

杨治国, 陈清敏, 成星, 等. 南北地理分界线—秦巴山区碳酸盐岩溶蚀速率研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 819-833.
DOI: 10.11932/karst2023y020

南北地理分界线—秦巴山区碳酸盐岩溶蚀速率研究

杨治国¹, 陈清敏^{1,2,3,4}, 成星¹, 贺凯凯¹, 张瑜⁵, 唐力⁵, 艾昊¹, 张文硕¹

(1. 陕西省地质调查院 陕西省地质调查实验中心, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部矿产地质灾害成灾机理与
防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省地质调查院博士后科研工作站, 陕西 西安 710054;
4. 中国自然资源学会秦巴研究分会, 陕西 西安 710054; 5. 陕西省地质调查院
陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 溶蚀速率作为反映岩溶作用强度的一个量化数据, 其研究有助于岩溶区生态系统的恢复, 对石漠化治理研究也有较为重要的意义。陕西秦巴地区是中国地理上重要的南北分界线, 其气候、生态环境与南方存在明显差异, 为应对日益严峻的岩溶生态环境退化问题, 亟需针对陕西秦巴地区开展岩溶作用的研究。研究选取林地、灌丛、草地三种植被类型, 利用标准溶蚀试片法获得溶蚀速率, 分析不同植被类型、气候条件对溶蚀速率的影响, 以及溶蚀速率与石漠化程度的关系。结果表明: 三种植被类型地下平均溶蚀速率表现为林地>灌丛>草地的规律。降雨与溶蚀速率有显著的正相关性, 相关系数 $R=0.84$, 而气温与其相关性不显著。在发育石漠化区域的溶蚀速率对比中, 发现人类活动越频繁的地区, 溶蚀速率越大, 石漠化程度越高。

关键词: 陕西秦巴地区; 岩溶; 溶蚀试片法; 溶蚀速率; 降雨量; 气温; 石漠化

中图分类号: P642.25; X141 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 04-0819-15

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引言

岩溶地区是我国典型的脆弱生态系统之一^[1-3]。特殊的地质背景与较强的降雨环境, 使岩溶区碳酸盐岩具有了较强的可溶性^[4-5], 促进了溶蚀作用的进行^[6]。加之人类活动的干扰、资源的不合理利用、植被的破坏, 导致了岩石裸露、土地退化的石漠化现象, 造成了生态环境的严重破坏^[7-10], 严重制约了岩溶山区的经济发展。

为了更好地修复与重建岩溶区生态系统, 前人针对西南地区岩溶作用的影响因素与岩溶发育机理研究开展了大量的工作, 如分析不同土地利用方式下土壤理化性质的改变, 对岩溶作用影响的强度与差异^[11-15]; 研究气温、降雨、季节性差异等自然因素对溶蚀速率的影响^[16-21]; 研究土壤 CO_2 浓度时空变化规律对岩溶发育的驱动作用^[16,22-26]。西南地区岩溶发育特征与岩溶作用影响因子的研究已取得了丰硕成果, 其中关于植被与溶蚀速率的研究成果也颇

基金项目: 陕西省公益性地质调查项目《秦巴地区岩溶石漠化防治研究》(202008); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金课题《汉中石笋多指标重建的末次冰期区域水文变化研究》(SKLLQG2209); 国家自然科学基金项目《汉中天坑群的形成年代: 宇宙成因核素²⁶Al/¹⁰Be埋藏年龄研究》(41901096); 陕西省自然科学基金基础研究计划—青年项目《汉中天坑群石笋记录的末次冰期区域水文和亚洲季风的关系研究》(2023-JC-QN-0298)

第一作者简介: 杨治国(1985—), 男, 硕士, 主要研究方向为岩溶石漠化。E-mail: 275464724@qq.com。

通信作者: 陈清敏(1984—), 女, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为全球变化和年代学, 岩溶石漠化研究。E-mail: chenqingmin0601@163.com;

成星(1992—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为古气候学, 同位素地球化学, 岩溶石漠化研究。E-mail: xingcheng529@outlook.com。

收稿日期: 2022-10-28

多^[27-31]。

相比西南地区岩溶作用的研究进程与科研成果,陕西秦巴地区仅在区域构造^[32-36]、岩溶地貌^[37-38]、水文地质^[39-40]、地球化学^[41-44]等方面对岩溶区进行了探索,岩溶作用的研究仍处于起步阶段,特别是不同植被条件下,结合气候等自然因素对岩溶作用影响的研究,以及石漠化程度与溶蚀速率的对比研究鲜有报道。陕西秦巴地区地处中国地理南北分界线,因其特殊的地理位置,区内发育纬度最高的天坑群,也造就了南北气候、地形等诸多差异。作为“中央水塔”的秦岭有着调控南北方降水的重要作用,它阻挡了西伯利亚寒潮的向南入侵,北上与南下的大型天气系统在此交锋,秦岭以北是温带季风气候带,气候干旱,年降雨低于 800 mm;而秦岭以南则是亚热带季风气候,降雨充沛,年降雨量高于 800 mm^[45]。为应对日益严峻的岩溶生态环境退化问题,针对陕西秦巴地区岩溶作用的研究至关重要。

岩溶作用往往通过溶蚀速率来定量表示^[17],溶蚀速率能反映不同岩溶环境下岩溶作用的强弱差异,这也为岩溶现象提供了数据支撑。本文借鉴国内相关研究经验,利用标准溶蚀试片法^[46]开展碳酸盐岩溶蚀速率试验研究,探讨植被、气候等不同自然因素对溶蚀速率的影响,以及溶蚀速率与石漠化发展的相互作用。

1 研究区概况

陕西秦巴地区位于陕西省南部(N31°42′~34°45′, E105°29′~111°15′),北靠秦岭、南倚巴山,东西长 400~500 km,南北宽 180~380 km^[47],地处秦岭—印支褶皱带,曾受到加里东、印支、燕山和喜马拉雅等多次构造运动的塑造,受其构造影响,区内褶皱、断裂发育。由于构造升降运动频繁,又经多次海水浸漫,从前震旦纪至三叠纪中世,各时代都不同程度有碳酸盐岩的沉积^[40],其中以寒武纪和奥陶纪最为发育。

区内山体海拔一般在 1 000~3 700 m,最高峰太白山 3 767 m,总体山势北陡南缓。秦巴山区属亚热带大陆性季风气候,植物多样性突出,以栓皮栎林和锐齿栎林为该区的优势植被^[48]。本区雨量充沛,气体湿润,年均气温 12~15 ℃,最冷 1 月平均气温 0~3 ℃,最热 7 月平均气温 24~27.5 ℃,溶蚀试片试验年份(2021—2022 年)的年平均降雨量各试验点有所差

异,其中石漠化最为严重的镇安、山阳两地年降雨量为 882~1 267 mm,安康地区年降雨量约 1 042 mm,汉中地区年降雨量约 1 136 mm,宝鸡地区年降雨量约 745 mm,陕西秦巴地区雨季多出现在 4—10 月,占该区全年降水量的 75% 左右^[49]。

2 研究方法

2.1 试片试验

本研究采用标准溶蚀试片法,此方法由袁道先院士在 20 世纪 80 年代末引进国内^[46],并在 IGCP299 项目(1990—1994)中得到广泛引用,其主要目的是对比不同地质、气候和水文条件下岩溶作用的强度及其差异。前人在西南地区用该方法进行了岩溶作用机理分析^[11,30,50]、不同岩性试片溶蚀速率的差异对比^[51-52]、植被类型对溶蚀速率的影响等研究^[53-54],以及气候条件对溶蚀速率的影响^[55-56],并运用该方法提高了岩溶区碳汇估算的精度以及碳汇/源评估的准确度^[57-58]。

为使其结果具有可比性,统一使用取自汉中市南郑区小南海镇晚三叠系吴家坪组(P_{3w})晶质灰岩磨制标准溶蚀试片(试片为正方形,边长 4 cm,厚 0.3 cm)。选取林地、草地、灌丛三种典型的植被类型,将试片埋放于有代表性的不同层位(空中 100 cm、地表、土下 20 cm、土下 50 cm、土下 100 cm),每种植被类型区每个层面放置 3 块,放置一个水文年后(2021 年 3 月 31 日至 2022 年 10 月 20 日),取出烘干称重,通过公式可计算出单位面积年溶蚀量或年绝对溶蚀量^[46]。计算公式如下:

$$ER = (W_1 - W_2)10^7 / T/S$$

式中:ER—日单位面积溶蚀量(mg·m⁻²·d⁻¹);W₁—试片初重(g);W₂—试片称后重量(g);T—埋放时间(d);S—试片表面积(约 36.8 cm²)。

2.2 试片称量

试片称重在陕西省地质调查实验中心化学分析所进行,主要分为埋前、满 1 个水文年称重两个阶段,均要求称重前对试片进行 4 小时干燥处理(满一个水文年试片干燥处理前需进行去离子水清洗),再经过 108 ℃、8 小时的烘箱烘干,随后取出放置于干燥箱中使其达到常温,按照实验室操作规范在称量间利用电子天平(万分之一天平,称重误差范围小于

0.1%) 对其进行称重实验。两个阶段各进行 2 次称量实验,并记录 2 次称重结果。

称重环节要尽量避免试片长时间暴露在空气中,并对两次试片重量数据认真比对,差值超过允许误差范围内的试片,首先要矫正电子天平,再严格遵循称量操作技术规范,对这类试片进行多次称重测量。

3 结 果

3.1 溶蚀试片分布

本研究共在陕西秦巴岩溶区埋设 47 处具有代表性的测试点,其中草地 15 处、林地 15 处、灌丛 17 处(表 1),1 个水文年后,共获得 598 个试片溶蚀量数据。

各区县测试点数量差异是岩溶山地土层厚度及人为因素所导致。林地、灌丛多见但各地区土层厚

度不同,少数地区土层厚度不能满足埋设条件。而草地在三种植被类型中分布最少,多位于平缓地带的居民活动区域,后期有被破坏的可能性,个别地区未埋设草地类型试验点也是此原因。

岩溶地区岩层由碳酸盐类岩石(灰岩、白云岩)组成,所以溶蚀速率测试点多布置于碳酸盐岩地层出露区。考虑到本区石漠化的强弱差异,岩溶速率测试点的数量布置也有所侧重,镇安-山阳一带石漠化程度较其它地域最为严重,且石漠化分布面积广、程度等级高,溶蚀速率测试点布置也较多。具体的空间分布见图 1。

3.2 秦巴地区溶蚀速率

本研究分别在三种不同植被类型条件下,对埋设的标准试片样 1 个水文年后重量损失进行统计(表 2),并通过计算获得了 598 个单位面积年溶蚀量

表 1 陕西秦巴地区溶蚀速率测试点分布情况一览表

Table 1 Distribution of dissolution rate test sites in the Qinba area, Shaanxi Province

植被类型	镇安	山阳	旬阳	宁强	洛南	南郑	商南	陇县	平利	岚皋
草地	5	2	1	0	3	1	0	2	1	0
灌丛	6	1	2	1	3	0	1	1	1	1
林地	6	3	1	1	1	0	1	1	0	1



图 1 陕西秦巴地区溶蚀试片埋设点分布图

Fig. 1 Distribution of the buried sites of the dissolution test pieces in the Qinba area, Shaanxi Province

表 2 秦巴地区各县区不同层位标准试片重量损失汇总表/g

Table 2 Summary of the weight loss of standard test pieces at different strata in different counties of the Qinba area/g

埋设层位	镇安	山阳	旬阳	洛南	宁强	陇县	岚皋	商南	平利
空中	0.035 3	0.020 3	0.020 6	0.018 6	0.022 4	0.016 5	0.008 6	0.019 9	0.015 6
地表	0.078 5	0.047 0	0.019 4	0.020 9	0.042 6	0.020 9	0.004 9	0.027 2	0.010 7
地下 20 cm	0.149 5	0.113 6	0.059 3	0.031 4	0.122 2	0.003 1	0.090 3	0.026 2	0.039 7
地下 50 cm	0.173 5	0.144 9	0.068 6	0.037 0	0.107 6	0.004 9	0.117 6	0.009 2	0.044 3
地下 100 cm	0.216 8	0.148 3	0.073 4	0.008 4	0.254 4	0.063 1	0.028 5	0.008 4	0.031 4
平均失重	0.130 7	0.094 8	0.048 3	0.023 3	0.109 8	0.021 7	0.045 0	0.018 2	0.028 3

数据,也就是溶蚀速率。

从表 2 可以看出,各地的试片失重量大体上表现为空中到地下依次递增的趋势,其中洛南地区空中到地下 50 cm 处为递增,但 100 cm 处失重量均小于其他各层位,商南失重量表现为地上先增大,地下又减少的规律。总体来看空中与地表失重量差异不明显,但空中、地表与地下差异较大。50 cm 及以上各层位镇安的试片失重量均为最大,100 cm 处宁强最大,各地区试片平均失重量镇安最大为 0.130 7 g,是商南县平均失重 0.018 2 g 的 7 倍多。

选取了中度-重度石漠化的镇安、轻度-中度石漠化的洛南以及轻度石漠化的旬阳三地,具有代表性的三种植被类型的溶蚀速率各 1 处(表 3)。发现年平均溶蚀量数据差异明显,不同植被类型条件下,空中溶蚀速率以镇安林地 $1.514\ 9\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最大,洛南灌丛 $0.319\ 3\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最小;地表溶蚀速率以镇安灌丛 $3.463\ 3\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最大,旬阳灌丛 $0.094\ 7\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最小;地下 20 cm 溶蚀速率以镇安灌丛 $6.131\ 3\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最大,洛南灌丛 $0.047\ 6\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最小;地下 50 cm 溶蚀速率以镇安林地 $6.391\ 3\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最大,洛南灌丛 $0.025\ 1\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最小;地下 100 cm 溶蚀速率以镇安灌丛 $10.985\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最大,洛南灌丛 $0.114\ 1\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最小。

4 讨 论

4.1 不同植被类型、层位的溶蚀速率

不同植被类型条件下碳酸盐岩的溶蚀量差异较大^[17],甚至相同植被类型条件下不同深度的溶蚀量也存在较大差异,已有研究表明,植被的正向演替加快了岩溶作用的进行^[30]。植被生长过程中分泌的大量有机酸^[59]以及呼吸排放的 CO_2 使土壤的 PH 值降低,从而促进了碳酸盐岩的溶蚀作用^[28]。

不同植被类型条件下林地各层的溶蚀速率明显高于灌丛与草地,灌丛与草地的地上溶蚀速率几乎相同,但灌丛地下的溶蚀速率增大趋势明显高于草地(如图 2)。三种植被类型以林地 100 cm 处的溶蚀速率 $4.517\ 5\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最大,灌丛地下 20 cm 处 $2.397\ 6\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 最小,溶蚀速率整体呈现林地 > 灌丛 > 草地的大致规律,表明了不同植被类型对溶蚀作用强度有较大的影响,罗建^[60]等、黄奇波^[61]等在西南地区不同植被类型条件下溶蚀速率研究也证实了该结果。

从表 4 可以看出秦巴地区同类型植被条件地下 5 个层位的溶蚀速率均表现为:空中到地下 100 cm 溶蚀速率随试片埋藏深度的增加有较明显的变大趋势,其中空中和地表相比变化在 2 倍范围之内,地下各处相差不超过 1 倍,但地上与地下的差异较大,地下平均溶蚀速率 $3.196\ 0\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 是地表、空中平均溶蚀速率 $0.972\ 2\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的 3 倍之多,这与刘宏和吴文青^[62]在路南石林的结果相似。

但在不同层位的溶蚀速率,北方与西南地区存在两种截然不同的趋势(表 5),西南地区岩溶作用均呈现了地下大于地表,而北方则表现为地表大于地下的特征^[63]。前人通过研究发现,西南地区降水充沛,雨水下渗强度大,与土壤中 CO_2 结合成碳酸^[64],加快了土下试片的溶蚀作用,故西南地区溶蚀速率地下高于地表,而北方常年相对干旱,降雨量大不如南方各地,雨水向地下渗透能力较弱,导致土壤水的化学溶蚀作用也较弱,而地表试片的溶蚀主要受较强的物理风化作用^[65],故地表的岩溶作用要强于地下。

4.2 气候因素对溶蚀速率的影响

溶蚀作用是水吸收了大气或土壤中的 CO_2 形成了碳酸,再与碳酸盐岩发生的化学溶蚀作用^[66]。已

表 3 镇安、旬阳、洛南三地不同植被类型各层位溶蚀速率统计表
Table 3 Dissolution rates of different vegetation types and strata in Zhen'an, Xunyang and Luonan

区域	植被类型	层位	W_1	W_2	1个水文年试片失重/g	年溶蚀速率 / $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
镇安	I	空中	—	—	—	—
		地表	11.327 5	11.286 9	0.040 6	1.103 7
		地下20 cm	10.990 0	10.793 9	0.196 2	5.330 2
		地下50 cm	11.348 5	11.158 7	0.189 8	5.158 3
		地下100 cm	11.463 5	11.156 6	0.306 8	8.337 4
镇安	II	空中	11.918 9	11.901 4	0.017 5	0.475 1
		地表	12.395 0	12.267 6	0.127 5	3.463 3
		地下20 cm	11.805 4	11.579 7	0.225 6	6.131 3
		地下50 cm	12.005 4	11.822 9	0.182 4	4.957 9
		地下100 cm	11.936 9	11.532 7	0.404 3	10.985 1
镇安	III	空中	11.686 0	11.630 3	0.055 8	1.514 9
		地表	11.672 3	11.614 2	0.058 1	1.579 3
		地下20 cm	11.760 1	11.537 6	0.222 5	6.045 3
		地下50 cm	12.192 1	11.956 9	0.235 2	6.391 3
		地下100 cm	11.963 5	11.655 2	0.308 3	8.378 2
洛南	I	空中	—	—	—	—
		地表	12.111 1	12.074 0	0.037 1	1.006 8
		地下20 cm	12.225 9	12.112 7	0.113 3	3.077 4
		地下50 cm	12.051 3	11.852 9	0.198 4	5.391 8
		地下100 cm	/	—	—	—
洛南	II	空中	12.346 2	12.334 5	0.011 7	0.319 3
		地表	11.464 8	11.457 3	0.007 5	0.203 8
		地下20 cm	11.785 4	11.783 6	0.001 8	0.047 6
		地下50 cm	11.574 8	11.573 9	0.000 9	0.025 1
		地下100 cm	11.975 4	11.971 2	0.004 2	0.114 1
洛南	III	空中	12.255 9	12.240 3	0.015 7	0.425 7
		地表	12.590 4	12.563 0	0.027 4	0.744 6
		地下20 cm	11.743 5	11.677 8	0.065 7	1.786 0
		地下50 cm	11.213 8	11.198 2	0.015 6	0.423 9
		地下100 cm	11.650 4	11.640 9	0.009 5	0.259 5
旬阳	I	空中	12.376 6	12.360 9	0.015 7	0.426 0
		地表	11.238 9	11.196 9	0.042 0	1.142 7
		地下20 cm	11.984 1	11.820 1	0.164 1	4.458 8
		地下50 cm	12.254 2	12.026 5	0.227 6	6.185 2
		地下100 cm	12.364 4	12.141 1	0.223 3	6.067 5
旬阳	II	空中	10.771 8	10.750 3	0.021 5	0.584 2
		地表	12.138 4	12.134 9	0.003 5	0.094 7
		地下20 cm	12.434 9	12.380 7	0.054 1	1.471 0
		地下50 cm	12.599 8	12.585 5	0.014 3	0.389 5
		地下100 cm	12.296 0	12.262 8	0.033 1	0.900 8
旬阳	III	空中	11.930 6	11.915 4	0.015 2	0.413 9
		地表	11.804 0	11.784 7	0.019 3	0.524 5
		地下20 cm	11.537 9	11.519 9	0.018 0	0.489 8
		地下50 cm	12.203 5	12.185 9	0.017 6	0.479 6
		地下100 cm	11.535 5	11.502 3	0.033 1	0.900 1

注：①植被类型栏，“I”为草地；“II”为灌丛；“III”为林地；②“—”为试片丢失无数据。
Note: ①Vegetation type part, "I" represents grassland; "II" represents brushwood; "III" represents forest land; ②"—" represents that test pieces are lost, no data.

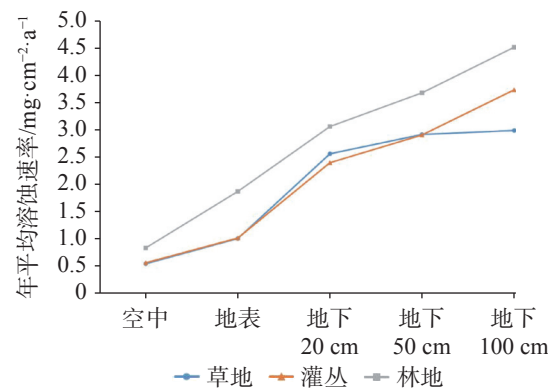


图2 不同植被类型条件下溶蚀速率与土壤深度的关系
Fig. 2 Relationship between dissolution rates and soil depths under different vegetation types

有研究表明,降雨对岩溶区溶蚀作用的影响最为直接与显著,降雨量越大,溶蚀量越大,即溶蚀速率

越大^[11,24,46]。
陕西秦巴地区的溶蚀速率远大于北方各省份,弱于降雨更为充沛、气温更高的南方各省份(表6)。其中桂林的溶蚀速率 $215.56\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 较临汾的溶蚀速率 $19.91\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 相差10倍之多,年降雨量最小的平凉、临汾两地也与桂林也相差4.5倍左右,说明降雨对溶蚀速率有显著的影响^[60]。图3展示我国10个地区降雨与溶蚀速率具高度正相关关系,相关系数 $R=0.84(P=0.002,N=10)$,通过95%的置信度检验,也说明了降雨是影响试片溶蚀速率的重要因子之一。

土壤水分是岩溶化学反应的重要条件^[69],水作为岩溶作用过程的重要介质,在土壤表层的下渗的过程中,水流携带较多的 CO_2 ,侵蚀能力增强。而土

表4 不同植被类型条件下溶蚀速率/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
Table 4 Dissolution rates under different vegetation types/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

植被类型	空中	地表	地下20 cm	地下50 cm	地下100 cm	地下平均溶蚀速率
草地	0.546 0	1.004 9	2.564 9	2.917 2	2.991 4	2.824 5
灌丛	0.558 3	1.017 4	2.397 6	2.903 9	3.733 8	3.011 8
林地	0.832 2	1.874 1	3.060 4	3.676 9	4.517 5	3.751 6

表5 我国南方、北方野外溶蚀试片不同深度溶蚀速率对比表/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
Table 5 Comparison of dissolution rates at different depths of field dissolution test pieces in South and North China/ $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

地区	空中	地表	地下20 cm	地下50 cm	地下100 cm	文献来源
桂林	2.245	1.288	2.263	3.095	\	[45]
弄拉	\	2.837	3.035	4.156	\	[45]
青木关	\	6.766	6.236	7.462	8.846	[14]
北京	\	1.134	0.142	0.121	\	[45]
吕梁	1.502	0.879	0.281	0.141	0.050 3	[63]

表6 我国各地溶蚀速率与降雨、气温汇总表
Table 6 Summary of dissolution rates, rainfall and temperatures in various parts of China

地区	平均溶蚀速率/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	年降雨量/mm	年平均气温/ $^{\circ}\text{C}$
广西桂林 ^[46]	215.56	1 897	15.0
贵州荔波 ^[67]	111.79	1 752	15.3
云南昆明 ^[17]	96.37	1 100	15.0
重庆青木关 ^[14]	128.11	1 000	15.5
四川黄龙 ^[65]	101.44	759	7.0
甘肃平凉 ^[65]	33.69	421	9.5
山西临汾 ^[68]	19.91	400	8.5
陕西镇安(本研究)	106.07	804	12.2
陕西山阳(本研究)	72.07	709	13.1
陕西汉中(本研究)	81.79	893	14.0

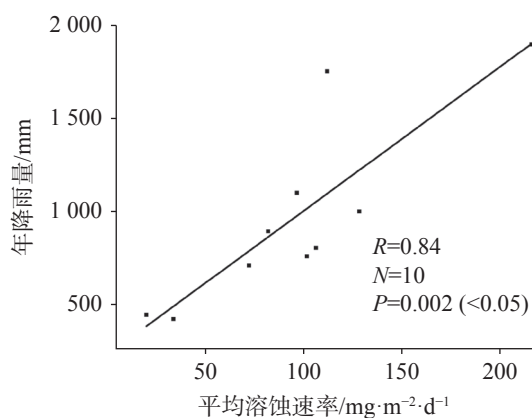


图 3 年降雨量与溶蚀速率的关系

Fig. 3 Relationship between rainfall and dissolution rates

壤温度有利于根系呼吸和微生物代谢排放 CO_2 , 进而影响土壤 CO_2 含量。已有实验成果显示^[18,70], 雨季与旱季溶蚀速率具有明显的差异, 雨季溶蚀速率要大于旱季溶蚀速率^[21,61]。只是在不同植被类型条件下, 降雨对溶蚀速率的响应强度上有所差别。一方面是由于不同植被土壤水分含量的差异, 从草地到灌丛再到林地, 随着植被条件的改善, 土壤保水能力也随之提高^[71-72]; 另一方面是与 CO_2 含量有关, 雨季条件下温暖湿润的土壤环境有助于植物根系呼吸、微生物的新陈代谢^[26], 加速了碳酸盐岩的溶蚀, 因此降雨越多会导致溶蚀速率的增大。

有研究表明, 随着温度的升高溶蚀速率变大^[73-74], 温度的变化与土壤 CO_2 浓度呈正相关^[75-76]。在季节上表现为夏秋高, 春冬低的特征^[77-78], 温度升高不仅使植物的呼吸作用加强, 还激发了土壤微生物的活性, 加速了 CO_2 的排放^[79-80]。但在不同植被覆盖的条件下 CO_2 含量也有较为明显的差异, 草地空旷空气流通性好, 近地表 CO_2 含量为当地大气的 CO_2 含量, 而灌丛、林地的空气流通性较草地逐渐变差, 能在局部范围内保持较高的 CO_2 含量^[64], 且灌丛与林地植物根系发达, 延伸较草地更深, 释放 CO_2 更多。但与降雨相比, 溶蚀速率与温度的相关系数 $R=0.45$ ($P=0.19$, $N=10$) (图 4), 未通过 95% 的置信度检验, 相关性不显著, 说明温度不是影响溶蚀速率的主要因素。温度相差 1°C 的汉中与桂林、昆明两地对比, 汉中与昆明的溶蚀速率较为接近, 但桂林的溶蚀速率却是汉中溶蚀速率的 2.6 倍, 也反应了温度对溶蚀速率的作用不是十分明显^[24]。因此, 对比降雨和温度两个气候因素对溶蚀速率的影响, 我们的研究数据支持降雨是引起南、北方岩溶发育巨大差异的关

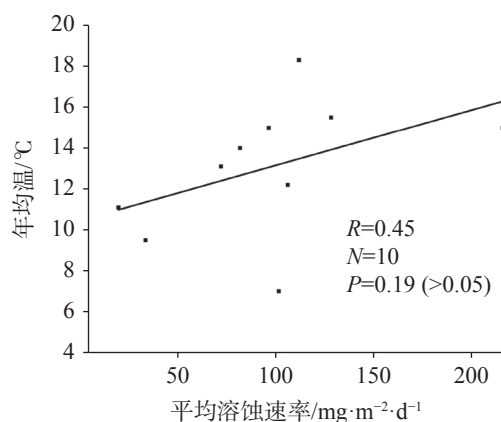


图 4 气温与溶蚀速率的关系

Fig. 4 Relationship between temperatures and dissolution rates

键因素^[81]。

4.3 溶蚀速率与石漠化强度等级关系的探讨

研究区内选取了镇安、山阳、洛南、旬阳、陇县等地试片测试点进行溶蚀速率对比(图 5), 发现了镇安、山阳两地溶蚀速率变化范围在 $2\sim 6\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 而旬阳、陇县、洛南区域的溶蚀速率基本都在 $2\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下, 且波动较小。镇安、山阳的平均溶蚀速率约 $3.321\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 是其他三地平均溶蚀速率 $0.4903\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的约 6.7 倍。

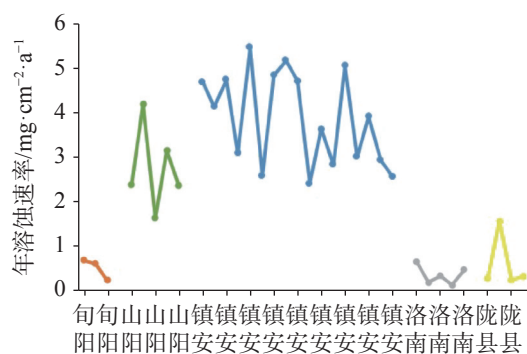


图 5 不同区县溶蚀速率对比

Fig. 5 Comparison of dissolution rates in different counties

在野外调查中发现镇安、山阳两地的岩溶石漠化现象较为严重, 多处石漠化程度为中度-重度, 其中以镇安北阳山的石漠化程度最为严重, 且分布范围广。山阳的石漠化程度虽不及镇安, 但多数仍为中度, 少数重度。而旬阳、陇县、洛南等地的石漠化程度多为轻度, 鲜有中度。

同时我们对 5 个区县的石漠化区域进行了人口密度、社会经济活动、植被演化规律、气候条件等诸多因素的对比, 发现石漠化较为严重的区域均存在

高强度的人类活动,且水资源缺乏。如石漠化最为严重的镇安北阳山,曾在 20 世纪 60 年代有过大规模的散养牲畜,导致山上植被荡然无存,加上人为肆意砍伐林木,导致石漠化现象加剧。石漠化同样严重的山阳县海螺宫村,在过去的几十年里,道路和住宅建设严重破坏了洼地及山体边坡植被,土层较厚的洼地则改造成了耕地。在气候条件基本一致的前提下,其他三地地表水系相对发育,石漠化区域人口密度及人类活动强度都要低于石漠化较严重的镇安、山阳两地。

此外,在镇安、山阳与旬阳、陇县、洛南、岚皋、宁强不同植被类型的溶蚀速率对比实验中发现了石漠化程度高的区域整体的溶蚀速率明显高于石漠化等级较低的地区(图 6),且同种植被类型上也是石漠化强度高的地区溶蚀速率高于轻度地区。在以往石漠化碳汇效应的研究中^[82-84],发现了平均溶蚀速率随着石漠化程度的加强而增大^[85],这与秦巴地区溶蚀速率与石漠化程度的关系相呼应。石漠化的演化就是以地被物消失为开始,以自然或人工植被破坏为先导,以土壤侵蚀、地表水流失、碳酸盐岩溶蚀侵蚀为核心,形成石质荒漠的过程^[86-87]。理论上溶蚀速率高的地区,在高强度的人类活动持续作用下更有利于石漠化的形成。

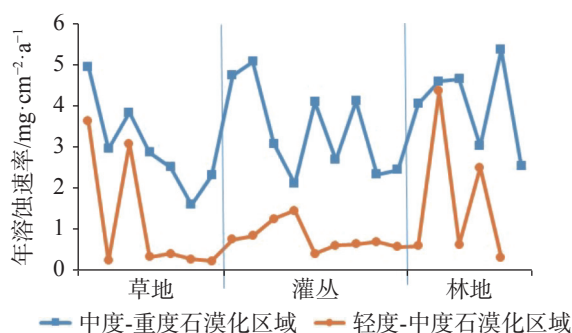


图 6 石漠化不同等级区域溶蚀速率实验结果

Fig. 6 Experimental results of dissolution rates in different grades of rocky desertification

5 结 论

(1)对陕西秦巴地区 47 处溶蚀速率测试点的分析结果表明:不同植被类型对溶蚀速率影响较大,从空中、地表到地下,溶蚀速率呈递增趋势,地上与地下溶蚀速率均呈现林地>灌丛>草地的规律。

植被的正向演替过程、碳酸盐岩的溶蚀速率也随之增大;

(2)降雨量与碳酸盐岩的溶蚀强度密切相关,是影响溶蚀速率的重要因子之一,而气温与溶蚀速率的相关性较小。雨期较多的降雨,加之土壤根系呼吸排放的 CO_2 与土壤较高活性的微生物,对碳酸盐岩的溶蚀有促进作用;

(3)由轻度石漠化到重度石漠化,溶蚀速率与溶蚀量也随之相应增大,潜在与轻度差异性不是特别明显,但中度-重度的镇安北阳山溶蚀速率是区内轻度-中度石漠化溶蚀速率的 3 倍左右。石漠化的形成与碳酸盐岩的溶蚀、高强度的人类活动持续作用密不可分,溶蚀量越大、人类活动越强烈,石漠化越严重。

参考文献

- [1] 苏维词, 朱文孝. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性分析[J]. 山地学报, 2000, 18(5): 429-434.
SU Weici, ZHU Wenxiao. The eco-environmental fragility in karst mountain regions of Guizhou Province[J]. *Journal of Mountain Sciences*, 2000, 18(5): 429-434.
- [2] 张新时. 中国关键生态区的评价与对策[J]. 中国基础科学, 2001, 3(5): 13-16.
ZHANG Xinshi. The key ecoregional assessment and strategy in China[J]. *China Basic Science*, 2001, 3(5): 13-16.
- [3] 何师意, 冉景丞, 袁道先, 谢运球. 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[J]. 地球学报, 2001, 23(3): 265-270.
HE Shiyi, RAN Jingcheng, YUAN Daoxian, XIE Yunqiu. A comparative study on hydrological and ecological effects in different karst ecosystems[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 23(3): 265-270.
- [4] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 461-466.
YUAN Daoxian. World correlation of karst ecosystem: Objectives and implementation plan[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(4): 461-466.
- [5] 武健强, 顾春生, 许书刚, 赵秀峰, 黄光明. 苏南地区碳酸盐岩的溶蚀性分析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 565-571.
WU Jianqiang, GU Chunsheng, XU Shugang, ZHAO Xiufeng, HUANG Guangming. Corrosion analysis of carbonate rocks in southern Jiangsu Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 565-571.
- [6] 蓝家程, 傅瓦利, 袁波, 彭景涛, 张婷, 付允. 岩溶山区土地利用方式对土壤活性有机碳及其分布的影响[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 175-180.
LAN Jiacheng, FU Wali, YUAN Bo, PENG Jingtao, ZHANG Ting, FU Yun. Impact of land use type on soil active organic car-

- bon and its distribution in karst mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(2): 175-180.
- [7] 何师意, 袁道先. 越南北部岩溶特征及其相关环境问题[J]. *中国岩溶*, 1999, 18(1): 90-95.
- HE Shiyi, YUAN Daoxian. Characteristics of karst in Northern Vietnam and its relevant environmental problems[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(1): 90-95.
- [8] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 31-35.
- WANG Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 31-35.
- [9] 李瑞玲, 王世杰, 张殿发. 贵州喀斯特地区生态环境恶化的人为因素分析[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2002, 21(1): 43-47.
- LI Ruiling, WANG Shijie, ZHANG Dianfa. The role of man-made factors in eco-environmental deterioration in Guizhou karst areas[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2002, 21(1): 43-47.
- [10] 贺庆棠, 陆佩玲. 中国岩溶山地石漠化问题与对策研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1): 117-120.
- HE Qingtang, LU Peiling. Rocky desertification and its preventive strategies in karst regions of China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 117-120.
- [11] 章程, 谢运球, 吕勇, 蒋勇军, 曹建华, 姜光辉, 杨平恒, 王冬银. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响: 以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J]. *地理学报*, 2006, 61(11): 1181-1188.
- ZHANG Cheng, XIE Yunqiu, LYU Yong, JIANG Yongjun, CAO Jianhua, JIANG Guanghui, YANG Pingheng, WANG Dongyin. Impact of land-use patterns upon karst processes: Taking Nongla Fengcong depression area in Guangxi as an example[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [12] 王冬银, 章程, 谢世友, 杨平恒, 张文晖. 山区岩溶作用对土地利用方式的响应: 以金佛山碧潭泉和水房泉两区岩溶系统为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(6): 222-230.
- WANG Dongyin, ZHANG Cheng, XIE Shiyu, YANG Pingheng, ZHANG Wenhui. Response of karstification to land-use types in mountain area: A case study of the karst areas in Bitan and Shuifang springs in Jinfo Mountain, Chongqing, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 222-230.
- [13] 甄晓君. 岩溶区不同土地利用方式下土壤容许侵蚀研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- ZHEN Xiaojun. Effects of different types of land use on soil loss tolerance in karst[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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 Geoscientia Sinica*, 2007, 28(5): 488-495.
- [18] 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.
- [19] 章程. 不同土地利用下溶蚀速率季节差异及其影响因素: 以重庆金佛山为例[J]. *地质论评*, 2010, 56(1): 136-140.
- ZHANG Cheng. Seasonal variation of dissolution rate under the soil at different land uses and its influence factors: A case study of Jinfo Mountain, Chongqing[J]. *Geological Review*, 2010, 56(1): 136-140.
- [20] 罗建, 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.
- [21] 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.
- [22] 刘再华, 何师意, 袁道先, 赵景波. 土壤中的CO₂及其对岩溶作

- 用的驱动[J]. 水文地质工程地质, 1998, 25(4): 44-47.
- LIU Zaihua, HE Shiyi, YUAN Daoxian, ZHAO Jingbo. CO₂ in soil and its driving effect on karstification[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, 25(4): 44-47.
- [23] 唐灿, 周平根. 北京典型溶洞区土壤中的CO₂及其对岩溶作用的驱动[J]. 中国岩溶, 1999, 18(3): 213-217.
- TANG Can, ZHOU Pinggen. The soil CO₂ and its driving action on karstification in typical karst area in Beijing[J]. Carsologica Sinica, 1999, 18(3): 213-217.
- [24] 章典, 师长兴. 青藏高原的大气CO₂含量、岩溶溶蚀速率及现代岩溶微地貌[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 566-570.
- ZHANG Dian, SHI Changxing. CO₂ partial pressure, karst dissolution rate and karst micro-landforms on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4): 566-570.
- [25] 邓艳, 覃星铭, 蒋忠诚, 罗为群, 祁晓凡. 表层岩溶动力系统中土壤水分及其岩溶效应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1586-1590.
- DENG Yan, QIN Xingming, JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, QI Xiaofan. Soilwater and its karst effect in epikarst dynamic system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1586-1590.
- [26] 李涛, 曹建华, 张美良, 黄艳梅, 陈家瑞, 严毅萍, 李光超, 朱晓燕. 桂林盘龙洞岩溶表层带土壤CO₂浓度的季节变化研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 348-353.
- LI Tao, CAO Jianhua, ZHANG Meiliang, HUANG Yanmei, CHEN Jiarui, YAN Yiping, LI Guangchao, ZHU Xiaoyan. The seasonal variation of soil CO₂ concentration in epikarst in the Panlong cave, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 348-353.
- [27] 何师意, 潘根兴, 曹建华, 陶于祥, 滕永忠. 表层岩溶生态系统碳循环特征研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 383-390.
- HE Shiyi, PAN Genxing, CAO Jianhua, TAO Yuxiang, TENG Yongzhong. Research on characteristics of carbon cycle in epikarst ecological system[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 383-390.
- [28] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 159-164.
- YAO Changhong, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Vegetation karst effect on the karst area of Southwest China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(2): 159-164.
- [29] 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 林玉石. 岩溶动力系统中的生物作用机理初探[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 203-209.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing, LIN Yushi. Preliminary study on biological action in karst dynamic system[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 203-209.
- [30] 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, 25(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, 25(6): 1131-1139.
- [31] 宁静, 杨磊, 曹建华, 李亮. 基于文献计量分析的岩溶区植被恢复研究现状与热点[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 321-336.
- NING Jing, YANG Lei, CAO Jianhua, LI Liang. Bibliometric analysis of the current research focus on vegetation restoration in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 321-336.
- [32] 张瑞林. 用华北与扬子陆块古地磁探讨秦巴地区的构造演化[J]. 西北地质科学, 1991, 20(2): 61-70.
- ZHANG Ruilin. The application of the paleomagnetic data of North China and Yangtze and the tectonic evolution in the Qinling-Dabashan region[J]. Northwest Geosciences, 1991, 20(2): 61-70.
- [33] 翟刚毅. 陕西秦巴地区区域构造演化与成矿谱系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2003.
- ZHAI Gangyi. Tectonic evolution and mineralized pedigree in the Qinlin-Bashan area of Shaanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2003.
- [34] 李红春, 顾德隆, Dorte Paulsen, 王非, 陈文寄, 尹功明, 程海, R L Edwards. 陕南石笋稳定同位素记录中的古气候和古季风信息[J]. 地震地质, 2000, 22(Supp.1): 63-78.
- LI Hongchun, GU Delong, Dorte Paulsen, WANG Fei, CHEN Wenji, YIN Gongming, CHENG Hai, R L Edwards. Paleoclimatic and paleomonsoonal variations in Central China recorded by stable isotopic records of stalagmites from Buddha cave, south Shaanxi[J]. Seismology and Geology, 2000, 22(Supp.1): 63-78.
- [35] 曹婷丽, 程成, 李双应, 庞长兴, 魏星. 陕西镇安二叠系碳酸盐岩粘土矿物特征及其对古气候的指示[J]. 地质评论, 2017, 63(2): 363-374.
- CAO Tingli, CHENG Cheng, LI Shuangying, PANG Changxing, WEI Xing. Clay mineral characteristics of Permian carbonate rocks in Zhen'an area, Shaanxi Province and its paleoclimate significance[J]. Geological Review, 2017, 63(2): 363-374.
- [36] 陈清敏, 洪增林, 罗乾周, 唐力, 王鹏, 胡义, 王研, 崔娜. 末次冰期汉中地洞河洞穴石笋微量元素古气候记录[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2020, 23(3): 92-97, 102.
- CHEN Qingmin, HONG Zenglin, LUO Qianzhou, TANG Li, WANG Peng, HU Yi, WANG Yan, CUI Na. Last glacial paleoclimate record of stalagmite trace elements from Didonghe cave in Hanzhong[J]. Journal of Xi'an University (Natural Science Edition), 2020, 23(3): 92-97, 102.
- [37] 齐矗华, 甘枝茂. 陕西省境秦巴山地白马塘、小南海地区岩溶地貌的基本特征[J]. 陕西师大学报(自然科学版), 1981, 9(Supp.1): 305-314.
- QI Chuhua, GAN Zhimao. The basic features of karst landforms in the Baimatang and Xiaonanhai regions of Qinling-Bashan mountains in Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 1981, 9(Supp.1): 305-314.
- [38] 谢红霞, 任志远, 莫宏伟. 陕南秦巴山地岩溶地貌生态旅游资源开发与生态经济建设[J]. 国土与自然资源研究, 2005,

- 27(1): 71-72.
- XIE Hongxia, REN Zhiyuan, MO Hongwei. The exploitation of karst eco-tourism resources and eco-economy construction in Qin-Ba Mountains in the south of Shaanxi Province[J]. *Territory and Natural Resources Study*, 2005, 27(1): 71-72.
- [39] 方东汉. 秦巴地区热矿泉的水文地质特征[J]. 陕西地质, 1985, 3(1): 92-99.
- FANG Donghan. The hydrogeological characteristics of thermal springs in Qinling-Bashan Mountainous[J]. *Geology of Shaanxi*, 1985, 3(1): 92-99.
- [40] 周宗俊. 陕西省岩溶地区水文地质特征[J]. 陕西地质, 1987, 5(2): 90-99.
- ZHOU Zongjun. Hydrogeologic feature in karst region, Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 1987, 5(2): 90-99.
- [41] 张本仁. 秦巴区域岩石圈组成、构造发展与成矿规律的地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1991, 10(4): 248-250.
- ZHANG Benren. Geochemical study on composition, tectonic development and metallogenic regularity of lithosphere in Qinling-Bashan area[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1991, 10(4): 248-250.
- [42] 陈清敏, 张丽, 王喆, 罗乾周, 蔺新望, 张俊良, 任娟刚. 汉中大佛洞宇宙成因核素 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏年龄[J]. 地球环境学报, 2018, 9(1): 38-44.
- CHEN Qingmin, ZHANG Li, WANG Zhe, LUO Qianzhou, LIN Xinwang, ZHANG Junliang, REN Juangang. Cosmogenic nuclides $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ burial ages of Dafo cave in Hanzhong, Shanxi, China[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(1): 38-44.
- [43] 樊会民, 张嘉升, 柏千惠, 安兴. 陕西秦巴地区地球化学分区及找矿意义[J]. 西北地质, 2018, 51(2): 75-82.
- FAN Huimin, ZHANG Jiasheng, BAI Qianhui, AN Xing. Geochemical landscape of Qinba area in Shaanxi Province and its prospecting significance[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(2): 75-82.
- [44] 吕古贤, 张宝林, 胡宝群, 王红才, 周永胜, 王宗秀, 曹代勇, 方维萱, 韩润生, 马立成. 构造物理化学的研究与进展[J/OL]. 地学前缘: 1-15[2023-02-28]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.11.36>.
- LYU Guxian, ZHANG Baolin, HU Baoqun, WANG Hongcai, ZHOU Yongsheng, WANG Zongxiu, CAO Daiyong, FANG Weixuan, HAN Runsheng, MA Licheng. Research status and progress of tectonic physicochemistry[J/OL]. *Earth Science Frontiers*: 1-15. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.11.36>.
- [45] 董云鹏, 杨钊, 孙圣思, 史小辉, 何登峰, 惠博, 龙晓平, 郭安林. 秦岭隆升过程及其如何控制气候环境[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3834-3836.
- DONG Yunpeng, YANG Zhao, SUN Shengsi, SHI Xiaohui, HE Dengfeng, HUI Bo, LONG Xiaoping, GUO Anlin. Qin Mountains uplift and how it controlled the climate?[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3834-3836.
- [46] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 62.
- YUAN Daoxian, CAI Guihong. *Karst Environment*[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988: 62.
- [47] 孙果梅, 况明生, 曲华. 陕西秦巴山区地质灾害研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 244-247.
- SUN Guomei, KUANG Mingsheng, QU Hua. Research of geological disaster in Qingling-Bashan Mountains[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 244-247.
- [48] 汪丽平, 魏志成, 梁卫卫, 关青青, 陈俊. 陕西省植被类型的空间分布[J]. 家畜生态学报, 2015, 36(7): 63-68.
- WANG Liping, WEI Zhicheng, LIANG Weiwei, GUAN Qingqing, CHEN Jun. Vegetation spatial distribution of in Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2015, 36(7): 63-68.
- [49] 任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 503-511.
- REN Zhiyuan, LI Jing. The valuation of ecological services from the vegetation ecosystems in the Qinling-Daba Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 503-511.
- [50] 龚自珍, 黄庆达. 碳酸盐岩岩块野外溶蚀速度试验[J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 17-26.
- GONG Zizhen, HUANG Qingda. Field corrosion rate tests on carbonate rocks[J]. *Carsologica Sinica*, 1984, 3(2): 17-26.
- [51] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 蓝芙宁, 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 Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, LAN Funing, ZHANG Liankai. Dissolution rate and its significance of different lithology tablets[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(4): 379-385.
- [52] 闫伟. 亚热带白云岩喀斯特区不同土地利用下成土速率与土壤侵蚀特征模拟研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- YAN Wei. Simulation study on soil formation rate and soil erosion characteristics under different land use in subtropical dolomite karst area[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021.
- [53] 吴孔运, 蒋忠诚, 叶晔. 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), 2007, 37(5): 967-971.
- WU Kongyun, JIANG Zhongcheng, YE Ye. Influence of different plant communities on erosion rates of limestone rock blocks[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(5): 967-971.
- [54] 李光超, 张春来, 杨慧, 李亮, 曹建华, 王培, 梁毅. 典型岩溶区旱季板栗树下岩溶溶蚀速率的研究[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 512-516.
- LI Guangchao, ZHANG Chunlai, YANG Hui, LI Liang, CAO Jianhua, WANG Pei, LIANG Yi. Study on karst processes under castanea mollissima trees at dry season in typical karst areas[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(4): 512-516.
- [55] 孙在斌. 垂直气候带表层岩溶泉水的理化性质与溶蚀作用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- SUN Zaibin. Study on physical and chemical properties and corrosion of surface karst springs on vertical climatic zones[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.

- [56] 蒲俊兵. 岩溶区典型水库岩溶作用碳循环过程及效应研究[R]. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 2017.
PU Junbing. Study on carbon cycle process and effect of karstification in typical reservoir in karst area[R]. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2017.
- [57] 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.
ZHANG Cheng. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2174-2180.
- [58] 张春来, 黄芬, 杨慧, 王培, 曹建华. 岩溶生态系统中的碳循环特征与碳汇效应[J]. 地球与环境, 2013, 41(4): 378-387.
ZHANG Chunlai, HUANG Fen, YANG Hui, WANG Pei, CAO Jianhua. Characteristics of carbon cycle and the effect of carbon sink in karst ecosystem[J]. Earth and Environment, 2013, 41(4): 378-387.
- [59] 朱国鹏. 根系分泌物研究方法(综述)[J]. 亚热带植物科学, 2002, 31(Supp.1): 15-21.
ZHU Guopeng. A review of the study methods for root exudates[J]. Subtropical Plant Science, 2002, 31(Supp.1): 15-21.
- [60] 罗健, 李林立, 李欢欢, 张德怀. 典型表层岩溶泉域旱季与雨季溶蚀速率分析: 以重庆金佛山水房泉流域为例[J]. 人民长江, 2012, 43(11): 90-94.
LUO Jian, LI Linli, LI Huanhuan, ZHANG Dehuai. Analysis on dissolution rate in subalpine epikarst spring area in dry and rainy seasons: A case of Shuifang spring area of Jinfo Mountain, Chongqing[J]. Yangtze River, 2012, 43(11): 90-94.
- [61] 黄奇波. 北方半干旱岩溶区岩溶碳汇过程及效应研究: 以山西柳林泉岩溶流域为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
HUANG Qibo. The carbon sequestration effect in semi-arid karst area: A case study of Liuling spring catchment, Shaanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [62] 刘宏, 吴文青. 路南石林现代喀斯特溶蚀速率研究[J]. 云南地理环境研究, 1998, 10(Supp.1): 114-121.
LIU Hong, WU Wenqing. Study on dissolution rate of modern karst in Lunan Stone Forest[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1998, 10(Supp.1): 114-121.
- [63] 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, Shaanxi Province[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(3): 258-265.
- [64] 潘波, 程滔, 徐丹, 刘松军. 长白山天池火山天文峰期黄色浮岩成因研究[J]. 岩石学报, 2020, 36(7): 2067-2080.
PAN Bo, CHENG Tao, XU Dan, LIU Songjun. Formation mechanism of yellow pumice in the deposition of Tianwenfeng eruption at Changbaishan-Tianchi volcano[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(7): 2067-2080.
- [65] 梁永平, 王维泰, 段光武. 鄂尔多斯盆地周边地区野外溶蚀试验结果讨论[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 315-320.
LIANG Yongping, WANG Weitai, DUAN Guangwu. Discussion on the result of field corrosion test around Erdos Basin[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(4): 315-320.
- [66] 周运超, 潘根兴. 茂兰森林生态系统对岩溶环境的适应与调节[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 50-55.
ZHOU Yunchao, PAN Genxing. Adaptation and adjustment of Maolan forest ecosystem to karst environment[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(1): 50-55.
- [67] 李阳兵, 王世杰, 周德全. 茂兰岩溶森林的生态服务研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(2): 39-44.
LI Yangbing, WANG Shijie, ZHOU Dequan. Research on the ecosystem service evaluation of Maolan karst forest[J]. Earth and Environment, 2005, 33(2): 39-44.
- [68] 杨明德, 梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44-51.
YANG Mingde, LIANG Hong. The processes of evolution dynamic of cone karst and the exploitation of the water resource[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(1): 44-51.
- [69] 邸爱莉. CO₂分压和降雨量对岩溶演化影响的数值模拟分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
DI Aili. Numerical simulation analysis of the influence of partial pressure of CO₂ and rainfall on karst evolution[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [70] 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 Shiyou, ZHANG Cheng. Impact of land-use patterns upon karst processes in typical karst regions of Jinfo Mountain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(6): 2366-2372.
- [71] 谢芳. 岩溶区成土速率的影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
XIE Fang. Effects of influence factors on the rate of soil formation in karst[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [72] 吴泽燕, 罗为群, 蒋忠诚, 章程, 胡兆鑫, 曹建华. 土壤改良对土壤水化学及碳酸盐岩溶蚀的CO₂净消耗量的影响[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 60-69.
WU Zeyan, LUO Weiqun, JIANG Zhongcheng, ZHANG Cheng, HU Zhaoxin, CAO Jianhua. Effects of filter sludge and organic manure soil improvement on soil hydrochemistry and net CO₂ consumption of dissolution of carbonate rocks[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(1): 60-69.
- [73] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 裴建国, 杨慧, 罗为群. 中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策[J]. 中国水土保持, 2008(12): 40-45, 72.
CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, YANG Desheng, PEI Jianguo, YANG Hui, LUO Weiqun. Soil loss tolerance and prevention and measurement of karst area in Southwest China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 40-45, 72.

- [74] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 潘立银, 胡安平, 胡圆圆. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.
- 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): 564-572.
- [75] 陶于祥, 潘根兴, 孙玉华, 滕永忠, 韩富顺. 土壤有机碳地球化学及其与岩溶作用的关系: 以桂林丫吉村岩溶试验场为例[J]. 火山地质与矿产, 1998, 19(1): 40-46.
- TAO Yuxiang, PAN Genxing, SUN Yuhua, TENG Yongzhong, HAN Fushun. The relationship between karst soil organic carbon geochemistry and karstification: Taking Yajichun karst experimental field in Guilin as an Example[J]. Volcanology and Mineral Resources, 1998, 19(1): 40-46.
- [76] 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CO₂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 Xiaqun, 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.
- [77] 曾发明. 岩溶石漠化治理对碳汇的影响研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- ZENG Faming. Study on the influence of karst rocky desertification control on carbon sink[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [78] 代林玉, 肖时珍, 曾成, 闫伟, 肖华, 邵治钦. 湿润亚热带典型白云岩区不同土地利用的土壤CO₂浓度特征及其影响因素[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 617-624.
- DAI Linyu, XIAO Shizhen, ZENG Cheng, YAN Wei, XIAO Hua, TAI Zhiqin. Characteristics and influencing factors of soil CO₂ release under different land use types in the typical dolomite area of humid subtropical regions[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 617-624.
- [79] 初小静, 韩广轩. 气温和降雨量对中国湿地生态系统CO₂交换的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 2978-2990.
- CHU Xiaojing, HAN Guangxuan. Effect of air temperature and rainfall on wetland ecosystem CO₂ exchange in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 2978-2990.
- [80] 康卫华, 程从雨, 李为, 余龙江. 微生物在岩溶碳循环中的作用研究回顾与展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 453-464.
- KANG Weihua, CHENG Congyu, LI Wei, YU Longjiang. Review and prospect of research on the role of micro-organisms in karst carbon cycle[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 453-464.
- [81] Liu Z H, Svensson U, Dreybrodt W, Yuan D X, Buhmann D. Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(15): 3087-3097.
- [82] 杨龙. 喀斯特石漠化治理生态修复模式下的碳汇效益监测评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- YANG Long. Evaluations of carbon sink benefit under the ecological restoration model of karst rocky desertification[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.
- [83] 李桂静. 不同程度石漠化岩溶系统碳迁移机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- LI Guijing. Carbon transfer mechanism of karst system in different degrees of rocky desertification[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [84] 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.
- [85] 郭红艳. 石漠化对土壤碳库和碳排放的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- GUO Hongyan. Study on the influence of the rocky desertification on soil carbon pool and soil carbon emissions[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [86] 王瑞江, 姚长宏, 蒋忠诚, 裴建国. 贵州六盘水石漠化的特点、成因与防治[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 45-50.
- WANG Ruijiang, YAO Changhong, JIANG Zhongcheng, PEI Jianguo. Characteristics, formation, and control of rocky desertification in Liupanshui City, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(3): 45-50.
- [87] 李森, 董玉祥, 王金华. 土地石漠化概念与分级问题再探讨[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 279-284.
- LI Sen, DONG Yuxiang, WANG Jinhua. Re-discussion on the concept and classification of rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(4): 279-284.

Karst dissolution rates of carbonate rocks in north-south geographical boundary of China—the Qinba Mountain Area

YANG Zhiguo¹, CHEN Qingmin^{1,2,3,4}, CHENG Xing¹, HE Kaikai¹,
ZHANG Yu⁵, TANG Li⁵, AI Hao¹, ZHANG Wenshuo¹

(1. Shaanxi Experimental Center of Geological Survey, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Postdoctoral Research Station of Shaanxi Geological Survey Institute, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4. Qinba Research Branch of China Society of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 5. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract The karst area in the south of China is one of the three major karst distribution areas in the world. But the economic development of the karst mountainous area is severely restricted by the fragility of its environment and unreasonable disturbance of human activities. As quantitative data reflecting the intensity of karstification, karst dissolution rates can be studied to facilitate the restoration of karst ecosystem and control of rocky desertification. Especially in recent years, research on rocky desertification control and ecological restoration in karst areas of Southwest China has been achieved with fruitful results, and hence is widely concerned by many domestic scholars on karst ecological characteristics and vulnerability, rocky desertification control and other issues. The Qinba area of Shaanxi Province is an important dividing line between the north and south of China in a climate of subtropical continental monsoon. It is also known as the "central water tower" and has a large sinkhole group at high latitude. Its special geographical location obviously differentiates the climate and ecological environment between the north and south. At the same time, carbonate rocks are widely exposed in the Qinba area, especially in places such as Zhen'an, Shanyang, etc. Unreasonable human activities have destroyed the karst ecological environment, making rocky desertification prominent. By analyzing dissolution rates from the aspects of vegetation, climate, and human factors, we explore the impact of regional environmental changes on karst formation, which may provide data support for ecological restoration, karst carbon sequestration, and rocky desertification control, and may also fill the gap in the study of karst formation in the Qinba area of Shaanxi Province.

The three representative vegetation types—woodland, shrub and grassland—were selected in field dissolution tests in the study area. In this study, we used standard dissolution specimens (square test pieces with the side length of 4 cm and thickness of 0.3 cm) of crystalline limestone from the Late Triassic Wujiaping Formation (P_3w) in Xiaonanhai town, Hanzhong City. Each vegetation type was divided into 5 layers (100 cm in the air, surface, 20 cm under the soil, and 50 cm and 100 cm under the soil). Three standard dissolution test pieces were placed in each layer. After a full hydrological year from March 31, 2021 to October 20, 2022, a total of 806 dissolution specimens were retrieved, and the amount and rate of dissolution of each specimen were obtained. The effects of vegetation types, depths, rainfall and temperatures on the karst process and the relationship between karst dissolution rates and degrees of rocky desertification were comprehensively discussed.

The results showed that there were significant differences in subsurface dissolution rates among vegetation types. The average underground dissolution rate of forest land was the highest, followed by that of shrub land. The rate of grassland was the lowest. It was found that the dissolution rate of forest land in the same layer was higher than those of shrub and grassland, and the underground dissolution rate of shrub was higher than that of grassland. The organic carbon contents of different vegetation types and the changes of soil physical and chemical properties by vegetation are the fundamental factors that affect the direction and intensity of the karst process. At the same time, we analyzed the influence of rainfall and temperatures on dissolution rates in different regions. The results showed that there was a significant positive correlation between rainfall and dissolution rates ($R=0.84$), indicating that rainfall plays a key role

in karstification. Rainwater absorbed CO_2 from the air during the process of falling to the surface. During infiltrating from the surface to the soil, rainwater combined with CO_2 released by plant root respiration and produced by microbial metabolism to form carbonic acid after it absorbed CO_2 in the process of falling to the surface. Consequently, the continuous dissolution of carbonate rocks by both surface water and groundwater containing carbonic acid led to the development of rocky desertification. The correlation coefficient between temperatures and corrosion rates is 0.45, which indicates that the temperature is not an important factor affecting the dissolution rate.

The formation of rocky desertification is the result of the joint action of natural factors and human factors, and unreasonable human activities are the main factors. A comparative study on dissolution rates of different degrees of rocky desertification in the Qinba area shows that dissolution rates increase with the increase of rocky desertification degrees as follows, severe rocky desertification>moderate rocky desertification>mild rocky desertification. This phenomenon is more obvious in areas with mild rocky desertification, for example, the dissolution rates of Beiyang Mountain in Zhen'an are three times as much as those of the areas mostly distributed with mild rocky desertification. Besides, the aggravation of rocky desertification is often accompanied by extensive agricultural production patterns and severe ecological environment damage. It can be seen that in densely populated areas of karst mountainous areas, people's transformation of the karst environment is the main reason for the aggravation of rocky desertification, and the higher the dissolution rate is, the higher the degree of rocky desertification becomes.

The study of dissolution rates in the Qinba area of Shaanxi Province shows that with the forward succession of vegetation, dissolution rates of carbonate rocks will increase. Rainfall can promote the dissolution of carbonate rocks, which is one of the important factors affecting karstification. Moreover, rocky desertification is the result of the interaction of carbonate rock dissolution and human disturbance, and human factors play the main role.

Key words the Qinba area of Shaanxi Province, karst, dissolution test method, dissolution rate, rainfall, air temperature, rocky desertification

(编辑 张玲 杨杨)