

文章编号: 1009-3850(2008)01-0001-06

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 CO₂净消耗率研究

秦建华^{1,2}

(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: 2000~2002年期间, 笔者对青藏高原东部长江流域溶质载荷分别进行了取样分析并对流域盆地化学剥蚀通量、剥蚀速率和大气 CO₂净消耗率进行了计算。结果表明, 流域盆地化学剥蚀速率以河源区楚玛尔河最高为 $2.34 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$, 沱沱河最低为 $1.40 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$, 四大支流雅砻江为 $1.69 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$, 金沙江为 $1.74 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$, 大渡河为 $1.57 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$, 岷江为 $1.88 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$; 流域盆地 ΦCO_2 估算结果以大渡河最高为 $101.81 \times 10^3 \text{ mol/a/km}^2$, 楚玛尔河最低为 $7.55 \times 10^3 \text{ mol/a/km}^2$, 金沙江为 $44.38 \times 10^3 \text{ mol/a/km}^2$, 雅砻江为 $69.64 \times 10^3 \text{ mol/a/km}^2$, 岷江为 $81.90 \times 10^3 \text{ mol/a/km}^2$, 沱沱河为 $21.90 \times 10^3 \text{ mol/a/km}^2$ 。并对长江流域地表化学剥蚀速率主要控制因素进行了讨论。

关键词: 青藏高原; 长江流域; 化学剥蚀通量; 剥蚀速率; 大气 CO₂净消耗率
中图分类号: P512.2 文献标识码: A

研究由河流主要离子所代表的流域盆地陆地化学剥蚀通量、剥蚀速率和大气 CO₂净消耗率, 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, 也是研究陆地风化与全球气候变化的重要内容。

本文将对青藏高原东部长江流域盆地化学剥蚀通量、剥蚀速率和大气 CO₂净消耗率进行研究并对其主要控制因素进行初步讨论。

1 长江流域盆地地表化学剥蚀通量和剥蚀速率

长江流域盆地地表化学剥蚀通量 (Flux) 和化学剥蚀速率 (CDR) 见表 1。化学剥蚀通量的计算为: 河水溶解质总量 TDS (TDS = Na + K + Ca + Mg + HCO₃ + Cl + SO₄ + S_i) 乘以年度流量, 即: Flux = TDS 样品 × 年流量; 化学剥蚀速率为: 化学剥蚀通

量 (Flux) 除以流域面积, 即: CDR = Flux ÷ 流域面积。表 1 中用以计算流域盆地地表化学剥蚀通量和化学剥蚀速率的样品分布见图 1。

表 1 中, 用于计算剥蚀通量 (Flux) 的样品, 均取自 5 月、6 月份, 处于贫水期向丰水期过渡的上升水位。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 S_i) 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。研究表明, 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%^[1]。

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

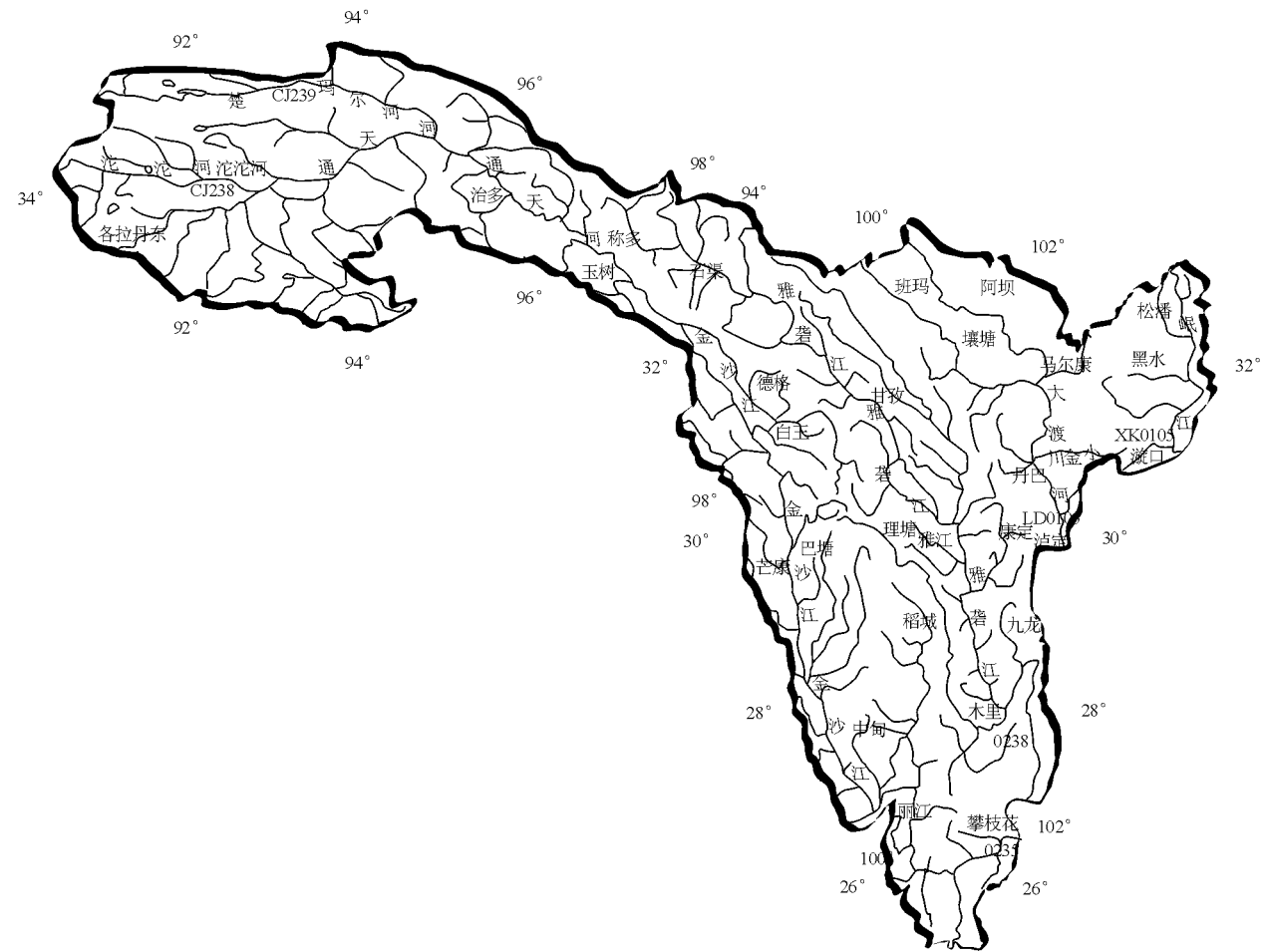


图 1 青藏高原东部长江流域化学剥蚀通量计算样品分布

Fig 1 Distribution of the samples used to calculate continental chemical weathering flux in the Changjiang drainage basins on the eastern Qinghai-Xizang Plateau

表 1 长江流域地表化学剥蚀通量 (Flux)和化学剥蚀速率 (CDR)

TTable 1 Continental chemical weathering flux and chemical denudation rates (CDR) in the Changjiang drainage basins

河流名称	样品编号	取样时间	流域 / km²	流量 (10 ⁹ m³ / a)	剥蚀通量 (10 ⁶ mol / a)	剥蚀速率 (10 ⁶ mol / a / km²)
雅砻江	CJ238	2002 年 5 月	108649.35	48.88	183621	1.69
金沙江	CJ235	2002 年 5 月	256343.03	65.59	445944	1.74
大渡河	LD0105	2001 年 5 月	58622.38	26.96	91843	1.57
岷江	XK0105	2001 年 5 月	22788.35	13.22	42779	1.88
沱沱河	CJ238	2000 年 6 月	16349.68	0.93	22924	1.40
楚玛尔河	CJ239	2000 年 6 月	8322.97	0.26	19488	2.34

为最高 (2.34× 10⁶ mol / a / km²), 最低沱沱河为 1.40× 10⁶ mol / a / km², 四大支流分别是: 雅砻江为 1.69× 10⁶ mol / a / km², 金沙江为 1.74× 10⁶ mol / a / km², 大渡河为 1.57× 10⁶ mol / a / km², 岷江为 1.88× 10⁶ mol / a / km². 长江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。

2 流域盆地地表化学风化大气 CO₂ 净消耗率

大气 CO₂ 是最为重要的温室气体, 强烈的影响着全球气候变化。目前, 人们已普遍认为全球新生

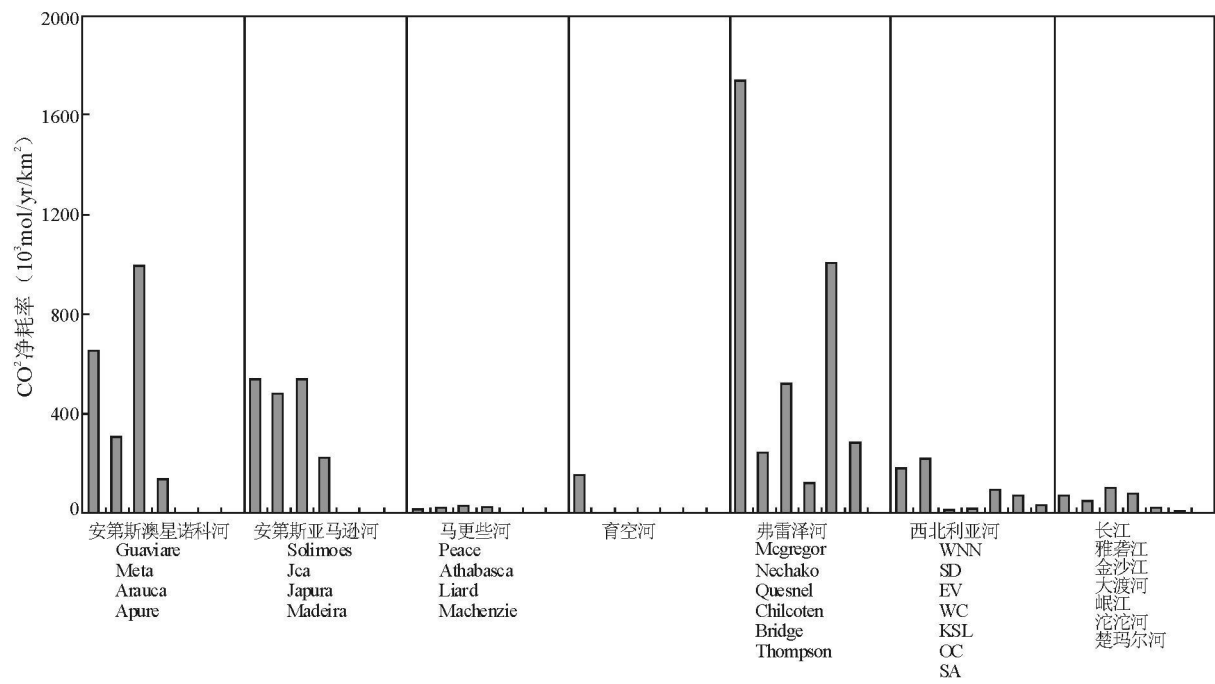


图 2 长江流域Φ CO₂ 与世界造山带河流的对比

Fig 2 Comparison of net CO₂ consumption rates in the Changjiang drainage basins with those in the rivers in other orogenic belts of the world

代气候长期变冷可能就是因为大气 CO₂ 浓度逐渐缓慢下降引起的,而全球大气 CO₂ 浓度水平在地质时间尺度上 (> 10⁶ a) 又是与全球碳循环密切相关的。在全球碳循环中,大气 CO₂ 的源 (Sources of CO₂), 主要是由火山作用和变质作用释放的 CO₂; 大气 CO₂ 的净汇 (Net sink of CO₂), 主要是地表硅酸盐岩风化以重碳酸盐形式 (bicarbonates) 消耗摄取的大气 CO₂。大气 CO₂ 汇和源之间的不平衡就会在百万年以上的地质时间尺度上引起气候变化。因此,研究现代流域盆地地表风化消耗的大气 CO₂ 净消耗率 (Φ CO₂), 对于研究地质历史中的气候变化和全球碳循环具有重要意义。

利用河水主要离子计算流域盆地地表硅酸盐风化所消耗的大气 CO₂ 净消耗率 (Φ CO₂, mol/a/km²) (Net Consumption Rate), 在无 S 同位素约束情况下, Edmond 等 (1997) [2] 提出了三种方法来粗略估计 Φ CO₂, 即:

- (1) 当流域内仅有火成岩和变质岩风化时, Φ CO₂ = Φ T⁺
- (2) 若流域内受到了来源于采矿、造纸等的盐类污染时, Φ CO₂ = Φ Alk
- (3) 在具有石灰岩和白云石等混合岩的流域内, Φ CO₂ = 2Φ Si

如前所述,研究区内各流域河水主要离子均受到了硅酸盐和碳酸盐岩风化作用的共同影响,属于 Edmond 划分的第三种情形。因此,我们采用 Φ CO₂ = 2 S 对高原东部长江流域的 Φ CO₂ 进行了估算 (表 2)。需要说明的是,长江流域从江源到高原东缘都不同程度地发育有沼泽、湖泊和水库,这些静止水体通过硅藻的形成摄取河水中的硅从而降低了河水 Si 的含量,因此,利用河水 S 来估计 Φ CO₂, 应当是流域盆地 Φ CO₂ 的下限。

对各流域盆地 Φ CO₂ 估算结果表明 (表 2), 以大渡河最高为 101.81 × 10³ mol/a/km², 楚玛尔河最低为 7.55 × 10³ mol/a/km²。其它河流,金沙江为 44.38 × 10³ mol/a/km², 雅砻江为 69.64 × 10³ mol/a/km², 岷江为 81.90 × 10³ mol/a/km², 沱沱河为 21.90 × 10³ mol/a/km²。

长江各流域 Φ CO₂ 与世界上其它造山带河流对比表明 (表 3 图 3), 它可与位于北极、亚北极造山带河流,如流经北美诺基山脉马更些河 (Mackenzie) 和东西伯利亚地区流经 Verkhoyansk 和 chersky 造山带的河流 (勒拿河等) 进行对比,但比北极、亚北极造山带育空河 (Yukon)、弗雷泽河 (Frazier) 和热带地区流经安底斯山脉的亚玛逊河 (Amazon) 和奥里诺科河 (Orinoco) 的 Φ CO₂ 低约一个数量级。

表 2 长江各流域盆地 ΦCO_2 计算
Table 2 Calculations of net CO_2 consumption rates (ΦCO_2) in the Changjiang drainage basins

河流名称	样品编号	流域面积 (km^2)	流量 ($10^9 \text{ m}^3/\text{a}$)	$\text{Si}(\mu\text{M})$	单位面积硅通量 (10^3 mol/a/km^2)	ΦCO_2 (10^3 mol/a/km^2)
雅砻江	CJ238	108649.3525	48.8808	77.4	34.82	69.64
金沙江	CJ235	256343.0323	65.5949	86.7	22.19	44.38
大渡河	LD105	58622.3799	26.9633	110.7	50.91	101.81
岷江	XK0105	22788.3486	13.2243	70.6	40.95	81.90
沱沱河	CJ38	16349.6800	0.9272	193.1	10.95	21.90
楚玛尔河	CJ39	8322.9700	0.2640	119.0	3.77	7.55

表 3 青藏高原长江与世界其它造山带河流 CDR和 ΦCO_2 的对比
Table 3 Comparison of the chemical denudation rates (CDR) and net CO_2 consumption rates (ΦCO_2) in the Changjiang drainage basins with those in the rivers in other orogenic belts of the world

河流名称		地理纬度	构造性质	CDR (10^6 mol/a/km^2)	ΦCO_2 (10^3 mol/a/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	19~30	Edmond等 (1997) ^[2] ; Youngsook 等 (1998) ^[3]
育空河 (Yukon)		亚北极 (大于 60°)	科迪勒拉山系 (诺基山脉)	1.6	161	
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 Chersky山脉)	0.04~0.39	18~230	
弗雷泽河 (Fraser)		北纬大于 50°	科迪勒拉山系 (诺基山脉)	0.24~2.9	128~1750	
亚马逊河		热带 10°	科迪勒拉山系 (安第斯山脉)	0.59~4.1	219~551	
奥里诺科河 (Orinoco)		热带 10°	科迪勒拉山系 (安第斯山脉)	0.96~1.6	143~1000	本文
长江流域	金沙江 (含源区)	中纬度 $\pm 35^\circ$	碰撞造山带	1.74	44.38	
	雅砻江		碰撞造山带	1.69	69.64	
	大渡河		前陆造山带	1.57	101.81	
	岷江		前陆带	1.88	81.90	
	沱沱河		前陆带	1.37	21.90	
	楚玛尔河		前陆造山带	2.32	7.55	

3 长江流域盆地地表化学剥蚀速率和主控因素

3.1 CDR主控因素的认识

目前,人们已普遍认为影响流域盆地地表化学剥蚀速率 (CDR)的因素较多,有地形、气候、岩性、构造作用、生物作用等,但关于影响 CDR的主要控制因素则有不同认识,主要有以下几种:

(1)Walke等^[4]认为地球温度的升高将会影响高大气中水的饱和蒸汽压的提高,由此提高了从陆地到海洋的径流量。而大气温度增高本身也促进了地表风化作用。因此,在Walke等看来,大气温度应是控制 CDR的主控因素,这也是其“衡温器”假说的理论基础。同时,White和 Blum^[5]也认为大气的温度和降雨因素比地形和机械侵蚀对 CDR的影响更为强烈。

(2)以 Raft^[6,7]为代表的一些科学家认为构造抬升和地形起伏应是控制地表 CDR的主要因素,这也是它们提出的“构造抬升—气候”理论的核心内容。Summerfield等^[8]也认为地表 CDR主要是受地形起伏的影响,而不是气候。

(3)Edmond等^[2]认为地表 CDR主要是受岩性和地形变化控制,受气候 (主要指温度/径流)的影响很小。Youngsook等 (1998)也认为岩性和机械剥蚀促使地表新鲜岩石不断暴露应是控制地表 CDR的主要因素。

3.2 地表 CDR的主控因素

高原东部长江流域地处北半球中纬度地区,其地表 CDR经与世界其它纬度造山带 (北极/亚北极、热带)的 CDR对比表明 (表 3 图 4),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经诺基山脉的河

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。由此,就从地球纬度梯度的对比上,排除了气候(主要是温度)是长江流域地表CDR主控因素的可能性。

为进一步揭示长江地表CDR的主控因素,我们对长江河源地区与岷江流域进行了地质地理的对比(表4)。从表中,我们可以看到,长江河源区在构造地形上地处高原腹地,大部分地形起伏较小,表现为小起伏高山宽谷盆地,气候为高原亚寒带亚干旱,年降水量约100mm;相比之下,岷江流域在地形上为深切割至中等切割的山脉地区,气候具有高原亚温带湿润特征,年降水量大于400mm。然而,二者地表CDR却大致相同,完全可以对比。其原因就在于长江河源区有较多的碳酸盐岩和蒸盐岩分布,同时由

于河源区广大地面为冰缘作用地区,寒冻风化作用极为强烈,几乎可与北极/亚北极地区相比。而寒冻作用在促使新鲜岩石表面不断的暴露方面有着巨大的效力)^[5]。

岩石新鲜面的不断暴露对于化学风化能力的提高已得到实验和野外研究的证实。Blum指出在岩石刚暴露时化学风化速率非常迅速,然后就呈指数衰减并在初始暴露105 s后其化学风化速率就已进行得非常缓慢了。因此,在主体地形起伏较小的河源地区,由于冰冻作用将新鲜岩石不断暴露于地表,这对于提高地表化学风化速率就显得尤为重要。

综上所述,不难看出,控制青藏高原东部长江河流域地表CDR的主要控制因素应是地表分布的岩性和促使岩石新鲜面不断暴露于地表的机械风化作用(包括寒冻风化)。

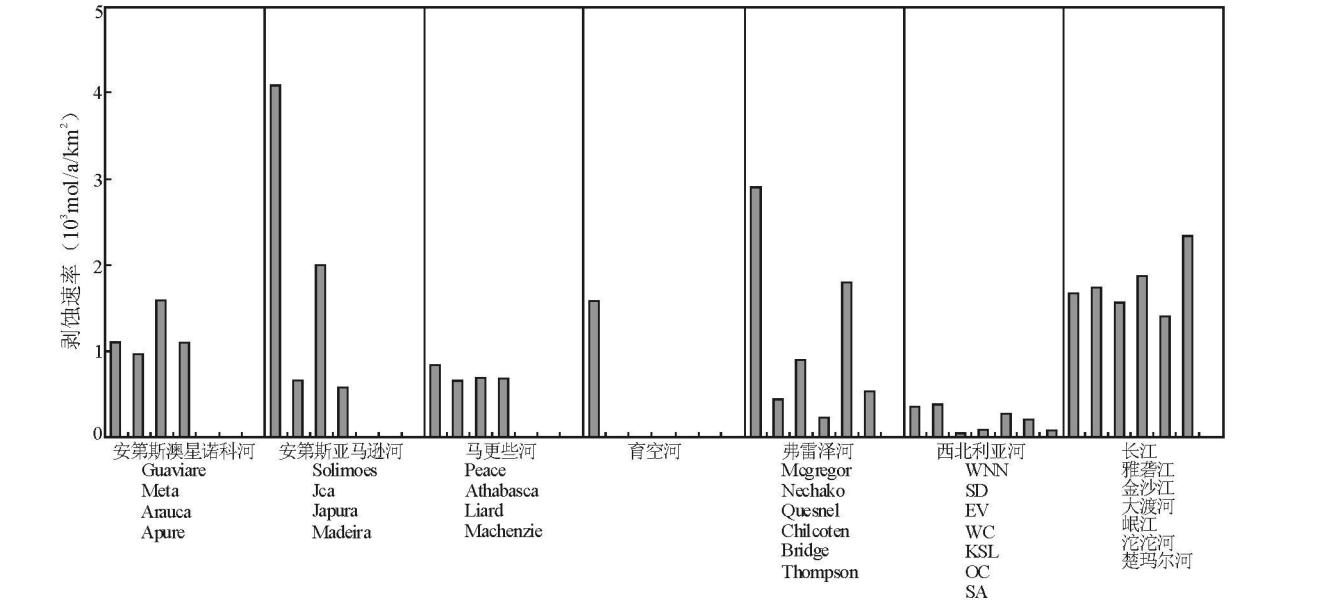


图3 长江各流域CDR与世界其它造山带河流^[9]的对比

Fig 3 Comparison of chemical denudation rates (CDR) in the Changjiang drainage basins with those in the rivers in other orogenic belts of the world

表4 长江河源区与岷江流域地质地理气候对比
Table 4 Comparison of geology, geography and climates in the source areas of the Changjiang River and in the Minjiang drainage basins

地质地理因素	长江河源区	岷江流域
构造地形	为高原腹地。主要地形为小起伏高山宽谷盆地,次为中小起伏高山谷地,零星地形为丘状高原湖盆和极大起伏极高山区	为山地区,包括深切割中山和中等切割低山
气候	高原亚寒带亚干旱	高原亚温带湿润
岩性	灰岩夹蒸发盐(石膏)和陆屑岩,少量火成岩	浅变质陆屑岩为主,次为火成岩,少量为碳酸盐岩
CDR	$(1.37 \sim 2.32) \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$	$1.88 \times 10^6 \text{ mol/a/km}^2$

地形和气候资料来源:“中国自然地理图集”^[10];“中华人民共和国地图集”^[11];青海可可西里地区自然环境”^[12]

参考文献:

[1] Jianhua Q in Youngsook Huh et al (2006) Chemical and Physical weathering in the Minjiang a headwater tributary of the Yangtze River. *Chemical Geology* 227: 53—69.

[2] Edmond J M et al (1997) Chemical weathering yields from basement and orogenic terrains in hot and cold climate [A]. in Ruddiman W F ed. *Tectonic Uplift and Climate Change*. New York: Plenum Press. 329—351.

[3] Huh Y, Panteleyev G, et al (1998b) The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia II. Tributaries of the Lena, Onon, Yana, and Girka Kolyma, and Anadyr draining the collisional/accretionary zone of the Verkhoyansk and Chersky ranges. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62: 2053—2075.

[4] Walker J C G, Hays P B (1981) A negative feedback mechanism for the long term stabilization of earth surface temperature. *Journal of Geophysical Research* 86: 9776—9781.

[5] White A F, Blum A E (1995) Effects of climate on chemical

weathering in watersheds. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 59: 1729—1747.

[6] Raymo M E, Ruddiman W F (1992) Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature* 359: 117—122.

[7] Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles. *Geology* 1988 16: 649—653.

[8] Summerfield M A, Hulton N J (1994) Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 99: 13871—13883.

[9] Ruddiman W F, Raymo M E, Prell W L, et al (1997) The uplift—climate connection: a synthesis [A]. in Ruddiman W F, ed. *Tectonic Uplift and Climate Change* [M]. New York: Plenum Press. 471—509.

[10] 中国自然地理图集 [R]. (高等学校教学参考用). 北京: 中国地图出版社编制出版, 1998.

[11] 中华人民共和国地图集 [R]. 北京: 中国地图出版社, 1994.

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

Continental chemical weathering flux, chemical denudation rates and net CO₂ consumption rates in the Changjiang drainage basins on the eastern Qinghai-Xizang Plateau

QN Jianhua²

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

Abstract: Based on the samples taken from the Changjiang drainage basins on the eastern Qinghai-Xizang Plateau in May and June of 2000, 2001 and 2002, the continental chemical weathering flux, chemical denudation rates and net CO₂ consumption rates for individual basins are generalized as follows: (1) The chemical denudation rate is highest (2.34×10^6 mol/yr/km²) for the Qumar River and lowest (1.40×10^6 mol/yr/km²) for the Tuotuo River. The chemical denudation rates of the other four main tributaries of the Changjiang River in the region are 1.69×10^6 mol/yr/km² for the Yalong River, 1.74×10^6 mol/yr/km² for the Jinsha River, 1.57×10^6 mol/yr/km² for the Dadu River, and 1.88×10^6 mol/yr/km² for the Minjiang River, respectively. (2) The net CO₂ consumption rates in the tributaries of the Yangtze River, on the other hand, are 101.81×10^3 mol/yr/km² for the Dadu River, 7.55×10^3 mol/yr/km² for the Qumar River, 44.38×10^3 mol/yr/km² for the Jinsha River, 69.64×10^3 mol/yr/km² for the Yalong River, 81.90×10^3 mol/yr/km² for the Minjiang River, and 21.90×10^3 mol/yr/km² for the Tuotuo River, respectively. The physical weathering is considered as a most important factor influencing the chemical denudation rates in the study area.

Key words: Qinghai-Xizang Plateau, Changjiang drainage basin, chemical weathering flux, chemical denudation rate, net CO₂ consumption rate