

张宇, 罗为群, 刘美玲, 等. 岩石风化碳汇遥感估算及其时空变化分析[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 727-741.

DOI: 10.11932/karst20240401

# 岩石风化碳汇遥感估算及其时空变化分析

张宇<sup>1,3,4</sup>, 罗为群<sup>1,2</sup>, 刘美玲<sup>4</sup>, 李梦琦<sup>4</sup>, 张莉<sup>3</sup>,  
陈芳芳<sup>5</sup>, 张扬岑<sup>6</sup>, 陈蕊<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西桂林 541004;  
2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站/百色平果喀斯特生态系统广西野外科学观测研究站, 广西平果 531406; 3. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195; 4. 中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083; 5. 河南省第一地质勘查院有限公司, 河南 郑州 450001; 6. 上海交通大学设计学院, 上海 200240)

**摘要:** 岩石风化过程吸收的 CO<sub>2</sub> 是全球碳循环“遗漏汇”中的一部分, 岩石风化碳汇估算对掌握区域与全球碳汇效应及与全球气候变化的关系具有重要意义。文章选取贵州省作为实验区域, 以 20 年作为时间跨度, 收集了气象、岩性等数据, 首先借助动态时间规整方法选取了岩石风化碳汇的影响因子, 然后利用 GEM-CO<sub>2</sub> 模型进行岩溶碳汇量的估算, 最后运用 Mann-Kendall 趋势法和统计法揭示实验区域的 2001—2020 年岩溶碳汇时空演变规律。结果表明: (1) 影响岩石风化速度、消耗 CO<sub>2</sub> 量的主要因素为岩石类别, 其次为年均降水量, 温度对于 CO<sub>2</sub> 消耗的响应具有滞后性; (2) 贵州省岩石风化消耗 CO<sub>2</sub> 量较多的地区主要在黔东南、黔西南、黔南以及黔东南部分地区, 消耗 CO<sub>2</sub> 较少的地区主要分布在黔西北地区; (3) 20 年间, 贵州省年均岩溶碳汇量大约在 0~1.04×10<sup>3</sup> t C·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间, 呈波动上升的趋势。基于遥感数据的全球或区域尺度碳汇估算为碳源/汇时空变化分析提供了基础数据, 为当地碳汇交易、环境政策的制定提供参考。

**关键词:** 岩溶碳汇; DTW; GEM-CO<sub>2</sub> 模型; Mann-Kendall 趋势检验

**创新点:** 1. 融合气象、岩性和遥感数据, 精确估算了不同类型岩石的碳汇量; 2. 利用 Mann-Kendall 趋势法分析了贵州省 2001 年-2020 年碳汇量的变化趋势, 并揭示其岩石碳汇变化的影响机制, 为区域碳汇时空动态变化提供了科学依据。

**中图分类号:** X141 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2024) 04-0727-15

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

全球气候变化关乎着人类命运, 对人类健康产生着广泛而复杂的影响<sup>[1]</sup>, 由于 CO<sub>2</sub> 等温室气体的影响, 碳循环成为影响全球气候变化的关键<sup>[2]</sup>。我国作为世界能源消费和 CO<sub>2</sub> 总排放量第一大国, 了解区域尺度碳汇潜力状况是实现“碳达峰、碳中和”目标

的重要基础, 也是应对全球气候变化、保障人类生命健康的重要前提<sup>[3]</sup>。

地球系统碳循环在碳积累中起着关键作用, 早期对于地球系统碳循环的研究大多集中于生物、海洋、人类活动等水圈、生物圈层的循环<sup>[4]</sup>。Tans 等<sup>[5]</sup>研究成果表明, 北半球陆地生态系统的碳汇作用不容忽视, 其中岩溶过程的碳汇一直是全球碳循环中

资助项目: 国家重点研发课题(2022YFF1300702); 中国地质调查局项目(DD20221820); 广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题(KBL202103)

第一作者简介: 张宇(1995—), 男, 硕士, 研究方向: 生态遥感。E-mail: zhangyu\_yf@piesat.cn。

通信作者: 罗为群(1980—), 男, 研究员, 研究方向: 岩溶生态与石漠化治理。E-mail: 125639802@qq.com。

收稿日期: 2023-01-19

容易被忽略和遗漏的问题。随着研究的不断深入,研究者发现,大陆风化作用对地质碳循环有着重要影响<sup>[6-8]</sup>,且与岩溶相关的碳汇可以对未来气候变化做出快速响应<sup>[9-10]</sup>。因此,掌握岩溶碳汇的时空分布及其变化特征能够充分发挥岩溶碳汇在实现碳中和目标中的作用。

已有研究表明,在岩石风化碳汇方面除典型岩溶区外(全球岩溶碳汇量可达硅酸盐岩的 15 倍)<sup>[11]</sup>,在其它非碳酸盐岩(酸性火山岩、页岩等非可溶岩)地区由于存在少量碳酸盐成分,在消耗  $\text{CO}_2$  方面提供了不可或缺的助力<sup>[12]</sup>。且有数据表明:在珠江流域,碳酸盐岩地区的年岩溶碳汇量仅占整个流域碳汇量的 60% 左右<sup>[13]</sup>。由此可见,非碳酸盐岩地区的岩溶碳汇作用也不可忽略,仅统计碳酸盐岩的碳汇量无疑会产生岩石类型方面的“碳遗漏”现象。因此,在进行岩溶碳汇估算时需充分考虑不同类型岩石的风化碳汇作用,如白晓永团队<sup>[14]</sup>针对不同岩性,结合全球岩性图与水文气象数据揭示了中国近 21 年岩石风化碳汇的量级与时空分布状况。目前主要的岩溶碳汇估算方法有动力学方法、溶蚀测量法以及水化学法等,其中,动力学方法主要通过研究反应物或反应产物的浓度与时间的关系,求得动力学参数,进而探讨其反应机理,并在岩溶地貌形成以及全球碳循环等领域得到了成功的应用。然而,有学者发现单纯的化学动力学方法仅在微观机理方面表现突出,并不适用于区域尺度等宏观方面<sup>[15]</sup>;溶蚀测量法的主要思想是通过标准试片法或微溶蚀测量仪法<sup>[16]</sup>,以标准石灰岩试片的溶蚀速率为基准来表征所有类型岩石溶蚀速率,进而实现岩溶碳汇的估算,虽然在一定程度上为复杂环境下的岩溶作用提供了依据,但不可避免地会产生尺度转换等误差<sup>[15]</sup>;目前估算岩石风化所消耗的大气  $\text{CO}_2$  主要以水文地球化学方法为主,该方法根据流域内岩石的分布情况,计算出各种类型岩石的风化速率,并估算出风化作用消耗的碳量<sup>[17]</sup>,如林云等<sup>[18]</sup>通过水化学法和同位素技术,探讨了岩溶地下水碳同位素特征和岩溶碳汇效应。GEM- $\text{CO}_2$  模型作为水文地球化学方法模型之一,相比于其他模型,它以径流量为岩石风化速率的影响因素,充分考虑了碳酸盐、硅酸盐岩等不同岩石类型风化作用与水流量的关系,并且估计了岩石在大范围内风化所消耗的大气二氧化碳的质量<sup>[19]</sup>。

“碳达峰”、“碳中和”目标的提出,为岩溶碳汇

的深入研究带来了新的机遇,如于爽等<sup>[20]</sup>根据已有研究成果,讨论了植被演替对岩石风化作用的控制机制;邵治钦等<sup>[21]</sup>通过化学平衡热力学方法,分析了白云岩流域的岩石风化碳汇变化及其控制机制。然而目前的研究多聚焦于对岩溶作用的机理过程以及时间尺度的分析,且大多针对单一岩性,对不同影响因素下区域尺度内的岩溶碳汇变化速度、长期变化趋势、空间分布格局等方面的研究较少<sup>[21-23]</sup>。因此,本文选取了 2001—2020 年 20 年的时间跨度,采用动态时间规整方法选取了碳汇影响因子,利用 GEM- $\text{CO}_2$  模型反演了贵州省不同岩石风化的碳汇量,并通过曼—肯德尔检验分析方法(MK 检验)方法,研究贵州岩溶碳汇的分布特征和演变规律。

## 1 研究区概况

贵州省地处云贵高原( $24^{\circ}37'-29^{\circ}13'N$ ,  $103^{\circ}36'-109^{\circ}35'E$ ),下辖 9 个地市级行政区划单位,属亚热带湿润季风气候,气温变化小,降水较多,雨季明显,年均降水量 900~1 600 mm,年均气温  $14\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。全省地貌以高原、山地为主,地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜。贵州境内岩溶地貌发育非常典型,主要表现为岩溶高原及峰丛洼的形式(图 1),面积占全省国土总面积 61.9%,且岩溶分布范围广泛,形态类型齐全,地域分布明显,构成了一种特殊的岩溶生态系统。

## 2 数据来源与处理

本文选取了气象数据、岩性数据以及土地覆盖类型数据作为基础数据,其中气象数据包括 2001—2020 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温以及逐月降水量数据集,数据格式为 NETCDF,其中温度单位为  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,降水单位为 0.1 mm。气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。该数据集以 CRU 发布的全球  $0.5^{\circ}\text{C}$  气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集为基础,通过 Delta 空间降尺度方案生成。同时使用了近 500 个独立气象观测点数据进行验证<sup>[24-25]</sup>,验证结果可信。这里根据气象数据进行像元统计,并通过逐月天数对月均数据进行累积求和以及均值处理,进一步求得贵州省年均气温以及年降水量。

典型岩溶地貌数据来自于中国地质科学院岩溶

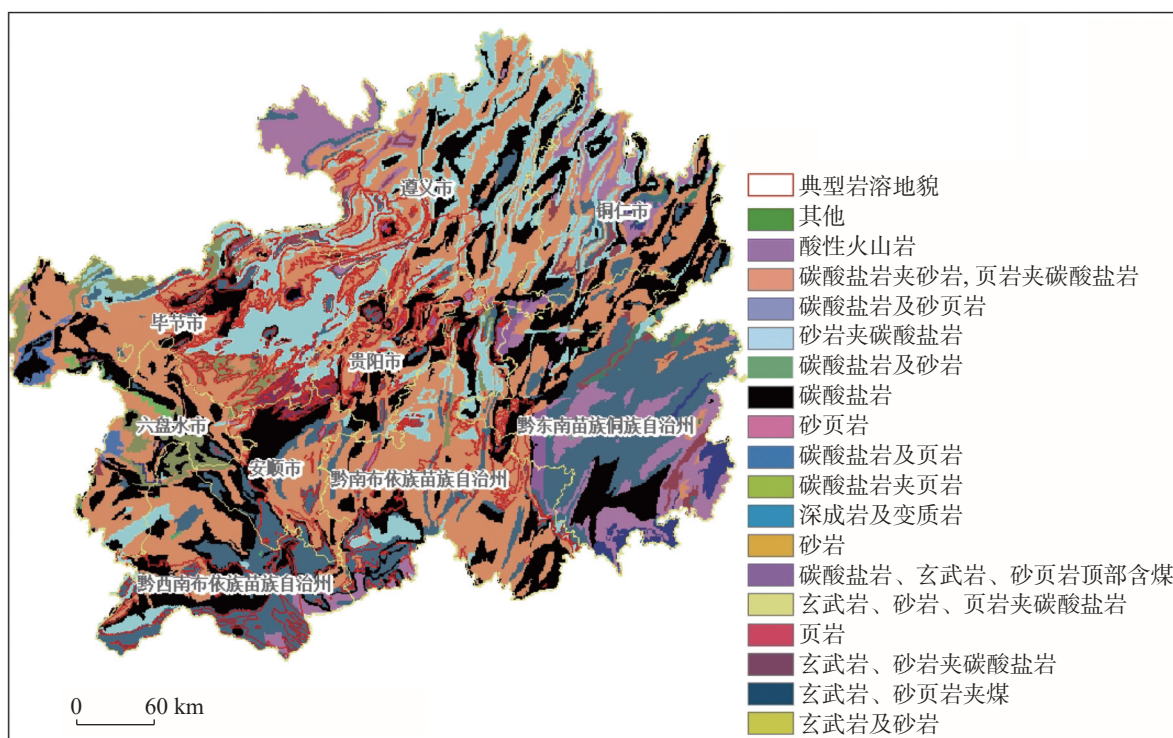


图1 贵州省行政区划及岩性分布

Fig. 1 Administrative division and lithology distribution of Guizhou Province

地质研究所的实地调查的岩性分类图,岩性数据来源于“全国1:100万数字地质图数据库”<sup>[26]</sup>、“1:250万中华人民共和国数字地质图空间数据库”<sup>[27]</sup>该数据充分吸收多种大比例尺区成果资料数据并根据统一标准和要求编制,并采用 MapGIS 格式成图,具有精度高、质量好等优势。本文基于该数据提取贵州省地质图,根据模型所需对岩性数据进行重分类,进而估算贵州省的岩溶碳汇量。

土地覆盖类型数据通过 Google Earth Engine 平台 (<https://code.earthengine.google.com/>) 下载获取,选取了 2001—2021 年 20 期的贵州省 MODIS 土地覆盖产品 (MCD12Q1),该数据使用 5 个传统分类方案,提供了 2001 年至今的每年全球范围的土地覆盖类型(17 个)影像,空间分辨率为 500 m,且在许多土地利用变化相关研究中得到广泛应用<sup>[28]</sup>。本文在林地、草地、耕地以及建筑用地的基础上对该产品数据做重采样与重分类处理。

### 3 研究方法

#### 3.1 碳汇影响因子选取

考虑到不同时间序列数据的单位以及数值范围

差距较大首先对碳汇影响因子时序数据做 z-normalization(Z-归一化)处理。输入时序数据的所有元素将通过归一化处理转换为均值近似为 0、标准偏差近似 1 的向量<sup>[29]</sup>。z-normalization 的计算方法如下:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2} \quad (2)$$

式中:  $z_i$  为归一化后的结果,  $X_i (i \in N)$  代表时序数据  $X$  中的元素,  $N$  为序列  $X$  的长度,  $\mu$  和  $\sigma$  分别为该时序数据所有元素的均值和标准偏差。本文整理了贵州省陆地生态系统碳汇数据,并将其与年均降水、年均气温以及岩性数据进行了 Z-归一化处理。

(1) 针对碳汇影响因子的时序数据进行相关性分析时,本文采用动态时间规整 (DTW, Dynamic Time Warping) 方法,该方法最早由 Itakura 提出,主要应用于语音识别领域。该算法遵循距离最近的原则,通过构建两个序列元素的对应关系,实现相应元素的对齐,进一步评估两者的相似性<sup>[30]</sup>。其计算流程如下。

① 计算累积距离矩阵: 假设存在两条序列数据  $A(m, 1)$ ,  $B(n, 1)$ , 首先生成维度为  $(m, n)$  的累积距离矩阵。依据具体情况定义距离公式  $\text{dis}(x, y)$ , 并根据



如下公式对矩阵进行填充:

$$L[i, 0] = \text{dis}(A_i, B_0) + L[i - 1, 0] \quad (3)$$

$$L[0, j] = \text{dis}(A_0, B_j) + L[0, j - 1] \quad (4)$$

$$L[i, j] = \text{dis}(A_i, B_j) + \min \begin{cases} L[i - 1, j] \\ L[i, j - 1] \\ L[i - 1, j - 1] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $L[i, 0]$  与  $L[0, j]$  分别为矩阵的第一列与第一行中两条序列对应元素之间的距离,  $\text{dis}(A_i, B_j)$  表征矩阵内部两序列对应元素  $(A_i, B_j)$  之间的累积距离。

②以累积距离矩阵右上角点位  $(m, n)$  为起点, 左下角点位  $(0, 0)$  为终点, 按照距离最近原则, 不断更

新路径的起点, 进而找寻路径的最优解。

③输出 DTW 最优路径:  $[(A_0, B_0), (A_1, B_0), \dots, (A_m, B_n)]$ 。

通过 DTW 对年均降水量、年均温度和碳汇量之间的相关性进行了计算(图 2), 年均降水量和碳汇量之间的最优路径为 1.61, 年均温度和碳汇量之间的最优路径为 11.69, 说明二者与碳汇量之间都存在较强的相似性, 且相比于年均气温, 年均降水与碳汇量之间的 DTW 最优路径最短, 存在的相似性最强, 因此将降水量、温度作为碳汇量的影响因子。

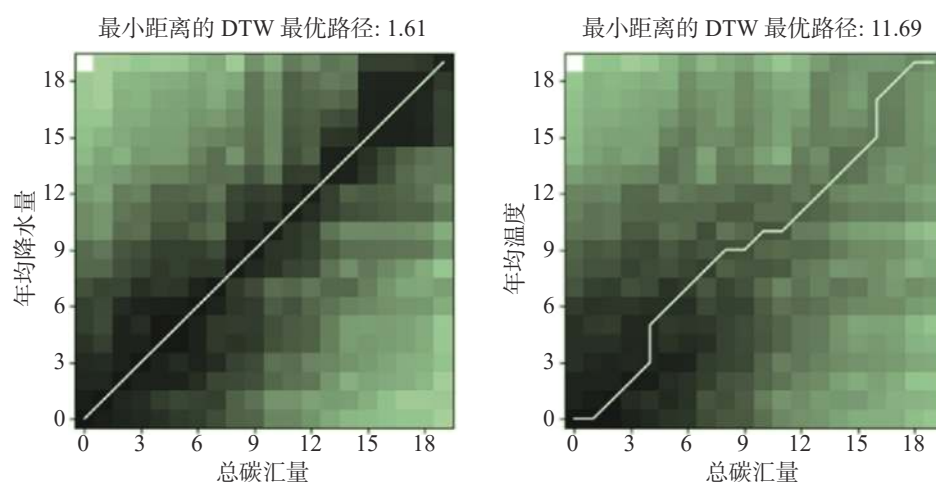


图 2 基于 DTW 的年均降水量、气温与总碳汇量的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of annual average precipitation, temperature and total carbon sink based on DTW

(2) 针对稳定的碳汇影响因子, 如岩石类型, 根据前人的研究成果, 对碳汇的贡献度进行分析, 不同岩石风化作用消耗  $\text{CO}_2$  百分比(图 3), 由图 3 可知, 在所有岩石类型中, 与大气中的  $\text{CO}_2$  发生作用的主要岩石类型为碳酸盐岩与硅酸岩<sup>[15]</sup>。同时, 由于碳酸盐具有快速溶解的动力学特性, 使得碳酸盐岩在

岩石风化过程对碳汇贡献度远远高于其它岩类, 在其它非岩溶区域, 碳酸盐的这一特性同样使得该区域具有相当可观的碳汇通量<sup>[12]</sup>。

综上, 降水量、气温和岩石类型作为碳汇的影响因子, 并参与到后期碳汇估算模型的计算中。

### 3.2 碳汇估算模型

本文选取基于经验关系的 GEM-  $\text{CO}_2$  (Global Erosion Model for  $\text{CO}_2$  fluxes) 模型进行碳汇估算。GEM-  $\text{CO}_2$  模型由学者 Amiotte 和 Probst 提出<sup>[31]</sup>, Meybeck<sup>[32]</sup> 对法国单一岩性流域的地表径流与河水化学数据进行了分析和研究, 认为岩石碳汇作用消耗的  $\text{CO}_2$  量主要由岩石类型、岩石表面水径流量以及大气温度决定。为方便估算岩石碳汇效应所消耗的大气  $\text{CO}_2$  量 ( $\text{FCO}_2$ ), 进而将岩石分为对碳汇具有差异的 7 种不同岩石类型。之后, 该模型在不同温度带的大河流域和全球尺度均进行了验证, 结果表

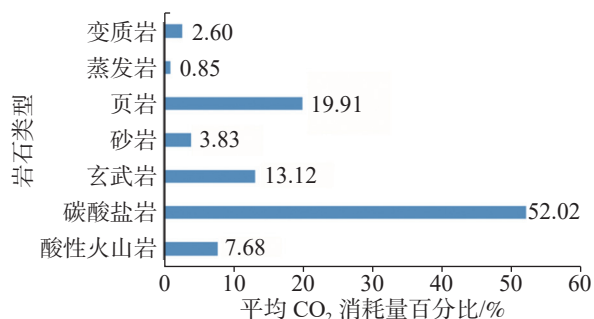


图 3 不同岩石风化作用消耗  $\text{CO}_2$  百分比

Fig. 3 Percentage of  $\text{CO}_2$  consumed by weathering of different rocks

明通过 GEM-CO<sub>2</sub> 模型计算的碳汇量与实地监测估算的结果接近<sup>[15, 33]</sup>, 进一步证实了该模型的准确性。GEM-CO<sub>2</sub> 模型计算公式(6)所示。

$$F_{CO_2} = a \cdot Q \quad (6)$$

$$Q = P - E \quad (7)$$

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{E_0}\right)^2}} \quad (8)$$

$$E_0 = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (9)$$

式中:  $F_{CO_2}$  代表 CO<sub>2</sub> 的消耗量, 单位为  $t \cdot C \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ ;  $a$  是经验系数, 因不同的岩石类型而不同, 自高到低为: 碳酸盐岩类、页岩类、玄武岩、蒸发岩类、酸性火山岩、砂层与砂岩类和变质岩及深成岩类, 各种岩石类型的模型系数如表 1。 $Q$  是单位面积岩石表面的水流量, 即径流模数, 是降水量 ( $P$ ) 与蒸发量 ( $E$ ) 的差值, 单位为  $L \cdot km^{-2} \cdot s^{-1}$ 。其中  $E$  为年实际蒸发量 (mm),  $P$  为年降水量 (mm),  $E_0$  为蒸散力 (mm), 表示土壤水分饱和时的最大年蒸散量,  $T$  为年平均气温 ( $^{\circ}C$ )。

表 1 GEM-CO<sub>2</sub> 模型经验系数<sup>[31]</sup>  
Table 1 Empirical coefficient of the GEM-CO<sub>2</sub> model<sup>[31]</sup>

| 岩石类型     | 经验系数 $a$ |
|----------|----------|
| 变质岩及深成岩类 | 0.095    |
| 酸性火山岩    | 0.222    |
| 玄武岩      | 0.479    |
| 砂层与砂岩类   | 0.152    |
| 页岩类      | 0.627    |
| 碳酸盐岩类    | 1.586    |
| 蒸发岩类     | 0.293    |

因此, 本文通过 GEM-CO<sub>2</sub> 估算模型, 以年均降水、年均气温以及岩性数据作为输入参数, 进而对贵州省的岩石风化碳汇量进行估算。首先对地质图岩石进行重分类, 根据经验系数对相应类别进行赋值, 对于混合岩石分布的情况, 采用加权系数平均的方式处理; 然后以月均气温与降水数据为基础, 通过公式(7)、(8)和(9)计算蒸发量, 进而求得径流量; 最后将岩石分类数据与年平均径流量数据输入模型中, 对贵州省历年岩溶碳汇量进行估算, 并对结果进行空间分辨率为  $1 km^2$  的栅格数据输出。

### 3.3 碳汇变化趋势分析

根据碳汇估算结果, 利用 Mann-Kendall(M-K)趋

势检验法对长时序岩溶碳汇量的变化趋势进行分析。M-K 方法由曼 (H.B.Mann) 和肯德尔 (M.G.Kendall) 提出, 并在气候、水文等领域得到广泛的应用<sup>[34-35]</sup>。M-K 方法作为一种无参数法, 具有不受少数异常值干扰、样本不需要遵循一定的分布等优势。M-K 趋势检验原理如下:

(1) 假设时间序列数据为  $\{x_1, x_2, x_3 \cdots x_n\}$  且不存在单调趋势。

(2) 确定指示函数  $S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\Delta x)$ , 并根据取值范围为  $\Delta x$  赋值, 其中  $\Delta x = x_j - x_i$  ( $i < j$ ),  $\text{sgn}(\Delta x)$  取值如下公式所示。

$$\text{sgn}(\Delta x) = \begin{cases} -1 & \Delta x < 0 \\ 0 & \Delta x = 0 \text{ 或不确定} \\ 1 & \Delta x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

(3) 考虑到数据的唯一性, 统计指数函数的方差  $\text{var}(S)$  并计算检验统计量  $Z$ , 如下公式所示。

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (11)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \end{cases} \quad (12)$$

(4) 统计最终结果, 若  $Z$  满足条件  $|Z| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ , 其中  $\alpha$  为错误率 ( $0 < \alpha < 0.5$ ),  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  符合标准正态分布, 则接受原假设, 否则拒绝原假设, 表明时序数据存在单调趋势。

通过检验计算求得  $z$  值, 该值可以反应变化趋势的强度, 在 0.05 的置信水平下, 若  $z > 1.96$  或者  $z < -1.96$  表明存在明显的变化趋势, 否则不存在明显的变化趋势,  $z > 0$  表示存在上升的趋势,  $z < 0$  表示存在下降的趋势。

## 4 结果与讨论

### 4.1 碳汇量的时空分布特征

根据 GEM-CO<sub>2</sub> 对贵州省 2001—2020 年岩溶碳汇量进行了估算, 选取了 10 年为间隔的 2001 年, 2010 年和 2020 年进行了空间表达(图 4)。

由图 4 可以看出, 贵州省岩石风化消耗 CO<sub>2</sub> 量较多的地区主要在黔东南、黔西南、黔南以及黔东南部分地区, 结合图 1 可知该区域大部分基岩为碳

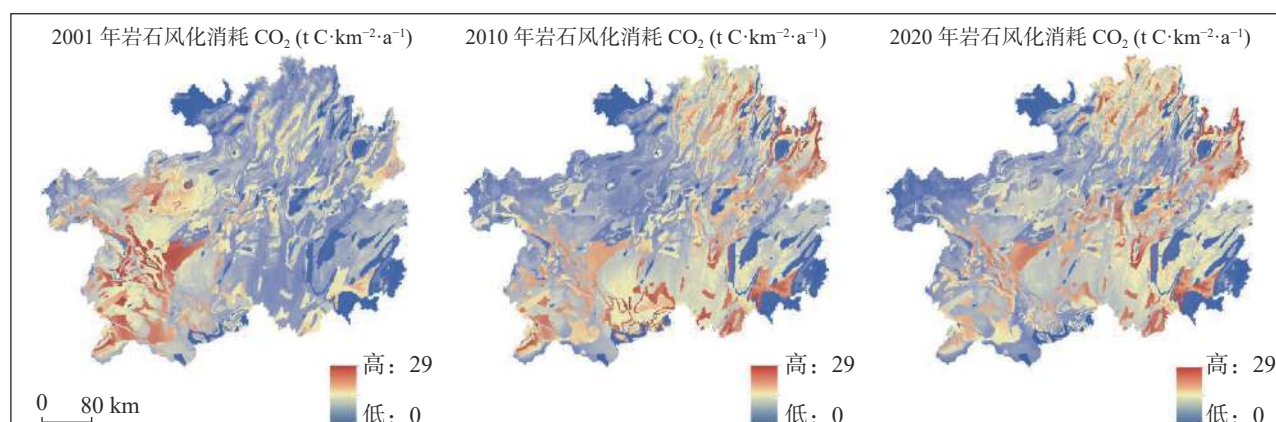


图 4 2001、2010、2020 年岩溶碳汇量分布

Fig. 4 Distribution of karst carbon sink in 2001, 2010 and 2020

酸盐岩,且属于亚热带温暖湿润区,促进了岩溶的溶解,加快了岩石风化的速率。而岩石风化消耗 CO<sub>2</sub> 量较少的地区主要在黔西北地区,这是由于该区域基岩以砂岩及页岩为主。综上分析结果表明,贵州省域岩石风化过程中消耗的 CO<sub>2</sub> 量主要位于碳酸盐分布地区,其次是硅酸盐岩类分布地区。

根据研究区 2001—2020 年岩石风化碳汇的变化规律,分别对各个年份的贵州全省、典型岩溶地貌区域以及非岩溶区相邻年份的岩溶碳汇量进行了对比分析(图 5)。可以看出:① 在碳汇量的年际变化方面,三者的变化方式几乎保持同步,相邻年份主要表现为一年增加、一年减少的形式;② 减少较多的年份主要集中在 2003、2005、2009、2011 年等,尤其在 2009 年减少最多,贵州全省、典型岩溶地貌区以及非岩溶区的碳汇量较上一年分别减少了 46.46%、

54.09%、40.54%,结合贵州历年旱涝统计以及降水数据(图 6)可以看出:这主要是由于部分城市受到干旱的影响,地表径流量与地下水明显减少,以及在部分岩溶农业流域可能存在过度施肥<sup>[36]</sup>的现象所造成的;③ 增加较多的年份有 2010、2012、2014 以及 2020 年等,其中 2012 年碳汇量变化幅度最大,区域内碳汇量分别增加约 85.93%、90.17%、83.22%,这是因为与前一年相比,2012 年降水量显著增加,且由于 2012 年与 2020 年贵州省中西部受到暴雨天气影响,地表径流量得到补充,岩溶碳汇量有所增加,这进一步证实了“我国西南岩溶碳汇变化主要受水文驱动”<sup>[37]</sup>的结论;④ 波动量比较大的年份分别处于 2006、2015、2017 年,由图中可以看出,这三种类型中典型岩溶地貌区域的碳汇量始终保持增加状态,导致这些变化的原因更可能是地域性岩石类型的差

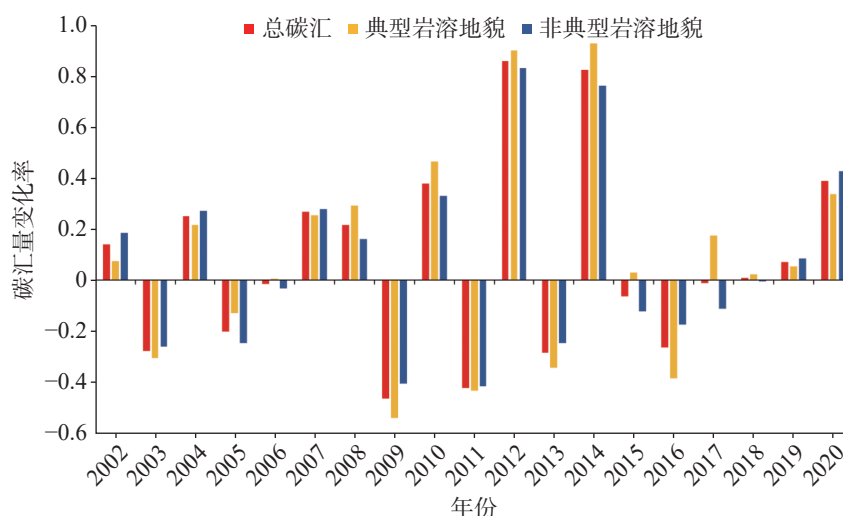


图 5 2001—2020 年贵州省相邻年份岩石风化碳汇量变化

Fig. 5 Variations of carbon sink of rock weathering in Guizhou Province from 2001 to 2020

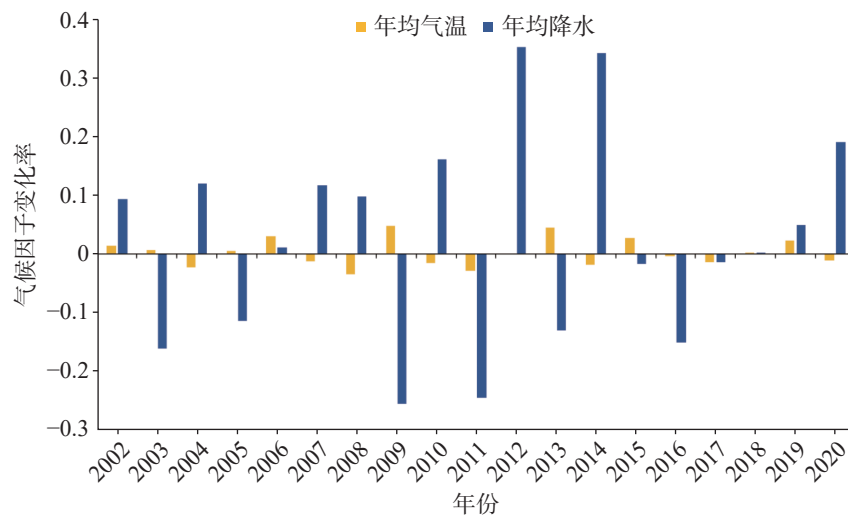


图 6 2001—2020 年贵州省相邻年份气候因子变化

Fig. 6 Variations of climate factors in Guizhou Province from 2001 to 2020

异以及在非岩溶区的人类活动的影响。

#### 4.2 碳汇量变化趋势分析

为确定 20 年来贵州省岩溶碳汇量是否存在确定的变化趋势, 本文选择 Mann-Kendall 方法进行趋势检验(图 7)。研究区岩石风化作用的总碳汇、典型岩溶地貌区碳汇以及非岩溶区碳汇量的  $z$  值分别为 0.23、0.55、0,  $p$  值分别为 0.82、0.58 以及 1.0, 均小于 1.96, 并未通过 95% 置信检验, 因此选择接受原假设——不存在单调趋势。由图 7 可以看出, 20 年中典型岩溶地貌区域与非岩溶区碳汇量呈现波动变化趋势, 且在 2003—2019 年间大多表现为波动减少状态, 而经过统计计算得到 2011—2020 年间的岩石风化碳汇量比 2001—2010 年增加了约  $1.24 \times 10^3 \text{ t C} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 因此可以认为 20 年中贵州省岩石风化碳

汇量总体呈现为波动增加的态势。结合图 7(a)可知, 碳汇量呈现明显递增状态的年份主要集中在 2001—2003 年与 2019—2020 年间, 这主要是因为 2002 年开始实施退耕还林工程, 通过植树造林、改良土壤等方式可以使土壤中的  $\text{CO}_2$  循环得到加强, 从而增加了地下岩溶碳汇通量, 在 2019 年贵州省森林生态系统的碳吸收量已经达到全省排放量的 40% 左右, 进一步证实了植被对岩石化学风化作用起到积极的影响<sup>[38]</sup>。

为进一步确定波动变化在空间的分布规律, 本文统计了 20 年来研究区范围内碳汇增加型的发生频率以及三种变化形式的空间分布信息, 得到贵州省 2001—2020 年间岩石风化碳汇量的变化趋势空间分布图(图 8)。可以看出: 波动增加次数  $> 10$  的区域主要分布在铜仁市中部区域以及以安顺市、贵阳

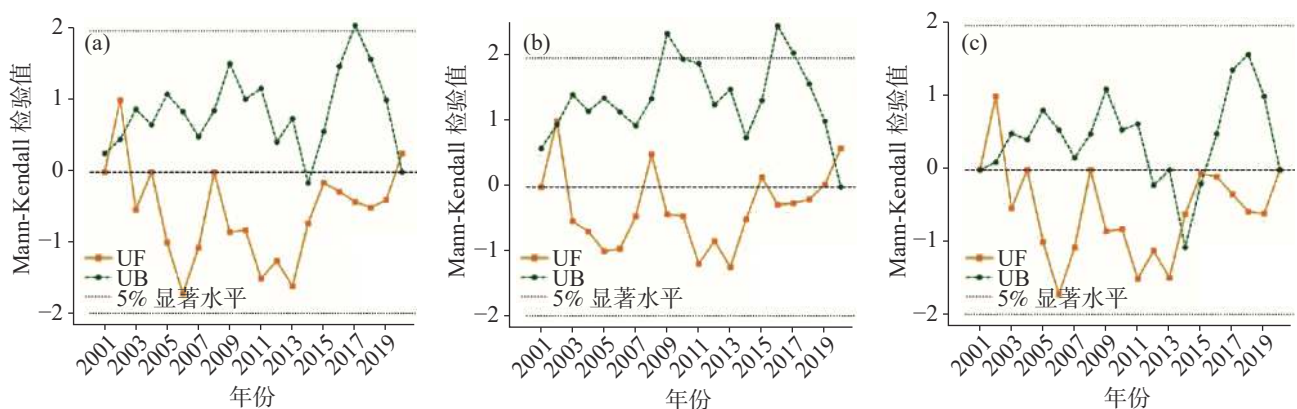


图 7 Mann-Kendall 趋势检验 (a) 总碳汇量变化趋势 (b) 典型岩溶地貌碳汇量变化趋势 (c) 非岩溶区碳汇量变化趋势

Fig. 7 Trend testing of Mann-Kendall (a) change of total carbon sink; (b) change of carbon sink in typical karst landforms; (c) change of carbon sink in non-karst areas



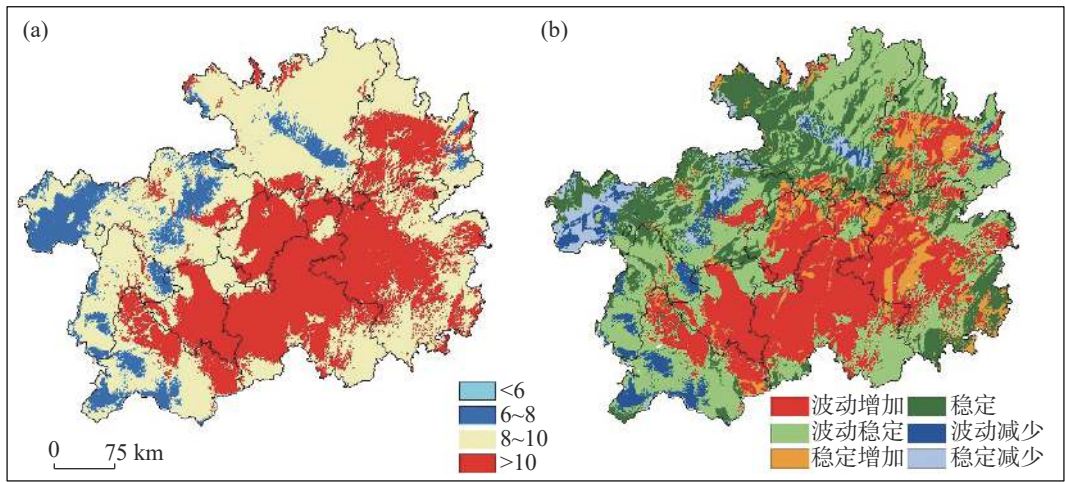


图 8 2001—2020 年贵州省岩石风化碳汇量的变化趋势 (a) 20 年中碳汇增加型发生频率 (b) 20 年中碳汇不同变化形式空间分布  
Fig. 8 ariations of carbon sink of rock weathering in Guizhou Province from 2001 to 2020 (a) frequency of increasing carbon sink in 20 years; (b) spatial distribution of different patterns of carbon sink in 20 years

市、黔南布依族苗族自治州为主的典型岩溶地貌区；增加频次在 8~10 区间的区域除了发生在毕节市东部、遵义市西南部等岩溶地貌区外，主要位于铜仁市北部、毕节市、六盘水市腹地以及黔东南区域；频次在 8 以内的主要体现为岩溶碳汇减少型，除了遵义市中部区域外，大多位于毕节市东部与西部、六盘水市东部与南部以及黔西南布依族苗族自治州中西部区域(图 8(b))，将岩溶碳汇量变化形式以“增加—减少—稳定”细分为六类，总体而言，碳汇量的变化形式还是以稳定型为主，增加型次之，减少型分布面积最小。本文对贵州省岩溶碳汇总量进行了详细统计(表 2)，每年碳汇量频繁变化，其中波动稳定型占比 33.86% 左右，主要分布在遵义市东北部，铜仁市东部，六盘水市西部等市县周边区域；波动增加型占比约 29.01%，遍布在以贵阳市、安顺市、黔南布依族苗族自治州为主的岩溶高原地貌区以及铜仁市、黔东南苗族侗族自治州周边区域；波动减少型占比 5.43% 左右，主要集中在六盘水市及黔西南布依族苗族自

治州周边区域。

4.3 碳汇影响因子对碳汇的时空响应分析

4.3.1 气候条件

分别计算年均降水量、年均温度和碳汇量之间的归一化 Z 值(图 9)，可以看出年均降水量与岩溶碳汇量之间呈现较强的相关性，二者时序曲线之间的周期、相位、振幅几乎完全重合，表现为完全一致的变化；与之相比，年均温度和碳汇量相关性较弱，二者曲线之间的振幅、运动周期较为一致，但存在少许相位差，表现出一定的滞后性，滞后 1—2 年左右。

4.3.2 岩石类型

计算了不同类型岩石碳汇量时间序列与总碳汇量时间序列之间的归一化 Z 值(图 10)，可以看出各类单岩碳汇量和总碳汇量之间呈现较强的相关性，其中碳酸盐岩、页岩与碳酸盐岩(碳酸盐岩夹页岩、碳酸盐岩及页岩)的碳汇量和总碳汇量曲线之间在

表 2 2001—2010 年贵州省岩溶碳汇类型  
Table 2 Types of karst carbon sink in Guizhou Province from 2001 to 2010

| 类型   | 面积占比/% | 描述                                                |
|------|--------|---------------------------------------------------|
| 波动减少 | 5.43   | 20年中相邻年份碳汇量表现为减少形式的次数与面积显著大于增加形式，方差波动较大，碳汇总量减少。   |
| 稳定减少 | 3.90   | 20年中相邻年份碳汇量表现为减少形式的次数与面积显著大于增加形式，方差波动较小，碳汇总量减少。   |
| 波动稳定 | 33.86  | 20年中相邻年份碳汇量表现为减少的次数与面积同增加形式持平或相近，方差波动较大，碳汇总量几乎不变。 |
| 稳定   | 19.47  | 20年中相邻年份碳汇量表现为减少的次数与面积同增加形式持平或相近，方差波动较小，碳汇总量几乎不变。 |
| 波动增加 | 29.01  | 20年中相邻年份碳汇量表现为减少形式的次数与面积显著小于增加形式，方差波动较大，碳汇总量增加。   |
| 稳定增加 | 8.33   | 20年中相邻年份碳汇量表现为减少形式的次数与面积显著小于增加形式，方差波动较小，碳汇总量增加。   |



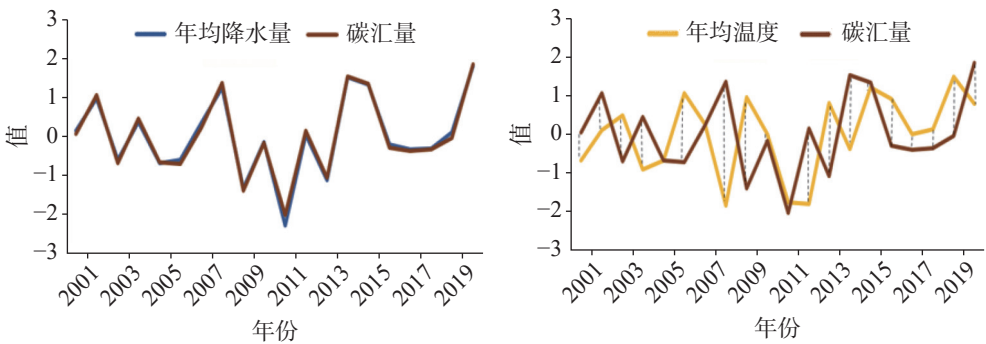


图 9 Z-归一化年均降水、温度时序数据

Fig. 9 Z-normalized time-sequencing data on annual average precipitation and temperature

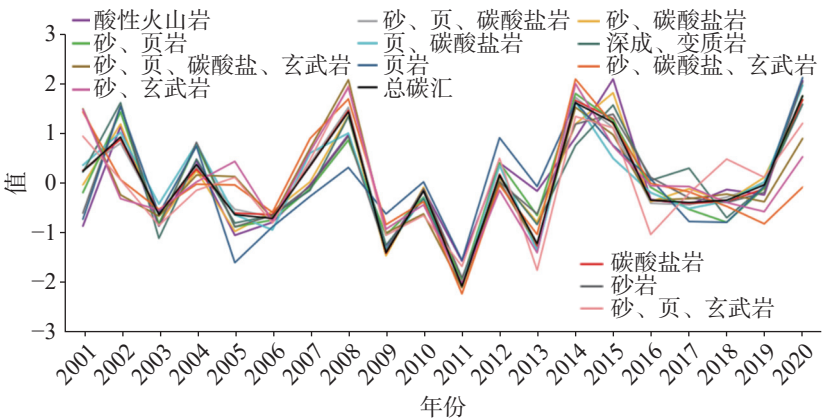


图 10 不同岩石碳汇 Z-归一化时序数据

Fig. 10 Z-normalized time-sequencing data on carbon sink in different rocks

20 年间的周期、相位、振幅几乎完全重合, 表现为完全一致的变化; 玄武岩及砂岩, 玄武岩砂岩夹碳酸盐岩, 玄武岩、砂页岩夹煤以及砂岩、页岩、碳酸盐岩与玄武岩(碳酸盐岩、玄武岩、砂页岩顶部含煤; 玄武岩、砂岩、页岩夹碳酸盐岩)碳汇量与总碳汇量仅在 2002 年前、2005 年以及 2018 年表现为相反的变化, 其余时间尺度也表现为与总碳汇量变化周期、相位、振幅三者较为一致的变化。并对 2001—2020 年贵州省不同类型岩石碳汇量贡献度进行了详细统计(表 3), 由表 3 可知, 20 年来贵州省不同类型岩石风化对碳汇的贡献由高到低依次为: 碳酸盐岩, 砂岩、页岩与碳酸盐岩(碳酸盐岩夹页岩、碳酸盐岩及页岩), 碳酸盐岩及砂岩, 砂岩、页岩、碳酸盐岩与玄武岩(碳酸盐岩、玄武岩、砂页岩顶部含煤; 玄武岩、砂岩、页岩夹碳酸盐岩), 砂岩, 砂页岩, 玄武岩、砂页岩夹煤, 玄武岩砂岩夹碳酸盐岩, 页岩, 深成岩及变质岩, 其中非碳酸盐岩地区的碳汇量仅占全省的 3.55%, 这进一步证实了其在岩溶碳汇方面的潜力<sup>[13]</sup>, 与此同时, 数据显示岩石风化所消耗的 CO<sub>2</sub> 量除了与岩石

表 3 2001—2020 年贵州省不同类型岩石碳汇量贡献度  
Table 3 Contribution rates of carbon sink of different types of rocks in Guizhou Province from 2001 to 2020

| 岩石类型           | 统计面积/km <sup>2</sup> | 碳汇量占比/% |
|----------------|----------------------|---------|
| 酸性火山岩          | 1413                 | 0.26    |
| 砂岩、页岩、碳酸盐岩     | 59329                | 30.46   |
| 砂岩、碳酸盐岩        | 25648                | 14.59   |
| 碳酸盐岩           | 35566                | 34.10   |
| 砂岩、页岩          | 2215                 | 0.64    |
| 页岩、碳酸盐岩        | 23654                | 14.62   |
| 深成岩及变质岩        | 2010                 | 0.22    |
| 砂岩             | 12095                | 1.66    |
| 砂岩、页岩、碳酸盐岩、玄武岩 | 5107                 | 2.27    |
| 页岩             | 655                  | 0.27    |
| 砂岩、碳酸盐岩、玄武岩    | 680                  | 0.28    |
| 砂岩、页岩、玄武岩      | 1188                 | 0.42    |
| 砂岩、玄武岩         | 297                  | 0.07    |
| 蒸发岩类           | /                    | /       |

中的少量碳酸盐成分相关外, 与自身的分布面积同样相关。

### 4.3.3 土地覆盖类型

大量研究表明,通过植树造林、土壤改良、外源水灌溉等方式增加林地面积,可以在一定程度上增加岩溶碳汇通量<sup>[22]</sup>,部分地区通过退耕还林可使土

下碳汇量达到耕地的 7 倍<sup>[39-40]</sup>。图 11 为以 2001—2020 年土地利用数据为基础,统计了 20 年来五种地物的面积信息。

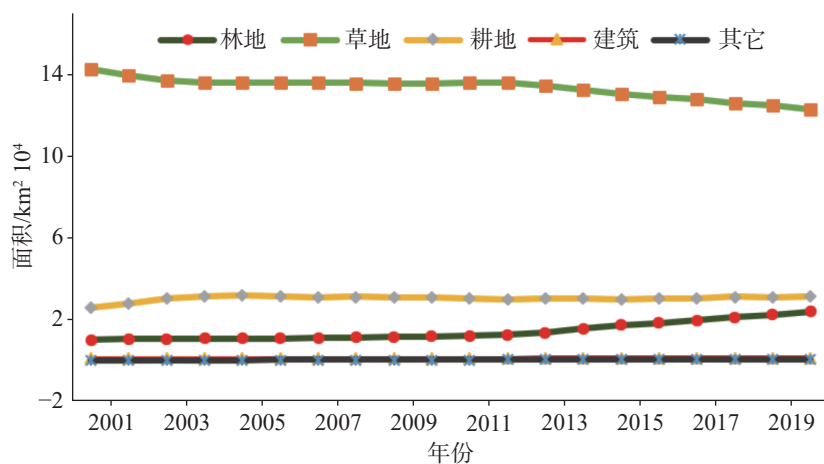


图 11 2001—2020 各地物类型面积变化

Fig. 11 Variations in area of different object types from 2001 to 2020

经统计,20 年来贵州省内草地与林地面积变化较为明显,且随着林地面积的增加,草地面积呈现减少的趋势。其中林地面积约增加了  $1.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,草地转化为林地的面积占 62.73%,耕地与建筑用地的转化面积为 0.19%;草地面积共减少了约  $1.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,除去转化为林地的部分,约 52.85% 转化为耕地;耕地面积在 2001—2003 年间不断增加并趋于稳定,20 年共增加  $5.73 \times 10^3 \text{ km}^2$  左右,排除草地转化面积,其余地物转化为耕地的面积仅占总变化面积的 0.16%;与上述三种面积变化较为明显的地类相比,建筑用地与其它用地的面积无明显变化趋势,分别

增加了  $192.75 \text{ km}^2$  与  $96.31 \text{ km}^2$ 。

为了直观地体现碳汇对森林面积变化的响应,计算贵州省森林面积与总碳汇量时间序列之间的归一化 Z 值(图 12),可以看出二者的时序振幅差异较大,且求得最优路径为 18.65,说明森林面积变化与碳汇量之间的相似性较弱。为了进一步分析不同地物类型面积变化与岩溶碳汇的关系,本文分别求取了相应时序数据的标准差与协方差,得到皮尔逊(Pearson)相关系数(表 4),结果表明:森林、建筑以及其它地物面积与岩溶碳汇表现为较弱的正相关关系,相对而言,森林面积与岩溶碳汇的相关性更强;

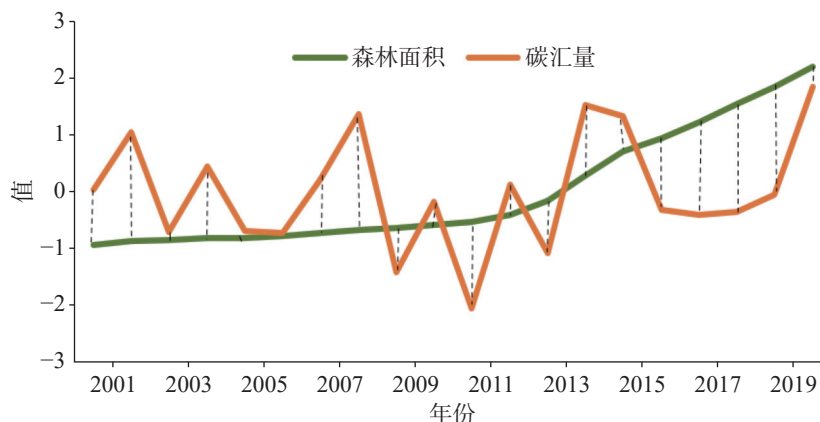


图 12 Z-归一化森林面积与碳汇时序数据

Fig. 12 Z-normalized forest area and time-sequencing data on carbon sink

表 4 2001—2020 年不同地物类型面积与碳汇的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient between the area of different object types and the carbon sink from 2001 to 2020

| 土地利用类型 | 相关系数  |
|--------|-------|
| 森林     | 0.29  |
| 草地     | -0.22 |
| 耕地     | -0.12 |
| 建筑     | 0.19  |
| 其它     | 0.18  |

而草地、耕地面积变化与岩溶碳汇表现为一定的负相关关系。考虑到岩溶碳汇由多种因素共同决定,仅通过 2001—2020 年间的森林面积变化无法准确反映岩溶碳汇量的变化情况,有待在之后的研究中结合政策、景观格局、森林种类以等因素深入探讨森林面积对岩溶碳汇的影响。

5 结 论

本研究以贵州省岩性数据为基础,通过动态时间规整方法和贡献度法分析了岩溶碳汇的影响因子,对各输入参数进行 Z-归一化处理,并利用 GEM-CO<sub>2</sub> 模型计算了贵州省年均碳汇量。通过 Mann-Kendall 趋势检验方法分析多年来岩溶碳汇量的发展趋势,并分析气温、降水、岩石类别、森林面积变化等与岩溶碳汇量的相关性,得出以下主要结论:

(1) 贵州省年均岩溶碳汇量在  $0\sim1.04\times10^3\text{ t C}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间,岩石风化消耗 CO<sub>2</sub> 量较多的地区主要在黔东南、黔西南、黔南以及黔东南部分地区,消耗 CO<sub>2</sub> 较少的地区主要分布在黔西北地区。

(2) 20 年间,贵州省岩溶碳汇量不存在明显的单调性,岩石风化碳汇量的变化形式主要分为减少、稳定以及增加三种,其中以稳定型为主,波动增加型主要集中典型岩溶地貌区域。

(3) 年均降水与碳汇量时序数据曲线特征结构相似、变化趋势一致,二者具有较强的相关性;而年均温度相较于碳汇数据表现出一定的滞后性(1~2 年)。

(4) 不同岩石类别碳汇量与岩溶碳汇总量存在强相关关系,相关性由大到小表现为:碳酸盐岩>砂岩、页岩与碳酸盐岩(碳酸盐岩夹页岩、碳酸盐岩及页岩)>页岩与碳酸盐岩(碳酸盐岩夹页岩、碳酸盐岩

及页岩)>碳酸盐岩及砂岩>砂页岩>深成岩及变质岩>砂岩>砂岩、页岩、碳酸盐岩与玄武岩(碳酸盐岩、玄武岩、砂页岩顶部含煤;玄武岩、砂岩、页岩夹碳酸盐岩)>酸性火山岩>玄武岩砂岩夹碳酸盐岩>玄武岩、砂页岩夹煤>玄武岩及砂岩>页岩。而 20 年来贵州省不同类型岩石风化对碳汇的贡献度由高到低依次为:碳酸盐岩>砂岩、页岩与碳酸盐岩混合岩>页岩与碳酸盐岩混合岩>砂岩与碳酸盐岩混合岩>砂岩、页岩、玄武岩与碳酸盐岩混合岩>砂岩>砂岩与页岩混合岩>砂岩、页岩与玄武岩混合岩>砂岩、玄武岩与碳酸盐岩混合岩>页岩>酸性火山岩>深成岩及变质岩>砂岩与玄武岩混合岩,这表明岩石风化所消耗的 CO<sub>2</sub> 量除了与岩石中的少量碳酸盐成分相关外,与岩石的分布面积同样相关。

(5) 2000—2020 年贵州省森林面积呈增加趋势,与岩溶碳汇量表现为较弱的正相关关系,草地、耕地面积变化与岩溶碳汇表现为一定的负相关关系,这可能是由于不同地域存在一定的小气候,且受到景观格局变化、人为活动等方面的影响,有待在之后研究中深入探讨。

总体来说,贵州省 2000—2020 年岩溶碳汇量波动变化,呈波动增加趋势。影响岩石风化速度、消耗 CO<sub>2</sub> 量的主要因素为岩石类别,其次为年均降水量,温度对于岩石风化 CO<sub>2</sub> 消耗的响应表现为 1—2 年的滞后性,森林面积变化对岩溶碳汇的影响需考虑多种环境因素、森林景观以及森林种类等进一步深入研究。

参考文献

[1] 白文广,张兴赢,张鹏. 卫星遥感监测中国地区对流层二氧化碳时空变化特征分析[J]. 科学通报, 2010, 55(30): 2955-2962.

[2] 张强. 岩溶地质碳汇的稳定性:以贵州草海地质碳汇为例[J]. 地球学报, 2012, 33(6): 947-952.

ZHANG Qiang. The stability of carbon sink effect related to carbonate rock dissolution: A case study of the Caohai lake geological carbon sink[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(6): 947-952.

[3] Hese S, Lucht W, Schmulilius C, et al. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO<sub>2</sub> balance—the Earth observation mission Carbon-3D[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 94-104.

[4] Zhang Cheng. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(35): 3759-3765.

[5] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constrains on the



- global atmospheric CO<sub>2</sub> budget[J]. *Science*, 1990, 247(4949): 1431-1438.
- [6] Walker J, Hays P B, Kasting J F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C10): 9776-9782.
- [7] Berner R A, Lasaga 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 of Science*, 1983, 283(7): 641-683.
- [8] Berner R A. A model for atmospheric CO<sub>2</sub> over phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 1991, 291(4): 339-376.
- [9] Zeng Siboa, Jiang Yongjuna, Liu Zaihua. Assessment of climate impacts on the karst-related carbon sink in SW China using MPD and GIS[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 144: 171-181.
- [10] Zeng S, Liu Z, Kaufmann G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5749.
- [11] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. *科学通报*, 2012, 57(2-3): 95-102.
- LIU Zaihua. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(2-3): 95-102.
- [12] Blum J D, Gazis C A, Jacobson A D, Chamberlain C P. Carbonate versus silicate weathering in the Raikhot watershed within the High Himalayan Crystalline Series[J]. *Geology*, 1998, 26(5): 411-414.
- [13] 蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 何师意, 章程, 张强. 论岩溶作用对全球碳循环的意义与碳汇效应: 兼对《对〈中国岩溶作用产生的大气 CO<sub>2</sub> 碳汇分区估算〉一文的商榷》的答复[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 1-6.
- JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, CAO Jianhua, HE Shiyi, ZHANG Cheng, ZHANG Qiang. Significance and carbon sink effects of karst processes in global carbon cycle: Also reply to "Discussion on article 'Calculation of atmospheric CO<sub>2</sub> sink formed in karst processes of karst divided regions in China' "[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 1-6.
- [14] 熊练, 白晓永, 李阳兵, 赵翠薇, 罗光杰, 吴路华, 陈飞, 李朝君, 冉晨, 张思蕊. 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[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2022, 41(5): 956-964.
- XIONG Lian, BAI Xiaoyong, LI Yangbing, ZHAO Cuiwei, LUO Guangjie, WU Luhua, CHEN Fei, LI Chaojun, RAN Chen, ZHANG Sirui. High-resolution long-term data of China's rock weathering carbon sink and its spatial-temporal pattern[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2022, 41(5): 956-964.
- [15] 邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 姚锐. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(2): 177-182, 190.
- QIU Dongsheng, ZHUANG Dafang, HU Yunfeng, YAO Rui. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(2): 177-182, 190.
- [16] 李矩章, 林钧枢, 房金福. 喀斯特溶蚀强度分析与估算[J]. *地理研究*, 1994, 13(3): 90-97.
- LI Juzhang, LIN Junshu, FANG Jinfu. Analysis and estimation of the karst solutional intensity[J]. *Geographical Research*, 1994, 13(3): 90-97.
- [17] Suchet P A, Probst J L. A global model for present-day atmospheric/soil CO<sub>2</sub> consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO<sub>2</sub>)[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1995, 47(1-2): 273-280.
- [18] 林云, 梁家乐, 武亚遵, 贾方建, 任华鑫. 许家沟泉域岩溶地下水  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  特征及碳汇效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(1): 146-153.
- LIN Yun, LIANG Jiale, WU Yazun, JIA Fangjian, REN Huaxin. Characteristics of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  of karst groundwater and carbon sink effect in Xujiagou spring area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(1): 146-153.
- [19] Zhou Guoqing, Jia Bin, Tao Xiaodong, Yan Hongbo. Estimation of karst carbon sink and its contribution to CO<sub>2</sub> emissions over a decade using remote sensing imagery[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 121: 104689.
- [20] 于爽, 蒲俊兵, 刘凡, 杨慧. 岩溶碳汇效应对植被的响应研究进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(4): 418-428.
- YU Shi, PU Junbing, LIU Fan, YANG Hui. Effect of vegetation on carbon sequestration in karst systems: A critical review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 418-428.
- [21] 郜治钦, 曾成, 肖时珍, 肖华, 代林玉, 闫伟. 近 27a 来典型白云岩流域岩溶碳汇变化及其调控机制: 以贵州施秉黄洲河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(4): 625-635.
- TAI Zhiqin, ZENG Cheng, XIAO Shizhen, XIAO Hua, DAI Linyu, YAN Wei. Variation and regulation mechanism of karst carbon sink in typical dolomite basin in recent 27 years: A case study of the Huangzhouhe basin in Shibing, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 625-635.
- [22] 张春来, 黄芬, 蒲俊兵, 曹建华. 中国岩溶碳汇通量估算与人工干预增汇途径[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(4): 40-52.
- ZHANG Chunlai, HUANG Fen, PU Junbing, CAO Jianhua. Estimation of karst carbon sink fluxes and manual intervention to increase carbon sinks in China[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(4): 40-52.
- [23] 章程. 岩溶作用时间尺度与碳汇稳定性[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 368-371.
- ZHANG Cheng. Time-scale of karst processes and the carbon sink stability[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 368-371.
- [24] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, Chen Y M, Cao Y, Ren J Y. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011–2100[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 183-194.
- [25] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集 (1901—2021)

- [EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194>.
- PENG Shouzhong. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901–2021)[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194>.
- [26] 庞健峰, 丁孝忠, 韩坤英, 曾勇, 陈安蜀, 张艳玲, 张庆合, 姚冬生. 1 : 100 万中华人民共和国数字地质图空间数据库[J]. 中国地质, 2017(Suppl.1): 8-18, 125-138.
- PANG Jianfeng, DING Xiaozhong, HAN Kunying, ZENG Yong, CHEN Anshu, ZHANG Yanling, ZHANG Qinghe, YAO Dongshen. The national 1 : 1,000,000 geological map spatial database[J]. *Geology in China*, 2017(Suppl.1): 8-18, 125-138.
- [27] 叶天竺, 黄崇轲, 邓志奇. 1 : 250 万中华人民共和国数字地质图空间数据库[J]. 中国地质, 2017, 44(Suppl.1): 19-24.
- YE Tianzhu, HUANG Chongke, DENG Zhiqi. Spatial database of 1 : 2,500,000 digital geologic map of People's Republic of China[J]. *Geology in China*, 2017, 44(Suppl.1): 19-24.
- [28] 廖顺宝, 岳艳琳. 基于时序 NDVI 图谱库提高土地覆盖分类精度的方法[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 241-248.
- LIAO Shunbao, YUE Yanlin. Method of improving classification accuracy of land cover based on time series NDVI database[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 241-248.
- [29] Liu H M, Zhan Q M, Yang C, Wang J. Characterizing the spatio-temporal pattern of land surface temperature through time series clustering: Based on the latent pattern and morphology[J]. *Remote sensing*, 2018, 10(4): 654.
- [30] Zhang Z, Tavenard R, Bailly A, Tang X, Tang P, Corpetti T. Dynamic time warping under limited warping path length[J]. *Information Sciences*, 2017, 393: 91-107.
- [31] Suchet P A, Probst J L. Flux de CO<sub>2</sub> consommé par altération chimique continentale: Influences du drainage et de la lithologie[J]. *Comptes Rendus De l'Académie Des Sciences De Paris*, 1993, 317: 615-622.
- [32] Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. *American Journal of Science*, 1998, 287: 401-428.
- [33] Suchet P A, Probst J L. A global model for present-day atmospheric/soil CO<sub>2</sub> consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM-CO<sub>2</sub>)[J]. *Tellus B*, 1995, 47(1-2): 273-280.
- [34] 王玉雪, 李波, 王槿妍, 赵小伟, 张欣, 王阳, 范庆莲. 基于 Mann-Kendall 检验法的北运河流域降水和径流变化趋势分析[J]. *北京水务*, 2022(1): 24-28.
- WANG Yuxue, LI Bo, WANG Jinyan, ZHAO Xiaowei, ZHANG Xin, WANG Yang, FAN Qinglian. Analysis on variation trend of precipitation and runoff in the North Canal basin based on Mann-Kendall test[J]. *Beijing Water*, 2022(1): 24-28.
- [35] 王念, 田庆春. 基于 Mann-Kendall 方法的 1954—2015 年临汾市气候变化特征分析[J]. *现代农业科技*, 2019(13): 175-178.
- WANG Nian, TIAN Qingchun. Analysis on climate change characteristics in Linfen City from 1954 to 2015 based on Mann-Kendall method[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(13): 175-178.
- [36] 张兴波, 蒋勇军, 邱述兰, 曹敏, 胡毅军. 农业活动对岩溶作用碳汇的影响: 以重庆青木关地下河流域为例[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 466-476.
- ZHANG Xingbo, JIANG Yongjun, QIU Shulan, CAO Min, HU Yijun. Agricultural activities and carbon cycling in karst areas in Southwest China: Dissolving carbonate rocks and CO<sub>2</sub> sink[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 466-476.
- [37] Zeng C, Liu Z H, Zhao M, Yang R. Hydrologically-driven variations in the karst-related carbon sink fluxes: Insights from high-resolution monitoring of three karst catchments in Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 74-90.
- [38] Schwartzman D W, Volk T. Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth[J]. *Nature*, 1989, 340(6233): 457-460.
- [39] 蓝家程, 肖时珍, 杨龙, 敖向红, 肖华. 石漠化治理对岩溶作用强度的影响及其碳汇效应[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 244-249.
- LAN Jiacheng, XIAO Shizhen, YANG Long, AO Xianghong, XIAO Hua. Impact of rocky desertification treatment on karst carbonate rock dissolution rates and its carbon sink effect[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 244-249.
- [40] 姜光辉, 张强. 峰丛洼地自然封育过程岩溶水溶解无机碳的变化: 以桂林丫吉试验场为例[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 397-402.
- JIANG Guanghui, ZHANG Qiang. Change of dissolved inorganic carbon (DIC) in karst peak cluster during natural restoration: A case study in Yaji station[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 397-402.

## Estimation of the carbon sink of rock weathering by remote sensing and analysis of its spatiotemporal variations

ZHANG Yu<sup>1,3,4</sup>, LUO Weiqun<sup>1,2</sup>, LIU Meiling<sup>4</sup>, LI Mengqi<sup>4</sup>, ZHANG Li<sup>3</sup>,  
CHEN Fangfang<sup>5</sup>, ZHANG Yangcen<sup>6</sup>, CHEN Rui<sup>4</sup>

( 1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of Natural Resources, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station/Pingguo Baise, Karst Ecosystem, Guangxi Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Piesat Information Technology Co., Ltd., Beijing 100195, China; 4. School of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 10083, China; 5. Henan No.1 Geological Exploration Institute Co., Ltd. Henan 450001, China; 6. School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China )

**Abstract** As a type of natural carbon sink, rock weathering plays a critical role in the global carbon cycle by storing atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). This process is particularly significant in mitigating climate change, although its contributions are often underestimated or overlooked in broader carbon calculation practices. The present study focuses on Guizhou Province, China, a region that is characterized by extensive karst landforms. These landforms are of particular interest because they are highly effective in capturing atmospheric CO<sub>2</sub> through rock weathering. This study aims to explore the spatiotemporal dynamics of the carbon sink of rock weathering from 2001 to 2020. This study integrates various data sources, including remote sensing data, meteorological records, and lithological information, to estimate the carbon sink capacity with the GEM-CO<sub>2</sub> model. This study also employs advanced analytical techniques such as Dynamic Time Warping (DTW) and statistical methods to analyze the spatiotemporal evolution of carbon sink.

The findings of this study reveal that the rock type is a primary factor influencing the rate of rock weathering and CO<sub>2</sub> consumption, followed closely by annual precipitation. The temperature also plays a significant role, although the responses of its effects are observed to be lagged. This indicates that changes in temperature may affect CO<sub>2</sub> absorption rates several years after the initial temperature fluctuation occurred. This study identifies that the regions with the highest CO<sub>2</sub> consumption through rock weathering are predominantly concentrated in the northeastern, southwestern, southern, and southeastern parts of Guizhou Province. These areas are characterized by widespread formations of carbonate rocks and higher precipitation levels, which can jointly enhance the weathering process and increase carbon sequestration. In contrast, the northwestern regions, which are dominated by silicate rocks and receive lower levels of precipitation, exhibit the lowest levels of CO<sub>2</sub> consumption. This discrepancy underscores the importance of both lithological composition and climatic conditions in determining the effectiveness of natural carbon sink.

From 2001 to 2020, the annual average karst carbon sink in Guizhou Province ranged from 0 to  $1.04 \times 10^3$  t C·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. Although there was a general trend of fluctuation, the overall pattern showed an increase in carbon sequestration capacity. However, the analysis did not reveal any significant single trend over the two decades. This lack of a clear trend suggests a complex interplay between geological and climatic factors that influence carbon sequestration in karst landforms. The variability in carbon sink capacity observed in this study highlights the sensitivity of natural carbon sink to the changes in environmental conditions, particularly in precipitation and temperature.

The spatial distribution of carbon sink closely mirrors the distribution of carbonate rocks in Guizhou Province. This correlation emphasizes the critical role that carbonate rocks play in the global carbon cycle due to their high solubility, which can accelerate the process of CO<sub>2</sub> absorption. Areas with more annual precipitation were found to have a greater capacity for carbon sequestration, and this result reinforces the importance of hydrological factors in the weathering process. This finding is particularly relevant for the regions that are expected to experience changes in precipitation patterns due to climate change, as it suggests that shifts in hydrological conditions could have a significant impact on the efficacy of natural carbon sink.

In addition to these findings, this study also highlights the importance of both geological formations and climatic



conditions when the carbon sequestration potential of different regions are estimated. The application of the GEM-CO<sub>2</sub> model in this study provides a robust framework for estimating the carbon sink at a regional scale. The effectiveness of this model in this context offers critical data that can be used to guide the development of carbon trading mechanisms and environmental policies aimed at enhancing the natural carbon sink. By integrating geological and climatic data, this model allows a more nuanced understanding of the factors that contribute to the carbon sequestration in karst landforms.

The insights gained from this study are invaluable for informing carbon management strategies, particularly in regions with similar geological and climatic conditions. The findings of this study suggest that the carbon sequestration through rock weathering could be a viable component of mitigation efforts for climate change in a wider range. However, the fluctuating nature of carbon sink over the study period indicates that the natural carbon sink is highly sensitive to changes in environmental conditions. This sensitivity underscores the need for adaptive management strategies that can respond to changes in climate and ensure the continued effectiveness of natural carbon sink.

Furthermore, this study lays the groundwork for future research to explore the further implications of rock weathering in global carbon cycles. It advocates a more integrated approach that considers both natural and human factors of mitigating climate change. As the climate change continues altering global weather patterns, understanding the role of natural processes like rock weathering in the carbon cycle will be increasingly important for us to develop effective strategies to manage and mitigate the impacts of climate change.

**Key words** karst carbon sink, GEM-CO<sub>2</sub> model, Mann-Kendall trend test, DTW

(编辑 张玲)