

乌江源区白泥河流域化学风化过程及其碳汇效应研究

焦树林¹, 梁虹¹, 丁蓉²

1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

2. 六盘水市水文水资源局, 贵州六盘水 553000

摘要 为了研究喀斯特地区源头流域化学侵蚀输出河流溶解无机碳(DIC)而消耗大气CO₂的碳汇效应,自2010年6月至2011年5月对乌江源地区喀斯特广泛发育的三岔河流域源头白泥河的向阳水文站断面的水文与水化学过程进行了一个水文年的观测。分析了该断面的总溶解固体物(TDS)及其碳汇通量和强度变化规律。结果表明,白泥河向阳断面的TDS的年输出通量和侵蚀强度分别约为 $6.37 \times 10^{10} \text{g}$ 和 $7.495 \times 10^7 \text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,化学侵蚀的同时,断面DIC的年输出通量和侵蚀强度分别达到 $5.483 \times 10^8 \text{mol}$ 和 $6.45 \times 10^5 \text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。按照98%的化学侵蚀来源于流域碳酸盐岩溶蚀作用估算,该流域化学侵蚀过程消耗大气CO₂约 $2.819 \times 10^8 \text{mol}$,其碳汇强度约为 $3.32 \times 10^5 \text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中95%的化学侵蚀和碳汇发生在高温多雨的6—11月。受到强烈的岩溶作用影响,白泥河流域化学风化及其碳汇强度与流域地貌、气候条件和水文过程密切相关。

关键词 乌江源白泥河流域;岩溶水文过程;化学侵蚀;流域碳汇通量

中图分类号 X142, P951, S157.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.015

Chemical Weathering Processes and Its Atmospheric CO₂ Consumption of the Bainihe Watershed in Wujiang River Source Drainage Basins Area

JIAO Shulin¹, LIANG Hong¹, DING Rong²

1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2. Liupanshui Hydrographic and Water Resources Survey Bureau, Liupanshui 553000, Guizhou Province, China

Abstract For understanding the law on the atmospheric CO₂ consumption effect due to Dissolved Inorganic Carbon (DIC) discharged from the chemical weathering processes in the Source Drainage Basins Area of the Karst region, a riverine hydro-chemical investigation is carried out during the entire hydrologic year from June 2010 to May 2011 in the water channel of the Xiangyang Hydrological Stations located at the Bainihe watershed in Wujiang River Source Drainage Basins Area, that the cover layer is mainly carbonate as well as Karst landforms are widely developed. The variation of the Total Dissolved Substances (TDS), its sink flux to atmospheric carbon, and intensity change in the cross-section studied are analyzed. Result indicates that the annual fluxes on the TDS are amount of $6.37 \times 10^{10} \text{g}$ with $7.495 \times 10^7 \text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in chemical weathering modulus, and the annual fluxes of the DIC are amount of $5.483 \times 10^8 \text{mol}$ with $6.45 \times 10^5 \text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in DIC weathering modulus. Based on the carbonate weathering contribution rate amounting to 98% of the riverine DIC, the annual fluxes of the atmospheric CO₂ consumption at Xiangyang Hydrological Stations of the Bainihe watershed are about $2.819 \times 10^8 \text{mol}$ with $3.32 \times 10^5 \text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in modulus, about 95% of which are discharged during the hot-rainy period from June to November in the year surveyed. Impacted strongly by Karst process, the chemical weathering and its carbon consumption are closely related to the characteristics of watershed land surface, climatic condition, as well as hydrological processes in the Bainihe watershed.

收稿日期: 2012-06-12;修回日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41263011);贵州省科学技术基金项目;贵州师范大学博士科研项目、贵州省高层次人才特助基金项目;教育部科学技术研究重点项目(210201)

作者简介: 焦树林,副教授,研究方向为流域水文水资源及地表过程与环境变化,电子信箱: jiaoshulin@gznu.edu.cn

Keywords Bainihe watershed in Wujiang River Source Drainage Basins Area; Karst hydrologic process; chemical weathering; atmospherical CO₂ consumption flux of the drainage basin

0 引言

流域岩石化学风化导致的流域化学侵蚀使得流域出口断面输出的总溶解固体物(TDS)包含河流溶解无机碳 DIC, 据此可以推算, 流域化学风化过程吸收大气和土壤空气中 CO₂ 的量^[1-2], 对解析流域碳汇效应、水土流失机制和流域综合治理具有重要意义。中国学者非常重视流域化学侵蚀过程及其碳汇规律研究, 针对不同区域的流域展开相关的研究工作, 取得了一系列的成果^[3-9], 这些基础工作对中国实施碳减排、规避碳风险具有十分重要科学意义。喀斯特地区化学侵蚀的特色就是大量的河流溶解无机碳来源于流域碳酸盐岩的化学溶蚀, 其碳汇规律与流域下垫面及其水文过程密切相关。本研究选取世界三大喀斯特分布中心之一的云贵高原乌江源地区的三岔河流域的白泥河向阳水文站断面为研究对象, 通过一个

水文年的野外实测分析, 揭示喀斯特源头流域的碳汇规律, 为研究河流过程中碳的迁移转化机制提供基础资料。

1 研究区概况

乌江是长江上游的重要支流, 其正源三岔河发源于贵州省威宁县香炉山乡银洞村的石缸洞, 源头至六盘水称为白泥河, 白泥河向阳水文站断面以上流域面积 850km²。流域广泛出露碳酸盐岩、赋水岩层以碳酸盐岩岩溶水为主, 间有砂页岩及玄武岩裂隙水(图 1)^[10]。地貌特征以喀斯特高原低缓丘为主。流域岩溶发育, 溶蚀沟槽洼地、落水洞、漏斗、暗河随处可见, 体现了岩溶地貌的早、中期发育特征。流域地处乌蒙山区与云南高原之间, 受西南季风和东南季风的共同影响, 为亚热带季风性湿润气候, 雨季集中在 5—11 月。

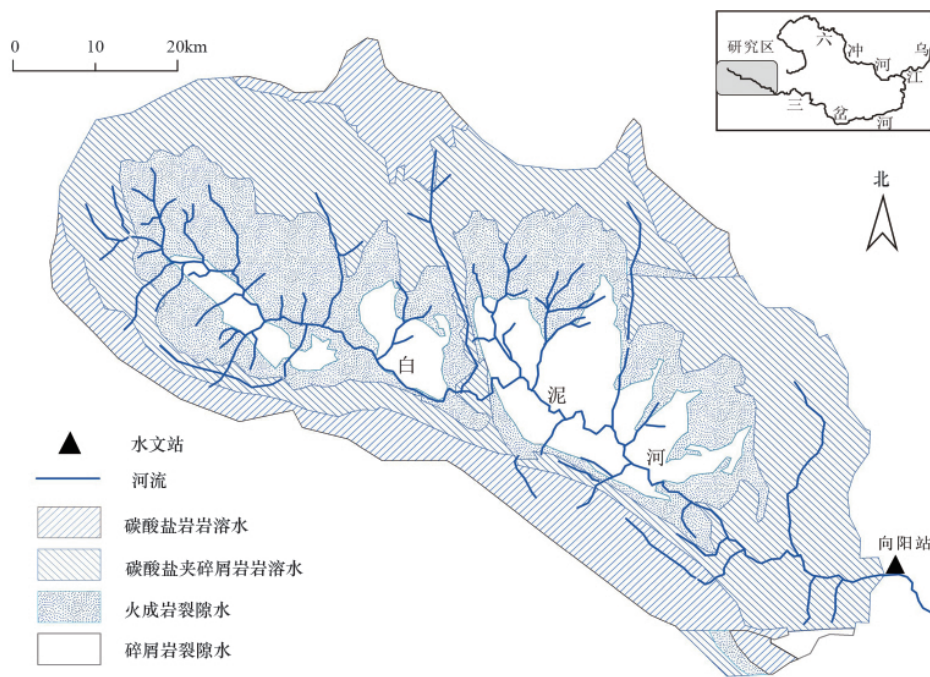


图 1 研究点流域岩组赋水特性及水系示意

Fig. 1 Diagram of petrofabric aquifer characteristics and the drainage system of watersheds investigated

2 材料与方法

2.1 样品采集

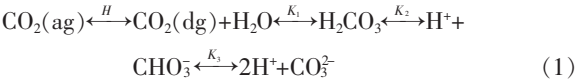
从 2010 年 6 月到 2011 年 5 月, 每月采集样品一次。现场采集水样, 用便携式过滤器 0.45μm 孔径的滤纸正压过滤后, 使用 6P 仪(美国 Myron L 公司)现场测量水体电导率(Cond)、TDS、氧化还原电位(ORP)、水温和 pH 值。取过滤液 50mL, 使用 0.05mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液作滴定剂测定溶液中的总碱度, 使

用甲基橙作为指示剂, 滴定终点 pH 值为 4.4。取过滤的水溶液 500mL 两瓶, 分别用于测定水体的主要阴阳离子浓度, 其中测定阳离子浓度的加入 3 滴稀硝酸溶液。采测水样的同时, 观测水文站实测采样时的水位数据以计算其流量。

2.2 分析方法

利用上述采样时所测的水体温度、Cond、TDS、ORP 和 pH 值等水体理化数据, 结合采样水体的离子浓度, 对 Cond 和

TDS 的量进行校对确定水体总溶解固体物。利用上述滴定的水体总碱度、水温和 pH 值,根据文献[11]方法,河流水体存在如下的碳酸盐平衡体系:



其中, H, K_1, K_2, K_3 是平衡常数,跟温度有关; $\text{CO}_2(\text{ag})$ 表示大气中的气态二氧化碳; $\text{CO}_2(\text{dg})$ 表示河流水体中的溶解态二氧化碳。根据实测的碱度和 pH 值及相应的水体温度,可以查找上述平衡常数 K 的值,计算水体溶解无机碳的浓度值,数据见表 1 和图 2。

表 1 向阳站 2010 年 6 月—2011 年 5 月各季节总溶解固体物、溶解无机碳输出及其碳汇量

Table 1 Total dissolved solids, dissolved inorganic carbon output, and carbon sink for each season from June 2010 to May 2011 at the Xiangyang Hydrological Station

时段	平均流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	TDS 浓度 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TDS 通量 / 10^9g	DIC 浓度 /($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	DIC 量 / 10^7mol	碳汇量 / 10^7mol
3—5 月	0.673	330.905	1.79	3.025	1.62	0.825
12—2 月	0.583	312.649	1.42	3.076	1.39	0.711
9—11 月	8.988	297.144	20.98	2.411	17.04	8.689
6—8 月	18.090	275.924	39.52	2.449	35.22	17.960

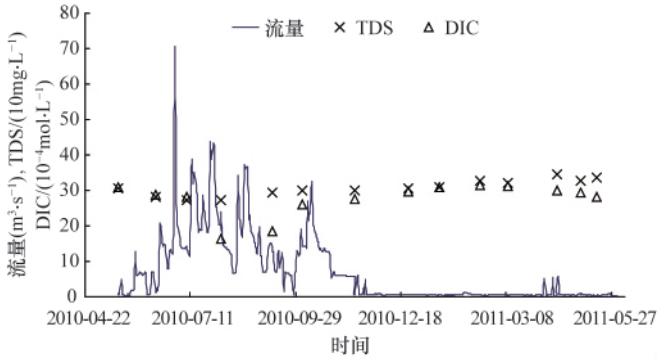


图 2 乌江源区向阳水文站断面 2010 年 6 月—2011 年 5 月流量过程线及其溶解无机碳和总溶解固体物的输出浓度
Fig. 2 Flow process line and its output concentrations of the riverine dissolved inorganic carbon and total dissolved solids from June 2010 to May 2011 at the Xiangyang Hydrological Stations located in Wujiang River Source Drainage Basins Area

参考水文站发布的每天早上 8:00 观测的流量和水位数据,建立水位流量关系。根据采样时实测水位,计算采样时的流域断面流量,作为当天流量的计算依据,其他时段的流量以水文站观测每天 8:00 的流量为计算依据(图 2)。根据河流元素通量的公式(式(2))^[12]计算断面每个季节平均的总溶解固体物质和河流溶解无机碳输出量,并根据河流 DIC 的来源计算每个季节的碳汇量。计算结果见表 1。

$$W = \sum_i^M \left[\sum_j^n (Q_i \cdot C_j) \right] \quad (2)$$

其中, C_j 为 j 种离子在 i 时段的浓度, Q_i 为 i 时段的径流量。

最后,根据流域面积计算单位面积总溶解固体物、溶解

无机碳和碳汇模数作为其化学侵蚀和碳汇的强度。

3 结果与分析

流域化学侵蚀过程中,河流断面水体的总溶解固体物的量是化学侵蚀强度的主要标志。在喀斯特地区流域化学侵蚀强度很大,主要表现在富含碳酸的水体对可溶岩的溶蚀作用。从观测和计算结果来看(表 1),白泥河流域向阳断面河流总溶解固体物质的年输出通量达到 $6.371 \times 10^{10} \text{g}$ 。按流域面积 850km^2 计算,单位面积的化学侵蚀模数为 $7.495 \times 10^7 \text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,即:每年每平方千米因化学侵蚀而带走的溶解物质约为 75t。其中,6—8 月的高温多雨季节,虽然其 TDS 浓度小,但径流量最大,该季节化学侵蚀总量最大;相反,在枯季的 12 至次年 2 月,尽管 TDS 浓度最大,但径流量小,其化学侵蚀量较小。其化学侵蚀强度表现为:6—8 月 > 9—11 月 > 3—5 月 > 12—2 月(次年)(表 1,图 2)。

从白泥河流域向阳断面的流量过程线可知,其溶解无机碳浓度表现出显著的季节性(表 1,图 2)。流域断面的溶解无机碳年输出通量为 $5.483 \times 10^8 \text{mol} \cdot \text{a}^{-1}$,其单位流域面积的侵蚀模数达到 $6.45 \times 10^6 \text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,即,向阳断面以上白泥河流域每年约输出溶解无机碳 6579t,其每平方千米流域面积每年因化学侵蚀而流失溶解无机碳 7.74t。尽管流域溶解无机碳的浓度在雨季比枯季小且雨季暴雨径流的退水阶段溶解无机碳小于涨水阶段(图 2),但由于流域径流量主要发生在雨季 6—11 月,雨季径流量大,河流溶解无机碳的总输出量仍然远远大于枯季,雨季的 6—11 月约占断面溶解无机碳年输出总量的 95%。其溶解无机碳的输出强度的季节变化与化学侵蚀强度一致。在枯季的 12—2 月(次年),尽管溶解无机碳浓度最大,但径流量小,其溶解无机碳的侵蚀输出量小(表 1,图 2)。

前人的研究成果^[13]表明,喀斯特地区 DIC 主要来源于碳酸盐岩的溶蚀作用,其贡献率一般在 93%以上。根据实测钙、镁离子浓度与碱度的比值接近于 0.49 推定流域碳酸盐岩的溶蚀作用对河水中 HCO_3^- 的贡献率约为 98%,各个季节的碳汇量计算结果见表 1。白泥河向阳站断面实测水文年内流域化学侵蚀约消耗大气二氧化碳 $2.819 \times 10^8 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$,其中雨季 6—11 月的碳汇约占 95%。碳汇强度按照流域面积 850 km^2 计算,流域碳汇模数达到 $3.32 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

4 讨论

4.1 向阳断面径流的来源

向阳水文站以上的白泥河流域位于乌江正源三岔河流域的源头,处于云南高原向贵州高原过渡的乌蒙山区,是三岔河上重要的控制站,也是黔中水利工程上游水源地环境质量监测的重要水文站。根据 1:20 万贵州省水文地质图利用 ArcGIS 9.3 软件数字化处理,测算向阳流域喀斯特碳酸盐岩岩溶水赋水单元面积约占 45%,其中,非喀斯特赋水岩组面积约占 30%,其径流区域喀斯特水比重较大。通过计算,溶解无机碳的量约占到总溶解固体物的 8.4%,该比例远大于非喀斯特流域,说明喀斯特流域的化学侵蚀主要表现为碳酸盐岩的溶蚀作用。通过 4 个季节水样钙、镁离子与 HCO_3^- 的物质的量浓度平均值的比约为 0.49,估计约有 98% 的河流溶解无机碳来源于流域碳酸盐岩的溶蚀作用,说明向阳流域的喀斯特水特征明显,尤其在枯季,喀斯特含水层的给水比例更大。

4.2 流域化学侵蚀及溶解无机碳的季节变化

从百万年以上的时间尺度上来看,硅酸盐类岩石为主的流域化学侵蚀过程把侵蚀介质中的 CO_2 转化为 HCO_3^- 离子随径流汇入大海,与碱土金属离子结合而沉积成为碳酸盐岩,这种碳的生物地球化学过程消减了大气中 CO_2 的含量,规避了温室气体对地球的温室效应,从而调控全球气温度的变化^[14-15]。对于化学侵蚀强度比硅酸盐岩流域强烈的喀斯特流域,其碳酸盐岩溶蚀作用同样消耗土壤和大气中的 CO_2 ,并通过水生生物的光合作用等生物地球化学过程而形成大气的碳汇^[16-17],在输往海洋最终释放 CO_2 而沉淀生成碳酸盐岩的过程中,其碳汇效应在百年甚至千年时间尺度上所产生的温室气体减缓效应,同样调节着全球大气温室气体的含量,从而调控全球气候变化。

从本研究的观测和计算结果来看(表 1),白泥河向阳水文站断面河流总溶解固体物质的年输出通量和化学侵蚀强度具有明显的季节性,其化学侵蚀强度表现为:6—8 月 > 9—11 月 > 3—5 月 > 12—2 月。这和流域地处亚热带季风性湿润气候区密切相关,主要表现为:6—8 月的高温多雨季节,由于径流量最大,尽管径流水体中 TDS 浓度较小,该季节段化学侵蚀总量最大;相反,在枯季的 12—2 月,尽管 TDS 浓度最大,但径流量小,其化学侵蚀量较小。另外,雨热同期,非常有利于喀斯特作用对岩石的风化侵蚀,使得雨季喀斯特作用明显

加强,TDS 的浓度不因为稀释作用而显著减小,最终使得雨季丰水期间化学侵蚀通量远远大于枯水季节。

从白泥河流域向阳断面的流量过程线和溶解无机碳关系图可知,白泥河流域溶解无机碳浓度及其输出强度同样表现出显著的季节性,表现为:6—8 月 > 9—11 月 > 3—5 月 > 12—2 月,与化学侵蚀强度的排序一致。尽管流域溶解无机碳的浓度在雨季比枯季小,但由于流域在雨季 6—11 月径流量大,使得雨季的 6—11 月约占断面溶解无机碳年输出总量的 95%。雨季河流溶解无机碳的输出强度远远大于在枯季 12—2 月的输出强度。

4.3 流域化学侵蚀的大气碳汇及其季节变化

根据研究成果^[12],喀斯特地区因岩溶作用有 80% 以上的河流溶解无机碳来源于碳酸盐岩的溶蚀作用。根据岩石溶蚀作用原理,其 DIC 的 50% 来源于大气或土壤中二氧化碳,另 50% 来源于碳酸盐岩石,即以岩溶作用为主的流域,约有 50% 以上的河流溶解无机碳是大气碳汇。而实际上,在有碳酸盐岩分布的流域中,由于碳酸盐岩的溶蚀作用强度远大于硅酸盐岩,故可以认为绝大部分的碱度来源于碳酸盐岩的溶蚀作用^[18]。根据实测钙、镁离子浓度与碱度的比值接近于 0.49,参考文献^[13]的数据,考虑较低碳汇情景,确定流域碳酸盐岩的溶蚀作用对河水中 HCO_3^- 的贡献率约为 98%,从而依据公式: $F = (1 - 0.98 + 0.98/2) \times M_{\text{DIC}}$ 计算出流域化学风化过程吸收大气或土壤中二氧化碳的碳汇量。结果表明,白泥河向阳流域实测水文年内约消耗大气二氧化碳 $2.819 \times 10^8 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$,流域碳汇模数达到 $3.32 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中雨季 6—11 月的碳汇约占 95%,对比珠海龙牙沟流域 $((0.35 - 1.37) \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$ ^[9],其碳汇强度为非喀斯特滨海花岗岩流域龙牙沟的 3—10 倍左右。与化学侵蚀强度的季节变化一致,其碳汇强度具有显著的季节变化,碳汇强度表现为:6—8 月 > 9—11 月 > 3—5 月 > 12—2 月,雨季大于枯季。

从本研究搜集的相关文献来看(图 3,其中 1—南北盘江硅酸盐岩为主的支流流域^[14];2—珠海龙牙沟花岗岩流域^[9];3—黄河利津断面^[9];4—乌江白泥河向阳流域(本文);5—增江流

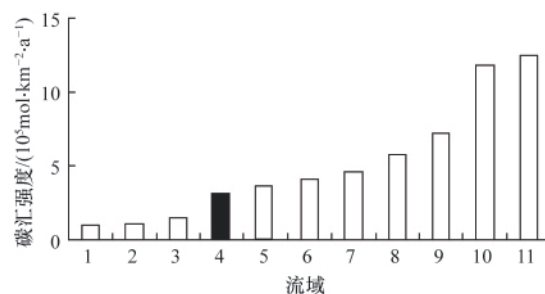


图 3 不同下垫面条件下流域化学风化的碳汇强度
Fig. 3 Flux modulus of the atmospheric CO_2 consumption due to the processes of the chemical weathering in the drainage basins with different terrains

域^[17];6—冲绳岛硅酸盐岩流域^[20];7—长江大通站^[7];8—南北盘江碳酸盐为主的支流域^[4];9—西江梧州站^[2];10—西江碳酸盐岩流域^[2];11—小安德烈斯群岛玄武岩流域^[19]),流域下垫面、气候和水文等特征对碳汇强度具有显著的影响。在流域碳汇强度排序中各喀斯特流域显著靠前,说明喀斯特流域碳汇强度较大。在岩石化学风化碳汇研究中,喀斯特地区的碳汇效应明显。对比非喀斯特流域,喀斯特流域的化学侵蚀强度及其碳汇模数远远大于非喀斯特流域^[2-9,19-21],而且即使是硅酸盐岩流域的化学风化所产生的长久碳汇也有大部分来源于该类流域中所含的少量碳酸钙的溶蚀作用^[18]。因此,流域因碳酸盐岩溶蚀作用而导致的化学侵蚀过程中岩石风化碳汇效应是全球遗漏碳汇的重要组成部分,对大气碳库具有重要的调控作用。

5 结论

认识喀斯特作用在全球岩石风化碳汇及其调控大气碳库方面具有非常重大的科学意义。通过对乌江源区白泥河流域向阳站断面为期一个水文年的实测研究,喀斯特地区的河流化学侵蚀及其碳汇过程与流域的气候条件、下垫面特征及其水文特征密切相关,具有其独特的变化规律,主要表现为:

(1) 乌江源地区的喀斯特地区的白泥河流域的化学侵蚀与其碳汇强度密切相关,分别为 $1.098 \times 10^8 \text{g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $3.32 \times 10^5 \text{mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 约是花岗岩流域龙牙沟的 3—10 倍。

(2) 乌江源流域化学侵蚀及其碳汇强度与流域的水文、水化学特征密切相关,具有显著的季节变化,尤其是处于季风性湿热环境下的源头流域。在雨热同期的地理环境下的白泥河向阳流域约 95% 的化学侵蚀量和碳汇通量发生在雨季。

参考文献 (References)

- [1] Suchet P A, Probst J L, Ludwig W. Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO_2 uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17(2): 1-13.
- [2] Gao Q, Tao Z, Huang X, et al. Chemical weathering and CO_2 consumption in the Xijiang River basin, South China [J]. *Geomorphology*, 2009, 106(3-4): 324-332.
- [3] Gao Q, Tao Z. Chemical weathering and chemical runoffs in the seashore granite hills in South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4007-y.
- [4] Xu Z, Liu C. 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.
- [5] 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.
- [6] 吴卫华, 杨杰东, 徐士进. 青藏高原化学风化和对大气 CO_2 的消耗通量[J]. *地质论评*, 2007, 53(4): 515-528.

Wu Weihua, Yang Jiedong, Xu Shijin, et al. *Geological Review*, 53(4):

515-528.

- [7] Chetelat B, Liu C, Zhao Z, et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: Anthropogenic impacts and chemical weathering[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72(17): 4254-4277.
- [8] Han G, Tang Y, Xu Z. Fluvial geochemistry of rivers draining karst terrain in Southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38(1-2): 65-75.
- [9] 李晶莹, 张经. 黄河流域化学风化作用与大气 CO_2 的消耗 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 43-49.
- Li Jingying, Zhang Jing. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(2): 43-49.
- [10] 韩至钧, 金占省. 贵州省水文地质志 [M]. 北京: 地震出版社, 1996: 507.
- Han Zhijun, Jin Zhansheng. *Guizhou province hydrological geology*[M]. Beijing: Seismological Press, 1996: 507.
- [11] 焦树林, 梁虹, 刘昆. 枯季乌江河流“呼吸”作用及其性质探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 158-163.
- Jiao Shulin, Liang Hong, Liu Kun. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(1): 158-163.
- [12] Probst J L, Mortatti J, Tardy Y. Carbon river fluxes and weathering CO_2 consumption in the Congo and Amazon river basins [J]. *Applied Geochemistry*, 1994, 9(1): 1-13.
- [13] Han G, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 204(1): 1-21.
- [14] Berner R A, Lassaga A C, Garrels R M. The carbonate silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years [J]. *American Journal Science*, 1983, 283(7): 641-684.
- [15] Walker J C G, Hays P B, Kasting J F A. A negative feedback mechanism for the long term stabilisation of Earth's surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(10): 9776-9782.
- [16] Liu Z, Zhao J. Contribution of carbonate rocks weathering to the atmospheric CO_2 sink [J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(9): 1053-1058.
- [17] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3-4): 162-172.
- [18] Liu Z, Dreybrodt W, Liu H. Atmospheric CO_2 sink: Silicate weathering or carbonate weathering[J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(S1): 292-294.
- [19] 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(1-3): 308-312.
- [20] Tao Z, Gao Q Z, Wang Z G, et al. Estimation of carbon sinks in chemical weathering in a humid subtropical mountainous basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56, doi:10.1007/s11434-010-4318-6.
- [21] Vuai S A H, Tokuyama A. Solute generation and CO_2 consumption during silicate weathering under subtropical, humid climate, northern Okinawa Island, Japan[J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(3-4): 199-216.

(责任编辑 岳臣)