

喀斯特槽谷区表层喀斯特水化学的暴雨动态特征

孙钰霞^{1 2} 李林立^{1 3} 魏世强²

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;
3. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘 要: 喀斯特水化学是在碳酸盐岩 - 水 - CO_2 气三相相互作用的开放系统中形成的, 水化学变化既反映了喀斯特含水介质特点和喀斯特发育的程度, 又反映了喀斯特区水土流失的进程。选择重庆市南川区南平镇兰花沟为代表, 以兰花沟喀斯特动力系统观测站为依托, 采用多功能自动化观测仪 CTDP300, 对暴雨条件下表层喀斯特泉的 pH、电导率、水温和水位进行了连续自动监测。监测结果表明: 1. 表层喀斯特带对降雨很敏感, 其喀斯特水化学明显受降雨条件的影响。在强降雨开始时, 喀斯特水 pH 升高, 水温降低、电导率降低、 PCO_2 降低, 方解石饱和指数 (*SIc*) 升高, 喀斯特泉水化学表现出雨水的“活塞效应”。2. 在强降雨中后期, 表层喀斯特水 pH、电导率、水温下降, 方解石饱和指数 (*SIc*) 降低, 这表明稀释作用可贯穿整个降雨过程, 但在降雨后 3 ~ 4 h, 表层喀斯特带的高裂隙率 and 渗透性开始发挥作用, 水动力作用和 CO_2 效应逐渐占据主导地位。因此, 降雨过程中有两个重要的作用在控制着水化学的动态变化, 一是雨水的稀释作用, 二是碳酸盐岩 - 水 - CO_2 气相互作用。3. 根据喀斯特水化学在降雨条件下不同结构的含水介质中的反应, 兰花沟表层喀斯特带含水介质以管道为主。4. 土地利用类型的改变也会影响到表层喀斯特水化学对暴雨的响应。

关键词: 表层喀斯特泉; 降雨; 碳酸盐岩 - 水 - CO_2 相互作用; 喀斯特水水化学动态
中图分类号: P342 , P931.4 **文献标识码:** A

喀斯特过程是一种生态系统条件控制下的表层地质作用。受喀斯特作用影响, 喀斯特区具有双层水文地质结构^[1-4], 不同水文地质条件制约着不同的水文循环过程^[5]。在喀斯特区, 大气降水通过地表渗透, 到达表层喀斯特含水层, 再经过运移, 汇聚到饱水裂隙含水层, 最终通过地下河排出。而在非喀斯特区, 大气降水经过地表渗透, 形成地下水, 在其出露地, 形成地下水露头补给地表水。因此, 相比非喀斯特区, 喀斯特区双层水文地质结构使水体运移的场所主要发生在地下, 因而大部分水资源赋存并运移于地下喀斯特裂隙、管道之中。该类型水循环模式决定了喀斯特区水土流失的主要表现形式为降雨携带泥沙进入地下喀斯特裂隙、管道、地下河,

然后再出露地表汇入地表河流。在此过程中, 水是造成土壤损失的传输介质, 其将覆盖于岩石表面的土壤带入地表 - 地下双层水文网络。其次, 喀斯特含水介质发育程度 (管道或者裂隙) 决定了土壤在地下可存储的空间, 从某种意义上决定了地表土壤流失的速率。

在喀斯特区对喀斯特含水介质的分析, 受技术手段限制, 通常是采用地下水水化学法, 尤其是表层喀斯特水与暴雨作用的水化学法。目前关于峰丛洼地、表层喀斯特带及表层喀斯特泉等的水化学研究取得了一些重要的认识和结论^[6-14], 但关于川东槽谷区表层喀斯特水, 尤其是持续时间较长的强降雨对喀斯特泉水物理化学响应的研究很少, 因此, 对川

收稿日期 (Received date) : 2011 - 01 - 09; 改回日期 (Accepted) : 2012 - 04 - 09。

基金项目 (Foundation item) : 西南大学博士基金 (SWU109050) ; 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2011B003) ; 国土资源部喀斯特动力学重点实验室开放基金联合资助。 [Supported by Doctor Item of Southwest University (SWU109050) , the Fundamental Research Funds for the Central Universities (XDJK2011B003) , the Open Fund of Karst Dynamic Key Laboratory of Ministry of Land and Resources.]

作者简介 (Biography) : 孙钰霞 (1976 -) , 女, 四川省宜宾市人, 讲师, 博士生, 主要从事农业资源利用研究。 [Sun Yuxia (1976 -) , female , lecturer , Ph D candiadate , researched on utilization of agricultural resources.] E - mail: sunyx@swu.edu.cn , Tel: 13983468271

东槽谷区表层喀斯特泉进行长期动态监测,加强暴雨期间喀斯特水化学分析,对于川东槽谷区水土资源利用和石漠化治理均有重要的理论和实践意义。

1 研究区域概况

兰花沟位于重庆市南川区南平镇木渡河流域。木渡河流域地处四川盆地与云贵高原的过渡地带,受区域地质构造作用,地貌类型为浅丘槽坝区,平均海拔 800 ~ 1 031 m,为典型的川东喀斯特槽谷地貌¹⁾。流域内年均气温 16℃,年均降水量 1 300 mm;降水年内分布不均匀,主要集中在 5—9 月,约占全年的 67.9%;土壤主要为黄泥土,成土母质多以轻度或强度的化学风化物为主,土壤细腻粘重,胶体品质差,矿物养分较贫乏,酸瘦缺磷,呈酸性。

兰花沟泉位于木渡河上游,出露地层为三叠系嘉陵江组灰岩(T_{1j})。地质构造上处于倾角较小的宽缓背斜的一翼,地层的倾向和倾角分别为 350°、5°。2008 年,兰花沟泉域的土地利用以旱地为主,约占 70%,林地和水田各约占 20% 和 10%,旱地位于山坡和坡脚,林地处于山顶,种植了以马尾松为主的水源涵养林,水田则位于坡脚,夹杂在旱地之中。2011 年,兰花沟泉域土地利用结构发生变化,水田和旱地各约占 45% 和 35%,位于山坡和坡脚,夹杂分布,而林地仍然占 20%,位于山顶。整个兰花沟泉流域面积约为 0.1 km²。受降雨与地质、生态环境综合作用,兰花沟泉常年不干,但流量动态变化较大,根据观测,流量在 0.02 ~ 12 L/s 间,现已作为周围农村居民点的主要饮用水源。

2 研究方法与数据处理

2.1 数据的获取

通过多功能自动化监测记录仪 CTDP300(澳大利亚),分别观测大气降水量和兰花沟泉水的 pH、电导率(Ec)、水温(T)以及泉水堰口水位(H),每 15 min 记录一次数据。泉水的 pH、电导率、水温和泉水堰口水位的精度分别为 0.01 pH、0.01 us/cm、0.01℃、0.01 m,电导率由温度自动补偿至 25℃ 的值,大气降水量的精度为 0.5 mm,为便于对降雨量进行数据分析,时间步长均取 15 min,即降雨强度均是根据 15 min 内实际的降雨量求出的。同时,为了

避免数据的偶然性和随机性,因此进行了 3 次观测,第 1 次观测时间为 2008-04-18 到 2008-04-28,第 2 次为 2008-05-22 到 2008-06-05,第 3 次为 2011-03-20 到 2011-04-17。

2.2 喀斯特泉的方解石饱和指数和 CO₂ 分压的计算

WATSPEC^[15] 程序可以计算每个样品的二氧化碳分压 P_{CO_2} 和饱和指数 SIc ,其值可以反映喀斯特作用的进程,即二氧化碳分压 P_{CO_2} 越高,表明溶解于水中的 CO₂ 愈多,其方解石饱和指数就愈低,喀斯特作用就愈强,因而能够溶解更多的碳酸盐岩,形成更大的地下空间。计算样品中的二氧化碳分压 P_{CO_2} 和饱和指数 SIc 需要 9 个参数值,分别是水温、pH 和 7 种主要阴阳离子的浓度(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^-)。由于一般喀斯特水中 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度都较低,其浓度随时间的变化在计算二氧化碳分压 P_{CO_2} 和饱和指数 SIc 时可以忽略,而 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度变化却相对较大,要获得喀斯特水的二氧化碳分压 P_{CO_2} 和饱和指数 SIc ,就必须即时得到 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度。通过实验发现 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度与电导率(Ec)存在良好的线性关系(图 1),且总体误差在 10%^[15]。因此,可以以自动观测记录仪(CTDP300)连续自动监测的电导率(Ec)为基础,通过线性关系式,获得当时每个样品中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度,这样就可以运用 WATSPEC 程序

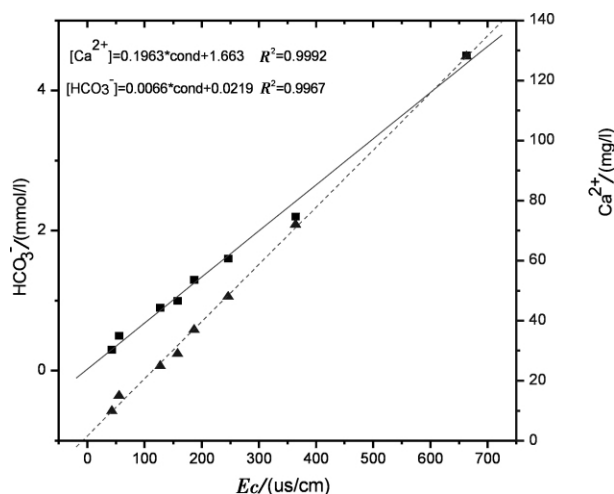


图 1 兰花沟喀斯特泉水 Ec 与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 线性关系图

Fig. 1 Linear relationships between electric conductivity vs. Calcium and bicarbonate, respectively for the Lanhuagou spring

1) 南川市水电勘测设计队、南川市水土保持局.“长治”七期工程重庆市龙凤项目区(南川市)木渡河小流域设计报告.2005.8

即时计算每个样品的二氧化碳分压 P_{CO_2} 和饱和指数 (SIc)

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.1963 \times \text{cond} + 1.663 \quad R^2 = 0.9992$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 0.0066 \times \text{cond} + 0.0219 \quad R^2 = 0.9967$$

式中 $[\text{Ca}^{2+}]$ 、 $[\text{HCO}_3^-]$ 浓度单位分别为 mg/l 和 mmol/l , cond 为 25°C 时喀斯特水的电导率, 单位为 us/cm 。 R 为相关系数。

3 结果与分析

3.1 第1次强降雨条件下兰花沟泉水化学动态

3.1.1 降雨特征

图2为兰花沟泉2008-04-18到2008-04-28降雨量、水温和水位变化曲线。该次降雨累计降雨量51.5 mm, 平均时段雨强为0.54 mm/15 min。在该时段内, 主要有2场相对集中降雨的过程, 第1场降雨从04-20T5:30开始, 到04-20T15:00结束, 累计降雨量26.5 mm, 时段雨强0.66 mm/15 min, 最大雨强4.5 mm/15 min, 最小0 mm/15 min。第2场降雨从04-21T23:45开始, 到04-22T14:15结束, 累计降雨量25 mm, 时段雨强0.42 mm/min, 最大雨强1.5 mm/min, 最小0 mm/min。根据降雨强度常用分级标准^[16], 当12 h雨量 $15 \text{ mm} \leq R_{12} \leq 29.9 \text{ mm}$ 及24 h雨量 $25 \text{ mm} \leq R_{24} \leq 49.9 \text{ mm}$ 时候, 属于大雨, 当 $R_{12} \geq 30 \text{ mm}$ 及24小时雨量 $R_{24} \geq 50 \text{ mm}$ 时, 属于暴雨, 因此该次降雨属于大雨, 且接近于暴雨。

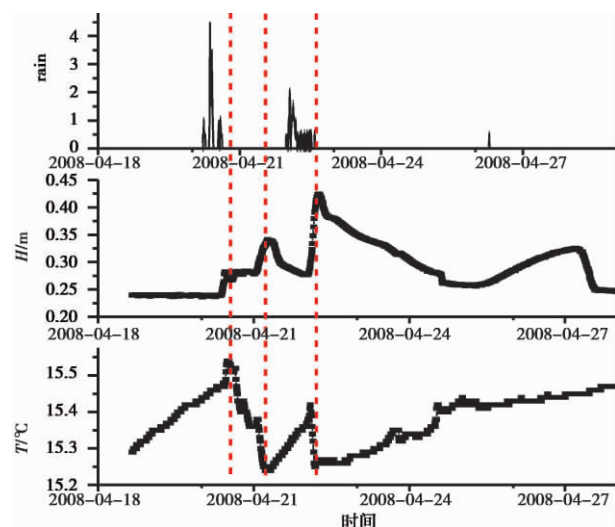


图2 降雨量、水位和水温动态曲线(2008-04-18—28)

Fig. 2 Waterlevel and watertemperature curve of Lanhuagou spring in Nanping country

据图2, 对应2场降雨兰花沟表层喀斯特泉堰口水位形成3个滞后水位峰, 第1、2个水位峰滞后第1场降雨时间分别约7 h、15 h, 第3个水位峰滞后第2场降雨时间仅约为4 h, 表明表层喀斯特带对降雨有比较快速的响应。但两场降雨却形成3个水位峰, 这可能是因为4月, 兰花沟泉上覆水稻田正在进行大面积小秧育苗, 水稻田水位低, 对大气降水有一定的调蓄作用, 所以水位缓慢增长, 并出现3个水位峰。

3.1.2 水化学动态

图3表示兰花沟泉从2008-04-18—28的pH、电导率、 P_{CO_2} 、 SIc 变化曲线。对应降雨量-水位峰, 发现在第1场降雨时, 对应表层喀斯特泉存在pH升高, 电导率降低、 P_{CO_2} 降低, 方解石饱和指数(SIc)升高, 这可能是因为降雨的“活塞效应”。在相对集中降雨26.5 mm条件下, 大量雨水在短时间内, 进入表层喀斯特含水层, 产生巨大的压力, 这种压力促使在原有含水介质中的喀斯特水快速流出含水层, 含水层的水由原来相对封闭的系统, 快速步入开放系统, 外界压力降低, 造成水中大量 CO_2 逸出, P_{CO_2} 降低, SIc 升高。但从图2发现水温曲线在雨前

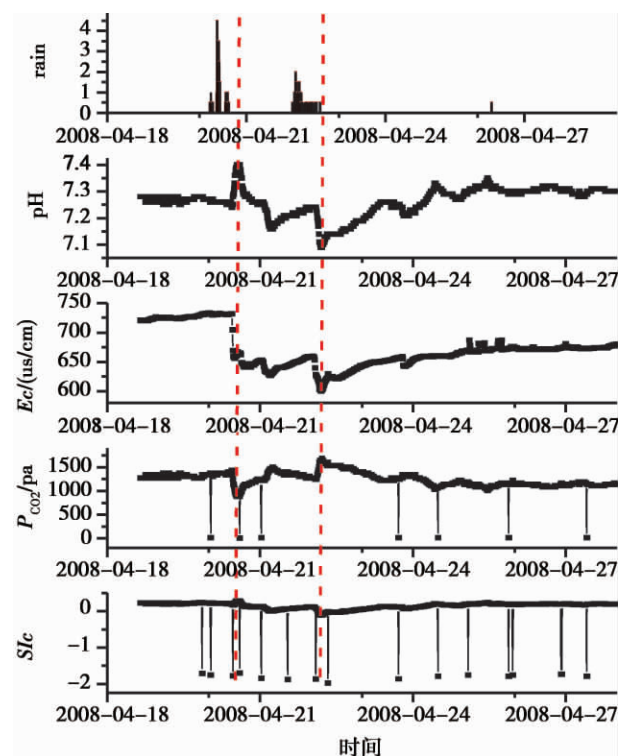


图3 兰花沟泉水水化学动态曲线(2008-04-18—28)

Fig. 3 Hydro-chemical variation curve of Lanhuagou spring in Nanping country

持续上升,雨后出现短暂的升高,这可能因为:一方面整个兰花沟地区气温开始整体回升,步入夏季,造成兰花沟泉水温的升高;另一方面由于兰花沟水稻田在大面积的进行塑料薄膜小秧育苗,其田间水温相对周围要高,在雨水活塞效应下,原有含水介质中的喀斯特水被快速移出,所以出现水温短暂升高。

对应第2场降雨,在降雨作用下,兰花沟泉水位开始上升,水温开始下降,pH降低,电导率降低, P_{CO_2} 升高, SIc 降低。这表明,在强降雨期间,电导率快速下降,pH下降,首先表现为雨水的稀释作用,在雨水强烈稀释下,兰花沟泉水温、pH、电导率、 SIc 迅速下降。而对应水位峰,水中的 P_{CO_2} 分压却增加364 Pa,这是因为喀斯特水化学虽然受稀释作用影响,但还受碳酸盐岩-水- CO_2 相互作用的中的 CO_2 的控制。降雨期间,大量的雨水溶解土壤的 CO_2 ,并将之带入表层喀斯特水系统,因此出现pH降低, P_{CO_2} 升高, SIc 降低。其中溶解于喀斯特水的 CO_2 分压升高,是与土壤中大量 CO_2 密切相关。因为现有研究发现^[16],在降雨期间,观测到土壤 CO_2 普遍出现降低,表明在非降雨期间排放大气的 CO_2 在降雨期间被雨水溶解,进入喀斯特系统,这与刘再华对桂林丫吉CF5钻孔喀斯特管道水观测研究结果相一致^[17];而后电导率升高,表明此时表层喀斯特带的高裂隙率和渗透性开始发挥作用,水动力作用和 CO_2 效应逐渐占主导地位,但从降雨前后的电导率数值变化看,强降雨期间,稀释作用贯穿整个降雨过程。

3.2 第2次强降雨条件下兰花沟泉水化学动态

3.2.1 降雨特征

为避免偶然性,又选择在2008-05-22—06-05进行观测。图4为兰花沟泉这期间的降雨量、水温和水位变化曲线。该次累计降雨量69 mm,平均时段雨强为0.4 mm/15 min。在该次时段内,主要有历时4场相对集中降雨过程:第1场降雨从2008-05-22T5:15开始,14:15结束,累计降雨量26 mm,时段雨强0.67 mm/15 min,最大2 mm/15 min,最小0 mm/15 min;第2场降雨从2008-05-25T12:45开始,14:15结束,累计降雨量5 mm,时段雨强0.36 mm/15 min,最大2 mm/15 min,最小0 mm/15 min;第3场降雨从2008-05-26T13:30开始,到2008-05-27T14:30结束,累计降雨量26 mm,时段雨强0.26 mm/15 min,最大5.5 mm/15 min,最小0 mm/15 min;第4场降雨从2008-05-

28T14:30开始,05-29T0:15结束,累计降雨量12 mm,时段雨强0.3 mm/15 min,最大雨强1.5 mm/15 min,最小雨强0 mm/15 min。该次降雨属于大雨,且接近于暴雨。

对应4场相对集中的降雨过程,兰花沟表层喀斯特泉堰口水位形成4个滞后1~8 h水位高峰,表明表层喀斯特带对降雨有比较快速的响应。但响应时间随着水位升高,又有差别,第1场到第3场降雨,由于地下水流处于相对低水位,响应比较快,大约1~2 h,但随着地下水位继续抬升,以及特殊地质构造,可能有部分地下水流向别处运移,因此,水位响应速度稍慢,大约8 h左右。

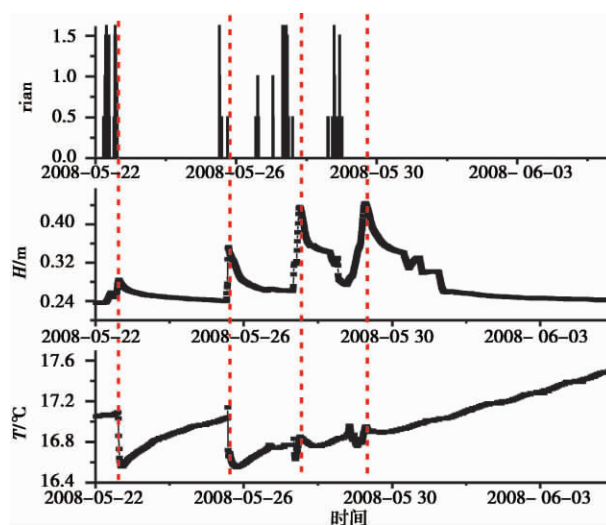


图4 兰花沟泉水位、温度动态曲线(2008-05-22—06-05)

Fig. 4 Water level and water temperature curve of Lanhuagou spring in Nanping country

3.2.2 兰花沟泉水化学动态

图5表示兰花沟泉从2008-05-22—06-05的pH、电导率、 P_{CO_2} 、 SIc 变化曲线。对应降雨量-水位峰,发现在第一场降雨时候,对应表层喀斯特泉存在pH升高,水温降低、电导率降低、 P_{CO_2} 降低,方解石饱和指数(SIc)升高,这是由于降雨的活塞效应造成。在随后的三场降雨,对应降雨量-水位峰,发现3~4 h,表层喀斯特泉的pH、电导率和 SIc 均出现低值, P_{CO_2} 出现峰值,随后pH、电导率和 SIc 迅速上升, P_{CO_2} 开始下降,这主要是因为雨水的稀释和土壤 CO_2 效应共同作用造成。在降雨开始时,首先表现为水的稀释效应,随后,表层喀斯特带的高裂隙率和渗透性开始发挥作用,水的动力作用和 CO_2 效应逐渐占据主导地位。纵观降雨过程电导率数值的变

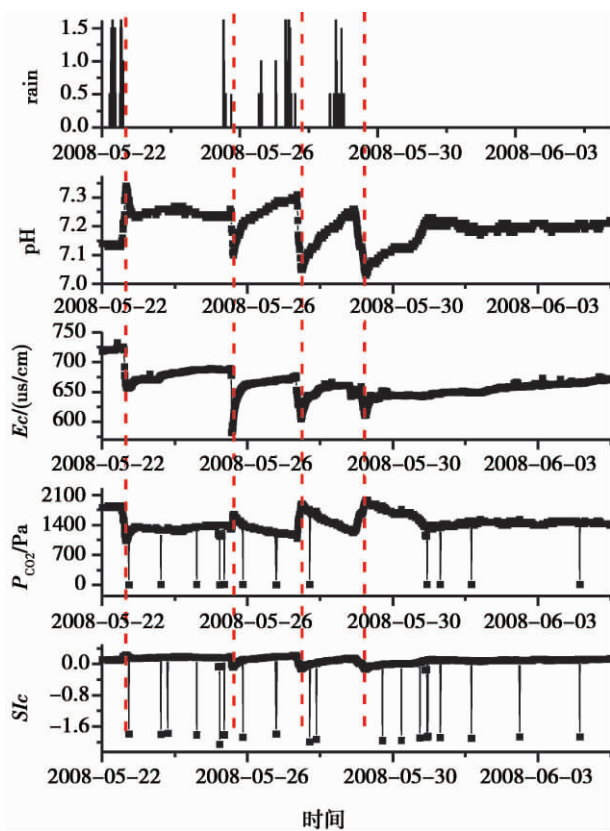


图5 兰花沟泉水水化学动态曲线(2008-05-22—06-05)

Fig. 5 Hydro-chemical variation curve of Lanhuagou spring in Nanping country

化,暴雨期间稀释作用还是贯穿整个降雨过程。

对比图3与图5可以看出,表层喀斯特带泉对降雨条件反应很敏感,响应及时,喀斯特水pH、电导率 P_{CO_2} 和 Sic 都表现变化一致性特征。在第一场降雨时,均表现降雨的活塞效应,出现pH升高,电导率降低, P_{CO_2} 降低, Sic 升高。在随后的几场降雨,也均表现雨水的稀释效应和土壤的 CO_2 效应。稀释作用可贯穿整个降雨过程。但在降雨3~4 h后,表层喀斯特带的高裂隙率和渗透性开始发挥作用,水动力作用和 CO_2 效应逐渐占据主导地位,表现为喀斯特水pH降低,电导率降低, P_{CO_2} 升高, Sic 升高。

同时,根据喀斯特水化学在降雨条件下不同结构的含水介质中的反应^[18],对于裂隙含水介质,碳酸盐岩-水- CO_2 气相互作用占主导,而对于管道含水介质,雨水的稀释作用则成为主控因素,因此兰花沟泉域的含水介质主要以管道为主,为管道型含水介质。

对比图2与图4看出,在2008-04-18—28观测时段,第1场降雨时,水温出现短暂升高,而在2008-05-22—06-05观测时段,第1场降雨时,

水温立刻下降,这可能由兰花沟泉域的水稻田所造成。在04-18—28,兰花沟泉域正进行大面积薄膜育秧,到05-22—06-05时,育秧工作已经完成。

3.3 第3次强降雨条件下兰花沟泉水化学动态

表层喀斯特系统作为一个低温地球化学开放系统,对环境变化相当敏感,为此,在2011-03-20—04-17对兰花沟表层喀斯特泉再次进行观测,以探索在暴雨条件下表层喀斯特泉水化学变化规律。

3.3.1 降雨特征

图6为兰花沟泉2011-03-20—04-17降雨量、水温和水位变化曲线。该次降雨累计降雨量39 mm。在该时段内,主要有1场相对集中的降雨过程:从2011-04-02T4:15开始,13:45结束,累计降雨量为34 mm,时段雨强0.85 mm/15 min,最大3.5 mm/15 min,最小0 mm/15 min。该时段降雨属于暴雨。对应这场相对集中的降雨过程,兰花沟表层喀斯特泉堰口水位形成一个滞后1~3 h水位高峰,表明表层喀斯特含水系统对降雨有比较快速的响应,对应的是水温也开始下降,这是由于降水的稀释效应所造成。从水温曲线整体趋势来看,水温是在升高,这是因为兰花沟开始步入初夏,气温整体升高。

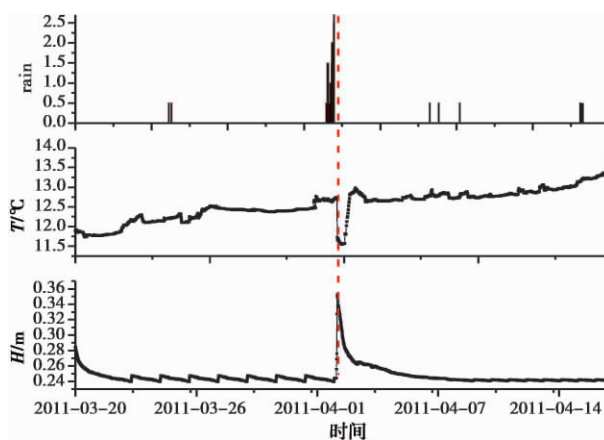


图6 兰花沟泉水位、温度动态曲线(2011-03-20—04-17)

Fig. 6 Waterlevel and watertemperature curve of Lanhuagou spring in Nanping country

3.3.2 水化学动态

图7表示兰花沟泉从2011-03-20—04-17的pH、电导率、 P_{CO_2} 、 Sic 变化曲线。对应降雨量-水位峰,发现在集中降雨34 mm情况下,兰花沟泉相对应存在pH降低,电导率降低, P_{CO_2} 升高, Sic 降低,这是因为降水的稀释效应造成。在短时间大量

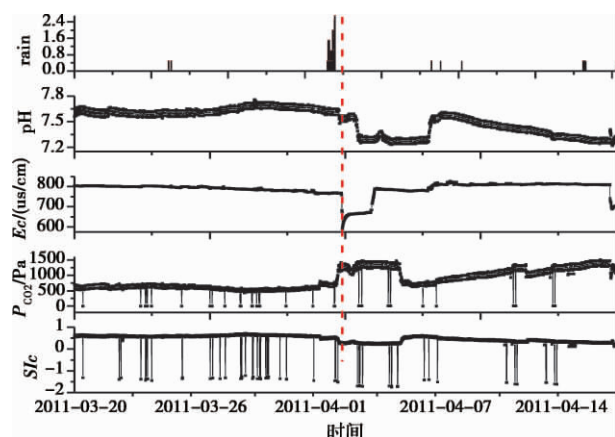


图7 兰花沟泉水水化学动态曲线(2011-03-20—04-17)

Fig. 7 Hydro-chemical variation curve of Lanhuagou spring in Nanping country

集中降雨条件下,降水经过土壤快速进入表层喀斯特含水层,稀释了原有表层喀斯特含水层的喀斯特水,因此造成水温降低,pH降低,电导率降低,Sic降低。对应水位峰,水中 P_{CO_2} 升高,由630.96 Pa增加到1412.54 Pa,增加了781.58 Pa,这也是因为喀斯特水化学虽然受稀释作用影响,但还受碳酸盐岩-水- CO_2 相互作用的中的 CO_2 的控制。暴雨期间,大量雨水溶解土壤的 CO_2 ,并将之带入喀斯特水系统,因此出现pH降低, P_{CO_2} 升高,Sic降低。随后出现pH升高,电导率升高, P_{CO_2} 降低,Sic升高,这是由于表层喀斯特带的高裂隙率和渗透性所致,水动力作用和 CO_2 效应逐渐占主导地位。

对比图3、图5和图7,发现兰花沟表层喀斯特泉pH、电导率、 P_{CO_2} 与Sic在暴雨条件下,均呈现一致性的变化,即pH降低,电导率降低,Sic降低, P_{CO_2} 升高,这表明在暴雨条件下,首先表现为降雨的稀释效应,随后pH值升高,电导率升高,Sic升高, P_{CO_2} 降低,则是水动力作用和 CO_2 开始主导表层喀斯特水化学过程。但兰花沟泉pH值升高,电导率升高,Sic升高和 P_{CO_2} 降低的幅度和所需要的时间,2011-03-20—04-17与2008-04-18—28和2008-05-22—06-05相比有很大的差异。在2008-04-18—28和2008-05-22—06-05观测时段,降雨后,pH、电导率、饱和指数Sic很快上升, P_{CO_2} 很快下降,而在2011-03-20—04-17观测时段,04-02T14:00降雨停止,而pH并未立即上升,而是下降到最低值,并平缓变化,持续到04-07T7:45才开始上升, P_{CO_2} 也04-02T14:30开始上升,到达最大值,然后平缓变化,持续到04-05T19:45开始下降,而

电导率在降雨后立即上升。这可能与兰花沟流域土地利用类型变化有关。2008年,兰花沟流域土地利用类型主要为旱地,旱地占据70%,水田和林地比重分别为10%和20%。2011年,旱地比例下降,为35%,林地不变,为20%,而水田比重增加,达到45%,并且增加的水田主要位于山坡。增加的水田犹如一个小型蓄水池,水田的蓄水在重力作用下,通过土壤壤中流,持续下渗到表层喀斯特含水层,就好比降雨在持续进行,因此,造成pH一直持续降低, P_{CO_2} 一直持续升高。而电导率升高,可能有其他可溶盐在雨水作用下进入到表层喀斯特含水系统。因此,土地利用类型的改变也会影响到表层喀斯特水化学对暴雨的响应。

4 结论

通过从上述3次观测时间段,7场强降雨条件下,兰花沟表层喀斯特泉水化学动态的分析及对比来看,可以得出以下结论:

1. 表层喀斯特带对降雨很敏感,喀斯特水化学明显受降雨条件的影响。对应降雨,在降雨初期,即第一场降雨,喀斯特泉水化学表现出雨水的“活塞效应”。即表层喀斯特泉pH升高,电导率降低, P_{CO_2} 降低,方解石饱和指数(Sic)升高。在降雨的中后期,即紧接第一场降雨后其他场降雨,表现为雨水的稀释效应和土壤的 CO_2 效应,即喀斯特水pH、电导率、水温下降, P_{CO_2} 升高,方解石饱和指数(Sic)降低。这时雨水的稀释作用可贯穿整个降雨过程,但在降雨后3~4h,表层喀斯特带的高裂隙率和渗透性开始发挥作用,水动力作用和 CO_2 效应逐渐占据主导地位。

2. 泉域水稻田利用的方式,会改变泉水水温对第一场降雨的响应。

3. 根据喀斯特水化学在降雨条件下不同结构的含水介质中的反应,兰花沟表层喀斯特带含水介质主要以管道为主,为管道型含水介质。

4. 土地利用类型的改变也会影响到表层喀斯特水化学对暴雨的响应。喀斯特水化学是在碳酸盐岩-水- CO_2 气三相相互作用的开放系统中形成的,要了解喀斯特含水层演化机理和喀斯特含水介质特点,就必须把大气圈、水圈、岩石圈、生物圈(土地利用)等作为一个整体,从水-岩- CO_2 气体三相系统全面考虑,才能解释喀斯特作用的水文地球化

学过程。

本文依据对兰花沟表层喀斯特泉的长期动态监测结果,对比分析了2008年和2011年不同时段、暴雨条件下的兰花沟泉水化学性质特征和规律,为川东槽谷区水土资源利用和石漠化治理奠定了基础,后续问题还有待于进一步探索。

参考文献(References)

- [1] Yuan Daoxian. Aspects on the new round land and resources survey in karst rock desertification areas of south china [J]. *Carsologica Sinica* 2000, 19(2): 103–108 [袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见 [J]. *中国岩溶*, 2000, 19(2): 103–108]
- [2] Yuan Daoxian, Liu Zaihua, Lin Yushi, et al. Chinese karst Dynamic system [M]. Beijing: Geology Press 2002: 196–200 [袁道先, 刘再华, 林玉石, 等. 中国岩溶动力系统 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 196–200]
- [3] Liu Zaihua, Chris GROVES, Yuan Daoxian, et al. Study on the hydrochemical variations caused by the water-rock-gas interaction——an example from the Guilin Karst Experimental Site [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*. 2003, 30(4): 13–18 [刘再华, Chris GROVES, 袁道先, 等. 水-岩-气相互作用引起的水化学动态变化研究: 以桂林岩溶试验场为例 [J]. *水文地质工程地质* 2003, 30(4): 13–18]
- [4] Guo fang, Jiang Guanghui, Pei Jianguo, et al. Assessment on the water qualities of major subterranean rivers in Guangxi and their changing trend [J]. *Carsologica Sinica* 2002, 21(3): 195–201 [郭芳, 姜光辉, 裴建国, 等. 广西主要地下河水质评价及其变化趋势 [J]. *中国岩溶* 2002, 21(3): 195–201]
- [5] Cao Jianhua, Lu Shengli, Yang Desheng, et al. Process of soil and water loss and its control measures in karst regions, Southwestern China. [J] *Science of Soil and Water Conservation* 2011, 9(2): 52–56 [曹建华, 鲁胜力, 杨德生, 等. 西南岩溶区水土流失过程及防治对策 [J]. *中国水土保持科学*. 2011, 9(2): 52–56]
- [6] Yuan Daoxian, Liu Zaihua. Global karst correlation [M]. Beijing, New York: Sciencepress Utrecht: vsp, 1998: 1–23
- [7] Liu Zaihua, Yuan Daoxin. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance [J]. *Geological Review* 2000, 46(3): 324–327 [刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义 [J]. *地质论评* 2000, 46(3): 324–327]
- [8] Yuan Daoxian. Contribution of IGCP379/Karst processes and Carbon Cycle to Global Change [J]. *Episodes*, 1998, 21(3): 198.
- [9] Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(3): 302–308 [蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义 [J]. *地球学报*, 1999, 20(3): 302–308]
- [10] Liu Zaihua, Yuan Daoxian, He Shiyi. Analysis on the variation of hydrochemistry in karst dynamic system [J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(2): 103–108 [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]
- [11] Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Pei Jianguo, et al. Karst ecosystem of southwest china constrained by geology setting [M]. Beijing: Geology Press 2005: 1–10 [曹建华, 袁道先, 裴建国, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统 [M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1–10]
- [12] Zhang Cheng, Yuan Daoxian, Cao Jianhua, et al. An analysis of short-term scale variation of the typical epikarst spring [J]. *Acta Geoscientia Sinica* 2004, 25(4): 467–471 [章程, 袁道先, 曹建华, 等. 典型表层岩溶泉短尺度动态变化规律研究 [J]. *地球学报* 2004, 25(4): 467–471]
- [13] Li Linli, Kuang Mingsheng, Zhang Yuanzhu, et al. Study on diurnal change of physico-chemistry of karst spring of epikarst system [J]. *Advances in Water Science* 2006, 17(2): 222–226 [李林立, 况明生, 张远瞩, 等. 典型表层岩溶泉水短时间尺度动态变化规律 [J]. *水科学进展* 2006, 17(2): 222–226]
- [14] Liu Zaihua, Li Qiang, Sun Hailong, et al. Diurnal variations in hydrochemistry in a travertine-depositing stream at Baishuitai, Yunnan, SW China: Observations and Explanations [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology* 2005, 4(4): 10–14 [刘再华, 李强, 孙海龙, 等. 云南白水台钙华水池中水化学日变化及其生物控制的发现 [J]. *水文地质工程地质* 2005, 4(4): 10–14]
- [15] Wigley T M L, WATSPEC. A computer program for determining the equilibrium of aqueous solutions [J]. *Technical Bulletin*, 1977, 20: 1–46
- [16] Ren Shumei, Zhu Zhongyuan, Zhang Wenping, et al. Engineering hydrology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001: 16–24 [任树梅, 朱仲元, 张文萍, 等. 工程水文学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 16–24]
- [17] Cao Jianhua, Pan Genxing, Yuan Daoxian, et al. Atmospheric CO₂ dynamics in the Guilin karst depression ecosystem and environmental significance [J]. *Geological Review*, 1999, 45(1): 107–108 [曹建华, 潘根兴, 袁道先, 等. 桂林岩溶洼地生态系统中大气 CO₂ 动态及环境意义 [J]. *地质论评*, 1999, 45(1): 107–108]
- [18] Liu Zaihua, Li Qiang, Wang Jinliang, et al. Interpretation of bore-hole scale and vertical hydrochemical variations at the Guilin karst experimental site [J]. *Carsologica Sinica* 2004, 23(3): 171 [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, 23(3): 171]

Storm-scale Hydrochemical Variation in Typical Rock Pendant of Chongqing

SUN Yuxia^{1 2}, LI Linli^{1 3}, WEI Shiqiang²

(1. College of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), School of Geographical, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Karst water chemistry was formed in open system of carbonate rock–water – CO₂ interaction. Under storm rain, chemical change of karst water could not only reflect the type of aquifer, but also soil and water loss and desertification administering in karst area. So based on the storm rain, the study on karst water chemistry was very important for desertification administering and soil and water use in karst area. The thesis aimed at Lanhuagou spring in the Nanping country, Chongqing to understand the hydro-chemical phenomenon that occurs in the water of Epikarstic aquifer. A site's automatic records(CTDP300) was fixed up which could inspect five indexes such as rainfall, pH, conductivity, water temperature, water level. According to the data from automatic records the study was showed that:

1. Epikarst and its Hydro-chemical change are highly sensitive to the rainfall. At the beginning, there are increased pH and SI_c, deduced watertemperature, conductivity and SI_c for the epikarst spring with the rainfall running. Its showed an “piston effect”. It meant that epikarst water was moved out from karst aquifer under great water pressure because amount water from rain water entered karst aquifer in a short time. It leded that P_{CO₂} of karst water depressed and its SI_c inclined.

2. According to experiment it was approved that there are at least two important processes that dominated the hydro-chemical variation. On one hand, it is the dilution of rainwater, and on the other hand, it is the carbonate rock – water – CO₂ interaction. At the beginning of rainstorm, physico-chemical variation of spring is mainly controlled by dilution effect and it can last for the entire rainfall process. But 3 – 4 hours later, hydrodynamic effect and CO₂ effect would occupy the dominant position due to the high fissure rate and permeability in epikarst. Whereas, dilution effect only acts on the earliest period of light rain.

3. Under the rain hydro-chemical change of epikarst spring is different in conduit aquifer and fracture aquifer. The carbonate rock–water – CO₂ interaction is the dominated process in the fracture aquifer. But in the conduit aquifer the dilution of rainwater is the main process. Based on the theory aquifer of Lanhuagou spring is mainly composed of conduits.

4. Transformation of land use type could affect the chemical variety of Epikarst water under rainstorm.

Key words: epikarst spring; rainfall; carbonate rock–water – CO₂ interaction; hydro-chemical change of karst water