

杨晓艳, 任世川, 田文锐, 等. 40年来昆明盆地碳酸盐岩风化溶解过程对大气中CO₂浓度变化的响应[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1341-1349.

DOI: 10.11932/karst20240611

40年来昆明盆地碳酸盐岩风化溶解过程对 大气中CO₂浓度变化的响应

杨晓艳^{1,2,3}, 任世川^{1,2,3}, 田文锐^{1,2,3}, 马能伟^{1,2,3}, 宋增宏^{1,2,3}, 李国瑞^{1,2,3}, 张高引^{1,2,3}

(1. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216; 2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态修复重点实验室, 云南昆明 650216;
3. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216)

摘要:近年来, 大气中CO₂浓度持续上升与全球气候变化相互关系引发了人们对地球系统碳循环的广泛关注, 作为碳循环的重要环节, 岩溶作用在对大气中CO₂浓度变化的响应方面, 存在较大的时间尺度分歧, 文章以昆明盆地两个岩溶泉水40年监测数据为基础, 收集了气象、大气中CO₂浓度等资料, 采用水化学—流量法、对比分析法定量评价了40年来岩溶作用的动态变化及对大气中CO₂浓度变化的响应。研究表明: 碳酸盐岩风化消耗CO₂质量浓度与大气CO₂浓度呈正相关, 滞后时间约20年, 变化速率基本相当; 碳汇强度变化主要受降水变化控制, 无明显滞后, 同时受大气CO₂浓度变化影响, 滞后时间20年。说明大气中CO₂浓度的上升会加强碳酸盐岩的溶蚀作用从大气回收更多的CO₂, 在缓解全球变暖中发挥着重要作用, 这对进一步准确评估岩溶碳汇强度, 解决“遗漏碳汇”问题, 助推“双碳”目标的实现具有重要意义。

关键词: 二氧化碳; 西南岩溶; 昆明盆地; 碳酸盐岩风化碳汇; 变化响应

创新点: 以40年监测数据为基础, 精确评价了昆明盆地碳酸盐岩化学风化作用消耗CO₂浓度和碳汇强度动态变化; 通过机理分析、数据对比, 得出碳酸盐岩风化消耗CO₂质量浓度和碳汇强度对气候变化的响应, 并根据未来大气中CO₂浓度数据, 预测了岩溶碳汇初始阶段碳酸盐岩风化在缓解全球变暖中的积极作用, 为实现“双碳”目标提供参考。

中图分类号: P642.25; P512.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1341-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

十八世纪工业革命拉开了人类大规模使用化石燃料的序幕, 由于大量燃烧化石燃料使空气中CO₂含量逐渐升高, 近年来, 全球气温上升显著, 极端气候事件频发^[1-2]。为积极应对气候变化, 全球碳循环和大气CO₂收支平衡研究成为全球变化科学研究的

热点^[3]。现有研究成果表明, 地球系统的碳循环与全球气候变化共存, 碳以不同形式在不同的碳库之间循环, 其中, 碳酸盐岩通过岩溶作用积极参与全球碳循环^[4], 回收的CO₂约占“遗漏的汇”的三分之一, 是大气CO₂源汇的重要环节^[5], 中国岩溶分布面积约346万km², 是世界上的岩溶大国, 岩溶碳汇潜力巨大^[6-8]。为实现“2030年前碳达峰, 2060年前碳中和”

第一作者简介: 杨晓艳(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事水工环方面的调查研究工作。E-mail: 515178059@qq.com。

通信作者: 任世川(1979—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要从事水工环方面的调查研究工作。E-mail: 56926747@qq.com。

收稿日期: 2024-01-01

总体发展目标,2021年,我国出台了《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》两个重要文件,岩溶碳汇被列入文件中重要的汇项,为岩溶碳汇深入研究与固碳增汇工程实践带来巨大的机遇^[9]。目前,岩溶碳循环时间尺度动态研究主要集中在日动态、月动态、季动态、年动态、降雨效应等短时间尺度,认为岩溶作用对环境变化极其敏感,与各种气候变化(如降水、气温)及生物作用基本同步,并不存在明显的滞后^[5,10-14];多年动态变化及对气候变化的响应研究主要以石笋中的碳同位素记录为依据,得出了石笋中C含量的变化过程滞后大气CO₂浓度变化16年^[15]。IPCC的AR5和AR6报告虽将岩溶碳汇作为大气CO₂去除的重要作用,但认为碳酸盐岩风化碳汇(岩溶作用)属于长时间尺度碳汇,为10³~10⁴年,未纳入全球碳收支核算^[2,16-17]。岩溶碳汇时间尺度存在较大争议,因此,碳酸盐岩风化碳汇中长时间尺度动态变化及对气候变化的响应需要进一步深入研究。

我国西南岩溶地区以云贵高原为中心,涉及云南、四川、贵州、广西等8个省区市,碳酸盐岩出露面积达54万km²,跨越中国的三大阶梯地貌单元,是世界上最大的连片裸露碳酸盐岩分布区^[15,18-19],水热条件优越,岩溶作用强烈,碳汇效应显著^[7]。其中,滇东—攀西地区岩溶断陷盆地广泛分布,盆地面积大于30km²的有69个,是我国西南重要的水资源汇集、人口聚居和经济发展区,也是碳汇和碳源最活跃的区域,其中,昆明盆地属汇水型岩溶断陷盆地,汇水面积2924.5km²^[20],碳酸盐岩地层出露面积约占盆地总面积的32%,盆地内岩溶水具有水量丰富、储存集中、水质较好的特征^[21-22]。同时,昆明做为云南省省会驻地,社会经济发达,地下水监测工作起步早,基础资料丰富,但岩溶碳汇研究程度较低,因此,本文以昆明盆地内岩溶泉水多年观测资料为基础,通过对大气CO₂浓度、气候指标(气温、降水量)和泉水水质数据变化的分析计算,初步定量评价40年来碳酸盐岩风化对大气CO₂浓度、气候变化的响应和碳汇效应对CO₂减排的贡献,为进一步准确评估岩溶碳汇强度,将岩溶碳汇列入全球碳收支核算,解决“遗漏碳汇”问题,助力“双碳”目标的实现提供基础依据。

1 昆明盆地水文地质条件

昆明盆地位于云南省中部,为金沙江支流普渡河上游滇池流域,流域呈南北向长条形,两头窄,中间宽,面积2924.5km²。地貌类型分为侵溶蚀山区、溶蚀丘峰谷地区、沉积平坝区和侵溶蚀河谷区四类^[23],地势总体北东高、南西低,四周分布拱王山和梁王山2条山系^[24],最高点为东北部梁王山,海拔2840m,盆底地形平坦,平均起伏仅19m,面积846.2km²,为云南省第二大盆地,滇池位于盆底南西部,水域面积320.58km²,海拔1886m,为流域最低点。省会昆明坐落在盆底北部,三面环山,南临滇池,具有靠山面水的良好地理环境,为云南省政治、经济、文化中心(图1)。流域内原生植被主要为中亚热带半湿润常绿阔叶林,但由于开发历史悠久,人口密度大,在长期人类活动影响下,原始植被多变为次生植被,盖度小于25%。

昆明盆地处于扬子地台区的昆明地台小区,地层发育齐全,各时代地层均有出露,最老为元古代昆阳群,最新为第四系;岩性复杂多变,以沉积的碳酸盐岩和碎屑岩为主,相间分布,出露面积占总面积的72%。盆地位于“康滇台背斜”与“滇东台褶带”交界区,夹持于近南北向的普渡河断裂和小江断裂之间,断裂构造发育,以南北向为主,北东向次之,构造的形成与演化对盆地地形地貌特征、地下水的补、径、排条件及富集规律起明显的控制作用。

昆明盆地属现代高原面,地形起伏相对缓和,深切割河谷排泄基准少,水文地质边界完整,地表水和地下水分水岭基本一致,现查明排泄口仅有海口河一处,地下水获得的补给量基本在盆地内排泄汇入地表水(滇池),水文地质类型属汇水型盆地。流域内碳酸盐岩呈断块状或条带状分布于盆地周围山区,出露面积较广,约占总面积的32%(图1),岩溶水含水层岩溶发育,盆地边缘含水均匀,富水性强,具有水量丰富、储存集中、水质较好的特征,是喀斯特断陷盆地的典型代表^[25]。在汇水边界范围内,岩溶地下水接受大气降水入渗补给后由周边山区向盆地径流,部分岩溶水以泉或暗河的形式排泄,部分岩溶水通过延伸进入盆地第四系松散层之下的碳酸盐岩在地下富集,埋藏深度数十至数百米,地下水承压或自流,构成昆明盆地边缘典型的裸露—覆盖型岩溶水

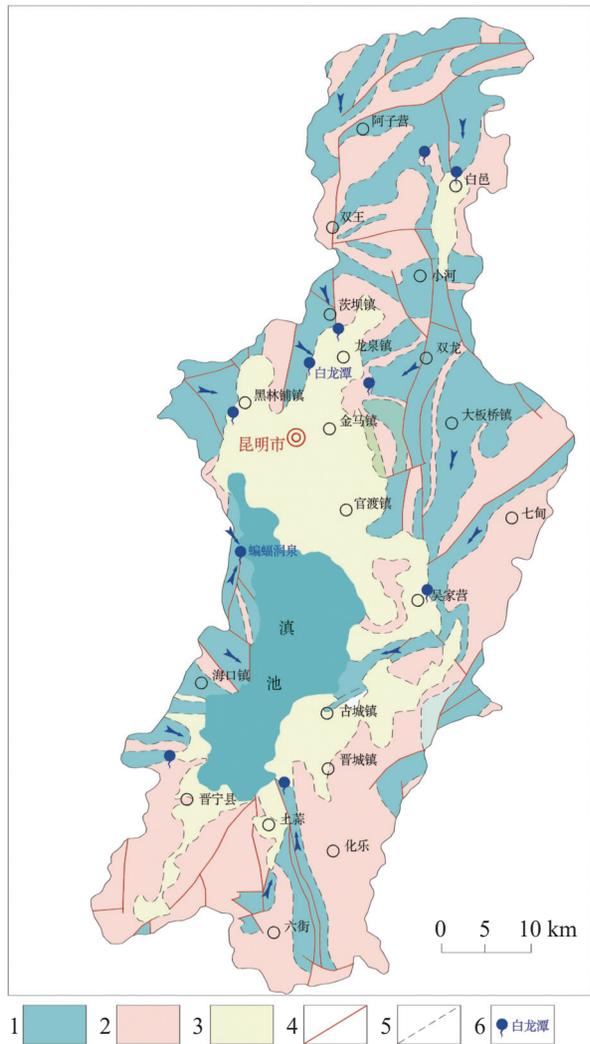


图 1 昆明盆地水文地质简图

1.岩溶水 2.裂隙水 3.孔隙水 4.断层 5.地层界线 6.泉点

Fig. 1 Hydrogeology of the Kunming basin

1. karst water 2. fissure water 3. pore water 4. fault 5. stratigraphic boundary 6. spring point

富水地段。盆地北部山区部分岩溶水在盆地边缘以大泉或暗河的形式排泄，出露泉水少，但流量大，部分岩溶水通过覆盖型岩溶地层进入盆地底部形成富水块段，部分通过人工开采方式排泄，少量进入深部循环；东部山区少量岩溶水在盆地边缘排泄，泉水多，流量相差较大，大部分岩溶水通过覆盖型岩溶在盆地底部形成富水块段，部分通过人工开采方式排泄，少量进入深部循环；南部山区大部分岩溶水以泉的形式排泄，在滇池南岸及外围山区冲沟或河谷底部有多处泉水出露，少量岩溶水则在滇池沿岸或山间洼地富集，形成富水块段，进入深部循环；西部山区岩溶水径流途径较短，多以泉的形式或在盆地边缘排泄或直接向滇池排泄，少量岩溶水通过覆盖型岩

溶进入盆地底部形成富水块段，进入深部循环。

2 大气中CO₂ 浓度变化和昆明盆地气候特征

2.1 大气中CO₂ 浓度变化

根据 IPCC 第六次评估报告，1850—2019 年人类活动累计 CO₂ 排放量约 2.4×10¹² t，其中 42% 在 1990—2019 年排放。1750 年以前，大气中 CO₂ 浓度平均值一直维持在 280×10⁻⁶，之后随着工业发展，大气中 CO₂ 浓度开始持续上升，至 1940 年增加到 310×10⁻⁶，190 年增加了 10.71%，年均增长率 0.16×10⁻⁶·a⁻¹，增长缓慢；至 1980 年增加到 338.68×10⁻⁶，40 年增加了 9.25%，年均增长率 0.72×10⁻⁶·a⁻¹，增长仍较缓慢；至 2021 年增加到 415.70×10⁻⁶，40 年增加了 22.74%，年均增长率 1.93×10⁻⁶·a⁻¹，增长速度明显加快，尤其进入 21 世纪后，大气 CO₂ 浓度的增长率由 20 世纪 90 年代的 1.56×10⁻⁶·a⁻¹ 上升到 2.23×10⁻⁶·a⁻¹ (图 2)^[26]。

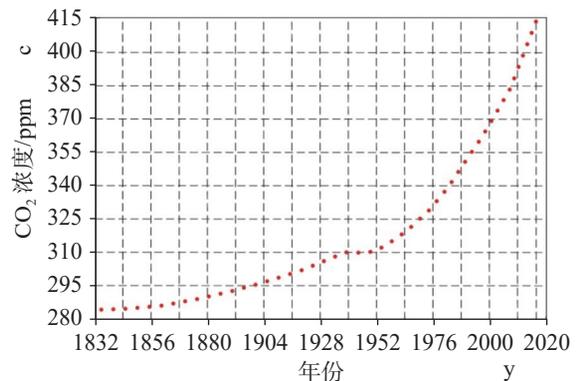


图 2 1832—2021 年大气 CO₂ 浓度变化曲线图

Fig. 2 Variation curves of atmospheric CO₂ concentration from 1832 to 2021

2.2 昆明盆地气候特征及动态

昆明盆地属亚热带低纬高原山地季风气候，素有“万紫千红花不谢，冬暖夏凉四时春”的气候特点，被誉为“春城”。根据多年来的《昆明市年度环境质量状况公报》，1951—2020 年昆明主城区多年平均降水量 992.4 mm，最大为 1999 年的 1449.9 mm，最小为 2009 年的 571.0 mm。根据 10 年平均值统计，降水动态呈波状起伏，具弱减少趋势，突变趋势不明显 (图 3)。1951—2020 年昆明主城区多年平均气温 15.2℃，最低为 1971 年的 13.7℃，最高为 2005、2010、2018 年的 16.7℃。根据 10 年平均值统计，

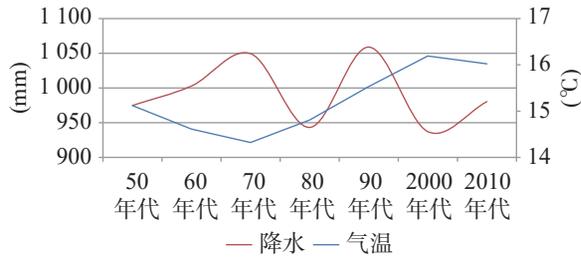


图3 1951—2020年昆明主城区10年平均气温和降水量变化趋势图

Fig. 3 Variation trend of 10-year average temperature and precipitation in the main urban area of Kunming from 1951 to 2020

1951—1970年呈下降趋势,下降 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,下降倾向率为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$;1981—2010年呈上升趋势,上升 $1.87\text{ }^{\circ}\text{C}$,上升倾向率为 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$;2010—2020年呈小幅下降趋势,下降 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1980年至今,气温整体呈明显上升趋势(图3)^[27-28]。

3 数据来源和研究方法

3.1 昆明盆地地下水监测历史和监测点选取

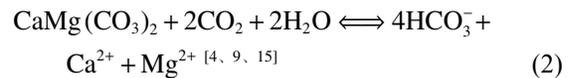
1981年,自昆明地下水动态监测站(现云南省地质环境监测院)成立开始,昆明盆地地下水监测工程正式启动,建站初期共有水质监测点197个,以机井(多为企业或单位开采井)为主,并有少量泉水和民井,覆盖了昆明盆地北部的大部分区域。随着社会发展、城市规划的不断变更和开采井业主的变迁,监测工作受到了较大影响,一是监测点数量大量减少,至2022年水质监测点逐渐减少至48个;二是监测点部分年份或期次未能开展监测工作,如2008—2012年地下水监测工作未能正常进行。

昆明盆地地下水水质监测每年取样化验分析2次,按枯丰期分别在4—5月、9—10月完成,监测

项目有pH值、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^{-} 等共48项,多年来取样要求、方式、手段、化验单位均未变更,监测结果一致性较好。为尽可能保证气候变化是泉域碳酸盐岩风化变化的主要因素,尽可能准确分析40年来昆明盆地岩溶水对气候变化的响应,本论文选择监测点依据以下原则,一是监测时间序列最长,数据最完整;二是流域内碳酸盐岩分布面积占90%以上,大气降水为泉水唯一补给来源,无外源水补给;三是地质环境条件基本保持不变,土地利用和植被类型没有明显变化,人类工程活动轻微,对环境的影响小。经过认真筛选符合上述条件的岩溶泉水仅有盆地北部蛇山白龙潭泉和盆地西部西山蝙蝠洞泉2个,截至2022年,白龙潭泉共有监测数据68组,蝙蝠洞泉共有监测数据62组,泉水基本特征见表1,位置见图1。

3.2 研究方法

碳酸盐岩风化的基本原理如下:



根据碳酸盐岩化学溶蚀原理,碳酸盐岩化学溶蚀消耗的 CO_2 质量浓度:

$$\rho(\text{CO}_2) = 0.5\rho(\text{HCO}_3^{-}) \times 44/61 \quad [4, 9, 15] \quad (3)$$

式中: $\rho(\text{CO}_2)$ 为碳酸盐岩风化消耗的 CO_2 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{HCO}_3^{-})$ 为地下水中的 HCO_3^{-} 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

因降水入渗补给为两个岩溶泉水的唯一补给来源,因此泉域内地下水径流量:

$$Q = 31.71 \times \alpha \times X \times F \quad (4)$$

式中:Q为泉域内地下水径流量, $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$;F为流域面积, km^2 ; α 为入渗系数(常数);X为降水量,m。

表1 白龙潭和蝙蝠洞岩溶泉水详细特征一览表^[17]

Table 1 Characteristics of karst spring water from Bailong pool and Bianfu cave in the Kunming basin^[17]

泉水名称	主要含水层		入渗系数	泉域面积	年均流量/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	补给、径流区环境特征
	地层代号	岩性				
蛇山白龙潭泉	D_3zg 、 C_1d^2 、 C_2w 、 P_{1Y}	灰岩、白云质灰岩	0.363	3.01	101.45	降水入渗补给为泉水唯一补给来源,补给区为蛇山南部碳酸盐岩分布区,多年来以荒山为主,局部有少量旱地,植被稀疏,以人工林为主,石漠化严重,人类工程活动弱
西山蝙蝠洞泉	D_3zg 、 C_1d^2 、 C_2w 、 P_{1Y}	灰岩、白云质灰岩	0.436	3.75	64.01	降水入渗补给为泉水唯一补给来源,补给区主要为西山风景区,植被发育,以次生林为主,多年来以自然状态为主,人类工程活动弱

根据公式(3)和(4)泉水流域内因碳酸盐岩风化消耗的 CO₂, 即碳汇强度 C_m:

$$C_m = 0.031536 \times Q/F \times \rho(\text{CO}_2) = \alpha \times X \times \rho(\text{CO}_2)^{[4,9,15]} \quad (5)$$

式中: C_m 为泉域碳汇强度, t·km⁻²·a⁻¹; 其它参数同公式(3)和(4)。

岩溶作用与大气圈、水圈、生物圈是紧密联系的, 对环境变化极其敏感, 呈现协调同步变化的特点, 地下水中 HCO₃⁻ 的浓度与季节性变化、昼夜变化和降水效应相关联, 上述因素会对化验结果带来一定的影响, 因此, 昆明盆地岩溶水化学指标变化幅度较大且不稳定^[29], 为尽可能消除偶然事件带来的影响, 本文主要采用 10 年数据平均值进行计算和讨论。

4 结果和讨论

4.1 计算结果

根据碳酸盐岩化学溶蚀原理, 碳酸盐岩的溶蚀作用是在水和 CO₂ 的共同作用下进行的, 地下水中 HCO₃⁻ 的碳有一半来源大气或者土壤中的 CO₂, 一半来源于碳酸盐岩的溶蚀作用, 即水中 HCO₃⁻ 的浓度反映地下水侵蚀能力强弱, 浓度越高, 侵蚀能力越强, 浓度越低, 侵蚀能力越弱, 因此, 在降水量不变的情况下, 水中 HCO₃⁻ 浓度变化代表了碳酸盐岩风化消耗大气或土壤中 CO₂ 的多少, 即碳酸盐岩风化速度。根据取样化验结果, 40 年来, 白龙潭泉水中 HCO₃⁻ 浓度在 147.17~258.51 mg·L⁻¹ 之间波动, 极不稳定。整

体看, 经历了从缓慢增长到快速增长的变化过程, 1982—2011 年呈缓慢增长趋势, 增加 2.3%; 2012—2021 迅速增长, 增加 14.38%。40 年共增长 17.0%(图 4, 表 2)。蝙蝠洞泉水中 HCO₃⁻ 浓度在 153.77~217.42 mg·L⁻¹ 之间波动, 同样经历了从缓慢增长到快速增长的变化过程, 1982—2011 年呈缓慢增长趋势, 增加 1.3%; 2012—2021 年呈迅速增长趋势, 增加了 6.25%, 40 年共增长 7.6%(图 5, 表 2)。

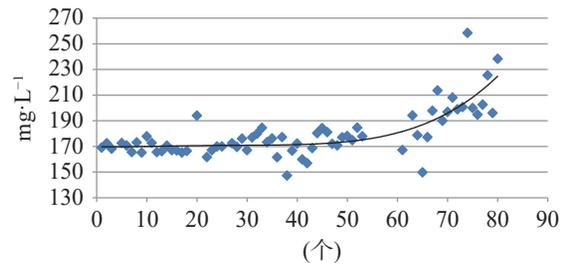


图 4 1982—2021 年白龙潭泉水中 HCO₃⁻ 浓度变化图

Fig. 4 Variations of HCO₃⁻ concentration in spring water from Bailong pool from 1982 to 2021

综上所述, 40 年来昆明盆地碳酸盐岩风化速度不断加快, 两个泉水平均 HCO₃⁻ 浓度提高了 12.30%, 整体增幅约 1/8, 且呈加速上升趋势, 由 0.26% 上升到 10.30%。碳汇强度经历了增加、减少再增加的过程, 整体呈增加态势。以 1982—1991 年为基准年, 两个岩溶泉水碳汇强度平均值为 1992—2001 年增加 12.20%; 2002—2011 年减少 4.85%; 2012—2021 年增加 20.25%, 整体增幅约为 1/5(表 2)。

表 2 岩溶泉水中 HCO₃⁻ 浓度及碳汇强度变化情况一览表

Table 2 Variations of HCO₃⁻ concentration and carbon sink intensity in karst spring water

对比类别划分	年份								整体 变幅	
	1982—1991年		1992—2001年		2002—2011年		2012—2021年			
	数值	变幅	数值	变幅	数值	变幅	数值	变幅		
HCO ₃ ⁻ 浓度 /mg·L ⁻¹	白龙潭	170.48	0.02	170.51	0.02	174.32	2.23	199.38	14.38	17.0
	蝙蝠洞	177.11	0.49	177.98	0.49	179.41	0.80	190.62	6.25	7.6
	平均变幅	0		0.26		1.52		10.3		12.3
碳汇强度 /t·km ⁻² ·a ⁻¹	白龙潭	21.19	11.97	23.73	11.97	20.25	-14.66	26.54	31.07	25.24
	蝙蝠洞	26.44	12.50	29.75	12.50	25.03	-15.86	30.48	21.76	15.26
	平均变幅	0		12.24		-15.26		26.41		20.25
大气CO ₂ 浓度/(×10 ⁻⁶)	348.62	4.25	363.43	4.25	382.64	5.29	404.35	5.67	15.99	
降水/mm	949.5	11.95	1063	11.95	887.3	-16.53	1016.8	14.59	7.09	
气温/℃	14.79	0.88	15.67	0.88	16.13	0.46	16.16	0.03	1.37	

注: 气温变幅为 ℃, 其它参数变化均为 %。

Note: The temperature range is in ℃, while changes in all other parameters are expressed as percentages.

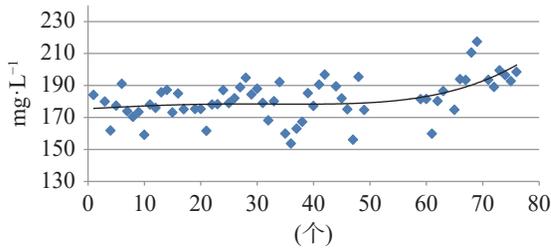


图5 1982—2021年蝙蝠洞泉水中HCO⁻浓度变化图

Fig. 5 Variations of HCO⁻ concentration in spring water from Bianfu cave from 1982 to 2021

4.2 碳酸盐岩岩溶风化碳汇对气候变化的响应

岩溶碳循环主要发生在地球表层系统,属于常温常压下的(生物)地球化学过程,其初始阶段碳酸盐的风化溶解过程以水和二氧化碳为驱动力,其中,CO₂最根本的来源是大气中的CO₂,水最根本的来源是大气降水^[15]。根据碳酸盐岩化学溶蚀原理和公式(5),在其它地质环境条件未有明显变化的前提下,碳酸盐岩化学溶蚀速率与大气中CO₂浓度直接相关,且呈正相关,并受温度等外部环境因素^[30-31],岩溶碳汇强度除受上述因素控制或影响外,还与大气降水呈正相关关系。近年来,大气中CO₂含量持续上升,导致全球气温加速上升和极端气候事件频繁发生,这些变化不断加强碳酸盐岩风化溶解的2个驱动力,这也是碳酸盐岩化学溶解速度加快,岩溶碳汇效应增强的主要原因。

对比5年碳酸盐岩风化速度与温度、降水和大气中CO₂浓度数据发现,碳酸盐岩风化速度仅与大气中CO₂浓度变化态势相似,线形相关性较好,相关系数可达0.63(图6)。1982—2021年,昆明盆地碳酸盐岩风化速度增加率(12.3%)明显低于大气中CO₂浓度增加率(16.0%),也低于1972—2011年大气中CO₂浓度增加率(14.73%),但与1962—2001年间大气中CO₂浓度增加率12.86%基本相当,与法国西南部岩溶洞穴中石笋中记录岩溶碳循环过程对气候事件的响应滞后时间16年较为吻合。说明在降水不变的情况下,碳酸盐岩溶蚀风化速度与大气中CO₂浓度呈正比,溶蚀速率随着大气中CO₂浓度上升而加快,滞后时间约20年。40年来,昆明盆地碳酸盐岩风化碳汇强度变化态势与降水量变化态势基本一致,无明显滞后,前30年变化量基本相当,最后10年增加率(26.41%)高于降水增加率(14.59%),但与大气中CO₂浓度变化态势有较大差异,整体均呈增

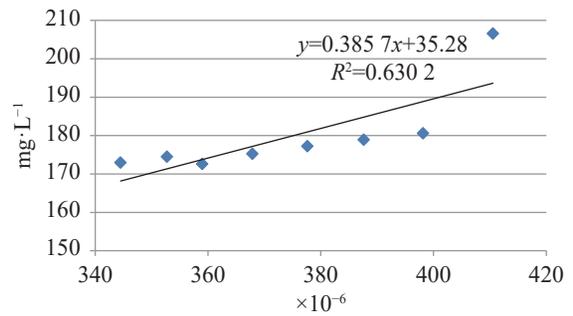


图6 碳酸盐岩风化速度与大气中CO₂浓度变化线性关系图

Fig. 6 Linear relationship between the weathering rate of carbonate rocks and variations in atmospheric CO₂ concentration

加趋势,增加率(20.25%)高于大气中CO₂浓度增加率(16.0%)(图7)。进一步说明岩溶风化碳汇强度对降水变化的迅速响应,无明显滞后,对大气中CO₂浓度变化响应稍有滞后,因此,岩溶碳汇初始阶段溶蚀作用积极响应全球气候变化,属100年内碳汇效应。

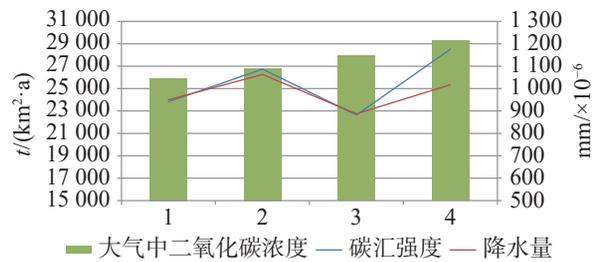


图7 1982—2021年昆明盆地碳酸盐岩风化碳汇强度与降水、大气中CO₂浓度变化趋势对比图

(左侧坐标为碳汇强度,右侧坐标为降水量和大气中CO₂浓度,其中大气中CO₂浓度为3倍实际数值)

Fig. 7 Comparison of carbon sink intensity of carbonate rock weathering, precipitation and variation trends of atmospheric CO₂ concentration in the Kunming basin from 1982 to 2021 (The left axis represents the carbon sink intensity, and the right axis depicts precipitation and atmospheric CO₂ concentration, with the latter being 3 times the actual value.)

4.3 碳酸盐岩风化碳汇对大气中CO₂回收作用

根据公式(3)和(5),1982—2021年,在降水量不变的情况下,岩溶碳汇初始阶段溶蚀作用吸收大气中CO₂质量浓度增加约1/8,滞后时间约为20年。由此类推,自工业革命至2001年,大气中CO₂浓度增加了32.55%,说明自工业革命至2021年,岩溶碳汇初始阶段溶蚀作用吸收大气中CO₂质量浓度增加32.55%,约为1/3,占全球“遗漏汇”的1/9;21世纪末全球CO₂浓度将会达到700×10⁻⁶^[32],岩溶碳汇初始阶段溶蚀作用吸收大气中CO₂质量浓度将比工业革

命前增加约 150%, 因此, 岩溶碳汇在缓解全球气候变暖过程中扮演着重要角色。

5 结 论

(1) 昆明盆地碳酸盐岩风化消耗 CO₂ 质量浓度不断增强, 且呈加速增强趋势。40 年来, CO₂ 质量浓度增长速度由 0.26% 增加 1.52%, 再增加到 10.3%。40 年间共增长 12.3%, 即, 碳酸盐岩风化消耗 CO₂ 质量浓度增加了 1/8; 碳酸盐岩岩石风化碳汇强度经历了增加、减少再增加的过程, 与 1982—1991 年相比, 1992—2001 年平均增加为 12.3%; 2002—2011 年平均减少为 4.85%; 2012—2021 年平均增加为 20.25%, 即碳汇量 40 年增加了 20.25%, 约 1/5。

(2) 岩溶作用对环境变化具有快速响应能力, 属百年内碳汇效应, 碳酸盐岩风化消耗 CO₂ 质量浓度对环境变化敏感, 主要与大气 CO₂ 浓度呈正相关, 滞后时间约 20 年, 变化速率基本相当; 碳酸盐岩风化碳汇强度同样对环境变化敏感, 与降水和大气中 CO₂ 浓度呈正相关, 且主要取决于降水量的变化, 无明显滞后, 同时受大气中 CO₂ 浓度变化影响, 滞后时间 20 年。

(3) 岩溶作用通过溶蚀和风化过程对大气 CO₂ 的吸收具有显著的环境调节功能, 在缓解全球变暖过程中扮演着重要角色, 随着大气中 CO₂ 浓度的进一步升高, 岩溶碳汇的潜力将进一步增强, 这为全球碳平衡和气候变化减缓提供了重要的自然途径。因此, 加强对岩溶碳汇机制的研究和保护, 对于应对全球变暖及实现碳中和目标具有重要意义。

参考文献

- [1] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.
YUAN Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 98-100.
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.
- [3] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 吴永贵. 清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4671-4679.
LYU Jiemei, AN Yanling, WU Qixin, WU Yonggui. Rock weathering characteristics and the atmospheric carbon sink in the chemical weathering processes of Qingshuijiang river basin[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4671-4679.
- [4] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [5] 袁道先. 地球系统的碳循环和资源环境效应[J]. 第四纪研究, 2001, 21(3): 223-232.
YUAN Daoxian. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(3): 223-232.
- [6] 蒋忠诚, 蒋小珍, 雷明堂. 运用 GIS 和溶蚀试验数据估算中国岩溶区大气 CO₂ 的汇[J]. 中国岩溶, 2000, 19(3): 212-217.
JIANG Zhongcheng, JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Estimation of atmospheric CO₂ sink of karst areas in China based on GIS and limestone tablet loss data[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(3): 212-217.
- [7] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报, 2012, 33(4): 129-134.
JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, CAO Jianhua, QIN Xiaoqun, HE Shiyi, ZHANG Cheng. A study of carbon sink capacity of karst processes in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(4): 129-134.
- [8] 蒋忠诚, 章程, 罗为群, 肖琼, 吴泽燕. 我国岩溶地区碳汇研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 345-355.
JIANG Zhongcheng, ZHANG Cheng, LUO Wei-qun, XIAO Qiong, WU Zeyan. Research progress and prospect of carbon sink in karst region of China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 345-355.
- [9] 章程, 汪进良, 肖琼, 等. 岩溶碳循环与流域地球化学过程[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- [10] 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 CO₂ 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 CO₂ sink formed in karst processes of karst divided regions in China' "[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(1): 1-6.
- [11] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 316-324.
JIANG Zhongcheng. Carbon cycle and ecological effects in epikarst systems in Southern China[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 316-324.
- [12] 袁道先, 蒋忠诚. IGCP 379 “岩溶作用与碳循环” 在中国的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2000(1): 49-51.
- [13] 袁道先. “岩溶作用与碳循环” 研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 425-432.
YUAN Daoxian. Progress in the study on karst processes and carbon cycle[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(5): 425-432.
- [14] 李彬, 袁道先. 岩溶区碳循环与大气 CO₂ 的源汇关系: 以贵州岩溶区为例[J]. 中国岩溶, 1996, 15(Suppl.1): 41-49.

- LI Bin, YUAN Daoxian. Relationship between carbon cycle in karst areas and CO₂ source-sink of atmosphere: Case of Guizhou karst[J]. *Carsologica Sinica*, 1996, 15(Suppl.1): 41-49.
- [15] 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 中国西南岩溶碳循环及全球意义[M]. 北京: 测绘出版社, 2023.
- CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, et al. Karst carbon cycle in southwest china and its global significance[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2023.
- [16] 赵丽华, 吴沿友, 谢腾祥, 李海涛. 微藻无机碳利用在岩石风化及碳循环过程中的作用[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(1): 1-18.
- ZHAO Lihua, WU Yanyou, XIE Tengxiang, LI Haitao. Role of carbonic utilization of microalgae on rock weathering and carbon cycle[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(1): 1-18.
- [17] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [18] 袁道先, 覃政教, 黄桂强, 等. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- YUAN Daoxian, QIN Zhengjiao, HUANG Guiqiang, et al. Research on major environmental geological problems and countermeasures in karst mountain area in Southwest China[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003.
- [19] 王宇, 李燕, 谭继中, 等. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- WANG Yu, LI Yan, TAN Jizhong, et al. Storage rule of karst water in fault basin[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003.
- [20] 云南省地质环境监测院. 云南重点岩溶流域水文地质及环境地质调查报告(滇池流域)[R]. 2009.
- [21] 彭淑慧, 王宇, 张贵, 李继红, 李玉辉. 昆明盆地土地利用对岩溶水质的影响[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2011, 36(6): 1-14.
- PENG Shuhui, WANG Yu, ZHANG Gui, LI Jihong, LI Yuhui. Effect of kunming basin land use on karst water quality[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 36(6): 1-14.
- [22] 彭淑慧, 王宇, 张世涛. 昆明岩溶断陷盆地的环境地质问题及治理对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2): 98-103.
- PENG Shuhui, WANG Yu, ZHANG Shitao. The environmental and geological problems and the countermeasures of the karst fault basin in Kunming[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2008, 19(2): 98-103.
- [23] 康晓莉, 周俊蓉, 高瑜, 张华. 昆明盆地地下水水质水位长序列数据特征分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(4): 662-671.
- KANG Xiaoli, ZHOU Junrong, GAO Yu, ZHANG Hua. Characteristics of long series data of groundwater quality and level in Kunming basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(4): 662-671.
- [24] 马骏, 阚丹妤, 沙敏, 尹江, 杨志勇, 王飞, 杨云丽, 宋升治. 滇池流域石漠化地区植被恢复技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(33): 11782-11783, 11807.
- MA Jun, KAN Danyu, SHA Min, YIN Jiang, YANG Zhiyong, WANG Fei, YANG Yunli, SONG Shengzhi. Study on rocky areas vegetation restoration techniques in Dianchi lake basin[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(33): 11782-11783, 11807.
- [25] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何绕生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shuhui, HE Raosheng, ZHOU Cuiqiong. Zoning of environmental geology and functions in karst fault-depression basins[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 283-295.
- [26] 阎坤. 60年来大气二氧化碳浓度数据的趋势方程研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(5): 1665-1670.
- YAN Kun. Research on tendency equation about the concentration data of carbon dioxide in the atmosphere over the past 60 years[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(5): 1665-1670.
- [27] 郝晓阳, 叶文, 吴利华. 1951~2013年昆明市气温变化特征分析[J]. *绿色科技*, 2015(4): 10-12.
- HAO Xiaoyang, YE Wen, WU Lihua. Characteristics and analysis of temperature in Kunming during 1951-2013[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2015(4): 10-12.
- [28] 潘娅婷, 杨靖新, 李晓鹏, 杨芳园, 邹灵宇. 近70年昆明市气温变化与城市化影响研究[J]. *环境科学导刊*, 2019, 38(2): 29-35.
- PAN Yating, YANG Jingxin, LI Xiaopeng, YANG Fangyuan, ZOU Lingyu. Research on the impacts of the changes of temperature and urbanization in nearly 70 years in Kunming[J]. *Environmental Science Survey*, 2019, 38(2): 29-35.
- [29] 张英华. 昆明盆地岩溶地下水水化学特征研究: 以黑龙潭泉和海源寺泉为例[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
- ZHANG Yinghua. Hydrochemical characteristics of karst groundwater in Kunming basin: A case study of Heilongtan spring and Haiyuansispring[D]. Kunming: Yunnan University, 2013.
- [30] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义[J]. *地质论评*, 2000, 46(3): 324-327.
- LIU Zaihua, YUAN Daoxian. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance[J]. *Geological Review*, 2000, 46(3): 324-327.
- [31] 任美镠, 刘振中, 王飞燕, 等. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
- [32] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 苗鸿. 全球碳循环中的失汇及其形成原因[J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 94-103.
- WANG Xiaoke, BAI Yanying, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong. Missing sink in global carbon cycle and its causes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 94-103.

Response of carbonate weathering and dissolution processes in the Kunming basin to changes in atmospheric CO₂ concentration over the past 40 years

YANG Xiaoyan^{1,2,3}, REN Shichuan^{1,2,3}, TIAN Wenrui^{1,2,3}, MA Nengwei^{1,2,3},
SONG Zenghong^{1,2,3}, LI Guorui^{1,2,3}, ZHANG Gaoyin^{1,2,3}

(1. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China;

2. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216,

China; 3. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China)

Abstract The carbon cycle of the Earth's system coexists with global climate change. Carbon circulates in different forms between different reservoirs, with carbonate rocks actively participating in the global carbon cycling through karst processes. The recovered CO₂ accounts for about one-third of the "missing sink", making it an important link between the atmosphere and the sink of CO₂. Currently, the dynamic studies on the karst carbon cycling are mainly focused on short time scales such as daily, monthly, seasonal, and annual dynamics, as well as the effects of precipitation. These studies suggest that karst processes are extremely sensitive to environmental changes and are basically synchronized with various climate changes (such as precipitation and temperature) and biological activities, with no significant lag observed. The long-term dynamic changes and responses to climate change are mainly based on carbon isotope records in stalagmites. These records indicate that the changes in carbon content within stalagmites lag behind alterations in atmospheric CO₂ concentration by 16 years. Although the IPCC's AR5 and AR6 reports acknowledge the important role of karst carbon sink in sequestering atmospheric CO₂, they classify the carbon sink associated with carbonate rock weathering (karst action) as a long-term carbon sink with a time scale of 10³–10⁴ years. Furthermore, this process has not been incorporated into the global carbon budget. There is considerable controversy surrounding the timescale of karst carbon sink. Consequently, the long-term dynamics of carbonate weathering, carbon sink, and their responses to climate change necessitate further in-depth research.

The outcropping area of carbonate rocks in the karst area of Southwest China covers 540,000 km², encompassing three major geomorphic units of the country. This area represents the largest contiguous distribution of exposed carbonate rocks in the world. It benefits from favorable water and heat conditions, along with intense karst processes, which contribute to significant carbon sink effects. The Kunming basin is a water-collecting karst graben basin, with a catchment area of 2,924.5 km². The outcropping area of carbonate rock layers accounts for about 32% of the total basin area. Karst water in the basin is characterized by abundant amount, concentrated storage, and good water quality. Meanwhile, Kunming, as the capital city of Yunnan Province, has a developed socio-economy. Groundwater monitoring in the area began early and has resulted in a substantial accumulation of foundational data. However, research on karst carbon sink remains relatively underdeveloped. Based on the long-term observation data of karst springs in the Kunming basin, this paper analyzes and calculates the changes in atmospheric CO₂ concentration, climate indicators (temperature and precipitation), and data on spring water quality. The response of carbonate weathering to fluctuations in atmospheric CO₂ concentration and climate change over the past 40 years, along with its carbon sink effect and contribution to CO₂ emission reduction is preliminarily evaluated. The results show that the CO₂ consumption rate by carbonate weathering is positively correlated with atmospheric CO₂ concentration, exhibiting a lag time of about 20 years, and the rate of change is basically the same. The variations in carbon sink intensity are mainly controlled by changes in precipitation, with no obvious lag time, while also being affected by changes in atmospheric CO₂ concentration, with a lag of 20 years. The research findings indicate that the increase in atmospheric CO₂ concentration will enhance the dissolution of carbonate rocks, allowing more CO₂ to be sequestered from the atmosphere. This process plays an important role in mitigating global warming. These findings are significant for accurately evaluating the intensity of karst carbon sink, incorporating karst carbon sink into global carbon accounting, addressing the "missing sink" problem, and promoting the achievement of the "dual carbon" goals.

Key words carbon dioxide, karst in Southwest China, the Kunming basin, carbonate weathering and carbon sink, response to change

(编辑 张玲)