

廖春来,罗明明,周宏.鄂西岩溶槽谷区洼地的水位响应特征及产流阈值估算[J].中国岩溶,2020,39(6):802-809.
DOI:10.11932/karst20200602

鄂西岩溶槽谷区洼地的水位响应特征 及产流阈值估算

廖春来^{1,2},罗明明^{1,2},周宏³

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院,武汉 430074; 2. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004; 3. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,武汉 430074)

摘要:以湖北省兴山县黄粮镇刘家坝和龙湾两处岩溶洼地作为研究对象,利用其降雨、水文和土壤水等监测数据,探讨灌入式补给条件下洼地汇流的水位响应特征和产流特点,并基于降雨量和洼地内明渠流量的关系,采用数学拟合方程,估算两处洼地的降雨产流阈值,进而分析了影响产流阈值的因素。结果表明:降雨强度增大,产流阈值减小;土壤前期含水率越大,越有利于坡面产流;落水洞和岩溶泉水位与降雨有较好的同步响应关系,水位变化曲线随雨强大小分别表现出“陡升陡降”和“缓升缓降”的特点;刘家坝和龙湾洼地的产流阈值分别为7.4 mm和10.6 mm。

关键词:岩溶洼地;灌入式补给;水位响应;产流阈值

中图分类号:P641;P333 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)06-0802-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶洼地是由岩溶作用形成的底部平坦、面积较大、利于耕种的封闭负地形,是中国南方岩溶的典型地貌之一。在岩溶洼地,当降雨量达到产流阈值时,形成的地表径流汇入岩溶洼地底部,并通过底部的落水洞以集中灌入的方式进入含水层,即灌入式补给。降雨产流阈值是灌入式补给产生的先决条件,它是指接受降雨的下垫面能够产生地表径流的最小降雨量^[1],产流阈值的大小直接关系到降雨径流调控、土壤侵蚀以及水资源分配等,特别是对降水—地表水—地下水的转化具有重要影响,然而受土壤母质^[2]、土壤前期含水率^[3]、表面粗糙度^[4]、坡度和降雨强度^[5]等因素的影响,坡面产流及水文响应特征的表现各不相同,因此对灌入式补给过程的研究显得尤为重要。

Jain等^[6]在印度 Jodhpur 地区得出土壤干燥和湿润时具有不同的产流阈值;Kampf等^[7]在美国亚利桑那州极端干旱和半干旱两个区域的研究表明,两者的降雨产流阈值分别为3~13 mm和7~16 mm;黄俊等^[8-9]设计室外模拟降雨实验,基于线性回归的方法对不同下垫面的降雨产流阈值进行了计算;姜光辉等^[10]通过连续监测的泉水水文数据,认为表层岩溶带降水补给的产流阈值为12 mm。总体来看,国内外对产流阈值的研究主要是通过建立流量与降雨的线性方程求得,或者是通过监测某些要素的变化而定性分析降雨产流过程。但是实验研究往往较为理想化,难以在实际中应用,而线性回归的方法容易忽略其他因素对产流阈值的影响。另外,在岩溶洼地地区的研究中,关于产流阈值的相关研究案例比较少见。本文通过利用鄂西岩溶槽谷区洼地的实测降雨及水文数据,探讨洼地灌入式补给的水文响应特征,

基金项目:国家自然科学基金(41807199);自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室开放基金(KDL201702);湖北省自然科学基金(2018CFB170);中国地质调查局项目(12120113103800、DD20190824)

第一作者简介:廖春来(1995—),男,硕士研究生,主要从事岩溶水文地质方面的研究。E-mail:liaochunlai@cug.edu.cn。

通信作者:罗明明(1989—),男,副教授,主要从事水文地质方面的教学与科研工作。E-mail:luomingming@cug.edu.cn。

收稿日期:2019-08-09

从宏观上分析降雨和产流的关系,并对降雨—流量数据进行非线性拟合,定量估算产流阈值,分析影响岩溶洼地产流阈值的因素,以期为研究岩溶区水资源评价和水循环规律提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于湖北省兴山县香溪河流域,地处鄂西岩溶槽谷区,区内地势总体北高南低(图1)。香溪河流域属亚热带季风性湿润气候区,年均降水量为900~1 200 mm,年内降水主要集中在夏季,多年平均气温为15.3℃^[11]。区内岩溶地貌形态复杂多样,包括峰丛、溶丘、岩溶洼地、岩溶漏斗等,主体呈现出溶丘洼地地貌类型。岩溶洼地多呈椭圆形或长条状,

规模大小不一,洼地底部可见数米至数十米厚的松散堆积层,并发育落水洞或消水洞,尤以黄粮镇、榛子乡等地最为显著^[12]。

本文选取了研究区内黄粮镇刘家坝洼地和龙湾洼地作为研究对象,洼地面积分别约为20.9 km²和1.83 km²。降雨坡面产流后,雨水通过明渠向洼地底部的落水洞汇聚,进入地下岩溶管道,转化为地下水,最后以岩溶泉的形式向地表排泄。前人的示踪试验结果表明^[13],刘家坝洼地的地下水主要流向白龙泉,龙湾洼地的地下水可分别流向白龙泉和雾龙洞。为了选择一个相对完整的岩溶水系统进行典型案例研究,对应补给区的刘家坝洼地和龙湾洼地,此次在排泄区选择白龙泉作为代表进行对比分析。

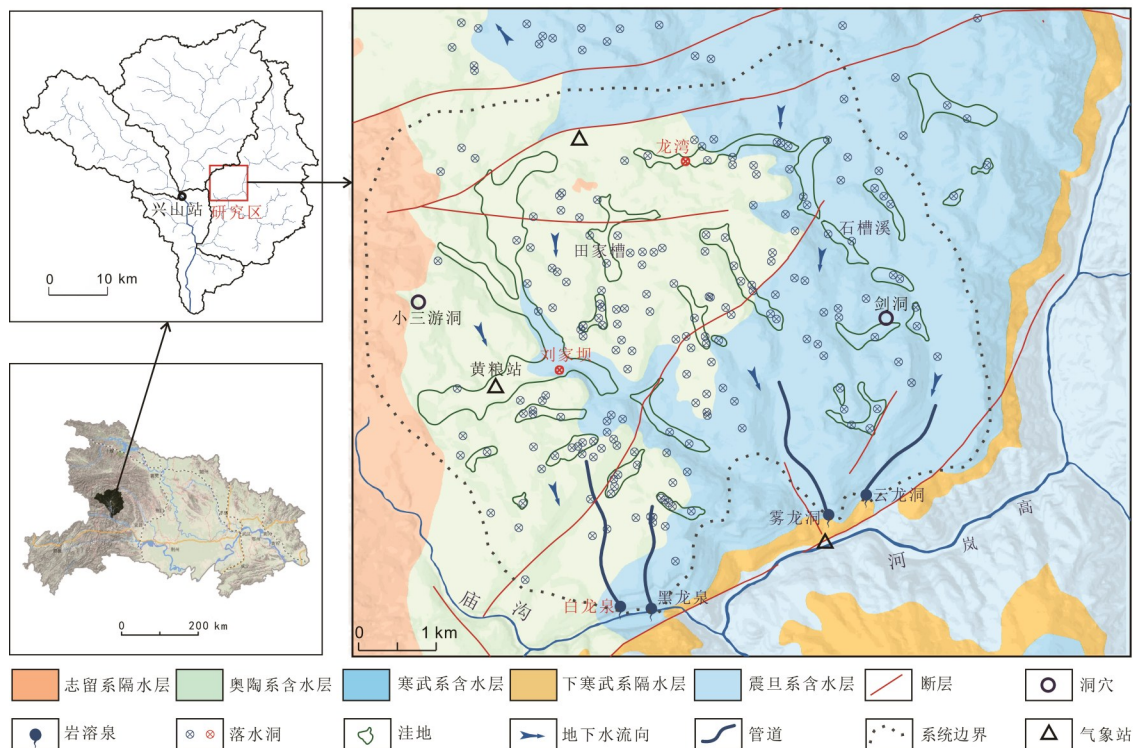


图1 研究区位置及水文地质概况(据参考文献[14]修改)

Fig. 1 Location and hydrogeological survey of the research area (revised according to references[14])

2 研究方法

分别在刘家坝洼地、龙湾洼地的落水洞口明渠和白龙泉布置了水文监测站(测量水位、水温、电导率),数据采集频率为每30分钟一次。在刘家坝洼地和龙湾洼地落水洞附近分别安装了小型雨量计,可自动记录洼地的降雨及气温数据,数据采集频率为每30分钟一次。另外,在刘家坝洼地里布设了土壤

水监测设备,数据采集频率为每10分钟一次,用于监测土壤垂直剖面方向上0.1 m、0.3 m、0.5 m、1.0 m和2.0 m深度处的电导率、含水率及温度。雨量计和水文监测站的数据从2018年1月1日记录至2019年9月27日;土壤水监测设备数据从2018年10月1日记录至2019年5月3日。在监测过程中由于仪器故障或维护,部分时间段数据有所缺失(其中白龙泉缺失2018年6月20日至2018年9月30日的数据;土壤

水监测缺失埋深 0.5 m 处 2019 年 1 月 24 日至 2019 年 5 月 3 日期间的数据)。

获取数据后,挑选研究期内水位响应较为明显的水文过程进行分析。为消除落水洞明渠断面形状的影响,利用谢才—曼宁公式[式(1)]进行水位—流量转换,通过非线性拟合建立降雨量与流量之间的数学关系,并估算产流阈值。

$$Q=AC\sqrt{Ri} \quad (1)$$

$$A=(b+mh)h, \quad C=\frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}},$$

$$R=\frac{(b+mh)h}{b+2h\sqrt{1+m^2}} \quad (2)$$

式中: A 为过水断面面积(m^2); C 为谢才系数($\sqrt{\text{m}}/\text{s}$); R 为水力半径(m); i 为渠底坡度; b 为渠底宽度(m); m 为边坡系数; h 为水深(m); n 为渠道粗糙系数。表 1 中给出了本次计算过程中的相关参数取值,其中渠底宽度、边坡系数和渠底坡度为实地测量和计算值,粗糙系数取经验参考值。

3 结果与讨论

3.1 洼地落水洞与岩溶泉水位响应特征

落水洞与岩溶泉分别位于岩溶水系统的补给区

表 1 谢才—曼宁公式参数取值

Table 1 Parameter value of Chey-Manning formula

位置	渠底宽度/m	边坡系数	渠底坡度	粗糙系数
刘家坝洼地	2.4	0.186	0.001	0.020
龙湾洼地	0.7	0.158	0.010	0.025

和排泄区,在次降雨事件中,两者的水位也会表现出不同的响应特点(图 2a)。不管是落水洞还是岩溶泉,对于间歇性的小雨,水位表现出“缓升缓降”的特点(图 2b),常出现多次微小波动,反映了该种条件下产流速度慢、产流量少,且几次降雨过程可能存在叠加,水位涨幅不明显。当降雨量较大时,水位表现出“陡升陡降”的特点(图 2c),说明水位响应的滞后时间短,水位涨幅较大,而当出现特大暴雨且降雨集中时,水位的响应更加明显,在短时间内骤增(图 2d)。

以龙湾洼地为例,在 2018 年 12 月 21 日的降雨过程中,17 h 内降雨量仅为 7.4 mm,落水洞和白龙泉的滞后时间分别为 3 h 和 4.5 h。2018 年 4 月 22 日,7.5 h 内降雨量达到 23 mm,落水洞和白龙泉水位变化快,滞后时间分别为 0.5 h 和 1.5 h。2019 年 7 月 24 日,研究区出现了特大暴雨,3.5 h 降雨量达到 86.5 mm,落水洞水位响应基本与降雨同步,在降雨 1.5 h

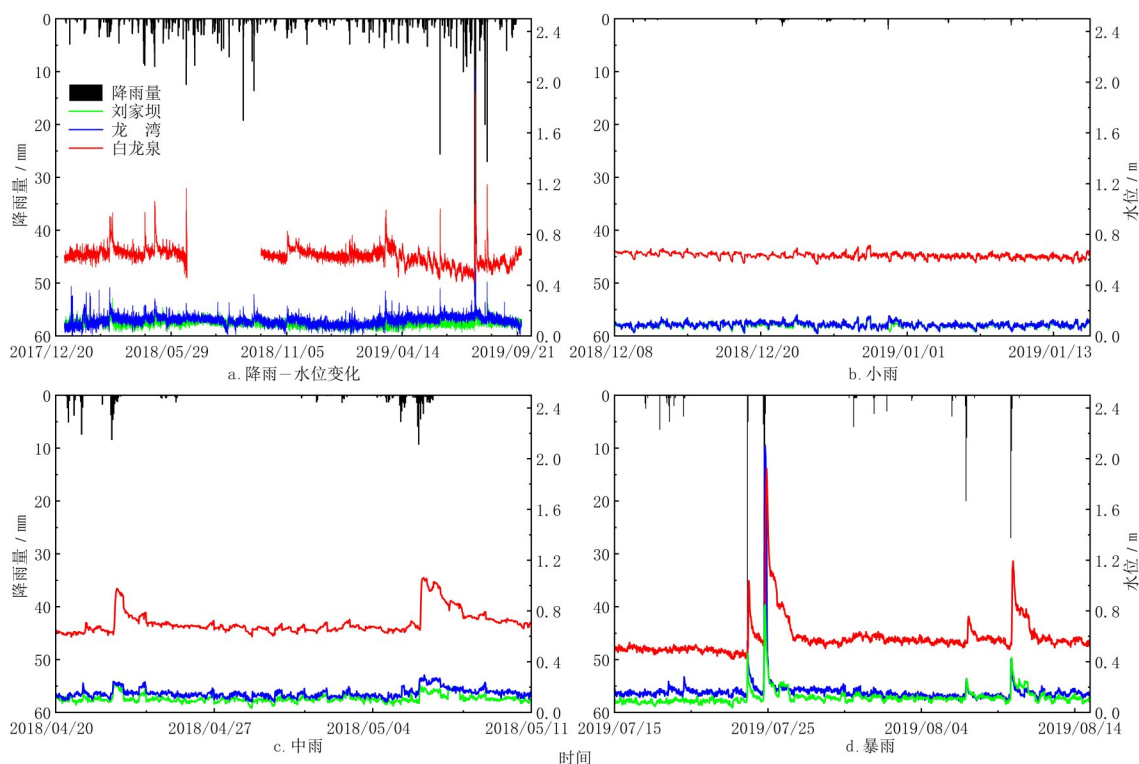


图 2 岩溶洼地及岩溶泉的降雨—水位曲线

Fig. 2 Curve of rainfall-water level in the karst depression and karst spring

后水位达到了峰值,涨幅为 1.96 m,超过了明渠高度(1.6 m),且这一峰值持续了 2 h,表明此时落水洞向地下的排泄能力低于洼地地表径流的补给能力,出现了岩溶内涝现象。

落水洞和岩溶泉的水位变化过程曲线相似,时间上表现得较为一致,但是岩溶泉的水位变化起涨时间稍晚于落水洞,即滞后时间更长。对研究期水位变化较为明显的几次降雨事件进行统计发现(表 2),刘家坝洼地、龙湾洼地落水洞和白龙泉的平均滞后时间分别为 2.3 ± 2.8 h、 4.4 ± 5.8 h 和 5.4 ± 4.3 h,表明刘家坝洼地的产流相对较快,而两个洼地的水位滞后时间均比白龙泉更短,这是因为水流从落水洞补

给进入岩溶含水层,再流至岩溶泉出口,需要一定传输时间。

3.2 洼地产流阈值的估算

落水洞水位变化是洼地产流和集中灌入式补给产生的直接外在表现。当降雨量较小时,雨水大多以补给包气带为主,难以产生坡面流,因此未能形成有效的落水洞补给水源;当降雨量达到或超过产流阈值时,包气带含水率逐渐增大直至饱和,或者超过包气带的入渗能力,此时降雨便以坡面流的形式汇流至落水洞。本文从落水洞明渠水位涨幅出发,统计了不同降雨量下的水位变化(表 2),并通过降雨量与落水洞口汇流量进行非线性拟合计算产流阈值。

表 2 刘家坝洼地、龙湾洼地水位变化值及降雨数据表

Table 2 Water level variations and rainfall data in the Liujiaba and Longwan karst depression

次数	日期	降雨量/mm	雨强/mm·h ⁻¹	滞后时间/h	刘家坝水位变化量/m	刘家坝流量/m ³ ·s ⁻¹	次数	日期	降雨量/mm	雨强/mm·h ⁻¹	滞后时间/h	龙湾水位变化量/m	龙湾流量/m ³ ·s ⁻¹
1	2018/3/4	7.2	2.7	1.0	0.042	0.015	1	2018/3/6	12.6	1.1	0.2	0.036	0.037
2	2018/1/8	8.0	6.7	1.3	0.072	0.076	2	2018/1/8	12.8	0.8	15.0	0.090	0.024
3	2018/2/23	9.8	3.0	0.9	0.066	0.051	3	2018/3/4	14.2	4.3	1.0	0.102	0.050
4	2018/8/1	10.6	3.5	0.5	0.060	0.034	4	2018/3/4	14.6	1.2	1.6	0.138	0.087
5	2018/2/18	12.0	2.4	0.9	0.090	0.057	5	2019/4/9	14.8	1.6	5.0	0.132	0.067
6	2018/3/4	12.4	1.2	0.9	0.168	0.181	6	2019/1/30	15.2	1.4	11.4	0.102	0.058
7	2018/3/6	12.6	1.1	2.2	0.078	0.032	7	2018/4/5	17.6	1.3	0.6	0.186	0.076
8	2019/1/30	13.4	1.2	11.7	0.150	0.097	8	2018/6/30	20.6	2.3	0.1	0.066	0.043
9	2018/4/5	14.0	1.1	1.3	0.198	0.164	9	2019/6/11	22.6	0.7	7.5	0.132	0.081
10	2019/4/9	14.4	1.6	3.0	0.132	0.090	10	2018/4/22	23.0	4.3	0.0	0.090	0.049
11	2018/4/22	27.6	3.7	0.2	0.114	0.104	11	2019/8/6	32.0	10.7	0.5	0.131	0.100
12	2019/8/6	30.0	10.0	1.6	0.152	0.173	12	2018/8/17	33.4	3.7	5.5	0.174	0.123
13	2019/3/22	33.5	0.8	5.5	0.162	0.142	13	2019/3/22	33.5	0.8	22.0	0.246	0.196
14	2018/5/5	35.0	1.6	4.9	0.144	0.131	14	2018/8/1	35.0	8.8	0.8	0.150	0.099
15	2019/8/9	40.0	13.3	0.6	0.327	0.534	15	2018/5/5	39.6	1.8	4.3	0.132	0.126
16	2018/11/4	42.4	1.3	5.7	0.088	0.064	16	2019/8/9	40.0	13.3	0.6	0.274	0.242
17	2018/6/18	45.0	5.5	1.2	0.150	0.151	17	2019/6/5	46.5	11.6	2.0	0.217	0.187
18	2019/6/5	46.5	11.6	1.6	0.280	0.458	18	2018/11/4	47.1	1.4	7.4	0.144	0.093
19	2018/9/20	49.4	2.2	1.5	0.176	0.234	19	2018/6/18	49.4	3.0	0.1	0.120	0.075
20	2019/7/23	57.5	28.8	0.3	0.364	0.670	20	2019/7/23	57.5	28.8	0.5	0.413	0.492
21	2019/7/24	86.5	24.7	0.2	0.757	1.885	21	2018/9/20	62.6	2.5	7.3	0.204	0.184
							22	2019/7/24	86.5	24.7	0.3	1.960	4.467

图 3 中降雨量—流量的变化关系曲线表明,当降雨量较小时,洼地的降雨量与流量之间存在较好的相关关系;当降雨量逐渐增大,落水洞的汇流量表现出两种不同的变化趋势:一是低降雨量的高流

量值,二是强降雨量下的低流量值。两种变化趋势反映了不同降雨事件中的产流条件各不相同,但是这种不同产流条件对小降雨量事件的产流量影响较小。

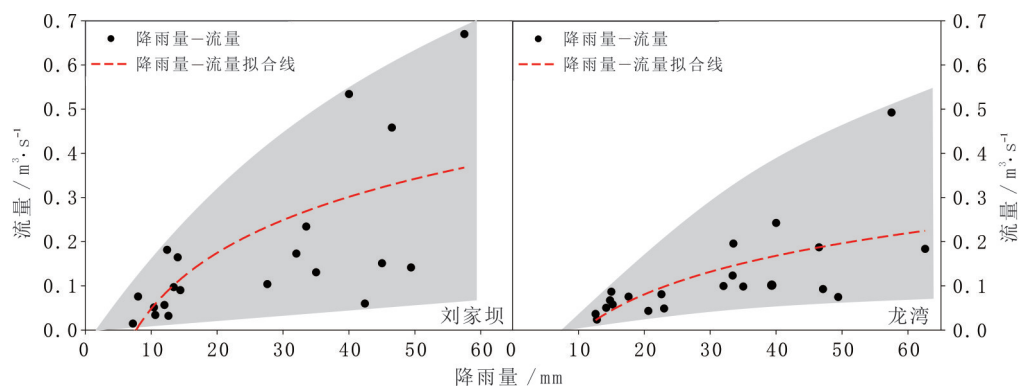


图3 刘家坝洼地、龙湾洼地流量随降雨量的变化关系

Fig. 3 Flow changing with rainfall in the Liujiaba and Longwan karst depression

对降雨量—流量数据分别进行拟合发现,以对数关系拟合最佳;令洼地汇流量为0,基于拟合方程计算此时的降雨量,即得到岩溶洼地的产流阈值(表3),得出刘家坝洼地的产流阈值为7.4 mm,龙湾洼地的产流阈值为10.6 mm。刘家坝洼地的产流阈值较

龙湾洼地更小,这一结果与刘家坝落水洞的水位滞后时间更短有着对应关系,综合表明刘家坝洼地仅需要较小的降雨量便可实现洼地地表产流,进而形成白龙泉的集中灌入式补给。

表3 刘家坝洼地、龙湾洼地产流阈值计算结果

Table 3 Results of runoff threshold calculation in the Liujiaba and Longwan karst depression

	拟合函数	R ²	产流阈值/mm
刘家坝洼地降雨量—流量拟合函数	$y=0.163\ln(x)-0.326\ 4$	0.49	7.4
龙湾洼地降雨量—流量拟合函数	$y=0.163\ln(x)-0.297\ 7$	0.42	10.6

3.3 洼地产流阈值的影响因素

产流阈值估算的结果表明,不同洼地的产流阈值存在差异,主要是降雨强度和入渗能力的不同。对于一次降雨,只有当降雨强度大于同时刻的入渗能力时,才能形成地表径流。降雨强度取决于降雨量和降雨时间等外在条件,同时覆盖植被也可以影响降雨强度,而入渗能力主要是受到了下垫面性质、坡度等洼地内部自身条件的影响。本文结合具体的次降雨事件,主要分析降雨强度和土壤含水率对产流阈值的影响,并简要论述了一些其他因素。

3.3.1 降雨强度

降雨强度可反映降雨对土壤水补给的速度,一般而言,在其他条件相同且保证能产流的情况下,降雨强度越大,对土壤水的补给速度越快,当补给的速度大于土壤水向下运移的速度时,降雨便产生坡面流,即超渗产流。超渗产流理论表明,在雨强大的条件下,越容易形成坡面流,即在降雨量相同时,大降雨强度下产流阈值会相对较小,对应的落水洞水位变化的滞后时间也往往较短。当雨强变小时,产流方式可由超渗产流向蓄满产流转变,这种条件下更

倾向于土壤水分向深层运移,此时土壤“吸收”的水分更多,即在相同的降雨量且能保证产流的情况下,雨强小时需要更多的降雨量才能产流,产流阈值增大,水位变化的滞后时间也随之变长。以刘家坝洼地第16和17次降雨过程为例,第16次降雨量(42.4 mm)和第17次(45.0 mm)相当,但是第17次的雨强更大($5.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}>1.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$),因而其水位变化滞后时间短($1.2\text{ h}<5.7\text{ h}$),水位增幅较大($0.150\text{ m}>0.088\text{ m}$)。这可推测对于第16次的降雨,其雨强较小,降雨整体比较均匀,有利于下垫面的吸收,而第17次降雨强度大,在短时间内可能形成超渗产流,更多的大气降雨形成了地表径流。综合以上分析认为第16次降雨的产流阈值比第17次的大。

3.3.2 土壤含水率

降落到地面的雨水,在重力势能和土壤水负压的驱动下向下渗透。根据土壤水负压与土壤含水率的关系可知,当土壤含水率越小时,水分向下运移的驱动力也越大,降雨便可达到更大的入渗深度,此时若要形成地面产流,则需要消耗更多的降雨量,即产流阈值增大。图4是刘家坝洼地不同深度的土壤含水

率等参数随时间的变化过程,可看出土壤含水率和电导率的变化趋势较为一致,两者表层的变化对降雨响应灵敏,随着深度的增加,其值趋向稳定。当超过 1 m 时含水率几乎不变,电导率仅存在微小的变化,说

明深层土壤仅有少量的“新水”加入。这表明一定深度以下土壤性质受外界激励的影响较小,浅层土壤起到了一定的滤波作用。因此可根据电导率和含水率变化情况来推测降雨的入渗深度及入渗量大小。

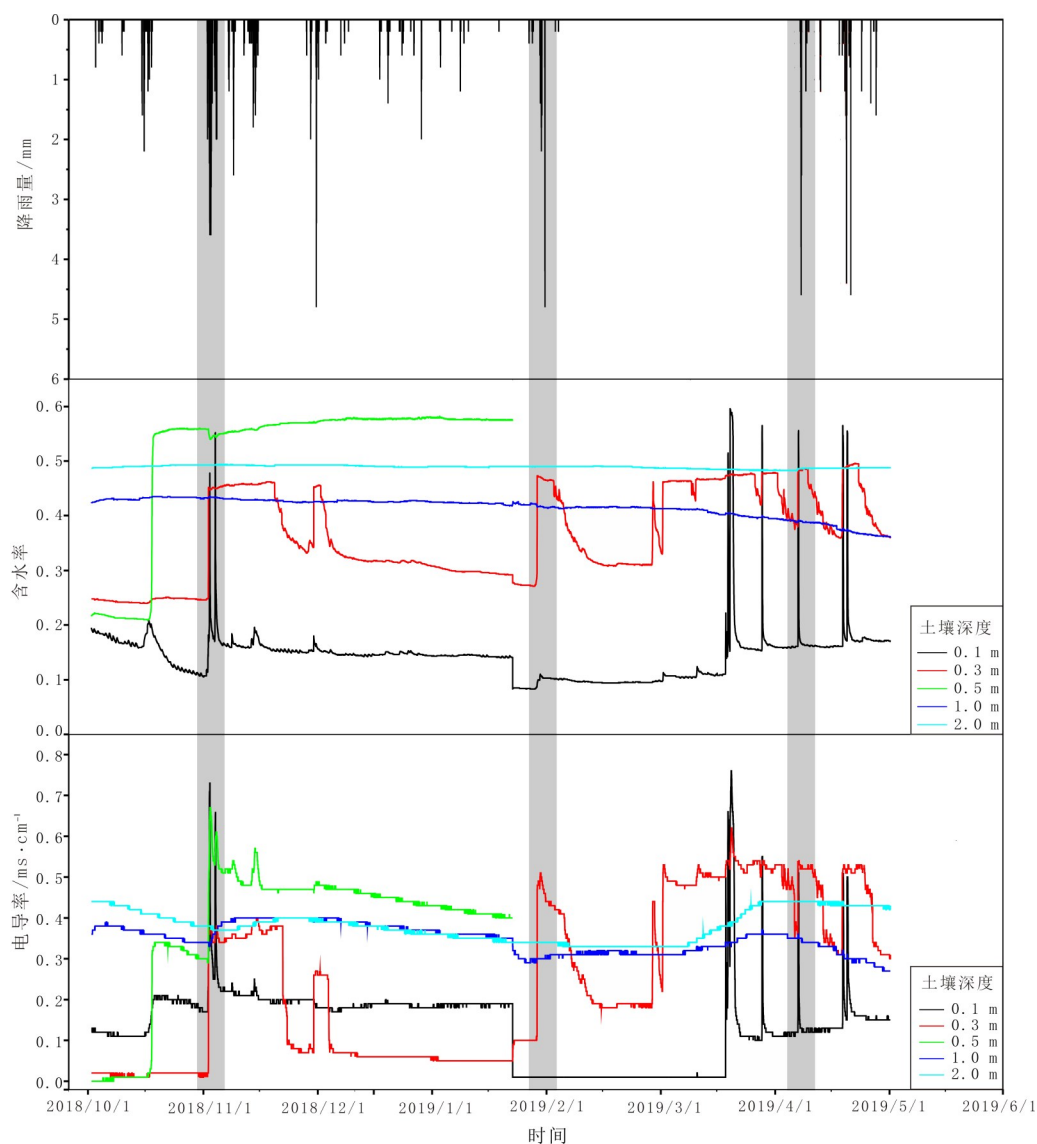


图 4 不同深度下土壤含水率、电导率变化曲线

Fig. 4 Curves of soil moisture and electrical conductivity at different depths

本文分析刘家坝洼地第 8、10 和 16 次降雨过程的含水率和电导率(表 4),3 次降雨事件中,浅层土壤(0~0.3 m)的电导率和含水率变化量均比较大,但是第 16 次降雨的含水率和电导率总体上要高于第 8 次和 10 次降雨。结合图 4,从较深层土壤来看,第 16 次降雨在 1 m 处的电导率有近 $0.1 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的增幅,第 8 次降雨在 1 m 处的电导率基本没有变化,第 10 次降雨的电导率有缓慢的下降趋势,电导率的变化预示着降雨新水的加入,因此推测第 10 和 16 次降雨的入渗

深度至少为 1 m,而第 8 次降雨未入渗到 1 m 处。

就土壤含水率而言,第 16 次的土壤前期含水率在 0.3 m 处比其他两次均更低,说明此时的土壤是相对比较干燥的,可有较大空间接受降雨对其的湿润,因此其含水率的变化量是最大的,这种变化直接导致了降雨量在土壤的耗损较多,而使得地表产流量减少。尽管第 16 次的降雨量为 42 mm,约为其他两次降雨量的 3 倍,但引起的落水洞水位变化并不高,为 0.88 m。再对比第 8 次和第 10 次降雨,二者土壤

表4 不同深度降雨前后土壤含水率及电导率变化量
Table 4 Changes of soil moisture and electric conductivity before and after rainfall at different soil depths

次数	日期	降雨量/ mm	0.1 m深度		0.3 m深度		水位变化 量/m
			前期含水率(变 化量)	前期电导率(变化 量)/ms·cm ⁻¹	前期含水率(变化 量)	前期电导率(变化 量)/ms·cm ⁻¹	
16	2018/11/4	42.4	0.107 (0.445)	0.180 (0.561)	0.246 (0.202)	0.020 (0.351)	0.088
8	2019/1/30	13.4	0.083 (0.027)	0 (0)	0.274 (0.201)	0.100 (0.409)	0.150
10	2019/4/9	14.4	0.161 (0.395)	0.121 (0.390)	0.388 (0.112)	0.380 (0.171)	0.132

前期含水率及含水率变化量都不一样,在0.1 m和0.3 m深度,第10次的前期含水率均比第8次更大,但在0.3 m深度处的变化量小于在0.1 m的变化量,这可能是第10次的降雨向地下迁移的水动力相对不足。然而从水位变幅来看,第10次的变幅相对较小,而其降雨量相对更大,说明总体上降雨在土壤的消耗比第8次大。

通过以上土壤含水率和电导率的分析,可明确降雨在土壤的入渗深度一般不会超过1 m,产流阈值的影响更多的是与浅层0.3 m左右的含水率变化有关。当表层的土壤前期含水率比较低时,可使更多的降雨入渗至土壤,从而增大降雨产流阈值。

3.3.3 其他因素

除了降雨和土壤前期含水率的影响,产流阈值的大小还受到众多其他因素的综合影响,例如,地形

坡度和土壤母质等,但这些因素的影响权重往往较难确定。通过DEM地形坡度分析发现,刘家坝洼地汇水范围的平均坡度比龙湾洼地更小,但汇水范围内的最大坡度相对更大,不同坡度范围的占比也各不相同。从洼地的汇水面积来看,刘家坝洼地的汇水面积远大于龙湾洼地,刘家坝洼地底部土壤层分布的绝对面积较大,但洼地底部的土壤层面积占比相对较小(表5)。这些因素都对洼地产汇流有着重要影响,例如,当坡度更大时,径流重力沿坡面方向的水平分力增大,可加快地表径流速度,使产流时间提前;洼地底部的土壤层母质为渗透性能较小的黏性土时,进入土壤包气带的降雨量占比将会减小,此时也更容易产流。综合而言,岩溶洼地产流阈值还存在着较多的不确定因素,但研究区内两个洼地的产流阈值计算结果总体相近,能够基本反映区内溶丘洼地区的平均降雨产流阈值特征。

表5 刘家坝洼地、龙湾洼地坡度等参数
Table5 Slope and other parameters in the Liujiaba and Longwan karst depression

	地形坡度 S/°						汇水面积/km ²	洼地土壤面积占比	土壤母质
	0~5	5~15	15~35	35~55	最大值	平均值			
刘家坝洼地	17%	57%	24%	2%	50.7	11.6	20.90	5.9%	黏性土
龙湾洼地	16%	48%	32%	4%	41.6	14.0	1.83	6.6%	粉质黏土

4 结 论

(1)鄂西岩溶槽谷区洼地落水洞和岩溶泉的水位受到降雨量和前期土壤含水率的影响,在强降雨的条件下,可以加快坡面产流,水位响应滞后时间短,水位变化大;雨强较小的降雨过程有利于土壤水垂直向下运移,使产流阈值变大;土壤含水率会改变坡面降雨入渗的条件,当前期土壤含水率大时,可提前实现坡面产流,加快对洼地落水洞的补给;

(2)产流阈值是多种因素综合作用的结果,不同条件下的产流阈值各有不同,利用非线性数学拟合

方程估算得出刘家坝洼地和龙湾洼地的平均产流阈值分别为7.4 mm、10.6 mm,这一数值可为鄂西岩溶槽谷区的水资源评价和水循环规律研究等提供参考。

参考文献

[1] 李锋瑞. 干旱农业生态系统研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1998.
[2] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等. 不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J]. 水土保持学报,2018,32(2):34-39.
[3] 艾宁,刘广亮,朱清科,等. 基于土壤前期含水量—降雨耦合关系的陕北黄土坡面产流临界降雨值[J]. 中国水土保持科

- 学, 2018, 16(5): 23-29.
- [4] Mandal U K, Rao K V, Mishra P K, et al. Soil infiltration, runoff and sediment yield from a shallow soil with varied stone cover and intensity of rain [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(4): 435-443.
- [5] 郭星星, 吕春娟, 陈丹, 等. 降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 23-29.
- [6] Jain B L, Singh R P. Run-off as influenced by rainfall characteristics, slope and surface treatment of micro-catchments [J]. *Annals of Arid Zone*, 1980, 19(1/2): 119-125.
- [7] Kampf S K, Faulconer J, Shaw J R, et al. Rainfall Thresholds for Flow Generation in Desert Ephemeral Streams [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(12): 9935-9950.
- [8] 黄俊, 吴普特, 赵西宁. 多参数非线性降雨产流阈值模型试验研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(1): 84-89.
- [9] 李小雁, 龚家栋, 高前兆. 人工集水面临界产流降雨量确定实验研究 [J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 516-522.
- [10] 姜光辉, 吴吉春, 郭芳, 等. 森林覆盖的喀斯特地区表层岩溶带的产流阈值 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 72-77.
- [11] 黄荷, 罗明明, 陈植华, 等. 香溪河流域大气降水稳定氢氧同位素时空分布特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 36-42.
- [12] 罗明明, 周宏, 陈植华. 香溪河流域岩溶水循环规律 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [13] 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.
- [14] Mingming Luo, Zhihua Chen, Hong Zhou, et al. Identifying structure and function of karst aquifer system using multiple field methods in karst trough valley area, South China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 824.

Water level response characteristics and runoff threshold estimation of karst depressions in a valley region, western Hubei Province

LIAO Chunlai^{1,2}, LUO Mingming^{1,2}, ZHOU Hong³

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Institute of Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Liujiaba and Longwan, Huangliang town, Xingshan county, Hubei Province are two karst depressions in valley region with elevations of 886 m and 997 m, and catchment areas 20.9 km² and 1.83 km², respectively. After rainfalls, these karst depressions runoff and transform the surface water into groundwater through the sinkholes which connect to the open channels at the bottom of the depressions, and finally discharge to the Bailong spring. To study such a hydrogeological process, rainfall stations, hydrological monitoring stations and soil-water monitoring equipment were installed in these depressions and a hydrological monitoring station constructed in the Bailong Spring. Rainfall stations record air temperature and rainfall, hydrological stations monitor water level and water temperature in the sinkholes, and soil-water monitoring equipment record the soil moisture content and electrical conductivity. Different methods were used to analyze these observational data, so as to reveal characteristics of water level response and runoff yield and their influencing factors under the condition of concentrated recharge. The results show that, (1) the water level responses in the sinkholes and karst springs have better synchronous relationships with the rainfall, expressing "sudden rise and steep drop" in hydrographs with large rainfall intensity and "slow rise and slow fall" in hydrographs with low rainfall intensity. When very heavy rainfalls happen, karst waterlogging is easy to occur due to the sinkhole's limited drainage ability. On July 24, 2019 after a rainfall storm (86.5 mm in 3.5 hours), the water level (1.96 m) surpassed the open channel height (1.6 m) in the Longwan karst depression; (2) The Chey-Manning formula was used to transfer the water level of the open channel into flow, then the rainfall and the flow of the open channel was fitted by a mathematical equation to estimate the runoff threshold of the Liujiaba and Longwan depressions, yielding values of 7.4 mm and 10.6 mm, respectively; (3) Through the changes of soil moisture content and electrical conductivity before and after the rainfall event, the influencing factors of runoff threshold were analyzed, indicating the rainfall intensity decreases the runoff threshold, and large antecedent soil moisture could promote slope-runoff. In addition, the yield threshold is also related to the topographic slope and soil material of karst depressions, implying the yield threshold is a multi-factor coupling parameter.

Key words karst depression, concentrated recharge, water level response, runoff threshold

(编辑 黄晨晖)