

高分辨率长时间序列的中国岩石化学风化 碳汇数据及其变化趋势

熊练^{1,2}, 白晓永^{2,3,4*}, 李阳兵¹, 赵翠薇¹, 罗光杰⁴, 吴路华²,
陈飞⁵, 李朝君², 冉晨², 张思蕊¹

1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 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 550081; 3. 中国科学院 第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061; 4. 贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵阳 550018; 5. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025

摘要: 中国岩石化学风化碳汇(RCS)在碳循环中极其重要, 然而, 中国 2000—2020 年 RCS 的时空格局和演变趋势尚未得到系统量化。本研究依据水文气象数据和 RCS 计算模型, 对中国 RCS 的量级和时空格局进行了系统量化研究。结果表明, 中国 RCS 通量(RCSF)和年均总量(FRCS)分别为 3.46 t/(km²·a)和 17.32 Tg/a, 并随纬度的升高而逐渐降低, 主要集中在西南八省和胡焕庸线以南。其中, 贵州省的 RCSF[11.79 t/(km²·a)]远高于其他省份, 但总量却低于广西壮族自治区(0.21 Tg/a), 而北京市和上海市的碳汇比重不足 1%。中国 RCS 在研究期间整体处于波动式增加状态, 增长速率为 2.76 kg/km², 至 2020 年, RCSF 和 FRCS 分别增加了 0.31 t/(km²·a)和 2.11 Tg/a。本文构建了一套中国高分辨率 RCS 数据集, 可为中国碳中和目标的实现提供数据支撑。

关键词: 岩石; 化学风化; 碳汇; 碳循环; 时空格局; 中国

中图分类号: K903 文章编号: 1007-2802(2022)05-0956-09 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.069

High-Resolution Long-Term Data of China's Rock Weathering Carbon Sink and Its Spatial-Temporal Pattern

XIONG Lian^{1,2}, BAI Xiao-yong^{2,3,4*}, LI Yang-bing¹, ZHAO Cui-wei¹, LUO Guang-jie⁴,
WU Lu-hua², CHEN Fei⁵, LI Chao-jun², RAN Chen², ZHANG Si-rui¹

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

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China; 4. Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 5. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: Rock weathering Carbon Sink (RCS) is extremely important in the carbon cycle. However, the spatial-temporal pattern of China's RCS and its changing trend from 2000 to 2020 have not been quantified. This study systematically quantified the magnitude and the spatial-temporal pattern of RCS in China with the support of hydro-meteorological data and RCS computational models. Our findings are as follows. First, the RCS Flux (RCSF) and the Full RCS (FRCS) of China were 3.46 t/(km²·a) and 17.32 Tg/a, respectively. RCS not only gradually decreased with the increase of latitude, but also mainly concentrated in the eight southwestern provinces and south of the Hu Line. Furthermore, RCSF of Guizhou (11.79 t/(km²·a)) was much higher than that of other provinces, but FRCS of Guizhou was lower than that of Guangxi (0.21 Tg/a). Moreover, FRCS in Beijing and Shanghai accounted for less than 1% of China's carbon sink. Fi-

收稿编号: 2022-096, 2022-5-30 收到, 2022-6-9 改回

基金项目: 中国科学院战略性先导专项(B类)子课题(XDB40020304); 中国科学院“西部之光”交叉团队项目(xbzg-zdsys-202101); 环境地球化学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLEG2022206, SKLEG2022208)

第一作者简介: 熊练(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 岩石风化与气候变化. E-mail: 1598711575@qq.com.

* 通信作者简介: 白晓永(1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 喀斯特与全球变化. E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn.

nally, China's RCS was in a fluctuating increase overall during the study period with a growth rate of 2.76 kg/km^2 , and by 2020, China's RCSF and FRCS increased by $0.31 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ and 2.11 Tg/a , respectively. This study provides a high-resolution RCS dataset to support China's achievement of carbon neutrality.

Key words: rock; chemical weathering; carbon sink; carbon cycle; spatial-temporal pattern; China

0 引言

近年来,气候治理、平衡碳收支和碳中和话题成为了国际关注的焦点。2021年2月22日,国家主席在领导人气候峰会上也明确提出中国力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。然而,近20年来,由于中国碳排放与国家发展的矛盾,以及全球性碳收支无法得到平衡的评估,约有10%~20%的碳不知去向,使得中国在共同治理气候、平衡碳收支和实现碳中和等问题上长期处于悲观状况。最新的联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次气候变化评估报告明确肯定了岩石化学风化碳汇(RCS)对于 CO_2 的移除作用(Ciais等,2013)。岩石矿物通过化学风化可以消耗大气/土壤的 CO_2 ,进而削弱温室效应的强度(Strefler et al.,2018;京志平和陶发祥,2020)。在各类岩石中,主要是碳酸盐和硅酸盐与 CO_2 发生作用,从而产生碳汇效益,尤其是由 $\text{Ca} \cdot \text{MgCO}_3$ 组成的碳酸盐岩,其碳汇能力最强(王世杰等,2017;Li et al.,2022)。最近的研究表明,碳酸盐岩和硅酸盐岩均积极参与地质作用碳循环过程中(蒲俊兵等,2015;孙海龙等,2017)。因此,明晰中国RCS的空间格局、量级及时空演变特征,不仅有利于解决陆地遗失碳汇难题,而且还对中国“双碳”事业及科学应对全球变暖具有重要的科学意义。

在估算RCS的量级方面,已有大量的工作积累。目前RCS估算方法主要有:动力学方法、水化学径流法、溶蚀试片法、扩散边界层(DBL)理论、模型模拟法和反演模拟法等(Gaillardet et al.,1999;Liu and Zhao,2000;Gombert,2002;刘再华等,2007;Hartmann et al.,2009;蒋忠诚等,2012;Zhang et al.,2021)。根据这些方法,很多学者也开展了有关岩石风化碳汇量级的研究。例如,基于流域和气象站点数据、全球各地降水中 $\text{DIC}/\text{HCO}_3^-$ 浓度数据和岩性数据,得到的 $6.82 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Gaillardet et al.,1999), $5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Liu and Zhao,2000), $10.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Gombert,2002), $6.08 \times 10^8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (刘再华等,2007;蒋忠诚等,2012), $6.44 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Liu et al.,2010,2011,2018), $37.70 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Martin,2017), $(7.93 \pm 2.8) \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (李朝君等,

2019), $4.30 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Zeng et al.,2019)等结果均是以往学者运用水化学径流法和溶蚀试片法计算和推演了全球碳酸盐岩风化碳汇通量和总量的量级; $1.28 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Gaillardet et al.,1999), $1.32 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Suchet and Probst,1993), $1.69 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Bernier,2006), $0.15 \sim 0.33 \text{ Pg/a}$ (Hilley and Porder,2008), $0.133 \sim 0.167 \text{ Pg/a}$ (Hartmann et al.,2009), $0.069 \sim 0.119 \text{ Pg/a}$ (Moon et al.,2014), $1.67 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (Zhang et al.,2021)等是基于不同的时间和空间尺度的硅酸盐岩风化碳汇能力进行评估所得结果。这些研究为有效解决大气 CO_2 收支平衡问题提出了新的方向,同时为明确区域乃至全球的RCS量级和空间分布做出了巨大贡献。

但是,在岩性方面,目前的研究多针对单一岩性,而缺乏对岩石化学风化碳汇的系统研究,且量级上存在较大差异;在时空尺度上,中国2000—2020年的RCS时空演变规律尚不明晰。为解决上述问题,本研究基于高分辨率和长时间尺度的气象水文数据(2000—2020年)以及全球岩性图(Hartmann and Moosdorf,2012;Beck et al.,2018),运用Suchet模型(Suchet and Probst,1995)和Hartmann模型(Hartmann and Moosdorf,2012)计算了中国RCS量级。此外,采用趋势分析方法,揭示中国最近21年RCS的时空演变状况,明晰省域及纬度带上的RCS分布情况,创建一套2000—2020年中国RCS空间数据集,为我国碳达峰、碳中和行动纲领的制定乃至全球陆地遗失碳汇问题的解决提供数据支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

以往的研究表明,RCS对于温度和降水的响应最为明显(Gong et al.,2021;Xi et al.,2021),其像元上的评估可通过运用温度、降水以及实际蒸散发数据反演出来。本研究主要使用中国2000—2020年的大气温度数据、年均降水数据以及实际蒸散发数据。其中,中国 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 温度和降水,主要来源于国家地球系统科学数据中心。2000—2020年中国 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 实际蒸散发数据分为两部分:①2000—2019年的实际蒸散发数据,主要来源于美

国哈佛大学社会科学数据库;②2020年中国实际蒸散发数据,主要来自MODIS陆地产品。

此外,本次研究采用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 全球岩性图(Hartmann and Moosdorf, 2012; Beck et al., 2018),运用Suchet模型和Hartmann模型计算的岩性主要为该岩性图中第一级的12级岩性,主要包括:①硅质碎屑沉积物[硅质碎屑沉积岩类(SS)、硅质松散沉积岩类(SU)、火成碎屑沉积岩类(PY)];②富碳酸盐岩的沉积岩类[碳酸盐沉积岩类(SC)、混合沉积岩类(SM)];③火成岩类[酸性火成岩类(VA)、基性火成岩类(VB)、中性火成岩类(VI)];④深成岩类[酸性深成岩类(PA)、基性深成岩类(PB)、中性深成岩类(PI)];⑤变质岩类(MT)。

1.2 RCS计算模型

本研究主要采用Suchet模型和Hartmann模型对中国RCS进行系统评估。岩石风化过程中的 CO_2 消耗主要与地表水流量、温度和岩性有关,其中受径流影响最大。运用降水与实际蒸散发的差值表示径流。具体模型参数如下:

(1) SC岩性计算模型(Suchet模型):

$$alk = 3.1692 \times q \quad (1)$$

式中, alk 为碱度通量,单位是 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; q 为径流量,单位是 $\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Suchet and Probst 1995; Börker et al., 2020)。由于Hartmann模型不适用于纯碳酸盐岩和纯黄土,本文采用Suchet模型计算碳酸盐岩沉积岩(SC)的碳汇。Suchet模型是目前应用较为广泛的全球 CO_2 通量侵蚀模型(GEM- CO_2)之一(Suchet and Probst, 1995; Börker et al., 2020)。它是基于国际地质比较项目提出的一个经验公式派生的,主要是利用岩石地表水流量和各种岩性确定的经验系数来计算岩石风化所消耗的 CO_2 。

(2)除SC外的其他岩性计算模型(Hartmann模型)(Hartmann et al., 2014):

$$\text{CO}_2 = q \times s \times b \left\{ sp \times e^{\left(\frac{1000 \times \ln}{R}\right)} \times \left[\left(\frac{1}{284.2}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right] + cp \times cc \times e^{\left(\left(\frac{1}{284.2}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right)} \right\} \quad (2)$$

式中, CO_2 为二氧化碳消耗量,单位是 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; s 为土壤屏蔽因子; q 为径流量,单位是 $\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; R 是气体常数,单位是 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,值为8.314; T 是开氏温度(K)。其他参数主要来源于参考文献(Börker et al., 2020)。该模型使用蒙特卡罗方法模拟10 000次运行,并为新的缩放方法计算全球范围内的二氧化碳消耗量。

1.3 趋势分析法

本研究运用基于像元的一元回归趋势分析法(李汇文等, 2019; Zhang et al., 2021, 2022)评估2000—2020年中国RCS的格局及趋势。如果 $\theta > 0$,则表示这一像元在研究期间呈现出上升的趋势;否则呈下降的趋势。 θ 值反映像元上增减的强度, θ 的绝对值大小越大,变化越剧烈。其公式如下:

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{RCSF}_i) - \left(\sum_{i=1}^n i\right) \left(\sum_{i=1}^n \text{RCSF}_i\right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (3)$$

式中, θ 为演变趋势, i 为当前年份, n 为研究时段, RCSF_i 为第 i 年的风化碳汇通量。

2 结果与讨论

2.1 中国RCS空间格局和纬度分布状况

为明晰中国21世纪以来RCS的量级、空间分布及纬度变化情况,本研究根据公式1-2计算了像元尺度和纬度方向上中国RCS的量级,形成了一套高分辨率(1 km)中国RCS数据集(图1)。结果显示,岩石风化在短时间尺度上同样存在不可忽视的碳汇量。中国2000—2020年RCSF为 $3.46 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,而FRCS为 $17.32 \text{ Tg}/\text{a}$,这与邱冬生等(2004)和Gong等(2021)结果近似,但也略有差异。如Gong等(2021)计算得到的中国RCSF和FRCS分别为 $2.53 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $17.69 \text{ Tg}/\text{a}$ 。导致这一差异的原因可能是计算面积和方式模型的不同,本研究计算的岩石面积为 $6.79 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。而方法上Gong等(2021)则是运用GEM- CO_2 模型,与本文所用的公式1和2在经验系数和对土壤屏蔽因子的考虑上存在差异。此外,在量级估算的基础上,本研究发现中国FRCS($17.32 \text{ Tg}/\text{a}$)占中国陆地生态系统净碳汇($0.19 \sim 0.24 \text{ Pg}/\text{a}$)的 $8.33\% \sim 10.53\%$,说明RCS对于陆地生态系统来说是不可忽视的重要碳汇。

另外,中国RCS在大区域尺度上存在着空间异质性,也是导致这种差异的原因之一。中国RCS主要分布在以贵州省为核心的中国西南八省的喀斯特地区,尤其是滇黔桂-黔渝湘鄂交界地带。一方面该区域广泛分布风化速率较快且纯度较高的碳酸盐岩。另一方面,相较于北方地区,西南八省气候潮湿炎热,降水丰富,生物繁茂,岩石化学风化强烈。以往的研究也证实,作为全球一个典型的喀斯特岩溶区,由于广布风化较快的碳酸盐岩,该区碳汇能力远高于中国其他区域(李汇文等, 2019)。就岩性而言,该区域主要分布着碳酸岩风化比重较大

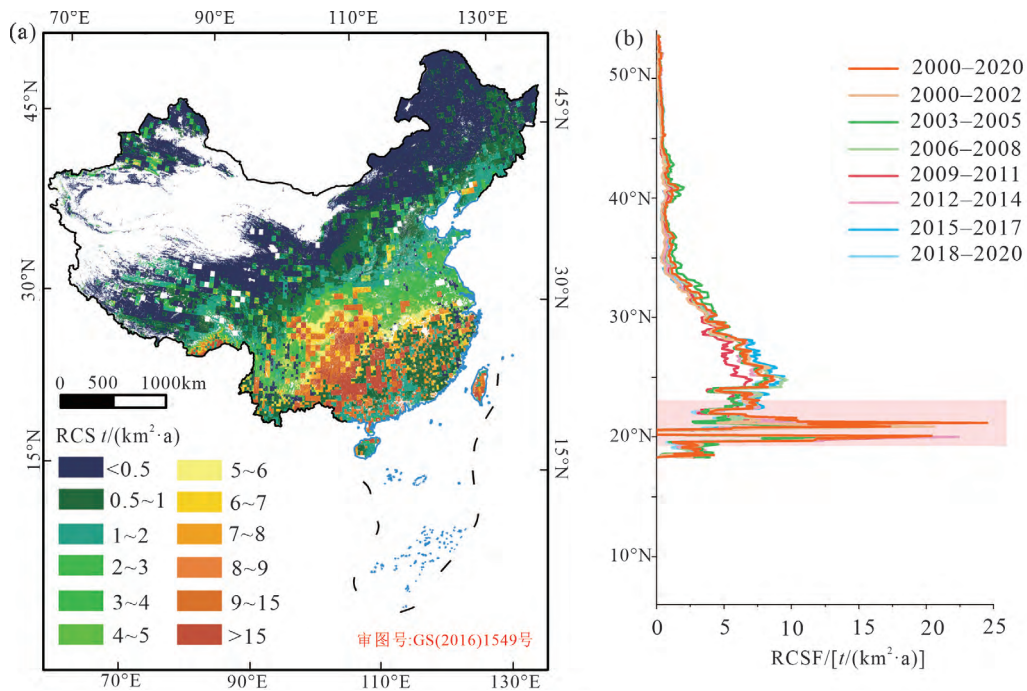


图 1 2000—2020 年中国 RCSF 多年平均空间分布 (a) 和纬度分布 (b) 图

Fig. 1 Multi-year average spatial distribution (a) and latitude distribution (b) of RCSF in China from 2000 to 2020

的 SC、SM(76%) 和 MT(75%) 岩类。同时,本研究所计算的以 SC 为典型代表的碳酸盐岩,其在研究期间的风化碳汇通量为 $9.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,远高于 SU [$1.46 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]、VB [$1.71 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]、PB [$1.63 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] 等岩类。再有,由图 1a 可知,胡焕庸线同样可作为中国 RCS 高低值的关键界限,该线以北地区,其 RCS 主要为 $0 \sim 3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,以南区域则以大于 $4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 为主,胡焕庸线上则主要在 $3 \sim 4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 之间。这一现象可归结为岩石化学风化受湿度和温度的影响,所得研究结果与降水数据的空间推进方向一致,主要由东南向西北递减。

为讨论气温对岩石化学风化的影响,本次对纬度方向上的中国 RCS 开展了进一步研究,结果发现中国 RCS 同样随着纬度的增加而逐渐减缓。在图 1b 中,由于岩石分布面积不均,使得在 $6^\circ\text{N} \sim 18^\circ\text{N}$ 之间 RCSF 基本无值或值较低,不足以作为参考。而在 $20^\circ\text{N} \sim 54^\circ\text{N}$ 之间,岩石面积变化较小,RCS 呈现由南向北逐渐递减的趋势。究其原因,一方面可能是西南八省岩溶碳汇提升了中低纬度 RCSF 的水平,而北方地区则以硅质岩类广泛分布为主,减缓了 RCS 的程度;另一方面可能是受我国水热条件由南向北、由东向西逐渐递减的影响,只有湿润和温和的气候才有利于岩石中碳酸盐和硅酸盐的风化,因此 RCS 在岩类分布和水热条件南北差异的影响

下呈现出由低纬度向高纬度逐渐降低的趋势。该研究结果也得到了 Gong 等 (2021) 和李汇文等 (2019) 研究的佐证。

2.2 中国各省份 RCS 的时空演变格局

为进一步明晰各省(除香港特别行政区、澳门特别行政区) RCS 的规模以及未来的演变状况,本研究在厘清中国 RCS 量级的基础上对各省的 RCS 进行了分析,结果显示:①在年均通量方面,贵州省尽管所计算的岩石风化面积($16 \times 10^5 \text{ km}^2$)次于多个省份,如云南省($3.4 \times 10^5 \text{ km}^2$)、广西壮族自治区($2.1 \times 10^5 \text{ km}^2$)和湖南省($1.9 \times 10^5 \text{ km}^2$)等省份,但贵州省的 RCSF [$11.79 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] 却远高于中国其他各省。这主要得益于较纯的碳酸盐岩占到贵州省总面积的 67.43%,同时整个研究期间贵州省的年平均降水量和气温分别高达 1179.6 mm 和 15.45°C ,也为贵州省的高 RCSF 做出了积极贡献。值得注意的是,除贵州省以外,西南八省 RCSF 也同样位列前茅,均在全国均值之上 [$3.46 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$],且逐渐由广西壮族自治区 [$10.37 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]—重庆市 [$9.93 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]—湖南省 [$8.01 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]—广东省 [$6.08 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]—湖北省 [$5.87 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]—云南省 [$4.35 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]—四川省 [$3.88 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] 降低。此外,19 个省份的 RCSF 均在全国均值之下,其中 16 个省份主要分布在北方、西北和南方纬度较高的沿海省份,其平均 RCSF 为 $1.13 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$

·a),主要受岩性的分布格局、温度和湿度变化等的复合影响。然后,在气候波动的影响下,云南省的RCS较21世纪初降低了 $2.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,南方部分省份出现不同程度的降低趋势,其余各省份都出现不同程度的波动式增加,但增幅最大的仍然为贵州省,该省至2020年RCSF将提升 $3.09 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。②在年均碳汇总量方面,各省的FRCS也同样存在较大的差异,对本研究区间内中国FRCS贡献最大的省份主要为广西壮族自治区,其FRCS($0.21 \text{ Tg}/\text{a}$)占到全国总量($1.73 \text{ Tg}/\text{a}$)的11.83%,其次是贵州省(10.1%)、四川省(9.89%)、湖南省(8.16%)、云南省(8.07%)四省份紧随其后,北京市、上海市、天津市在全国中的比重约为1%。此外,在研究期间,中国RCS不仅通量变化明显,各省的RCS的总量同样处于一个波动变化的过程。此外,西北大部分地区由于受实际蒸散发多于降水的影响,其RCS为0或负值,这与Gong等(2021)结果相似。

基于当前计算结果本研究对中国各省份的FRCS进行讨论。图2显示了中国各省FRCS在各个时间段内(3年为一组)的占比情况,其中每个省

份对应的弧段的长短表示该省份FRCS的大小,弧段越长表示占比越大,此外每个弧段下所对应的31条曲线的宽度则表示每个省份在对应时间段内的FRCS的占比,越宽表示占比越大,而图中百分比则表示每个弧段在总弦图中所占比例。基于图2可发现,研究期间内,中国FRCS处于波动的状态,其中在2003—2005年和2015—2017年为FRCS最大的两个时段,在2009—2011年其FRCS处于较低水平,主要存在2004年和2011年波谷。此外,各省的FRCS也同样存在较大的差异,对本研究区间内中国FRCS贡献最大的省份主要为广西壮族自治区,其次是贵州省、四川省、湖南省和云南省。通过观察各年份弧段上线条的排列方式和宽度可知,不同时间段上各省所占的比例有所波动,如除了2003—2005年这一时间段,广西壮族自治区基本处于其他时间段的首位,且线条较宽。

2.3 中国RCS长期演变趋势

了解中国RCS的变化情况将为今后岩石风化过程中碳的捕获与储存过程及其控制机理的相关研究提供参考(Liu and Zhao,2000)。本研究利用公

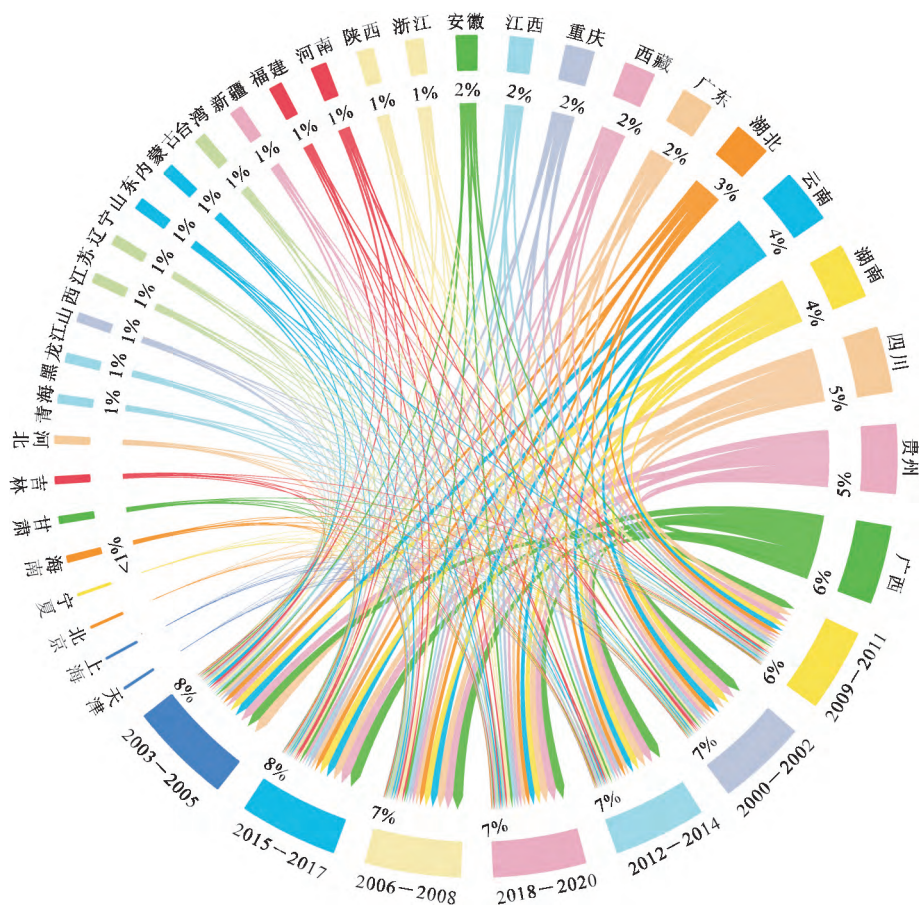


图2 2000—2020年中国各省FRCS(Tg/a)的时空演变分布图

Fig. 2 Spatial-temporal distribution of FRCS (Tg/a) by provinces in China from 2000 to 2020

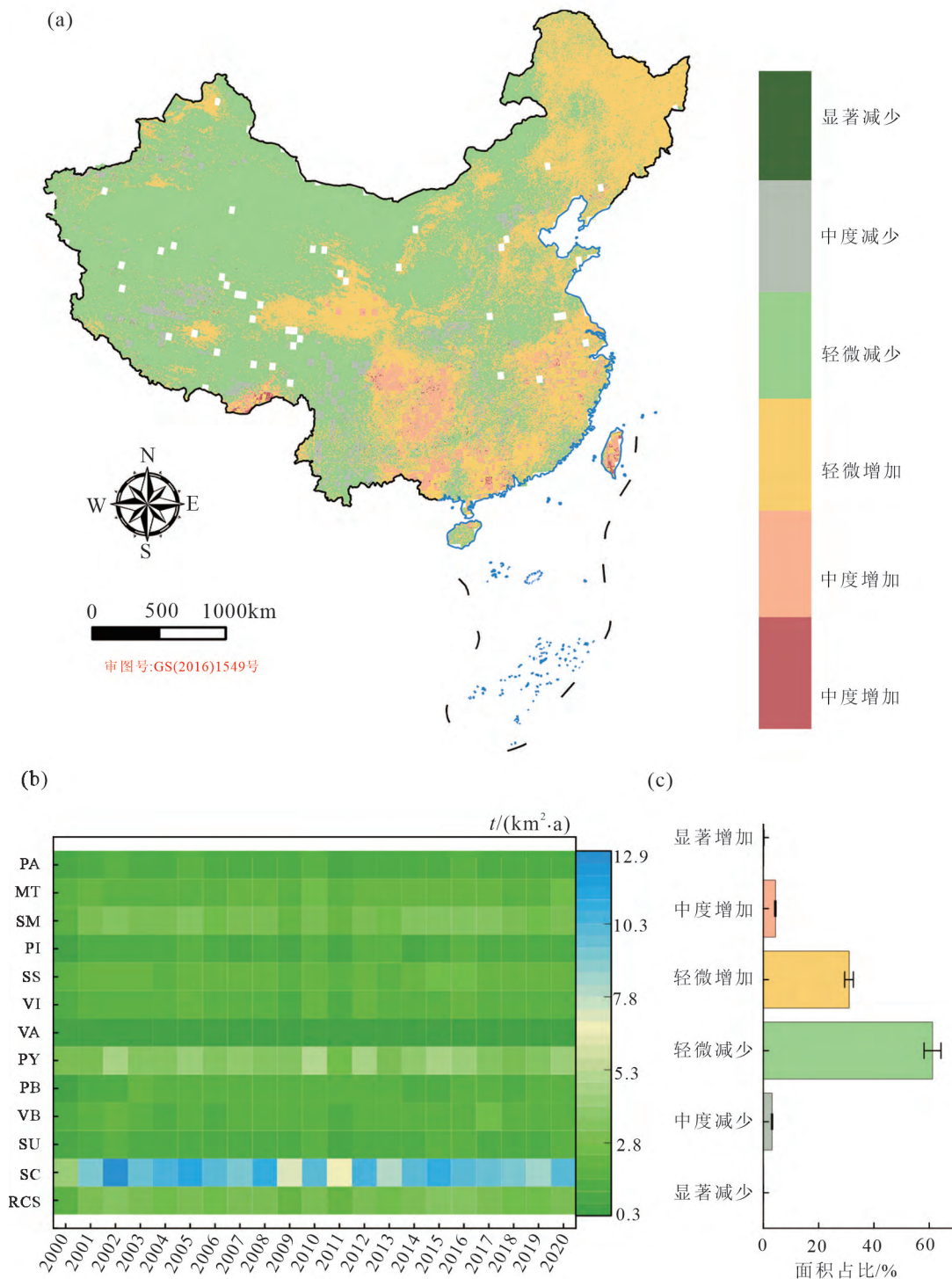


图3 2000—2020年中国RCS趋势变化(a)、各岩性年均均值(b)变化和趋势面积占比状况(c)图
 Fig.3 Changes in RCS trends (a), area share of each trend (c), and annual average value of each lithology (b) in China from 2000 to 2020

式3分析了2000—2020年中国RCS的长期趋势(图3),结果表明:①中国RCS在研究期间整体处于波动式增加状态,其增长速率约为 2.76 kg/km^2 。此外,通过对碳汇通量和总量进行对比发现与前者规律保持一致。具体表现在2000—2020年RCSF增

加了 $0.31 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,FRCS较2000年(19.1 Tg/a)增加了 2.11 Tg/a 。在研究期间,FRCS的6个波谷值和7个峰值中,峰值均在 20 Tg/a 以上,以2016年(22.5 Tg/a)为最高值。而波谷则均在 $14.7 \sim 18.8 \text{ Tg/a}$ 之间,最低值出现在2011年(14.7 Tg/a)。

这是全球地球表面温度与径流量年变化的结果。本研究结果与局部地区研究一致,如 Zhou 等(2020)通过遥感数据和水化学模型,得出广西 2003—2012 年岩石风化碳汇变化呈波浪上升状态。②在空间上(图 3a),本研究发现增加区域主要分布在中国南方地区,如云贵川渝桂鄂粤七省交界处、长江下游地区、西藏东南部等地区。本研究进一步将趋势分析结果根据自然间断点分级法分为显著增加、中度增加、轻微增加、轻微减少、中度减少、显著减少 6 类,并对不同演变趋势等级面积占比进行评估(图 3c)发现。中国 RCSF 轻微减少占到整体面积的 61.17%,而 3 类增加部分仅占到 35.6%。虽然增加占比少,但在量级变化上,其增加的值远高于轻微减少的量级。RCS 的轻微变化主要受地质碳汇的稳定性较大的限制。然而,在喀斯特石漠化治理下,植被的恢复促进根系作用和生物有机质的分解,从而提升了贵州省、广西壮族自治区等省份的 RCS 水平。

此外,本研究进一步从岩性出发分析每年各类岩性对中国 RCS 波动的影响。从图 3b 可看出,SC 是 RCS 的主要贡献者,PY 和 SM 次之。总体来说,除上述三类岩性碳汇通量较大外,其余岩性的碳汇通量均在 $5 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 以下,且总体随着时间的推移仅发生轻微波动。反之,SC 在整个研究期间碳汇通量变化明显且波动较大。同时结合空间分布中增长区域来看,中国 RCS 的波动主要与 SC 岩类相关。

2.4 研究结果对比与不确定性分析

为检验计算结果的可靠性,本研究从中国-省域-流域尺度三方面将本研究的 RCS 与前人相关研究进行对比。首先,在中国像元尺度上,本研究得到的 2000—2020 年中国 RCSF 为 $3.46 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,总量为 17.32 Tg/a ;而邱冬生等(2004)估算的中国岩石风化作用所致的碳汇总量为 14.1 Tg/a ,通量为 $1.64 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。Gong 等(2021)运用 GEM-CO₂ 模型计算得到的中国 2000—2014 年的 12 种岩类的岩石风化碳汇总量是 17.69 Tg/a ,通量是 $2.53 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。基于中国尺度,可见本研究得到的总量和通量与二者的研究结果只有较小的差异,但不排除时间尺度、数据差异以及计算过程所带来的影响。其次,基于省域尺度,Zeng 等(2016)得到的贵州省的岩石风化碳汇总量为 1.56 Tg/a ,通量为 $11.68 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;Gong 等(2021)计算得到的贵州省的岩石风化碳汇总量为 1.12 Tg/a ,通量为 7.12

$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究计算得到的贵州省 RCS 的总量为 1.75 Tg/a ,通量为 $11.78 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,与 Zeng 等(2016)的结果更为接近。最后,在流域尺度上,Fan 等(2014)、Gong 等(2021)、李晶莹和张经(2003)计算得到的中国黄河流域的岩石风化碳汇总量分别为 0.31 、 0.86 、 1.06 Tg/a ,通量分别为 0.42 、 2.18 、 $5.74 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究的研究计算得到的黄河流域的岩石风化碳汇总量为 0.69 Tg/a ,通量为 $0.85 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,这一结果处于以上三个研究结果之间。从以上中国-省域-流域尺度的结果对比可见,本研究与前人研究结果是相吻合的。

但是,该研究中也存在以下几点不确定性:首先,本文主要以大尺度的宏观分析为主,缺乏实验的支撑,为弥补这一不足,本研究中将本文结果与部分学者的流域结果进行了对比佐证。其次,以往研究认为硫酸也参与到了部分岩溶风化过程中(吴起鑫等,2015),然而本文尚未考虑排除硫酸、硝酸对中国 RCS 的影响。最后,本研究未计算人类活动尤其是土地利用变化及其产生的生态效益对于 RCS 的影响(谭秋和李阳兵,2007;Mu et al., 2011;曾思博和蒋勇军,2016;Wu et al., 2020;Luo et al., 2022),同时也缺乏对黄土高原区独特地貌、流域特征、土壤特性及其生物生长对 RCS 的影响的考虑(魏孝荣和邵明安,2009;李同川,2014)。这些均需要在今后相关研究中进行更深一步的探究。

总而言之,中国的岩石风化地质碳汇具有不可忽视的碳汇能力,其在陆地碳汇中做出了重要的贡献。科学并细致的量化中国 RCS 的时空格局和演变趋势,助力中国碳中和事业的推进,这也使得本研究的实际效应与可参考性是较高的。

3 结论

本研究首先评估了中国 2000 年至 2020 年岩石化学风化产生的年均碳汇通量和总量;其次,建立了一套高分辨率长时间序列的中国 RCS 时空演变图谱;此外,量化了近 20 年内中国 RCS 的演变趋势,阐明了中国各纬度及各省 RCS 的多年平均碳汇水平,空间分布规律和演变规律。主要得出以下结论:

(1)揭示了我国近 21 年 RCS 的量级和时空分布状况。其中,中国 RCS 的在研究时段的通量为 $3.46 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,总量为 17.32 Tg/a ;空间上主要分布在以贵州省为核心的西南八省,胡焕庸线以南区域;纬度上 RCS 随着纬度的升高潜力逐渐降低。

(2)量化了中国 RCS 的时空演变格局。具体体

现为截止 2020 年,中国 RCS 整体处于波动式增加的状态,其增长速率约为 2.76 kg/km^2 ,但增长速率不稳定。

(3)分析了省域尺度上 RCS 的时空演变状况。贵州省的 RCSF 远高于全国其他各省,其 RCSF 达到 $7.42 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。除贵州省以外,西南八省 RCSF 则逐渐由广西壮族自治区→重庆市→湖南省→广东省→湖北省→云南省→四川省降低。FRCS 贡献最大的则是广西壮族自治区 (0.21 Tg/a),北京市、上海市、天津市的 FRCS 在全国中的比重仅不到 1%。

参考文献 (References):

- Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A, Wood E F. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5: 180214
- Berner R A. 2006. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O_2 and CO_2 . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (23): 5653-5664
- Börker J, Hartmann J, Amann T, Romero-Mujalli G, Moosdorf N, Jenkins C. 2020. Chemical weathering of loess and its contribution to global alkalinity fluxes to the coastal zone during the Last Glacial Maximum, Mid-Holocene, and Present. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(7): e2020GC008922
- Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, House J I. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx J C (eds.). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 465-570
- Fan B L, Zhao Z Q, Tao F X, Liu B J, Tao Z H, Gao S, Zhang L H. 2014. Characteristics of carbonate, evaporite and silicate weathering in Huanghe River basin: A comparison among the upstream, mid-stream and downstream. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96: 17-26
- Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, Allègre 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
- Gombert P. 2002. Role of karstic dissolution in global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 33(1-2): 177-184
- Gong S H, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Wu L H, Chen F, Qian Q H, Xiao J Y, Zeng C. 2021. Response of the weathering carbon sink in terrestrial rocks to climate variables and ecological restoration in China. *Science of the Total Environment*, 750: 141525
- Hartmann J, Jansen N, Dürr H H, Kempe S, Köhler P. 2009. Global CO_2 -consumption by chemical weathering: What is the contribution of highly active weathering regions. *Global and Planetary Change*, 69(4): 185-194
- Hartmann J, Moosdorf N. 2012. The new global lithological map data-base GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12): Q12004
- Hartmann J, Moosdorf N, Lauerwald R, Hinderer M, West A J. 2014. Global chemical weathering and associated P-release-the role of lithology, temperature and soil properties. *Chemical Geology*, 363: 145-163
- Hilley G E, Porder S. 2008. A framework for predicting global silicate weathering and CO_2 drawdown rates over geologic time-scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(44): 16855-16859
- Li C J, Bai X Y, Tan Q, Luo G J, Wu L H, Chen F, Xi H P, Luo X L, Ran C, Chen H, Zhang S R, Liu M, Gong S H, Xiong L, Song F J, Xiao B Q, Du C C. 2022. High-resolution mapping of the global silicate weathering carbon sink and its long-term changes. *Global Change Biology*, 28(14): 4377-4394
- Liu Z, Zhao J. 2000. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO_2 sink. *Environmental Geology*, 39(9): 1053-1058
- Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. 2010. 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. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4): 162-172
- Liu Z H, Dreybrodt W, Liu H. 2011. Atmospheric CO_2 sink: Silicate weathering or carbonate weathering? *Applied Geochemistry*, 26 (S1): S292-S294
- Liu Z H, Macpherson G L, Groves C, Martin J B, Yuan D X, Zeng S B. 2018. Large and active CO_2 uptake by coupled carbonate weathering. *Earth-Science Reviews*, 182: 42-49
- Luo X L, Bai X Y, Tan Q, Ran C, Chen H, Xi H P, Chen F, Wu L H, Li C J, Zhang S R, Zhong X, Tian S. 2022. Particulate organic carbon exports from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *CATENA*, 209: 105815
- Martin J B. 2017. Carbonate minerals in the global carbon cycle. *Chemical Geology*, 449: 58-72
- Moon S, Chamberlain C P, Hilley G E. 2014. New estimates of silicate weathering rates and their uncertainties in global rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 134: 257-274
- Mu Q Z, Zhao M S, Running, S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781-1800
- Streifer J, Amann T, Bauer N, Krieger E, Hartmann J. 2018. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3): 034010
- Suchet P A, Probst J L. 1993. Modelling of atmospheric CO_2 consumption by chemical weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins. *Chemical Geology*, 107 (3-4): 205-210
- Suchet P A, Probst J L. 1995. A global model for present-day atmospheric/soil CO_2 consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM- CO_2). *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 47(1-2): 273-280
- Wu L H, Wang S J, Bai X Y, Tian Y C, Luo G J, Wang J F, Li Q, Chen F, Deng Y H, Yang Y J, Hu Z Y. 2020. Climate change

- weakens the positive effect of human activities on karst vegetation productivity restoration in southern China. *Ecological Indicators*, 115: 106392
- Xi H P, Wang S J, Bai X Y, Tang H, Luo G J, Li H W, Wu L H, Li C J, Chen H, Ran C, Luo X L. 2021. The responses of weathering carbon sink to eco-hydrological processes in global rocks. *Science of the Total Environment*, 788: 147706
- Zeng C, Liu Z H, Zhao M, Yang R. 2016. Hydrologically-driven variations in the karst-related carbon sink fluxes: Insights from high-resolution monitoring of three karst catchments in Southwest China. *Journal of Hydrology*, 533: 74-90
- Zeng S B, Liu Z H, Kaufmann G. 2019. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. *Nature Communications*, 10(1): 5749
- Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, Tan Q, Luo G J, Wang J F, Li Q, Wu L H, Chen F, Li C J, Deng Y H, Yang Y J, Xi H P. 2021. Global CO₂ consumption by silicate rock chemical weathering: Its past and future. *Earth's Future*, 9(5): e2020EF001938
- Zhang S R, Bai X Y, Zhao C W, Tan Q, Luo G J, Wu L H, Xi H P, Li C J, Chen F, Ran C, Liu M, Gong S H, Song F J. 2022. China's carbon budget inventory from 1997 to 2017 and its challenges to achieving carbon neutral strategies. *Journal of Cleaner Production*, 347: 130966
- Zhou G Q, Jia B, Tao X D, Yan H B. 2020. Estimation of karst carbon sink and its contribution to CO₂ emissions over a decade using remote sensing imagery. *Applied Geochemistry*, 121: 104689
- 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 2012. 中国岩溶碳汇潜力研究. *地球学报*, 33(2): 129-134
- 京志平, 陶发祥. 2020. 碳酸盐岩的化学风化与失踪碳汇的关系: 以贵州红枫水库流域为例. *矿物岩石地球化学通报*, 39(5): 999-1013
- 李朝君, 王世杰, 白晓永, 谭秋, 李汇文, 李琴, 邓元红, 杨钰杰, 田诗琪, 胡泽银. 2019. 全球主要河流域碳酸盐岩风化碳汇评估. *地理学报*, 74(7): 1319-1332
- 李汇文, 王世杰, 白晓永, 操玥, 吴路华. 2019. 中国石灰岩化学风化碳汇时空演变特征分析. *中国科学: 地球科学*, 49(6): 986-1003
- 李晶莹, 张经. 2003. 黄河流域化学风化作用与大气 CO₂ 的消耗. *海洋地质与第四纪地质*, 23(2): 43-49
- 李同川, 李会科, 郭宏, 杜毅飞, 王海涛. 2014. 渭北黄土高原果园生草地旱季土壤水分特征研究. *水土保持研究*, 21(1): 29-33, 38
- 刘再华, Dreybrodt W, 王海静. 2007. 一种由全球水循环产生的可能重要的 CO₂ 汇. *科学通报*, 52(20): 2418-2422
- 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——中国地质大学学报*, 29(2): 177-182, 190
- 孙海龙, 刘再华, 杨睿, 陈波, 杨明星, 曾庆睿. 2017. 珠江流域水化学组成的时空变化特征及对岩石风化碳汇估算的意义. *地球与环境*, 45(1): 57-65
- 谭秋, 李阳兵. 2007. 贵州省近期土地利用变化及其生态效应. *矿物岩石地球化学通报*, 26(1): 57-63
- 王世杰, 刘再华, 倪健, 闫俊华, 刘秀明. 2017. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展. *地球与环境*, 45(1): 2-9
- 魏孝荣, 邵明安. 2009. 黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征. *应用生态学报*, 20(11): 2710-2715
- 吴起鑫, 韩贵琳, 李富山, 唐杨. 2015. 珠江源区南、北盘江丰水期水化学组成特征及来源分析. *环境化学*, 34(7): 1289-1296
- 曾思博, 蒋勇军. 2016. 土地利用对岩溶作用碳汇的影响研究综述. *中国岩溶*, 35(2): 153-163

(本文责任编辑:刘莹,胡宇思;英文审校:肖保华)