

张小琴, 罗维均, 王彦伟, 等. 岩溶试片的岩性差异对估算岩溶速率和碳通量的影响[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 477-487.

DOI: [10.11932/karst20220314](https://doi.org/10.11932/karst20220314)

岩溶试片的岩性差异对估算岩溶速率和碳通量的影响

张小琴^{1,2}, 罗维均^{1,3,4}, 王彦伟^{1,3}, 蔡先立^{1,2,3}, 吕伊娜^{1,3}, 王世杰^{1,3}

(1. 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, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100;
4. 贵州省高校乡村振兴研究中心, 贵州 安顺 561000)

摘要: 研究岩性差异对溶蚀速率的影响有助于提高溶蚀试片法估算岩溶碳汇强度的精确度。本文以贵州省普定县为研究区, 将埋放地的主要基岩类型(石灰岩与白云岩)制成标准尺寸的试片, 并将其埋设于不同土地利用类型和土壤深度下, 经过 4 个水文年的监测后将估算的结果与前人在同一区域使用标准溶蚀试片的研究结果进行对比分析, 结果表明: (1) 在相同气候和土壤环境条件下, 岩性对溶蚀试片的溶蚀速率有显著影响, 且溶蚀速率与岩石中 CaO 含量呈正相关关系, 与 MgO 含量呈负相关关系; (2) 石灰岩与白云岩试片溶蚀速率的差异程度受土地利用及埋放深度的调控, 整体上石灰岩溶蚀速率比白云岩溶蚀速率大 14%; (3) 不同岩性试片估算的岩溶碳汇强度相差较大, 标准溶蚀试片估算的结果比埋放地基岩试片估算的结果高。故使用溶蚀试片法估算区域岩溶碳通量时应考虑埋放地基岩的岩性, 或者对基于标准溶蚀试片的估算结果进行校正, 才能准确反映区域尺度真实的岩溶碳通量大小。

关键词: 白云岩; 石灰岩; 岩溶试片法; 溶蚀速率; 岩溶碳通量

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)03-0477-11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

0 引言

自工业革命以来, 化石燃料燃烧及土地利用变化等人类活动使得大气中 CO₂ 浓度剧增, 从 1750 年的 277×10^{-6} 上升到 2021 年的 416.87×10^{-6} ^[1]。人类活动的碳排放 40% 直接增加了大气中的 CO₂ 浓度, 30% 被海洋所吸收, 还有 10% 左右的剩余部分被称为遗失碳汇, 可能分布在陆地生态系统中^[2-3]。而陆地生态系统组成十分复杂, 确定具体的碳汇分布难度较大, 特别是在喀斯特地区, 地表的二维三元结构使得碳循环路径更多、过程更为复杂, 碳循环的研究

需考虑水—岩—土—气—生 5 个子系统^[4]。近来的很多研究表明, 碳酸盐岩的化学风化过程将在短期和长期产生碳汇^[5-6]。20 世纪 90 年代, 科学家利用石灰岩溶蚀试片法、水化学法和扩散边界层理论估算出全球范围内岩溶作用每年的碳回收量为 0.22~0.608 Pg C, 约占未知碳汇的 1/3^[7]。随着研究的加深, 发现碳酸盐岩溶解的无机碳可在水循环的参与下与水生生物光合作用产生联系^[7-9], 并且得出该过程的碳汇强度为 0.5 Pg C·a⁻¹, 约占陆地遗漏碳汇的 50%^[10]。这些研究为全球碳循环研究提供了理论补充, 表明对岩溶碳通量的研究不容忽视^[11-12]。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(XDB400202001); 国家自然科学基金项目(41673121); 贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648); 贵州省省级科技计划项目资助(黔科合基础-ZK[2022]-564)

第一作者简介: 张小琴(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事喀斯特碳循环研究。E-mail: zhangxiaoqin@mail.gyig.ac.cn。

通信作者: 罗维均(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为喀斯特关键带物质循环。E-mail: luoweijun@vip.gyig.ac.cn。

收稿日期: 2022-02-20

在定量评估岩溶作用速率及其碳汇强度的研究中,标准溶蚀试片法是最简单且常用的。在中国,标准溶蚀试片为采自桂林泥盆系融县组纯的石灰岩,经加工制成标准尺寸的岩石试片(圆饼形,直径40 mm,厚3 mm),将其放置于空气中、土壤表面或地下不同深度(-5 cm、-20 cm、-50 cm),一定时间内取回称重计算其溶蚀量^[13],并采用以点带面的方式,直接计算区域内的溶蚀速率,从而简化了因碳酸盐岩种类太多带来的复杂计算^[14]。自20世纪90年代,学者通过埋放标准溶蚀试片进行溶蚀实验,研究土壤水、CO₂、有机质、微生物等环境因素对碳酸盐岩溶蚀速率的影响^[15-19],并估算区域内岩溶碳汇强度^[20-23]。但是,由于喀斯特地区地质背景具有高度的异质性,如果均使用标准溶蚀试片(取自桂林泥盆系的石灰岩)来研究岩溶碳汇效应,会产生较大的误差^[24-25]。基于此,本文以中国贵州省普定县为研究区,选择当地基岩(石灰岩与白云岩)制成与标准试片形状和大小相同的试片,并参考标准试片的野外试验方法进行埋设,经过四个水文年的试片收集和称重,对该区不同土地利用类型的岩溶作用速率及岩溶碳汇强度进行估算,通过与标准溶蚀试片的相关研究进行对比分析,并探讨差异形成原因,为准确估算喀斯特地区的碳汇量提供科学依据。

1 研究区概况

普定县位于贵州省中偏西部($105^{\circ}27'49''E$ ~ $105^{\circ}58'51''E$, $26^{\circ}26'36''N$ ~ $26^{\circ}31'42''N$),海拔1 100~1 600 m。属于亚热带季风湿润气候。试验期间年均气温16.1 ℃,日最高温度29 ℃,最低温度-0.4 ℃,年平均降水量在1 079.3到1 457.7 mm。普定县为高原丘陵、山地地形,县域地势为中间低南北高,主要为峰丛、溶洞、暗河、洼地等喀斯特地貌。县域碳酸盐岩地层出露面积约占总面积的84.27%,主要为石炭系、二叠系、三叠系,其中以三叠系出露面积最大,约占60.7%。全县土壤种类较多,主要为石灰土、黄壤、水稻土、山地黄棕壤、山地灌丛草甸土等,其中,石灰土占比最大,约为63.7%。普定县境内代表性植被为常绿栎林、常绿落叶混交林和马尾松林,灌丛和草地主要为藤刺灌丛、火棘、白茅、青蒿等植物^[26]。

研究区位于普定县马官镇北部的天龙山($26^{\circ}14'40''N$, $105^{\circ}45'45''E$)和白岩镇东部的讲义村

($26^{\circ}15'57''N$, $105^{\circ}50'26''E$)(图1)。天龙山区域为喀斯特峰丛洼地地貌,基岩为三叠系关岭组中段(T_2g^2),岩性主要是薄层至中厚灰岩、泥灰岩^[27],土壤类型为黑色石灰土,土层较薄,地面平均岩石裸露率为44.7%,土被不连续^[28],山体陡峭,森林植被保存较好,主要以圆果化香树、云南鼠刺、窄叶石栎为优势种的常绿落叶阔叶混交林^[29];农田以水田和旱地为主,主要种植水稻、玉米和油菜。讲义村区域的基岩为三叠系关岭组上段(T_2g^3),岩性主要为紫红色微晶白云岩^[27],土壤类型为黑色石灰土,土被不连续,土层厚度在10~50 cm。次生林地以椤木石楠为优势种的常绿落叶混交林,山体草甸主要的植物为白茅,水田交替种植水稻和油菜,旱地种植玉米和蔬菜。

2 研究方法

将研究区的基岩加工制成标准尺寸的溶蚀试片,选取典型的土地利用类型(次生林地、灌丛、草地、旱地、水田),每个土地利用类型设置一个埋放点,埋放深度为地下5 cm、20 cm、50 cm,每层埋放4组试片,每组为一片白云岩(讲义村基岩)和一片石灰岩(天龙山基岩)。试片于2016年12月进行埋放,后期每年取出一组测定其溶蚀量。埋放点概况如表1,土壤剖面如图2和图3。

每片试片埋放前用纯净水洗净并烘干,称重两次取平均值,记录下初始重量 W_1 ;埋放后取出时再用纯净水洗净,放入105 ℃的烘箱烘干24 h,再次称重两次取平均值 W_2 。称重精度为0.01 mg。计算试片日均溶蚀速率^[13, 30]:

$$ER = (W_1 - W_2) \times 10000 / (T \times S) \quad (1)$$

式中: ER 为日均单位面积溶蚀量,即溶蚀速率($mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); W_1 为试片初始重量(mg); W_2 为试片埋放后重量(mg); T 为埋放天数(d); S 为试片表面积(约 $28.91 cm^2$)。采用以下公式计算两地不同土地利用下的岩溶碳汇强度:

$$F = ER \times 365 \times 10^{-3} \times R \times M_1 / M_2 \quad (2)$$

$$F = ER \times 365 \times 10^{-3} \times R \times 2M_1 / M_2 \quad (3)$$

公式(2)为天龙山(石灰岩区)岩溶碳汇强度计算公式,公式(3)为讲义(白云岩区)岩溶碳汇强度计算公式。式中, F 为碳汇强度,单位是 $tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$; ER 为岩石试片的日单位面积溶蚀量,单位是 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; R 为岩石试片的碳酸盐岩纯度; M_1 为

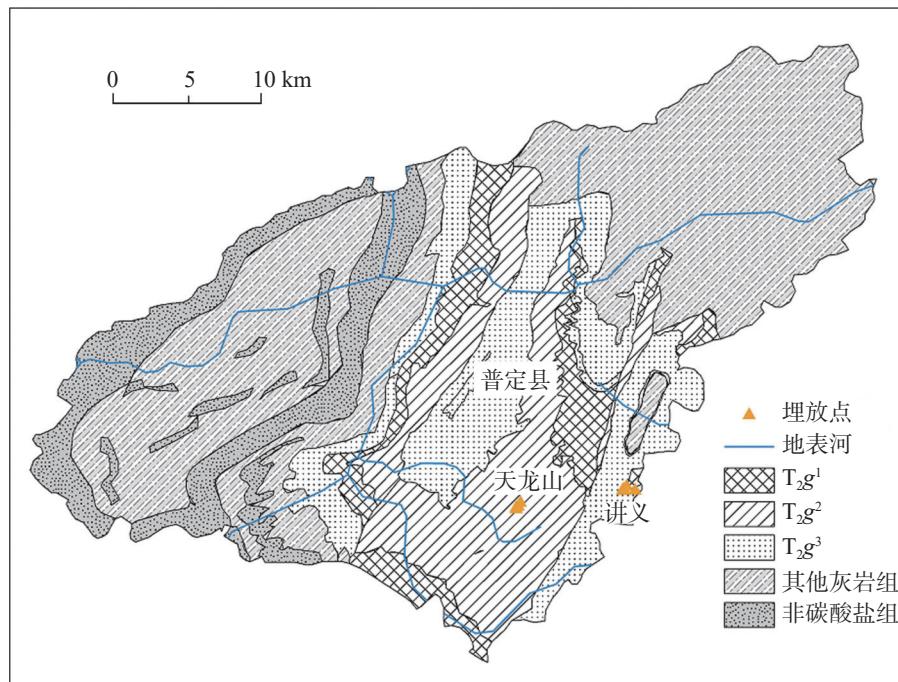
图 1 研究区及试片埋放位置图^[27]

Fig. 1 Map of study area and buried sites of rock tablet

表 1 不同土地利用类型埋放点概况

Table 1 Overview of buried sites of different land use types

地点	土地利用类型	土壤剖面基本情况	位置及其他
次生林 天龙山	次生林	A层为25 cm黑色石灰土, 碎石比30%, B层为黄土未见底	半山腰处
	灌丛	碎石比4%, 草根发达, A层为18 cm黑色石灰土, B层为黄色土壤, 不见底	山脚处, 土壤疏松度低
	水田	A层38 cm黑色石灰土, B层为黄色土, 未见底	洼地, 南部为峰丛, 水稻交替种植, 夏季长时间处于淹水状态
灌丛 讲义村	旱地	A层为40 cm为黑色石灰土, B层为黄色土未见底	洼地, 四周为峰丛, 种植玉米及蔬菜, 人为干扰较多
	次生林	A层35 cm, 为黑色石灰土, 根系发达, B层未见底	山腰处, 植被丰富, 枯枝落叶多
	灌丛	碎石比20%; A层21 cm, 黑色石灰土, B层黄色土壤, 未见底	山脚处, 土壤疏松度低
讲义村	草地	碎石比50%, A层20~30 cm黑色石灰土, 根系发达, B层厚度10~15 cm, 以下为基岩	山坡草地上, 土壤疏松度低
	旱地	A层5~20 cm, 为黑色石灰土; B层为黄色土壤, 未见底	山下洼地处, 种植玉米及蔬菜, 人为干扰较多
	水田	A层43 cm, 为黑色石灰土, 以下为黄色土壤	山下洼地处, 油菜地、水稻交替种植, 夏季长时间处于淹水状态

CO_2 的分子量 44; M_2 为石灰岩试片岩石成分 CaCO_3 的分子量 100 或白云岩试片岩石成分 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 的分子量 184。

3 结 果

3.1 不同土地利用类型及不同层位的溶蚀速率

将天龙山和讲义村两埋放地 4 年内回收的全部

试片计算日均溶蚀速率, 并取平均值得到表 2。

从表 2 可以得出不同土地利用类型不同层位试片的溶蚀速率特征如下:

(1) 不同土地利用类型地下 0~50 cm 范围内, 天龙山石灰岩试片的平均溶蚀速率为水田 (138.85 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)>旱地 (136.60 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)>次生林 (49.19 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), 白云岩试片的溶蚀速率为旱地 (110.79 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)>水田 (102.70 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)>灌丛 (66.83

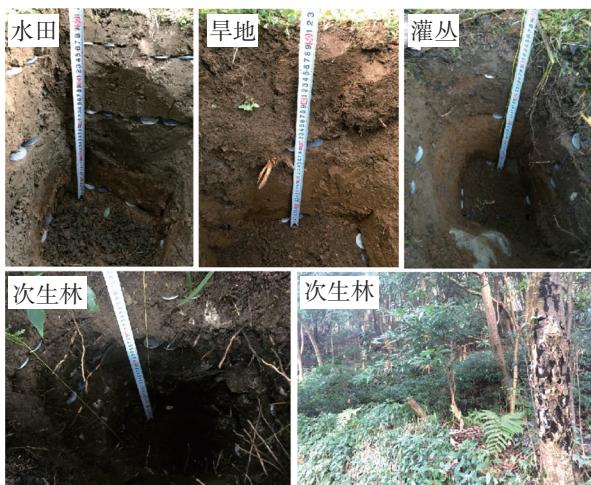


图2 天龙山不同土地利用类型土壤剖面

Fig. 2 Soil profiles of different land use types in Tianlong mountain

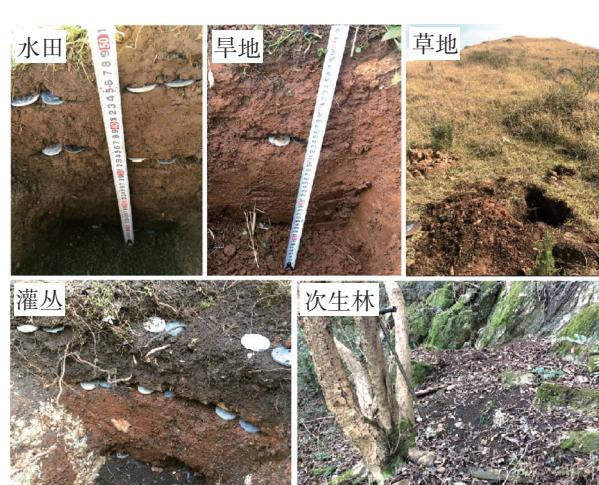


图3 讲义村不同土地利用类型土壤剖面

Fig. 3 Soil profiles of different land use types in Jiangyi

表2 不同土地利用下不同深度的试片日均溶蚀速率

Table 2 Daily average dissolution rate of rock tablets at different soil depths under different land uses

地点	试片岩性	埋放深度/cm	次生林	灌丛	草地	旱地	水田
天龙山	石灰岩日均溶蚀速率 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	地下5	119.94	138.69	—	106.84	186.99
		地下20	18.91	—	—	171.64	159.80
		地下50	8.73	—	—	131.32	69.75
		平均值	49.19	—	—	136.60	138.85
	白云岩日均溶蚀速率 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	地下5	55.09	101.91	—	79.12	144.75
		地下20	17.05	56.46	—	143.21	125.42
		地下50	3.95	42.12	—	110.05	37.92
		平均值	25.36	66.83	—	110.79	102.70
讲义村	石灰岩日均溶蚀速率 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	地下5	35.25	28.44	69.28	63.08	110.13
		地下20	35.93	21.79	46.11	114.19	121.32
		地下50	44.04	20.31	30.63	85.90	136.47
		平均值	38.41	23.51	48.68	87.72	122.64
	白云岩日均溶蚀速率 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	地下5	15.80	12.65	37.09	43.54	78.91
		地下20	14.63	11.37	18.42	67.71	87.43
		地下50	19.65	6.95	7.83	56.15	110.54
		平均值	16.69	10.33	21.11	55.80	92.29

注: 溶蚀速率为4年内试片日均溶蚀速率的平均值; —为试片缺失。

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)>次生林 ($25.36 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。总体来看, 天龙山两种岩性试片的溶蚀速率都表现为水田和旱地的溶蚀速率最大, 次生林的溶蚀速率最小。讲义村两种岩性试片的溶蚀速率表现为水田>旱地>草地>次生林>灌丛, 但不同土地利用类型的溶蚀速率差异较明显。

(2) 相同土地利用类型、不同层位两种试片的溶蚀速率差异较大, 规律不一。具体表现为: 在天龙山, 不同埋放深度下, 埋放在次生林和水田的石

灰岩和白云岩试片都表现为地下 5 cm 处溶蚀速率最大, 地下 20 cm 次之, 地下 50 cm 处最小; 埋放在旱地的石灰岩和白云岩试片则表现为地下 20 cm 处溶蚀速率最大, 地下 50 cm 处次之, 最小为地下 5 cm 处。其中, 石灰岩和白云岩试片溶蚀速率最大值都出现在水田地下 5 cm 处, 分别为 $186.99 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $144.75 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 最小值出现在次生林地下 50 cm 处, 分别为 $8.73 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $3.95 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在讲义村各埋试点, 埋放在灌丛和草地的石灰岩和白云

岩试片的溶蚀速率都呈现出随埋深增加逐渐减小的趋势;而埋放在水田中的两种试片的溶蚀速率都表现出随埋深增加逐渐增大;旱地里两种试片的溶蚀速率在地下 20 cm 处最大,地下 50 cm 处次之,地下 5 cm 处最小;埋放在次生林中石灰岩和白云岩试片的溶蚀速率与埋放深度的关系不大。在讲义村,两种试片的溶蚀速率最大出现在水田地下 50 cm 处,最小出现在灌丛的地下 50 cm 处。

(3)天龙山和讲义村各土地利用类型及各埋放深度,都表现出石灰岩试片的溶蚀速率比白云岩试片的溶蚀速率高。天龙山次生林地下 5 cm 处石灰岩试片比白云岩试片溶蚀速率大 $65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,埋深在地下 20 cm 和 50 cm 处两种试片的溶蚀速率差异不大;在灌丛中,地下 5 cm 处石灰岩试片比白云岩试片溶蚀速率大 $36.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;在水田和旱地中,两种试片的溶蚀速率差异较稳定,在 $25 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。在讲义村,埋在旱地土壤下 20 cm 处石灰岩试片溶蚀速率比白云岩试片溶蚀速率大 $47 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,除此之外,其他土地利用类型石灰岩和白云岩试片的溶蚀速率差异都稳定在 $10 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。

3.2 环境条件对不同岩性试片溶蚀速率的调控作用

3.2.1 石灰岩与白云岩溶蚀速率关系

对研究区 4 年内所有的白云岩与石灰岩试片的日均溶蚀速率进行相关性分析(图 4)发现,绝大部分的点分布在 $y=x$ 线上方, $K>1$ ($K=$ 石灰岩溶蚀速率/白云岩溶蚀速率),即石灰岩试片的溶蚀速率整体大于白云岩试片的溶蚀速率,统计分析结果得出,石灰岩

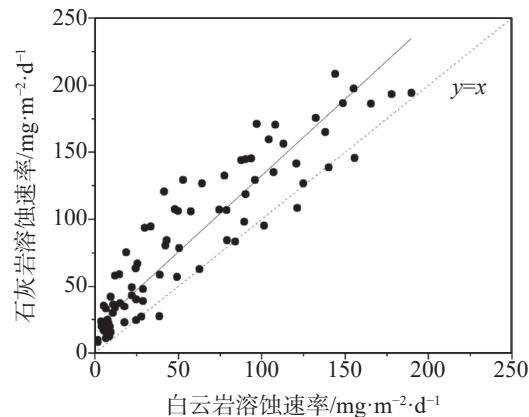


图 4 石灰岩试片与白云岩试片溶蚀速率关系

Fig. 4 Relationship between dissolution rates of limestone and dolomite rock tablets

溶蚀速率比白云岩溶蚀速率大 14% 左右,相关性系数为 0.85。

3.2.2 土地利用类型与溶蚀速率的关系

将 4 年内的试片日均溶蚀速率的平均值(表 2)按土地利用类型进行划分,对 3 个土壤深度下石灰岩与白云岩试片的溶蚀速率进行相关性分析(图 5),在石灰岩溶蚀速率大于白云岩溶蚀速率的基础上($K>1$),同一土地利用类型的 3 个埋放深度的 K 值不一致,即 3 个埋放深度的石灰岩与白云岩溶蚀速率差异程度不同,3 个点趋势线的斜率越接近 1,说明该土地利用类型下 3 个埋放深度对石灰岩与白云岩溶蚀速率差异的影响越小。天龙山的次生林、旱地和水田 3 个埋放点趋势线的斜率分别为 2.28、1.01 和 1.08,讲义村的旱地、次生林、草地、灌丛、水田 3 个埋放点趋势线的斜率分别为 2.11、1.78、1.31、1.14、0.80。

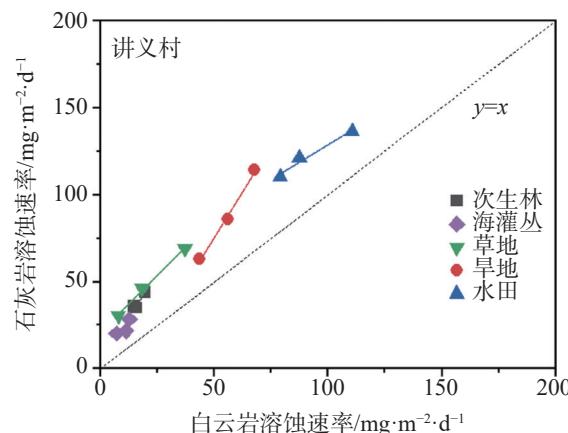
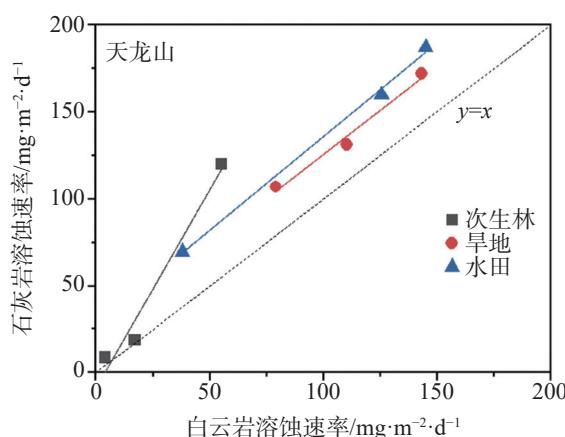


图 5 不同土地利用类型下石灰岩与白云岩试片溶蚀速率关系

Fig. 5 Relationship between dissolution rate of limestone and dolomite rock tablets under different land use types

3.2.3 土壤埋放深度与溶蚀速率的关系

同理,将4年内的试片日均溶蚀速率的平均值(表2)按埋放深度进行分类,对研究区全部土地利用类型的石灰岩与白云岩试片的溶蚀速率进行相关性分析(图6),在石灰岩溶蚀速率大于白云岩溶蚀速率的基础上($K>1$),同一埋放深度下,不同土地利用类

型的K值不一致,埋放点趋势线斜率越接近1,说明研究区内不同土地利用类型对石灰岩与白云岩溶蚀速率的影响越小。天龙山的土壤下5 cm、20 cm、50 cm处理放点趋势线的斜率分别为0.84、1.24、1.11,讲义村的土壤下5 cm、20 cm、50 cm处理放点趋势线的斜率分别为1.20、1.30、1.08。

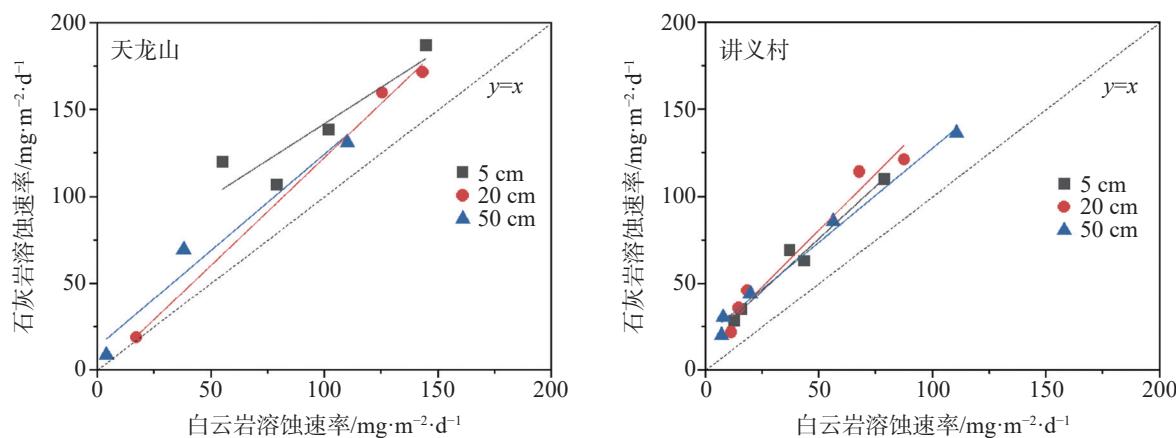


图6 不同土壤深度条件下石灰岩与白云岩试片溶蚀速率关系

Fig. 6 Relationship between dissolution rate of limestone and dolomite rock tablets at different soil depths

3.3 岩溶碳汇强度估算

3.3.1 埋放地的岩溶碳汇强度

本研究在天龙山和讲义村均使用了石灰岩和白云岩两种岩性试片,天龙山基岩为石灰岩,讲义村基岩为白云岩,根据天龙山各土地利用类型下的石灰岩试片的平均溶蚀速率及其主要化学成分(表3),由公式(2)计算出天龙山不同土地利用类型的岩溶碳

汇强度。同理,由公式(3)计算出讲义村不同土地利用类型的岩溶碳汇强度(表4)。

3.3.2 不同岩性试片碳汇估算对比

本研究中,同一埋放点埋放的两种岩性试片其溶蚀速率差异显著,根据公式(2)和(3)计算得出天龙山各土地利用类型地下50 cm处两种试片对应的岩溶碳汇强度(表5),次生林、旱地和水田下石灰

表3 不同岩石试片主要化学成分

Table 3 Main chemical components of different rock tablets

岩性	组分/%					
	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂
石灰岩	6.56	47.10	2.26	0.457	0.034	41.58
白云岩	1.26	30.14	21.40	<0.01	0.023	46.41
标准溶蚀试片 ^[31]	-	55.61	0.16	-	-	-

表4 不同土地利用类型地下平均岩溶碳汇强度

Table 4 Average karst carbon sink intensity under different land use types

地点	项目	次生林	灌丛	草地	旱地	水田
天龙山	试片溶蚀速率/mg·m⁻²·d⁻¹	49.19	-	-	136.60	138.85
	岩溶碳汇强度/tCO ₂ ·km⁻²·a⁻¹	7.47	-	-	20.73	21.07
讲义村	试片溶蚀速率/mg·m⁻²·d⁻¹	16.69	10.33	21.11	55.80	92.29
	岩溶碳汇强度/tCO ₂ ·km⁻²·a⁻¹	2.84	1.75	3.40	9.48	15.68

表 5 地下 50 cm 处不同岩性试片估算的岩溶碳汇强度

Table 5 Karst carbon sink intensity at 50 cm underground estimated by different lithology rock tablets

岩性	不同土地利用类型岩溶碳汇强度/ $tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$			
	次生林	灌丛	旱地	水田
石灰岩	1.33	—	19.93	10.59
白云岩	0.68	7.15	18.69	6.44
标准溶蚀试片	—	2.60	22.49	13.02

岩试片的岩溶碳汇强度分别为 $1.33 tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 、 $19.93 tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 、 $10.59 tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$, 均大于白云岩试片估算的结果。曾成等^[17]在普定县陈旗村使用标准溶蚀试片(采自广西桂林七星岩上泥盆统融县组)的研究结果表明: 旱地和水田的地下 50 cm 处的岩溶碳汇强度分别为 $22.49 tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot d^{-1}$ 和 $13.02 tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$, 均高于本研究的石灰岩试片和白云岩试片的估算结果, 灌丛的岩溶碳汇为 $2.60 tCO_2 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$, 比本研究白云岩试片估算的结果低。可见在环境条件相同时, 试片岩性的差异会造成岩溶碳汇强度估算的差异, 总体上标准试片法估算的结果较大。

4 讨 论

岩溶作用是 CO_2 溶于水形成弱酸溶液溶解可溶性岩石的化学溶蚀过程, 因此试片的溶蚀作用强度直接受土壤环境中水份含量和 CO_2 浓度影响。此外, 有研究认为试片的溶蚀作用还受到土壤有机质含量、植被状况以及土壤微生物含量等因素的影响。土壤有机质含量越高时, 土壤 pH 越低, 越容易使试片溶蚀^[17]; 植物根系分泌的有机酸可降低土壤 pH 以及提高土壤碳酸酐酶活性, 从而促进岩石化学风化^[33]; 土壤微生物的活性和多样性也可加速碳酸钙类岩石的溶蚀^[32]。另外, 土壤中的碳酸盐岩角砾会与降雨后下渗的土壤水发生溶蚀反应, 从而削弱了继续下渗的土壤水的溶蚀能力, 使深部的溶蚀试片的溶蚀量减少。本研究中, 次生林、灌丛、水田、旱地和草地的土壤水分含量、土壤孔隙度、植被状况、凋落物含量以及各埋放点土壤的碎石比均存在较大差异(表 1), 故同一岩性的试片在不同土地利用类型下溶蚀速率差异显著。

在相同环境条件下, 不同岩性岩石的矿物组成和结构决定了自身的溶蚀速率^[33]。研究区内的基岩主要由方解石($CaCO_3$)和白云石($CaMg(CO_3)_2$)两种矿物组成, 两种矿物晶体结构不同, 因此其溶蚀作用也存在一定差异。石灰岩的主要矿物成分为方解石,

白云岩则为白云石。在溶蚀过程中, 石灰岩沿分散孤立的晶间空隙溶蚀, 形成很多溶蚀坑, 白云岩则沿节理裂隙进行溶蚀, 使裂隙不断扩大而崩解^[34]。一般情况下, 碳酸盐岩类型的溶蚀比为: 石灰岩>云灰岩>泥质云灰岩>大理岩>泥质灰岩>灰云岩>泥质灰云岩>白云岩>泥质白云岩^[35]。本研究中, 石灰岩和白云岩试片的主要化学成分如表 3, 结合曾成等^[22]在普定县使用标准溶蚀试片的试验结果, 将试片的化学成分与其溶蚀速率进行相关性分析, 得出在水田和旱地两种土地利用类型下, 岩石溶蚀速率与 CaO 含量呈正相关, 与 MgO 含量呈现负相关, 相关性系数均大于 0.90(图 7), 且水田和旱地的地下试片溶蚀速率受 MgO 、 CaO 含量影响的程度不同, 这可能与两种土地利用类型的土壤环境有关。

不同土地利用类型及不同土壤深度下, 石灰岩与白云岩溶蚀速率的比值不同, 其原因除与试片岩性有关外, 还与试片埋放点的土壤环境有关, 是各因素的共同作用的最终结果。同一土地利用类型, 在不同深度下, 试片的溶蚀速率主要受不同深度土壤环境条件的影响, 从图 5 分析得出, 在天龙山, 地下埋放深度对埋放在水田和旱地的石灰岩与白云岩试片溶蚀速率差异程度的影响较小, 对埋放在次生林下的影响相对较大; 而在讲义村, 埋放深度对草地下石灰岩与白云岩试片溶蚀速率差异程度的影响较小, 而对旱地和次生林下的试片影响相对较大。同理, 在同一区域的相同土壤深度下, 受不同土地利用类型的土壤环境条件的影响, 石灰岩与白云岩的溶蚀速率差异程度相差较大, 从图 6 分析得出, 研究区内地下 5 cm 和 20 cm 处土地利用类型对石灰岩与白云岩溶蚀速率差异程度的影响较大, 50 cm 处的最小。总之, 影响试片溶蚀速率的主要因素是水和 CO_2 的含量及其与岩石的接触面积, 当反应条件已达到充分时, 溶蚀速率就主要由岩性来决定。

使用溶蚀试片法估算的岩溶碳汇强度是在已知试片溶蚀速率的基础上进行的, 岩溶碳汇强度与溶

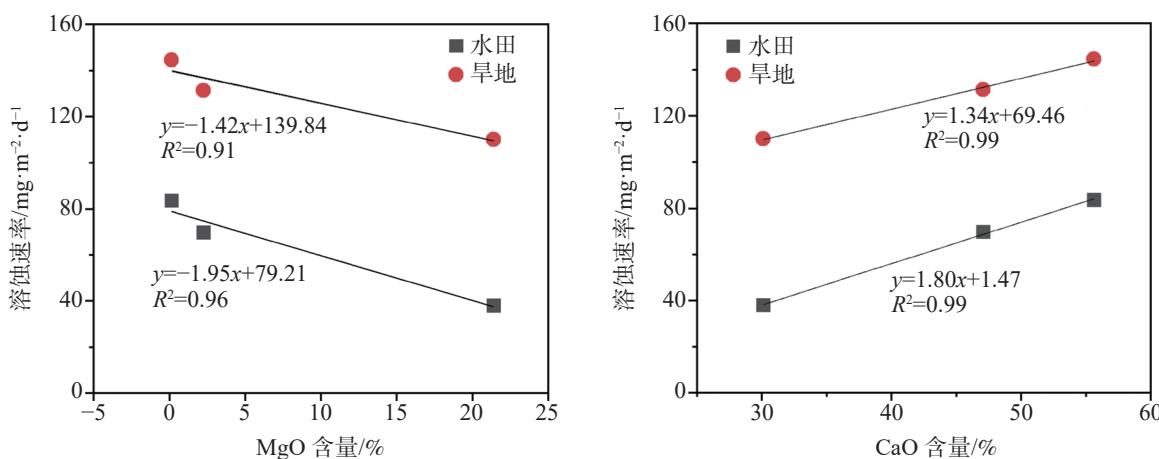


图 7 溶蚀速率与岩石试片化学成分含量的关系

Fig. 7 Relation between dissolution rate and chemical composition content of rock tablets

蚀速率两者有一定的正相关性,但相关程度受碳酸盐岩纯度的影响。根据表 5 得出在水田和旱地下,标准溶蚀试片法估算的岩溶碳汇强度比本研究采用的石灰岩与白云岩试片估算的岩溶碳汇强度都大,本研究石灰岩试片的岩溶碳汇强度又比白云岩的岩溶碳汇强度大,结合三种试片的化学成分(表 3)认为,岩性差异是导致相同土地利用类型下岩溶碳汇强度差异的主要原因。这和黄奇波等^[22]在山西吕梁山岩溶流域的研究结果一致,使用当地岩性的试片估算的岩溶碳汇强度($1.738 \text{ tCO}_2 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)明显低于标准试片的计算结果($1.821 \text{ tCO}_2 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。而与水化学法相比,多项研究表明,采用溶蚀试片法估算得出的岩溶碳汇强度比采用水化学法计算的结果要低,仅为水化学法计算结果的 1/5 到 1/6^[22, 36],这除了与流域内土壤中存在的原生和次生碳酸盐有关外,可能还与当地基岩复杂的岩性有关,标准溶蚀试片不能完全代表流域内的基岩,从而造成标准试片法计算的结果偏低。

综上,岩性及土壤环境条件对试片的溶蚀速率影响较大,当前的研究虽未能将每个因素的影响进行量化,但得出了岩石的溶蚀速率与自身 CaO 含量呈一定的正相关关系,虽然在不同环境条件下正相关程度有一定的差异,但总的看来,当基岩 CaO 含量相差 17% 时,其溶蚀速率相差 14%,结合基岩的碳酸盐岩纯度可计算岩溶碳汇强度。

5 结 论

(1) 使用埋放地的基岩试片估算了研究区不同

土地利用类型的溶蚀速率及岩溶碳汇强度,并与前人使用标准溶蚀试片在该区的研究进行对比分析,发现不同土地利用类型、不同埋放深度等条件下,石灰岩试片比白云岩试片岩溶速率大 14%,产生原因是受溶蚀试片 CaO 和 MgO 的相对含量控制;

(2) 在不同研究区,由于岩性差异,采用标准溶蚀试片估算岩溶碳汇强度会造成结果的高估或低估,而基于埋放地基岩岩性的试片更能准确地代表当地的岩溶速率;

(3) 溶蚀试片法与水化学法计算的岩溶碳汇结果往往存在差异,可能与采用的标准试片法岩性与当地基岩岩性不同有关,需要进一步研究确认。

参考文献

- [1] Fortunat Joos, Renato Spahni. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20000 years[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(5): 1425-1430.
- [2] Pierre Friedlingstein, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Are Olsen, et al. Global Carbon Budget 2020[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269-3340.
- [3] PIAO Shilong, HE Yue, WANG Xuhui, CHEN Fahu. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(4): 641-651.
- [4] 王世杰, 刘再华, 倪健, 闫俊华, 刘秀明. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J]. 地球与环境, 2017, 45(01): 2-9.
WANG Shijie, LIU Zaihua, NI Jian, YAN Junhua, LIU Xioming. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of south China. Erath and environment. 2017, 45(1): 2-9.

- [5] LIU Zaihua, Wolfgang DREYBRODT, WANG Haijing. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms[J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 99(3-4): 162-172.
- [6] ZHOU Guoqing, HUANG Jingjin, TAO Xiaodong, LUO Qingli, ZHANG Rongting, LIU Zaihua. Overview of 30 years of research on solubility trapping in Chinese karst[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 146: 183-194.
- [7] YUAN Daoxian. The carbon cycle in karst[J]. *Zeitschrift fuer Geomorphologie*, 1997, 108: 91-102.
- [8] LIU Zaihua, ZHAO Jinbo. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(9): 1053-1058.
- [9] LIU Zaihua, Wolfgang Dreybrodt. Significance of the carbon sink produced by H₂O-carbonate-CO₂-aquatic phototroph interaction on land[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(2): 182-191.
- [10] LIU Zaihua, G. L. Macpherson, Chris Groves, Jonathan B. Martin, YUAN Daoxian, ZENG Sibo. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 42-49.
- [11] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(1): 1-6.
- YUAN Daoxian. Carbon cyclce and global karst[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(1): 1-6.
- [12] CAO Jianhua, YUAN Daoxian, Chris GROVES, HUANG Fen, YANG Hui, LU Qian. Carbon Fluxes and Sinks: the Consumption of Atmospheric and Soil CO₂ by Carbonate Rock Dissolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 963-972.
- [13] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 62-64.
- YUAN Daoxian, CAI Guihong. The science of karst environment[M]. Chongqing: Chongqing Publication House, 1988: 62-64.
- [14] Kristina Krklec, David Domínguez-Villar, Dražen Perica. Use of rock tablet method to measure rock weathering and landscape denudation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212(4): 103449.
- [15] ZHANG Cheng, PEI Jianguo, XIE Yunqiu, CAO Jianghua, WANG Lanling. Impact of land use covers upon karst processes in a typical Fengcong depression system of Nongla, Guangxi, China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(8): 1621-1626.
- [16] 谢芳, 傅瓦利, 王晓阳, 蒲鹏, 张蕾, 谭波, 彭景涛, 甄晓君. 重庆中梁山碳酸盐岩溶蚀速率对季节的响应研究[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(4): 410-413.
- XIE Fang, FU Wali, WANG Xiaoyang, PU Peng, ZHANG Lei, TAN Bo, PENG Jingtao, ZHEN Xiaojun. Study on response of carbonate rock dissolution rate to the season in Zhongliang Mountain, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(4): 410-413.
- [17] 刘文, 张强, 贾亚男. 夏季不同土地利用方式下的溶蚀作用研究: 以重庆青木关岩溶槽谷区为例[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(1): 1-6.
- LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan. Karstification under different lan-use patterns in sumer: A case study in the Qingmuguan karst valley, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(1): 1-6.
- [18] 蓝家程, 傅瓦利, 彭景涛, 周小萍, 肖时珍, 袁波. 不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素[J]. *生态学报*, 2013, 33(10): 3205-3212.
- LAN Jiacheng, FU Wali, PENG Jingtao, ZHOU Xiaoping, XIAO Shizhen, YUAN Bo. Dissolution rate under soil in karst areas and the influencing factors of different land use patterns[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(10): 3205-3212.
- [19] SHAO Mingyu, ZHANG Liankai, LIU Pengyu, CAO Jianhua, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, LUO Mingming, ZHANG Chunlai. Influential factors and spatial suitability of the method of limestone tablets in karst carbon cycle study in China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2020, 35(3): 85.
- [20] 徐胜友, 蒋忠诚. 我国岩溶作用与大气温室气体CO₂源汇关系的初步估算[J]. *科学通报*, 1997, 42(9): 953-956.
- XU Shengyou, JIANG Zhongcheng. Preliminary estimation of the relationship between karstification and the source sink of atmospheric greenhouse gas CO₂ in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(9): 953-956.
- [21] 罗健, 蒋勇军, 胡毅军, 李林立, 刘文. 亚高山表层岩溶泉域土壤溶蚀速率季节变化及碳汇量估算: 以重庆金佛山水房泉流域为例[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 443-448.
- LUO Jian, JIANG Yongjun, HU Yijun, LI Linli, LIU Wen. Seasonal changes of soil dissolution rate and estimations on carbon sequestration in the subalpine epikarst spring zone: A case study in the Shuifang Spring in Jinfoshan, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 443-448.
- [22] 曾成, 赵敏, 杨睿, 刘再华. 岩溶作用碳汇强度计算的溶蚀试片法和水化学径流法比较: 以陈旗岩溶泉域为例[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(1): 106-111.
- ZENG Cheng, ZHAO Min, YANG Rui, LIU Zaihua. Comparison of karst processes-related carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test and solute load method: A case study in the Chenqi karst spring system[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(1): 106-111.
- [23] 同伟, 曾成, 肖时珍, 蓝家程, 何江湖, 何春, 代林玉, 狄永宁. 湿润亚热带典型白云岩流域不同土地利用下的试片溶蚀速率及岩溶碳汇[J]. *地球与环境*, 2021, 49(5): 529-538.
- YAN Wei, ZENG Cheng, XIAO Shizhen, LAN Jiacheng, HE Jianghu, HE Chun, DAI Linyu, DI Yongning. Dissolution rate and karst carbon sink of different land use in typical dolomite watershed with humid subtropical weather[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(5): 529-538.
- [24] 王文娟, 蓝美宁, 蒋忠诚, 覃小群, 劳文科. 湖南大龙洞流域不同岩性不同土地利用类型条件下碳酸盐岩试片的溶蚀速率[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 29-33.
- WANG Wenjuan, LAN Funing, JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, LAO Wenke. Corrosion rate of carbonate tablet under

- diverse land use and lithology in the Dalongdong basin, Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 29-33.
- [25] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 蓝美宇, 张连凯. 不同岩性试片溶蚀速率差异及意义[J]. *地球与环境*, 2015, 43(4): 379-385.
- HUANG Qib, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, LAN Funing, ZHANG Liankai. Dissolution on rate and its significance of different lithological tablets[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(4): 379-385.
- [26] 杨成华, 陈景艳, 丁访军. 普定县天龙山喀斯特森林群落植物多样性对比研究[J]. 贵州林业科技, 2012, 40(2): 1-7.
- YANG Chenghua, CHEN Jinyan, DING Fangjun. Study on the plant diversity of karst forest community in Tianlong mountain of Puding County[J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2012, 40(2): 1-7.
- [27] 俞锦标, 潘瑞鸿. 贵州省普定县碳酸盐岩沉积相带成岩作用与岩溶发育的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1982(3): 787-798, 823.
- YU Jinbiao, PAN Ruihong. Sedimentary facies zones, diagensis and karst development of carbonate rocks in Pudding, west Guizhou[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 1982(3): 787-798, 823.
- [28] 胡刚, 张忠华, 程安云, 刘立斌, 吴洋洋, 倪健. 黔中天龙山喀斯特次生林分空间结构的量化与分析[J]. *地球与环境*, 2017, 45(1): 25-31.
- HU Gang, ZHANG Zhonghua, CHENG Anyun, LIU Libin, WU Yangyang, NI Jian. Characterizing and analyzing stand spatial structure of a northern subtropical karst secondary forest in Tianlong mountain of central Guizhou Province, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(1): 25-31.
- [29] 习新强, 赵玉杰, 刘玉国, 王欣, 高贤明. 黔中喀斯特山区植物功能性状的变异与关联[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1000-1008.
- XI Xinqiang, ZHAO Yujie, LIU Yuguo, WANG Xin, GAO Xianming. Variation and correlation of plant functional traits in karst area of central Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10): 1000-1008.
- [30] Luo Mingming, ZHOU Hong, Liang Yongping, Chen Zhihua, Chen Rubing, Li Xinlong, Hamza Jakada, et al. Horizontal and vertical zoning of carbonate dissolution in China[J]. *Geomorphology*, 2018, 322: 66-75.
- [31] 詹自珍, 黄庆达. 碳酸盐岩块野外溶蚀速度试验[J]. 中国岩溶, 1984(2): 17-26.
- GONG Zizhen, HUANG Qingda. Field corrosion rate tests on carbonate rocks[J]. *Carsologica Sinica*, 1984(2): 17-26.
- [32] 李永双, 范周周, 国辉, 周金星, 彭霞薇. 菌剂添加对不同树种根际土壤微生物及碳酸钙溶蚀的影响[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 854-862.
- LI Yongshuang, FAN Zhouzhou, GUO Hui, ZHOU Jinxing, PENG Xiawei. Effects of microorganisms agent addition on soil microbes in different rhizosphere soils and calcium carbonate dissolution[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 854-862.
- [33] 李强, 何媛媛, 曹建华, 梁建宏, 朱敏洁. 植物碳酸酐酶对岩溶作用的影响及其生态效应[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1867-1871.
- LI Qiang, HE Yuanyuan, CAO Jianhua, LIANG Jianhong, ZHU Minjie. The plant carbonic anhydrase at karst area and its ecological effects[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12): 1867-1871.
- [34] SHE Min, Shou Jianfeng, SHEN Anjiang, PAN Liyin, HU Anping, HU Yuanyuan. Experimental simulation of dissolution law and porosity evolution of carbonate rock[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 616-625.
- [35] 何宇彬, 金玉璋, 李康. 碳酸盐岩溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 12-16.
- HE Yubin, JIN Yuzhang, LI Kang. An experimental study of carbonate rock corrosion mechanism[J]. *Carsologica Sinica*, 1984, 3(2): 12-16.
- [36] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 康志强, 唐萍萍. 半干旱区岩溶碳汇原位监测方法适宜性研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(1): 240-246.
- HUANG Qib, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, KANG Zhiqiang TANG Pingping. Applicability of karst carbon sinks calculation methods in semi-arid climate environment[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2015, 45(1): 240-246.

Effects of rock tablet lithology difference on estimation of rock dissolution rate and carbon flux

ZHANG Xiaoqin^{1,2}, LUO Weijun^{1,3,4}, WANG Yanwei^{1,3}, CAI Xianli^{1,2,3}, LYU Yina^{1,3}, WANG Shijie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, CAS, Puding, Guizhou 562100, China; 4. Rural Revitalization Research Center of Guizhou Universities, Anshun, Guizhou 561000, China)

Abstract Under the control of subtropical humid monsoon climate, karstification is very strong in the karst area of southern China. At the same time, a lot of researches indicate that the carbon sink formed by karstification in southern China may be an important part of the global missing carbon sink. At present, there are many research methods to estimate the intensity of karst carbon sink. The carbonate rock tablet test is one of the main traditional research

methods to estimate the karst carbon flux. The main principle of this method is based on the chemical reaction of water-CO₂-carbonate rock. The specific operation is to bury the carbonate rock test piece with the same size under the soil, then take them out and weigh them after a certain time, use the dissolution amount of rock tablets to calculate the dissolution rate and karst carbon flux in study area. Finally, the regional karst carbon sink can be estimated according to "point by area". In the study of estimating karst carbon sink in China, previous scientists used pure limestone from Rongxian formation of Devonian System in Guilin. However, the geological background of different regions is quite different, and the composition and structure of bedrock are different, so that the estimation results of standard carbonate rock tablets (pure limestone) may be also different from the actual dissolution amount of local bedrock tablets, resulting in great uncertainty in the estimation of karst carbon sink in the region. Based on this, in this study, we chose Puding county, Guizhou Province as the study area. The main bedrock types (limestone and dolomite) of this place are made into standard size rock tablets, and buried them in the typical land use types (secondary forest, shrub, grassland, dry land and paddy field) in the study area. After monitoring for four hydrological years, the dissolution rate and karst carbon flux were calculated, then compared them with the previous research results using the standard carbonate rock tablet (pure limestone) in the same study area, and the following results are obtained; (1) Under the same climatic conditions and soil environmental conditions, lithology has a significant impact on the dissolution rate of carbonate rock tablets, and the dissolution rate has a positive correlation with CaO content in the rock tablets and a negative correlation with MgO content in the rock tablets; (2) The difference of dissolution rate between limestone and dolomite is controlled by land use types and soil depths. Without considering the influence of environmental factors, on the whole, the dissolution rate of limestone is 14% higher than that of dolomite; (3) The karst carbon sink intensity estimated by different lithology carbonate rock tablets varies greatly. The estimated result of standard limestone tablets is higher than that of local tablets in this study. Therefore, when using the carbonate rock tablet method to estimate the regional karst carbon flux, we should consider the lithology of the bedrock where the rock tablet is buried, or correct the estimation results based on the standard carbonate rock tablet, so as to accurately obtain the real karst carbon flux on the regional scale.

Key words dolomite, limestone, carbonate rock tablet test, dissolution rate, karst carbon flux

(编辑 张玲 杨杨)