

文章编号: 1009-3850(2007)04-0001-06

青藏高原东部长江流域盆地陆地化学风化研究

秦建华^{1,2}, 冉 敬², 杜 谷²

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 长江河水主要离子由流域盆地碳酸盐岩的风化所控制, 沱沱河和楚玛尔河受蒸发盐岩影响较为明显; 河水溶质载荷 Si , Si/TZ^{+} , $\text{Si}/(\text{Na}^{+}+\text{K})$ 等指标表明, 长江流域盆地地表硅酸盐岩风化还是浅表层次的; 金沙江地表化学剥蚀速率为 $1.74 \times 10^3 \text{ mol/yr} \cdot \text{km}^2$, 雅砻江为 $1.69 \times 10^3 \text{ mol/yr} \cdot \text{km}^2$, 大渡河为 $1.57 \times 10^3 \text{ mol/yr} \cdot \text{km}^2$, 岷江为 $1.88 \times 10^3 \text{ mol/yr} \cdot \text{km}^2$, 长江河源区楚玛尔河为 $2.32 \times 10^3 \text{ mol/yr} \cdot \text{km}^2$, 沱沱河为 $1.37 \times 10^3 \text{ mol/yr} \cdot \text{km}^2$, 流域地表化学剥蚀速率可与世界上其它造山带的河流进行对比。

关 键 词: 青藏高原东部; 长江; 流域盆地; 陆地化学风化

中图分类号: P592 文献标识码: A

笔者于 2000 年和 2002 年对青藏高原东部长江河流溶质载荷主要离子地球化学进行了野外数据采集和研究工作^[1]。为便于研究对比, 按照河流发育的地质背景结合地形地貌和气候等因素, 将高原东部长江流域划分为四个次级流域分别进行研究, 即金沙江(含河源区)、雅砻江、大渡河和岷江流域。

1 金沙江流域盆地地表岩石风化

1.1 碳酸盐和蒸发盐岩石的风化

在主要阴离子和阳离子三角形图中可以看到(文献^[1]图 3), 河水中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ 和 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 为金沙江河水中最主要的离子成分, 显示出碳酸盐岩或含 Ca 硅酸盐岩与蒸发盐岩的混合风化特征。

蒸发盐石膏对河水主要离子的影响, 可从 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 图上看出(图 1)。 SO_4^{2-} 在河水中主要有两种来源: 一是黄铁矿的风化, 其特征是在阴离子三角图上投点位于中间地带(Youngsook, 1998); 二是蒸发盐石膏的风化溶解。不难看出, 研究区河水中的 SO_4^{2-} 主要是来源于石膏溶解。过量的 Ca^{2+} 来自于

碳酸盐和含 Ca^{2+} 硅酸盐的风化(图 1)。

值得注意的是, 在 Na^{+} - Cl^- 分布图(图 2)上, 金沙江表现出 $\text{Cl}^- \gg \text{Na}^{+}$ 的特征, 金沙江在上游区的补给主要为雨水、冰雪融水和地下水三分秋色。据李炳元等^[2]研究, 可可西里长江源区的地下水表现为 $\text{Cl}^- \gg \text{Na}^{+}$, 而其冰水中的 Cl^- 和 Na^{+} 含量极低, 因此, 认为金沙江河水中多余的 Cl^- 可能主要与上游地下水的补给有关。

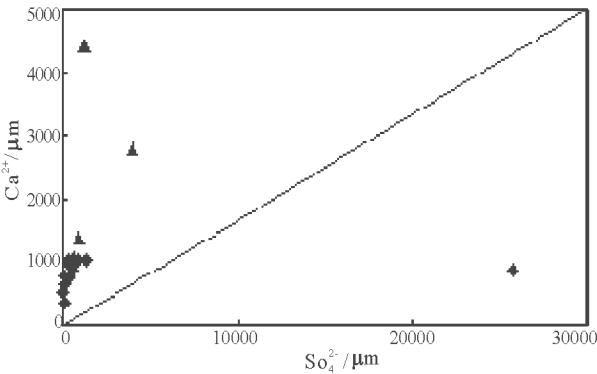


图 1 金沙江 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 分布图
Fig. 1 SO_4^{2-} - Ca^{2+} plot for the Jinsha River

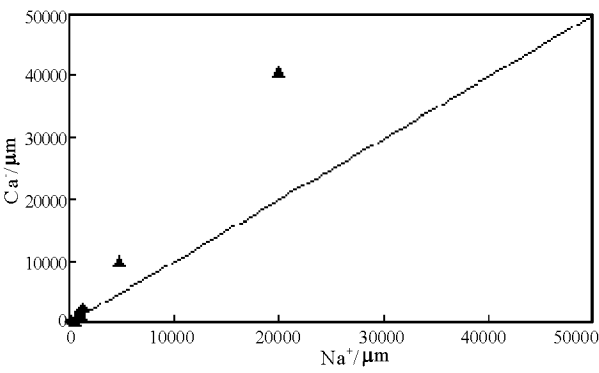


图2 金沙江 Cl^- - Na^+ 分布图

Fig. 2 Cl^- - Na^+ plot for the Jinsha River

1.2 流域盆地硅酸盐岩石的风化

河流 Si 主要来源于地表硅酸盐岩的风化。金沙江河水中 Si 浓度大多小于 $100\mu\text{m}$, 平均为 $78.8\mu\text{m}$ (不含河源区), 但在河源区河水 Si 浓度显示出异常特征, 均大于 $100\mu\text{m}$, 平均为 $152\mu\text{m}$, 最高达 $193\mu\text{m}$, 几乎可与地盾河流相比较, 可能与河源区地下水的补给有关。

Si/TZ^{+*} 可作为流域盆地硅酸盐岩风化强度的一个指标^[3]。河水 Si/TZ^{+*} 投点均落在大大低于碎

屑岩页岩风化到高岭石阶段的0.25(图 3a)。其中, 最高值为0.13, 是取自流经(样品CJ213)花岗岩的样品, 其余样品均小于0.1, 主要介于 $-0.05 \sim 0.05$ 之间, 说明金沙江流域地表硅酸盐岩的风化尚处于初级风化阶段为浅表性风化, 形成的风化产物还是富含阳离子的次生粘土矿物, 从土壤粘土矿物和悬浮物粘土矿物测定分析结果分析, 所形成的次生粘土矿物主要是水云母。

但 Si/TZ^{+*} 指标本身也有局限性, 主要是由于碳酸盐风化速度大大高于硅酸盐岩, TZ^{+*} 也就可能主要受碳酸盐的风化控制。因此, 需要利用 $\text{Si}/(\text{Na} + \text{K})$ 指标来消除碳酸盐和蒸发盐风化对硅酸盐岩风化进行分析所带来的影响和干扰, 以进一步揭示流域盆地硅酸盐岩的风化。

金沙江(除河源区外), 河水 $\text{Si}/(\text{Na}^{+} + \text{K})$ 主要介于 $0.59 \sim 1.54$ 之间, 个别可达2.17(图4)。 $\text{Si}/(\text{Na}^{+} + \text{K})$ 为2.17的样品(CJ213), 取自于巴塘县金沙江支流海子山源头, 地表岩性为花岗岩, 表明该花岗岩风化程度较浅, 可能正处于水云母风化阶段。金沙江其余样品 $\text{Si}/(\text{Na}^{+} + \text{K}) < 1.7$, 说明硅酸盐岩石总体尚处于初步风化阶段, 主要为形成水云母, 部

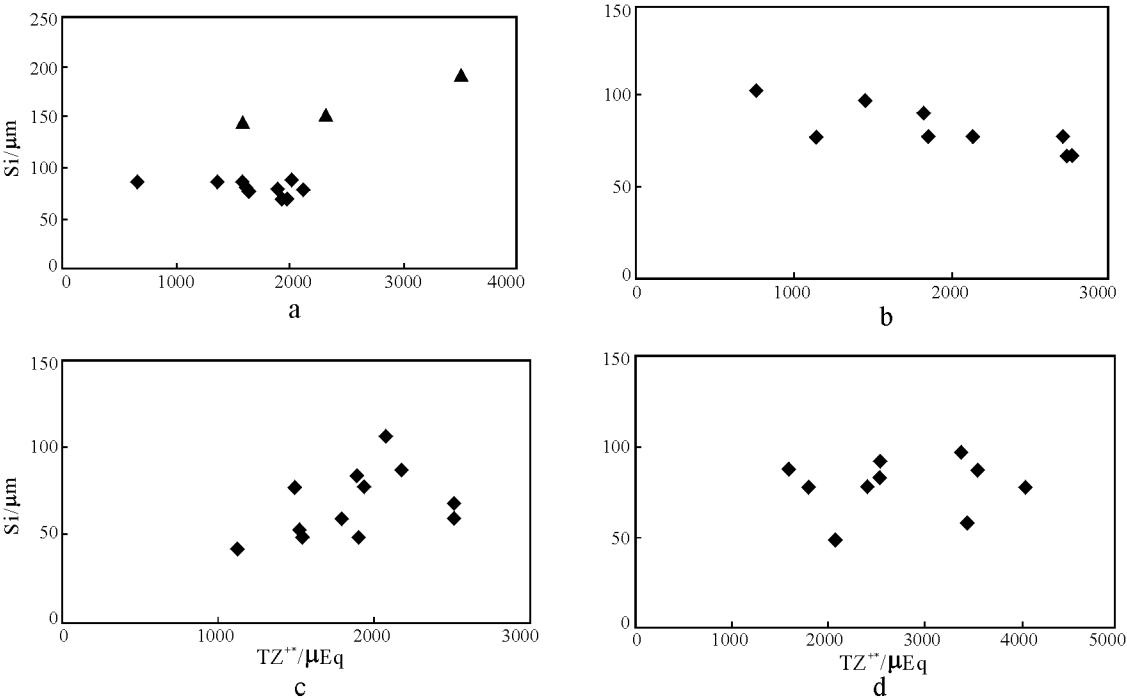
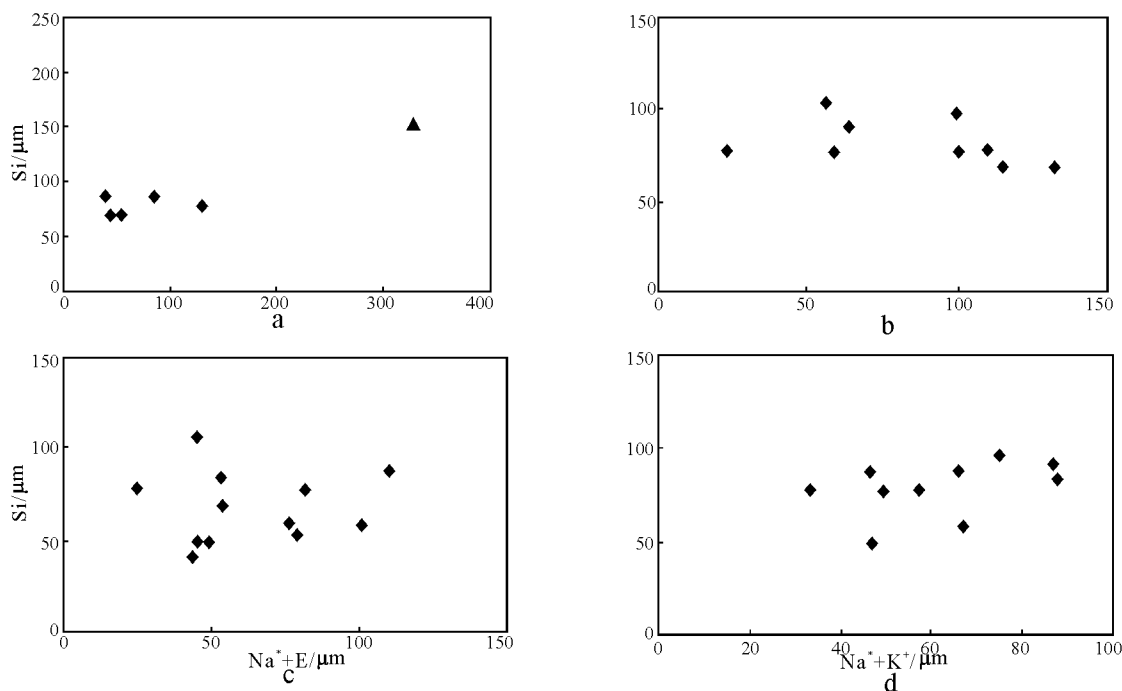


图3 长江 Si/TZ^{+*} 关系图

a. 金沙江; b. 雅砻江; c. 大渡河; d. 岷江(下同)

Fig. 3 Si/TZ^{+*} diagrams for the Changjiang drainage systems

a. Jinsha River; b. Yalong River; c. Dadu River; d. Minjiang River

图4 长江Si-(Na⁺+K)关系图Fig. 4 Si-(Na⁺+K) diagrams for the Changjiang drainage systems

分可能已达蒙脱石形成阶段,少量可能已达到高岭石形成阶段。

河水中Na⁺(=Na-Cl)可代表来自于地表硅酸盐风化所供应的Na⁺含量(若河水中有地下水供应,那么Na⁺就代表了河水中来自地表硅酸盐风化所供应的Na⁺含量的上限)。因此,可用(Na⁺+K)/TZ⁺指标来反映地表硅酸盐岩风化对河水中阳离子(TZ⁺)总量的贡献。对于有地下水供应的河水,该指标就代表了来自于地表硅酸盐岩风化对河水阳离子贡献的上限^[4,5]。金沙江(Na⁺+K)/TZ⁺介于0.02~0.08之间,平均为0.05(图5),低于恒河(平均为0.1~0.2)^[4],说明由硅酸盐风化降解对河水中阳离子的贡献并不明显,也说明河水中主要离子主要是由地表碳酸盐(含蒸发岩)的风化贡献的。

2 雅砻江、大渡河和岷江流域盆地地表岩石风化

2.1 碳酸盐和蒸发盐岩的风化

流域盆地地表碳酸盐岩的风化,在阴离子HCO₃⁻-Si-Cl⁻+SO₄²⁻三角图上(文献^[1]图3),投点均位于HCO₃⁻>Si+Cl⁻+SO₄²⁻范围之内并主要集中在HCO₃⁻附近;在阳离子Ca²⁺+Mg²⁺-(Na⁺+K⁺)三角图上,投点表现为向Ca²⁺端点相对集中的趋势。揭示出河水中离子主要是受碳酸盐风化影

响的特征。

地表石盐的风化,在Na⁺-Cl⁻图(图2)上表现为:投点大多偏离Na⁺:Cl⁻=1:1线,且Na⁺>Cl⁻。过量的Na⁺来自于硅酸盐岩的风化。地表蒸发盐石膏的风化,可用SO₄²⁻-Ca²⁺图(图1)来揭示。图中Ca²⁺(=Ca²⁺-SO₄²⁻)应来自于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化。另外,利用化学平衡计算软件MINEQL⁺ ver. 3.01^[5]对大渡河和岷江的方解石饱和度(Calcite saturation index, CSI)进行了计算,结果是所有样品的CSI>0,表明河水为碳酸盐过饱和状态,这与世界上其它的碳酸盐河流的情况是相同的^[9]。

2.2 硅酸盐岩风化

如同对金沙江流域的研究,下面利用Si、Si/TZ⁺、Si/(Na⁺+K)和(Na⁺+K)/TZ⁺等4个指标来揭示流域盆地地表硅酸盐的风化。

雅砻江、大渡河及岷江流域地表主要为三叠系西康群复理石浅变质分布,夹杂着火成岩(主要为花岗岩)和中生代、古生代碳酸盐块体。在31件样品中,河水Si浓度仅有3件大于100μm,占样品总数的6%,其余均小于100μm。最高为105.5μm(泸定大渡河),最低为41μm(大渡河),平均浓度值为75.6μm,具有沉积碎屑岩地区河流的特征,其中,岷江河水Si均小于100μm,平均为78.3μm;在大渡河的12件样品中有1件Si>100μm,平均为67.3μm;雅砻江Si在

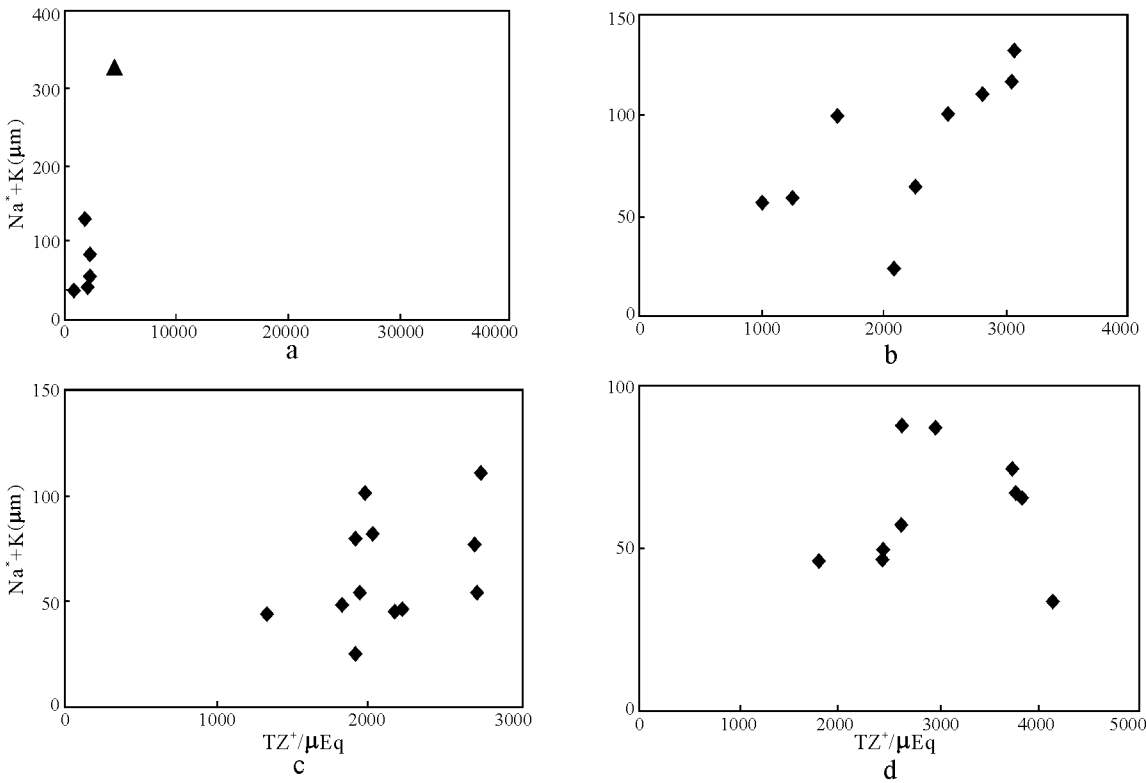


图5 长江(含源区) (Na⁺+K)-TZ⁺ 关系图

Fig. 5 (Na⁺+K)-TZ⁺ diagrams for the Changjiang drainage systems

9 件样品中仅 1 件样品大于 100 μm , 平均为 81.9 μm 。

在 Si-TZ⁺ 图(图 3)上, 河水 Si/TZ⁺ 比值均落在碎屑岩风化到高岭石阶段比值为 0.25 区域的下方, 说明硅酸盐风化尚处于形成富含阳离子的次生粘土矿物阶段。其中岷江河水 Si/TZ⁺ 介于 0.02 ~ 0.05 之间, 平均为 0.03; 大渡河 Si/TZ⁺ 介于 0.02 ~ 0.05 之间, 平均为 0.04; 雅砻江 Si/TZ⁺ 介于 0.02 ~ 0.13 之间, 平均为 0.05。

对于 Si/(Na⁺+K) 指标(图 4): 岷江最大值为 2.32, 大于 2.0 的仅有 1 件样品; 最小值为 0.87, 平均值为 1.36; 雅砻江最大值为 3.33, 大于 2.0 也仅有 1 件, 最小值为 0.51, 平均值为 1.27; 大渡河中 Si/(Na⁺+K) 比值最大为 3.07, 大于 2.0 的也仅有 1 件, 最小值为 0.58, 平均值为 1.25。考虑到流域盆地中岩石分布具有混合分布的特点, 即以西康群砂板岩为主, 夹有较多的火成侵入岩(主要是花岗岩)和少量基底变质岩, 在 Si-(Na⁺+K) 图上, 投点也主要落在陆屑页岩风化到高岭石与地盾岩石风化到高岭石的比值之间, 少量落在陆屑岩风化到高岭石比值下方。由此推测地表硅酸盐岩石风化整体上尚未进入到高岭石阶段, 主要还是处于初级的表层风化阶段, 即以形成水云母和蒙脱石粘土矿物为主的阶段。

在 (Na⁺+K)/TZ⁺ 指标中(图 5), 岷江河水介于 0.008 ~ 0.03 之间, 平均为 0.02; 大渡河的 (Na⁺+K)/TZ⁺ 比值是介于 0.01 ~ 0.05 之间, 平均值为 0.03; 雅砻江介于 0.01 ~ 0.06, 平均值为 0.04, 金沙江平均为 0.05。说明在各流域中, 河水中主要离子是受碳酸盐岩和蒸发岩的风化所影响的。虽然由硅酸盐风化降解对河水中阳离子的贡献并不是太明显, 但其贡献度从岷江→大渡河→雅砻江→金沙江是逐渐增大的。总的来看, 在岷江和大渡河流域碳酸盐岩的风化在河水主要阳离子中的贡献平均达 70%(变化范围为 40% ~ 90%), 蒸发盐岩的贡献平均达 15%(变化范围为 2% ~ 40%), 硅酸盐岩的贡献较少, 平均为 7%(变化范围为 1% ~ 24%), 大气注入的贡献最小, 平均为 6%(变化范围为 1% ~ 13%)^[9]。

3 长江流域地表化学剥蚀通量和剥蚀速率

了解由河流主要离子所代表的流域盆地地表化学剥蚀通量和剥蚀速率, 是研究物质在陆地-河流-海洋之间进行地球化学循环的一项重要内容。

研究长江在青藏高原东部流域盆地地表正在发生的化学剥蚀通量和剥蚀速率, 无疑对了解整个长

表 1 长江流域和河源区地表化学剥蚀通量和化学剥蚀速率

Table 1 Chemical denudation fluxes and chemical denudation rates in the Changjiang drainage systems

河流名称	样品编号	流域面积(km ²)	流量(109m ³ /yr)	剥蚀通量(10 ⁶ mol/yr)	剥蚀速率 (10 ⁶ mol/yr·km ²)
雅砻江	CJ0238	108649. 3525	48. 8808	183621	1. 69
金沙江	CJ0235	256343. 0323	65. 59488	445944	1. 74
大渡河	LD0105	58622. 37991	26. 96328	91843	1. 57
岷江	XK0105	22788. 34855	13. 2242976	42779	1. 88
沱沱河	CJ238	16349. 68	0. 9271584	22924	1. 40
楚玛尔河	CJ239	8322. 97	0. 26395632	19488	2. 34

江流域地表化学剥蚀作用及对全球陆地-海洋物质循环的研究具有重要意义。

表 1 中, 用于计算剥蚀通量的样品, 均取自 5、6 月份, 处于贫水期向丰水期过度的上升水位。用于计算的雅砻江样品, 是取自二滩水电站之上, 避开了水库对河水元素(主要是 Si) 的影响, 用于计算剥蚀通量的流量数据, 雅砻江、金沙江、大渡河和岷江的年流量来自于水文站 2001 年实测资料; 河源区沱沱河和楚玛尔河的数据来自于当地水文站多年平均流量。在上升水位利用一次取样和年度流量来计算流域盆地化学剥蚀通量与利用连续的时间序列样品和流量计算的剥蚀通量, 二者间的误差可控制在 ±20%。

在各个流域盆地中, 单位面积上的地表化学剥蚀通量(即化学剥蚀速率 CDR), 以河源区楚玛尔河为最高 ($2.34\times 10^6\text{mol/ yr}\cdot\text{km}^2$), 最低为沱沱河 ($1.40\times 10^6\text{mol/ yr}\cdot\text{km}^2$) 四大支流分别是: 雅砻江为 $1.69\times 10^6\text{mol/ yr}\cdot\text{km}^2$, 金沙江为 $1.74\times 10^6\text{mol/ yr}\cdot\text{km}^2$, 大渡河为 $1.57\times 10^6\text{mol/ yr}\cdot\text{km}^2$, 岷江为 $1.88\times 10^6\text{mol/ yr}\cdot\text{km}^2$ 。长江各支流流域在高原东部的 CDR (表 1), 高于长江在武汉所代表的流域盆地的 CDR ($85\text{t/ km}^2\cdot\text{yr}$)^[8]。

长江流域地表化学剥蚀速率与世界其它纬度造山带(北极/ 亚北极、热带) 的 CDR 对比表明(表 2), 长江的 CDR 高于东西伯利亚北极/ 亚北极河流约一个数量级, 但可与同处北极/ 亚北极的北美地区流径

表 2 青藏高原长江与世界其它造山带河流 CDR 对比

Table 2 Comparison of the chemical denudation rates in the Changjiang drainage systems on eastern Qinghai Xizang Plateau and the rivers in other orogenic belts in the world

河流名称	地理纬度	构造性质	CDR (10 ⁶ mol/ yr·km ²)	资料来源
马更些河(Mackenzie)	亚北极(大于 60°)	科迪勒拉山系(诺基山脉)	0. 66~0. 85	Edmond 等, (1996, 1997); Youngsook 等 (1998)
育空河(Yukon)	亚北极(大于 60°)	科迪勒拉山系(诺基山脉)	1. 6	
勒拿等河流(Lena 等)	亚北极(大于 60°)	东西伯利亚碰撞/ 增生造山带(Verkhoyansk 和 Cherskiy 山脉)	0. 04~0. 39	
弗雷泽河(Frazer)	北纬大于 50°	科迪勒拉山系(诺基山脉)	0. 24~2. 9	
亚马逊河	热带 10°	科迪勒拉山系(安底斯山脉)	0. 59~4. 1	
奥里诺科河(orinico)	热带 10°	科迪勒拉山系(安底斯山脉)	0. 96~1. 6	
金沙江(含源区)	中纬度±35°	碰撞造山带	1. 74	本文
雅砻江		碰撞造山带	1. 69	
大渡河		前陆造山带	1. 57	
岷江		前陆带	1. 88	
沱沱河		前陆带	1. 37	
楚玛尔河		前陆造山带	2. 32	

诺基山脉的河流(马更些河、育空河和弗雷泽河)对比,处于其 CDR 范围的高端;同时,长江流域 CDR 也可与热带/亚热带河流(亚马逊河和奥里诺科河)对比。

鸣谢: 研究过程中,曾与美国麻省理工学院 John. M. Edmond 教授,韩国首尔国立大学 Young-sook Huh 博士进行过讨论,得到了有益的指导和帮助。

参考文献:

[1] 秦建华,冉敬,杜谷. 青藏高原东部长江河流溶质载荷主要离子地球化学研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2007,27(3): 14- 19.

[2] 李炳元,等. 青海可可西里地区自然环境[M]. 北京: 科学出版社, 1996

[3] EDMOND J M. Himalayan tectonics, weathering processes, and the strontium isotope record in marine limestone [J]. Science, 1992, 258: 1594—1597.

[4] SARIN M M, KRISHNASWAMI S, et al. Major ion chemistry of the Ganga. Brahmaputra river system: weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal [J]. Geochim et Cosmo Acta, 1989, 53: 997—1009.

[5] STALLARD RF, EDMOND JM. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load [J]. J. Geophys. Res. 1983, 88: 9671—9688.

[6] JIANHUA QIN. Huh Y, Edmond J M, GU DU, JING RAN. Chemical and physical weathering in the Minjiang, a headwater tributary of the Yangze River [J]. Chemical Geology, 2006, 227: 53—69.

Subaerial chemical weathering in the Changjiang drainage systems on eastern Qinghai-Xizang Plateau

Qin Jian-hua^{1, 2}, Ran Jing², Du Gu²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: The major ions from the Changjiang River tend to be dominantly controlled by the weathering of the carbonate rocks in the Changjiang drainage systems on eastern Qinghai-Xizang Plateau. For instance, the major ions from the Tuotuo and Qumar Rivers in Qinghai are mostly originated from the weathering of evaporites. The indexes of Si, Si/TZ^{+ *} and Si/(Na⁺ +K) for the dissolved loads in the river water indicate the superficial weathering of the silicate rocks in the Changjiang drainage systems. The subaerial chemical denudation rates are 1.74 × 10³ mol/km² per year for the Jinsha River, 1.69 × 10³ mol/km² per year for the Yalong River, 1.57 × 10³ mol/km² per year for the Dadu River, 1.88 × 10³ mol/km² per year for the Minjiang River, 2.32 × 10³ mol/km² per year for the Qumar River, and 1.37 × 10³ mol/km² per year for the Tuotuo River. The preceding values for the chemical denudation rates in the study area may be compared with those for the rivers in other orogenic belts in the world.

Key words: eastern Qinghai-Xizang Plateau; Changjiang River; drainage basin; subaerial chemical weathering