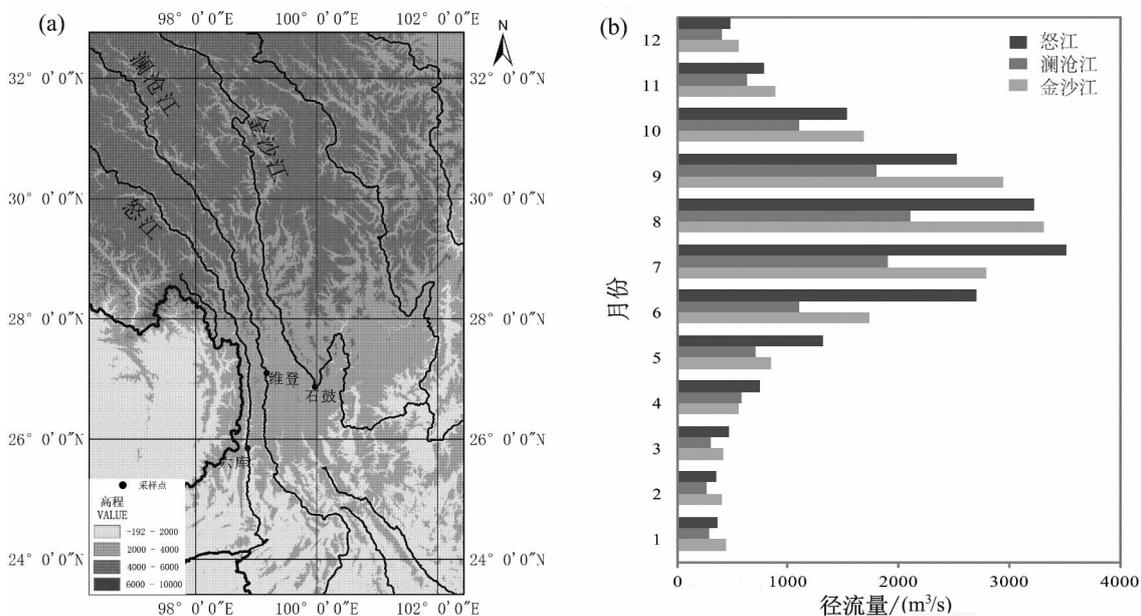


图 1 采样点位置(a)和采样点径流量概况(b)

Fig. 1 The elevation map of the Three Rivers Region and the sample locations(a) and average monthly discharge(b)

国)原位测定 pH、水温以及电导率,并用盐酸现场滴定水样碱度。

水样在 24 h 内用 0.4 μm 微孔滤膜过滤后,储存在润洗过的聚乙烯瓶中待用。取 15 mL 样品,用预先蒸馏 2 次的 6 mol/L 超纯盐酸酸化至 $\text{pH} < 2$,用 Vista MPX 型电感耦合等离子体-光发射光谱仪(ICP-OES)测定主要阳离子(Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , 和 Na^+)和硅的浓度;取 15 mL 样品存入预先用超纯水浸泡、洗净的离心管中,用 Dionex 90 型离子色谱测定阴离子(SO_4^{2-} , Cl^- , 和 NO_3^-)浓度。除现场监测外,其余测试均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完成,测试精度优于 5%。

3 结果与讨论

三江水样 pH 值变化范围较大:5.5~10.9,总体偏弱碱性。其中金沙江不同月份的样品 pH 值变化范围较大(69%的样品 pH 值大于 7);澜沧江水样 pH 值月度变化不大,并且均大于 7.7;怒江水样 pH 值偏中性。

三江水样溶解固体总量(TDS)在 105~465 mg/L 范围内,平均值为 281 mg/L,高于世界河流平均值^[6, 43]。其中金沙江样品的 TDS 变幅最大(105~465 mg/L,平均值为 288 mg/L);澜沧江样品 TDS 季节性变化明显但范围较小:222~450 mg/L,平均值为 343 mg/L;怒江样品的 TDS 有季节性变化,并且明显低于澜沧江:144~257 mg/L,平均值为 212 mg/L;这与 Noh 等^[20]研究的三江 TDS 变化范围一致。

3.1 主要离子分布特征

从阳离子和阴离子与 Si 的三角图(图 2)可以看出,金沙江和澜沧江水样中主要阴阳离子组成变化范围较大,最主要的阳离子都是 Ca^{2+} 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$,最主要的阴离子都是 HCO_3^- 和 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$,但是相较于金沙江,澜沧江中 Cl^- 含量降低, SO_4^{2-} 含量明显升高,河水中 SO_4^{2-} 的可能来源有:(1)蒸发盐岩的溶解,如石膏,硫酸钠盐等;(2)含硫矿物的氧化,如硫铁矿;(3)外源输入,如酸雨^[43]。怒江水样中主要阳离子和阴离子组成变化较小,最主要的阳离子和阴离子分别是 Ca^{2+} 和 HCO_3^- ,不同于金沙江和澜沧江,怒江水样中 Mg^{2+} 所占的比例超过了 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 所占的比例。

3.2 水中化学组成的季节性变化

三江均有明显的丰水期和枯水期^[21, 30-32],如图 1b,本文使用的径流量数据来自前人文章中对石鼓^[28-29]六库^[44]监测站水文资料的总结,澜沧江就近选择、旧州站^[45]的流量数据。整个样品采集的时间尺度内(2013 年 4 月至 2014 年 4 月),澜沧江的 TDS 随径流量升高而急剧减小,怒江的 TDS 随径流量变化不大,金沙江 TDS 虽然也随着径流量升高而降低,但是金沙江的 TDS 的最大值出现在丰水初期(图 3)。

河水化学组成的季节性变化,除了跟河水径流量的大小有关外,还跟流域风化机制有关。当流域侵蚀为风化限制时(搬运速率大于风化速率),雨水的输入会造成河水中溶质的稀释,例如金沙江和澜沧江;当流域侵蚀为搬运限制时(风化速率大于搬运

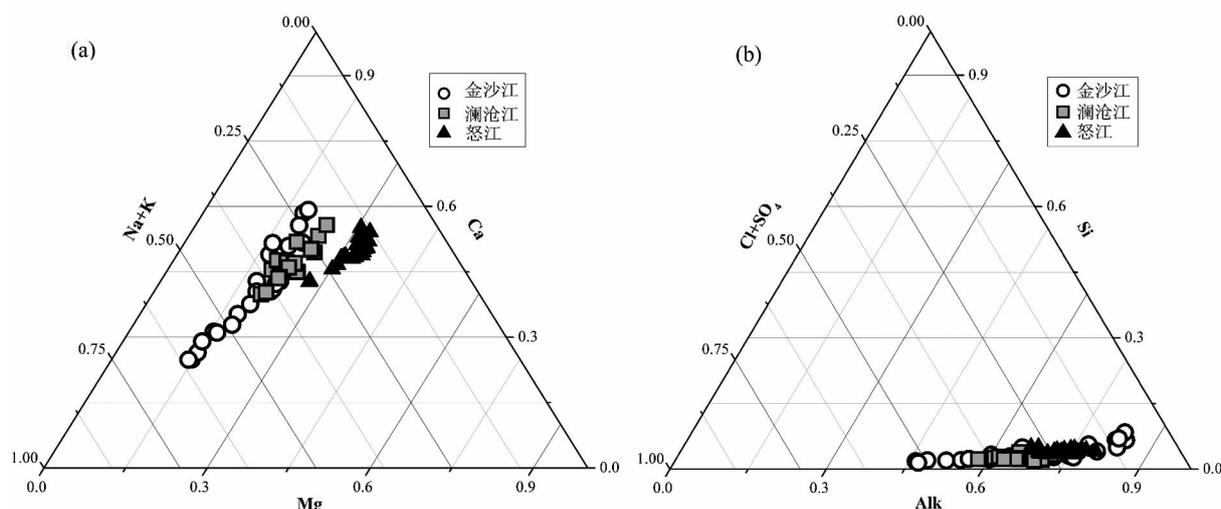


图 2 主要阳离子三角图(a)和主要阴离子与 Si 分布图(b)

Fig. 2 Ternary diagram for cations (a) and distribution diagrams for anions and Si (b)

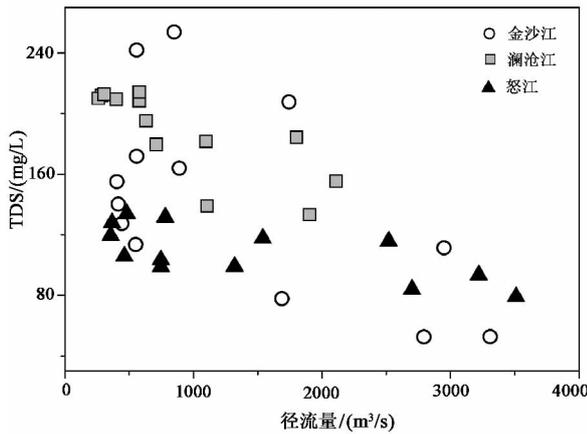


图 3 溶解固体总量 (TDS) 与采样点河水径流量之间的关系
Fig. 3 Total dissolved solids (TDS) vs. monthly average discharge for the Three Rivers' samples

速率),雨水的输入加速搬运速率,从而降低稀释作用对河水化学组成的影响,例如怒江。

除了流域侵蚀机制, Maher^[46-47]认为流体在土壤中的驻留时间也是影响河水中水化学组成变化的重要原因,当流体驻留时间超过了其达到化学平衡所需要的时间时,溶质浓度不易发生很大的变化,而当流体的驻留时间小于其达到化学平衡所需要的时间时,溶质浓度对外界干扰则会比较敏感。对本研究来讲,金沙江和澜沧江流域浅层地下水的驻留时间可能小于其达到化学平衡的时间,而怒江流域浅层地下水的驻留时间可能大于其达到化学平衡的时间,浅层地下水补给三江河水,从而导致怒江河水溶质的季节性变化不大。

Jacobson 等^[48]认为次生碳酸盐矿物沉淀也会对河水的水化学组成以及 Ca^{2+} 汇产生很大的影响。然而,如图 4 所示, Ca^{2+} 随河水径流量的升高急剧降低,而 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 随流量的增加则基本保持稳定,因此正如 Noh 等^[20]文章中所述,次生碳酸盐沉淀在三江流域作用并不明显。

3.3 河水中主要离子来源

为了更好地了解人为活动、大气沉降、蒸发盐类、碳酸盐岩和硅酸盐岩对河流中主要离子的影响,本文采用正演模型来定量评估这五个来源对三江水化学组成的贡献比例(图 5)。

3.3.1 大气沉降和人为来源

前人对石鼓雨水研究的结果显示^[20, 22],即使是对雨水反应最灵敏的 K^+ ,雨水输入也仅占 3%~13%,雨水输入的阳离子占河水阳离子的比例不到 1%。此外,采样点上游人口密度很小,因此三江上

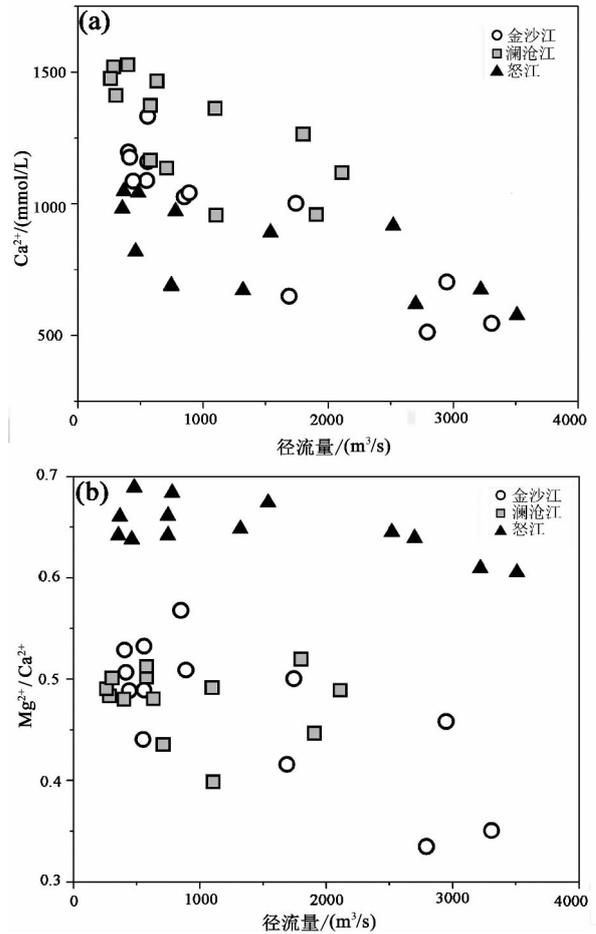


图 4 三江定点水样中 Ca^{2+} 离子浓度(a)、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (b) 与河水径流量的关系
Fig. 4 Ca^{2+} vs. monthly average discharge (a) and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ vs. monthly average discharge (b)

游大气沉降输入和人类活动的影响是可以忽略的。

3.3.2 蒸发盐类溶解

蒸发盐类的主要矿物通常为岩盐和硫酸盐,假设河水中的 Cl^- 仅来源于大气沉降和岩盐, SO_4^{2-} 仅来源于石膏或者硬石膏^[18],则蒸发盐类溶解的贡献可用图 5 中公式进行估算。需要指出的 SO_4^{2-} 还可能来源于含硫矿物的氧化,例如 Li 等^[18]研究证明同样发源于青藏高原东部的雅砻江河水中近 72% 的 SO_4^{2-} 来源于含硫矿物的氧化,因此这里对蒸发盐类溶解贡献的评估是偏高于实际值的。

3.3.3 硅酸盐类矿物风化

硅酸盐岩类矿物的风化是河水中 Na^+ 和 K^+ 的主要来源之一,含 Ca 和 Mg 的硅酸盐矿物风化可以贡献河水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。在忽略大气沉降和人类活动贡献后,河水中的 K^+ 几乎全部来源于硅酸盐矿物风化,河水中的 Na^+ 全部来源于硅酸盐岩风化和含 Na 蒸发盐溶解^[7, 49];河水中 Ca^{2+} 的来源很

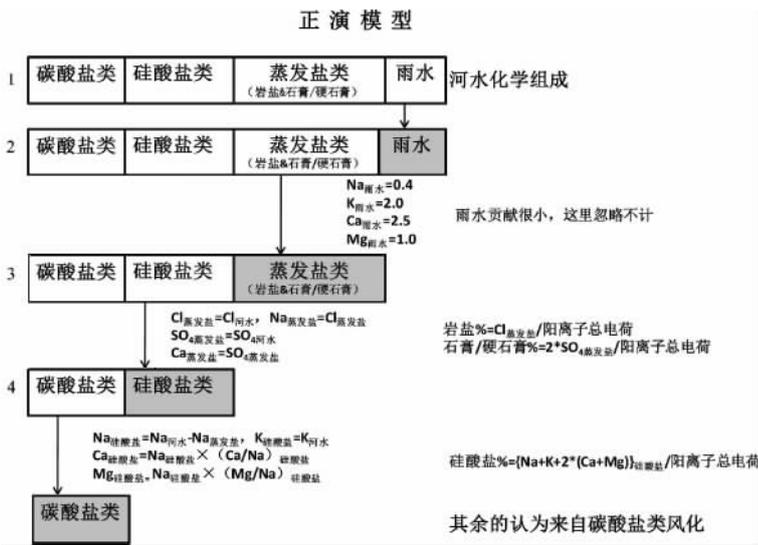


图5 正演模型
Fig. 5 Forward model

多,可能是碳酸盐类、硅酸盐类风化和蒸发盐类溶解, Mg²⁺既可以来源于碳酸盐风化也可以来源于硅酸盐类风化,因此很难直接计算硅酸盐矿物风化对河水 Ca²⁺和 Mg²⁺的贡献,一般采用间接法。如图5所示,这里的(Ca/Na)_{硅酸盐}和(Mg/Na)_{硅酸盐}是指硅酸盐矿物风化释放到溶液中的 Ca/Na和 Mg/Na的比值,但是在自然界中很难找到单一硅酸盐岩性的流域,因此这个值很难直接测得^[20, 22]。Gaillardet等^[6]在研究全球大河流域时,通过模拟小流域,给出了通用的(Ca/Na)_{硅酸盐} = 0.35 ± 0.15, (Mg/Na)_{硅酸盐} = 0.24 ± 0.12, 本文采用这些值来研究三江流域化学风化。

对硅酸盐矿物风化的贡献评估有一系列的不确定因素。首先,河水中的硫酸盐可能是来自石膏、硬石膏,也可能是硫酸钠盐,仅用主要阴阳离子数据难以将这两种来源分开,因此在评估硅酸盐岩风化来源时假设除了盐岩溶解释放的 Na⁺以外,其他的 Na⁺全部来自硅酸盐风化,这一假设高估了硅酸盐风化对河水中 Na⁺的贡献;虽然本文使用的(Ca/Na)_{硅酸盐}和(Mg/Na)_{硅酸盐}均给出了很大的不确定范围,但是也仅代表花岗岩型硅酸盐的比值,如果将火山岩考虑在内,硅酸盐风化贡献的比例将会多出7%^[20];最后,Blumn等^[50]证明硅酸盐中含有少量的碳酸盐矿物,尽管碳酸盐矿物含量很少,但是其风化对河水化学组成的影响很大,而本文没有考虑可能存在硅酸盐岩中的少量碳酸盐矿物的影响。

3.3.4 碳酸盐矿物风化

正演模型认为除了上述端元,剩余的河水中化学成分来源于碳酸盐岩风化。前人通过对三江2002年样品的S同位素进行分析,认为三江流域硫化物(如黄铁矿)的氧化是三江水中SO₄²⁻的重要来源^[19]。由于本研究没有测试硫酸盐的硫同位素,暂将SO₄²⁻全部归结为蒸发盐溶解,因此可能低估对碳酸盐类风化的贡献。

综上所述,利用正演模型对蒸发盐类(石盐和石膏)、碳酸盐类和硅酸盐类贡献的评估结果如图6所示。金沙江水样中溶质来源主要是碳酸盐矿物风化(34%~76%)和蒸发盐类溶解(11%~62%),并且这两种来源的比例变化较大;澜沧江水样中溶质的主要来源也

是碳酸盐矿物风化(39%~55%)和蒸发盐类溶解(34%~52%),较之于金沙江,澜沧江中这两种来源所占的比例变化较小;怒江水样中溶质的主要来源是碳酸盐矿物风化(35%~57%),蒸发盐类溶解所占的比例明显降低(26%~53%),而硅酸盐风化(13%~33%)所占的比例明显高于金沙江和澜沧江。这与三江主要岩石类型的分布特征是一致的。并且,如图6所示,碳酸盐风化的贡献比例在雨季略有升高,蒸发盐类溶解的贡献比例在雨季则降低。

3.4 风化速率

在地质时间尺度,含Ca和Mg的硅酸盐风化消耗大气中的CO₂,从而影响全球气候变化^[6],因此推算硅酸盐岩风化消耗大气CO₂速率具有重要意义^[1, 2, 18, 51]。这里利用碳酸盐岩和硅酸盐岩风化释放的阳离子的量和溶解硅含量结合三江采样点上游的流域面积和径流量来计算碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化速率。硅酸盐岩风化速率(SWR)可以用式(1)进行计算^[52]:

$$SWR = (Ca_{\text{硅酸盐}} + Mg_{\text{硅酸盐}} + Na_{\text{硅酸盐}} + K_{\text{硅酸盐}} + SiO_2) \times \text{径流量} / \text{流域面积} \quad (1)$$

碳酸盐岩风化速率(CWR)可用式(2)进行计算^[48]:

$$CWR = \{Ca_{\text{碳酸盐}} + Mg_{\text{碳酸盐}} + Na_{\text{碳酸盐}} + K_{\text{碳酸盐}} + 1/2(HCO_3)_{\text{碳酸盐}}\} \times \text{径流量} / \text{流域面积} \quad (2)$$

这里X_{碳酸盐或硅酸盐}(X代表Ca, Mg, Na或K)的单位是mg/L,得到的风化速率单位为t/(km²·a)。

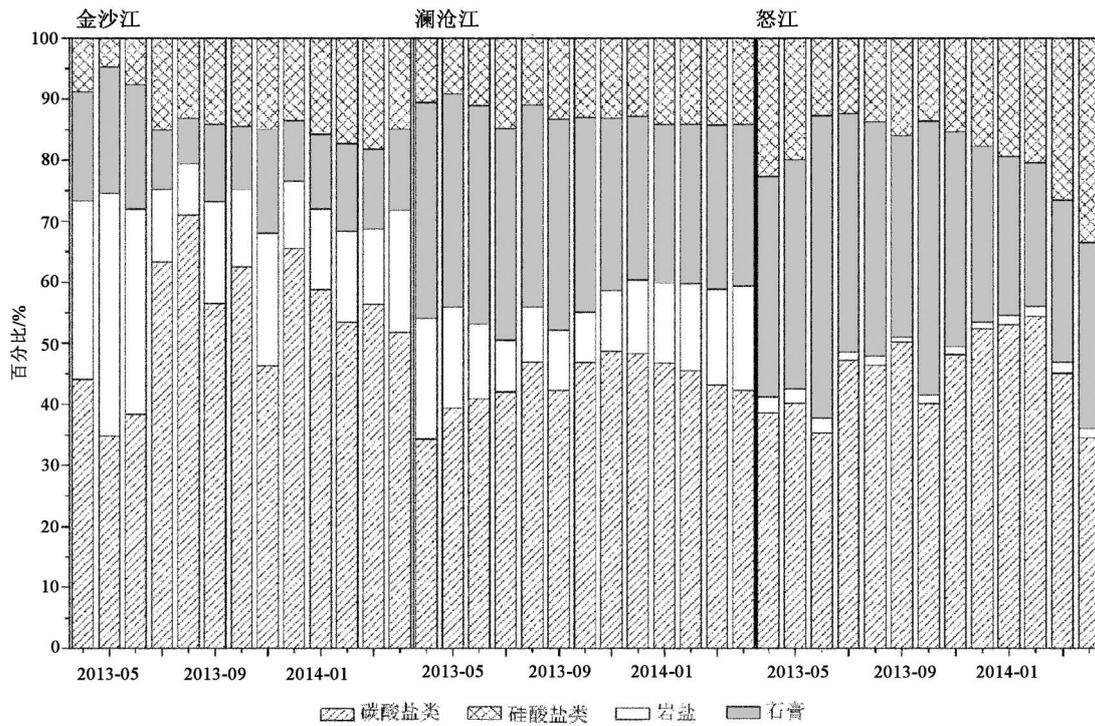


图 6 不同月份三江四个端元对河流溶解质的贡献比例分析

Fig. 6 Monthly contribution of four end-members to the dissolved solids of the Three Rivers

由于三江流域的碳酸盐岩风化普遍受到硫酸的影响^[18],本研究现有的数据难以区分碳酸和硫酸导致的碳酸盐岩溶解,因此这里只讨论硅酸盐岩风化消耗的 CO₂ 量,即净 CO₂ 消耗,公式如下:

$$[\phi \text{CO}_2]_{\text{硅酸盐}} = \phi (TZ^+)_{\text{硅酸盐}} = (2\text{Ca}_{\text{硅酸盐}} + 2\text{Mg}_{\text{硅酸盐}} + \text{Na}_{\text{硅酸盐}} + \text{K}_{\text{硅酸盐}}) \times \text{径流量} / \text{流域面积} \quad (3)$$

这里 CO₂ 消耗速率的单位为 mol/(km² · a)。经计算,金沙江石鼓、澜沧江维登和怒江六库上游区域的碳酸盐岩风化速率分别为 19.2, 57.5 和 38.3 t/(km² · a)。硅酸盐岩风化速率分别为 3.0, 7.7, 6.3 t/(km² · a), 对应的净 CO₂ 消耗速率为 76.3 × 10³, 238.9 × 10³, 189.3 × 10³ mol/(km² · a)。

在计算硅酸盐风化来源时,本文用 (Ca/Na)_{硅酸盐} 和 (Mg/Na)_{硅酸盐} 来计算硅酸盐风化释放的 Ca 和 Mg 的量,这样计算出来的硅酸盐风化速率累计误差可达 33%;假定流域为单一花岗岩,相对于花岗岩型和火山岩型硅酸盐共同来源,这一假定可能造成 7% 的不确定性;此外三江流域含硫矿物的氧化作用明显,如果河水中的 SO₄²⁻ 全部来自这一过程,CO₂ 净消耗速率将减少 30%。

前人研究流域风化速率时一般用的是某个时间(丰水期或者枯水期)采集的水样结合年平均径流

量^[17, 20, 49, 52-56],而工作从 2013 年 4 月到 2014 年 4 月分别在金沙江上游石鼓、澜沧江上游维登和怒江中游的六库进行每个月两次的定点采样,结合石鼓、维登和六库三个站点的每个月平均径流量数据进行估算,从达到 CO₂ 消耗速率的季节性变化特征,更准确的估算流域硅酸盐风化消耗 CO₂ 的目的。

3.5 结果比较

为了验证正演模型的计算结果,本文分别选择三江在丰水期和枯水期的样品进行反演模型计算。反演模型设定河水中的溶解质来自于大气降水、蒸发盐溶解、碳酸盐和硅酸盐风化四个不同端元的混合,以此进行反演计算,定量研究各端元对河水溶解质的贡献^[6, 23, 53, 57]。因为仅有主要元素组成数据,本文的反演计算以下列质量平衡方程为基础:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{X}{\text{Na}} \right) \times \alpha_i (\text{Na}) = \left(\frac{X}{\text{Na}} \right)_{\text{河水}} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i (\text{Na}) = 1 \quad (5)$$

河水中的 Na 来源较清楚且不受营养物质循环影响,因此在上述方程中用 Na 校正以后的元素对比值代替其绝对浓度,从而降低蒸发浓缩-稀释作用对结果的影响^[54]。式中 X 代表 Cl、HCO₃⁻、Ca、Mg

和 K_{ai} (Na) 表示河水中来自第 i 种端元的 Na 占总量的比例。反演计算得到的结果如表 1, 为了比较正演法和反演法的计算结果, 这里选择相同样品的正演结果和反演结果的平均值, 如表 1 所示, 可以看出金沙江和澜沧江正演和反演得到的各个端元贡献比例相差不大, 净 CO_2 消耗速率偏差在 10% 以内; 怒江正演法和反演法各个端元贡献比例相差较多, 净 CO_2 消耗速率偏差为 22%。

本研究所得的三江中上游净 CO_2 消耗速率范围是: $(17 \sim 651) \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 平均值为 $166 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 而 Noh 等^[20]得出的三江流域净 CO_2 消耗速率范围是: $(22 \sim 298) \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 平均值为 $109 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。造成这种差异的可能原因有: 首先, Noh 文中用的是全流域的样品, 包括干流和支流, 而本文研究则集中在中上游的干流; 其次 Noh 一文中使用的是单一时间点的样品结合年平均径流量, 根据 Qin 等(2006)^[23]的研究结果, 与每个月定点样品采集结合每个月径流量计算出来的结果相比, Noh 一文中计算得到的结果可能产生 $\pm 15\%$ 的偏差; 最后, 与 Noh 文中使用的径流量相比, 本文使用的径流量为采样点多年月平均径流量, 更能反应三江地球化学性质的季节性变化规律。

3.6 影响风化速率的因素

首先, 岩石类型是影响化学风化速率最主要的原因^[6, 58], 研究发现, 不同类型的岩石具有不同的抗风化能力, 因此其风化速率也不同, 总体特征为蒸发盐类矿物(石膏、硬石膏、石盐) > 碳酸盐类矿物(如方解石) > 硅酸盐类矿物(如长石和石英)。三江流域岩性异常复杂, 其中怒江流域碳酸盐岩分布最为广泛, 因此如 3.2 部分所述, 怒江流域的风化

速率较大。

其次, Summerfield 等^[59]认为对于给定岩性的流域, 河水径流量是影响化学风化的最重要因素^[60]。例如怒江的总溶解固体明显小于澜沧江, 但是由于怒江的月均径流量大于澜沧江, 怒江的年 CO_2 净消耗速率与澜沧江的相似, 如图 7a 所示。此外, 地势和径流可能是控制总剥蚀率的最主要的因素, 三江位于横断山脉河段天然落差巨大, 水流湍急, 巨大的落差和径流量可能加剧了物理侵蚀作用, 使得更多新鲜矿物暴露, 增大了水、气与矿物的接触面积, 从而间接增强了化学风化作用^[20]。

再者, 气候因素也是影响化学风化速率的重要因素^[60-61]。三江中上游流域属于典型的季风气候区, 干湿季分明。如图 7b 所示, 在雨季(5~10月), 由于温度较高, 降水充足, 净 CO_2 消耗速率可达旱季的 2~4 倍。

此外, 春夏季是植被生长的季节, 植被作用也会对风化速率产生影响, 三江中上游植被覆盖率高且物种丰富, 但是由于植被作用异常复杂, 且缺少具体的植被覆盖信息, 这里难以对植被作用进行评估。

4 结论

对金沙江石鼓、澜沧江维登和怒江六库以上流域进行每个月两次的定点观察研究表明:

三江水中主要阴阳离子组成变化范围较大, 河水中总溶解固体均随着径流量的增加而降低, 但是降低趋势并不相同, 这与三江流域的风化机制以及流域附近浅层地下水的驻留时间有关。

利用正演模型估算蒸发盐类, 碳酸盐岩和硅酸盐岩这四个端元对三江河水化学组成的贡献, 三江水中溶质最主要来源是碳酸盐岩风化(34%~76%)

表 1 正演模型与反演模型结果比较

Table 1 Comparison of forward model and inverse model

流域	计算方法	石盐	碳酸盐+石膏	硅酸盐	硅酸盐风化速率	碳酸盐风化速率	净 CO_2 消耗速率
		%			$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$		$10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
金沙江	正演法	18	69	14	4.0	19.9	100.2
	反演法	24	64	13	3.8	16.1	91.3
澜沧江	正演法	11	76	13	7.8	43.8	315.1
	反演法	13	76	12	4.7	40.5	288.9
怒江	正演法	2	79	19	7.6	36.1	210.9
	反演法	39	47	15	4.4	33.0	164.1

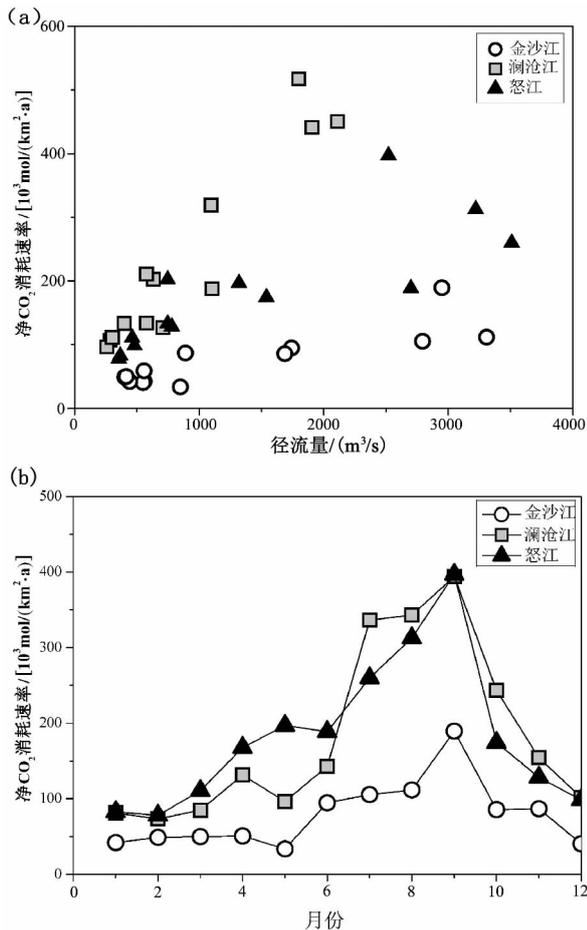


图 7 CO_2 消耗速率与径流量的关系(a)和
净 CO_2 消耗速率的季节性变化(b)

Fig. 7 Net CO_2 consumption rates vs. monthly average discharge (a) and seasonal variation of net CO_2 consumption rates (b)

和蒸发盐类溶解(11%~62%),来源较少的是硅酸盐岩风化(3%~33%),并且硅酸盐岩风化对怒江水化学风化的贡献明显高于金沙江和澜沧江,蒸发盐类溶解的贡献比例在雨季有降低趋势,三江流域雨水的贡献很小,可以忽略不计。

排除人类活动的干扰和时间序列采样为准确评估三江中上游流域的风化速率提供可能,正演法估算出澜沧江维登以上流域碳酸盐岩风化速率最大,为 $57.5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,硅酸盐岩风化速率最大的是怒江六库上游流域,为 $6.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,金沙江上游风化速率最小。三江中上游净 CO_2 消耗速率为 $(17 \sim 492) \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,平均为 $148 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,金沙江石鼓上游、澜沧江维登上游和怒江六库上游流域的净 CO_2 消耗速率分别为 $76.3 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $238.9 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $189.3 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;通过反演法对部分样品进行验证,得出正演法和反演法得到的 CO_2 净消耗速率相差均在 25%以内。此外,三江中上游流域化学风化速率有明显的季节性变化,在雨季(5~10月),由于温度较高,降水充足,净 CO_2 消耗速率可达旱季的 2~4 倍,在今后的流域风化研究中必须考虑风化速率及 CO_2 消耗速率的季节差异性。

参 考 文 献

- [1] Berner R A, Erner R A, Ladaga A C, *et al.* The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon-dioxide over the past 100 million years[J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(7): 641-683.
- [2] Dessert C, Dupre B, Gaillardet J, *et al.* Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3-4): 257-273.
- [3] 任佐华, 张于光, 李迪强, 等. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量[J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3 232-3 238.
- [4] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large chinese rivers[J]. *Nature*, 1982, 298(5874): 550-553.
- [5] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of Amazon . 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved-load[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres*, 1983, 88(NC14): 9 671-9 688.
- [6] Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1-4): 3-30.
- [7] Ryu J S, Lee K S, Chang H W, *et al.* Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1-2): 66-80.
- [8] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因[J]. *地质通报*, 2010, (2): 446-456.
- [9] Qin J, Du G, Ran J. Continental weathering features in the Jinsha River drainage basin in the eastern part of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(3): 18-23.
- [10] Sarin M M, Krishnaswami S, Dilli K, *et al.* Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river system-weathering processes and flu-

- xes to the bay of Bengal[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1989, 53(5): 997-1009.
- [11] Sarin M M, Krishnaswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river system, India[J]. *Nature*, 1984, 312(5994): 538-541.
- [12] Krishnaswami S, Trivedi J R, Sarin M M, *et al.* Strontium isotopes and rubidium in the Ganga Brahmaputra river system-weathering in the Himalaya, fluxes to the bay of Bengal and contributions to the evolution of oceanic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109(1-2): 243-253.
- [13] Karim A, Veizer J. Weathering processes in the Indus River Basin: Implications from riverine carbon, sulfur, oxygen, and strontium isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2000, 170(1-4): 153-177.
- [14] 陈静生, 李远辉, 乐嘉祥, 等. 我国河流的物理与化学侵蚀作用[J]. *科学通报*, 1984, (15): 932-936.
- [15] 陈静生, 夏星辉, 张利田, 等. 长江、黄河、松花江 60—80 年代水质变化趋势与社会经济发展的关系[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(5): 500-505.
- [16] 赵继昌, 耿冬青, 彭建华, 等. 长江源区的河水主要元素与 Sr 同位素来源[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(2): 89-93+8.
- [17] Wu L L, Huh Y, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2005, 69(22): 5279-5294.
- [18] Li S L, Chetelat B, Yue F, *et al.* Chemical weathering processes in the Yalong River draining the eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 88: 74-84.
- [19] Liu C Q, Zhao Z Q, Wang Q, *et al.* Isotope compositions of dissolved lithium in the rivers Jinshajiang, Lancangjiang, and Nujiang: Implications for weathering in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(3): S357-S359.
- [20] Noh H, Huh Y, Qin J, *et al.* Chemical weathering in the Three Rivers region of Eastern Tibet[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2009, 73(7): 1857-1877.
- [21] Wu W, Xu S, Lu H, *et al.* Mineralogy, major and trace element geochemistry of riverbed sediments in the headwaters of the Yangtze, Tongtian River and Jinsha River[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(2): 611-621.
- [22] 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(3-4): 307-320.
- [23] Qin J, Huh Y, Edmond J M, *et al.* Chemical and physical weathering in the Min Jiang, a headwater tributary of the Yangtze River[J]. *Chemical Geology*, 2006, 227(1-2): 53-69.
- [24] 杨振. 虎跳峡水电站可能最大暴雨及可能最大洪水计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [25] 王嘉学. 三江并流世界自然遗产保护中的旅游地质问题研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [26] 王舒. 变化环境下澜沧江流域植被与水文相互作用机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [27] 李志雄. 怒江流域开发与环境保护的关系[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [28] 赵文焕, 高袁. 金沙江流域径流年代际变化特性分析[J]. *人民长江*, 2011, 42(6): 98-100.
- [29] 陈媛, 王顺久, 王国庆, 等. 金沙江流域径流变化特性分析[J]. *高原山地气象研究*, 2010, 30(2): 26-30.
- [30] Cen S, Qin N, Li Y. Climatic characteristics of runoff variation in flood season in Jinsha River Basin[J]. *Resources Science*, 2012, 34(8): 1538-1545.
- [31] 李丽娟, 李海滨, 王娟. 澜沧江水文与水环境特征及其时空分异[J]. *地理科学*, 2002, 22(1): 49-56.
- [32] 何大明. 澜沧江—湄公河水文特征分析[J]. *云南地理环境研究*, 1995, 7(1): 58-74.
- [33] 姚治君, 段瑞, 刘兆飞. 怒江流域降水与气温变化及其对跨境径流的影响分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(2): 202-210.
- [34] 李廷华. 三江并流区水资源特性分析[J]. *云南水力发电*, 2003, 19(2): 15-18.
- [35] 李朋武, 高锐, 崔军文, 等. 西藏和云南三江地区特提斯洋盆演化历史的古地磁分析[J]. *地球学报*, 2005, 26(5): 3-20.
- [36] 李科国. 云南省怒江干流区水文特性[J]. *云南水力发电*, 2003, 19(B05): 14-17.
- [37] 刘冬英, 沈燕舟, 王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. *人民长江*, 2008, 39(17): 64-66.
- [38] 杨永德. 浅谈澜沧江流域水能水资源的开发与利用[J]. *水电能源科学*, 1997, 15(1): 54-59.
- [39] 邹宁, 王政祥, 吕孙云. 澜沧江流域水资源量特性分析[J]. *人民长江*, 2008, 39(17): 67-70.
- [40] 唐海行. 澜沧江—湄公河流域的水资源及其开发利用现状分析[J]. *云南地理环境研究*, 1999, 11(1): 16-25.
- [41] 郭荣文. 金沙江、雅砻江、澜沧江、怒江四江洪水特性分析[J]. *水电站设计*, 1990, (2): 17-21.
- [42] 赵东, 郑强民. 金沙江水沙特征及其变化分析[J]. *水利水电快报*, 2006, 27(14): 16-19.
- [43] 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(1-2): 83-95.
- [44] 郑江涛. 水电开发对山区河流生态系统影响模型及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [45] 周正道, 李云霞. 功果桥站水位-流量关系分析[J]. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 2012, 15(1): 107-110.
- [46] Maher K. The role of fluid residence time and topographic scales in determining chemical fluxes from landscapes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312(1-2): 48-58.
- [47] Maher K. The dependence of chemical weathering rates on fluid residence time[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(1-

- 2): 101—110.
- [48] Jacobson A D, Blum J D, Walter L M. Reconciling the elemental and Sr isotope composition of Himalayan weathering fluxes: Insights from the carbonate geochemistry of stream waters[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3 417—3 429.
- [49] 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, 05: 988—994.
- [50] Blum J D, Gazis C A, Jacobson A D, *et al.* Carbonate versus silicate weathering in the Raikhot watershed within the high Himalayan crystalline series[J]. *Geology*, 1998, 26(5): 411—414.
- [51] 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 硅酸盐风化与全球碳循环研究回顾及新进展[J]. *高校地质学报*, 2012, 02: 215—224.
- [52] Roy S, Gaillardet J, Allegre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1999, 63(9): 1 277—1 292.
- [53] Chetelat B, Liu C Q, Zhao Z Q, *et al.* Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: Anthropogenic impacts and chemical weathering[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2008, 72(17): 4 254—4 277.
- [54] Millot R, Gaillardet J, Dupre B, *et al.* Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2003, 67(7): 1 305—1 329.
- [55] Moon S, Huh Y, Qin J, *et al.* Chemical weathering in the Hong (Red) River basin: Rates of silicate weathering and their controlling factors[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2007, 71(6): 1 411—1 430.
- [56] 覃小群, 刘朋雨, 黄奇波, 等. 珠江流域岩石风化作用消耗大气/土壤 CO₂量的估算[J]. *地球学报*, 2013, 04: 455—462.
- [57] Negrel P, Allegre C J, Dupre B, *et al.* Erosion sources determined by inversion of major and trace-element ratio and strontium isotopic-ratio in river water—the Congo basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120(1-2): 59—76.
- [58] Meybeck M. Global chemical-weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. *American Journal of Science*, 1987, 287(5): 401—428.
- [59] Summerfield M A, Hulton N J. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 1994, 99(B7): 13 871—13 883.
- [60] 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, 03: 411—419.
- [61] Oliva P, Viers J, Dupre B. Chemical weathering in granitic environments[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3-4): 225—256.

Seasonal Variation Characteristics of Weathering in the Three Rivers Basin, Southwestern China

HUANG Lu^{1,2}, LIU Congqiang¹, CHETELAT Benjamin¹,
TAO Zhenghuang^{1,2}, ZHANG Lili^{1,2}, YUE Fujun¹, ZHAO Zhiqi¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550180, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the weathering of the Tibetan Plateau may affect the global carbon cycle and the long time-scale climate change, its weathering rate and influential mechanism have been subjected to the attention of the scientific community. In this study, the Jinshajiang River, the Lancangjiang River and the Nujiang River originating from the Eastern Qinghai-Tibet Plateau were monitored for one hydrological year and water samples were collected every other week. By analyzing basic physical and chemical properties, the pH of river water samples turn out to be mildly alkaline and the chemical composition have a noticeable seasonal variation. During the research, we used forward model to calculate the contribution of different end-members to the river water chemistry and net CO₂ consumption rates by silicate weathering, around $76.3 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, $182.0 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ and $238.9 \times 10^3 \text{ mol}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ of the upper reach of Shigu (the Jinshajiang River), Weideng (the Lancangjiang River) and Likuku (the Nujiang River), respectively, the net CO₂ consumption rate in rainy season can be twice to four times than that in dry season. At last, we used the inverse model to calculate the net CO₂ consumption rate, and the results appeared to be quite good (within 25%).

Key words: the Tibetan Plateau; the Three Rivers Basin; water chemistry; chemical weathering; CO₂ consumption rate