

罗维均,杨开萍,王彦伟,等.喀斯特地区不同岩土组构对岩溶碳通量的影响[J].地质科技通报,2022,41(3):208-214.
Luo Weijun, Yang Kaiping, Wang Yanwei, et al. Influence of different rock-soil fabrics on carbonate weathering carbon sink flux in karst regions[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3): 208-214.

喀斯特地区不同岩土组构对岩溶碳通量的影响

罗维均^{1,2}, 杨开萍^{1,3}, 王彦伟¹, 陈佳^{1,2,3}, 贾玉鹤⁴, 王世杰^{1,2}

(1.中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2.中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 安顺 562100;

3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.沈阳市生态环境事务服务中心, 沈阳 110011)

摘要:我国南方喀斯特地区岩石裸露率高、土层浅薄且分布不均,这种特殊的岩土组构如何影响水文过程对于准确估算岩溶碳通量具有重要意义。水化学径流法是计算流域尺度岩溶碳通量的常用方法,其中流域面积和流量作为2个重要参数在喀斯特地区往往难以准确获取。在普定喀斯特生态系统观测研究站设计了一组岩土比(1:1和4:1)和一组土层厚度(5,20,100 cm)共计5种岩土组构的模拟试验场。通过一个完整水文年的流量和水化学监测,定量研究了岩石裸露率和土层厚度对水文过程以及岩溶碳通量的影响。研究表明,5个模拟试验场岩溶碳通量平均值为(17±3) gC/m²/a,受渗流量控制,雨季(5—10月)约占95%;岩石裸露率(2组岩土组构之间)对渗流量的影响可达14%,且随着岩石裸露率增加,入渗系数也相应增加;土层厚度对渗流量的影响仅在1%~2%之间。此外,对8个野外流域观测数据的分析发现,入渗系数与岩溶碳通量的相关性最为显著,说明入渗系数是喀斯特地区不同岩土组构地质背景影响和控制岩溶碳通量的主要因素,同时这种影响可能随降雨量变化而变化,即入渗系数并非常数。

关键词:岩溶碳通量;岩石裸露率;岩土组构;土层厚度;入渗系数;喀斯特普定喀斯特生态系统观测研究站

中图分类号:P641.72

文章编号:2096-8523(2022)03-0208-07

收稿日期:2021-06-20

doi:10.19509/j.cnki.dzkg.2022.0088

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of different rock-soil fabrics on carbonate weathering carbon sink flux in karst regions

Luo Weijun^{1,2}, Yang Kaiping^{1,3}, Wang Yanwei¹, Chen Jia^{1,2,3}, Jia Yuhe⁴, Wang Shijie^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2.Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun Guizhou 562100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Shenyang Ecological Environment Affairs Service Center, Shenyang 110011, China)

Abstract: The karst areas in southern China are characterized by a high rock exposure ratio and shallow and unevenly distributed soil layers. How this special geotechnical fabric affects the hydrological process is of great significance for the accurate estimation of carbonate weathering carbon sink flux. Hydrochemical runoff is a commonly used method for calculating carbonate weathering carbon sink flux at the watershed scale, and basin area and discharge, as two important parameters, are often difficult to accurately obtain in karst areas. To overcome this problem, we designed a rock-soil fabric simulation test site, including different rock-soil ratios (1:1 and 4:1) and soil thicknesses (5, 20, 100 cm) at the Puding Karst Ecosystem Research

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB400202001);国家自然科学基金项目(41673121)

作者简介:罗维均(1978—),男,研究员,主要从事喀斯特关键带物质循环教学与研究工作。E-mail:luoweijun@vip.gyig.ac.cn

Station, Chinese Academy Sciences. The effects of rock exposure and soil layer thickness on hydrological processes and carbonate weathering carbon sink flux were quantitatively studied by monitoring the flow and hydrochemistry during a hydrological year. The results show that the average carbonate weathering carbon sink flux is $17 \pm 3 \text{ gC/m}^2/\text{a}$, which is controlled by the leakage amount and accounts for 95% in the rainy season (from May to October); The influence of the rock exposure ratio (between the two groups of rock fabric) on the leakage amount is up to 14%, and the infiltration coefficient increases with increasing of rock exposure ratio; The effect of the soil layer thickness on seepage is only 1%–2%. In addition, it is found that the correlation between the infiltration coefficient and carbonate weathering carbon sink flux is the most significant by analysis the observed data of 8 field basins from previous studies. The infiltration coefficient is the main factor affecting and controlling the carbonate weathering carbon sink flux, which is due to the geological background of different rock and soil fabrics in the karst area. At the same time, the influence may change with the rainfall variation, that is, the infiltration coefficient is not constant.

Key words: carbonate weathering carbon sink flux; rock exposure; rock-soil fabrics; soil thickness; infiltration coefficient; Karst Puding Karst Ecosystem Research Station

碳酸盐岩是全球最大的无机碳库,在耦合生物作用与水循环系统后通过快速的岩溶作用成为参与全球碳循环重要的组成部分之一,对于控制全球二氧化碳浓度有重要的负反馈作用^[1-3]。其中岩溶作用主要是以水为介质消耗大气和土壤中的二氧化碳生成碳酸,然后与碳酸盐岩反应生成溶解无机碳,进而通过河流输送至海洋形成短时间尺度的碳汇^[4]。在这个过程中部分碳通过脱气作用返回回大气^[5],但还有一部分会通过水生生物的光合作用形成有机碳埋藏,从而成为稳定碳汇^[6-7]。全球碳酸盐岩分布面积约占陆地面积的 15%^[8],由于地质、气候、水文、植被等水、热、化学、生物条件及介质物理结构存在明显的差异,导致不同地区岩溶形态组合不同,岩溶作用的强度也大相径庭^[9-10]。但是通过对不同岩溶水系统的监测研究发现,岩溶碳通量主要受流量控制,其次是受土地利用变化的影响^[11-12]。比如对美国 59 个流域的监测研究发现,径流量变化可达几个数量级,而水化学参数变化相对较小,表现出一定的稳态性,导致流域岩溶产物输出量主要受流量控制^[13]。对中国主要河流的研究发现,溶解无机碳的含量差异较小,而溶解无机碳输出量相差可达 3 个数量级,也说明了流量的控制作用^[14]。

我国南方喀斯特地区作为全球三大喀斯特集中分布区之一,面积约 $5.4 \times 10^5 \text{ km}^2$,是相关研究的热点地区^[15]。其中通过水化学一径流法对普定后寨河流域、荔波板寨地下河流域等流域的多年监测研究也表明岩溶碳通量主要受流量控制^[16-17]。而水化学一径流法作为喀斯特地区估算岩溶碳通量的经典方法,最主要的问题是流域边界和径流量往往难以准确获取^[18-19]。特别是缺少监测的区域,径流量一般采用降水径流系数法获得,而径流量以及径流系

数往往受地质背景、气候、土地利用类型等多种因素影响^[20-21]。特别是我国南方喀斯特地区岩石裸露率高、土层浅薄且分布不均^[22],这种特殊的岩土结构地质背景如何影响水文过程,对于准确估算岩溶碳通量有重要意义,但是野外难以开展相关控制试验。

基于此,本研究依托中科院普定喀斯特生态系统观测研究站的基础研究平台,采用边界明确、渗流量准确的大型蒸渗仪装置,根据喀斯特地区野外常见的岩土结构关系,设计了 5 种不同岩土结构的模拟实验场,在排除外源酸、气候、植被和人类活动等干扰的前提下,定量研究不同岩土结构的地质背景如何通过影响水文过程进而控制岩溶碳通量的大小。

1 研究方法

1.1 研究区及模拟试验场

模拟试验场位于中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,处于亚热带湿润季风气候区。根据普定气象站多年监测数据,年均气温 $15.1 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均日照时数为 1 165 h,无霜期 301 d,年均降水 1 378 mm,雨季集中在 5—10 月。如图 1 所示,模拟试验场箱体的集水面积相同,规格为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,由嵌入的岩石和土壤组合而成。蒸渗仪装置外壳由钢材和混凝土制成,内部设有重量感应装置,对整个箱体的称重频率为每小时一次,精度误差小于 1 g。箱体外部右下角设置排水口,将称重之后的渗流水收集在容积为 10 L 的量桶内。所有填埋的石灰岩和白云岩均采于试验场附件的采石场,属中三叠纪关岭组地层。土壤来自普定站周边的石灰岩洼地,分别是黑色石灰土和黄色石灰土。

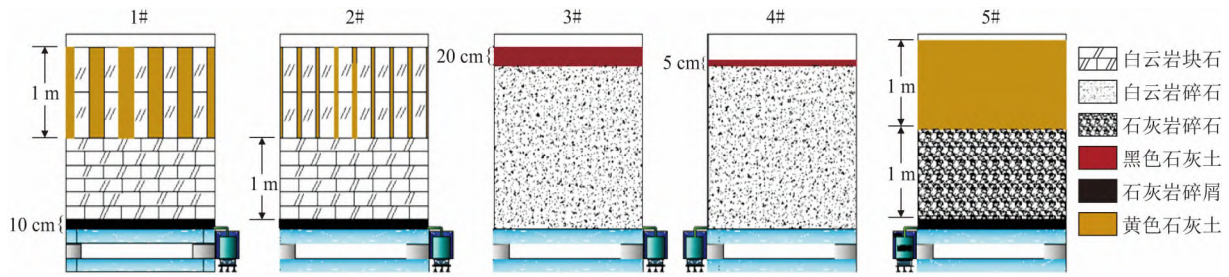


图1 基于大型蒸渗仪装置的不同岩土结构模拟试验场

Fig.1 Simulation test of different rock-soil fabrics based on a lysimeter device

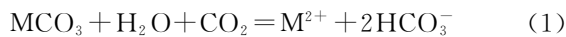
1.2 采样及测试

从2019年9月1日至2020年9月1日进行了一个完整水文年的试验场渗漏水水样收集。雨季时平均每7天进行一次采样,旱季采样周期为15天一次,且旱季采样提前一天关闭阀门,确保次日试验场水量充足。且水化学参数均是在现场测量。

利用Multi 3420便携式多参数水质分析仪现场测定每个模拟场渗透水的电导率(EC)、水温、pH值、TDS和溶解氧,其测量精度分别为 $1 \mu\text{S}/\text{cm}$, 0.01°C , 0.01 pH , $1 \text{ mg}/\text{L}$ 和 $1 \text{ mg}/\text{L}$ 。利用Merck碱度计和硬度计现场测定水中的 HCO_3^- 浓度,精度为 $0.1 \text{ mmol}/\text{L}$ 。测阴阳离子的水样均用50 mL塑料瓶装取,测阳离子的水样中提前加入两滴纯硝酸至 $\text{pH} < 2$ 以保持离子活性,阴离子和阳离子分别用离子色谱(ICS90)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定,所有水样阴阳离子测定中电荷平衡检验误差小于5%。所有测试均在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。

1.3 数据处理

碳酸盐岩风化的化学方程式为:



式中:M指岩石中的 Mg^{2+} 或 Ca^{2+} ;1单位土壤 CO_2 在碳酸盐岩溶解过程中,转化为0.5单位的 HCO_3^- 。

本研究采用水化学-径流法计算模拟试验场岩溶碳通量的大小。计算公式如下:

$$\text{CCSF} = 0.5 \times 12 \times \text{DIC} \times Q/A \quad (2)$$

式中:CCSF为岩溶碳通量($\text{gC}/\text{m}^2/\text{a}$);12为碳的相对原子质量;DIC为溶解无机碳浓度(mmol/L); Q/A 为单位时间单位面积的渗漏量(m/a)。其中流量(Q/A)根据重量感应器实时称重得出,溶解无机碳(DIC)浓度通过现场测量获取。

2 结果

2.1 模拟试验场渗漏水水化学特征

如图2所示,三线图表明5种岩土结构不同的模拟试验场渗漏水均为典型的岩溶水,主要阳离子

为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,占总阳离子数量的85%以上,主要阴离子为 HCO_3^- 。如表1所示,岩性不同的试验场渗透水的 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 差异明显,3#和4#模拟试验场的渗漏水 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 较高,是典型的纯白云岩风化特征。模拟试验场渗漏水pH值整体差异不大,均呈现弱碱性,说明碳酸盐岩化学风化作用对渗漏水pH值的控制作用。一般pH值在7~9之间时,溶解无机碳(DIC)主要以碳酸氢根离子(HCO_3^-)为主^[23-24],5种模拟试验场DIC浓度差异明显,可能与试验场中土壤有机碳含量不均一有关。

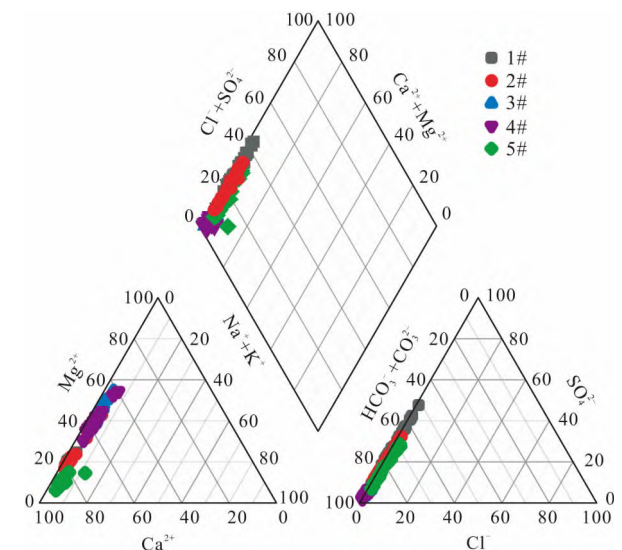


图2 不同岩土结构模拟试验场渗漏水水化学参数三线图

Fig.2 Piper diagram of hydrochemical parameters under different rock-soil fabrics

表1 不同岩土结构模拟试验场水化学参数均值

Table 1 Hydrochemical parameters under different rock-soil fabrics

	1#	2#	3#	4#	5#
pH	8.24	8.20	8.38	8.46	8.36
T/°C	20.46	20.32	20.26	20.16	20.23
$\rho(\text{TDS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	254	239	255	208	173
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	76	74	50	42	58
$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	21	21	41	31	8
$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	188	231	259	232	173

2.2 模拟试验场渗漏特征

如图 3 所示,2019 年 9 月至 2020 年 9 月作为一个完整水文年的总降雨量为 1 376 mm,且主要集中在雨季,约占总降雨量的 89%。观测期间 5 个模拟试验场渗漏量在 790~917 mm 之间,且 96% 以上的渗漏量都集中在雨季。其中第一组岩土组构 1# 和 2# 模拟试验场岩石裸露率分别为 50% 和 80%,渗漏量基本一致,相差仅为 1%。第二组岩土组构 4#、3# 和 5# 模拟试验场土层厚度分别为 5, 20, 100 cm,渗漏量也基本一致,相差约为 2%。但 2 组岩土组构之间渗漏量相差较大,即第二组土壤全覆盖的情况下比第一组渗漏量下降约 14%。降雨作为模拟试验场唯一的输入水源,在相同降雨量的情况下,模拟试验场之间渗漏量的差异主要取决于不同岩土组构对水文过程的影响。如图 4 所示,发现在月尺度上渗漏量与降雨量之间呈现复杂的非线性关系,即在每月降雨量小于 50 mm 的情况下,渗漏量基本为零,随着每月降雨量的不断增加,渗漏量呈现不同程度的增加趋势。并且不同岩土组构之间渗漏量随降雨量的变化存在一定的差异,说明水文过程受岩土组构影响。

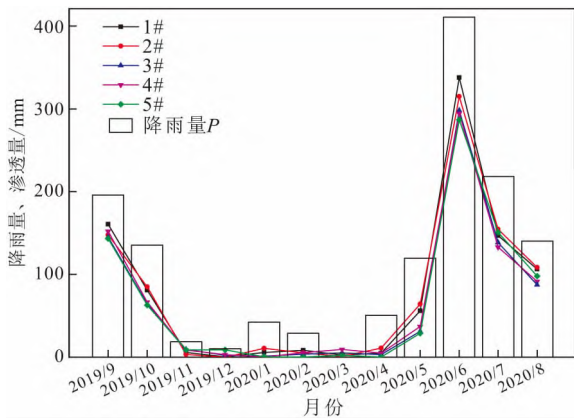


图 3 每月降雨量和模拟试验场渗漏量变化

Fig.3 Monthly precipitation and leakage of the simulation test

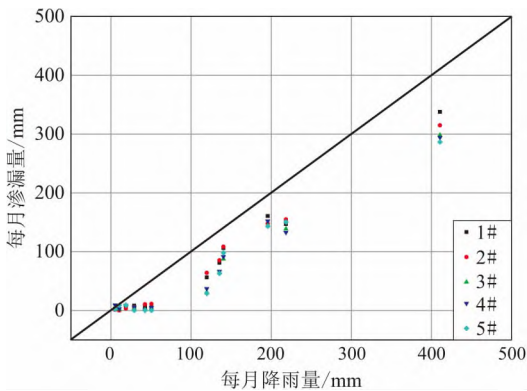


图 4 月尺度降雨量与渗漏量关系

Fig.4 Relationship between monthly precipitation and leakage

2.3 模拟试验场岩溶碳通量特征

根据水化学和渗漏量的观测结果,计算得到 5 种不同岩土组构模拟试验场雨季、旱季和全年不同时间段的岩溶碳通量,如表 2 所示。5 种模拟试验场岩溶碳通量平均大小为 $(17 \pm 3) \text{ gC/m}^2/\text{a}$,不同模拟试验场之间岩溶碳通量大小受水化学和渗漏量的耦合控制。同一模拟试验场由于水化学参数全年变化较小,使得岩溶碳通量变化主要受渗漏量控制,导致所有模拟试验场 90% 以上的岩溶碳通量都集中在雨季。如图 5 所示,在月尺度上,岩溶碳通量与渗漏量呈显著正相关,与 DIC 浓度相关性不显著。

表 2 不同岩土组构模拟试验场岩溶碳通量大小

Table 2 Carbonate weathering carbon sink flux of different rock-soil fabrics

参数	1#	2#	3#	4#	5#
Q/mm	889.00	875.00	765.00	775.00	771.00
雨季 DIC/(mmol·L ⁻¹)	2.92	3.59	4.01	3.59	2.75
CCSF/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	15.60	18.90	18.40	16.70	12.70
旱季 Q/mm	28.00	32.00	25.00	32.00	21.00
旱季 DIC/(mmol·L ⁻¹)	3.05	3.68	4.23	3.85	2.89
旱季 CCSF/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	0.50	0.70	0.60	0.70	0.40
全年 Q/mm	917.00	907.00	790.00	807.00	792.00
全年 DIC/(mmol·L ⁻¹)	2.97	3.63	4.09	3.69	2.82
全年 CCSF/(gC·m ⁻² ·a ⁻¹)	6.30	19.80	19.40	17.90	13.40

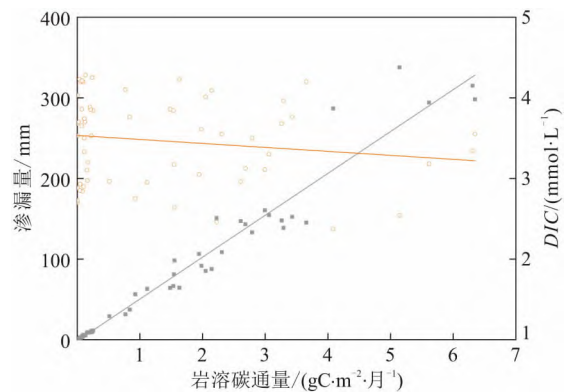


图 5 月尺度岩溶碳通量与渗漏量、DIC 浓度关系

Fig.5 Relationship between monthly carbonate weathering carbon flux and leakage, DIC

3 讨论

3.1 岩土组构对入渗系数的影响

结合本研究和前人的类似控制试验结果^[12],如表 3 所示,可以发现岩土组构对入渗系数有一定的控制作用。即在土层完全覆盖的情况下,入渗系数小于 0.6;在岩石出露的情况下,入渗系数超过 0.6;

在完全裸岩的情况下,入渗系数达 0.9 以上。可见,随着岩石裸露率的增加,入渗系数呈现非线性的增加趋势。这可能主要与岩土组构对蒸发的影响有关,当土层完全覆盖时,由于土壤对水分的截留与涵养,使得蒸发作用较强,导致入渗系数较小;当有岩石出露时,蒸发作用减小,导致入渗系数增加;而当完全裸岩时,降雨下渗较快,极大削弱了蒸发作用对水分的消耗,导致入渗系数最大。但是对于土层厚度和岩石裸露率的相对变化,入渗系数并不敏感。比如土层厚度由 5 cm 增加至 100 cm 时,入渗系数基本不变;岩石裸露率由 50% 增加至 80%,入渗系数也基本接近。这可能与当地的降雨特征有关,由于 90% 的降雨量集中在雨季,且大部分降雨量主要以强降雨的形式发生,导致降雨入渗较快,使得入渗系数对岩土比例和土层厚度相对变化的响应不能显现出来。

表 3 岩土组构对入渗系数的影响

Table 3 Influence of rock-soil fabric on infiltration coefficient

岩土组构类型	参数	入渗系数	来源
裸岩地/%	100	0.92	文献[12]
岩土比例	1:1	0.67	本研究
	4:1	0.66	本研究
土层厚度/cm	5	0.58	本研究
	20	0.57	本研究
	50	0.57	文献[12]
	100	0.58	本研究

3.2 入渗系数对流域尺度岩溶碳通量的影响

前人对我国南方喀斯特地区的典型流域进行了大量观测研究,比如对广西柳州关村地下河、云南广南木美地下河和贵州板寨地下河的对比研究发现,石漠化严重的木美地下河流域岩溶碳通量高于原始森林的板寨地下河流域,主要与木美地下河有较高的径流量有关^[25]。对广西桂林寨底地下河、广西环江大安地下河和重庆北碚青木关地下河 3 个岩溶水系统的对比研究发现,降雨量较低的青木关地下河流域岩溶碳通量反而最高^[11]。对贵州荔波板寨地下河、皇后地下河和贵州普定后寨河地下河流域的对比研究发现,皇后地下河流域虽然 DIC 浓度最低,但由于径流强度高,导致岩溶碳通量最高^[26]。对北欧阿尔卑斯山 2 个岩溶流域和贵州荔波板寨地下河流域的对比研究发现,径流主导岩溶碳通量的大小,由于板寨流域植被导致的蒸腾作用较强,导致径流量减小,使其全年岩溶碳通量相对较低^[27]。如表 4 所示,以上文献中提到的 8 个喀斯特野外流域由于地质背景、土地利用和气候的差异,岩溶碳通量最大相差可达 5 倍。如图 6 所示,通过进一步分析可以发现不同流域岩溶碳通量与径流量呈显著正相关,但与降雨量无显著相关性。主要是因为 8 个南方喀斯特流域同处于亚热带季风气候,降雨量差别较小,此时入渗系数成为了径流量的主要控制因素。径流量越大,携带出的 HCO_3^- 越多,岩溶碳通量则越大。而不同流域入渗系数的差异可能受地质背景和土地利用的综合影响,且同一流域的入渗系数随降雨量的变化而变化,说明入渗系数可能并非常数。

表 4 我国南方喀斯特地区 8 个野外流域数据汇总

Table 4 Data summary of eight karst basins in South China karst region

流域名称	$P/(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$	$T/^\circ\text{C}$	$\text{DIC}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{RD}/(\text{m} \cdot \text{a}^{-1})$	α	$\text{CCSF}/(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	土地利用	地质背景	参考文献
寨底	1.67	19	213	0.90	0.54	19	灌木、草丛存在石漠化	灰岩(90%)、白云质灰岩、白云岩、碎屑岩	
大安	1.57	20	263	0.85	0.54	22	阔叶林、灌木、草丛	灰岩、白云质灰岩、页岩夹砂岩	文献[11]
青木关	1.25	18	327	0.85	0.68	27	针叶林、阔叶林	砂页岩、白云质灰岩、白云岩、灰岩、泥页岩	
关村	1.75	20	262	0.48	0.27	12	灌木	灰岩、白云岩夹层	文献[23]
木美	1.41	17	256	1.35	0.96	34	石漠化	灰岩、白云岩	
皇后	1.43	15	183	0.53	0.37	9	森林、农田	灰岩	文献[24]
后寨	1.23	15	231	0.39	0.32	11	农田、森林、裸岩	灰岩、白云岩、石膏夹层	
	1.31		262	0.38	0.29	10			本研究
	1.57		229	0.37	0.24	8			文献[24]
板寨	1.63	118	206	0.54	0.33	11	原始森林	白云质灰岩	文献[17]
	1.65		238	0.50	0.31	12			文献[23]
	1.69		223	0.33	0.20	7			文献[25]

注: P 为降雨量; T 为年均温; RD 为径流深; $\alpha = \text{RD}/P$, 为入渗系数

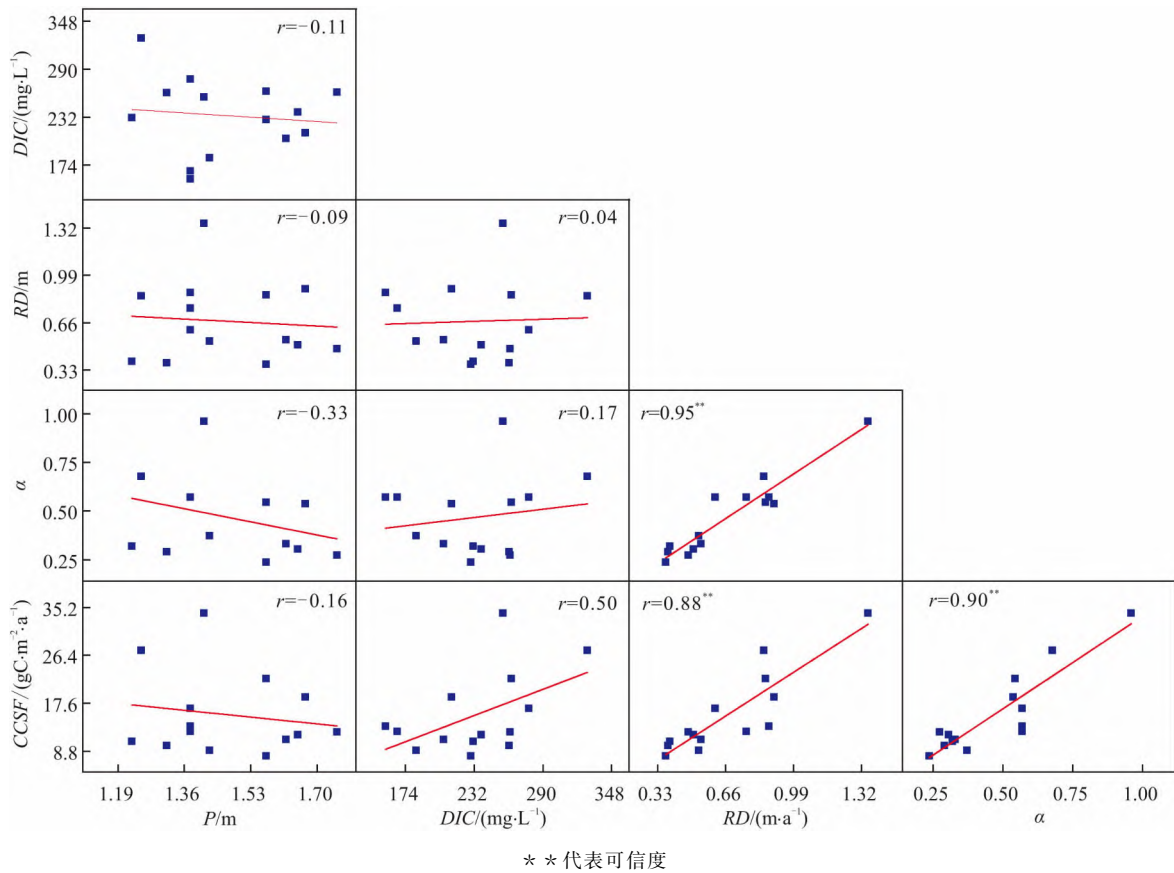


图 6 我国南方喀斯特地区 8 个野外流域岩溶碳通量与影响因子的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of carbonate weathering carbon sink flux with associated factors for eight karst basins in the South China karst region

4 结 语

喀斯特地区流域尺度上岩溶碳通量的大小主要受径流量控制。在降雨量充沛,气候条件相似的南方喀斯特地区,降雨量并不是控制径流量的主要因素,而是入渗系数。本研究通过模拟控制试验证明不同岩土结构的地质背景可以通过对水文过程的影响,在一定程度上控制入渗系数的大小,成为除土地利用之外影响流域岩溶碳通量大小的关键因素。但入渗系数随岩石裸露率的增加,整体上呈现非线性的增加趋势,而受土层厚度的影响较小,说明喀斯特地区地质背景对入渗过程影响的复杂性。本研究说明对于缺少观测数据的区域,在使用降雨径流系数法计算径流量时,径流系数的选择除了考虑土地利用类型的影响之外,同时必须考虑地质背景的影响。

参考文献:

[1] Amiotte S P, Probst J L. Modelling of atmospheric CO₂ consumption by chemical weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins [J]. Chemical Geology, 1993, 107(3/4): 205-210.

[2] Shen T M, Li W, Pan W Z, et al. Role of bacterial carbonic anhydrase during CO₂ capture in the CO₂-H₂O-carbonate system [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 123: 66-74.

[3] Martin J B. Carbonate minerals in the global carbon cycle [J]. Chemical Geology, 2017, 449: 58-72.

[4] Liu Z H, Dreybrodt W, Liu H. Atmospheric CO₂ sink: Silicate weathering or carbonate weathering? [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26: S292-S294.

[5] Wang Z J, Yin J J, Pu J B, et al. Flux and influencing factors of CO₂ outgassing in a karst spring-fed creek: Implications for carbonate weathering-related carbon sink assessment [J]. Journal of Hydrology, 2020, 596(2): 125710.

[6] Liu Z H, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. Earth Science Reviews, 2010, 99(3): 162-172.

[7] Liu Z H, Macpherson G L, Groves C, et al. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 182: 42-49.

[8] Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources [J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(5): 1661-1677.

[9] 袁道先. 碳循环与全球岩溶 [J]. 第四纪研究, 1993, 13(1): 1-6.

- Yuan D X. Carbon cycle and global karst[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [10] 罗明明, 周宏, 郭绪磊, 等. 峡口隧道间歇性岩溶涌突水过程及来源解析[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(6): 246-254.
Luo M M, Zhou H, Guo X L, et al. Processes and sources identification of intermittent karst water inrush in Xiakou Tunnel[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(6): 246-254 (in Chinese with English abstract).
- [11] 江欣悦, 李静, 郭林, 等. 豫北平原浅层地下水化学特征与成因机制[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(5): 290-300.
Jiang X Y, Li J, Guo L, et al. Chemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the northern Henan Plain[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(5): 290-300 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zeng Q R, Liu Z H, Chen B, et al. 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*, 2017, 474: 58-71.
- [13] Godsey S E, Kirchner J W, Clow D W. Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(13): 1844-1864.
- [14] Wang Q F, Zheng H, Zhu X J, et al. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001-2010[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(6): 577-590.
- [15] 王世杰, 刘再华, 倪健, 等. 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 S J, Liu Z H, Ni J, et al. 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 (in Chinese with English abstract).
- [16] Yan J H, Wang Y P, Zhou G Y, et al. Carbon uptake by karsts in the Houzhai Basin, southwest China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G4): 1-10.
- [17] 何师意, 康志强, 李清艳, 等. 高分辨率实时监测技术在岩溶碳汇估算中的应用: 以板寨地下河监测站为例[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(3): 157-161.
He S Y, Kang Z Q, Li Q Y, et al. The utilization of real-time high resolution monitoring skill in karst carbon sequestration: A case of the station in Banzhai subterranean stream catchment[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(3): 157-161 (in Chinese with English abstract).
- [18] 曾成, 刘再华. 建设岩溶水-碳通量大型模拟试验场的构想[J]. *资源环境与工程*, 2013, 27(2): 196-221.
Zeng C, Liu Z H. Ideas of construction of simulation test field of karst water and carbon fluxes[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2013, 27(2): 196-221 (in Chinese with English abstract).
- [19] 朱辉, 曾成, 刘再华, 等. 岩溶作用碳汇强度变化的土地利用调控规律: 贵州普定岩溶水-碳通量大型模拟试验场研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6): 120-125.
Zhu H, Zeng C, Liu Z H, et al. Karst-related carbon sink flux variations caused by land use changes: An example from the Puding karst test site in Guizhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 120-125 (in Chinese with English abstract).
- [20] 邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 等. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2004, 29(2): 177-182.
Qiu D S, Zhuang D F, Hu Y F, et al. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(2): 177-182 (in Chinese with English abstract).
- [21] 彭韬, 周长生, 宁茂岐, 等. 基于探地雷达解译的喀斯特坡地表层岩溶带空间分布特征研究[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(6): 1262-1270.
Peng T, Zhou C S, Ning M Q, et al. Study on spatial distribution of epikarst zone on plateau karst slope based on ground-penetrating radar[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6): 1262-1270 (in Chinese with English abstract).
- [22] 梁杏, 张人权, 牛宏, 等. 地下水流系统理论与研究方法的发展[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(5): 143-151.
Liang X, Zhang R Q, Niu H, et al. Development of the theory and research method of groundwater flow system[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(5): 143-151 (in Chinese with English abstract).
- [23] Zeng S B, Liu H, Liu Z H, et al. Seasonal and diurnal variations in DIC, NO_3^- and TOC concentrations in spring-pond ecosystems under different land-uses at the Shawan Karst Test Site, SW China: Carbon limitation of aquatic photosynthesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 811-821.
- [24] 梁杏, 张婧玮, 蓝坤, 等. 江汉平原地下水化学特征及水流系统分析[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 21-33.
Liang X, Zhang J W, Lan K, et al. Hydrochemical characteristics of ground water and analysis of groundwater flow systems in Jianghan Plain[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1): 21-33 (in Chinese with English abstract).
- [25] 郭芳, 姜光辉, 康志强. 亚热带典型岩溶水系统的碳汇效应对比研究[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 403-409.
Guo F, Jiang G H, Kang Z Q. Study on carbon sink effect in typical sub-tropical karst water system[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 403-409 (in Chinese with English abstract).
- [26] Zeng C, Liu Z H, Zhao M, et al. Hydrologically-driven variations in the karst-related carbon sink fluxes: Insights from high-resolution monitoring of three karst catchments in Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 74-90.
- [27] Zeng S B, Liu Z H, Goldscheider N, et al. Comparisons on the effects of temperature, runoff, and land-cover on carbonate weathering in different karst catchments: Insights into the future global carbon cycle[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 29: 331-345.