

半干旱岩溶区油松林显著促进碳酸盐岩溶蚀

侯满福¹⁾, 覃小群²⁾, 黄奇波²⁾, 邓艳^{2)*}, 刘朋雨²⁾

1) 广西师范大学, 环境与资源学院/珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西桂林 541004;

2) 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,

自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004

摘 要: 植被覆盖通过促进碳酸盐岩风化吸收大气 CO₂, 在实现碳中和中具有重要作用, 但不同植被类型的影响强度仍不清楚。为揭示半干旱区植被类型对碳酸盐岩风化的影响规律, 以一个典型岩溶小流域为研究区, 通过系统的植被调查和野外溶蚀试片试验, 详细对比了不同植物群系的碳酸盐岩溶蚀率及其影响因素, 并探讨了不同分类层次植被的溶蚀率的差异。结果表明, 半干旱岩溶区碳酸盐岩溶蚀率在植被型组层次为森林>草地>灌丛, 在演替的早期减弱、后期促进溶蚀; 群系层次的对比发现油松(*Pinus tabulaeformis*)林内碳酸盐岩溶蚀率最高, 是其它群系的 5 倍至近 30 倍; 不同群系对溶蚀率的影响强度的大小得以明确; 溶蚀率与土壤 CO₂ 浓度(pCO₂)、土壤温度和土壤含水量任何单一因素无相关性, 而与三者匹配性有较好的对应关系, 与湿润区明显不同; 植被演替通过增强对溶蚀环境因子匹配性的调控能力, 促进碳酸盐岩的溶蚀。半干旱区油松林显著促进碳酸盐岩溶蚀, 进行群系层次的广泛对比研究可以更好揭示植被类型与碳酸盐岩溶蚀之间的关系, 为提高岩溶生态系统恢复的碳汇量提供有效指导。

关键词: 碳酸盐岩风化; 植被类型; 溶蚀率; 碳汇; 半干旱岩溶区

中图分类号: P642.252 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.030101

Pinus tabulaeformis Forests in Semi-arid Areas Significantly Enhance Carbonate Rock Dissolution

HOU Man-fu¹⁾, QIN Xiao-qun²⁾, HUANG Qi-bo²⁾, DENG Yan^{2)*}, LIU Peng-yu²⁾

1) School of Environment and Resources/Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004;

2) Institute of Karst Geology, Chinese Academic of Geological Science/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Treatment, Ministry of Natural Resources/Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi 541004

Abstract: Vegetation increases atmospheric CO₂ sequestration by enhancing carbonate rock weathering and plays an important role in carbon neutralization. However, the effects of different vegetation types on carbonate weathering are unclear. To determine these effects, the dissolution rates and their influencing factors in different vegetation alliances were compared in detail using in situ rock tablets tests coupled with systematic vegetation surveys in a typical small karst watershed in a semi-arid area. The results showed that the average dissolution rate of carbonate rocks was in the order of forest > grassland > shrubland at the Vegetation Formation Group level, showing a weakening effect in the early stage of succession and a promoting effect in the later stage. At a finer vegetation classification level, the dissolution rate of the *Pinus tabulaeformis* Forest Alliance was much higher than that of other alliances, which was five times to approximately thirty times that of other alliances, and the effect

本文由国家自然科学基金(编号: 31960233)、广西重点研发计划项目(编号: 桂科 AB19110004)、中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011087121)和广西重点基金项目(编号: 2018GXNSFDA281036)联合资助。

收稿日期: 2021-12-03; 改回日期: 2022-02-28; 网络首发日期: 2022-03-03。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 侯满福, 男, 1976 年生。博士, 副教授。主要从事岩溶生态学研究。通讯地址: 541004, 广西桂林市育才路 15 号。

E-mail: houmanfu@163.com。

*通讯作者: 邓艳, 女, 1978 年生。博士, 研究员。主要从事岩溶环境学研究。E-mail: dydesk@163.com。

intensity of different alliances on dissolution rate could be identified and sorted. The dissolution rate had no correlation with any single factor in soil CO_2 concentration ($p\text{CO}_2$), soil water content, and soil temperature but had a corresponding relationship with the synchronization of the three factors, which differed notably from that in humid areas. Vegetation succession enabled more effective regulation of key dissolution factor matching, resulting in higher weathering rate. *Pinus tabulaeformis* forest in semi-arid areas could significantly enhance carbonate weathering. Extensive comparative research at the Alliance level is strongly suggested to illuminate the relationship between vegetation types and carbonate weathering and provide effective guidance for increasing carbon sinks in karst ecosystem restoration.

Key words: carbonate weathering; vegetation type; dissolution rate; carbon sink; semi-arid karst area

降低人类活动的碳排放、实现碳中和是全球应对气候变化的共同目标。人类活动每年排放的 CO_2 中,有 30%被陆地生态系统固定,5%被碳酸盐岩风化吸收(Liu et al., 2018; Friedlingstein et al., 2020),对缓解全球气候变化具有巨大贡献。陆地生态系统恢复可以增加植被和土壤碳汇,并与碳酸盐岩风化密切相关(Cao et al., 2012; Liu et al., 2018; Bastin et al., 2019; Kang et al., 2020)。水化学监测、水生生态系统调查、同位素示踪等研究表明,碳酸盐岩风化吸收的大气 CO_2 以溶解有机碳(DIC)的形式进入水体,促进了水生生物的光合作用,并在水下沉积物中形成稳定的碳存储(Liu Y et al., 2010; Liu Z H et al., 2010; Cao et al., 2018; Zhao et al., 2020)。据估算,全球岩溶作用碳汇通量可达森林碳汇通量的 31.18%~34.41%,中国的岩溶作用碳汇通量高达森林碳汇通量的 68%(Cao et al., 2018)。植被覆盖显著增加了输入水体的 DIC(覃小群等, 2011; Xiao et al., 2021),岩溶区植被恢复将进一步增加岩溶地质碳汇量。我国岩溶面积达 344 万 km^2 ,生态退化和石漠化广泛发生(Jiang et al., 2014),生态系统恢复具有巨大需求,由此产生的植被、土壤和岩溶地质碳汇在实现碳中和中将发挥重要作用(蒋忠诚等, 2012; 王世杰等, 2017)。

植被覆盖条件是影响碳酸盐岩风化速率复杂而又十分重要的因素(Berner, 1997; 曹建华等, 2004)。有很多研究对比了不同植被类型对碳酸盐岩溶蚀的影响,发现植被覆盖促进了溶蚀(Zeng et al., 2017),且随着植被正向演替促进作用不断增强(李恩香等, 2004; 吴孔运等, 2007; 黄奇波等, 2013)。例如,演替顶极森林群落内的溶蚀率可达演替早期草丛的 2~4 倍(李恩香等, 2004),次生林的 3 倍,灌丛的 9 倍,耕地的 15 倍以上(Zhang, 2011)。这展现了通过改善植被条件增加岩溶地质碳汇的广阔前景(蒋忠诚等, 2012; Cao et al., 2018)。然而,溶蚀率并不总是随植被正向演替而增加,存在相当部分森林或灌丛低于草地的情况(王冬银等, 2007; 章程等,

2020; 柯静等, 2021)。这种矛盾的结果还没有相关探讨和合理的解释。已开展的研究对植被类型的划分比较简单,仅大致分为森林、灌丛和草地,相当于植被分类的最高级单元植被型组(郭柯等, 2020),且多选择某个植被类型作为代表。这预设了森林/灌丛/草地中的不同群落类型对碳酸盐岩溶蚀的影响强度大体相同为前提。实际上岩溶植被具有复杂多样的群落类型组成(刘长成等, 2021),选择某个类型代表高级单元对结果造成何种影响仍不清楚,而且研究植被的简单划分无法回答何种类型的植被可以更好促进溶蚀,增加岩溶地质碳汇。此外,当前研究主要集中在南方湿润区,广大的北方半干旱岩溶区存在怎样的影响规律缺乏认识。以上问题都需要从更详细的植被分类层次进行研究和确认。

因此,我们选择一个完整的流域,通过系统的植被调查和溶蚀试片对比实验,旨在验证(1)半干旱岩溶区植被对溶蚀率有怎样的影响规律?(2)在植被分类更详细的群系层次这种规律有何不同?(3)造成这种不同的可能因素是什么?希望通过本研究为更好地理解植被条件与碳酸盐岩溶蚀之间的关系,以及岩溶区植被恢复中通过树种选择实现最佳的植被、土壤和岩溶地质综合碳汇效应提供探索方向。

1 研究区概况

马跑神泉流域位于吕梁山南段东南侧、晋中盆地西南,地理坐标 $111^\circ 25' 40''\text{E}$ — $112^\circ 00' 00''\text{E}$, $37^\circ 19' 26''\text{N}$ — $37^\circ 29' 02''\text{N}$,流域面积 212.06 km^2 。该区域属温暖大陆性气候,多年平均气温 11.11°C ,多年平均降水量 444 mm ,降雨集中在 6—9 月,其中 7—8 月降水约占年降水量的 40%,是典型的半干旱岩溶流域。流域西北为山区,主要出露寒武—奥陶系碳酸盐岩,向东南海拔渐低,过渡为第四纪黄土丘陵区,土壤主要为淋溶褐土和褐土性土。森林覆盖率 57.58%,灌丛面积占 34.34%。森林主要分布在流域北侧白虎岭林场范围的山区,灌丛主要分布于

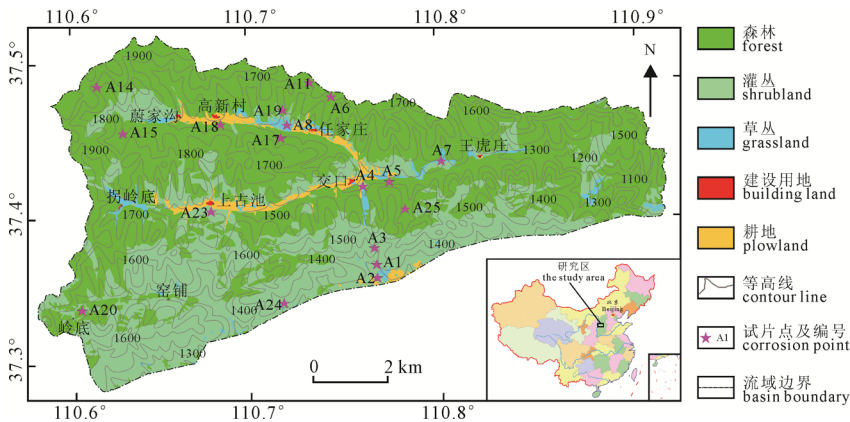


图 1 研究区内实验点的植被和土地利用分布示意图
Fig. 1 Vegetation and land use types of dissolution test spots in the study area

山地向丘陵过渡的山坡、阶地及山沟边和坡脚，草本植被零星分布于山谷河沟附近平地，山谷内有少量居民点和耕地(图 1)。由于山区劳动人口的外迁，流域植被处于恢复过程中，形成以油松(*Pinus tabulaeformis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、茶条槭(*Acer tartaricum*)、槲树(*Quercus dentata*)等构成的纯林或混交林，其中油松纯林分布面积最大，以油松与蒙古栎、山杨等组成的针叶与阔叶混交林其次，蒙古栎、山杨等阔叶林较少。灌丛则以黄刺玫(*Rosa xanthina*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)分布最广泛，沙棘和紫丁香较少。

2 研究方法

2.1 植物群落调查与实验点选择

参照方精云等(2009)提出的群落清查规范，于 2011 年 7 月选择典型地段开展样地调查，共计调查样地 63 个。依据群落学—生态学原则和最新修订的中国植被分类系统(郭柯等, 2020)，将自然植被划分为 3 个植被型组、6 个植被型、24 个群系。根据分布面积选择其中 15 个群系的代表性样地设置了 28 个溶蚀试片实验点，根据试片回收情况选择其中 18 个点进行对比分析，其分布示意图如图 1，环境信息如表 1。

表 1 溶蚀试片实验点植被、自然环境及溶蚀试片主要化学组成其特点
Table 1 Characteristics of vegetation cover, chemical composition of rock tablets, and natural environment of test sites

编号	植被类型	出露地层	土壤类型	海拔/m	坡度	坡向	坡位	试片 CaO/MgO 含量/%
A1	荆条灌丛(VNH)	O ₁	褐土性土	1235	20°	110°	中下	40.22/11.56
A2	黄刺玫灌丛(RX)	Є ₂	淋溶褐土	1180	35°	181°	中	51.65/2.03
A3	黄刺玫灌丛(RX)	O _{2x}	褐土性土	1354	15°	250°	中	47.92/5.81
A4	华北落叶松林(LG)	O ₁	淋溶褐土	1420	15°	346°	下	40.22/11.56
A5	油松+蒙古栎林(P+Q)	Є _{2z}	淋溶褐土	1402	5°	310°	下	51.65/2.03
A6	蒙古栎林(QM)	O _{2x}	淋溶褐土	1708	25°	245°	上	51.65/2.03
A7	亚柄盖草草地(CLS)	Є _{2z}	淋溶褐土	1325	—	—	沟边	51.65/2.03
A8	肥披碱草草地(EE)	Є ₃	淋溶褐土	1476	—	—	沟边	30.90/15.08
A11	油松林(PT)	O _{2x}	淋溶褐土	1750	20°	180°	上	47.92/5.81
A14	蒙古栎+白桦林(Q+B)	O _{2x}	淋溶褐土	1840	17°	20°	中	47.92/5.81
A15	沙棘灌丛(HR)	O _{2x}	淋溶褐土	1713	—	92°	沟边	47.92/5.81
A17	油松林(PT)	O ₁	淋溶褐土	1570	15°	280°	下	40.22/11.56
A18	油松+蒙古栎林(P+Q)	Є ₃	淋溶褐土	1570	20°	255°	下	30.90/15.08
A19	油松林(PT)	O _{2x}	淋溶褐土	1557	13°	270°	中下	47.92/5.81
A20	油松+蒙古栎林(P+Q)	O _{2x}	石灰性褐土	1530	20°	140°	中下	47.92/5.81
A23	紫丁香灌丛(SO)	Є ₃	淋溶褐土	1544	23°	0°	下	30.90/15.08
A24	紫丁香灌丛(SO)	Є ₃	褐土性土	1316	40°	46°	中下	30.90/15.08
A25	茶条槭林(AT)	O _{2x}	淋溶褐土	1448	3°	2°	下	47.92/5.81

注: PT—*P. tabulaeformis* Evergreen Needleleaf Forest Alliance; P+Q—*P. tabulaeformis* + *Q. mongolica* Mixed Needleleaf and Broadleaf Forest Alliance; QM—*Q. mongolica* Deciduous Broadleaf Forest Alliance; Q+B—*Q. mongolica* + *B. platyphylla* Deciduous Broadleaf Forest Alliance; AT—*Acer tartaricum* Deciduous Broadleaf Forest Alliance; RX—*R. xanthina* Deciduous Broadleaf Shrubland; SO—*Syringa oblata* Deciduous Broadleaf Shrubland; VNH—*Vitex negundo* var. *heterophylla* Deciduous Broadleaf Shrubland; HR—*Hippophae rhamnoides* Deciduous Broadleaf Shrubland; CLS—*Carex lanceolata* var. *subpediformis* Forb Grassland; EE—*Elymus excelsus* Forb Grassland.

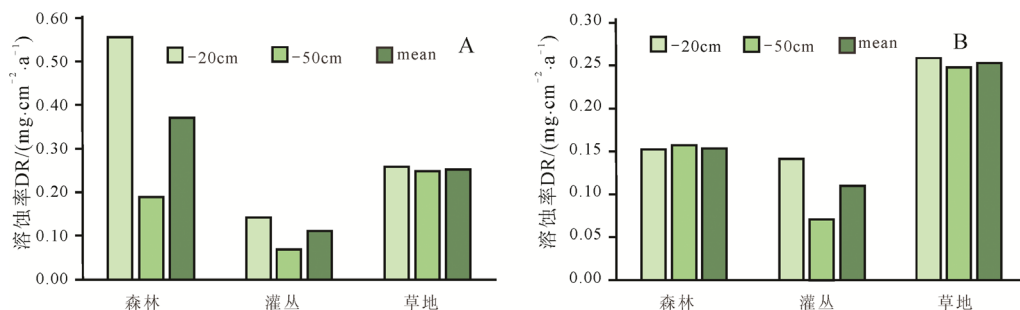


图2 森林计入(A)/不计入(B)油松林时植被型组之间的溶蚀率对比

Fig. 2 Dissolution rate between vegetation formation groups including (A) and excluding (B) *Pinus tabulaeformis* Forest Alliance

间的差异平缓化有关。

溶蚀率在草地各类型间差异较小($(0.25\pm0.04) \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),在灌丛各类型间差异稍大但都很低($(0.11\pm0.07) \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),在森林各类型间的差异明显增大($(0.37\pm0.71) \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),溶蚀率最高和最低的森林相差约10倍(不计发生沉积的类型),表明森林对碳酸盐岩溶蚀的影响显著强于灌丛和草地。

随着研究植被划分趋向详细,不同植被类型间溶蚀率的差异突显,油松林显著高于其他类型的溶蚀率得以识别出来;同时植被型组、植被型等高级分类单元较高的溶蚀率主要由于油松林的溶蚀贡献也得以揭示。当森林植被型组中不计入油松林时,其溶蚀率小得多,三种植被型组溶蚀率的顺序将变为草地>森林>灌丛(图2B),可见研究的植被是否选择油松林为代表将产生截然不同的结果。

3.2 影响溶蚀的因素特征

在代谢旺盛的夏季,半干旱区土壤 CO_2 相对浓度随深度呈抛物线形变化,峰值在土下40 cm处。从实测值看,森林、灌丛和草地的土壤 $p\text{CO}_2$ 峰值分别在土下40 cm、60 cm和70 cm;土壤 $p\text{CO}_2$ 随深度的变化森林最平缓,灌丛其次,草地最剧烈,三者土壤表层10 cm深度的 $p\text{CO}_2$ 分别为深层峰值的73.44%、42.39%和38.70%(图3A, B)。土壤 $p\text{CO}_2$ 表现出随植被复杂程度增加而降低、峰值向表层上移、变动幅度变弱、表层与深层间的差距变小的规律,显示植被演替对其产生了调控。土壤含水率随深度单调递减,不同植被类型间为灌丛>森林>草地,但表层土(0–20 cm)为森林>灌丛>草地(图3C, D)。土壤温度随深度呈直线下降关系,大体上草地>灌丛>森林,但在0–20 cm表层,灌丛土壤温度最高,草地其次,森林最低(图3E, F)。这种规律显示森林对土壤湿度和温度有更强的调控能力,使表土层湿度更高, $p\text{CO}_2$ 更接近峰值。

相关分析表明,在植被型组之间和群系之间,溶蚀率与土壤 $p\text{CO}_2$ 、土壤含水量、土壤温度的相关

性均不显著。草地的土壤 $p\text{CO}_2$ 最高,土壤温度也较高,但只产生中等程度的溶蚀。从三者的匹配程度看,森林土下20–50 cm范围 $p\text{CO}_2$ 处于峰值附近,土壤含水量和温度下降还不明显,也处于峰值附近,匹配较好(图4A),溶蚀率最高;草地土壤表层含水率接近峰值,但 $p\text{CO}_2$ 最小,而在含水率和 $p\text{CO}_2$ 均处于峰值附近的土下50–80 cm区间,温度又较低,匹配性也不如森林(图4C),溶蚀率居于其次;灌丛在温度较高的土壤表层, $p\text{CO}_2$ 远低于峰值,三者的匹配程度最差(图4B),溶蚀率最低。土壤 $p\text{CO}_2$ 、含水量与温度三者的匹配程度与溶蚀率有较好的对应性。

不同出露地层的碳酸盐岩化学成分存在差异(表1),也是影响溶蚀率的一个因素。当植被类型相同时,在溶蚀率较高时不同岩性间的溶蚀率才表现出显著差异,并随CaO含量增加而增加,在溶蚀率较低时岩性的影响不明显,且溶蚀率随CaO含量增加而降低(表1,图5A)。同一地层试片的各种群系类型溶蚀率的变化规律与不考虑试片化学成分时相似(图5B,表2),表明试片的化学成分不影响植被类型间溶蚀率的变化规律。

4 讨论

4.1 植被类型对碳酸盐岩溶蚀率的影响

本文研究揭示,在半干旱区碳酸盐岩溶蚀率森林>草地>灌丛,表现出植被正向演替前期减弱、后期促进溶蚀的规律(图2A)。这证实了以前的大部分研究结果(李恩香等,2004;吴孔运等,2007;黄奇波等,2013),但在演替早期的灌草阶段支持了相反的一些研究结果(Zhang, 2011; Zeng et al., 2017; 姜鑫等,2020;柯静等,2021)。本文群系层次的研究进一步揭示不同群系间的溶蚀率存在显著差异,并没有确定的规律(表2)。这为以往植被型组层次的研究中植被演替与溶蚀率之间的矛盾关系提供了一种可能的解释,即这种矛盾可能是由于被选作代表的低级植被分类单元间固有的溶蚀率差异所致。例如在本

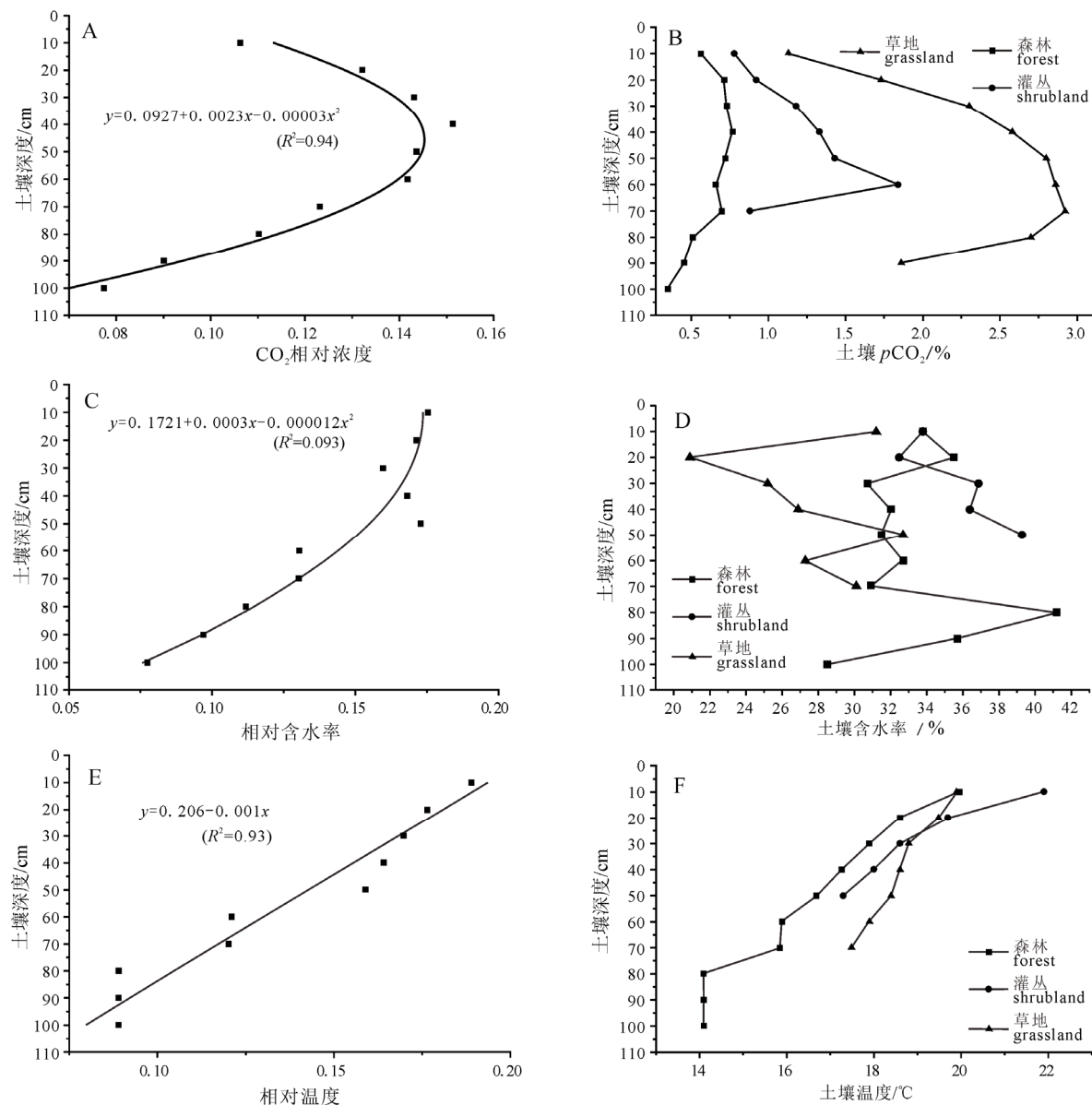


图3 半干旱区土壤 pCO_2 、含水率、温度垂直剖面趋势及其在森林、灌丛和草地间的对比
 Fig. 3 Vertical profile trends of soil pCO_2 (A, B), soil water content (C, D), and soil temperature (E, F), and its comparison in forest, shrubland, and grassland in a semi-arid karst area

研究中,当选择紫丁香群落代表灌丛、蒙古栎林或华北落叶松林代表森林时,将会得出溶蚀随植被正向演替减弱的结论,当选择油松林或茶条槭林代表森林时,才能得出植被正向演替前期减弱、后期促进溶蚀的结论。此外,当选择油松林代表森林时将导致溶蚀率偏高 5~10 倍,而当选择蒙古栎+白桦林时将得到森林溶蚀小于沉积、产生净沉积的结果。根据这种植被选择产生的偏差估算的岩溶地质碳汇量也必然产生显著偏差,需要引起充分注意。

群系层次的对比研究还发现,油松林的溶蚀率远高于其他各类植被(表 2)。这对半干旱岩溶区植被恢复、森林经营与固碳结合具有重要的实际意义。半干旱岩溶区发展油松林将成倍增加岩溶地质碳汇。由此可见,群系层次的溶蚀率对比研究能帮助我们发现对溶蚀促进效果最显著、岩溶地质碳汇效

应最大的植被类型,也能识别促进效果不好,甚至减弱溶蚀的类型,对构建更大碳汇量的植被恢复途径具有实际指导作用。

4.2 半干旱区溶蚀环境因子与覆盖植被的相关性

本文研究显示,在半干旱区不管是植被型组层次还是群系层次,碳酸盐岩溶蚀率与土壤 pCO_2 、土壤含水量和土壤温度的相关性都不显著,而与三者的匹配性有较好的对应关系。这与湿润区溶蚀率与土壤 pCO_2 、土壤含水量和温度强烈正相关的研究结果均不相同(何师意等, 1997; 刘再华等, 1998; Kirstein et al., 2016)。从碳酸盐岩溶蚀的化学反应式看,影响溶蚀的因素包括反应物的持续供给(主要是酸的持续供给)、产物持续移除和反应速度三个方面(Dong et al., 2019)。酸的持续供给与土壤 CO_2 浓度和土壤含水量有关,反应产物的移除与土壤中的

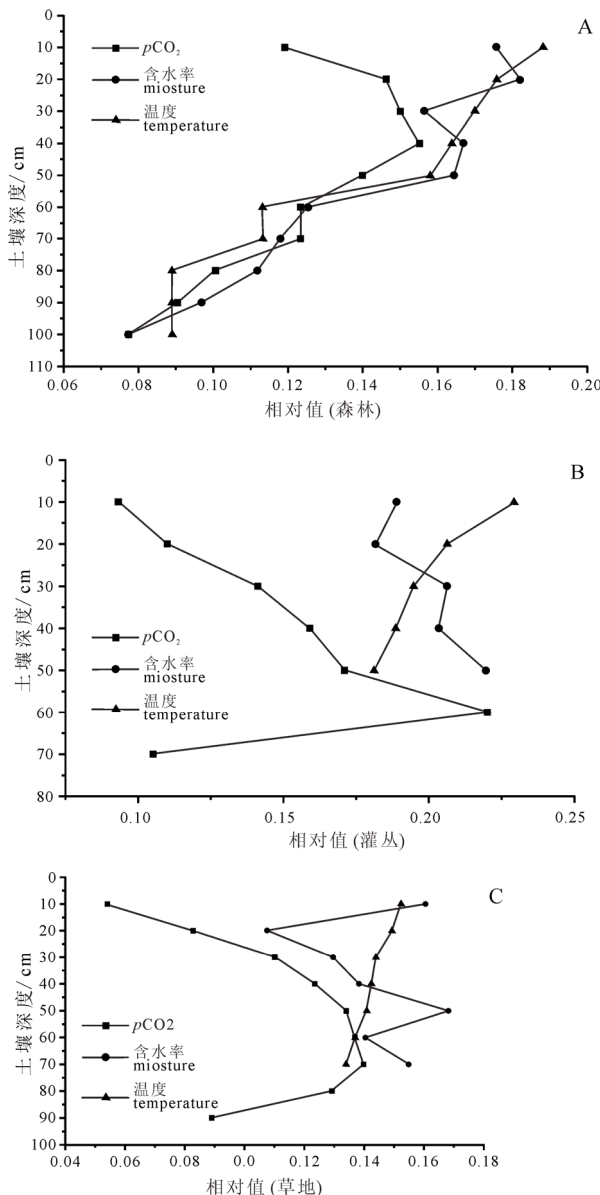
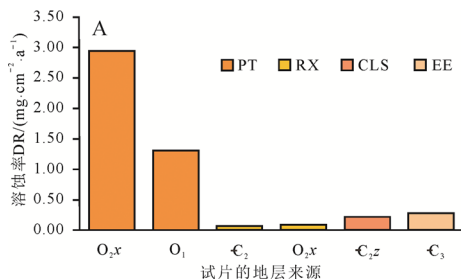


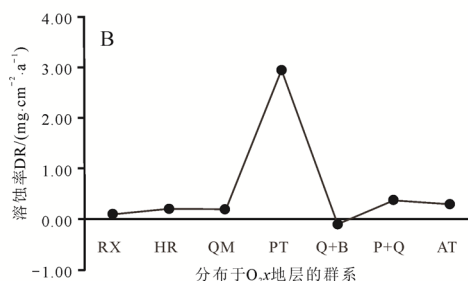
图4 半干旱区森林、灌丛和草地的土壤 $p\text{CO}_2$ 、含水率、温度垂直剖面匹配特征

Fig. 4 Matching characteristics of soil $p\text{CO}_2$, soil water content, and soil temperature of forest, shrubland, and grassland in a semi-arid karst area



径流有关, 反应速率与温度和生物酶的数量有关, 这些因素很大程度上取决于植被覆盖与气候条件 (Romero-Mujalli et al., 2019)。中国南方岩溶区降水丰沛、雨热同期, 三者之间匹配程度高, 从而呈现溶蚀率随土壤 $p\text{CO}_2$ 及土壤含水量增加而增加 (何师意等, 1997; 刘再华等, 1998), 在低温条件下 (60°C 以下) 随温度升高而升高 (Kirstein et al., 2016) 的规律。但在本研究中, 类似吕梁山南段的半干旱区多年平均降水量低于 450 mm, 土壤含水量从旱季到雨季初期都接近凋萎点, 在雨季大多也低于 20%, 且随土层深度增加而递减 (图 3) (李洪建等, 2003; 董林水, 2005)。在我们的研究中, 土壤 $p\text{CO}_2$ 随深度的变化趋势与土壤含水量或土壤温度的恰好相反 (图 3), 三者出现了明显的不匹配。在土壤 $p\text{CO}_2$ 高的深度土壤含水量处于低位, 将限制碳酸的形成和供给, 从而制约碳酸盐岩的溶蚀, 且在干季形成沉积 (黄奇波等, 2013), 进一步抵消溶蚀作用; 在土壤含水量和土壤温度较高的表层土壤 $p\text{CO}_2$ 低, 使其对溶蚀的驱动减弱。因此, 三者中任何单一因素都不能对溶蚀产生显著影响。与此类似的还有岩性。在湿润区溶蚀率还受碳酸盐岩的纯度和结构的明显影响 (刘再华, 2000), 但在半干旱区影响的程度大大降低, 在土下 20–50 cm 奥陶纪灰岩和泥灰岩溶蚀率几乎没有差别 (张春潮等, 2018)。本研究中试片化学成分只在溶蚀率较高时才有明显差异, 较低时几乎没有差异 (图 5A), 不影响所揭示的碳酸盐岩溶蚀率随植被覆盖变化的规律。

本研究中森林、灌丛和草地的土壤 $p\text{CO}_2$ 、土壤含水量和土壤温度三者的匹配程度与溶蚀率有较好的对应关系, 表明半干旱岩溶区植被通过调节溶蚀发生的条件影响了溶蚀过程。这支持了植被是碳酸盐岩溶蚀的重要影响因素的认识 (曹建华等, 2004;



PT—油松林; RX—黄刺玫灌丛; CLS—藁草类草丛; EE—禾草类草丛; HR—沙棘灌丛; QM—蒙古栎林; Q+B—蒙古栎+白桦林;

P+Q—油松+蒙古栎林; AT—茶条槭林。

PT—*P. tabuliformis* Evergreen Needleleaf Forest Alliance; RX—*R. xanthina* Deciduous Broadleaf Shrubland; CLS—*C. lanceolata* var. *subpediformis* Forb Grassland; EE—*E. excelsus* Forb Grassland; HR—*H. rhamnoides* Deciduous Broadleaf Shrubland; QM—*Q. mongolica* Deciduous Broadleaf Forest Alliance; Q+B—*Q. mongolica* + *B. platyphylla* Deciduous Broadleaf Forest Alliance; P+Q—*P. tabuliformis* + *Q. mongolica* Mixed Needleleaf and Broadleaf Forest Alliance; AT—*A. tartaricum* Deciduous Broadleaf Forest Alliance.

图5 半干旱区分布于不同地层的相同群系(A)与同一地层的不同群系类型(B)的溶蚀率对比

Fig. 5 Comparison of dissolution rate between Alliances on different geological stratigraphy (A) and Alliances on the same geological stratigraphy (B)

表 3 半干旱区不同森林类型的溶蚀环境
Table 3 Environmental factors of different forest types in the study area

土壤深度/cm	土壤 $p\text{CO}_2$ /%			土壤含水量(SWC)/%			土壤温度/°C		
	PT	P+Q	QM	PT	P+Q	QM	PT	P+Q	QM
10	0.52	0.90	0.49	36.0	36.4	21.5	20.1	18.6	21.3
20	0.71	1.20	0.45	31.5	38.2	35.9	18.9	17.9	19.3
30	0.68	1.18	0.64	27.7	40.8	19.9	18.3	17.7	18.2
40	0.70	1.38	0.65	30.3	37.5	27.4	17.8	17.0	17.5
50	0.53	1.42	0.61	33.7	27.4	27.3	16.9	16.7	17.2

Calmels et al., 2014; Romero-Mujalli et al., 2019)。不同的植被覆盖形成的小气候不同, 土壤中 CO_2 的聚集与梯度变化也不一致(李恩香等, 2004; 陈鹏娟, 2021), 从而对溶蚀过程和强度产生影响。森林的根系发育更利于气体扩散, 使土壤 $p\text{CO}_2$ 的峰值向表层移动, 随深度递减的程度更弱, 浓度下降(李恩香等, 2004), 从而使高土壤 $p\text{CO}_2$ 与较高的含水量和温度更好的匹配。森林的覆盖使土壤温度波动减小, 表层土壤的湿度增加, 三者匹配的时间延长, 因此尽管 $p\text{CO}_2$ 低于灌丛和草地, 却对应了更高的溶蚀率(图 3B, 图 4)。草地由于根系集中分布于浅层, 土壤呼吸作用更旺盛, 且草本植物密集生长不利于空气流通而具有较高的土壤 $p\text{CO}_2$ (冯朝阳等, 2008; 张鸽香等, 2010), 但灌丛和草地对小生境及溶蚀条件的调节能力弱(邓艳等, 2004; 龙健等, 2021), 与土壤含水量和土壤温度的匹配程度均低于森林, 使其溶蚀率也较低。由此我们可以得出结论, 半干旱区碳酸盐岩溶蚀受土壤含水量低的强烈制约, 具有与湿润区完全不同的驱动机制, 土壤 $p\text{CO}_2$ 、土壤含水量或土壤温度中的任何单一因素均不能产生显著影响, 三者的匹配程度才是驱动溶蚀的关键因素; 植被演替成为森林增加了对三者匹配程度的调节能力, 最终促进了碳酸盐岩的溶蚀。

然而, 油松林溶蚀率远高于其他森林类型, 其产生机制可能十分复杂。油松林的土壤 $p\text{CO}_2$ 、土壤含水量或土壤温并不是最高的(表 3)。细根垂直分布也因是否混交以及混交的树种而不同(翟明普, 1982; 刘春江等, 1985), 各种有机酸的分泌量则纯林显著高于混交林(邵东华等, 2011), 但是否随森林类型而变, 还需要更多研究佐证。可见, 森林类型如何调控各种影响溶蚀的因子从而影响溶蚀, 还需要更深入和详细的研究揭示, 特别是对影响溶蚀的因子进行连续动态监测, 以揭示其匹配性及其变化规律。

森林的经营管理与碳汇效应相结合越来越成为共识(Yu et al., 2021)。岩溶地质碳汇与植被、土壤碳汇密切相关(Cao et al., 2012), 需要在植被恢复、植树造林和森林经营管理中充分考虑。群系层开展的对比不仅能识别出油松林有比其他各类植被高得多的岩溶地质碳汇效应, 也能明确各植被类

型岩溶地质碳汇效应的大小顺序。但影响碳酸岩风化过程的各种因素复杂交叉, 不同树种的根系径级构成和分布深度不同(赵忠和李鹏, 2002), 类似的因素都可能影响植被对溶蚀因子的调控能力。此外, 湿润区受干湿季节、地形、岩溶发育条件等影响, 可能也存在溶蚀关键因子匹配差制约溶蚀的情况。本文研究中, 以溶蚀最强烈的季节测定的溶蚀因子分析溶蚀的差异, 未能详细揭示溶蚀因子及其不同季节的变化情况。连续动态监测是较好的解决办法, 也将是未来研究的重点。因此, 有必要从更基础的植被分类层次或者说至少从群系层次开展更广泛的对比、选择典型类型进行关键影响因素的连续动态监测, 揭示不同植被影响溶蚀的机制, 核算清它们的植被、土壤和岩溶地质碳汇总量。这将为森林管理中根据综合碳汇效应确定造林树种、优化植被恢复途径, 以充分发挥岩溶区植被恢复碳汇潜力, 最终促进碳中和提供可操作的指导。

5 结论

(1) 半干旱岩溶区植被正向演替早期减弱、后期促进了碳酸盐岩溶蚀。

(2) 群系层次的对比研究可揭示各植被类型对碳酸盐岩溶蚀影响的强度, 识别出油松林具有远高于其他各植被类型的溶蚀率, 显著促进了碳酸盐岩的溶蚀。

(3) 半干旱岩溶区受土壤水分缺乏影响, 环境因子对溶蚀率的影响模式与湿润区显著不同, 土壤 $p\text{CO}_2$ 、土壤含水量和土壤温度任何单一因素与溶蚀率没有显著相关性, 三者的匹配性才是决定溶蚀率的关键因素; 植被演替增加了对土壤 $p\text{CO}_2$ 、土壤含水量和土壤温度的调控能力从而影响溶蚀。

致谢: 南宁师范大学安钧鉴、蒋艳华、胡云华、黄世岸、苏浩等人参加了野外工作, 在此表示感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 31960233), Key Research and Development Program of Guangxi (No. Guike AB19110004), China Geological Survey (No.

1212011087121), and Guangxi Natural Science Foundation Program (No. 2018GXNSFDA281036).

参考文献:

- 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 姜光辉. 2004. 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, 32(1): 90-96.
- 陈鹏娟. 2021. 干旱半干旱地区植被恢复类型对林地小气候的影响研究[J]. 中国水土保持, (5): 45-47, 9.
- 邓艳, 蒋忠诚, 蓝芙宁, 李恩香. 2004. 弄拉典型峰丛洼地生态系统中青冈林群落的小气候特征比较[J]. 广西科学, 11(3): 236-242.
- 董林水. 2005. 晋西基岩山地与黄土丘陵区生态过渡带植被特征及生态恢复机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- 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, 郭兆迪. 2009. 植物群落清查的主要内容, 方法和技术规范[J]. 生物多样性, 17(6): 533-548.
- 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 刘尚华, 林栋. 2008. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. 北京林业大学学报, 30(2): 20-26.
- 郭柯, 方精云, 王国宏, 唐志尧, 谢宗强, 沈泽昊, 王仁卿, 强胜, 梁存柱, 达良俊. 于丹. 2020. 中国植被分类系统修订方案[J]. 植物生态学报, 44(2): 111-127.
- 何师意, 徐胜友, 张美良. 1997. 岩溶土壤中CO₂浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系[J]. 中国岩溶, 16(4): 319-324.
- 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 唐萍萍. 2013. 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, 32(3): 258-265.
- 姜鑫, 黄先飞, 秦樊鑫, 张珍明. 2020. 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), 35(5): 899-905.
- 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 2012. 中国岩溶碳汇潜力研究[J]. 地球学报, 33(2): 129-134.
- 柯静, 邓艳, 岳祥飞, 梁锦桃, 李旭尧, 曹建华, 吴松. 2021. 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, 42(3): 407-416.
- 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 姜光辉, 邓艳. 2004. 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, 24(6): 1131-1139.
- 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 2003. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报, 14(4): 515-519.
- 刘春江, 郭旭临, 徐振泉. 1985. 北京西山地区人工油松栓皮栎混交林根系研究初报[J]. 北京林学院学报, (1): 77-84.
- 刘再华, 何师意, 袁道先, 赵景波. 1998. 土壤中的CO₂及其对岩溶作用的驱动[J]. 水文地质工程地质, (4): 42-45.
- 刘再华. 2000. 外源水对灰岩和白云岩的侵蚀速率野外试验研究——以桂林尧山为例[J]. 中国岩溶, 19(1): 1-4.
- 刘长成, 王斌, 郭柯, 李先琨, 侯满福, 刘玉国. 2021. 中国喀斯特植被分类系统[J]. 广西植物, 41(10): 1618-1631.
- 龙健, 吴求生, 李娟, 廖洪凯, 刘灵飞, 黄博聪, 张菊梅. 2021. 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, 58(1): 151-161.
- 覃小群, 蒙荣国, 莫日生. 2011. 土地覆盖对岩溶地下河碳汇的影响——以广西打狗河流域为例[J]. 中国岩溶, 30(4): 372-378.
- 邵东华, 任琴, 宁心哲, 白淑兰. 2011. 油松和虎榛子不同林型根系分泌物组分及化感效应[J]. 浙江农林大学学报, 28(2): 333-338.
- 王冬银, 章程, 谢世友, 杨平恒, 张文晖. 2007. 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, 28(5): 488-495.
- 王世杰, 刘再华, 倪健, 闫俊华, 刘秀明. 2017. 中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J]. 地球与环境, 45(1): 2-9.
- 吴孔运, 蒋忠诚, 叶晔. 2007. 不同植物群落对灰岩试块溶蚀速率的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 967-971.
- 翟明普. 1982. 北京西山地区油松元宝枫混交林根系的研究[J]. 北京林学院学报, (1): 1-11.
- 章程, 李玉辉, 汪进良, 苗迎, 肖琼, 郭永丽. 2020. 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, 66(4): 1019-1030.
- 张春潮, 李向全, 王振兴, 侯新伟, 桂春雷, 白占学, 付昌昌. 2018. 不同碳酸盐岩岩性试片的溶蚀速率研究——以三姑泉域为例[J]. 水资源与水工程学报, 29(5): 218-223.
- 张鸽香, 徐娇, 王国兵, 武珊珊, 阮宏华. 2010. 南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的变化[J]. 生态学杂志, 29(2): 274-280.
- 赵忠, 李鹏. 2002. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. 水土保持学报, 16(1): 96-99, 107.

References:

- BASTIN J F, FINEGOLD Y, GARCIA C, MOLICONE D, REZENDE M, ROUTH D, ZOHNER C M, CROWTHER T W. 2019. The global tree restoration potential[J]. Science, 365(6448): 76-79.
- BERNER R A. 1997. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂[J]. Science, 276(5312): 544-546.
- CALMELS D, GAILLARDET J, FRANÇOIS L. 2014. Sensitivity of carbonate weathering to soil CO₂ production by biological activity along a temperate climate transect[J]. Chemical Geology, 390: 74-86.
- CAO J H, WU X, HUANG F, HU B, GROVES C, YANG H, ZHANG C L. 2018. Global significance of the carbon cycle in the karst dynamic system: evidence from geological and ecological processes[J]. China Geology, 1(1): 17-27.
- CAO J H, YUAN D X, GROVES C, HUANG F, YANG H, LU Q. 2012. Carbon fluxes and sinks: the consumption of atmospheric and soil CO₂ by carbonate rock dissolution[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 86(4): 963-972.
- CAO Jian-hua, YUAN Dao-xian, PAN Gen-xing, JIANG Guang-hui. 2004. Influence of soil carbon transfer under different vegetations on carbon cycle of karst dynamics system[J]. Earth and Environment, 32(1): 90-96(in Chinese with English abstract).
- CHEN Peng-juan. 2021. Effects of vegetation restoration types on

- forest microclimate in arid and semi-arid areas[J]. Soil and Water Conservation in China, 42(5): 45-47, 9(in Chinese with English abstract).
- DENG Yan, JIANG Zhong-cheng, LAN Fu-ning, LI En-xiang. 2004. The comparison of micro-climate in *Cyclobalanopsis glauca* community in typical peak clump depression ecological system in Nongla[J]. Guangxi Sciences, 11(3): 236-242(in Chinese with English abstract).
- DONG Lin-shui. 2005. The characteristics and ecological restoration mechanism of vegetation in the ecotone between the bed-rock area and loess area at West Shanxi Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry(in Chinese with English abstract).
- DONG X L, COHEN M J, MARTIN J B, MCLAUGHLIN D L, MURRAY A B, WARD N D, FLINT M K, HEFFERNAN J B. 2019. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst landscape[J]. Chemical Geology, 527: 118774.
- FANG Jing-yun, WANG Xiang-ping, SHEN Ze-hao, TANG Zhi-yao, HE Jin-sheng, YU Dan, JIANG Yuan, WANG Zhi-heng, ZHENG Cheng-yang, ZHU Jiang-ling, GUO Zhao-di. 2009. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 17(6): 533-548(in Chinese with English abstract).
- FENG Chao-yang, LÜ Shi-hai, GAO Ji-xi, LIU Shang-hua, LIN Dong. 2008. Soil respiration characteristics of different vegetation types in the mountain areas of north China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 30(2): 20-26(in Chinese with English abstract).
- FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, ANDREW R M, HAUCK J, OLSEN A, PETERS G P, PETERS W, PONGRATZ J, SITCH S. 2020. Global carbon budget 2020[J]. Earth System Science Data, 12(4): 3269-3340.
- GUO Ke, FANG Jing-yun, WANG Guo-hong, TANG Zhi-yao, XIE Zhong-qiang, SHEN Ze-hao, WANG Ren-qing, QIANG Sheng, LIANG Cun-zhu, DA Liang-jun, YU Dan. 2020. A revised scheme of vegetation classification system of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 44(2): 111-127(in Chinese with English abstract).
- HE Shi-yi, XU Sheng-you, ZHANG Mei-liang. 1997. Observation on soil CO₂ concentration, hydrochemistry, and their relationship with karst processes[J]. Carsologica Sinica, 16(4): 319-324(in Chinese with English abstract).
- HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, TANG Ping-ping. 2013. 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, 32(3): 258-265(in Chinese with English abstract).
- JIANG Xin, HUANG Xian-fei, QIN Fan-xin, ZHANG Zhen-ming. 2020. Rock dissolution rate and soil properties of karst soil under different land use ways[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 35(5): 899-905(in Chinese with English abstract).
- JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 132: 1-12.
- JIANG Zhong-cheng, YUAN Dao-xian, CAO Jian-hua, QIN Xiao-qun, HE Shi-yi, ZHANG Cheng. 2012. A study of carbon sink capacity of karst processes in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(2): 129-134(in Chinese with English abstract).
- KANG Z Q, CHEN J, YUAN D X, HE S Y, LI Y L, CHANG Y, DENG Y, CHEN Y, LIU Y Y, JIANG G H, WANG X Y, ZHANG Q J. 2020. Promotion function of forest vegetation on the water & carbon coupling cycle in karst critical zone: Insights from karst groundwater systems in south China[J]. Journal of Hydrology, 590: 125246.
- KE Jing, DENG Yan, YUE Xiang-fei, LIANG Jin-tao, LI Xu-yao, CAO Jian-hua, WU Song. 2021. The response of the karst dissolution rate to altitude and land use types in typical karst faulted basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(3): 407-416(in Chinese with English abstract).
- KIRSTEIN J, HELLEVANG H, HAILE B G, GLEIXNER G, GAUPP R. 2016. Experimental determination of natural carbonate rock dissolution rates with a focus on temperature dependency[J]. Geomorphology, 261: 30-40.
- KRKLEC K, DOMÍNGUEZ-VILLAR D, PERICA D. 2021. Use of rock tablet method to measure rock weathering and landscape denudation[J]. Earth-Science Reviews, 212: 103449.
- LI En-xiang, JIANG Zhong-cheng, CAO Jian-hua, JIANG Guang-hui, DENG Yan. 2004. 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, 24(6): 1131-1139(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-jian, WANG Meng-ben, CAI Bao-feng. 2003. Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 14(4): 515-519(in Chinese with English abstract).
- LIU Chang-cheng, WANG Bin, GUO Ke, LI Xian-kun, HOU Man-fu, LIU Yu-guo. 2021. Karst vegetation classification system of China[J]. Guihaia, 41(10): 1618-1631(in Chinese with English abstract).
- LIU Chun-jiang, GUO Xu-lin, XU Zhen-quan. 1985. A preliminary study on root systems of the artificially mixed stand of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus varibilis* in Xishan region, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry College, (1): 77-84(in Chinese with English abstract).
- LIU Y, LIU Z H, ZHANG J L, HE Y Y, SUN H L. 2010. Experimental study on the utilization of DIC by *Oocystis solitaria* Witttr and its influence on the precipitation of calcium carbonate in karst and non-karst waters[J]. Carbonates and Evaporites, 25: 21-26.
- LIU Z H, DREYBRODT W, WANG H J. 2010. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Consid-

- ering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms[J]. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4): 162-172.
- LIU Z H, MACPHERSON G L, GROVES C, MARTIN J B, YUAN D X, ZENG S B. 2018. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering[J]. *Earth-Science Reviews*, 182: 42-49.
- LIU Zai-hua, HE Shi-yi, YUAN Dao-xian, ZHAO Jing-bo. 1998. CO₂ in soil and its driving on karstification[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (4): 42-45(in Chinese with English abstract).
- LIU Zai-hua. 2000. Field experimental research on the corrosion kinetics of limestone and dolomite in allogenic water-Case from Yaoshan Mt., Guilin[J]. *Carsologica Sinica*, 19(1): 1-4(in Chinese with English abstract).
- LONG Jian, WU Qiu-sheng, LI Juan, LIAO Hong-kai, LIU Ling-fei, HUANG Bo-cong, ZHANG Ju-mei. 2021. Effects of different microhabitat types on rock dissolution in Maolan karst forest, Southwest China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 58(1): 151-161(in Chinese with English abstract).
- QIN Xiao-qun, MENG Rong-guo, MO Ri-sheng. 2011. Influence of land covers on carbon sink of underground river: A case in the Dagouhe Basin in Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 30(4): 372-378(in Chinese with English abstract).
- ROMERO-MUJALLI G, HARTMANN J, BÖRKER J, GAILLARDET J, CALMELS D. 2019. Ecosystem controlled soil-rock pCO₂ and carbonate weathering—Constraints by temperature and soil water content[J]. *Chemical Geology*, 527: 118634.
- SHAO Dong-hua, REN Qin, NING Xin-zhe, BAI Shu-lan. 2011. Root exudate constituents and allelopathic effects from forests of *Pinus tabulaeformis*, *Ostryopsis davidiana*, and a mixed forest[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 28(2): 333-338(in Chinese with English abstract).
- WANG Dong-yin, ZHANG Cheng, XIE Shi-you, YANG Ping-heng, ZHANG Wen-hui. 2007. Karst dissolution rates of areas with different vegetation types in the sub-mountain region[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(5): 488-495(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-jie, LIU Zai-hua, NI Jian, YAN Jun-hua, LIU Xiu-ming. 2017. A review of research progress and future prospective of carbon cycle in karst area of South China[J]. *Earth and Environment*, 45(1): 2-9(in Chinese with English abstract).
- WU Kong-yun, JIANG Zhong-cheng, YE Ye. 2007. Influence of different plant communities on erosion rates of limestone rock blocks[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 37(5): 967-971(in Chinese with English abstract).
- WU Z Y, ZHANG C, JIANG Z C, LUO W Q, XIAO Q, HU Z X, WU H Y. 2020. Subsoil carbonate dissolution rates and their determining factors in a karst drainage basin, SW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 79(22): 501-516.
- XIAO W J, YANG Y, JIANG X Y, HE Z L, ZOU X G, YOU X H, YANG Y Y, ZENG Z Z, SHI W Y. 2021. Different responses of ecohydrological processes in the re-vegetation area between the dip and anti-dip slope in a karst rocky desertification area in southwestern China[J]. *Plant and Soil*, <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04821-9>.
- YU Z, YOU W B, AGATHOKLEOUS E, ZHOU G Y, LIU S R. 2021. Forest management required for consistent carbon sink in China's forest plantations[J]. *Forest Ecosystems*, 4: 726-734.
- ZENG Q R, LIU Z H, CHEN B, HU Y D, ZENG S B, ZENG C, YANG R, HE H B, ZHU H, CAI X L, CHEN J, OU Y. 2017. Carbonate weathering-related carbon sink fluxes under different land uses: A case study from the Shawan Simulation Test Site, Puding, Southwest China[J]. *Chemical Geology*, 474: 58-71.
- ZHAI Ming-pu. 1982. Studies on the root systems of the mixed stand of *Pinus tabulaeformis* and *Acer truncatum* in Xishan (Western hills) Region, Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry College*, (1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng, LI Yu-hui, WANG Jin-liang, MIAO Ying, XIAO Qiong, GUO Yong-li. 2020. Interface processes at soil-rock, soil-root contacts and subsoil dissolution rate in Shilin Geopark, Yunnan[J]. *Geological Review*, 66(4): 1019-1030(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng. 2011. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(35): 3759-3765.
- ZHANG Chun-chao, LI Xiang-quan, WANG Zhen-xing, HOU Xin-wei, GUI Chun-lei, BAI Zhan-xue, FU Chang-chang. 2018. Dissolution rate of different carbonate rocks: A case study in Sangu Spring Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 29(5): 218-223(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ge-xiang, XU Jiao, WANG Guo-bing, WU Shan-shan, RUAN Hong-hua. 2010. Soil respiration under different vegetation types in Nanjing urban green space[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 29(2): 274-280(in Chinese with English abstract).
- ZHAO H J, XIAO Q, ZHANG C, ZHANG Q H, WU X, YU S, MIAO Y, WANG Q G. 2020. Transformation of DIC into POC in a karst river system: evidence from $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ in Lijiang, Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 79: 295.
- ZHAO Zhong, LI Peng. 2002. Researches on vertical root distributions and drought resistance of main planting tree species in Weibei Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(1): 96-99, 107(in Chinese with English abstract).