

文章编号:1001-4810(2014)02-0176-08

典型岩溶石山包气带洞穴水流的水文过程浅析

郭小娇,姜光辉,汤庆佳,黄思宇,刘绍华

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:为了研究岩溶包气带洞穴水流的水文过程,在2013年7月1日至2013年11月21日期间,选取桂林丫吉试验场硝盐洞XY5滴水点为研究对象,利用GreenSpan CTD300多参数仪对其进行了每半小时一次的高频率水文指标监测,分析了包气带洞穴滴水对降雨响应过程及水化学指标的动态变化特征。研究表明:洞穴滴水量、电导率和水温有很好的对应关系;滴水量变化主要受到降雨量、降雨强度和硝盐洞单元体前期含水量的影响,监测期间滴水量变化范围为23.15~589.47 mL/s;水温对降雨响应速度最快且主要受当地气温的影响,流量和电导率基本上表现出同时上升态势,电导率具有季节变化规律,即雨季电导率值较大,波动小,旱季值较小,波动较大;从旱季和雨季的水文过程,并结合旱季滴水主要化学组分的动态变化来看,电导率和水温有3个峰值,不同的峰对应不同产流顺序的水,即裸岩面产生的坡面径流、土壤—基岩界面径流和裂隙水。因此,通过洞穴滴水的水文过程及水化学指标的动态变化特征,可以定性的反映出滴水水源、滴水点运移路径、时间和环境条件的变化。

关键词:洞穴滴水;流量;电导率;水温;桂林硝盐洞

中图分类号:P641 **文献标识码:**A

0 引言

我国西南地区是世界上最大的连片裸露岩溶分布区,面积约 $53.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1],而广西岩溶面积为 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全区面积的18.2%。由于强烈的岩溶作用,岩溶含水层中溶蚀裂隙、管道高度发育,并相互贯通,形成岩溶区特有的地表、地下“双层空间结构”^[2]和岩溶含水介质的非均一性,造成了岩溶水资源分布的极度不均匀。在水文地质条件上,石质坡地往往具有独特的包气带结构,即地表岩石裸露,或虽有土壤但厚度薄且呈斑块状分布^[3],基岩内常有洞穴发育,并以流水、滴水等形式通过洞穴排泄上部介质中的水。前人^[4-9]研究结果表明滴水的物质组成主要来源于土壤和岩石,而滴水中化学元素含量变化主要受到水—土、水—岩作用时间和强度、生物化学、土壤、基岩顶板厚度、滴水来源、滴水量、降雨响应时

间及水流状态等因素的综合影响。姜光辉等^[3,20-21]研究了峰丛洼地的坡面径流成分,总结出了岩溶山区的5种产流模式,即大气—岩石界面的超渗产流,大气—土壤界面的超渗产流或者饱和产流,土壤—岩石界面的壤中流,岩溶表层带一下部包气带界面的表层岩溶带产流,包气带—饱水带界面的地下产流。可以看出,岩溶包气带是水—岩—CO₂气体相互作用的重要场所,是水化学成分的物质库;岩溶含水介质及其结构的非均匀性造成了岩溶石山区产流模式、产流顺序、储水空间、运移通道的差异,这些特性将通过洞穴滴水的物理、化学指标反映出来;反过来,洞穴水化学成分及其水文过程又印证了岩溶石山地区岩溶含水介质非均一性的这种本质特征。

岩溶洞穴滴水一直是岩溶学者研究的热点对象,过去大多数研究集中在洞穴滴水产生的次生化学沉积物上,而忽视了洞穴滴水环境意义的研究。向晓晶

基金项目:国家自然科学基金项目“气候变化对岩溶地区蒸散作用及水文过程的影响(41172231/D0213)”

第一作者简介:郭小娇(1988—),女,硕士研究生,研究方向:地下水工程。E-mail: lguo2010@163.com。

通讯作者:姜光辉,男,副研究员,主要从事岩溶地下水研究。E-mail: hgjiang@karst.ac.cn。

收稿日期:2014-01-14

等^[10]强调在研究石笋指示古环境变化过程中,要以弄清滴水 and 洞穴沉积物中元素的来源及各种岩溶过程中地球化学信号的运移机理为基础,所以利用洞穴滴水建立长期的自动监测系统,研究洞穴滴水的形成及其量的大小与外界环境变化的关系显得尤为重要。本文从洞穴滴水对降雨的水化学响应入手,探讨了滴水的可能来源及控制水化学动态变化的主要作用,研究结果对了解和把握岩溶区典型石山坡面降雨入渗机制和洞穴水文地球化学变化规律有重要的意义。

1 研究区概况

硝盐洞(N25°14′53, E110°22′33)位于桂林市区东郊约 8 km 的丫吉村附近,是丫吉试验场内发现的最大溶洞,处于峰林平原和峰丛洼地两种地貌类型的界面上,即位于 S291 泉东部山坡上(图 1)。洞穴发育在上泥盆统融县组(D₃r)浅灰至灰白色中厚层状泥亮晶颗粒灰岩中,地层倾向总体向南,倾角平缓。洞口海拔为 197.5 m,比 S291 泉高出 46 m,洞长约 100 m,宽约 25 m,洞穴顶板厚度为 20~150 m,为一向山内倾斜的厅堂式溶洞(图 2)。洞穴分为两

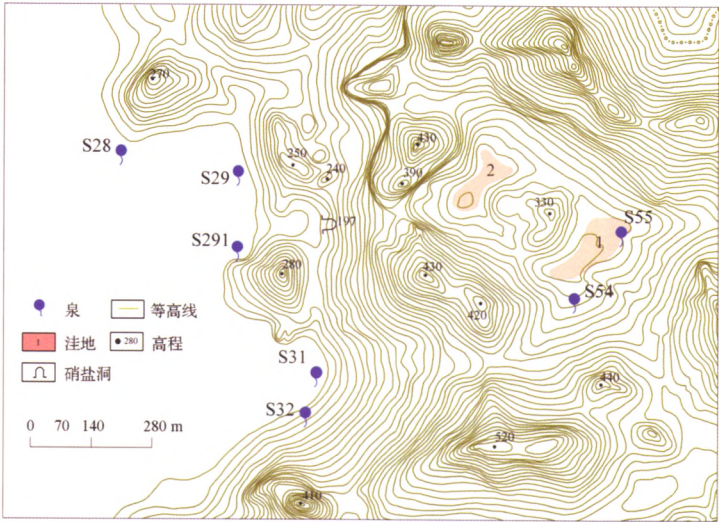


图 1 硝盐洞分布位置图
Fig. 1 Topographic map of Xiaoyan cave

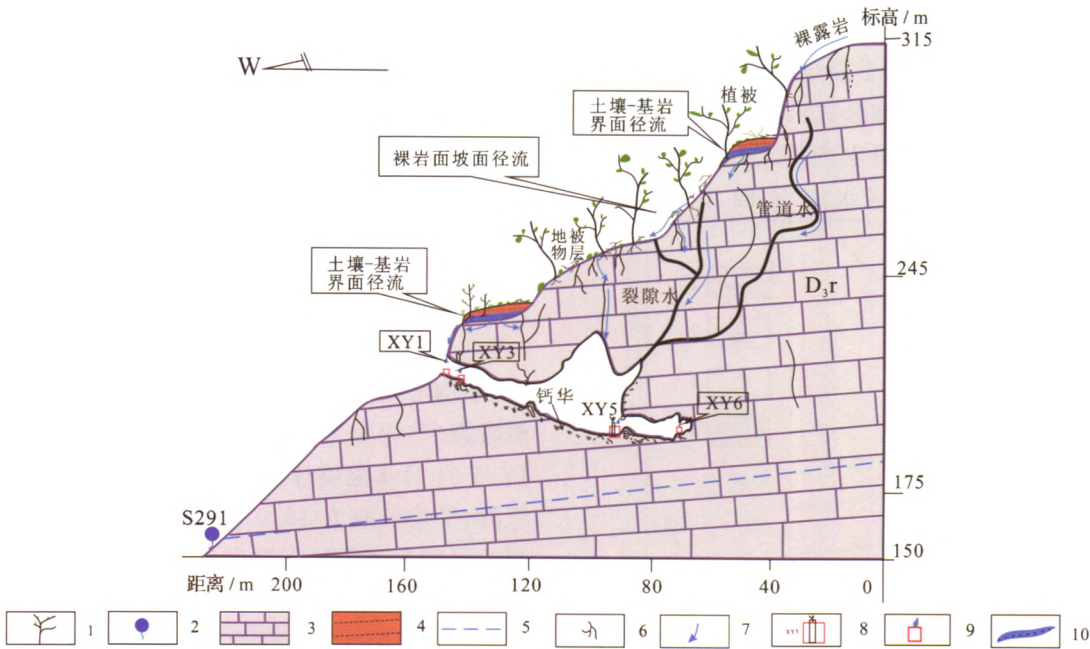


图 2 硝盐洞结构剖面及监测点分布图
Fig. 2 Profile of Xiaoyan cave and its outside slope and location of drip water sites
1. 植被; 2. 泉; 3. 上泥盆统融县组灰岩; 4. 土壤; 5. 地下水位; 6. 裂隙、管道; 7. 水流方向; 8. 常年滴水点; 9. 季节性滴水; 10. 土壤水

段,长占一半,前半段呈厅堂状,空间较大,后半段为度约各裂隙状,空间狭小,洞穴顶板滴水基本分布在前半段,从洞外往里主要分布有 5 处滴水点,编号为 XY1、XY1-1、XY3、XY5、XY6,其中 XY5 点是硝盐洞滴水量最大的点,为常年性滴水点。丫吉试验场内第四纪地层主要为残坡积层,以灰褐色、褐黄色砂质粘土为主,厚度在 1~5 m。XY5 点上覆土壤厚度不均匀,介于 0.3~1 m 之间。

研究区属于亚热带季风气候区,根据桂林市气象站 1951—2012 年观测资料,该区多年平均气温为 18.9℃,多年平均降雨量为 1 886 mm,4 到 8 月为雨季,总降雨量占年降雨量的 70%,从 9 月到次年 3 月为旱季,其降雨量仅为年降雨量的 30%。

2 研究方法

2.1 野外监测

选取硝盐洞 XY5 滴水点为监测对象,在滴水点处用塑料布汇集滴水,导流进入下面的流量桶,在 20 cm、28 cm 高度处分别设置内径为 2 mm、2.8 cm 的出流孔(图 3),以排泄不同时间、不同降雨条件下的滴水或流水。在旱季时,滴水量较少,以小孔径出流为主;在雨季时,XY5 点滴水量较大,两孔径均有出流,当大孔径处于不完全充水状态时,按孔口出流公式(公式 1、2)利用水位数据分别计算出两孔口流量,然后相加得到总的滴流量。公式由室内模拟得出,因流量桶截面积和出流孔孔径恒定,故公式中流量仅与水位有关。当两出流孔均处于完全充水状态时,滴水水量较大,流量则改用三角堰公式求得。流量桶中放有澳大利亚 GreenSpan 公司生产的 CTD300 水质多参数自动记录仪,自动记录水位、水温、pH 和电导

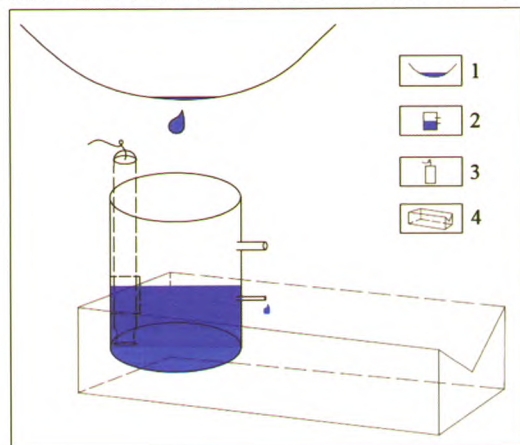


图 3 XY5 滴水点实验观测装置图

Fig. 3 Monitoring equipment at XY5

1. 集水布;2. 流量桶;3. 水质多参数自动记录仪;4. 流量槽

率 EC(其中,EC 为温度自动补偿至 25℃ 的值;水位是指以小出水孔所在位置为起点的水柱高度),观测时间间隔为 30 min,在雨季通过设置仪器加密记录,对应精度分别为 0.01 m、0.01℃、0.01 pH 和 0.01 μS/cm。观测期间 pH 由于探头损坏未能记录数据。

$$Q = 8.5353 \times h + 29.975 \quad (h < 8 \text{ cm}) \quad (1)$$

$$Q = 519.44 \times \ln(h) - 969.22 \quad (h > 8 \text{ cm}) \quad (2)$$

式中:Q 为流量,单位 mL/s;h 为水位,以小出水孔高度处为基准算起,单位 cm。

2.2 样品采集与测试分析

在 2013 年 11 月 11 日—16 日连续降雨期间采集 XY5 滴水,每天一次,收集滴水 120 mL 于聚乙烯塑料瓶中,并用 1:1 的硝酸酸化,密封,带回实验室测试 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度。水样中的 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 分析在中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶动力学实验室进行,仪器使用 Thermo Scientific 公司生产的 ICS900 离子色谱仪测试,测量相对误差小于 5%; Ca^{2+} 和 HCO_3^- 由德国 Merck 公司的碱度试剂盒现场测量获得,精度分别为 2 mg/L 和 0.1 mmol/L。

3 结果与分析

3.1 XY5 滴水点长时间序列水文过程变化分析

图 4 表示硝盐洞 XY5 滴水点 2013 年 7 月 1 日到 11 月 21 日的降雨、流量、电导率和水温的关系。从图中可以看出,流量、电导率和水温有很好的对应关系,其变化幅度受到降雨强度和硝盐洞顶板岩土单元体含水状况的影响,三者在一一定的降雨后都表现出暴涨暴落的现象,波峰呈尖瘦状,而且随着降雨的结束峰值很快减小并趋于缓和,反映出含水介质中裂隙、管道并存的特点。电导率往往在降雨过后有个低谷,并且该值小于平水期的均值,表明低谷的形成,存在明显的雨水稀释作用。在每次降雨过后,水温的峰值基本上恢复到原来水平,但水温整体上从 2013 年 7 月 1 日到 10 月 17 日呈上升趋势,增加的速率为 1%,平均水温为 17℃,水温的这种变化与该时间段气温较高(平均为 27℃)有很大的关系;10 月 17 日到 11 月 21 日水温整体上降低,是进入冬季气温降低的缘故,平均气温为 18.7℃,班凤梅等^[11]对北京石花洞的研究也表明洞穴温度的波动与洞内外温差的季节性变化有关。流量的变化受到降雨强度、降雨量及硝盐洞顶板岩土单元体含水状况的影响,对降雨响应敏感,但存在滞后现象,其中流量的变化主要受降雨量的控制,降雨后流量往往变大,流量的变幅范围为 23.15~589.47 mL/s。图中流量过程曲线呈“几”字

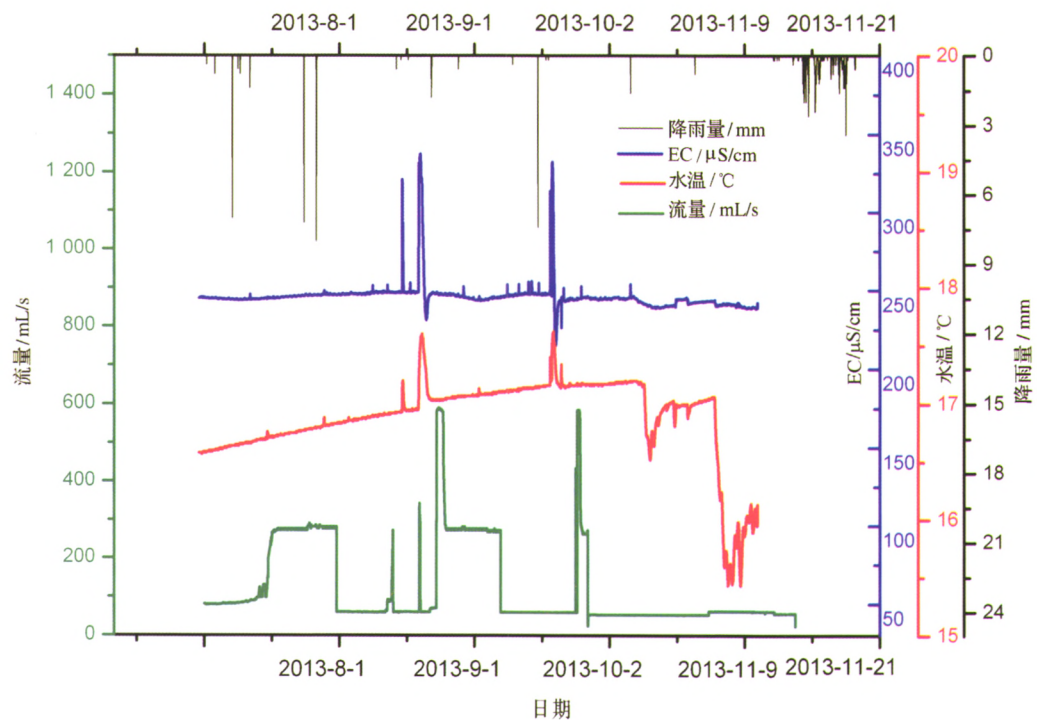


图 4 XY5 点 7—11 月降雨、流量、EC 和水温关系图

Fig. 4 Precipitation, discharge, electric conductivity and water temperature at drip site XY5 from July to November, 2013

形,可能是集水布上常有蝙蝠粪便或其他杂质,随水流进入流量桶堵塞小孔径出水管的原因。由于小出水孔排水不畅,使得桶内水位上升,并在距桶底 40 cm 处上下波动,以致桶内的滴水能通过大孔径排出,但由于水量不大,大孔径不完全充水,因而由公式计算得出的流量较稳定,进而产生了流量过程曲线“平台”效应。

3.2 XY5 雨季水文过程变化分析

选取雨季 2013 年 8 月 22 日到 27 日的一次降雨事件(图 5)作分析。该次降雨总的降雨量为 68.2 mm,降雨强度为 0.57 mm/h。降雨主要集中于 8 月 23 日 7:00 到 24 日 0:00 之间,本时段的降雨量为 54.6 mm,占该次降雨量的 80 %,之后降雨逐渐减

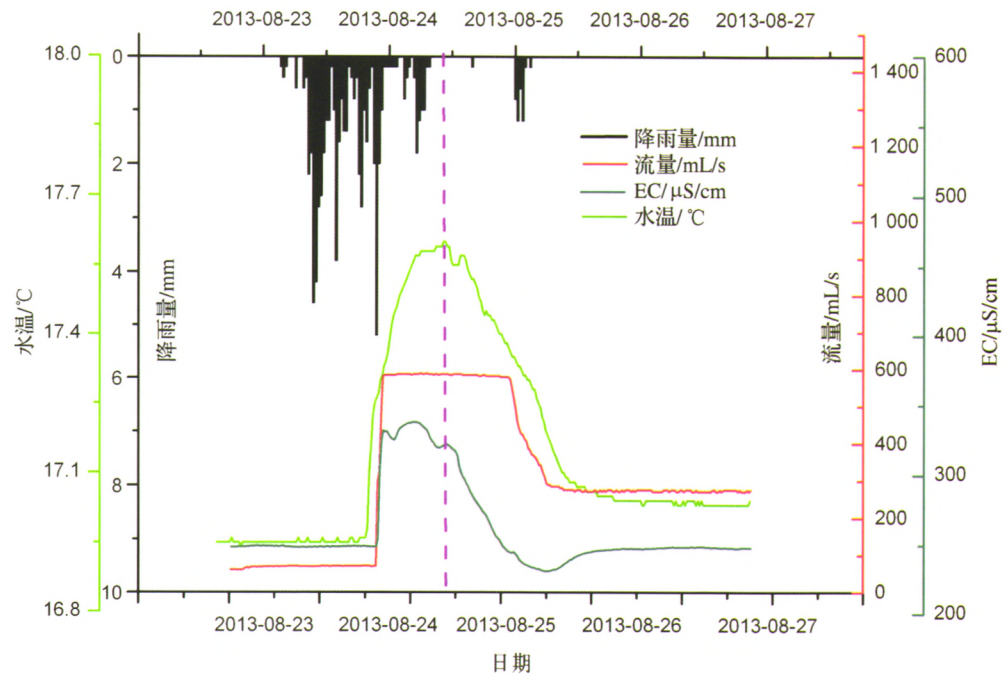


图 5 XY5 点 8 月降雨、流量、EC 和水温关系图

Fig. 5 Precipitation, discharge, electric conductivity and water temperature at drip point XY5 in August, 2013

少,并于 25 日 5:30 停止降雨。从图 5 可以看出,水温对降雨响应速度最快,在降雨 38.5 h 后的 23 日 14:30 开始上升,和流量、电导率相比最晚达到峰值,并与电导率的第三次峰值出现时间基本上一致,之后迅速衰减达到平缓状态,但是降雨后水温略高于降雨初期的水温,平均高 0.1 °C。流量和电导率基本上同时上升,均在降雨 40 h 后的 23 日 17:00 开始快速上升,其中流量在达到峰值后持续了大约 36 h,之后迅速降低,但雨后平均流量高于降雨初期流量,高出 205.2 mL/s,说明含水介质得到降雨补给后有一定的调蓄能力。

根据姜光辉^[3]、常勇^[12]对坡面径流成分的研究,来自不同界面的产流顺序不同,将造成水物理化学性质的差异;周运超等^[4,13]指出滴水的物质组成来源于土壤和岩石,并将通过水化学性质(如电导率)的变化表现出来。从图 5 可以看出,可能受到不同来源水的控制及水物质成分的影响,电导率对降雨响应过程出现了 3 个峰值,这与张美良等^[14]对盘龙洞 8 个滴水点的监测,发现在 4—9 月份,滴水电导率有明显峰值相类似。其原因应是雨季高温多雨,土壤水溶蚀能力较强,更多的土壤矿物和基岩矿物被溶解,从而导致

滴水电导率增大^[15]。之后,由于前期土壤中 CO₂ 的消耗,岩溶水溶蚀能力降低^[16-18],电导率下降。此外,因洞穴滴水对降雨存在滞后效应,滞后效应的稀释作用也是电导率降低的主要原因之一。峰值过后的 24 日 13:30 电导率迅速降低,最低值往往低于平水期的平均电导率,可见降雨稀释作用之强烈。

3.3 XY5 旱季水文过程变化分析

选取旱季 11 月 11 日到 16 日的一次降雨事件(图 6)作分析并和 8 月的降雨事件作对比。该次降雨总降雨量为 67 mm,降雨强度为 0.56 mm/h,降雨主要集中在 11 日 00:00 到 12 日 2:00 之间,本时段的降雨量为 66.4 mm,占该次降雨总量的 99.1 %。统计得出,该次降雨之前有 44 d 没有降过大雨,仅在 10 月 17 日到 21 日之间有 9.6 mm 降雨。因而图 6 中流量、电导率和水温没有出现大的峰值。这可能是表层岩溶带长期未得到降雨补给,造成水分亏缺引起的,也即该次降雨基本上被表层岩溶带全部吸收,以满足其蓄水要求。本降雨过程观测点的流量基本上没有变化,图 6 中流量曲线的震荡波动,是因集水布未能把汇集的水及时导入流量桶中,即导流不连续,存在有间断造成的。

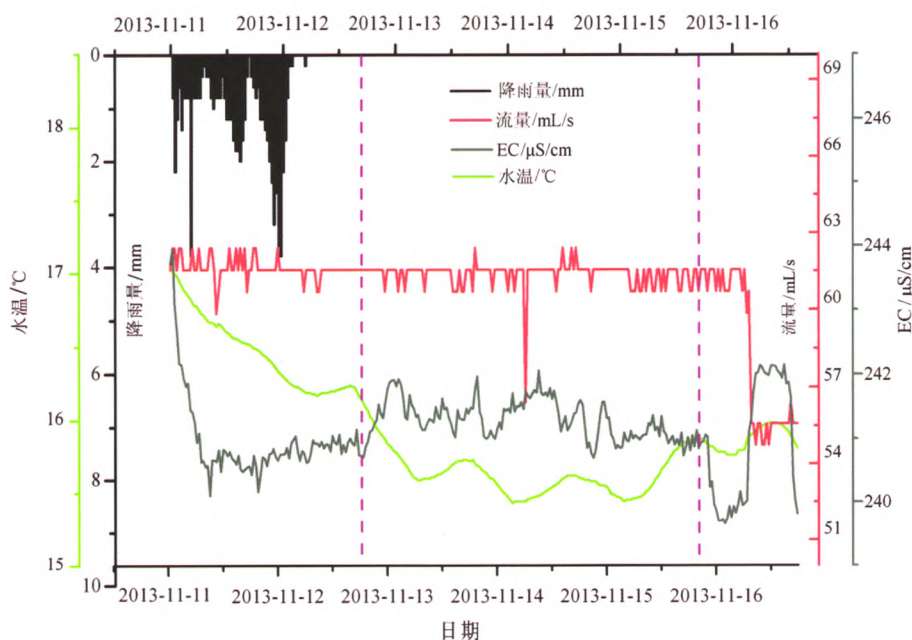


图 6 XY5 点 11 月降雨、流量、EC 和水温关系图

Fig. 6 Precipitation, discharge, electric conductivity and water temperature at drip point XY5 in November, 2013

与流量变化不同,电导率和温度变化阶段性明显,反映 XY5 点对不同产流顺序水响应存在有时间差异。第一阶段即 11 日 00:00 至 12 日 21:30,该阶段的水主要来源于裸岩面上产生的坡面径流,该部分水沿着渗透性良好的大裂隙或管道快速下渗,优先到

达滴水点,即形成“优先流”,之后这样的水极少甚至为零。和雨季 8 月份一样,本阶段滴水温度对降雨最先响应,11 日 00:00 滴水温度开始迅速降低,是洞顶裸露岩石表面形成的水直接进入裂隙的结果。观测资料表明,11 日 00:00 之前平均气温为 22.6 °C,而

在 11 日 0:00 到 13 日 5:30,平均气温为 13.8℃,由于气温较低,导致雨水的温度也较低,以致在洞顶裸露岩石表面形成的该部分水到达 XY5 点时滴水水温突然变低。与此类似,该阶段滴水点电导率降低也是受洞顶裸露岩面水的稀释作用引起的。周福莉等^[15]在研究芙蓉洞洞穴水水文地球化学指标时空变化时指出,电导率的高低取决于水溶液中含有溶质盐的浓度,或其他会分解为电解质的化学杂质的含量。本阶段滴水因主要来源于裸露岩面上产生的坡面径流,该坡面径流由于在相对不透水岩石表面停留时间较短,未与岩、土发生充分的溶蚀作用,携带的化学成分较少,所以导致滴水点电导率较低。第二阶段始于 12 日 21:30,结束于 16 日 2:30,电导率和水温都表现出波动特征,是不同介质水混合作用的结果。该阶段电导率比第一阶段末端的电导率要高,可能是降雨经过上部表层岩溶带(土壤、裂隙)调蓄后溶解了更多的离子造成的。该阶段主要是水经过“活塞式”下渗,降雨(新水)推动土壤—基岩界面上的径流到达滴水点。第三阶段从 16 日 3:30 至 7:30 电导率急剧降低,该时间段平均流量为 61.2 mL/s,与 11 月 11 日至 16 日期间的平均流量 61.0 mL/s 相比略有增加,电导率的下降主要受裂隙水稀释作用的控制;16 日 7:30 电导率开始逐渐上升,在 16 日 20:30 达到峰值,而流量从 12:00 开始大幅减小,说明该时段滴水的近源补给也消耗殆尽,滴水补给主要来源于远程径流的裂隙水,而且该裂隙水流量较小,更重要的是途中它溶解

并携带了大量的离子,受之补给,电导率大幅度上升。

3.4 XY5 旱季(11 月)主要化学组分动态变化

土壤和岩石是洞穴滴水中多种元素的主要来源之一,化学元素含量的变化主要受到大气降雨在土壤和基岩运移过程中的生物化学作用的影响^[6],滴水水化学成分的动态变化可以反映出水在岩溶介质中的运移过程及滴水来源。有研究表明, K^+ 主要存在于土壤中,岩石中含 Ca^{2+} 较高,含 K^+ 、 Na^+ 较低,滴水中的 Mg^{2+} 主要来源于上覆土壤和下伏基岩的溶解和淋滤^[19]。从图 7 中可以看出, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的动态变化可以分为 3 个阶段,和旱季电导率(图 6)的变化不仅在时间上匹配,而且其变化的主要控制作用(稀释作用,水—岩相互作用)也一致。第一阶段(11—12 日) K^+ 和 Mg^{2+} 的浓度在降低,是裸露岩面产生的坡面流通过裂隙下渗优先到达洞穴滴水点的结果,表现出稀释作用,而 Ca^{2+} 浓度增加,是降雨流经裸露岩石表面具有一定的溶蚀能力,携带了相当数量的 Ca^{2+} 。从时间上来看,11—12 日电导率也处于下降阶段,说明水中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子含量是电导率变化的主要原因之一。第二阶段(12—15 日) K^+ 和 Ca^{2+} 持续升高, Mg^{2+} 先升高后降低,但其含量始终较第一阶段高。在非降雨期,这些化学组分储存在土壤孔隙和岩溶裂隙中,一旦降雨量足够大,下渗雨水便将原先储存于土壤孔隙、岩溶裂隙中的这些离子带入洞内,这是造成本阶段电导率增大的主要原因。 K^+ 浓度持续升高,则是因为本阶段滴水主要来源于

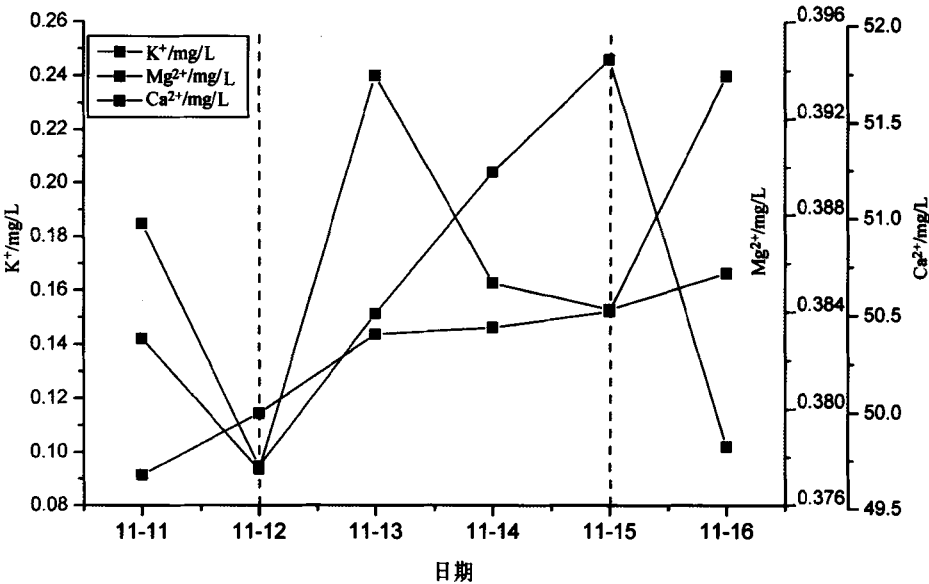


图 7 XY5 滴水点 11 月主要离子变化图

Fig. 7 Main ion variations at drip point XY5 in November

土壤—基岩界面径流之故。第三阶段(15—16日) K^+ 浓度降低, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度在增加, 并且 Ca^{2+} 浓度增加幅度较大。原先储存于土壤中的 K^+ 在前一阶段不断随渗透水进入洞中, 存量逐渐减少, 致使在本阶段浓度降低。而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度增加, 主要是长距离运移的裂隙水沿途溶解并携带了大量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的结果。

从雨季和旱季电导率变化来看, 电导率具有明显的季节变化规律, 即雨季电导率较大, 变幅小, 旱季电导率较小, 波动较大。根据电导率旱季波动较大的特点, 并结合滴水中主要化学组分(K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 的动态变化, 可以推测出不同时间滴水来自于不同产流顺序的水, 即裸岩面产生的坡面径流(优先流)、土壤—基岩界面径流和裂隙水。其中第二阶段的水(土壤—基岩界面径流)相对持续的时间最长, 其他阶段的水都很快通过 XY5 点进入下部包气带, 这部分水是表层岩溶带发挥调蓄作用的主体。通过洞穴滴水点的主要水化学指标的动态变化可以分析出滴水的可能来源、运动转化过程, 在一定程度上可以反映赋水介质特征, 这对于研究表层岩溶带的调蓄机制是非常重要的。

4 结 论

(1)降雨量、降雨强度和前期含水量控制着洞穴滴水流量的变化过程。在雨季, 流量有明显的峰值, 但在旱季, 前期有 44 d 没有降雨的情况下, 流量没有表现出明显的峰值, 明显受到岩溶含水介质前期含水量的影响。

(2)水温对降雨响应速度最快, 流量和电导率基本上表现出同时上升态势, 水温主要受到当地气温的影响, 电导率具有季节变化规律, 即雨季电导率值较大, 波动小, 旱季值较小, 波动较大。

(3)从旱季和雨季的水文过程, 结合旱季滴水主要化学组分的动态变化综合来看, 电导率和水温有 3 个峰值, 不同的峰对应不同产流顺序的水, 即裸岩面产生的坡面径流、土壤—基岩界面径流和裂隙水。

致 谢:感谢中国地质科学院岩溶地质研究所潘谋成在实验室分析中给予的帮助; 感谢林玉石研究员、殷建军在修改过程中的细致指导; 审稿专家和韦复才研究员提出了宝贵修改意见, 在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1—13.
- [2] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 3—15.
- [3] 姜光辉, 陈坤琨, 于爽, 等. 峰丛洼地的坡地径流成分划分[J]. 水文, 2009, 29(6): 14—19.
- [4] 周运超, 王世杰. 贵州七星洞滴水的水文水化学特征及其意义[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 52—58.
- [5] 向晓晶, 李廷勇, 王建立, 等. 重庆芙蓉洞土壤渗透水一滴水的元素变化特征及其意义[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 121—125.
- [6] 周文亮, 姜光辉, 陈国富, 等. 桂林硝盐洞滴水水文和水化学动态变化特征[J]. 中国岩溶, 2013, 32(1): 51—57.
- [7] 杨平恒, 袁道先, 叶许春, 等. 降雨期间岩溶地下水化学组分的来源及运移路径[J]. 科学通报, 2013, 58(18): 1755—1763.
- [8] Pauline C Treble, Chris Bradley, Anne Wood, et al. An isotopic and modelling study of flow paths and storage in Quaternary calcarenite, SW Australia: implications for speleothem paleoclimate records[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 64: 90—103.
- [9] Célestine Delbart, Danièle Valdes, Florent Barbecot, et al. Temporal variability of karst aquifer response time established by the sliding-windows cross-correlation method[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 580—588.
- [10] 向晓晶, 王建立, 李俊云. 重庆芙蓉洞岩溶系统中钡元素地球化学特征[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(17): 3510—3513.
- [11] 班凤梅, 蔡炳贵. 北京石花洞空气环境主要因子季节性变化特征研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(2): 132—137.
- [12] 常勇, 姜光辉, 康彩霞, 等. 峰丛洼地坡面径流过程——以丫吉试验场为例[J]. 水文, 2010, 30(6): 19—23.
- [13] 周运超, 王世杰. 洞穴滴水的水文地球化学过程: 贵州犀牛洞的研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(2): 23—33.
- [14] 张美良, 朱晓燕, 林玉石, 等. 桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义[J]. 地球与环境, 2009, 37(1): 1—10.
- [15] 周福莉, 李廷勇, 陈虹利, 等. 重庆芙蓉洞洞穴水水文地球化学指标的时空变化[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 253—259.
- [16] 刘再华. 桂林岩溶水文地质试验场岩溶水文地球化学的研究[J]. 中国岩溶, 1992, 11(3): 209—217.
- [17] 刘再华, 袁道先, 何师意. 岩溶动力系统水化学动态变化规律分析[J]. 中国岩溶, 1999, 18(2): 103—108.
- [18] 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译[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 169—176.
- [19] 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 258—264.
- [20] 姜光辉, 于爽, 常勇. 利用水化学方法识别岩溶水文系统中的径流[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1535—1541.
- [21] 常勇, 吴吉春, 姜光辉, 等. 峰丛洼地岩溶泉流量和水化学变化过程中地面径流的作用[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1050—1057.

Analysis of hydrological process of drip water in the aeration zone of a typical karst stone hill

GUO Xiao-jiao, JIANG Guang-hui, Tang Qing-jia, Huang Si-yu, Liu Shao-hua

(Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Xiaoyan cave is located in Yaji village approximately 8 km southeast of Guilin City in Guangxi (N25°14'53, E110°22'33). Geomorphologically, the cave is on the boundary between adjacent peak cluster and peak forest karst systems. Xiaoyan cave is developed in massive pure Upper Devonian limestone with a bioclastic sparite to micrite texture. The limestones dip gently toward the south-west. The altitude of the cave is 197.5 m. The total length of cave measures 100 m, the width of cave is about 25 m and the thickness of the cave roof is approximately 20—150 m. XY5 is a perennial drip point, which is the largest drip water point in the cave. The overburden above the cave is about 0.3—1 m thick. The area has a subtropical monsoon climate with mean temperature of 18.9℃, and long-term mean annual rainfall of 1 886 mm.

In order to study the hydrological processes of cave drip water flow, cave drip water was sampled, and water level, conductivity, and temperature were automatically monitored in Xiaoyan cave's karst aeration zone. The response of the drip water, water chemistry and dynamic characteristics to the rain was analyzed. The results indicate that the drip water flow rate, conductivity and water temperature have a good corresponding relationship. Rainfall, rainfall intensity and the pre-rainfall water content of the rock and soil mass overlying Xiaoyan cave are the main factors affecting water flux; the flow rate ranges from 23.15 to 589.47 mL/s. Temperature has the fastest response to rainfall, while water flux and conductivity basically increase at the same time. Water temperature is mainly affected by the local temperature. Conductivity exhibits obvious seasonal changes, with higher values and lower amplitude in the rainy season, lower values and a large amplitude in the dry season. Due to the hydrological processes of the wet and dry conditions, combined with dynamic changes in the main hydrochemical components in the dry season, conductivity and temperature exhibit three peaks. The different peaks correspond to different runoff water: preferential flow, soil-rock interface runoff and fracture water. Therefore, through the hydrological processes and the dynamic change characteristics of hydrochemical indicators, we can qualitatively reflect the drip water source, flow paths, time and the changes in environment conditions.

Key words: cave drip water; water flux; conductivity; temperature; Xiaoyan cave, Guilin

(编辑 韦复才)