

河流泥沙输移过程中矿物风化的碳汇效应初探

——以长江干流为例

张信宝¹⁾, 罗景城^{1,2)}, 王小国¹⁾, 唐家良^{*1)}, 彭韬³⁾, 朱波¹⁾

- 1) 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川成都, 610041;
2) 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都, 610031;
3) 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州普定, 550081

内容提要: 本文首先提出了河流泥沙输移过程中泥沙中的钙镁矿物溶蚀消耗水体中的 CO₂ 并具有碳汇功能的观点。基于前人长江干流从源头到入海口和支流 2003~2007 年期间 4 次河流悬移质泥沙的化学元素组成和矿物组成资料, 分析悬移质中 CaO、MgO 含量和方解石、白云石含量变化特征, 定量计算了这些取样点悬移质泥沙的 CO₂ 总碳汇能力和非永久性、永久性碳汇能力, 分析了不同碳汇能力沿程变化规律及其原因。碳汇计算结果表明: 寸滩—大通河段 1956~2000 年期间泥沙输移过程中钙镁矿物溶蚀产生的总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量分别为 2572 万 t/a、1700 万 t/a 和 872 万 t/a。由于输沙量减少, 寸滩站—大通河段的总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量 2006~2019 年期间较 1956~2000 年期间相应分别减少了 1852 万 t、1224 万 t 和 872 万 t。三峡水库年均淤积量 1.145 亿 t, 损失总碳汇量 675.6 万 t, 相当于三峡电站减排二氧化碳 8580 万 t 的 7.9%。全球河流入海年输沙量 126.1 亿 t, 以寸滩—吴淞口河段碳汇功能 0.060 t/t 计, 总碳汇量 7.57 亿 t 相当于全球岩石风化碳汇总量 10.56 亿 t CO₂ 的 71.6%。河流泥沙输移过程中钙镁矿物溶蚀的碳汇量具有重要的作用, 其溶蚀速率大于原地风化。

关键词: 岩石风化; 钙镁矿物; 长江; 悬移质泥沙; 输移; 碳汇

硅酸盐和碳酸盐等矿物组成的岩石, 风化消耗大气 CO₂ 是全球碳循环的重要碳汇。Suchet et al. (1993) 认为岩石风化消耗的 CO₂ 量主要受岩石表面水流量、大气温度及岩石类型影响, 利用法国 232 个岩性单一流域的地表径流与主要溶解元素的数据进行了分析和研究, 并建立了一个基于经验关系 GEM-CO₂ 模型, 用以估算岩石风化所消耗的大气 CO₂ 量。该模型被认为是国际地质对比课题 (IGCP)404 项目的主要成果之一。Gaillardet et al. (1999) 收集了全球范围内 60 条大河的水化学数据, 通过反演模型计算, 全球硅酸盐风化碳汇 1.4×10^8 t C/a, 碳酸盐风化碳汇 1.48×10^8 t C/a (Stallard,

1998; Gaillardet et al., 1999, 2011)。河流泥沙输移过程泥沙中的钙镁矿物溶蚀消耗水体中的 CO₂, 具有碳汇功能, 但目前未见相关研究报道 (Stallard, 1998; 邱冬生等, 2004; 刘建栋等, 2007; 刘再华, 2012; 蒲俊兵等, 2015; Beerling et al., 2020)。本文基于丁悌平等 (2013) 长江干流 2003~2007 年期间从源头到入海口 25 个样点河流悬移质泥沙化学元素组成和矿物组成资料的分析, 根据悬移质中 CaO、MgO 含量和方解石、白云石含量的沿程变化, 探讨泥沙输移过程中硅酸盐和碳酸盐矿物风化的碳汇效应, 并初步评估长江输沙量变化对碳汇效应的影响。

注: 本文为国家自然科学基金项目 (编号 41873025) 和中国科学院战略性先导科技专项 (编号 XDA23040202) 联合资助的成果。

收稿日期: 2022-01-06; 改回日期: 2022-03-24; 网络发表日期: 2022-07-06; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 张信宝, 男, 1946 年生。研究员, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zxbao@imde.ac.cn。

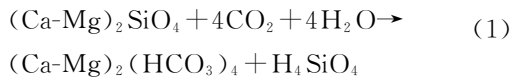
* 通讯作者: 唐家良, 男, 1975 年生。研究员, 研究方向为流域水文。E-mail: jltang@imde.ac.cn。

引用本文: 张信宝, 罗景城, 王小国, 唐家良, 彭韬, 朱波. 2023. 河流泥沙输移过程中矿物风化的碳汇效应初探——以长江干流为例. 地质学报, 97(7): 2378~2385. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022055.

Zhang Xinbao, Luo Jingcheng, Wang Xiaoguo, Tang Jialiang, Peng Tao, Zhu Bo. 2023. A preliminary study on the inorganic carbon sink function of mineral weathering during sediment transport in the Yangtze River mainstream. Acta Geologica Sinica, 97(7): 2378~2385.

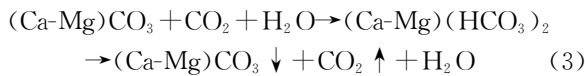
1 岩石风化-输移过程中消耗和释放 CO₂ 的机制

岩石风化的全过程包括风化壳发育过程中的原地风化和泥沙输移过程中的异地风化,硅酸盐和碳酸盐矿物风化过程中吸收的大气-水体中的 CO₂,成为可溶性的重碳酸盐,通过河流进入海洋后部分以 Ca-MgCO₃ 的形式沉积(生物或化学沉积),被 Curl (2012)称为永久性无机碳汇(substantial inorganic carbon sink),部分又排放到大气中,可称为非永久性碳汇。钙镁硅酸盐中的 Ca-Mg 离子在风化-沉积过程中吸收、固定和释放 CO₂ 的化学方程式如下:



式(2)中末端单元的(Ca-Mg)CO₃ 沉积的 CO₂ 为永久性碳汇,释放的 CO₂ 为非永久性碳汇。

碳酸盐中的 Ca-Mg 离子在风化-沉积过程中吸收和释放 CO₂ 的化学方程式如下,碳酸盐风化吸收的 CO₂ 为非永久性碳汇,通过河流进入海洋后全部释放。



2 长江和主要支流悬移质泥沙的 CaO、MgO 含量和方解石、白云石含量

长江源于青藏高原,其干流流经青、藏、川、渝、

滇、鄂、湘、赣、皖、苏、沪等 11 个省、市、自治区,在崇明岛以东注入东海(图 1)。长江干流全长 6300 余千米,多年平均入海水量近 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$,居世界第三位。从源区到宜宾,河道两旁出露的岩石以碎屑沉积岩、火成岩和变质岩为主,主要支流有雅砻江。从宜宾到奉节,沿江出露的岩石主要为含石膏的红层砂岩,且分布着大片稻田和湿地,主要支流有岷江、嘉陵江与乌江。从奉节到宜昌,河流通过三峡大坝,三峡水库最大蓄水量 393 亿 m^3 ,该段江边出露的岩石主要为灰岩。宜昌至江西湖口为中游,该河段呈现弯曲蜿蜒形的特征,河床宽阔而水流缓慢,主要支流有清江、洞庭“四水”(湘、资、沅、澧)、汉江和鄱阳“五水”(赣、抚、信、饶、修),第四纪河湖相沉积物沿河广泛出露,在干流与支流两岸,分布着大面积的稻田与湿地。湖口以下至长江口为下游,主要流经平原地带,河段显河曲型河流的特征。安徽省大通以下受海潮影响,水势和缓,第四纪河湖相沉积物沿河广泛出露,在干流两岸与湖泊周围分布着大面积的稻田与湿地。

丁梯平等(2013)的研究中 2003~2007 年期间长江干流 25 个及支流 15 个悬移质采样点见图 1 和表 1。长江悬移质泥沙 CaO 和 MgO 含量、方解石和白云石含量的沿程变化见图 2。

长江干流从源头到河口 25 个点 4 次悬移质泥沙样品(2003 年 7 月、2004 年 4 月、2005 年 7 月和 2007 年 7 月)的 CaO+MgO 含量和 2005 年 7 月的方解石

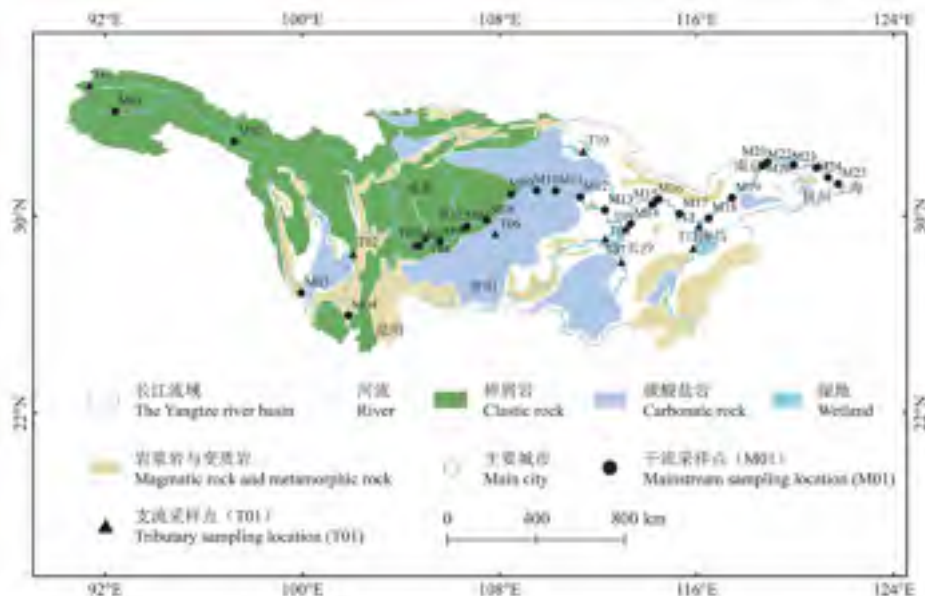


图 1 长江流域简图及取样点位置(据丁梯平等,2013)

Fig. 1 The map of Yangtze River basin and the sampling locations (after Ding Tiping et al., 2013)

表1 长江干流及支流悬移质采样点(据丁悌平等,2013)

Table 1 Sampling locations of suspended sediment in the main stream and tributaries of the Yangtze River
(after Ding Tiping et al., 2013)

采样点	站名	所在河流/湖泊	所在地理位置	与干流会合点离源头距离(km)
M01	沱沱河	长江干流	青海沱沱河大桥下	130
M02	通天河	长江干流	青海玉树直门达观测站	980
M03	石鼓	长江干流	云南丽江石鼓观测站	1820
M04	攀枝花	长江干流	四川攀枝花观测站	2754
M05	宜宾	长江干流	四川宜宾观测站	3480
M06	泸州	长江干流	四川泸州观测站	3580
M07	寸滩	长江干流	重庆寸滩乡观测站	3855
M08	清溪场	长江干流	重庆涪陵区清溪场观测站	4020
M09	万县	长江干流	重庆万州区观测站	4200
M10	奉节	长江干流	重庆奉节县观测站	4300
M11	巴东	长江干流	湖北巴东县观测站	4400
M12	宜昌	长江干流	湖北宜昌南津关观测站	4515
M13	沙市	长江干流	湖北沙市砖瓦厂观测站	4620
M14	螺山	长江干流	湖北洪湖市螺山观测站	4850
M15	沌口	长江干流	湖北武汉市沌口观测站	5030
M16	工业港	长江干流	湖北武汉市工业港观测站	5157
M17	黄石	长江干流	湖北黄石观测站	5260
M18	九江	长江干流	江西九江观测站	5426
M19	大通	长江干流	安徽池州大通观测站	5650
M20	南京上	长江干流	江苏南京江宁河观测站	5880
M21	南京下	长江干流	江苏南京十里长沟观测站	5950
M22	镇江	长江干流	江苏镇江观测站	6020
M23	南通	长江干流	江苏南通观测站	6130
M24	石洞口	长江干流	上海宝山区石洞口观测站	6250
M25	吴淞口	长江干流	上海吴淞口下 23 km 观测站	6300
T01	楚马尔河	楚马尔河	青海楚马尔河大桥下	430
T02	冕宁	雅砻江	四川冕宁雅砻江边	2874
T03	高场	岷江	四川宜宾县高场观测站	3480
T04	富顺	沱江	四川富顺县观测站	3580
T05	临江门	嘉陵江	重庆临江门观测站	3850
T06	武隆	乌江	重庆武隆观测站	4020
T07	长沙	湘江	湖南长沙观测站	4720
T08	南咀	洞庭湖	湖南沅江南咀观测站	4720
T09	城陵矶	洞庭湖	湖南岳阳市城陵矶观测站	4720
T10	丹江口	丹江口水库	湖北丹江口水库坝上观测站	5157
T11	集家嘴	汉水	湖北汉口集家嘴观测站	5157
T12	南昌	赣江	江西南昌赣江大桥下	5465
T13	鞋山	鄱阳湖	江西九江鞋山南 1 km	5465

十白云石含量沿程变化见图 2。2004 年 4 月是旱季,由于河水含沙量低,未取到悬移质泥沙,样点缺失较多;其他三次为 7 月份汛期样品,无样点缺失。5~10 月汛期输沙量占全年的 70%以上,三次 7 月份样品的化学、矿物组成平均值有较好的代表性。以下讨论中的平均含量为三次 7 月份样品的平均值(镇江 2005 年 7 月异常值,已剔除)。由图 2 可见,长江干流悬移质泥沙的 CaO、MgO 含量和方解石、白云石含量,从上游到下游均呈减少的趋势。CaO+MgO 含量:源头沱沱河,16.33%;宜宾,11.43%;三峡库首寸滩,10.35%;三峡大坝以下宜昌,

6.17%;武汉工业港,6.61%;大通,4.80%;吴淞口,4.60%。方解石+白云石含量:沱沱河,16.8%;宜宾,9.1%;寸滩,6.2%;宜昌,4.1%;武汉工业港,7.4%;大通,4.2%;和吴淞口,1.5%(长江最下游 3 个站全为白云石,无方解石)。

宜宾以上的金沙江河段 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量均较高,与流域上游地形高差大、重力侵蚀和物理风化强烈有关。长江干流 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量从源头到河口沿程逐渐降低,很好地说明了泥沙输移过程中的钙镁硅酸盐和碳酸盐矿物的溶蚀现象,宜昌以上的长江

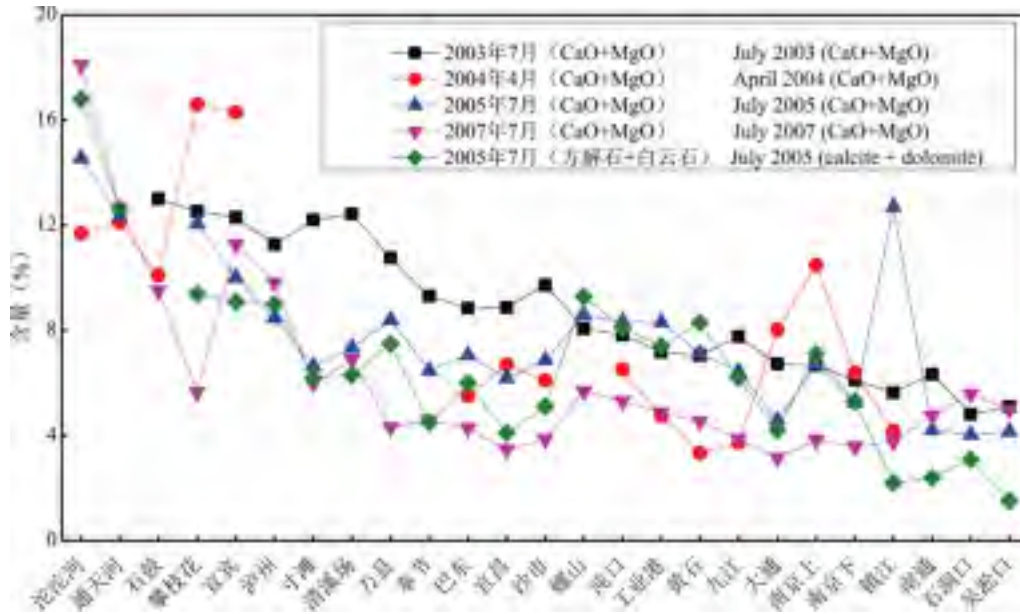


图 2 长江悬移质泥沙 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量沿程变化

Fig. 2 The variations of CaO+MgO and calcite+dolomite contents in suspended sediment along the mainstream of Yangtze River

上游干流河段 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量下降速率分别为 0.12%/100 km 和 0.29%/100 km, 以下的中下游河段分别为 0.09%/100 km 和 0.15%/100 km。方解石+白云石含量下降速率高于 CaO+MgO 含量, 说明了泥沙输移过程中碳酸盐矿物较钙镁硅酸盐矿物更易于溶蚀。上游河段的 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量下降速率高于中下游河段, 是上游河流比降大, 流速快, 矿物溶蚀速率较高的缘故。

长江主要支流悬移质泥沙 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量分别为: 岷江 9.75%, 6.3%; 嘉陵江 5.40%, 5.5%; 乌江 10.87% (乌江及以下支流缺方解石+白云石含量数据); 湘江 4.75%, 汉江 4.41%、赣江 2.87%。除乌江外, 岷江 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量均高于其他支流, 接近金沙江宜宾点值, 这是岷江流域与金沙江流域产输沙环境相近的缘故。乌江悬移质泥沙 CaO+MgO 含量只有 2003 年 7 月和 2007 年 7 月两个值, 分别为 6.67% 和 15.06%, 两者均较高, 但差别较大, 应是碳酸盐岩流域不同水文年水土流失差异较大的缘故。

3 长江干流悬移质泥沙输移过程中的矿物风化碳汇能力和效应

本文将单位重量悬移质泥沙的硅酸盐和碳酸盐矿物中的 CaO、MgO 全部被溶蚀为重碳酸盐消耗

的 CO₂ 量, 定义为悬移质泥沙的总碳汇能力 (TCS, C₁, t/t)。依据公式 (1)~(3), 首先计算出单位重量全部矿物的 CaO 和 MgO 摩尔数、碳酸盐矿物中 CaO 和 MgO 当量摩尔数, 分别得出不同类型矿物 (碳酸盐矿物和硅酸盐矿物) 风化溶蚀过程中吸收的 CO₂ 摩尔数 (碳汇能力), 其中硅酸盐矿物碳汇能力 (SCS) 通过全部矿物总碳汇能力 (TCS) 减去碳酸盐矿物碳汇能力 (NSCS) 得到。钙镁碳酸盐矿物风化消耗的 CO₂ 全为非永久性碳汇 (NSCS, C_{g1}); 钙镁硅酸盐矿物风化消耗的 CO₂ 一半为非永久性碳汇 (C_{g2}), 一半为永久性碳汇 (C_{g3}):

$$C_1 = C_2 + C_3 \quad (4)$$

$$C_2 = C_{g1} + C_{g2} \quad (5)$$

$$C_3 = C_{g3} \quad (6)$$

式中, C₁ 为总碳汇能力 (TCS, t/t); C₂ 为非永久性碳汇能力 (NSCS, t/t); C₃ 为永久性碳汇能力 (SCS, t/t); C_{g1} 为钙镁碳酸盐矿物非永久性碳汇能力 (t/t); C_{g2} 为钙镁硅酸盐矿物非永久性碳汇能力 (t/t); C_{g3} 为钙镁硅酸盐矿物永久性碳汇能力 (t/t)。

总碳汇能力 (C₁) 从源头到河口, 向下逐渐降低 (图 3): 沱沱河, 0.271 t/t; 寸滩, 0.151 t/t; 宜昌, 0.117 t/t; 武汉工业港, 0.127 t/t; 大通, 0.092 t/t; 和吴淞口, 0.091 t/t (表 2)。随着 CaO+MgO 含量的逐渐减少, 悬移质泥沙的总碳汇能力从源头到河口逐渐降低, 说明了泥沙在向下游的输移过程中消耗了 CO₂, 说明河流泥沙输移过程中具有一定的碳

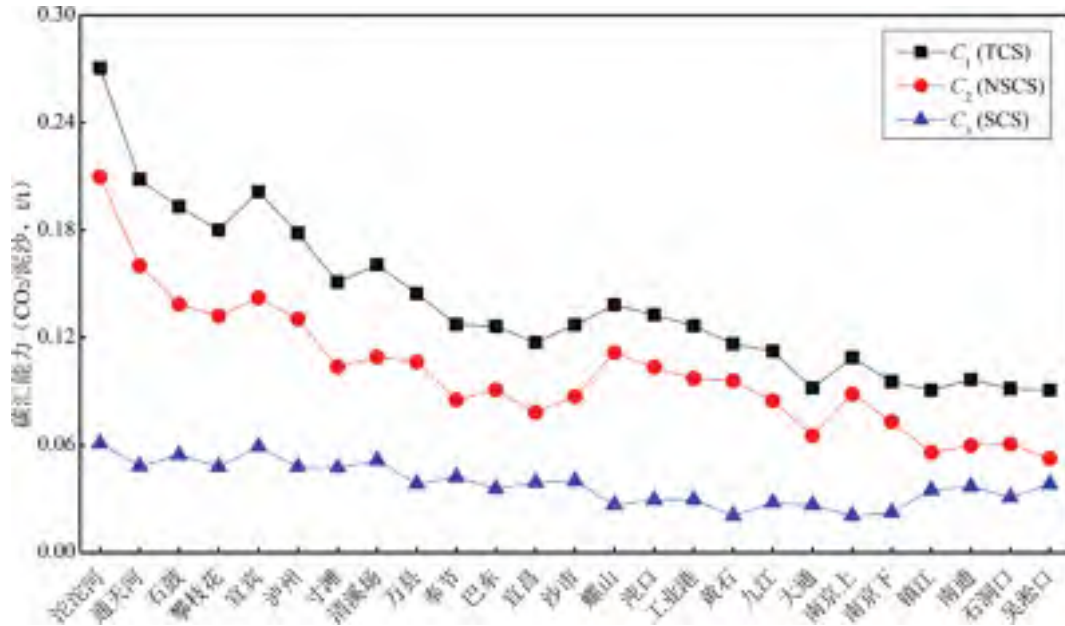


图3 长江悬移质泥沙碳汇能力的沿程变化

Fig. 3 The variation of carbon sink capacities of suspended sediment in Yangtze River

C₁—总碳汇能力(TCS);C₂—非永久性碳汇能力(NSCS);C₃—永久性碳汇能力(SCS);为2003年7月、2005年7月和2007年7月三次样品的平均值;镇江点,2005年7月值异常,为其他两次样品的平均值

C₁—total carbon sink capacity (TCS); C₂—nonsubstantial carbon sink capacity (NSCS); C₃—substantial carbon sink capacity (SCS); based on the average of the three samplings in July 2003, July 2005 and July 2007; the data in Zhenjiang were averaged from two samplings except the abnormal value in July 2005

表2 长江干流悬移质泥沙碳汇能力和潜量的沿程变化

Table 2 The variation of carbon sink capacity and potential of suspended sediment along the Yangtze River main stream

样品编号	取样点	流域面积 (km ²)	年输沙量 (亿 t) 1956~2000年	3次样品的平均CaO含量(%)	3次样品的平均MgO含量(%)	泥沙碳汇总能力 (C ₁ , CO ₂ /泥沙, t/t)/碳汇总潜力 (万 t CO ₂)	2005年7月样品的方解石含量(%)	2005年7月样品的白云石含量(%)	非永久性碳汇能力 (C ₂ , CO ₂ /泥沙, t/t)/碳汇总潜量 (万 t CO ₂)	永久性碳汇能力 (C ₃ , CO ₂ /泥沙, t/t)/碳汇总潜量 (万 t CO ₂)
M01	沱沱河	—	—	14.09	2.24	0.271	15.6	1.2	0.210	0.061
M07	寸滩	86.7	4.39	4.92	3.35	0.151/6629	3.8	2.4	0.104/4566	0.047/2063
M12	宜昌	100.5	5.03	2.94	3.23	0.117/5885	0	4.1	0.078/3923	0.039/1962
M16	武汉工业港	148.8	4.04	3.59	3.19	0.127/5131	4.0	3.4	0.097/3919	0.030/1212
M19	大通	170.5	4.33	2.26	2.56	0.092/3984	1.8	2.4	0.065/2815	0.027/1169
M25	吴淞口	—	—	2.18	2.56	0.091	0	1.5	0.051	0.040

注:“—”表示无数据;1956~2000年的数据引自 Zhang Xinhao et al., 2015;2005年7月的数据引自丁梯平等, 2013。

汇功能。寸滩的总碳汇能力是 0.151 t/t,吴淞口是 0.091 t/t,1 t 悬移质泥沙从寸滩输送入海要消耗 0.06 t CO₂。

硅酸盐矿物对应的永久性碳汇能力(C₃),除源头沱沱河较高(0.061 t/t)外,其余的变化不大,介于 0.027~0.047 t/t 之间。非永久性碳汇能力(C₂)与总碳汇能力变化趋势一致,从源头到河口呈逐渐降低的趋势(图 3):沱沱河,0.210 t/t;寸滩,0.104 t/t;宜昌,0.078 t/t;武汉工业港,0.097 t/t;大通,0.065 t/t;和吴淞口,0.051 t/t。硅酸盐碳汇能力沿

程变化不大,说明了河流泥沙输移过程中硅酸盐矿物溶蚀轻微,消耗 CO₂ 能力有限,与中下游为硅酸盐岩区分布区有一定的关系。显然,总碳汇能力沿程降低,主要是河流泥沙输移过程中碳酸盐矿物溶蚀强烈的缘故。

理想河段,指没有支流来沙汇入或该河段支流来沙量与泥沙淤积量平衡(入口与出口悬移质输沙量相近),且支流与干流悬移质泥沙矿物组成相近的河段,其输沙过程中泥沙的钙镁矿物溶蚀消耗 CO₂ 的碳汇量可表达如下:

$$W_{t_{h1-2}} = W_{S_{h1-2}} \times (C_{h1} - C_{h2}) \quad (7)$$

式中, $W_{t_{h1-2}}$ 为河段(h1-h2)输沙过程中泥沙的钙镁矿物溶蚀消耗 CO_2 的碳汇量(万 t/a); $W_{S_{h1-2}}$ 为河段(h1-h2)的年输沙量(万 t/a); C_{h1} 为河段入口处悬移质的碳汇能力(t/t); C_{h2} 为河段出口处悬移质的碳汇能力(t/t)。

长江流域面积 178.5 万 km^2 , 其中宜昌站以上长江上游流域面积 100.5 万 km^2 , 1956~2000 年期间年均输沙量 5.01 亿 t, 下游大通站流域面积 170.5 万 km^2 , 1956~2000 年均输沙量 4.33 亿 t。三峡库首的寸滩站流域面积 86.7 万 km^2 , 1956~2000 年输沙量 4.39 亿 t (Zhang Xinbao et al., 2015)。三峡蓄水拦沙(2003 年 6 月 1 日)前, 寸滩站与大通站之间的区间流域面积虽然比较大, 为 83.8 万 km^2 , 但两站年均输沙量接近, 这是由于这一河段河床淤积量抵消了有限的两岸支流来沙量的缘故。汉江、赣江、湘江等支流悬移质泥沙的 CaO、MgO 和方解石、白云石含量又与长江干流汉口站值基本一致(丁悌平等, 2013)。本研究将寸滩—大通河段作为理想河段, 根据两站 2003 年 7 月, 2005 年 7 月和 2007 年 7 月三次样品的 CaO、MgO 含量和 2005 年 7 月方解石和白云石含量, 计算这一河段永久性、非永久性和永久性碳汇能力(表 2)。取两站 1956~2000 年输沙量的平均值为河段的年输沙量, 计算这一时段该河段泥沙输移过程中钙镁矿物溶蚀产生的总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量, 分别为: 2572 万 t/a, 1700 万 t/a 和 872 万 t/a(表 2)。2001 年后, 由于水电工程建设和生态环境改善、水土流失减轻等原因, 两站的输沙量都急剧减少, 2006 年后比较稳定。与 2001 年前相比, 寸滩站和大通站 2006~2019 年时段的输沙量分别减少 72.4% 和 71.6% (长江水文网, 2019^①), 由于输沙量减少, 这一河段的总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量, 分别减少了 1852 万 t, 1224 万 t 和 628 万 t(表 3)。

三峡水库 2003 年 6 月~2017 年 12 月, 三峡水库实测泥沙淤积量为 16.691 亿 t, 年平均淤积量为 1.145 亿 t(胡春宏, 2019), 这里用寸滩站和大通站悬移质泥沙的总碳汇能力、非永久性和永久性碳汇能力的差值, 粗略估算三峡水库拦蓄泥沙损失的总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量分别为: 675.6 万 t、446.6 万 t 和 229.0 万 t。2018 年三峡电站年发电量突破 1000 亿千瓦时, 相当于节约标准煤 0.319 亿 t, 减排二氧化碳 8580 万 t(第一工程机械网, 2018^②)。三峡水库拦蓄泥沙减少的碳汇量只相当

表 3 三峡水库寸滩站—大通站河段 2006 年后输沙量减少导致的碳汇减少量

Table 3 Reduction in the carbon sink caused by the reduction in sediment transport in the reach between Cuntan Station and Datong Station in the Three Gorges Reservoir after 2006

站名	年输沙量(亿 t)		碳汇减少量(万 t)		
	1956~2000 年	2006~2019 年	总碳汇	非永久性	永久性
寸滩站	4.39	1.21	1852	1224	628
大通站	4.33	1.23			

注: 1956~2000 年的数据引自 Zhang Xinbao et al., 2015; 2006~2019 年的数据引自长江水文网, 2019^①。

于三峡电站发电减排 CO_2 量的 7.9%。

Syvitski et al.(2011)通过对全球流域面积大于 100 km^2 的 4462 条河流研究的结果显示, 目前全球河流入海年输沙量 126.1 亿 t, 以寸滩—吴淞口河段的碳汇功能 0.060 t/t 计, 河流输沙的总碳汇量 7.57 亿 t, 相当于全球岩石风化碳汇总量 10.56 亿 t CO_2 的 71.6%。0.060 t/t 可能高于全球河流悬移质泥沙碳汇功能的平均值, 但河流泥沙输移过程中钙镁矿物溶蚀的碳汇量在全球岩石风化碳汇量中, 占有举足轻重的地位是毋庸置疑的。河流泥沙输移过程中(岩石异地风化), 泥沙颗粒的相互碰撞、磨蚀和水流的搅拌作用大大促进了矿物溶蚀, 溶蚀速率大于源地风化是可以理解的。与未受人类活动影响时期相比, 全球入海输沙量减少约 10% (第一工程机械网, 2018^②), 相应碳汇损失量 0.757 亿 t, 不足三峡电站一年发电减排的 CO_2 量。

4 结论

(1) 河流泥沙中的硅酸盐和碳酸盐矿物在输移过程中被溶蚀转化为可溶性的重碳酸钙镁并消耗水体中的 CO_2 是一种重要的碳汇机制。钙镁硅酸盐中的 Ca-Mg 离子在风化-沉积过程中消耗 CO_2 , 最后进入海洋的沉积态 (Ca-Mg) CO_3 部分的 CO_2 成为永久性碳汇, 碳酸盐风化吸收的 CO_2 全为非永久性碳汇, 通过河流进入海洋后全部释放。

(2) 长江干流悬移质泥沙的 CaO、MgO 含量和方解石、白云石含量, 从上游到下游均呈减少的趋势。上游河段的 CaO+MgO 含量和方解石+白云石含量下降速率高于中下游河段, 是由于上游河流比降大, 流速快, 矿物溶蚀速率较高的缘故。

(3) 悬移质泥沙的总碳汇能力从上游到下游呈逐渐降低趋势, 说明河流泥沙在向下游输移过程中消耗了 CO_2 , 具有一定的碳汇功能。1 t 悬移质泥沙从寸滩输入海要消耗 0.060 t CO_2 , 非永久性碳汇

能力(C_2)与总碳汇能力变化趋势一致,从源头到河口呈逐渐降低的趋势,硅酸盐矿物对应的永久性碳汇能力(C_3)碳汇能力沿程变化不大。河流泥沙输移过程中硅酸盐矿物溶蚀轻微,碳酸盐矿物溶蚀强烈,总碳汇能力的沿程变化主要是碳酸盐矿物溶蚀的贡献。寸滩—大通河段 1956~2000 年期间泥沙输移过程中钙镁矿物溶蚀产生的总碳汇、非永久性和永久性碳汇量分别为 2572 万 t/a、1700 万 t/a 和 872 万 t/a。

(4)由于水电工程建设和生态环境改善,水土流失减轻等原因,2001 年后,三峡水库库首寸滩站与下游大通站河段的输沙量均急剧减少。由于输沙量减少,总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量,相应分别减少了 1852 万 t、1224 万 t 和 628 万 t。三峡水库 2003 年 6 月~2017 年 12 月,年平均淤积量为 1.145 亿 t,三峡水库拦蓄泥沙损失的总碳汇量、非永久性和永久性碳汇量分别为:675.6 万 t、446.6 万 t 和 229.0 万 t。2018 年三峡电站年发电量突破 1000 亿千瓦时,相当于节约标准煤 0.319 亿 t,减排二氧化碳 8580 万 t。三峡水库拦蓄泥沙减少的总碳汇量只相当于三峡电站发电减排 CO_2 量的 7.9%。

(5)目前全球河流入海年输沙量 126.1 亿 t,以寸滩—吴淞口河段的碳汇功能 0.060 t/t 计,河流输沙的总碳汇量 7.57 亿 t,相当于全球岩石风化碳汇总量 10.56 亿 t CO_2 的 71.6%。河流泥沙输移过程中(岩石异地风化),泥沙颗粒的相互碰撞、磨蚀和水流的搅拌作用大大促进了矿物溶蚀,溶蚀速率大于源地风化是可以理解的。与未受人类活动影响时期相比,全球入海输沙量减少约 10%,相应碳汇损失量 0.757 亿 t,不足三峡电站一年发电减排的 CO_2 量。

注 释

- ① 长江水文网. 2019. 2019 年长江泥沙公报.
- ② 第一工程机械网. 2018. 三峡水电站年发电量首破一亿千瓦时相当于节煤 3000 万吨. <https://news.dlcm.com/20181221101115.shtml>.

References

Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, Wade P, Eufrazio R M, Renforth P, Sarkar B, Andrews M G, James R H, Pearce C R, Mercure J F, Pollitt H, Holden P B, Edwards N R, Khanna M, Koh L, Quegan S, Pidgeon N F, Janssens I A, Hansen J, Banwart S A. 2020. Potential for large-scale CO_2 removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583: 242~248.

Curl R L. 2012. Carbon shifted but not sequestered. *Science*,

335: 656.

Ding Tiping, Gao Jianfei, Shi Guoyu, Chen Feng, Wang Chengyu, Han Dan, Luo Xurong. 2013. The contents and mineral and chemical compositions of suspended particulate materials in the Yangtze River, and their geological and environmental implications. *Acta Geologica Sinica*, 87(5): 634~659 (in Chinese with English abstract).

Gaillardet J, Dupre B, Louvat P, Allegre C J. 1999. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 159(1-4): 3~30.

Gaillardet J, Louvat P, Lajeunesse E. 2011. Rivers from Volcanic Island Arcs: The subduction weathering factory. *Applied Geochemistry*, 26: 2350~2353.

Hu Chunhong. 2019. Analysis on sediment scouring and silting variation of Three Gorges Reservoir since 175 m trial impoundment for past ten years. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 50(8): 18~26 (in Chinese with English abstract).

Liu Jiandong, Hu Hong, Zhang Longjun. 2007. Progress of carbon sink by chemical weathering of watershed. *Chinese Journal of Soil Science*, 38(5): 998~1002 (in Chinese with English abstract).

Liu Zaihua. 2012. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks. *Chinese Science Bulletin*, 57(2): 95~102 (in Chinese with English abstract).

Pu Junbing, Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Zhang Cheng. 2015. Some opinions on rock-weathering-related carbon sinks from the IPCC fifth assessment report. *Advances in Earth Science*, 30(10): 1081~1090 (in Chinese with English abstract).

Qiu Dongsheng, Zhuang Dafang, Hu Yunfeng, Yao Rui. 2004. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China. *Earth Science*, (2): 177~182+190 (in Chinese with English abstract).

Stallard R F. 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycle*, 12(2): 231~257.

Suchet P A, Robst J L. 1993. CO_2 flux consumed by chemical weathering of continents: Influences of drainage and lithology. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II*, 317(5): 615~622.

Syvitski J, Kettner A. 2011. Sediment flux and the anthropocene. *Philosophical Transactions Royal Society*, 369(1938): 957~975.

Zhang Xinbao, Tang Qiang, Long Yi, He Xiubin, Wen Anbang. 2015. Recent changes of suspended sediment yields in the Upper Yangtze River and its headwater tributaries. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 367(2): 297~303.

参 考 文 献

丁梯平, 高建飞, 石国钰, 陈峰, 王成玉, 韩丹, 罗续荣. 2013. 长江水中悬浮物含量与矿物和化学组成及其地质环境意义. *地质学报*, 87(5): 634~659.

胡春宏. 2019. 三峡水库 175m 试验性蓄水十年泥沙冲淤变化分析. *水利水电技术*, 50(8): 18~26.

刘建栋, 胡泓, 张龙军. 2007. 流域化学风化作用的碳汇机制研究进展. *土壤通报*, 38(5): 998~1002.

刘再华. 2012. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望. *科学通报*, 57: 95~102.

蒲俊兵, 蒋忠诚, 袁道先, 章程. 2015. 岩石风化碳汇研究进展: 基于 IPCC 第五次气候变化评估报告的分析. *地球科学进展*, 30(10): 1081~1090.

邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 姚锐. 2004. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算. *地球科学*, (2): 177~182+190.

A preliminary study on the inorganic carbon sink function of mineral weathering during sediment transport in the Yangtze River mainstream

ZHANG Xinbao¹⁾, LUO Jingcheng^{1,2)}, WANG Xiaoguo¹⁾, TANG Jialiang^{*1)},
PENG Tao³⁾, ZHU Bo¹⁾

1) *Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;*

2) *Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;*

3) *Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding, Guizhou 550081, China*

* *Corresponding author: jltang@imde.ac.cn*

Abstract

This study proposed that the dissolution of calcium and magnesium minerals in river sediment could sequester CO₂ and function as a carbon sink. Based on the published literature, the contents of CaO, MgO, calcite and dolomite in suspended sediment collected from 25 sampling points in the mainstream and 13 sampling points in the tributaries of the Yangtze River in 4 sampling campaigns during 2003~2007 were used to calculate the total inorganic carbon sink (TCS) capacity and nonsubstantial and substantial inorganic carbon sink (NSCS and SCS) capacities of suspended sediment along the river. Results showed that the TCS, NSCS and SCS caused by weathering of Ca and Mg minerals at Cuntan-Datong section were 2.57×10^7 tons, 1.70×10^7 tons and 0.87×10^7 tons per year during the period of 1956~2000. Due to the reduction of sediment yield, the annual TCS, NSCS and SCS of the Cuntan-Datong section during 2006~2019 decreased by 18.52×10^6 tons, 12.24×10^6 tons and 8.72×10^6 tons, respectively, compared to the period before 2002. The average annual sedimentation of the Three Gorges Reservoir (TGR) was 114.5×10^6 tons, and the related TCS loss was 6.76×10^6 tons, which were equivalent to 7.9% of the 85.8×10^6 tons of CO₂ emissions reduced by the clean energy production of the Three Gorges Hydropower Station. The annual TCS of global rivers was estimated as 757×10^6 tons (the SCS was more than one quarter of the TCS), which is equivalent to 71.6% of the TCS by global rock weathering with 1.06×10^9 tons of sequestered CO₂. The dissolution rate of calcium and magnesium minerals for offsite rock weathering was higher than that for in situ rock weathering.

Key words: rock weathering; calcium and magnesium minerals; Yangtze River; suspended sediment; transport; carbon sink