

不同类型表层岩溶水源划分及对降雨的响应

黄 荣^{1,2,3}, 王 发^{1,2,3}, 陈洪松^{1,2}, 付智勇^{1,2}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所,亚热带农业生态过程重点实验室,湖南 长沙 410125;
2.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,广西 河池 547100; 3.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:表层岩溶泉的水文水化学特征是认识岩溶含水介质结构的重要手段。基于泉域水文地质调查,2018 年对广西环江木连小流域内降水和泉水流量及电导率进行监测,利用单元模型与电导率频率分布分析方法,解析表层岩溶泉径流来源及对降雨的响应特征。结果表明:(1)年尺度上,受驱替作用排泄的水流分别占季节泉、常流泉总径流的 32.3%和 23%;(2)次降雨过程季节泉和常流泉径流均以驱替含水层中未联通的“旧水”为主,强降雨条件下存在的雨水稀释现象仅约占 3.6%;(3)季节泉在次降雨过程中受多重水流补给且对降雨响应敏感,其中管道流和壤中流分别占 23%、34.2%,以基质或岩溶裂隙释放的重力水流仅占 10.5%,导致持续供水能力较差;(4)常流泉补给来源单一,次降雨过程中主要受到以基质或岩溶裂隙排泄的重力水补给(77%),具有较高的有效涵养地下水资源功能及供水可持续性能力。

关键词:表层岩溶泉;电导率;流量;降雨响应;补给来源

中图分类号:P592

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2022)03-0020-07

0 引言

我国西南岩溶地区具有地上地下二元水文地质结构,地表岩石裸露、石漠化程度高,土层浅薄且蓄水能力低,生态环境脆弱^[1]。表层岩溶泉水的普遍分布成为该地区居民生产生活的重要分散式供水水源。研究表层岩溶泉水的径流机制与成因,有助于促进表层岩溶泉水资源的合理开发与利用,为岩溶流域水源涵养功能提升提供科技支撑。

不同岩溶含水系统因风化程度、管道/裂隙发育、岩土结构、植被分布等因素的差异,导致不同的水文过程,从而形成不同类型的泉水。然而,岩溶含水层由洞穴、管道、裂隙和基质组成,其复杂的、可变的介质结构具有高度的非均质性^[2],径流成分与补给来源难以区分^[3]。大多研究结果表明岩溶地区表层岩溶泉水的补给主要受到管道流和裂隙流的影响,因而具有流量暴涨暴落的特征^[4]。例如,姜光辉^[5]通过对峰丛洼地表层岩溶泉的分析得出,以快速流集中补给的泉在强降雨后水

位快速升高,降雨结束后水位迅速回落;而受孔隙控制的泉水位上升与下降阶段都较平缓。目前,大多研究仅在于通过表层岩溶泉对降雨的响应特征划分为快速流与慢速流,但是,由于土壤、表层岩溶带耦合管道/裂隙/基质网络结构的多重介质调蓄岩溶地下水文过程,二元径流划分对于理解其降雨产流过程尚且不足。

虽然理解水文地质结构差异对泉水径流的控制机理对于多重介质作用的岩溶地区具有挑战性,但这对于水资源调蓄措施的指定具有重要意义。水文、水化学和同位素是分析水文过程和径流分割的常用方法。降雨补给地下水过程中,水体经过不同介质的调蓄作用,携带了大量的水文地球化学信息^[6]。但由于不同介质或者不同水流之间的交互作用,很难独立获取不同路径中水化学信息。多元径流划分示踪离子的选择、测试以及采样频率等问题也受到技术、方法的限制,导致研究结果的不确定性。相比之下,电导率是一种常用和可实时监测的水化学指标。水流经过不同的导水/储水介质的调蓄作用,因滞留时间或水岩作用面

收稿日期:2020-12-14

网络首发日期:2022-06-01

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220530.1538.016.html

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41930866,41971048);广西自然科学基金创新研究团队项目(2018GXNSFGA281003)

作者简介:黄荣(1996—),女,湖南攸县人,硕士研究生,主要研究方向为生态水文过程。E-mail:1987491144@qq.com

通信作者:陈洪松(1973—),男,湖北通山人,博士,研究员,主要从事水土保持与生态水文方面的工作。E-mail:hbchs@isa.ac.cn

积等因素导致电导率变化。其分析结果不仅类似于同位素和水化学离子,甚至可以获取更多信息。比如,Cano-Paoli^[7]等通过对比电导率和同位素在径流划分中的应用发现两者并无显著差异,并且电导率对含水层水分迁移过程等信息可以有效解译。目前,对于一些岩溶大泉、地下河等,许多研究通过电导率频率分布划分了其径流组分,并根据水文地质调查结果解译了其径流组分的潜在来源^[8-10]。但对水文过程迅速,受浅层含水层控制的表层岩溶泉的研究尚且不足。

因此,基于表层岩溶泉降雨响应过程中径流组分识别及其对径流形成过程中作用机理不清的问题,本文以白云岩小流域内水文地质结构差异显著的季节泉和常流泉为例,通过降雨、泉水流量与电导率自动连续监测,结合端元模型和电导率频率分布分析方法,识别不同类型表层岩溶泉的水源组分及贡献率,分析降雨产流机制,探讨水文地质结构对泉水水文过程影响,为岩溶地区水资源保护与开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站木连背斜西翼(108°18′~108°19′E,24°43′~24°44′N)。地层岩性为石炭系中统(C₂)白云岩、白云质灰岩;背斜核部地层岩性为石炭系下统东岗岭组(C₁d)砂泥岩;东翼地层岩性为石炭系中统(C₂)白云岩、白云质灰岩。为典型的峰丛洼地地貌,小流域

总汇水面积 1.14 km²,海拔 272.0~647.2 m,属于中亚热带季风气候,年均气温 15.7 ℃,年均降雨量 1389.1 mm。降雨季节分配不均,有明显的旱、雨季之分,雨季主要集中在 4—9 月,占全年降雨量的 70%以上,10 月至次年 3 月则为旱季,各月平均降水量在 90 mm 以下。

1985 年研究区耕地全部撂荒。受火烧、砍伐、放牧的影响,荒草地和稀疏灌丛为主要植被类型。经过 30 余年的植被恢复,洼地西南部以及局部低洼地段土壤常年大部分时间处于积水或饱和状态,坡脚有 3 个表层岩溶泉发育,为 S1(季节泉)、S2(常流泉)和 S4(季节泉)。表层岩溶泉泉域含水岩组主要为石炭系中统(C₂)中风化白云岩及中风化白云质灰岩,富水性较好。本文选取 S1 和 S2 做对比研究。S1 对应坡面植被以乔木为主,土壤厚度沿坡从上至下增大,平均为 0.2 m,但基岩裸露率高(39.5%),土壤不连续。表层岩溶带厚度为 2.2~15.4 m(平均值为 10.6 m),溶槽、溶蚀裂隙发育强,局部发育有溶洞,断层发育,其总体径流方向为东南至北西。S2 对应坡面植被以草、灌木组合为主;基岩出漏率低(6.8%),土壤相对 S1 连续性好;土壤厚度沿坡从上至下增大,平均为 0.6 m。表层岩溶带厚度为 6.1~13.3 m(平均值为 15.4 m),以风化破碎、裂隙发育为主,总体径流方向为北西至东南。

2 研究方法

2.1 动态监测

在表层岩溶泉泉口建设导流槽和三角堰(60°),于 2018 年利用高分辨率多参数水质仪每隔 5 min 连续自动记录水位和电导率。根据薄壁三角堰流公式由水位估算流量^[11]。降雨量通过安装在气象场的 HOBO 雨量温度自动记录仪记录,分辨率 0.2 mm。雨水样品的收集采用国际原子能机构全球大气降水网络计划推荐的雨水收集装置^[12,13],安装于气象场内,用于测量雨水的电导率。

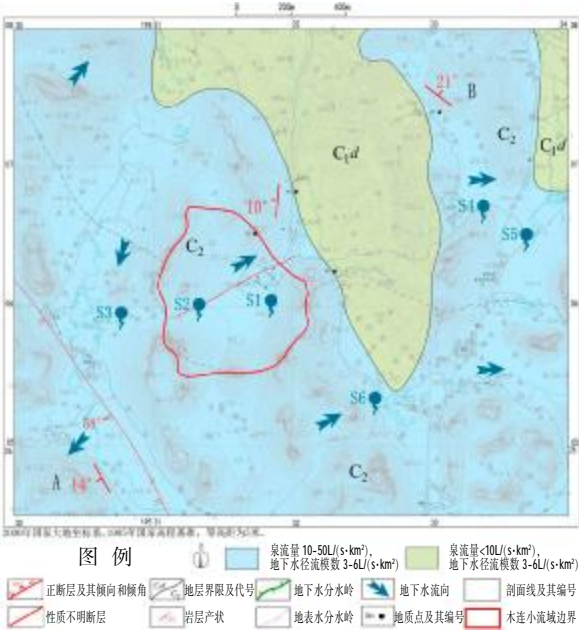


图1 研究区区位及水文地质图

Fig.1 The location and the hydrogeological features of the study area

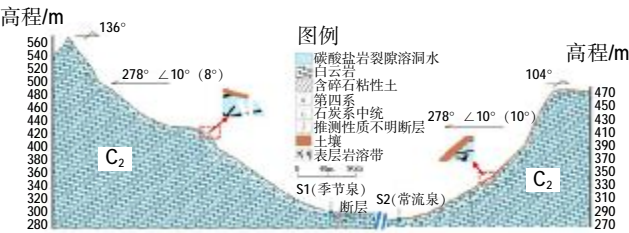


图2 季节泉和常流泉水文地质剖面示意图

Fig.2 Hydrogeological profile of the seasonal spring and the flowing spring

2.2 数据处理

采用二端元混合模型划分泉水径流^[1],运用电导率作为示踪剂划分降雨过程中新旧水比例。将次降雨前的基流作为泉水的“旧水”,而将雨水作为“新水”。

假定电导率频率分布(CFDs)代表水源电导率的集成,并且均质水的电导率呈正态分布。例如,从多孔含水层中流出完全混合的泉水电导率呈正态分布^[8,14]。同样,通过岩溶管道运输的单一类型水被认定为化学性质均质且电导率也呈正态分布。当CFDs呈现多峰分布时,其形状近似于在水文年内测的电导率直方图。使用统计软件找到与直方图最对应的概率密度函数。通过峰拟合软件将概率密度函数分解为正态分布成分种群。使用残留法,识别构成原始CFDs的所有峰。由于其基本分布是呈正态分布,因此可通过峰分解确定每种类型水的电导率和方差,以及该类型水所占整个CFDs的比例。通过将各种群所代表的电导率范围与监测的电导率和流量时间序列进行比较,可以解释每种水源相对应的水文过程。

3 结果与分析

3.1 年尺度上层岩溶泉流量及电导率动态变化

选取2018年两个表层岩溶泉水文数据与降水量。从表3可知,季节泉的年平均流量低于常流泉,但

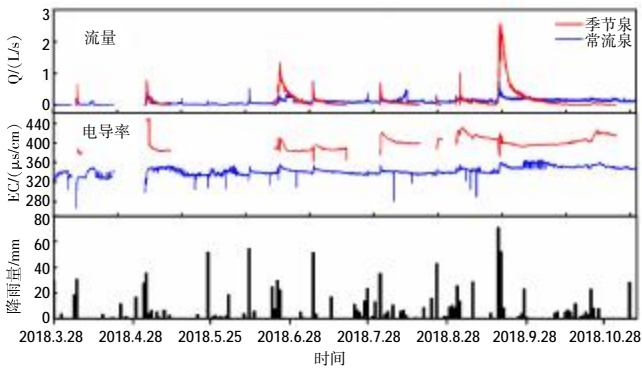


图3 季节泉和常流泉降雨、流量、电导率变化趋势

Fig.3 Variations of rainfall,flow and conductivity of the seasonal spring and the flowing spring

年内季节泉的流量变异系数显著大于常流泉。降雨过程中,季节泉的流量响应峰值显著高于常流泉,表明季节泉流量波动明显,对降雨的响应更敏感。

由表2可知,季节泉的年平均电导率大于常流泉。但年内季节泉的电导率变异系数与常流泉相差较小。从表1可知,两个表层岩溶泉水水化学组成以HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺为主要阴阳离子,且季节泉高于常流泉。研究区属碳酸盐岩地区,含水岩组主要为石炭系中统(C₂)中风化白云岩及中风化白云质灰岩,水化学特征充分反映其受水岩作用控制且季节泉含水系统的岩溶结构水岩相互作用程度强于常流泉。

3.2 次降雨过程中表层岩溶泉流量及电导率动态变化

对比分析两个表层岩溶泉在次降雨事件中的具体响应特征,结果如图4。6月22日至24日次降雨量为60.2 mm,降雨历时18.1 h,平均雨强为3.3 mm/h,最大雨强为10.4 mm/h。在次降雨前,季节泉断流,常流泉出流。但降雨过程中,季节泉的峰值流量显著大于常流泉;季节泉的电导率呈下降趋势,波动较大;而常流泉的电导率呈上升趋势,波动较小。常流泉水文过程的响应时间(35.6 h)略大于季节泉(35.4 h)。结果表明,在次降雨过程中,随着雨强增大,降水对季节泉稀释作用更显著;对降雨响应更快,且水文过程呈现出暴涨暴落。

表2 季节泉和常流泉流量

Table2 Flow of the seasonal spring and the flowing spring					
岩溶泉	最小流量/ (L/s)	最大流量/ (L/s)	年平均流 量/(L/s)	标准差	变异系数
季节泉	0	2.56	0.10	0.25	2.63
常流泉	0.001	0.76	0.10	0.07	0.69

表3 季节泉和常流泉电导率

Table3 Conductivity of the seasonal spring and the flowing spring					
岩溶泉	最小值/ (μs/cm)	最大值/ (μs/cm)	均值/ (μs/cm)	标准差	变异系数
季节泉	361.30	450.10	400.04	12.49	0.03
常流泉	267.20	365.40	343.15	7.26	0.02

表1 季节泉和常流泉水化学组分

Table1 Chemical composition of the seasonal spring and the flowing spring								
指标		HCO ₃ ⁻ /(mg/l)	K ⁺ /(mg/l)	Na ⁺ /(mg/l)	Ca ²⁺ /(mg/l)	Mg ²⁺ /(mg/l)	SO ₄ ²⁻ /(mg/l)	NO ₃ ⁻ /(mg/l)
季节泉	雨季	219.19	0.02	0.29	53.19	27.89	7.52	0.09
	旱季	223.89	0.02	0.18	54.78	29.07	7.40	0.11
常流泉	雨季	203.96	0.05	0.24	49.63	25.31	6.05	0.42
	旱季	201.78	0.02	0.15	51.28	27.83	4.59	0.26

为区分降雨过程中“新水”(雨水)对表层岩溶泉的贡献,利用电导率对表层岩溶泉的新旧水比例进行了划分,结果如图5。季节泉在整个降雨过程中新水比例呈现先上升后下降的趋势,与降雨强度有较好的对应关系。在泉水流量上涨期间,季节泉新水所占比例为2.9%;当流量达到峰值时,新水也仅占4.4%。而常流泉以驱替水岩相互作用时间较长的“旧水”为主,导致新水比例在降雨过程中均呈现负值。在降雨的整个过程中,两个表层岩溶泉主要是接受“旧水”补给,占比达到95.6%~100%。

3.3 电导率频率的定量分析

对两个表层岩溶泉2018年的电导率进行频率分布的峰值提取,结果如图6所示。并计算了拟合的相关系数 R^2 和标准差 δ 。季节泉电导率频率分布曲线可划分为4个峰, $R^2=0.73, \delta=3.9$ 。常流泉可划分为2个峰, $R^2=0.93, \delta=2.4$ 。峰值的数量和形态基本能反映含水系统的结构特征,季节泉可能有多种补给水源,常流泉可能至多两种补给水源。季节泉从左至右各峰相对总分配比例分别为23%,34.2%,10.5%,32.3%。常流泉各峰分配比例分别为77%和23%。

4 讨论

4.1 表层岩溶泉径流和电导率对降雨响应特征

次降雨过程中,管道裂隙等快速流补给季节泉,导致季节泉流量暴涨暴落。查小森^[5]研究发现表层岩溶泉在暴雨事件中响应最迅速。在小降雨阶段,雨水受到

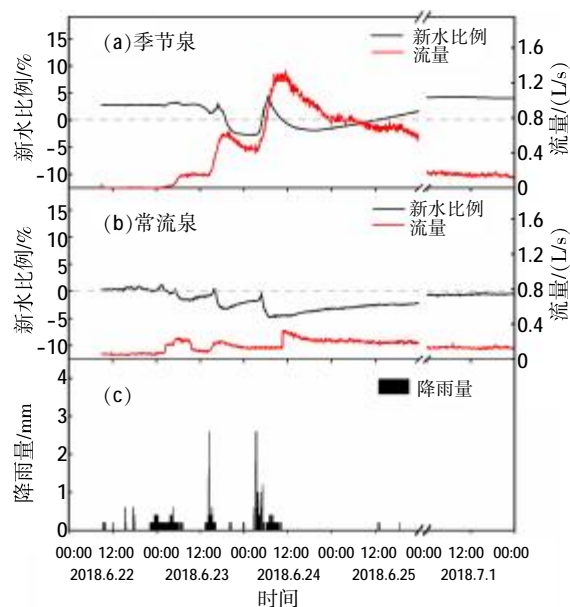


图5 降雨过程中季节泉、常流泉新水比例动态变化(EC作为示踪剂)

Fig.5 Proportion variations of new water in the seasonal spring and the flowing spring during rainfall

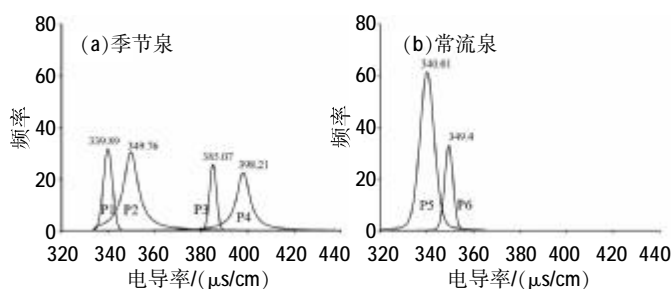


图6 季节泉和常流泉CFDs分布

Fig.6 CFDs of the seasonal spring and the flowing spring

土壤或者风化层截留,无法形成有效的径流通过管道快速迁移。在高雨强下,雨水超出土壤和风化层的产流阈值形成径流。另外,季节泉补给区内裸岩率高,更有利于地表径流的产生和再分布,导致集中入渗。因此,季节性泉水对降雨的响应更为敏感。姜光辉^[5]等研究表明表层岩溶带上覆土层薄,基岩裸露,且含水介质有管道发育,降雨后会导致岩溶水运动迅速,流量上涨快速。对比季节泉,常流泉泉域内土壤连续性高,表层岩溶带整体发育,径流过程主要受到土壤和表层岩溶带整体渗透性能的控制,导致其响应慢。同样受制于含水层持水能力的影响,排泄过程相对季节泉缓慢。

泉水电导率在次降雨过程中呈升高趋势,表明两个表层岩溶泉主要受驱替作用(旧水)补给。这是由降雨强度、含水层不饱和区的特征和管道-基质的交换等原因造成^[6]。在典型次降雨过程中,两个表层岩溶泉

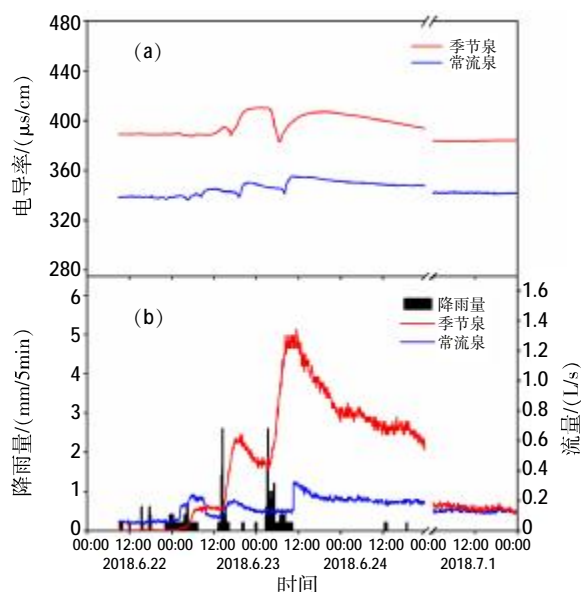


图4 降雨过程中季节泉和常流泉电导率、流量动态变化

Fig.4 Variations of conductivity and flow of the seasonal spring and the flowing spring during rainfall

电导率对降雨的响应变化趋势基本一致。降雨前期,两个表层岩溶泉电导率升高且均显著高于降雨前基流值。一种原因是水-岩-气作用显著大于雨水稀释作用。比如,刘再华^[17]等在丫吉试验场研究表明当水-岩-气作用大于稀释作用时,降雨过程中电导率表现升高现象。第二种原因是泉水补给水源的连通性问题。当补给区内部分水流无法与其他水流交换补给,长期滞留,导致电导率升高。未联通的“旧水”因较长时间的水岩相互作用,Ca、Mg离子浓度高于降雨前基流值,电导率较高^[18],同时,也表明随着降雨的增加,坡地水流连通性增加,逐渐驱替滞留时间更长的水流。虽然管道裂隙发育的季节泉也表现为驱替补给过程为主,但强降雨时段仍发挥重要的导水功能,导致稀释作用加强,如在降雨后期电导率呈现显著下降。KVAERBER^[19]等研究也表明高强度降雨会产生管道流补给,增加“新水”比例。通过模拟降雨试验,王升^[20]等在该研究区发现只有在大雨强事件中,径流小区才会产生坡面流和壤中流。季节泉电导率在强降雨阶段波动较大,可能主要受到低电导率的地表水或壤中流(P2)通过管道集中补给,导致电导率下降。常流泉因土层较厚、表层岩溶带风化较弱,且岩溶化程度低,以风化破碎、裂隙发育为主。随降雨量累积,地下水位升高,依次驱替先前储存在介质中流动性更差的“旧水”,导致电导率依次升高。

4.2 水源划分及其成因

水文地质条件差异导致季节泉有多种补给水源,而常流泉补给源相对单一。电导率频率分布曲线能提取出不同的波峰,每个峰所代表的意义都是基于含水系统的水文结构来考虑的^[9]。SANCHEZ^[21]利用CFDs研究发现:发育程度低的表层岩溶泉,矿化度和水化学相对均质,年际变化小,电导率峰值较单一,而岩溶化程度高的泉呈多峰分布。相比常流泉,季节泉的电导率波动性更大,频率分布呈多峰形态,表明季节泉含水层岩溶化程度较高,径流组分更复杂。MUDARRA和ANDREO^[22]通过研究不同类型泉水径流组分表明由于管道以及管道等级在供水过程中发挥的作用而导致了径流组分多元化。基于前期的水文地质调查,季节泉泉域土层浅薄且不连续,表层岩溶带厚度异质性高,且溶槽、溶蚀裂隙发育强,局部有溶洞,从而导致季节泉的径流组分相对常流泉更复杂。由电导率频率分布图发现季节泉P1-2电导率显著小于P3-4。一般情况下,低电导率代表管道裂隙等过程导致的泉水稀释。但本试验中的两个泉水均以驱替为主,且驱替主要发生在降

雨过程中,因此,推断P3-4为管道裂隙作用下驱替的旧水。比如,BICALHO^[23]等通过岩溶大泉水化学监测发现在地下水位较高时,高矿化度的水流首先补给泉水,然后受到快速稀释水流的补给,从而导致电导率连续升高和下降过程。且这种现象在许多季节泉中均有发现。因此,P1可定义为快速流,比如管道流、地表径流和壤中流。降雨结束后,泉水电导率逐渐恢复到雨前值,并且大降雨后,也会出现显著低于雨前值的情况,因此推断P2为连通性较好的慢速流(重力流)。P2受降雨以混合形式补给泉水,且在无降雨时段是泉水持续出流的主要来源。相对于季节泉,常流泉泉域土层厚、连续,表层岩溶带整体风化程度高,管道裂隙不发育。因此,常流泉的补给来源较单一,主要有两种水流类型。虽然次降雨过程中,两个表层岩溶泉均表现为雨水驱替旧水补给泉水,但常流泉电导率变化较为缓和,表明常流泉快速流补给过程不发育。因此,常流泉两种水流可划分为连通性差的驱替水流(P5)和以混合过程为主的重力水流(P6)。

本文中两个表层岩溶泉水均为驱替过程为主的泉水,与大多数文献中研究的泉水水文过程存在显著差异。比如,常勇^[24]等通过观测石灰岩区泉水发现电导率随降雨过程呈先上升(微弱)后显著下降的趋势,表明了泉水以混合稀释过程为主。这可能主要受到岩性差异的影响。MASSEI^[9]等通过岩溶大泉的观测及径流组分发现,虽然不同水文年泉水径流呈多元化,但是其中地下水占有绝对控制作用。这主要归咎于表层岩溶带水流过程迅速,且受降雨影响显著。因此,本文从电导率的角度定义了泉水水流组分,但是由于表层岩溶带结构和水文过程的复杂性,研究结果还需要进一步通过结合更多的水化学和物探资料进行验证。

5 结论

通过监测两个不同类型表层岩溶泉水文水化学指标,利用频率分布分析方法和端元模型,分析了泉水对降雨的响应特征,解析了泉水的径流来源及成因,为西南岩溶区表层岩溶泉水资源保护与开发利用提供了科学依据。主要得到以下结论:

(1)在次降雨过程中,表层岩溶泉产流过程以驱替为主,雨水稀释作用只出现在强降雨阶段,新水比例仅约占3.6%。在年尺度上,受驱替作用排泄的水流占总径流的32.3%(季节泉)和23%(常流泉)。

(2)季节泉含水层因管道裂隙发育,对降雨响应

更敏感,易表现出暴涨暴落,其中快速流(壤中流和管道流)占比可达 57.2%;而以基质或岩溶裂隙释放的重力水仅占 10.5%,导致季节泉的持续供水能力较差。

(3)常流泉泉域土壤连续性高、表层岩溶带岩溶化发育程度较低,补给来源仅有 2 种。次降雨过程除了受驱替作用排泄的水流外,以基质或岩溶裂隙释放的重力水占比为 77%,从而常流泉具有较高的有效涵养地下水资源功能及供水可持续性能力。

参考文献:

- [1] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理:成效、问题与对策[J]. 中国岩溶, 2018,37(1):37-42. (CHEN Hongsong, YUE Yuemin, WANG Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of southwestern China: achievements, problems, and countermeasures [J]. Carsologica Sinica, 2018,37(1) 37-42. (in Chinese))
- [2] LUO M, CHEN Z, HONG Z, et al. Hydrological response and thermal effect of karst springs linked to aquifer geometry and recharge processes[J]. Hydrogeology Journal, 2017,26(4):1-11.
- [3] 罗明明, 尹德超, 张亮, 等. 南方岩溶含水系统结构识别方法初探[J]. 中国岩溶, 2015,34(6):543-550. (LUO Mingming, YIN Dechao, ZHANG Liang, et al. Identifying methods of karst aquifer system structure in South China [J]. Carsologica Sinica, 2015,34(6):543-550. (in Chinese))
- [4] ZHAO L, YANG Y, XIA R, et al. Evaluation of a hydrodynamic threshold in the Zhaidi karst aquifer (Guangxi Province, China)[J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(12): 424.
- [5] 姜光辉, 郭芳. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析[J]. 水文地质工程地质, 2009(5):95-99. (JIANG Guanghui, GUO fang. Hydrological character of epikarst in Southwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009(5):95-99. (in Chinese))
- [6] VYSTAVNA Y, SCHMIDT S I, KOPÁČEK J, et al. Small-scale chemical and isotopic variability of hydrological pathways in a mountain lake catchment[J]. Journal of Hydrology, 2020,585:124834.
- [7] CANO-PAOLI K, CHIOGNA G, BELLIN A. Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters [J]. Science of the Total Environment, 2019,685:37-49.
- [8] MASSEI N, MAHLER B J, BAKALOWICZ M, et al. Quantitative Interpretation of Specific Conductance Frequency Distributions in Karst[J], 2007,45(3):288-293.
- [9] BICALHO C C, BATIOU-GUILHE C, SEIDEL J, et al. Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2012,450: 206-218.
- [10] MINVIELLE S, LASTENNET R, DENIS A, et al. Characterization of karst systems using SIc-Pco (2) method coupled with PCA and frequency distribution analysis. Application to karst systems in the Vaucluse county (Southeastern France) [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(12):7593-7604.
- [11] WANG F, CHEN H, LIAN J, et al. Hydrological response of karst stream to precipitation variation recognized through the quantitative separation of runoff components [J]. Science of the Total Environment, 2020,748:142483.
- [12] PANARELLO H O, ARAGUÁS L, ABAYA J G, et al. The role of the Global Network for Isotopes in precipitation (GNIP) in hydrological and hydro-climatic studies [C]. Isotope Techniques in the Study of Environmental Change, 1997.
- [13] 胡可, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征[J]. 农业工程学报, 2013,29(5):53-62. (HU Ke, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, et al. Characteristics of seasonal variation of deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation in karst peak-cluster depression area, northwest Guangxi of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(5):53-62. (in Chinese))
- [14] BAKALOWICZ M. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique de la karstification [D]. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1979.
- [15] 查小森. 不同降雨条件下典型亚高山表层岩溶泉水化学特征及其碳汇效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015. (ZHA Xiaosen. Study on Hydrochemical Variations and Carbon Sink Effect in the Typical Subalpine Epikarst Spring under Different Rainfall [D]. Chongqing: Southwest University, 2015. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] 刘再华, 李强, 汪进良, 等. 桂林岩溶试验场钻孔水化学暴雨动态和垂向变化解释[J]. 中国岩溶, 2004(3):3-10. (LIU Zaihua, LI Qiang, WANG Jinliang, et al. Ground water resource assessment under the conditions to control ground subsidence [J]. Carsologica Sinica, 2004(3):3-10. (in Chinese))
- [18] BIRK S, LIEDL R, SAUTER M. Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany) [J]. Journal of Hydrology, 2004,286(1-4):179-193.
- [19] KJÆRNER J, KLØVE B. Tracing sources of summer streamflow in boreal headwaters using isotopic signatures and water geochemical components[J]. Journal of Hydrology, 2006,331(1-2):186-204.
- [20] WANG S, FU Z, CHEN H, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope[J]. Journal of Hydrology, 2019,580:124370.
- [21] SANCHEZ D, BARBERA J A, MUDARRA M, et al. Hydrogeochemical tools applied to the study of carbonate aquifers: examples from some karst systems of Southern Spain[J]. Environmental Earth sciences, 2015,74(1):199-215.
- [22] MUDARRA M, ANDREO B. Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of

- karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,397(3-4):263-280.
- [23] BICALHO C C, BATIOU -GUILHE C, TAUPIN J D, et al. A conceptual model for groundwater circulation using isotopes and geochemical tracers coupled with hydrodynamics: A case study of the Lez karst system, France[J]. *Chemical Geology*, 2019,528: 118442.
- [24] 常勇. 裂隙—管道二元结构的岩溶水文过程分析与模拟[D]. 南京: 南京大学, 2015. (CHANG Yong. Analysis and simulation of the hydrological process of the karst aquifer with fracture-conduit dual structure [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese))

The Water Source Division of Different Types of Epikarst Springs and Their Response to Rainfall

HUANG Rong^{1,2,3}, WANG Fa^{1,2,3}, CHEN Hongsong^{1,2}, FU Zhiyong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Hechi 547100, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The hydrological and hydrochemical characteristics of epikarst spring are an important means to understand the structure of karst water-bearing system. Based on the hydrogeological survey of the spring area, this paper monitored precipitation, spring water flow and conductivity in Mulian small watershed of Huanjiang, in Guangxi in 2018, using end member models and conductivity frequency distribution analysis method to analyze the source of epikarst spring water runoff and their response characteristics to rainfall. The results show that: (1) On the annual scale, the water discharged by displacement accounted for 32.3% and 23% of the total runoff of the seasonal spring and the flowing spring respectively; (2) The runoff of the seasonal spring and the flowing spring during a single rainfall process is mainly to displace the unconnected "old water" in the aquifer, and the rainwater dilution phenomenon only accounts for about 3.6% in the process of heavy rainfall; (3) The seasonal spring is recharged by multiple water flows during a single rainfall and is sensitive to rainfall response. The pipeline flow and the soil flow accounted for 23.03%, 34.22%, respectively. The gravity flow released by the matrix or karst fissures only accounted for 10.5%, resulting in poor continuous water supply; (4) The flowing spring has a single source of replenishment, which is mainly recharged by gravity water (77%) discharged from the matrix or karst fissures in the process of secondary rainfall. It has a high effective groundwater conservation function and water supply sustainability.

Keywords: epikarst spring; conductivity; flow; rainfall response; source of supply

(上接第 52 页)

Spatio-Temporal Variation Assessment of Urban Waterlogging in Zhengzhou Using Social Media Data

CHEN Yilin¹, GONG Changhao¹, FAN Yongya¹, LI Xiaolan¹, LIANG Yaohao¹, HU Maochuan^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In July 2021, due to the influence of typhoon "Fireworks", Zhengzhou-city suffered a torrential rainstorm, which caused serious urban waterlogging. Taking this event as an example, this study extracted waterlogging-related data from Sina Weibo during the rainstorm period using crawler technology and a deep learning model, then assessed the spatio-temporal variations of urban waterlogging at different time scales using the extracted data. The results show that the amount of microblog data related to waterlogging information increased sharply during the rainstorm of "7.20" in Zhengzhou. The inundated points extracted from Sina Weibo were more than the official observed points and could cover about 82% of the official observed points. Also, there were similar spatio-temporal distribution features between the inundated points and rainfall. Most of inundated points were low-lying places in old down-town. Overall, the urban waterlogging related information extracted from microblog data can not only effectively cover and supplement the official observation data during disasters, but also describe the real-time conditions of urban waterlogging, which are helpful for urban waterlogging prevention and mitigation.

Keywords: urban waterlogging; Sina Weibo; real-time change; deep learning