

侯满福, 刘雨婷, 张杰, 等. 亚热带岩溶森林类型和坡位对碳酸盐岩溶蚀的影响[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 842-852.

DOI: 10.11932/karst2023y010

亚热带岩溶森林类型和坡位对碳酸盐岩溶蚀的影响

侯满福^{1,2}, 刘雨婷^{1,2}, 张杰³, 贺露炎^{1,4}, 梁江弈¹

(1. 广西师范大学环境与资源学院, 广西桂林 541004; 2. 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室(广西师范大学), 广西桂林 541004; 3. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641100; 4. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 吉林长春 130102)

摘要: 文章采用标准溶蚀试片法对比两种亚热带岩溶森林不同坡位的碳酸盐岩溶蚀速率, 并分析其与土壤 CO₂ 含量 ($p\text{CO}_2$) 和土壤含水量的对应关系。结果表明: 青冈林的平均溶蚀速率 ($5.22 \pm 0.99 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 显著高于化香树林 ($3.58 \pm 2.59 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); 青冈林的土下溶蚀速率在垂直剖面上先增加后递减, 峰值位于土下 20 cm, 而化香树林的随土壤深度增加而增加; 青冈林不同坡位的溶蚀速率差异不显著, 而化香树林中坡显著高于上坡和下坡; 不同森林类型坡位间的溶蚀速率未表现一致规律。森林类型间溶蚀速率差异与土壤含水量有较好的对应而与土壤 $p\text{CO}_2$ 相反, 森林内坡位间及土壤垂直剖面的溶蚀速率差异与土壤 $p\text{CO}_2$ 有更好对应性。亚热带不同岩溶森林类型间溶蚀速率差异显著, 可用土壤含水量较好解释; 不同坡位间差异没有一致规律, 但可用土壤 $p\text{CO}_2$ 较好解释。

关键词: 标准溶蚀试片; 碳酸盐岩风化; 溶蚀速率; 森林类型; 碳汇

中图分类号: P642.25; X171.1 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0842-11

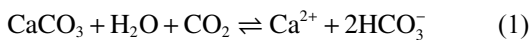
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中国岩溶分布面积达 334.4 万 km², 是世界上分布面积最大的国家^[1]。岩溶区碳酸盐岩风化吸收大气 CO₂, 并与水循环和水生生态系统耦合产生岩溶地质碳汇^[2-3]。在中国这一岩溶碳汇的估计通量达到森林碳汇通量的 68%^[4], 对区域碳收支至关重要。明确岩溶地质碳汇的影响因素, 对有效利用岩溶碳汇潜力促进碳中和具有重要意义。

碳酸盐岩风化的化学过程可用下式简单表示:



此反应产生的溶解无机碳(DIC, 主要是 HCO₃⁻) 进入水体后即与生物碳泵耦合, 其光合产物在水下沉积物中形成长时间尺度的有机碳存储^[2-3]。因此,

通过促进碳酸盐岩溶蚀增加输入水体的 DIC, 就可增加岩溶碳汇。在土壤中, 这一反应过程主要受土壤含水量和土壤 CO₂ 含量 ($p\text{CO}_2$) 的控制^[5-6]。土壤呼吸产生的 CO₂ 在土壤中积累, 常呈现浓度随土壤深度增加而增加的规律^[7]。当降水发生时, 土壤含水量增加并与土壤 CO₂ 形成碳酸, 在岩土界面发生式(1)的碳酸盐岩溶蚀反应, 使深层土壤 CO₂ 不断消耗, 重塑了土壤 $p\text{CO}_2$ 的剖面规律^[8]。同时, 土壤水分增加会促进土壤呼吸使 $p\text{CO}_2$ 升高^[9-10], 进一步推动式(1)向右进行。反之, 当土壤含水量不断降低时, 式(1)反应动力减弱, 甚至向左进行而产生碳酸盐沉积, CO₂ 重新在土壤中积累^[7, 11]。因此, 土壤 CO₂ 与含水量对溶蚀的影响是一个密切关联的复杂动态过程, 任何影响二者形成与移动的因素(如植被覆盖、地形、

基金项目: 国家自然科学基金(31960233); 广西师范大学博士启动基金

第一作者简介: 侯满福(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩溶植被生态和碳循环研究。E-mail: houmanfu@163.com。

收稿日期: 2022-04-19

坡向等),都可能影响溶蚀^[9,12]。明确各因素对溶蚀过程的具体影响,对于理解溶蚀发生的过程及其碳汇管理至关重要。

植被覆盖会形成局部小气候环境,如林冠层和凋落物层会截留降水、增加下渗,影响土壤含水量,并通过凋落物输入极大程度改变土壤呼吸强度,是影响溶蚀的重要因素^[13-14]。不同土地利用类型、不同演替阶段等溶蚀对比试验均证实,植被覆盖显著改变碳酸盐岩溶蚀速率^[13,15-18]。少量研究还揭示出不同森林间溶蚀速率也存在差异^[18-19]。然而,已有研究无法明确溶蚀速率的差异究竟是植被类型差异还是地形等自然环境条件差异所致,因为植被对溶蚀的影响常与气候、地形、土壤等因素交织,形成十分复杂的影响过程^[12]。此外,土壤 $p\text{CO}_2$ 和土壤含水量与溶蚀速率的关系存在较大不确定性,使植被对溶蚀的影响更难以确认。例如,由雨季到旱季,土壤 $p\text{CO}_2$ 与溶蚀速率的关系由显著正相关减弱为不相关^[20];土壤含水量也可能比土壤 $p\text{CO}_2$ 有更强的相关性^[21]。在降雨量不同的区域,土壤 $p\text{CO}_2$ 对溶蚀的影响强度可能很不相同,并随海拔而变化^[18]。半干旱区的研究还表明,溶蚀速率与土壤 $p\text{CO}_2$ 或含水量任何单一因素没有明显关系;植被类型通过调节它们的同步匹配性影响溶蚀^[22]。在湿润的中国热带亚热带岩溶区,由于降水充沛且雨热同期,岩溶强烈发育,塑造出不同的地表岩溶形态和植被,具有与半干旱区明显不同的水土过程^[1]。这一环境中植被及其土壤 $p\text{CO}_2$ 和含水量是如何相互关联影响溶蚀速率的,迄今所知极为有限。

本研究在亚热带岩溶区挑选出空间距离极近(气候相同)、不同坡位植被类型一致的两处森林作为研究对象,通过不同坡位的标准溶蚀试片对比实验及土壤 $p\text{CO}_2$ 和土壤含水量的季节动态观测,以验证如下问题:(1)不同森林类型间碳酸盐岩溶蚀速率是否存在差异?(2)地形对溶蚀速率有怎样的影响?(3)土壤 $p\text{CO}_2$ 和土壤含水量对溶蚀的影响存在怎样的规律?通过这一研究,以为岩溶生态系统管理、碳汇功能提升提供科学支撑。

1 研究区概况

研究区均位于桂林市郊 $\text{N}25^{\circ}13' \sim 25^{\circ}19'$, $\text{E}110^{\circ}15' \sim 110^{\circ}23'$ 之间,为亚热带季风气候,年均温度 20.2°C ,年均降水量 $1\,996.0\text{ mm}$,年均相对湿度 75% 。森林

类型分别为位于桂林市东南郊的化香树+密花树 (*Platycarya strobilacea*+*Myrsine seguinii*)常绿与落叶阔叶混交林(简称化香树林)和位于西郊的青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)常绿阔叶林(简称青冈林),直线距离约为 18 km (图1)。两片森林分别分布在从山脚到上坡的同一坡面上,群落类型一致。青冈林下伏基岩为纯质石灰岩,土层较薄,质地黏重,物种组成较单一,常绿树种占绝对优势,群落盖度约 90% 。化香树林下伏基岩为纯质石灰岩,含少量硅质夹层,土层相对较厚,群落以落叶的化香树占明显优势,但由常绿小乔木构成第二层乔木。

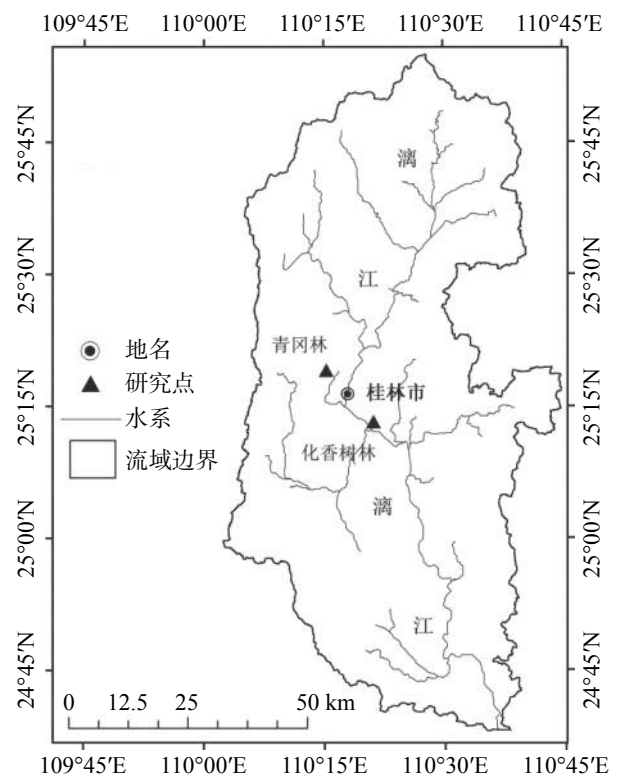


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

2 研究方法

2.1 溶蚀速率测定

参照方精云等^[23]群落调查规范,分别在两种森林上坡、中坡和下坡设置 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样方开展群落调查,确定不同坡位森林类型一致性。溶蚀速率采用广泛使用的标准溶蚀试片法测定^[24]。首先取桂林上泥盆统融县组纯质石灰岩制作成直径约 40 mm 、厚约 3 mm 的圆形标准试片,其次在两处森林的上、

中、下三个坡位分别挖开 50 cm 以上的土壤剖面,直到基岩层或母质层,然后在距地面 100 cm 空气中、地表、土下-20 cm、-50 cm、-70 cm 5 个层位(土壤深度不足时 4 个层位,但不放置在岩土界面,以免

环境差异过大影响结果),按水平排列放置 3 块试片,共放置 96 块试片,放置时间为 3 个水文年(2014/11/30—2017/12/17)。溶蚀试片点的环境特征见表 1。

表 1 溶蚀试片实验点的自然环境状况

Table 1 Environmental characteristics of dissolution test sites

群落类型	坡位	海拔/m	坡度	坡向	重要值(常绿:落叶)
青冈林	上	269	20°	96°	76.4 : 23.6
	中	233	15°	96°	93.0 : 7.0
	下	197	12°	96°	86.9 : 13.1
化香树林	上	213	15°	345°	21.5 : 78.5
	中	183	25°	345°	27.1 : 72.9
	下	160	18°	345°	18.4 : 81.6

试片取出后带回实验室,用蒸馏水洗净,烘干至恒重,用电子天平称重(精度 0.000 1 g),按下式计算溶蚀量:

$$DR = (W_1 - W_2) \times 1000 \times T \times 365^{-1} \times S^{-1}$$

式中: DR 为年单位面积溶蚀量($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); W_1 为试片初重(g); W_2 为试片试验后重量(g); T 为埋放时间(d); S 为试片表面积(约 28.9 cm^2)。每一层位的溶蚀速率以 3 块试片的平均值计算。

2.2 溶蚀环境因子测定

在样地内分别埋设 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 和 50 cm 长、内径为 2.54 cm 的 PVC 管,每个坡位埋设三组重复。PVC 管竖向埋放,管下部 5 cm 四周钻孔以便土壤空气扩散,管口密封,内垂一根比 PVC 管短 3 cm 的硅胶细管(开口处位于靠近土层深度下部),小管口密封外露。采用 AP-20 抽气泵及 126SA CO_2 测试管,于 2017 年 1、4、7、11 月初(7-10 日)通过外露硅胶管测定各深度的土壤 $p\text{CO}_2$; 采用 Spectrum 土壤水分测试仪(精度 3%,体积含水量)于 2019 年 1、4、8 (7 月因洪水无法到达测试点改为 8 月)、11 月初(6-8 日)测定表层土壤(20 cm)含水量,分别代表其季节变化。气象数据来源于桂林市国家基本气象站(www.meteomanz.com,与试验样地直线距离分别约为 5 km 和 14 km)。

2.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,采用方差分析和非参数检验比较不同组别的差异性。溶蚀速率与土壤含水量和土壤 $p\text{CO}_2$

之间的相关性用 Pearson 分析。采用 Excel 2010 和 Origin pro 9 作图。文中数据为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 不同森林类型碳酸盐岩溶蚀速率的差异

两种森林中碳酸盐岩溶蚀速率在 $0.43 \sim 9.69 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,最高值在青冈林 -20 cm 处,最低值在化香树林地表处(图 2a)。以所有坡位和空间层位的平均值计算,青冈林的溶蚀速率($5.22 \pm 0.99 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)显著高于化香树林($3.58 \pm 2.59 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $P=0.02$)。从各空间层位看,两种森林溶蚀速率的差异在空中 100 cm 处极小且不显著($P=0.15$),在地面有所增加但仍不显著($P=0.05$),在土下成倍扩大且极显著($P \leq 0.01$),其中 -20 cm 差异最大,但 -50 cm 有所减小(图 3)。这与两种森林溶蚀速率的垂直剖面规律不同有关。两种森林地上溶蚀速率都很小,差异也小;土下溶蚀速率在青冈林中随土壤深度增加迅速增加,在 -20 cm 处达到最大,然后开始减小;在化香树林中则单调递减,在土下 50~70 cm 处达到最大值(图 2a)。综上所述,森林类型间溶蚀速率差异显著。

3.2 不同坡位碳酸盐岩溶蚀速率的差异

由图 2 b 可知,以最主要的土下溶蚀来看,青冈林内的平均溶蚀速率上坡>下坡>中坡,但坡位间没有显著差异;化香树林的中坡>下坡>上坡,但中坡显著高于上坡和下坡,后两者几乎相等。具体到各土

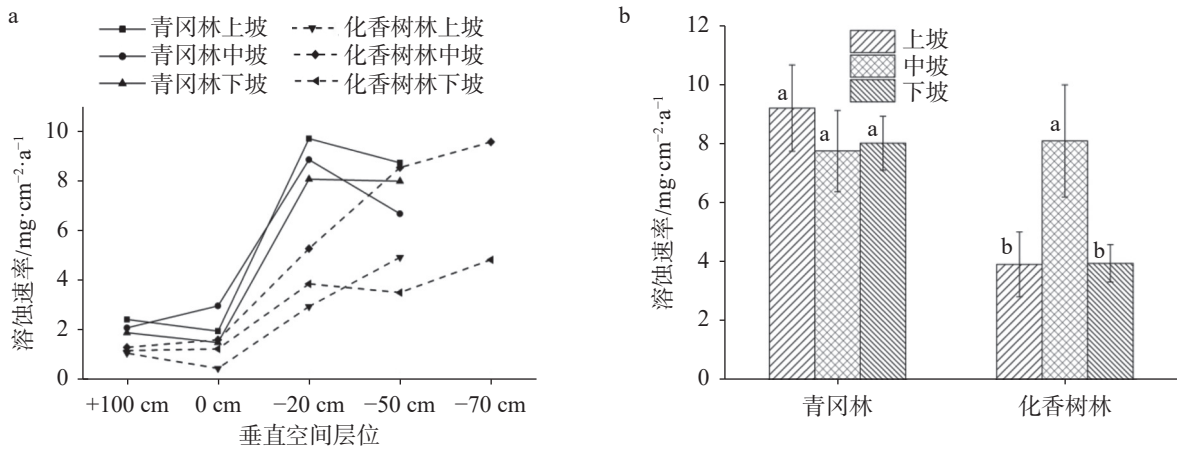


图 2 亚热带岩溶区青冈林和化香树林碳酸盐岩溶蚀速率的垂直剖面差异(a)及不同坡位的土下平均溶蚀速率(b)(柱子上的字母相同表示差异不显著, 不同表示差异显著)

Fig. 2 Dissolution rates of carbonate rock in vertical profile (a) and average dissolution rates under soil (b) at different slope positions in *C. glauca* forest and *P. strobilacea* forest in the subtropical karst area of China. The same alphabet on columns means insignificant difference, and different alphabet means significant difference

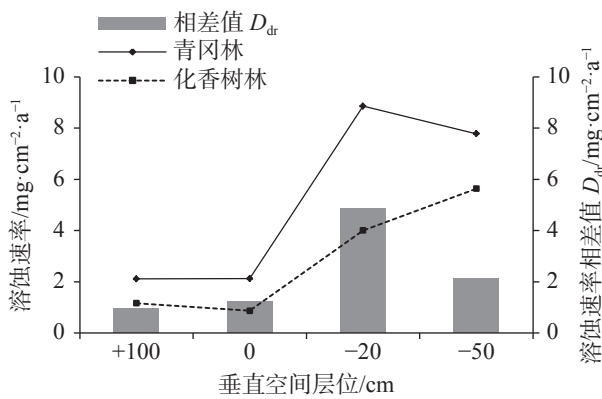


图 3 两种岩溶森林不同垂直空间层位的溶蚀速率

Fig. 3 Dissolution rates at vertical positions in two forest types

壤深度, 方差分析表明: 溶蚀速率在化香树林中坡 -20 cm 和 -50 cm 处均显著高于上坡和下坡; 下坡 -20 cm 处高于上坡, 但 -50 cm 处显著低于上坡, 使二者总体溶蚀速率差异不显著(图 2a)。青冈林 -50 cm 处上坡显著大于下坡, 其余各深度的坡位差异不显著。此外, 不同坡位的地面和空中的溶蚀速率也存在差异, 但溶蚀量较小, 对总溶蚀量影响有限。综合两种森林类型, 坡位间溶蚀速率存在差异但没有一致的规律。

3.3 溶蚀环境因子特征及其与溶蚀速率的对应性

两种森林土壤 $p\text{CO}_2$ 具有显著的季节差异, 在秋季最低, 严冬 1 月开始回升, 春季可达秋季的 2 倍以上, 夏季达到全年最高值, 平均可达秋季最低值的 8.1 倍; 所有季节青冈林的土壤 $p\text{CO}_2$ 均低于化香树

林, 但差异不显著(图 4a)。在垂直剖面上, 青冈林除秋季外均呈单峰型, 化香树林除夏季呈单峰型外均随土壤深度增加而增加。两种森林夏季土壤 $p\text{CO}_2$ 的峰值均在 -30 cm 深处, 但青冈林的剖面变化幅度比化香树林更剧烈(图 4b)。两种森林表层土壤含水量的季节波动比土壤 $p\text{CO}_2$ 小: 青冈林春季最高, 夏、秋季逐渐降低, 冬季迅速回升至仅次于春季的次高水平, 而化香树林夏季最高, 冬春季相近, 秋季最低; 在一年中大多数时间青冈林均高于化香树林, 仅夏季低于后者(图 5a)。对照降水量, 研究区 2017、2019 年降水量与 2000–2020 年平均降水量季节规律大致相同(图 5b), 青冈林夏季土壤含水量的下降快于化香树林, 秋冬季的维持与春季的回升强于化香树林。两种森林的不同坡位间, 土壤 $p\text{CO}_2$ 和表层土壤含水量差异均不显著。

相关分析表明, 两种森林的土壤含水量和 $p\text{CO}_2$ 与溶蚀速率的相关性均不显著。在森林类型之间, 溶蚀速率与土壤含水量对应而与土壤 $p\text{CO}_2$ 则相反, 即青冈林溶蚀速率高于化香树林, 其土壤含水量也高于后者, 但土壤 $p\text{CO}_2$ 低于后者(图 3, 图 4a, 图 5a)。在同一森林内, 溶蚀速率与 $p\text{CO}_2$ 的变化规律对应性高于土壤含水量, 如青冈林的上坡、化香树林的中坡溶蚀速率最大, 土壤 $p\text{CO}_2$ 也最大; 在垂直剖面上青冈林的溶蚀速率与 $p\text{CO}_2$ 主要呈单峰型, 化香树林的二者大致随深度增加而增加(图 2a, 图 4a), 均有较好对应。与之相对的是, 化香树林中坡溶蚀速率显著

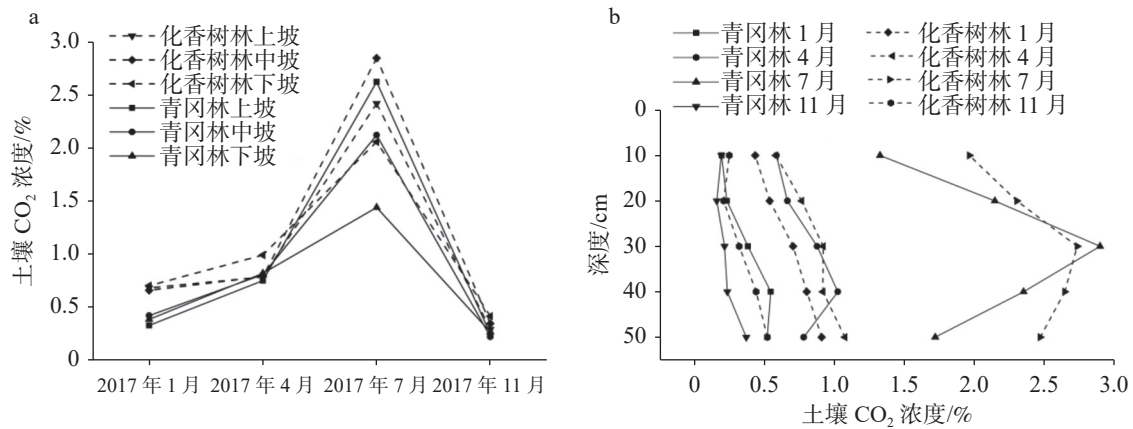


图4 青冈林和化香树林不同坡位(a)和不同剖面深度(b)的土壤 $p\text{CO}_2$ 季节动态
Fig. 4 Seasonal variation of soil $p\text{CO}_2$ in different slope positions(a) and soil depths(b) of
C. glauca forest and *Platycarya strobilacea* forest

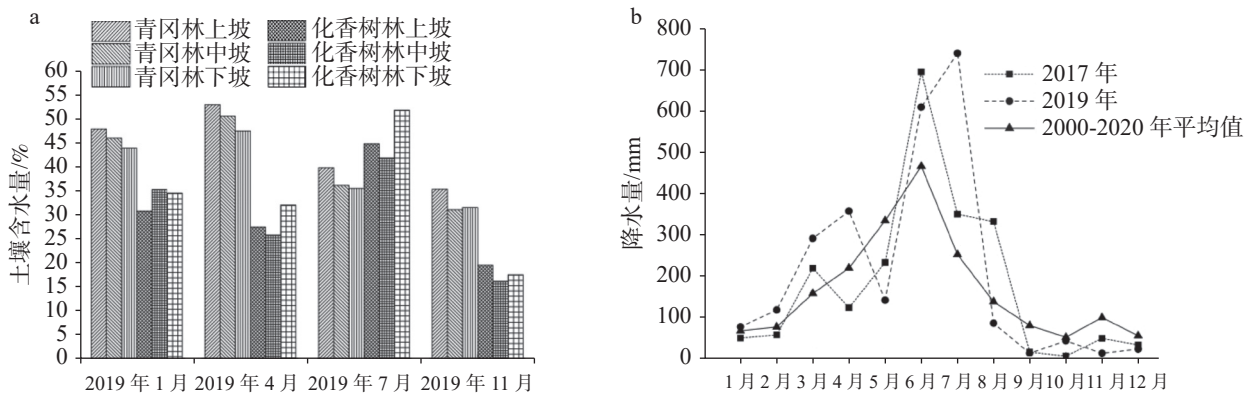


图5 青冈林和化香树林不同坡位土壤含水量的季节变化(a)及其降水量月动态特征(b)
Fig. 5 Seasonal variation of soil water content in different slope positions(a) and monthly precipitation(b) of
C. glauca forest and *Platycarya strobilacea* forest

高于上、下坡但土壤含水量通常最低(图2b, 图5A), 两者趋势相反。溶蚀速率在森林类型间的差异与土壤含水量有更好的对应性, 在同一森林内不同坡位间的差异与土壤 $p\text{CO}_2$ 有更好的对应性。

4 讨论

4.1 溶蚀速率的森林类型与地形坡位规律

溶蚀速率在森林、灌丛和草地之间^[15-16,18,25-26]、一些森林类型间^[18-19]的差异已被很多研究证实。本研究中青冈林的溶蚀速率显著高于化香树林, 且两者在垂直空间层位和不同坡位间均表现了不同的变化规律, 进一步证实在很小的空间尺度上不同森林类型间溶蚀速率存在显著差异。在研究不同土地利用类型、不同演替阶段的溶蚀速率或碳汇效应时, 要充分考虑群落类型的代表性和它们对溶蚀速率影响

可能存在的显著差异, 以免因所选群落类型造成结果的偏差^[22]。同时, 要准确评估区域的岩溶碳汇潜力, 对更多森林类型或群落类型开展细致对比研究是必要的。

地形对气候、水文等因子具有再分配效应, 与独特的岩溶地表—地下双层空间结合, 使很小的海拔范围出现环境因子的垂直梯度变化, 对溶蚀速率产生重要的间接影响^[27-28]。Wang等^[29]在桂林丫吉的研究发现溶蚀速率: 垭口>山坡>洼地, 存在较明显的地形差异。本研究中两种森林海拔相差在50~70 m, 但溶蚀速率也表现出坡位差异, 其中化香树林中坡的溶蚀速率显著高于上坡和下坡, 支持了这一结果。但化香树林的中坡>下坡>上坡, 青冈林的上坡>下坡>中坡, 二者趋势相反, 与Wang等^[29]的结果也不同。此外, 坡向对水热条件也有较明显影响, 群落类型特征甚至石漠化程度均表现出由阴坡过渡到

阳坡的差异^[30-31], 阴坡和阳坡的差异尤其显著^[32]。本研究中青冈林(东坡)的太阳辐射强于化香树林(北坡), 但前者冬、春、秋季的土壤含水量均高于后者, 可能与青冈林常绿成分更高(表1)、植被覆盖的季节波动更小有关。这表明地形、坡向等对溶蚀的影响强度可能较弱, 易受植被覆盖等其他因素的影响而改变^[33], 从而呈现不一致的规律。地形坡位、坡向影响溶蚀速率的规律及与植被类型之间的协同关系, 还需要更多研究确认。

4.2 土壤 $p\text{CO}_2$ 和土壤含水量对溶蚀速率的影响规律

本研究中不同森林类型间溶蚀速率差异与土壤含水量对应、与土壤 $p\text{CO}_2$ 趋势相反, 表明土壤含水量是比 $p\text{CO}_2$ 更强烈的溶蚀影响因素, 支持了王冬银等^[21] 在金佛山的研究结果, 也与闫伟等^[34] 溶蚀速率与土壤 $p\text{CO}_2$ 变化趋势相反的结果相符, 但与通常认为的相反。一般认为中国南方岩溶区土壤 $p\text{CO}_2$ 对溶蚀的影响强于土壤含水量, 北方则土壤含水量的影响强于土壤 $p\text{CO}_2$ ^[5]。这是因为南方岩溶区降水丰富, 在高温多雨的夏季持续补充土壤水分, 尽管土壤呼吸也显著增强从而产生较高的土壤 $p\text{CO}_2$, 但土壤含水量基本不成为形成溶蚀所需碳酸的限制条件。北方岩溶区土壤水分长期处于亏缺状态从而限制碳酸的产生, 对溶蚀的影响比 $p\text{CO}_2$ 更强烈^[25,35]。然而, 亚热带岩溶区岩溶发育, 地表土壤稀少不利于水分存留, 地下复杂的空间使降水快速漏失, 易形成地质性干旱, 使溶蚀反应动力减弱, CO_2 在土壤中聚集, 产生高浓度的 CO_2 与低溶蚀速率对应的现象, 可能使土壤含水量的限制性影响大大增强, 土壤水分成为比土壤 $p\text{CO}_2$ 更强烈的影响因素, 与干旱、半干旱区相类似。孙平安等^[36] 研究表明, 亚热带区降水是溶蚀速率的控制性影响因素, 间接说明土壤含水量对溶蚀影响的重要性。这在以往研究中易被忽略, 值得深入探讨。

本研究中, 同一森林的不同坡位及土壤剖面上, 溶蚀速率与 $p\text{CO}_2$ 的变化规律对应性高于土壤含水量。青冈林三个坡位土壤含水量相近, 上坡较高的溶蚀速率与较高的土壤 $p\text{CO}_2$ 对应(图4b, 图5, 图3); 化香树林中坡显著高于上、下坡的溶蚀速率, 与土壤含水量坡位差异规律相反, 而与夏季土壤 $p\text{CO}_2$ 的坡位差异较好对应。这表明在土壤含水量相

近(坡位差异不显著)时, 土壤 $p\text{CO}_2$ 对溶蚀的影响体现出来, 但强度较弱; 在降水丰富的夏季, 土壤含水量的差异对溶蚀的影响不明显, 高浓度的土壤 $p\text{CO}_2$ 成为溶蚀的主要影响因素, 并由于夏季具有比其他季节高得多的溶蚀量^[37], 可能决定全年溶蚀量的坡位差异。土壤 $p\text{CO}_2$ 和土壤含水量与溶蚀速率间的对应关系也反映在剖面规律上。本研究中青冈林溶蚀速率随土壤深度呈单峰型变化, 与前人的大多数研究结果一致^[16-17], 其土壤 $p\text{CO}_2$ 也与此有很好的对应性, 与刘文等^[38] 的研究结果相符。化香树林的溶蚀速率随深度增加而增加, 与极少数研究结果相符^[18,39], 也与林内土壤 $p\text{CO}_2$ 的剖面规律基本一致。但化香树林溶蚀速率与其夏季土壤 $p\text{CO}_2$ 的剖面规律不相符, 有可能夏季 40 cm 以下的 $p\text{CO}_2$ 降幅对溶蚀的影响较小, 与其他三个季度叠加后最终表现为随深度增加的规律。由此可见, 土壤 $p\text{CO}_2$ 和含水量是溶蚀的两个重要影响因子, 但其主次关系及影响效应因植被、季节、坡位而变。土壤含水量较好解释了不同森林类型间溶蚀速率的差异, 土壤 $p\text{CO}_2$ 特别是夏季土壤 $p\text{CO}_2$ 较好解释了同一森林内坡位间的溶蚀速率差异。

4.3 植被对碳酸盐岩溶蚀的调控

虽然两种森林及其坡位间溶蚀速率的差异可较好用土壤含水量和 $p\text{CO}_2$ 解释, 但其作用过程可能非常复杂。生态系统通过一系列过程调控酸度、温度及反应物饱和程度, 影响溶蚀速率^[12]。植被通过根系分泌、共生菌根合成等增加有机酸增强土壤的酸度^[14], 通过凋落物归还增加土壤有机质含量, 并促进土壤 CO_2 浓度^[5,40]、林内湿度和下渗水量的增加^[41-43]。植被覆盖改变土层深度、土壤粒度、土壤孔隙度等物理性质^[33,44-45], 影响 CO_2 、水的持留与移动, 并与海拔、地貌、微地形等因素交叉作用, 使影响溶蚀的主控因子发生变化^[18,39,46]。本研究中青冈林土层较浅, 实际观察其土壤质地更黏重而有利于水分的保持^[47], 植物细根更多集中在表层, 因而土壤 $p\text{CO}_2$ 峰值更浅, 土壤含水量更高。化香树林土层较厚, 根系较易达到更深的土层, 使 $p\text{CO}_2$ 峰值更深, 秋冬季节乔木上层落叶增加了透射阳光和土壤水分散失, 土壤含水量更低, 一定程度上可解释土壤含水量和 $p\text{CO}_2$ 的差异特征。总体而言, 不同森林碳酸盐岩溶蚀的差异是植被对溶蚀各种因子复杂调控、使重要因子或其组

合产生时空分异的结果。然而,土壤含水量和 $p\text{CO}_2$ 存在强烈的季节变动^[36],某次或某个时段的测定值对揭示其与溶蚀过程的关系具有明显的局限性。溶蚀与影响因子的连续监测已展示了定量分析溶蚀过程及其发生机理的积极作用^[39]。未来应针对不同群落类型在更详细的时间尺度下开展溶蚀试验并同步连续监测主要溶蚀环境因子的动态变化规律,揭示植被覆盖对溶蚀的调控机制,为推进基于岩溶碳汇的生态系统管理提供支持。

5 结论与建议

亚热带岩溶区不同森林类型之间碳酸盐岩溶蚀速率差异显著。不同森林类型间不同坡位、垂直剖面上的溶蚀速率存在差异但没有一致的规律性。青冈林的溶蚀速率显著高于化香树林,在垂直剖面上呈现单峰型,最大溶蚀速率在土层中部,坡位间差异不显著,而化香树林溶蚀速率在垂直剖面上随土壤深度增加而增加,中坡显著高于上、下坡。分析溶蚀速率与土壤含水量和土壤 $p\text{CO}_2$ 之间的对应关系,土壤含水量较好解释了森林类型间溶蚀速率的差异,土壤 $p\text{CO}_2$ 特别是夏季土壤 $p\text{CO}_2$ 较好解释了同一森林不同坡位、不同土壤深度的溶蚀速率差异。

在亚热带湿润岩溶区,岩溶强烈发育,降水快速漏失,岩溶性干旱频发,使土壤含水量对溶蚀的限制作用增强,从而成为比土壤 $p\text{CO}_2$ 更重要的溶蚀影响因素。森林通过改造环境条件引起溶蚀环境因子或其组合发生时空变异,调控碳酸盐岩溶蚀,产生不同地质碳汇效应。

未来研究应充分考虑群落类型对溶蚀的影响,加强土壤含水量和土壤 $p\text{CO}_2$ 的连续动态观测,以揭示植被调控碳酸岩溶蚀的机理。

致谢: 杨得志、李高飞、梁欣、赖敏、乔宁、包玉婷、李国政等人参加了野外工作。

参考文献

- [1] Yuan Daoxian, Zhu Dehao, Weng Jintao, Zhu Xuewen, Han Xingrui, Wang Xunyi, Cai Guihong, Zhu Yuanfeng, Cui Guangzhong, Deng Ziqiang. Karst of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [2] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. 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[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99: 162-172.
- [3] Liu Z H, Macpherson G L, Groves C, Martin J B, Yuan D X, Zeng S B. Large and active CO_2 uptake by coupled carbonate weathering[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 42-49.
- [4] Cao J H, Wu X, Huang F, Hu B, Groves C, Yang H, Zhang C L. Global significance of the carbon cycle in the karst dynamic system: Evidence from geological and ecological processes[J]. *China Geology*, 2018, 1: 17-27.
- [5] 刘再华, 何师意, 袁道先, 赵景波. 土壤中的 CO_2 及其对岩溶作用的驱动[J]. 水文地质工程地质, 1998, 34(4): 42-45.
LIU Zaihua, HE Shiyi, YUAN Daoxian, ZHAO Jingbo. CO_2 in soil and its drive to karstification[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1998, 34(4): 42-45.
- [6] 何师意, 徐胜友, 张美良. 岩溶土壤中 CO_2 浓度, 水化学观测及其与岩溶作用关系[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 319-324.
HE Shiyi, XU Shengyou, ZHANG Meiliang. Observation on soil CO_2 concentration, hydrochemistry, and their relationship with karst processes[J]. *Carsologica Sinica*, 1997, 16(4): 319-324.
- [7] 徐胜友, 何师意. 碳酸盐岩土壤 CO_2 的动态特征及其对溶蚀作用的驱动[J]. 中国岩溶, 1996, 15(Supp.1): 50-57.
XU Shengyou, HE Shiyi. The CO_2 regime of soil profile and its drive to dissolution of carbonate rock[J]. *Carsologica Sinica*, 1996, 15(Supp.1): 50-57.
- [8] 邵明玉, 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 邵天杰, 曹建华, 张春来. 夏季黄土丘陵区不同土地利用方式土壤 CO_2 分布特征及影响因素[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 70-79.
SHAO Mingyu, ZHANG Liankai, LIU Pengyu, QIN Xiaoqun, SHAO Tianjie, CAO Jianhua, ZHANG Chunlai. Distribution characteristics and influencing factors of soil CO_2 in different land use patterns in loess hilly region in summer[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 70-79.
- [9] 赵瑞一, 吕现福, 蒋建建, 段逸凡. 土壤 CO_2 及岩溶碳循环影响因素综述[J]. 生态学报, 2015(13): 4257-4264.
ZHAO Ruiyi, LV Xianfu, JIANG Jianjian, DUAN Yifan. Factors affecting soil CO_2 and karst carbon cycle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015(13): 4257-4264.
- [10] 施晓, 杨琰, 李一冬, 田宁, 叶枝茂, 李建仓, 段军伟. 岩溶关键带土壤-洞穴系统 CO_2 运移的时空变化: 以河南鸡冠洞为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 580-591.
SHI Xiao, YANG Yan, LI Yidong, TIAN Ning, YE Zhimao, LI Jiancang, DUAN Junwei. Analysis of temporal and spatial variations of CO_2 migration in the soil cave system in karst critical zone: A case study of Jiguan cave, western Henan[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 580-591.
- [11] 蓝芙宁, 王文娟, 吴华英, 蒋忠诚, 覃小群, 安树青. 不同土地利用方式下土壤 CO_2 时空分布特征及其影响因素: 以湘西大龙洞地下河流域为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(4): 427-432.
LAN Funing, WANG Wenjuan, WU Huaying, JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, AN Shuqing. Temporal and spatial

- distributions of CO₂ in soil and their influencing factors under different LUCC: A case study of the Dalongdong underground river drainage area[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(4): 427-432.
- [12] Romero Mujalli G, Hartmann J, Börker J, Gaillardet J, Calmels D. Ecosystem controlled soil-rock pCO₂ and carbonate weathering—constraints by temperature and soil water content[J]. *Chemical Geology*, 2019, 527: 118634.
- [13] 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 姜光辉. 不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响[J]. *地球与环境*, 2004, 32(1): 90-96.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing, JIANG Guanghui. Influence of soil carbon transfer under different vegetations on carbon cycle of karst dynamics system[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 90-96.
- [14] Berner R A. Weathering, plants, and the long-term carbon cycle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 3225-3231.
- [15] 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 姜光辉, 邓艳. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究[J]. *生态学报*, 2004, 24(6): 1131-1139.
LI Enxiang, JIANG Zhongcheng, CAO Jianhua, JIANG Guanghui, DENG Yan. The comparison of properties of karst soil and karst erosion ratio under different successional stages of karst vegetation in Nongla, Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1131-1139.
- [16] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. *科学通报*, 2011, 56(26): 2174-2180.
- [17] 王冬银, 章程, 谢世友, 杨平恒, 张文晖. 亚高山不同植被类型区的雨季岩溶溶蚀速率研究[J]. *地球学报*, 2007, 28(5): 488-495.
WANG Dongyin, ZHANG Cheng, XIE Shiyu, YANG Pingheng, ZHANG Wenhui. Karst dissolution rates of areas with different vegetation types in the sub-mountain region[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(5): 488-495.
- [18] 柯静, 邓艳, 岳祥飞, 梁锦桃, 李旭尧, 曹建华, 吴松. 典型岩溶断陷盆地溶蚀速率对海拔高度和土地利用方式的响应[J]. *地球学报*, 2021, 42(3): 407-416.
KE Jing, DENG Yan, YUE Xiangfei, LIANG Jintao, LI Xuyao, CAO Jianhua, WU Song. The response of the karst dissolution rate to altitude and land use types in typical karst faulted basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(3): 407-416.
- [19] 章程, 李玉辉, 汪进良, 苗迎, 肖琼, 郭永丽. 云南石林地质公园土岩、土根界面过程和土下溶蚀速率[J]. *地质论评*, 2020, 66(4): 1019-1030.
ZHANG Cheng, LI Yuhui, WANG Jinliang, MIAO Ying, XIAO Qiong, GUO Yongli. Interface processes at soil-rock, soil-root contacts and subsoil dissolution rate in Shilin Geopark, Yunnan[J]. *Geological Review*, 2020, 66(4): 1019-1030.
- [20] 刘文, 张强, 贾亚男. 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1418-1428.
LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Ya'nan. The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer and winter in a typical karst valley[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1418-1428.
- [21] 王冬银, 谢世友, 章程. 典型岩溶区不同土地利用方式下雨季、旱季岩溶作用研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2366-2372.
WANG Dongyin, XIE Shiyu, ZHANG Cheng. Impact of land-use patterns upon karst processes in typical karst regions of Jinpo Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2366-2372.
- [22] 侯满福, 覃小群, 黄奇波, 邓艳, 刘朋雨. 半干旱岩溶区油松林显著促进碳酸盐岩溶蚀[J]. *地球学报*, 2022, 43(4): 472-482.
HOU Manfu, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, DENG Yan, LIU Pengyu. Pinus tabuliformis forests in semi-arid areas significantly enhance carbonate rock dissolution[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, 43(4): 472-482.
- [23] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲. 植物群落清查的主要内容, 方法和技术规范[J]. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
FANG Jingyun, WANG Xiangping, SHEN Zehao, TANG Zhiyao, HE Jinsheng, YU Dan, JIANG Yuan, WANG Zhiheng, ZHENG Chengyang, ZHU Jiangling. Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17(6): 533-548.
- [24] Krklec K, Domínguez-Villar D, Perica D. Use of rock tablet method to measure rock weathering and landscape denudation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 103449.
- [25] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 唐萍萍. 北方不同植被下土壤岩石试片的溶蚀速率及碳汇分析: 以山西汾阳地区为例[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(3): 258-265.
HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, TANG Pingping. Analysis on tablets dissolution rate and carbon sink under different vegetation in North China karst area: A case study of Fenyang, Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(3): 258-265.
- [26] 姜鑫, 黄先飞, 秦樊鑫, 张珍明. 不同土地利用方式下喀斯特地区岩石溶蚀速率及其驱动因素[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2020, 35(5): 899-905.
JIANG Xin, HUANG Xianfei, QIN Fanxin, ZHANG Zhenming. Rock dissolution rate and soil properties of karst soil under different land use ways[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 35(5): 899-905.
- [27] Zhou Y C, Wang S J, Lu H M, Xie L P, Xiao D A. Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outcrops: Example from SW China[J]. *Acta Carsologica*, 2010, 29: 115-122.
- [28] 周宁, 刘波. 鄂西南岩溶地区表层岩溶带发育强度变化规律研究[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(1): 1-6.

- ZHOU Ning, LIU Bo. Varying regulation of epikarst developing intensity in southwest Hubei karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(1): 1-6.
- [29] Wang C W, Li W, Shen T M, Cheng W L, Yan Z, Yu L J. Influence of soil bacteria and carbonic anhydrase on karstification intensity and regulatory factors in a typical karst area[J]. *Geoderma*, 2018, 313: 17-24.
- [30] 黄其成, 马姜明. 桂林岩溶石山“风水林”植物群落数量分类与排序[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(11): 2324-2330.
- HUANG Qicheng, MA Jiangming. Classification and ordination of Fengshui Woods on karst hills of Guilin[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(11): 2324-2330.
- [31] 巩书华, 朱丽芬. 湘西北地质地貌特征对岩溶石漠化影响研究: 以张家界市为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 504-512.
- GONG Shuhua, ZHU Lifan. Influence of geological and geomorphologic features on karst rocky desertification in northwestern Hunan Province: A case study of Zhangjiajie City[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 504-512.
- [32] 盘远方, 陈兴彬, 姜勇, 梁士楚, 陆志任, 黄宇欣, 倪鸣源, 覃彩丽, 刘润红. 桂林岩溶石山灌丛植物叶功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1581-1589.
- PAN Yuanfang, CHEN Xingbin, JIANG Yong, LIANG Shichu, LU Zhiren, HUANG Yuxin, NI Mingyuan, QIN Caili, LIU Runhong. Changes in leaf functional traits and soil environmental factors in response to slope gradient in karst hills of Guilin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1581-1589.
- [33] 王轶浩, 王彦辉, 谢双喜, 于澎涛, 熊伟, 郝佳. 六盘山小流域地形、植被特征与土壤水文物理性质的关系[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 145-151.
- WANG Yihao, WANG Yanhui, XIE Shuangxi, YU Pengtao, XIONG Wei, HAO Jia. Relationships of landform and vegetation characters with soil hydrophysical properties in a small watershed of Liupan Mountains, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 145-151.
- [34] 闫伟, 曾成, 肖时珍, 蓝家程, 代林玉, 郜洽钦, 何江湖, 何春, 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, DAI Linyu, TAI Zhiqin, HE Jianghu, HE Chun, 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.
- [35] 张鹏飞, 王融融, 戴燕燕, 李强, 马延东, 赵景波. 山西榆次不同植被土壤水分有效性及干燥化效应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 192-198.
- ZHANG Pengfei, WANG Rongrong, DAI Yanyan, LI Qiang, MA Yandong, ZHAO Jingbo. Soil moisture availability and soil desiccation under different vegetation conditions in Yuci, Shanxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 192-198.
- [36] 孙平安, 肖琼, 郭永丽, 苗迎, 王奇岗, 章程. 混合岩溶流域碳酸盐岩溶蚀速率与岩溶碳汇: 以漓江流域上游为例[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(5): 825-834.
- SUN Ping'an, XIAO Qiong, GUO Yongli, MIAO Ying, WANG Qigang, ZHANG Cheng. Carbonate dissolution rate and karst carbon sink in mixed carbonate and silicate terrain: Take the upper reaches of the Lijiang river basin as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(5): 825-834.
- [37] 李涛, 赵东兴, 张美良, 曹建华, 朱晓燕. 土壤CO₂、土壤水的动态特征及其对岩溶作用的驱动[J]. *热带地理*, 2013, 33(5): 575-581.
- LI Tao, ZHAO Dongxing, ZHANG Meiliang, CAO Jianhua, ZHU Xiaoyan. Dynamic characteristics of the soil CO₂ and soil water chemistry, and their driving action on karstification[J]. *Tropical Geography*, 2013, 33(5): 575-581.
- [38] 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 Ya'nan. Karstification under different land-use patterns in summer: A case study in the Qingmuguan karst valley, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(1): 1-6.
- [39] Wu Z Y, Zhang C, Jiang Z C, Luo W Q, Xiao Q, Hu Z X, Wu H Y. Subsoil carbonate dissolution rates and their determining factors in a karst drainage basin, SW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(22): 508.
- [40] 高宗军, 张洪英, 李伟, 刘新刚, 韩宝莹, 时孟杰, 牟林凯. 土壤CO₂浓度变化特征及其水文地质意义研究[J]. *地下水*, 2017, 39(3): 136-139.
- GAO Zongjun, ZHANG Hongying, LI Wei, LIU Xingang, HAN Baoying, SHI Mengjie, MOU Linkai. Analysis of vertical profiles of soil CO₂ with different depths and its hydro-geological significance[J]. *Ground Water*, 2017, 39(3): 136-139.
- [41] 王根绪, 夏军, 李小雁, 杨达, 胡兆永, 孙守琴, 孙向阳. 陆地植被生态水文过程前沿进展: 从植物叶片到流域[J]. *科学通报*, 2021, 66(28-29): 3667-3683.
- WANG Genxu, XIA Jun, LI Xiaoyan, YANG Da, HU Zhaoyong, SUN Shouqin, SUN Xiangyang. Critical advances in understanding ecohydrological processes of terrestrial vegetation: From leaf to watershed scale[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(28-29): 3667-3683.
- [42] Wen H, Sullivan P L, Macpherson G L, Billings S A, Li L. Deepening roots can enhance carbonate weathering by amplifying CO₂-rich recharge[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(1): 55-75.
- [43] 邓艳, 蒋忠诚, 徐焯, 岳祥飞, 李旭尧, 梁锦桃. 典型表层岩溶泉域植被对降雨的再分配研究[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5): 714-721.
- DENG Yan, JIANG Zhongcheng, XU Ye, YUE Xiangfei, LI Xuyao, LIANG Jintao. Redistribution of precipitation by vegetation and its ecohydrological effects in a typical epikarst spring catchment[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 714-721.
- [44] 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(1): 2-9.
- WANG Shijie, LIU Zaihua, NI Jian, YAN Junhua, LIU Xiuming. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of South China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(1): 2-9.
- [45] 罗美, 周运超, 唐风华. 不同植被下碳酸盐岩石发育形成土壤属性研究[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(2): 277-289.
- LUO Mei, ZHOU Yunchao, TANG Fenghua. Soil properties of carbonate rocks under different vegetation types[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 277-289.
- [46] 龙健, 吴求生, 李娟, 廖洪凯, 刘灵飞, 黄博聪, 张菊梅. 贵州茂兰喀斯特森林不同小生境类型对岩石溶蚀的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 151-161.
- LONG Jian, WU Qiusheng, LI Juan, LIAO Hongkai, LIU Lingfei, HUANG Bocong, ZHANG Jumei. Effects of different microhabitat types on rock dissolution in Maolan karst forest, Southwest China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 151-161.
- [47] 张川, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 叶莹莹, 王克林. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1585-1591.
- ZHANG Chuan, CHEN Hongsong, ZHANG Wei, NIE Yunpeng, YE Yingying, WANG Kelin. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on karst slopes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1585-1591.

Influence of forest types and slope positions on dissolution rates of carbonate rocks in the karst area in subtropical China

HOU Manfu^{1,2}, LIU Yuting^{1,2}, ZHANG Jie³, HE Luyan^{1,4}, LIANG Jiangyi¹

(1. College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education(Guangxi Normal University), Guilin, Guangxi 541004, China; 3. School of Geography and Resource Science of Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100, China; 4. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102, China)

Abstract Carbonate rock weathering has great carbon sink potential. Vegetation is an important driven factor of carbonate rock dissolution. However, the relationship between vegetation types and carbonate weathering is still left unknown. In order to reveal the effects of forest types on carbonate rock weathering, the dissolution rates of carbonate rocks at different slope positions in two typical subtropical karst forests were compared in details based on the in-situ dissolution tests of standard rock test pieces, and the corresponding relationship between the rates and soil CO₂ content (pCO₂) and soil water content (SWC) were analyzed based on seasonal measured data.

The study area is located in the suburb of Guilin, South China, which has a subtropical seasonal climate with an average annual temperature of 20.2 °C and an average annual precipitation of 1,996.0 mm. Precipitation is concentrated from April to September, synchronous with the high temperature in summer. The landforms of peak cluster depressions and peak forest plain around the study area are the most typical in the world and were added to the UNESCO's World Heritage List in 2014. Stretching from the foot to the place near the peak of limestone hills, *Cyclobalanopsis glauca* forest and *Platycarya strobilacea* forest, the representatives of subtropical karst forests, were selected as research objects in the study area. The community dominated by *C. glauca* is widely distributed in the karst region of N25°-N31° and E105°-E120°, and is the most important climax community in the subtropical karst region of China. *P. strobilacea* is one of the most common dominant species or constructive species in evergreen and deciduous broad-leaved forests, forming a more widely distributed forest type than *C. glauca* forest in the subtropical karst area.

Standard rock test pieces were respectively placed in the air 100 cm above ground, on the surface of soil, -20 cm, -50 cm, and -70 cm (if possible) in the soil of downhill slope, middle hill slope and uphill slope from 30/11/2014 to 17/12/2017 in each forest type. The soil pCO₂ and SWC of each test place were measured seasonally.

The results show that the dissolution rate of carbonate rock in *C. glauca* forest (5.22 ± 0.99 mg·cm⁻²·a⁻¹) was significantly higher than that in *P. strobilacea* forest (3.58 ± 2.59 mg·cm⁻²·a⁻¹). In vertical profile, the dissolution rate under soil experienced a decrease after an increase, peaking at 20 cm below ground in *C. glauca* forest while the rate kept rising with the increase of soil depth in *P. strobilacea* forest. The differential of dissolution rates did not show

consistency at different slope positions of the two forest types. There was no significant difference in rates at three slope positions in *C. glauca* forest, but the rate was significantly higher on the middle slope than those on the upper and down slopes in *P. strobilacea* forest. The dissolution rates of the two forests well corresponded to their SWC, but were opposite with their soil $p\text{CO}_2$. The dissolution rates at different slope positions and in vertical profiles well corresponded to soil $p\text{CO}_2$.

There are significant differences in dissolution rates among different forest types in the subtropical karst area, which can be explained by SWC. There is not a consistent pattern on dissolution rates of slope positions between the two forest types, but their differences could be explained by soil $p\text{CO}_2$. Our results highlight the importance of distinguishing the influence of community types, their SWC and soil $p\text{CO}_2$ on dissolution rates of carbonate rock in the subtropical karst area.

Key words standard tablet, carbonate weathering, dissolution rate, forest type, carbon sink

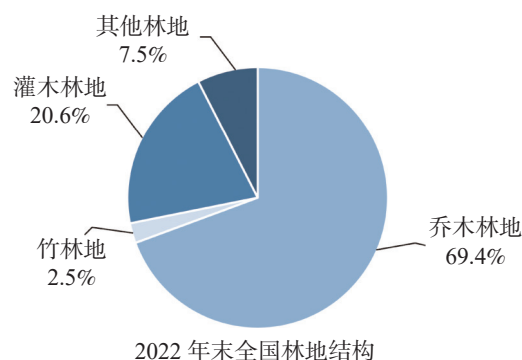
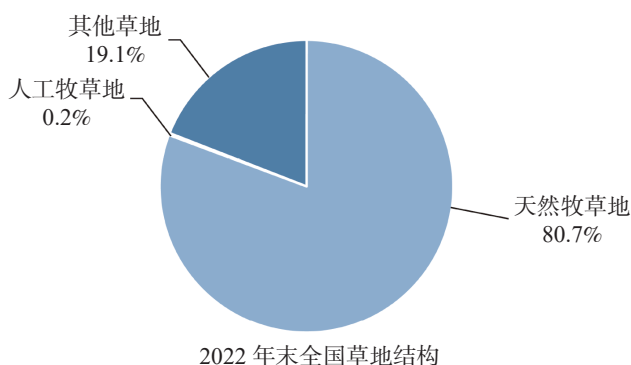
(编辑 黄晨晖)

我国森林资源概况

2022 年度全国国土变更调查初步汇总结果显示, 全国共有林地 28 352.7 万公顷。其中, 乔木林地 19 675.2 万公顷, 竹林地 699.1 万公顷, 灌木林地 5 841.3 万公顷, 其他林地 2 137.1 万公顷。

2022 年, 造林任务首次实现带位置上报、带图

斑下达。全年共完成造林面积 383.0 万公顷, 其中人工造林面积 120.1 万公顷, 占全年造林面积的 31.4%; 种草改良面积 321.4 万公顷, 其中人工种草 120.4 万公顷, 草原改良面积 201.0 万公顷。



——据《2022 年中国自然资源统计公报》