

罗振宇, 杨琰, 李计, 等. 石漠化治理区表层岩溶泉流量衰减分析及无机碳通量估算: 以重庆酉阳龙潭槽谷老泉为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 337-350, 381.

DOI: 10.11932/karst2023y011

石漠化治理区表层岩溶泉流量衰减 分析及无机碳通量估算 ——以重庆酉阳龙潭槽谷老泉为例

罗振宇^{1,2}, 杨琰^{1,2}, 李计^{1,2}, 肖文杰^{1,2}, 孙婷婷^{1,2}, 叶枝茂^{1,2}

(1. 西南大学地理科学学院岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715)

摘要: 应对“双碳”目标, 加强岩溶石漠化综合治理工作, 地下水是关键。为探究重庆市酉阳县龙潭槽谷石漠化治理区岩溶泉的流量衰减及无机碳通量变化特征, 采用流量衰减方程与水化学径流法对研究点老泉进行模拟与分析。结果表明: (1) 老泉的流量衰减分为两个亚动态, 衰减系数分别为 0.089 2、0.019 6, 其具有双重性含水介质特征。(2) 暴雨期老泉的碳通量随流量变化的特征明显; 而伏旱期(7月底—8月底)老泉的碳通量与土壤 CO₂、泉水 CO₂ 均具有明显的昼夜变化特征, 表现为夜间低、日间高。(3) 老泉夏季的碳通量与降水量呈正相关($R=0.78$), 与蒸发量呈负相关($R=-0.36$), 气候的不稳定性变化对碳通量影响显著。老泉的月 HCO₃⁻浓度与月土壤 CO₂ 浓度的相关系数为 0.64, HCO₃⁻敏感地响应土壤 CO₂ 的变化; 而老泉年碳通量与年土壤 CO₂ 浓度的相关系数为 0.90, 且年均 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 呈偏负趋势, 土地利用变化(植被恢复)有利于土壤 CO₂ 及老泉碳通量的增加。(4) 老泉 2018-2021 年的碳通量呈波动上升趋势, 年均无机碳通量为 15.05 t·km⁻²·a⁻¹。研究结果能为石漠化生态恢复治理工作提供参考。

关键词: 岩溶泉; 流量衰减; 碳通量; 岩溶石漠化; 重庆市酉阳县

中图分类号: X 171.4; P 641.134 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)02-0337-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

全球气候变化与国家“双碳”目标的大背景下, 岩溶碳汇与碳循环是当今的热点研究方向之一^[1]。根据国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》, 扎实推进山水林田湖草沙一体化保护与修复工作, 特别是针对岩溶石漠化与水土流失的综合治理, 以期提升岩溶生态系统的碳汇能力。我国西南岩溶槽谷

区水土资源流失的问题尤其突出^[2], 石漠化问题严峻, 进一步完善槽谷区的生态环境综合治理与地下水资源的高效利用研究是该区域的工作重点^[3-4]。

岩溶地下水开发利用是槽谷石漠化区生态恢复治理的关键环节, 对石漠化形成与分布起着重要控制作用^[5], 合理评估与利用岩溶地下水十分必要。由于岩溶水系统复杂多变, 含水介质具有强烈的非均质性和各向异性^[6], 如何有效地评估含水层储水量与认识

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277048); 国家重点研发计划子课题(2016YFC050230205)

第一作者简介: 罗振宇(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶环境变化研究。E-mail: 956458061@qq.com。

通信作者: 杨琰(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩溶关键带水资源与水环境研究。E-mail: yy2954@swu.edu.cn。

收稿日期: 2022-09-13

其内部特征是水文地质研究的难点。众多学者如 Fiorillo 等^[7]通过序列分析的方法,揭示岩溶水系统内部信息; Worthington 等^[8]采用钻探、吴平等^[9]采用同位素示踪等方法揭示岩溶含水介质特征,但实施难度偏大,成本较高。杨杨等^[10]、张程鹏等^[11]利用数值模型法进行水文模拟与评价,但前期研究与数据基础要求较高,适用于特定的较大岩溶流域。西南地区存在众多小流域,基于动态监测技术的地下水流量衰减曲线分析是认识岩溶小流域含水层水文地质特征的有效方法之一^[12-13],目前该方法少见岩溶槽谷典型石漠化治理区表层岩溶泉的研究。岩溶地下水不仅是水循环的载体,也是岩溶碳循环的重要媒介^[14],精确地评估岩溶水系统的碳通量对于研究岩溶碳循环过程具有重要意义。众多学者基于碳酸盐岩溶蚀试片法^[15]、回归模型法^[16]、地理信息技术^[17]等方法计算区域的碳通量,但普遍存在数据精确要求高、环境因素变化造成结果存在较大误差等问题。目前常运用水化学径流法对岩溶流域碳汇进行估算^[18],该方法的精确度是建立在对流域水文流量与溶解无机碳精确观测的基础上^[19-20],是合理评估岩溶碳汇工作的重要参考。此外,研究表明全球变化引起的极端高温、干旱与暴雨等事件会导致岩溶碳汇强度估算存在不确定性^[21],土地利用变化如植被恢复的增汇效益显著^[22],同时也会出现土地撂荒等新问题^[23],造成土壤 CO₂ 及岩溶碳汇的不稳定性变化。目前针对岩溶槽谷石漠化区的已有研究大多考虑单独的土地利用、石漠化治理对岩溶泉水化学及同位素的影响^[24-25],对于全球气候变化与石漠化生态治理过程中岩溶地下水中的碳通量变化差异及其影响机制仍不清楚。

基于前人的研究基础,综合运用数理统计、衰减分析与水化学径流法等方法,分析龙潭槽谷石漠化治理区表层岩溶泉的流量衰减过程,评估岩溶地下水含水量与含水介质特征,并初步估算泉域的无机碳通量及分析其影响因素,为评估该地区的岩溶碳汇工作提供理论依据,也能为石漠化治理工作提供技术参考。

1 研究区概况

龙潭槽谷地处渝东南桐麻岭背斜的南东翼,为武陵山区的一部分,属背斜型岩溶低位槽谷,槽谷范围为重庆市酉阳县泔溪镇至麻旺镇,呈 NNE 走向。槽

谷区年均气温 16 ℃,年均降水量 1 470 mm,降水集中在每年的 5-7 月和 9-10 月,属亚热带季风气候。龙潭槽谷以寒武系 (C)、奥陶系 (O) 的白云质灰岩与白云岩为主(图 1),槽谷东侧为逆层坡,地层为毛田组 (C_{3m})、南津关组 (O_{1n})、分乡组与红花园组 (O_{f+h}) 及大湾组 (O_{1d}),岩性以白云质灰岩与白云岩为主,岩组富水性中等偏弱。西侧为顺层坡,地层为高台组 (C_{2g})、平井组 (C_{2p}),岩性以白云质灰岩为主,岩组富水性中等。老泉出露于龙潭槽谷逆层坡的寒武系毛田组 (C_{3m}) 地层,海拔约 400 m,年均流量 5.26 L·s⁻¹,水化学类型主要是 Ca-Mg-HCO₃ 型,泉域的汇水面积约为 0.9 km²^[24],泉域范围主要位于龙潭槽谷东侧的石漠化治理区及其周边地区,泉域内岩层相对裸露,土层浅薄,土地利用方式以林地、少量旱地为主,覆盖植被主要为人工青花椒林与次生灌木林。其中逆坡石漠化治理区用于植被恢复治理的青花椒林约为 20 hm²,但由于当地经营管理不当,从 2018 年起青花椒林开始出现撂荒(不耕种,不管理)的现象,土地利用经历了林地—荒地—次生灌木林地的变化。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

由于岩溶泉水文与水化学特征变化迅速,数据的获取采用野外仪器高分辨率自动监测、现场监测与实验室分析等方法。自动监测方面:利用 U20-001-04 HOBO Water Level 型水位计、PONSEL Multy8320 set4 多参数水质自动记录仪、CR1000 型 CO₂ 数据采集器、DAVIS Vantage Pro2 型自动气象监测站及重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站武陵山龙潭观测点气象站,设置 15 min 记录间隔,监测老泉的水位 (m)、水温 (℃)、电导率 (μS·cm⁻¹)、pH、CO₂ 浓度 (mL·m⁻³),及其泉域附近 60 cm 深处的土壤 CO₂ 浓度 (mL·m⁻³)、降水量 (mm)、气温 (℃) 和蒸发量 (mm)。现场监测方面:每月利用 Multi3430 便携式水质分析仪与 Merck 碱度计对老泉中的电导率 (μS·cm⁻¹)、Ca²⁺ (mg·L⁻¹) 和 HCO₃⁻ (mg·L⁻¹) 进行现场测定。实验室分析方面:每月采集老泉的水样,样品经处理后送往西南大学地理科学学院检测,水体 δ¹³C_{DIC} 的测试仪器为 Delta V Plus 气体稳定同位素质谱仪,绝对误差 < 0.2%。本文采用 SPSS 19 进行数据分析,采用 ArcGIS 10.2 和 Origin 2018 绘制图件。

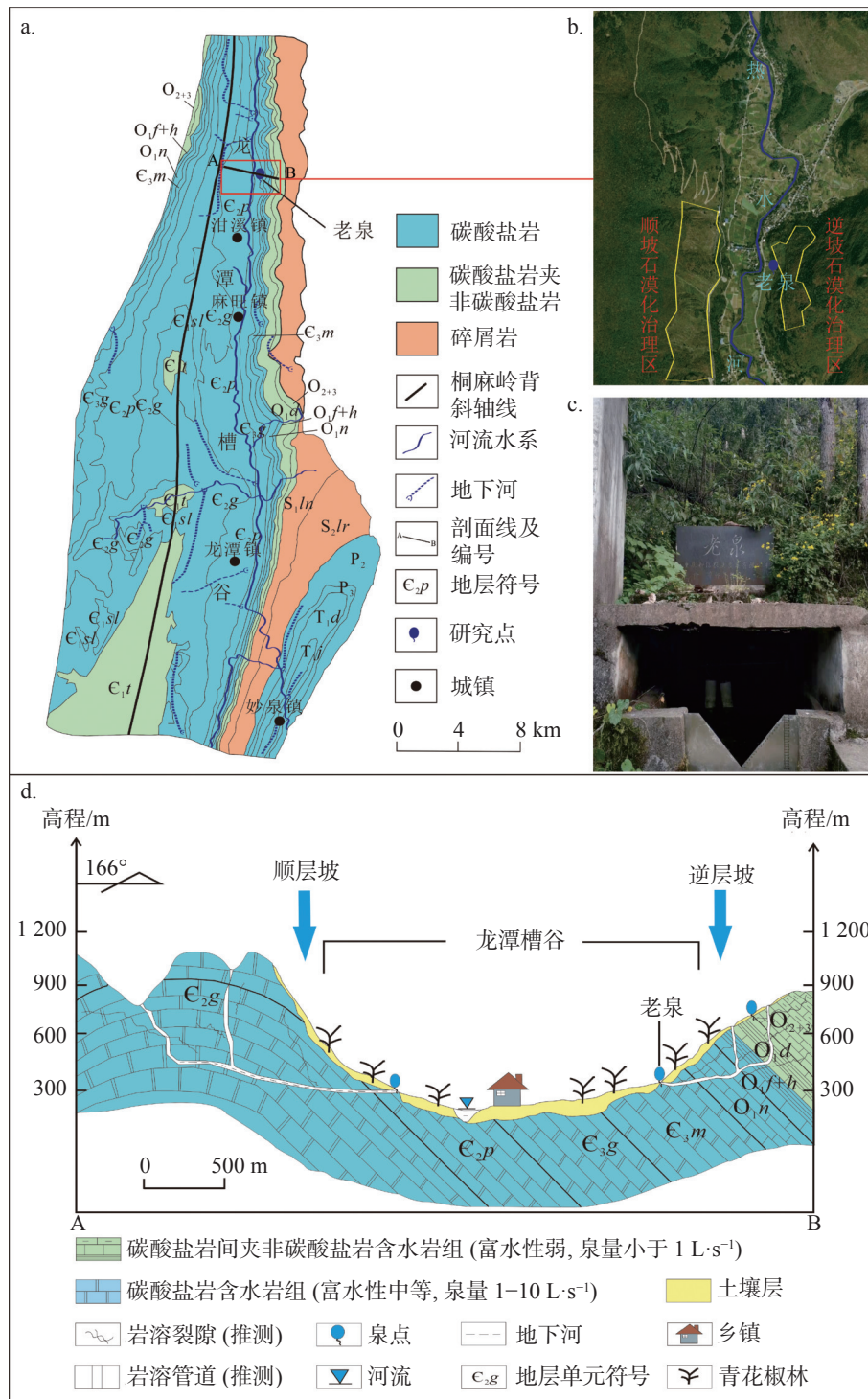


图 1 龙潭槽谷水文地质概况图(a-水文地质平面图, b-石漠化治理区卫星图(据 Google Earth), c-老泉实景图, d-水文地质剖面图(修改自参考文献 [25]))

Fig. 1 Hydrogeological survey of Longtan trough valley (a- Hydrogeological map, b- Satellite map of rocky desertification control area (based on Google Earth), c- Map of Laoquan spring, d- Hydrogeological profile [25])

2.2 研究方法

2.2.1 流量衰减计算

老泉处修建蓄水池并设置直角三角与薄壁矩形

复合堰, 通过暴雨期间实测堰上水头高度与蓄水池内 HOBO 水位计自动记录的水位高度进行矫正, 利用堰流公式计算泉水的流量。当水位低于直角三角堰最大高度时, 采用直角三角堰流量公式计算^[26]。

当水位高于直角三角堰最大高度时,采用薄壁矩形堰流量公式计算^[27],流量系数则采用巴赞流量系数公式^[28],公式在 $0.1\text{ m} \leq H \leq 1.24\text{ m}$, $0.2\text{ m} \leq B \leq 2\text{ m}$ 及 $P \leq 1.13\text{ m}$ 范围适用。

采用指数衰减分析法^[29]计算老泉的流量衰减方程。计算公式如下:

$$Q_t = Q_0 e^{-at} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{\lg Q_{i-1} - \lg Q_i}{0.4343(t_i - t_{i-1})} \quad (2)$$

式中: Q_0 表示衰减的初始流量($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$); Q_t 表示衰减开始后 t 时刻的流量($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$); Q_i 表示第 $(i+1)$ 衰减期初始时刻流量($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$); a_i 表示第 (i) 衰减期流量衰减系数; t_i 表示第 (i) 衰减期结束时间(min)。

2.2.2 无机碳通量计算

采用水化学径流法估算老泉的无机碳通量^[30],利用老泉水中的 HCO_3^- 浓度值,根据岩溶作用消耗的大气/土壤 CO_2 估算碳酸盐岩中的溶解无机碳通量。计算公式如下:

$$C_h = \text{CO}_2 = \text{HCO}_3^- \times 44 / (2 \times 61) \quad (3)$$

$$C_m = Q / F \times C_h \quad (4)$$

式中: Q 为岩溶水径流量($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$); F 为流域面积(km^2); C_h 为岩溶水 CO_2 含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); C_m 为无机碳通量(以 CO_2 计)($\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^2$)。

3 结果与讨论

3.1 岩溶泉的流量特征

表层岩溶泉老泉的流量状态具有不稳定特点(图2),具体表现为:年际尺度下,据年均流量进行划分,2019年($3.48\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)为枯水年,2020年($7.30\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)为丰水年,2018年($4.68\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)与2021年($5.58\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)为平水年,多年平均流量 $5.26\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。季节尺度下,春、秋季流量偏大,夏季伏旱期(7月底—8月底)泉水会出现长时间的断流现象。区别于峰丛谷地地貌区的岩溶地下水^[31],发育于槽谷区坡面的老泉的产流与排泄极为迅速。

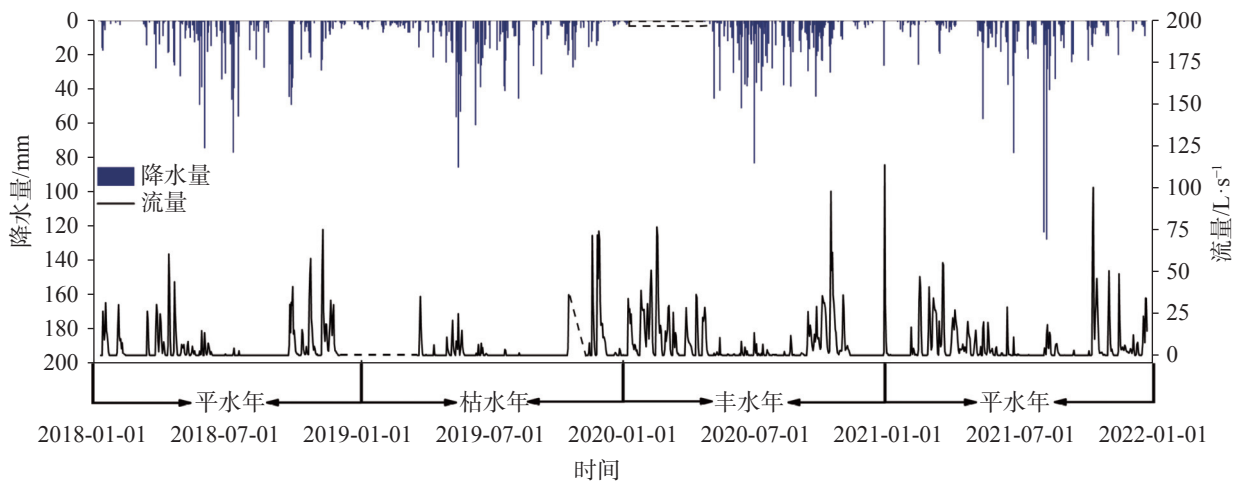


图2 龙潭槽谷老泉的降水流量变化曲线

注:虚线部分数据因仪器故障而缺失

Fig. 2 Variation curve of precipitation discharge in Laoquan spring of Longtan trough valley

Part of the dotted line data is missing due to the instrument failure

老泉流量在时间尺度上分布不均,分析降水条件与下垫面因素对其流量状态存在较大影响。槽谷区春雨期与华西秋雨期的降水持续时间且密集,降水强度影响着含水层的饱和度,雨强较小导致雨水能通过地表分散入渗补给地下水,造成春、秋季地下水总体流量增大。夏季初期槽谷地区强降水事件频发,降水强度超过地表的入渗

能力而形成超渗产流,雨水难以充分下渗补给地下水^[32];且夏季在西太平洋副热带高压控制下,槽谷区每年7月底—8月底会出现长时间的极端高温与伏旱天气(表1),蒸发量大幅增加,泉水的补给来源减少,导致老泉流量偏低,甚至出现断流现象,造成该时期水资源相对短缺,同时也不利于区域岩溶作用的进行与碳通量的增加。

表 1 2018–2021 年伏旱期 (7 月 21 日–8 月 31 日) 老泉的气候与流量情况

Table 1 Climate and discharge of Laoquan spring during the drought period (from July 21 to August 31) from 2018 to 2021

时间/年	2018	2019	2020	2021	多年平均值
降水总量/mm	1 485.2	1 461.6	1 500.2	1 429.8	1 470.0
伏旱期降水量/mm	103.8	139.6	216.8	491.2	237.9
伏旱期蒸发量/mm	166.9	178.7	178.7	226.9	187.8
伏旱期干旱天数/天	29	31	29	19	27
伏旱期降水天数/天	13	11	13	23	15
伏旱期高温天数(大于35 °C)/天	27	29	23	25	26
伏旱期断流天数/天	37	34	18	23	28
伏旱期流量/L·s ⁻¹	0	0.03	0.65	2.38	0.76

3.2 岩溶泉的流量衰减特征

老泉对于强降水的响应非常敏感,选取 2020 年 5 月 6 日 6:00–5 月 7 日 18:00 次降雨过程分析其流量衰减曲线(图 3a)。本次强降水历时 6 h,降水总量为 45.6 mm,达到了暴雨等级。老泉流量峰值为 70.94 L·s⁻¹,洪峰滞后降水峰值约 2 h,洪峰过后水量排泄迅速,流量曲线于 9 h 后进入缓慢排泄阶段,流量曲线为不对称尖峰型流量曲线^[13]。结合公式(1)、(2)对老泉 200506 号暴雨期间的流量变化进行衰减分析,如图 3b 所示,将其流量衰减过程划分为两个衰减亚动态,利用 SPSS 19 软件进行分段拟合,得出流量衰减系数与方程:

$$\begin{cases} 70.94e^{-0.0892t} & (0, 36] & R^2 = 0.992 \\ 2.86e^{-0.0196t} & (36, 120] & R^2 = 0.896 \end{cases} \quad (t, 15\text{min}) \quad (5)$$

流量衰减方程可用于反映含水层介质的特性,利用函数积分方法^[33]进一步计算出老泉的岩溶水子系统的赋存水量(表 2)。老泉两个亚动态衰减系数分别为 0.089 2、0.019 6,第一亚动态的衰减系数是第二亚动态的 4.5 倍,总储水量为 739.26 m³,第一、第二亚动态对应的含水介质储水量占比分别是 84%、16%。老泉流量衰减过程主要集中在第一、第二亚动态,对比贵州岩溶区的表层泉,其衰减过程集中在第二、第三亚动态^[13],而老泉的流量衰减特征更接近于湘西岩溶水系统^[34],这表明武陵山地区的岩溶水文地质特征具有一定的独特性。

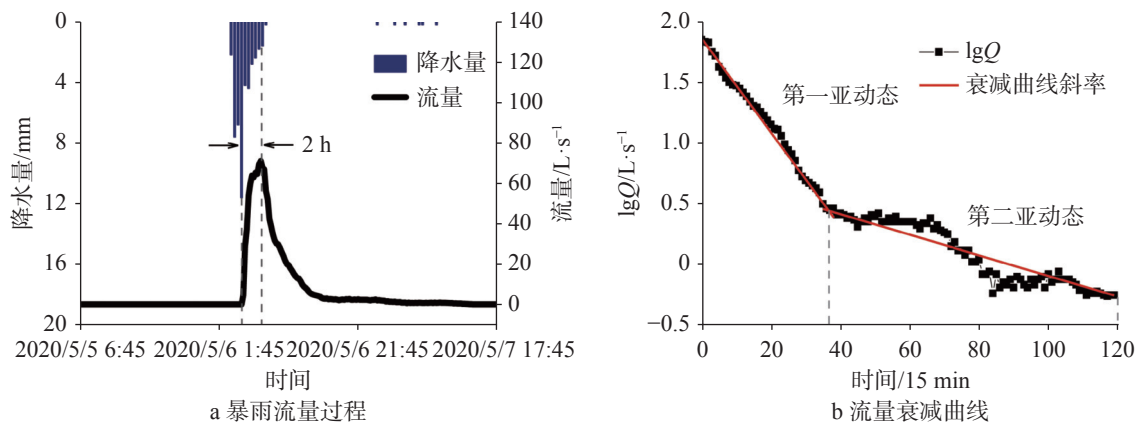


图 3 老泉 200506 号暴雨的流量衰减过程

Fig. 3 Flow attenuation process of rainstorm No. 200506 in Laoquan spring

表 2 老泉 200506 号暴雨的流量衰减参数

Table 2 Flow attenuation parameters of Rainstorm No. 200506 in Laoquan spring

岩溶水系统	亚动态	衰减系数/15 min	持续时间/h	含水介质储水量/m ³	亚动态占总储水量之比/%	总储水量/m ³
老泉	一	0.089 2	9	620.43	84	739.26
	二	0.019 6	21	118.83	16	

老泉所在的石漠化治理区逆层坡坡面与岩层的倾角较大^[35], 土壤层较薄, 岩性以白云质灰岩与白云岩为主, 岩层透水性强, 岩溶作用较为强烈, 对泉水流量特征影响大。从表 2 可知, 老泉第一亚动态的储水量占比高, 推测逆层坡含水层中连通性较好的大型岩溶管道或洞穴发育, 其导水作用强烈, 导致大量的泉水迅速地排泄。老泉第二亚动态储水量占比较小, 推测逆层坡含水介质中存在一定的张性裂隙、断裂带及溶隙系统, 使地下水流量的衰减速度减小。老泉的双重性含水介质特征显著, 且含水介质具有极不均匀的特性, 管道与裂隙比重大, 含水介质的导水作用强, 老泉水文系统对降水入渗水量的调蓄能力较弱。同时, 老泉的流量衰减与含水介质特征也会对岩溶碳汇过程产生重要影响。

3.3 岩溶泉的碳通量特征及影响因素

3.3.1 暴雨期间碳通量的变化

根据长时间的现场滴定与野外仪器自动监测,

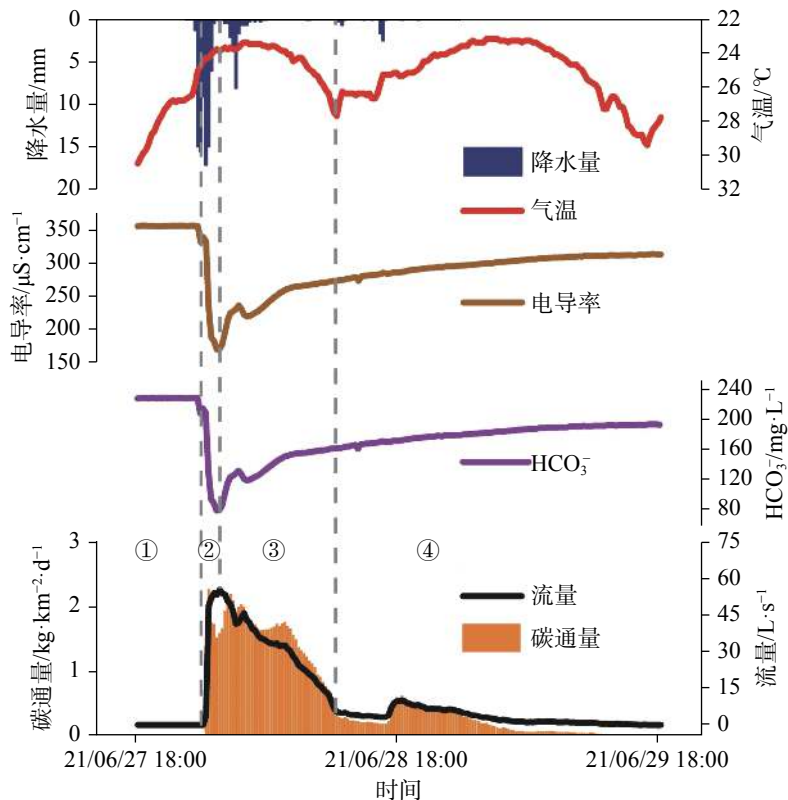


图 5 老泉 210628 号暴雨期间的碳通量变化

Fig. 5 Variation of carbon flux during Rainstorm No. 210628 in Laoquan spring

暴雨期老泉水碳通量的变化受含水介质、流量与 HCO_3^- 浓度的共同影响, 且流量是控制碳通量变化

发现老泉的 HCO_3^- 浓度与电导率存在较好的相关性(图 4), 线性方程为: $(\text{HCO}_3^-) = 0.797 \times \text{EC} - 54.973$, $R = 0.74$, 可间接估算老泉 210628 号暴雨期间的连续的 HCO_3^- 浓度值。按流量过程及流量衰减亚动态划分 4 个 HCO_3^- 浓度变化的区间(图 5), 并通过公式(3)、(4)进一步估算暴雨期老泉流量衰减过程中产生的碳通量。

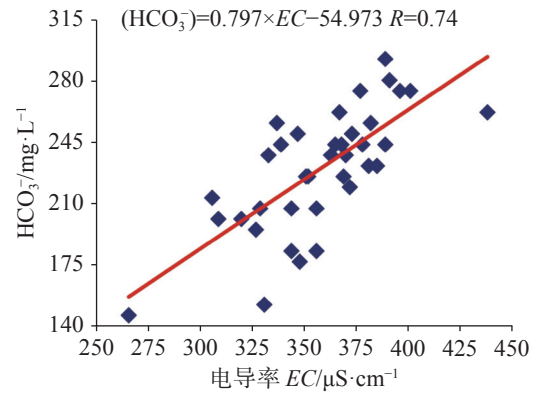


图 4 老泉 HCO_3^- 与电导率 EC 的相关性

Fig. 4 Correlation between HCO_3^- and EC in Laoquan spring

的主要因素^[36]。根据表 3 可以看出: 第①阶段老泉无水源补给, 该阶段碳通量为 0; 第②阶段雨水开始

表 3 老泉 210628 号暴雨期间流量与碳通量参数
Table 3 Flow and carbon flux parameters during Rainstorm No.210628 in Laoquan spring

阶段	平均流量/L·s ⁻¹	HCO ₃ ⁻ 平均浓度/mg·L ⁻¹	持续时间/h	各阶段累计的碳通量/kg·km ⁻² ·d ⁻¹	累计碳通量/kg·km ⁻² ·d ⁻¹
①	0	227.53	6	0	
②	38.52	127.49	1.5	9.25	97.64
③	31.75	140.30	10.5	64.43	
④	3.25	181.78	29	23.96	

从岩溶洞穴或落水洞进入岩溶系统,老泉的流量快速上升,碳通量大幅增加,为 9.25 kg·km⁻²·d⁻¹;第③阶段老泉处于衰减初期,大型岩溶管道的导水作用强烈,其平均流量高,岩溶作用效率提升造成水中 HCO₃⁻浓度上升,加上衰减时间较长,碳通量在该阶段达到最大值,为 64.43 kg·km⁻²·d⁻¹;第④阶段老泉处于衰减后期,裂隙或溶隙系统的流量排泄速度缓慢,虽然水中 HCO₃⁻浓度上升及衰减时间延长,但碳通量随流量消退而逐渐减少,为 23.96 kg·km⁻²·d⁻¹。夏季暴雨期老泉的碳通量随流量变化的特征显著,该时期岩溶作用条件充分,碳通量主要富集于流量衰减阶段,碳通量为 97.64 kg·km⁻²·d⁻¹。

3.3.2 伏旱期间碳通量的变化

夏季伏旱期老泉的碳通量变化具有明显的昼夜变化特征,以 2021 年 8 月 2 日-2021 年 8 月 3 日的水-土监测数据为例(图 6)。夜间老泉的碳通量变化为 0.03~0.26 kg·km⁻²·d⁻¹,均值为 0.15 kg·km⁻²·d⁻¹;土壤 CO₂ 变化为 8 041~9 141 mL·m⁻³,均值为 8 549 mL·m⁻³;泉水 CO₂ 变化为 5 751~6 151 mL·m⁻³,均值为 5 957 mL·m⁻³。日间的碳通量变化为 0.11~0.31 kg·km⁻²·d⁻¹,均值为 0.22 kg·km⁻²·d⁻¹;土壤 CO₂ 变化为 8 532~9 404 mL·m⁻³,均值为 9 023 mL·m⁻³;泉水 CO₂ 变化为 6 124~6 214 mL·m⁻³,均值为 6 182 mL·m⁻³。老泉

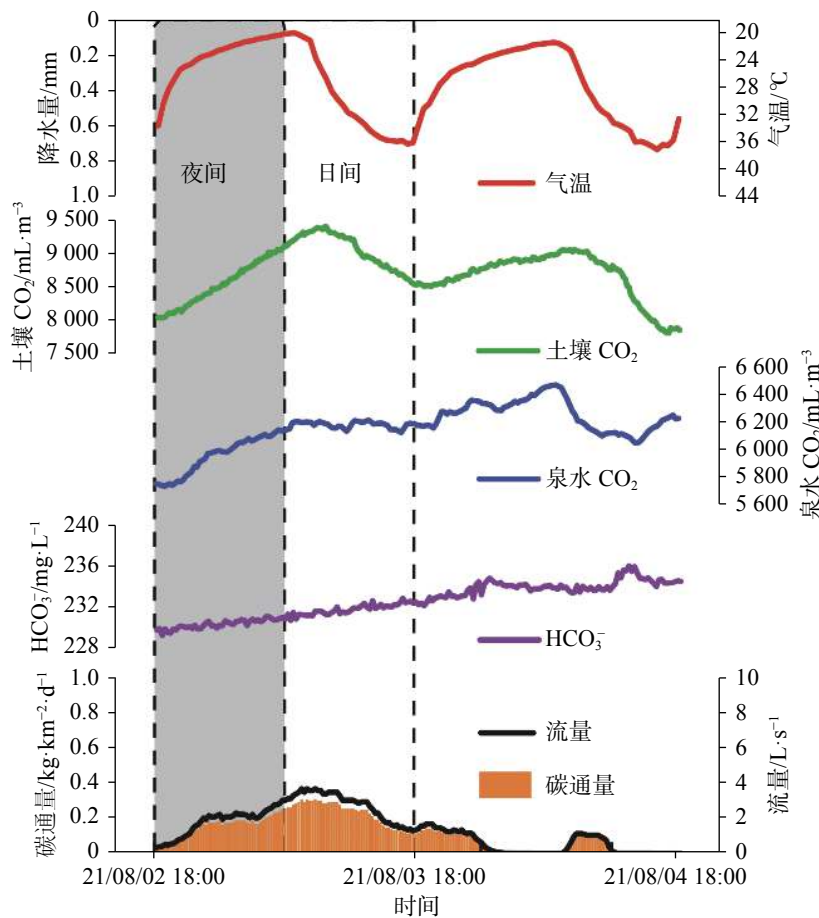


图 6 老泉夏季伏旱期的土-水 CO₂-碳通量的变化

Fig. 6 Changes of soil-water CO₂-carbon flux of Laoquan spring during the summer drought period

碳通量变化与土壤 CO₂、泉水 CO₂ 的变化具有同步性,均呈现夜间低、日间高的特点,土壤 CO₂ 的昼夜变化可能会导致老泉 CO₂ 浓度及碳通量随之变化^[37]。

老泉泉域的土壤 CO₂ 主要来源于植物根呼吸、微生物活动和土壤有机质氧化分解。夏季伏早期间日照时间长,植物生长茂盛,根系的呼吸作用更加频繁,温度上升导致土壤中的生物活动也更为活跃,促使土壤 CO₂ 浓度快速上升。土壤 CO₂ 能与水反应形成 H₂CO₃ 存在土壤水中,并进一步与碳酸盐岩发生反应,补给地下水^[38],造成泉水中 HCO₃⁻、CO₂ 浓度上升,最终导致日间碳通量的增加。但由于伏早期降水补给减少、蒸发量增加,泉水以裂隙、溶隙流为主,老泉流量小甚至断流,岩溶作用效率相对降低,造成该时期的碳通量普遍偏低,碳通量为 18.23 kg·km⁻²·d⁻¹。

3.3.3 年际碳通量的变化

老泉的碳通量具有明显的年际变化特征,以

2018-2021 年的水文-化学监测数据为例(表 4)。老泉的年碳通量变化主要受年径流量与 HCO₃⁻ 浓度影响,随着年均径流量的增加与 HCO₃⁻ 浓度的上升,老泉 2018-2021 年碳通量分别为 11.66、10.33、21.31 和 16.9 t·km⁻²·a⁻¹,总体呈现波动上升的趋势。老泉 2020-2021 年碳通量相较于 2019 年同比增长分别为 51% 与 39%,上升幅度大,认为碳通量的增加还可能与泉域内土地利用方式改变引起的土壤 CO₂ 浓度变化有关。根据表 4 与图 7 的统计数据,2018-2021 年逆层坡的年平均土壤 CO₂ 浓度分别为 7 806、7 801、7 863 和 7 813 mL·m⁻³,老泉年碳通量与年平均土壤 CO₂ 浓度呈较强的正相关关系($R=0.90$)(表 5)。老泉中的岩溶产物如 HCO₃⁻、Ca²⁺ 对土壤 CO₂ 浓度响应敏感,三者的年际变化趋势具有相似性,其中月 HCO₃⁻ 浓度和月土壤 CO₂ 浓度呈显著正相关($R=0.65, P<0.01$)(图 8),土壤 CO₂ 浓度的上升会使其更多地参与到泉水中 CO₂ 与碳酸盐岩溶解过程,促进老泉的 HCO₃⁻ 浓度与碳通量的增加,以 2020-2021 年尤其明显。

表 4 老泉 2018-2021 年的水文水化学与碳通量参数

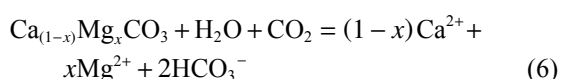
Table 4 Hydrochemical features and carbon sink flux of Laoquan spring from 2018 to 2021

时间/年	HCO ₃ ⁻ 浓度/mg·L ⁻¹	CO ₂ 消耗量/mg·L ⁻¹	年均流量/L·s ⁻¹	无机碳通量/t·km ⁻² ·a ⁻¹
2018年	197.23	71.13	4.68	11.66
2019年	234.85	84.70	3.48	10.33
2020年	231.03	83.32	7.30	21.31
2021年	239.64	86.43	5.58	16.90
平均值	225.69	81.40	5.26	15.05

根据表 4 的统计结果,老泉的年均无机碳通量为 15.05 t·km⁻²·a⁻¹(以 CO₂ 计)。对比贵州陈旗岩溶泉域的岩溶碳汇强度 55.07 t·km⁻²·a⁻¹(CO₂)^[20],由于老泉的年均径流量及流域面积偏小,流域内有小面积的不纯碳酸盐岩出露可能会影响老泉的碳汇强度^[39],导致老泉年均岩溶碳通量相对偏小。

3.3.4 碳通量变化的影响因素

老泉中的无机碳主要来自于大气 CO₂、土壤 CO₂ 与碳酸盐岩风化,CO₂ 通过溶于地下水或参与碳酸盐岩风化后以 HCO₃⁻ 的形式储存在地下水中^[40]。根据 H₂CO₃ 风化碳酸盐岩的方程式:



龙潭槽谷区的碳酸盐岩在岩溶作用过程中,岩

溶系统通过地下水的溶蚀性与流动性,不断推动水循环与碳循环的进程,为老泉提供丰富的溶解无机碳。尤其是夏季暴雨期间的流量衰减过程中,老泉的溶蚀性与流动性增强,区域岩溶作用强烈,导致碳通量富集,老泉暴雨期的碳通量可达 97.64 kg·km⁻²·d⁻¹。

气候的不稳定性变化会影响老泉碳通量变化,夏季尤其显著,存在着暴雨期与伏早期两个极端。老泉夏季的月碳通量与月降水量呈正相关关系($R=0.78, P<0.01$)(图 9),龙潭槽谷区夏季初期的降水量增多,岩溶作用的条件充分,客观上促进岩溶系统中 HCO₃⁻ 的析出与老泉无机碳通量的增加^[41],这在夏季暴雨期表现最为明显。但与此同时,老泉夏季的月碳通量与月蒸发量呈负相关关系($R=-0.36$),夏季龙潭槽谷区易受西太平洋副热带高压控制,7 月底-8 月底出现长时间的高温伏旱天气^[42],持续性降水量减

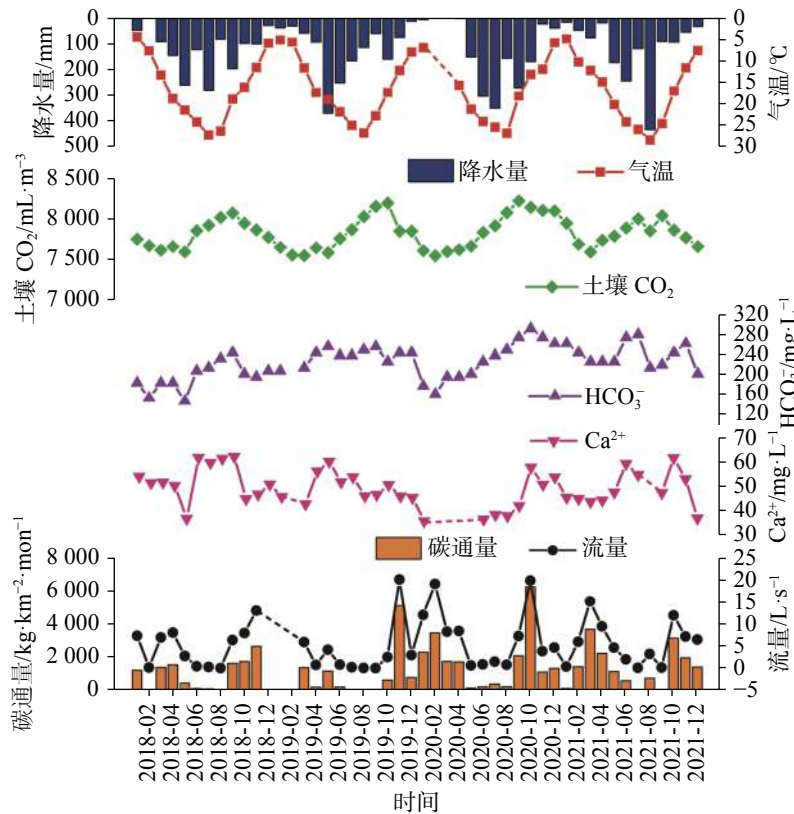


图 7 老泉 2018-2021 年土—水 CO₂—碳通量的变化(注:虚线部分数据因仪器故障而缺失)
 Fig. 7 Changes of soil—water CO₂—carbon flux of Laoquan spring from 2018 to 2021. Part of the dotted line data is missing due to instrument failure

表 5 老泉 2018-2021 年碳通量与土壤 CO₂ 浓度的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between carbon flux and soil CO₂ concentration of Laoquan spring from 2018 to 2021

		年平均土壤CO ₂ 浓度/mL·m ⁻³
年碳通量/t·km ⁻² ·a ⁻¹	Pearson 相关性	0.903
	显著性(双侧)	0.097
	N	4

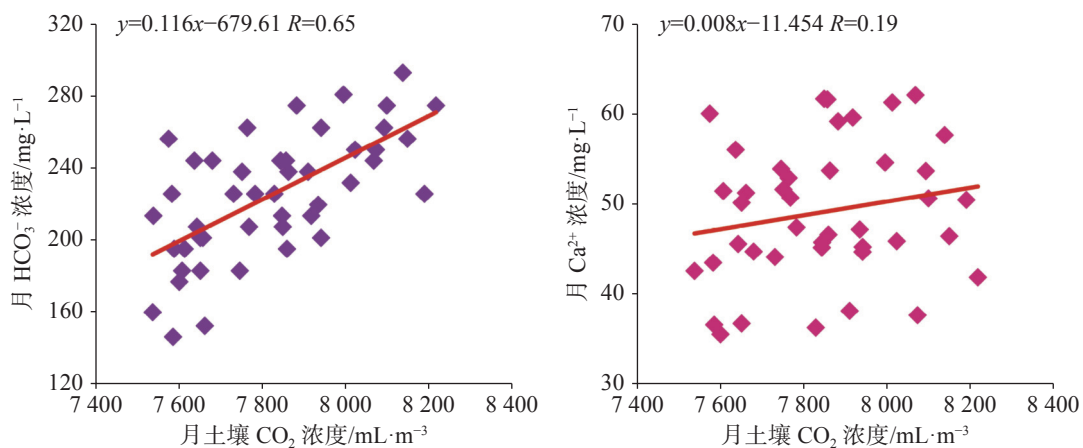


图 8 老泉岩溶产物浓度与土壤 CO₂ 浓度的相关性

Fig. 8 Correlation between the concentration of karst products of Laoquan spring and the concentration of soil CO₂

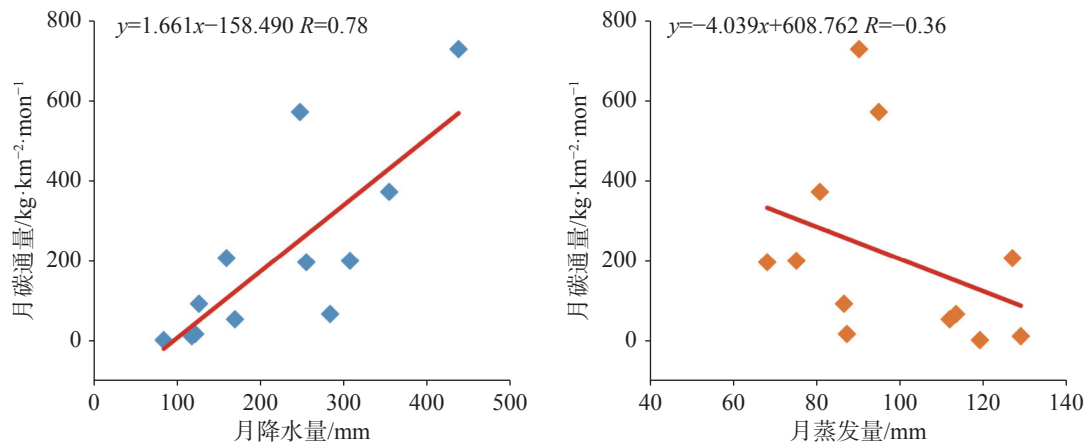


图9 老泉夏季月降水量、月蒸发量与月碳通量的相关性

Fig. 9 Correlation analysis between monthly precipitation, monthly evaporation and monthly carbon flux of Laoquan spring in Summer

少,气温升高造成蒸发量增加,导致地下水补给量减小,使岩溶作用效率降低。伏旱期间老泉的碳通量仅为 $18.23 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,泉水断流时无碳通量富集。

土地利用改变对于老泉碳通量的变化也存在着重要影响。老泉所在的逆层坡石漠化治理区的土地利用方式在 2018-2021 年间经历了林地—荒地—次生灌木林地的变化,由此造成土壤 CO_2 与碳通量的不稳定性变化。从表 4 与图 7 的可以看出,受土地撂荒的影响,人为干扰减少,逆层坡处于植被自然恢复阶段,区域内杂草与次生灌木大量生长,反而有利于土壤 CO_2 与泉水中 HCO_3^- 增加^[43],导致老泉 2020-2021 年碳通量大幅增加。此外,通过老泉的碳同位

素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 特征可以发现土地利用方式的改变对碳通量变化的影响(表 6),2018-2021 年的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值分布在 -8.46% ~ -12.36% 之间,平均值为 -10.81% 。其中,2018-2021 年 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的年平均值分别为 -10.91% 、 -9.85% 、 -11.68% 和 -11.08% ,呈偏负趋势,且与年平均土壤 CO_2 浓度、老泉的年碳通量变化趋势基本一致,指示着 2020-2021 年老泉及逆层坡的自然环境恢复态势向好^[44],表明土地利用变化对于土壤 CO_2 浓度及老泉碳通量的增加有着一定的促进作用,应更加重视石漠化区植被自然恢复的生态功能。

老泉碳通量变化与区域岩溶作用、气候变化和土地利用变化等因素有关。因此当地在改善岩溶生

表 6 2018-2021 年老泉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的变化趋势

Table 6 Variation trend of $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Laoquan spring from 2018 to 2021

时间(年/月)	2018年	2019年	2020年	2021年
	实测值/ $\%$	实测值/ $\%$	实测值/ $\%$	实测值/ $\%$
1月	-	-10.13	-10.90	-10.56
2月	-	-8.58	-	-10.30
3月	-	-	-	-10.62
4月	-	-9.63	-	-10.29
5月	-11.62	-10.37	-	-11.47
6月	-11.72	-8.92	-11.26	-10.23
7月	-11.19	-9.45	-11.99	-12.10
8月	-11.17	-8.46	-11.91	-
9月	-11.03	-11.74	-12.25	-12.22
10月	-10.06	-9.84	-12.36	-11.58
11月	-10.59	-10.46	-11.35	-11.11
12月	-9.89	-10.82	-11.41	-11.36
年平均值/ $\%$	-10.91	-9.85	-11.68	-11.08

注: -代表数据缺失。

态系统的碳汇能力方面需要因地制宜,需合理调配暴雨期和伏早期的地下水资源,科学规划土地利用方式,重视植被自然恢复的生态效益。

4 结 论

通过对龙潭槽谷石漠化治理区老泉的流量衰减过程及无机碳通量变化特征进行定量模拟与分析,得出以下主要结论:

(1)老泉的流量衰减可分为两个亚动态,衰减系数分别为 0.089 2、0.019 6,衰减过程主要集中在第一亚动态,老泉双重性含水介质特征显著。

(2)暴雨期老泉的碳通量随流量变化的特征明显,流量衰减阶段的碳通量值高,碳通量为 $97.64 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。伏早期(7月底—8月底)老泉碳通量变化具有明显的昼夜变化特征,表现为夜间低、日间高,土壤 CO_2 浓度、泉水 CO_2 浓度与老泉碳通量在昼夜变化上具有同步性,伏旱天气导致老泉流量下降甚至断流,伏早期碳通量偏低,碳通量为 $18.23 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(3)气候的不稳定性变化对碳通量影响显著,老泉夏季的碳通量与降水量呈正相关($R=0.78$),与蒸发量呈负相关($R=-0.36$)。基于老泉月均值的 HCO_3^- 浓度与土壤 CO_2 浓度的相关系数为 0.64,泉水 HCO_3^- 敏感地响应土壤 CO_2 的变化;老泉年碳通量与年土壤 CO_2 浓度相关系数为 0.90,且年均 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 呈明显的偏负趋势,土地利用变化与植被恢复有利于土壤 CO_2 浓度及老泉碳通量的增加。

(4)老泉 2018-2021 年碳通量分别为 11.66、10.33、21.31 和 $16.9 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,呈现波动上升的趋势,年均无机碳通量为 $15.05 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (以 CO_2 计)。

参考文献

- [1] Zeng S B, Liu Z H, Goldscheider N, Frank S, Goepfert N, Kaufmann G, Zeng C, Zeng Q R, Sun H L. 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*, 2021, 29: 331-345.
- [2] 张彩云, 蒋勇军, 马丽娜, 汪啟容. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 49-55.
ZHANG Caiyun, JIANG Yongjun, MA Lina, WANG Qirong. Characteristics of runoff and sediment on slope land with different land use in karst trough valley area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1): 49-55.
- [3] 伏文兵, 严友进, 李华林, 林栳桓, 胡刚, 黄朝海. 岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(7): 146-156.
FU Wenbin, YAN Youjin, LI Hualin, LIN Zhihuan, HU Gang, HUANG Chaohai. Evaluation of ecological benefits of comprehensive management of rocky desertification in karst trough valleys[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(7): 146-156.
- [4] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 何丙辉, 谢建平, 罗维均, 白晓永, 肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7092-7097.
JIANG Yongjun, LIU Xiuming, HE Shiyi, HE Binghui, XIE Jianping, LUO Weijun, BAI Xiaoyong, XIAO Qiong. Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in karst trough valley area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7092-7097.
- [5] 王明章. 西南岩溶石山区地下水开发在石漠化防治中的地位[J]. *贵州地质*, 2006(4): 261-265.
WANG Mingzhang. Status on exploitation of undergroundwater in prevention and control of rocky desertification in the areas of karst rocky mountain, Southwestern China[J]. *Guizhou Geology*, 2006(4): 261-265.
- [6] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 现代岩溶学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 292-305.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbin, XIAO Qiong. *Modern Karstology*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 292-305.
- [7] Fiorillo F, Leone G, Pagnozzi M, Esposito L. Long-term trends in karst spring discharge and relation to climate factors and changes[J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29: 347-377.
- [8] Worthington S. R. H. Characteristics of channel networks in unconfined carbonate aquifers[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127(5-6): 759-769.
- [9] 吴平, 葛勤, 张卫民, 李荐华, 刘海燕, 王洋, 王振, 陈家鸿. 基于水化学和同位素示踪岩溶含水系统的水力联系: 以宜春市四方井副坝区为例[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12058-12065.
WU Ping, GE Qin, ZHANG Weimin, LI Jianhua, LIU Haiyan, WANG Yang, WANG Zhen, CHEN Jiahong. Tracing hydraulic connection of a karst aquifer system based on hydrochemistry and isotopes: A case study of the auxiliary dam of Sifangjing in Yichun City[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 12058-12065.
- [10] 杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文. 西南岩溶山区地下水资源评价方法对比研究: 以寨底地下河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 111-123.
YANG Yang, ZHAO Liangjie, PAN Xiaodong, XIA Riyuan, CAO Jianwen. Comparative study on evaluation methods of

- groundwater resources in karst area of Southwest China: Taking Zhaidi underground river basin as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 111-123.
- [11] 张程鹏, 张凤娥, 耿新新, 冀俊杰, 陈永康. 岩溶地下河在SWAT中的概化方法: 以毕节倒天河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 665-672.
ZHANG Chengpeng, ZHANG Fenge, GENG Xinxin, JI Junjie, CHEN Yongkang. Generalization method of karst underground river in SWAT: An example of the Daotian river watershed in Bijie, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 665-672.
- [12] 常勇, 吴吉春, 刘玲, 罗跃. 岩溶泉流量衰减曲线分析[J]. *水文*, 2016, 36(1): 15-21.
CHANG Yong, WU Jichun, LIU Ling, LUO Yue. On recession curve of karst spring[J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(1): 15-21.
- [13] 梁日胜, 曾成, 闫志为, 石彪, 何师意, 樊宇虹, 灌瑾. 贵州印江朗溪岩溶槽谷龙洞湾泉流量衰减分析[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 10-18.
LIANG Risheng, ZENG Cheng, YAN Zhiwei, SHI Biao, HE Shiyi, FAN Yuhong, GUAN Jin. Recession flow analysis for Longdongwan spring at Langxi karst valley in Yinjiang county, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 10-18.
- [14] 吕玉香, 胡伟, 杨琰. 岩溶关键带水循环过程研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 123-138.
LV Yuxiang, HU Wei, YANG Yan. Research progress of hydrological cycle in karst critical zone[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 123-138.
- [15] 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 Pingan, 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.
- [16] LI H W, WANG S J, BAI X Y, CAO Y, WU L H. Spatiotemporal evolution of carbon sequestration of limestone weathering in China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2019, 62(6): 974-991.
- [17] 马明国, 汤旭光, 韩旭军, 时伟宇, 宋立生, 黄静. 西南岩溶地区碳循环观测与模拟研究进展和展望[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(8): 1196-1205.
MA Mingguo, TANG Xuguang, HAN Xujun, SHI Weiyu, SONG Lisheng, HUANG Jing. Research progress and prospect of observation and simulation of carbon cycle in the karst areas of Southwest China[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(8): 1196-1205.
- [18] 郭静芸, 毕鑫涛, 方然可, 李守定. 可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 24-34.
GUO Jingyun, BI Xintao, FANG Ranke, LI Shouding. Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 24-34.
- [19] 曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪. 贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1761-1771.
CAO Xingxing, WU Pan, YANG Shidi, LIU Shan, LIAO Jiahao. Hydrochemistry characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Caohai lake wetland catchment of Guizhou Province[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1761-1771.
- [20] 曾成, 赵敏, 杨睿, 刘再华. 岩溶作用碳汇强度计算的溶蚀试片法和水化学径流法比较: 以陈旗岩溶泉域为例[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(1): 106-111.
ZENG Cheng, ZHAO Min, YANG Rui, LIU Zaihua. Comparison of karst processes-related carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test and solute load method: A case study in the Chenqi karst spring system[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(1): 106-111.
- [21] 刘再华, 曾庆睿, 陈波, 贺海波. 碳酸盐风化碳汇研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 1-10.
LIU Zaihua, ZENG Qingrui, CHEN Bo, HE Haibo. Study on carbonate weathering carbon sink[M]. Beijing: Science Press, 2021: 1-10.
- [22] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Rudbeck J M, Penueles J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [23] Wang Y H, Li X B, Xin L J, Tan M H. Farmland marginalization and its drivers in mountainous areas of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 135132.
- [24] 邹晓岗, 杨琰, 徐刚, 田宁, 游贤慧, 何志立, 田洪明, 曾朱周. 岩溶槽谷石漠化治理区表层泉水化学特征研究: 以重庆酉阳泔溪花椒基地老泉为例[J]. *地球与环境*, 2018, 46(6): 524-533.
ZOU Xiaogang, YANG Yan, XU Gang, TIAN Ning, YOU Xianhui, HE Zhili, TIAN Hongming, ZENG Zhuzhou. Chemical characteristics of surface spring in the rehabilitation area of karst rock desertification: A case study at Laoquan in the pepper planting base of Ganxi town, Youyang county, Chongqing City, China[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(6): 524-533.
- [25] 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. 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*, 2022, 475: 25-43.
- [26] SL 551-2012, 土石坝安全监测技术规范[S]. 中华人民共和国水利部, 2012: 108-109.
SL 551-2012, Technical specification for earth-rockfill dam safety monitoring[S]. Ministry of Water Resources of the PRC, 2012: 108-109.
- [27] 他金城, 谭立新, 张宗孝. 黄池沟配水枢纽分水池侧槽退水道

- 水力特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 141-145.
- TA Jincheng, TAN Lixin, ZHANG Zongxiao. Experiments on the hydraulic characteristics of the side channel spillway of the water allocation pool in Huangchigou Water Distribution Hub[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(2): 141-145.
- [28] 徐玲君, 陈刚, 李国栋, 薛阳. 薄壁堰泄流能力的数值模型计算及模拟自由水面的评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 225-230.
- XU Lingjun, CHEN Gang, LI Guodong, XUE Yang. Numerical simulation about Rectangle Sharp-crested Weir and evaluation of free-surface[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2010, 38(1): 225-230.
- [29] Cerino A E, Taddia G, Gizzi M, Lo R S. Reliability of spring recession curve analysis as a function of the temporal resolution of the monitoring dataset[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(7): 249.
- [30] 张春来, 黄芬, 蒲俊兵, 曹建华. 中国岩溶碳汇通量估算与人工干预增汇途径[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 40-52.
- ZHANG Chunlai, HUANG Fen, PU Junbing, CAO Jianhua. Estimation of karst carbon sink fluxes and manual intervention to increase carbon sinks in China[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 40-52.
- [31] 康志强, 陈骏, 袁道先, 何师意, 邓艳, 陈旻, 刘媛媛, 姜光辉, 张勤军. 岩溶关键带植被对水循环过程的影响作用研究[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 391-396.
- KANG Zhiqiang, CHEN Jun, YUAN Daoxian, HE Shiyi, DENG Yan, CHEN Yang, LIU Yuanyuan, JIANG Guanghui, ZHANG Qinjun. The effect of vegetation on groundwater cycle in the critical zone of the karst area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 391-396.
- [32] Chang W, Wan J W, Tan J H, Wang Z X, Jiang C, Huang K. Responses of spring discharge to different rainfall events for single-conduit karst aquifers in western Hunan Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(11): 5775-5775.
- [33] Luo M M, Chen Z H, Yin D C, Jakada H, Huang H, Zhou H, Wang T. Surface flood and underground flood in Xiangxi River Karst Basin: Characteristics, models, and comparisons[J]. Journal of Earth Science, 2016, 27(1): 15-21.
- [34] 万豪杰, 赵骏, 张松松, 张茹星. 永顺隧道岩溶涌水风险性评价及地下水流量衰减过程分析[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(5): 1-7, 16.
- WAN Haojie, ZHAO Jun, ZHANG Songsong, ZHANG Ruxing. Analysis of water flow and risk assessment of karst water gushing in Yongshun Tunnel[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(5): 1-7, 16.
- [35] Gan F L, He B H, Qin Z Y, Li W B. Role of rock dip angle in runoff and soil erosion processes on dip/anti-dip slopes in a karst trough valley[J]. Journal of Hydrology, 2020: 588.
- [36] Zeng C, Liu Z H, Zhao M, Yang R. 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.
- [37] Zhang C, Yan J, Pei J G, Jiang Y J. Hydrochemical variations of epikarst springs in vertical climate zones: A case study in Jinfo Mountain National Nature Reserve of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(2): 375-381.
- [38] Liu Z H, Li Q, Sun H L, Wang J L. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO₂ and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1-2): 207-223.
- [39] 刘朋雨, 张连凯, 黄奇波, 覃小群. 外源水和外源酸对万华岩地下河系统岩溶碳汇效应的影响[J]. 中国岩溶, 2020, 39(1): 17-23.
- LIU Pengyu, ZHANG Liankai, HUANG Qibo, QIN Xiaojun. Effect of exogenous water and acid on karst carbon sink in the Wanhuayan underground river system[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(1): 17-23.
- [40] 任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏. 岩溶区不同土地利用地下水碳同位素地球化学特征及生态意义[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4523-4531.
- REN Kun, PAN Xiaodong, ZENG Jie, JIAO Youjun, PENG Cong, LIANG Jiapeng. Geochemical characteristics and ecological significance of carbon isotopes in groundwater under the influence of different land use types in karst areas[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4523-4531.
- [41] 李汇文, 王世杰, 白晓永, 操玥, 田义超, 罗光杰, 陈飞, 李琴, 吴路华, 王金凤, 王明明, 田诗琪, 邓元红, 胡泽银, 杨钰杰, 李朝君, 路茜, 习慧鹏, 陈欢, 冉晨, 罗旭玲. 气候变化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6158-6172.
- LI Huiwen, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, CAO Yue, TIAN Yichao, LUO Guangjie, CHEN Fei, LI Qin, WU Luhua, WANG Jinfeng, WANG Mingming, TIAN Shiqi, DENG Yuanhong, HU Zeyin, YANG Yujie, LI Chaojun, LU Xi, XI Huipeng, CHEN Huan, RAN Chen, LUO Xuling. Effects of climate change and ecological restoration on carbonate rock weathering carbon sequestration in the karst valley of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6158-6172.
- [42] 孙亚卿, 李春, 石剑. 长江流域夏季极端高温的年代际变化特征及其与大西洋多年代际振荡的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 13-22.
- SUN Yaqing, LI Chun, SHI Jian. Interdecadal variation of Summer Extreme High Temperature in the Yangtze River and its relationship with Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(2): 13-22.
- [43] Zhang C. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(35): 3759-3765.
- [44] Zhao M, Liu Z, Li H C, Zeng C, Yang R, Chen B, Yan H.

Response of dissolved inorganic carbon (DIC) and $\delta_{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ to changes in climate and land cover in SW China karst catch-

ments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 165: 123-136.

Flow attenuation analysis and inorganic carbon flux estimation of surface karst spring in rocky desertification control area: A case study at Laoquan spring in the Longtan trough valley, Youyang county, Chongqing City, China

LUO Zhenyu^{1,2}, YANG Yan^{1,2}, LI Ji^{1,2}, XIAO Wenjie^{1,2}, SUN Tingting^{1,2}, YE Zhimao^{1,2}

(1. *Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China*; 2. *National Observation and Research Station of Karst Ecosystem in Jinfo Mountain of Chongqing, Chongqing 400715, China*)

Abstract The rational utilization of groundwater resources is the key to achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals, strengthening the comprehensive control of karst rock desertification and soil erosion in the ecological environment. On the southern wing of Tongmaling anticline in southeast Chongqing, Longtan trough valley—a part of Wuling Mountain area—is located in Youyang county, Chongqing City, China. The karst development is strong in the trough valley area, and the distribution of groundwater is extensive. At the same time, the problem of rocky desertification is severe in this area, so the efficient utilization of water resources and ecological restoration are especially important. The objective of this study is to explore the flow characteristics of karst spring and structure types of aquifer medium, and to further analyze the variation characteristics of inorganic carbon flux in the ecological restoration area of rock desertification control.

In this study, the flow attenuation equation and hydrochemical runoff method are used to estimate and analyze attenuation process and inorganic carbon flux of Laoquan spring based on the re-vegetation in a karst rocky desertification area in Longtan trough valley in Youyang county, Chongqing City, Southwest China. The results show that: (1) The flow attenuation process of Laoquan spring is divided into two sub-dynamics with attenuation coefficients of 0.0892 and 0.0196, respectively. The attenuation process of this spring mainly occurs on the first sub-dynamics. In the aquifer medium of groundwater system, the ratio of pipeline to fissure is significant. The strong water conduction effect of aquifer medium leads to the weak capacity of Laoquan spring to regulate and store rainfall infiltration water. (2) The variation process of the carbon flux of Laoquan spring during the rainstorm period is divided into four stages, and the carbon flux has obvious variation characteristics with the flow. The carbon flux during the rainstorm period is $97.64 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. In the summer drought period (from the end of July to the end of August), the carbon flux of Laoquan spring has obvious diurnal variation characteristics, low at night and high in the day. The soil CO_2 concentration, water CO_2 concentration and carbon flux of Laoquan spring are synchronized in the diurnal variation, and the carbon flux in the summer drought period is $18.23 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. (3) The climate instability can affect the carbon flux of Laoquan spring. The precipitation of this spring in summer is positively correlated with the carbon flux ($R=0.78$), and the evaporation is negatively correlated with the carbon flux ($R=-0.36$). The change of land use mode has a significant effect on the carbon flux of Laoquan spring. The correlation coefficient between HCO_3^- concentration and soil CO_2 concentration based on the monthly mean value of Laoquan spring is 0.64, indicating that HCO_3^- in Laoquan spring sensitively responds to the change of soil CO_2 . The correlation coefficient between the annual spring carbon flux and the annual soil CO_2 concentration is 0.90, and the average annual $\delta_{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ shows an obvious negative trend, indicating that land use change (Vegetation Restoration) is conducive to the increasing of soil CO_2 concentration and carbon flux. (4) From 2018 to 2021, the carbon flux in Laoquan spring was 11.66, 10.33, 21.31 and $16.9 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively, showing an increasing trend with fluctuation. The annual inorganic carbon flux is $15.05 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}(\text{CO}_2)$. The carbon sink capacity should be enhanced by the improvement of comprehensive control measures of rocky

(下转第 381 页)

Tonglao town and Pozao town in the middle and Xin'an town in the south. The hillslope geo-hazards in these five susceptible areas cover proportions of 64.54%, 8.37%, 1.59%, 21.91%, and 3.59%, respectively, which indicates that the evaluation results of hazard susceptibility are highly consistent with the distribution of historical collapse and landslides, and the mapping results of hazard susceptibility are reliable and accurate. (iv) The frequency ratio of each susceptibility zone can be obtained by calculating the ratio of hazard point proportion and area proportion of each susceptibility class. The frequency ratio increases from the very low susceptibility area to the very high susceptibility area, which indicates that the coupling model can effectively determine the different susceptibility levels in the study area. (v) The performance of the model is comprehensively compared through the AUC and ROC curves with validation datasets. The AUC value for the IV-MLPC model is 0.809, showing that the model exhibits a satisfactory performance ($AUC > 0.8$) in collapse and landslide spatial prediction. The research results can provide a scientific basis for the risk assessment and disaster prevention of collapse and landslide in the study area.

Key words Pingguo City, hillslope geo-hazard, information value, multi-layer perceptron classifier, susceptibility zoning

(编辑 杨杨 张玲)

~~~~~  
(上接第 350 页)

desertification. Therefore, in the process of rocky desertification control, it is necessary to make scientific use of karst water resources and heighten the awareness of karst environment protection, especially the scientific use and management of water resources in summer rainstorm and summer drought. In addition, it is necessary to boost regional carbon sink capacity by restoring natural dominant vegetation in rocky desertification control areas.

**Key words** karst spring, flow attenuation, carbon flux, karst rocky desertification, Youyang county in Chongqing City

(编辑 杨杨 张玲)