

喀斯特峰丛-洼地小流域洪水滞时及相似性分析

龚轶芳¹, 陈喜^{1,2}, 张志才¹, 张润润¹, 程勤波¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072)

摘要:以两个邻近的典型喀斯特峰丛-洼地小流域(陈旗和长冲)为研究对象,选取26场不同量级流量的洪水过程,对比分析陈旗流域地表、地下两套水系及其与长冲流域洪水的滞时和相似性特征。结果表明:陈旗流域受洼地不透水/弱透水跃迁部位的“门槛效应”影响,地表河与地下河的洪水滞时和形态特征差异明显,地表河洪水涨落迅速,但峰现时间滞后于地下河;流域暴雨洪水涨落形态受地表河控制,与地表河洪水形态相似度高。长冲流域暴雨洪水过程与地表洪水过程相似,随着降雨量的减小,其洪水形态趋向于地下河径流变化特征;流域不透水岩石分布减小了含水层调蓄能力,流域洪水滞留时间短、暴雨洪水响应迅速。

关键词:喀斯特流域;水文过程;相似性;洪水滞时;岩性

中图分类号:P641.134

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)04-0007-06

Analysis of flood lag time and similarity in small karst peak cluster-depression watersheds//GONG Yifang¹, CHEN Xi^{1,2}, ZHANG Zhicai¹, ZHANG Runrun¹, CHENG Qinbo¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Two small adjacent typical karst peak cluster-depression watersheds (Chenqi and Changchong) were chosen as the research objects, and then 26 flood processes with different magnitudes of flow were selected. The characteristics of the lag time and similarity of the surface and subsurface runoff in Chenqi watershed were compared and analyzed with those in Changchong watershed. The results show that due to the soluble rock of the depression and the threshold effect of the impervious or weakly permeable transition at the Chenqi watershed, the characteristics of the lag time and similarity between the surface and underground runoff show obvious differences. The surface runoff fluctuates more rapidly but its peak time lags behind that of the underground runoff. The flood fluctuation shape of the watershed is controlled by the surface river and it has high similarity with the flood process of the surface river. The flood process in the Changchong watershed is similar to the surface river flood process, and as the rainfall decreases, the flood shape tends to change the characteristics of the underground river runoff. The distribution of impervious rocks in the watershed reduces the aquifer's ability to regulate storage. The flood lag time in the watershed is short and the runoff responds quickly to the rainfall.

Key words: karst watershed; hydrological process; similarity; flood lag time; lithology

洪峰流量、洪水历时/滞时、洪水总量等是表征洪水过程的特征指标,其时空变化反映了流域降雨分布和下垫面不均匀性的影响。因此,研究洪水特征指标相似性及其影响因素是分析区域水文规律以及进行无/缺资料地区水文预报的重要基础。单位线法是研究洪水相似性的常用方法,其通过描述洪水过程特征(如峰值对降雨的响应滞时、洪水形状等)受流域内部地形、土壤结构等因素的影响程度^[1-2],定量表述不同流域降雨-径流响应的相似性

程度^[3]。此外,根据同一流域不同场次洪水或不同流域同一场次洪水时间序列之间的“距离”量化其相似性程度,也是分析流域洪水相似性的重要方法,如欧氏距离法、动态时间规整算法,以及基于核函数衍生的距离算法^[4]等。该类方法能从不同洪水场次中寻找特征相似的洪水过程,结合流域下垫面条件(面积、地形、岩性、土壤等)进行相似性分析,揭示洪水特征的影响因素和区域规律。

我国西南喀斯特流域具有地表地下二元水文结

基金项目:国家自然科学基金国际合作重大项目(41571130071);国家自然科学基金(41571020);中央高校业务费项目(2016B04814)

作者简介:龚轶芳(1992—),女,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文统计研究。E-mail:yifgong@163.com

通讯作者:陈喜(1964—),男,教授,博士,主要从事地下水及水文数值模拟研究。E-mail:xichen@hhu.edu.cn

构,受土壤层浅薄、岩溶裂隙发育影响,降雨-径流响应迅速,易形成陡涨陡落的洪水过程,造成洪涝灾害。受高度空间异质性影响,喀斯特地区不同流域、不同场次的洪水特征差异显著。峰丛-洼地型流域岩溶地质结构发育,快速、慢速导水介质并存,洪水过程通常呈现陡急上涨和缓慢退水的特征^[5-7]。若岩溶洼地含水层存在“天然水坝效应”(“门槛效应”)^[8],降雨量较小时,地下径流相对滞缓,但当降雨量大于某一阈值时,快速导水介质中水流作用迅速加强,形成更为陡涨陡落的流量过程。

目前,针对喀斯特峰丛-洼地型流域洪水的研究相对缺乏。本文利用贵州陈旗与长冲两个典型喀斯特小流域多场次实测雨洪资料,定量分析不同场次洪水滞时及洪水过程形状的相似性,结合两个流域水文地质条件,分析峰丛洼地岩性分布对洪水特征的影响机理。

1 流域概况及资料

陈旗和长冲小流域位于贵州普定后寨河试验流域的上游山区(图1,图中岩性: T_2g^1 为黏土岩,杂色中薄层泥岩、泥灰岩; T_2g^{2-1} 为中薄层、灰黄色泥质灰岩; T_2g^{2-2} 为厚层灰岩及白云岩; T_2g^{2-3} 为厚层灰岩、白云质灰岩),流域面积分别为 1 km^2 和 3.2 km^2 。该地区位于亚热带季风气候区,全年温湿多雨,多年平均气温为 $15.1\text{ }^\circ\text{C}$,多年平均降水量为 1315 mm ,雨季集中在6—8月。两个小流域具有贵州高原典型的

峰丛-洼地地貌特征。流域岩性分布如表1所示,平均高程、坡度、地形指数、流域形状系数等信息如表2所示。其中,长冲流域坡度小、地形变化小,其流域形状更狭长、形状系数较小。两个流域土壤类型主要为石灰土,分别占93%与78%。山体植被覆盖以林地、灌草和灌丛为主,土壤厚度较薄;洼地多为农田,土层厚。

表1 陈旗与长冲流域岩性分布

流域	岩层	面积/ km^2	占比/%
陈旗	T_2g^{2-1}	0.5	49.96
	T_2g^{2-2}	0.5	50.04
长冲	T_2g^1	0.732	22.88
	T_2g^{2-1}	0.888	27.74
	T_2g^{2-2}	1.391	43.48
	T_2g^{2-3}	0.189	5.90

两个流域以三叠系关岭组第二段第一、二亚段(T_2g^{2-1} 、 T_2g^{2-2})中薄层、灰黄色泥质灰岩和厚层灰岩以及白云岩为主,岩层中均发育有泥岩夹层,洼地地层岩性差异最大(图1)。陈旗洼地是溶蚀性强的 T_2g^{2-1} ,地下河潜伏于 T_2g^{2-1} 岩层中,常年有水,在出口处受泥岩阻水影响,以泉的形式出露地表;洼地地表渠系底部距地表小于 1 m ,只在雨季暴雨时形成水流。长冲洼地主要以三叠系关岭组第一段(T_2g^1)黏土岩、杂色中薄层泥岩、泥灰岩为主,中间夹薄层硬石膏多层,构成区域性隔水层^[9],流域下游分布 T_2g^{2-2} 岩层,无阻水作用,水流经地下河流出流域。

陈旗流域地表、地下河出口及长冲流域出口有

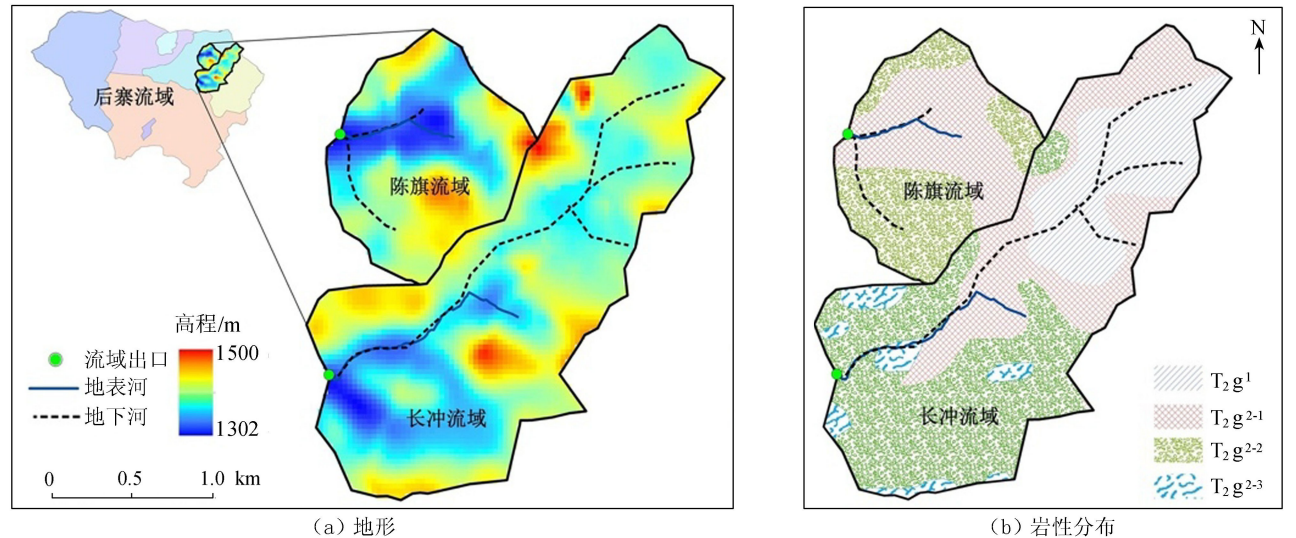


图1 陈旗与长冲流域地形和岩性分布

表2 陈旗与长冲流域地形统计

流域	形状系数	高程				坡度				地形指数			
		最高/m	最低/m	平均/m	C_V	最大/ $^\circ$	最小/ $^\circ$	平均/ $^\circ$	C_V	最大	最小	平均	C_V
陈旗	0.67	1499	1320	1396	0.027	47.12	0.34	18.54	0.563	13.21	2.97	5.97	0.293
长冲	0.49	1500	1302	1392	0.024	55.84	0.34	14.17	0.625	15.64	2.35	6.61	0.27

水位/流量观测点,陈旗流域内建有气象自动监测站用于降雨量观测,观测步长均为 15 min。选取 2016—2018 年不同量级的 26 场典型单峰雨洪过程,场次水流持续时间大于 25 h(表 3)。

2 研究方法

2.1 洪水滞时特征分析方法

将降雨-洪水响应滞时划分为 4 种类型^[10-11]:降雨形心到洪峰流量的时间 T_{LPC} 、降雨形心到流量过程线形心的时间 T_{LC} 、降雨开始到洪峰流量的时间 T_{LP} 及降雨峰值到洪峰流量的时间 T_{LPP} (图 2)。以一次降雨起始时间 t_{w0} 为原点,分别计算降雨峰值出现的时间 t_{wp} 、降雨形心点的时间 t_{wc} 、洪峰流量出现的时间 t_{pk} 、流量过程线形心点的时间 t_{qc} ,作为以上 4 种降雨-洪水响应滞时。

降雨过程形心点 t_{wc} 计算公式为

$$t_{wc} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i t_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中: w_i 为时段 i 的降水量,mm, t_i 为时段 i 的时间

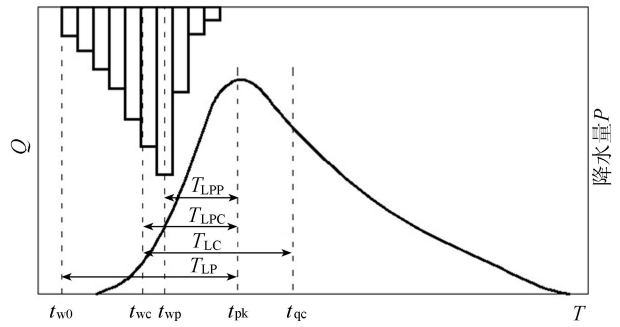


图 2 4 种洪水滞时表述

间隔,h; n 为总时段数。

流量过程形心 t_{qc} 点计算公式为

$$t_{qc} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i t_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

式中: Q_i 为时段 i 的平均流量, m^3/s 。

由此可得:

$$\begin{aligned} T_{LP} &= t_{pk} - t_{w0} \\ T_{LPP} &= t_{pk} - t_{wp} \\ T_{LPC} &= t_{pk} - t_{wc} \\ T_{LC} &= t_{qc} - t_{wc} \end{aligned} \quad (3)$$

表 3 场次洪水信息

洪水 编号	降水量/ mm	初始流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)				洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)				洪水总量/ m^3			
		陈旗			长冲	陈旗			长冲	陈旗			长冲
		地表	地下	合计		地表	地下	合计		地表	地下	合计	
1	24.5	0	0.001	0.001	0	0	0.008	0.008	0.022	0	634	634	243
2	11.0	0	0.009	0.009	0	0	0.069	0.069	0.079	0	3390	3390	1415
3	4.9	0	0.003	0.003	0	0	0.003	0.003	0.044	0	176	176	851
4	27.0	0	0	0	0	0	0.011	0.011	0.146	0	625	625	6813
5	35.8	0	0	0	0.001	0	0.044	0.044	0.494	0	1631	1631	13515
6*	87.6	0	0	0	0.001	0.905	0.151	1.056	5.540	19128.1	6949	26077	107025
7*	31.4	0	0.008	0.008	0.026	0.369	0.122	0.489	1.787	9260.5	8016	17276	52424
8	8.4	0	0.016	0.016	0.056	0	0.065	0.065	2.919	0	4505	4505	70824
9*	15.2	0	0.034	0.034	0.178	0.160	0.100	0.260	0.642	4485.5	8026	12512	42824
10*	50.6	0	0.030	0.030	0.136	0.715	0.137	0.853	4.412	26688.2	12940	39629	166618
11*	67.8	0	0.006	0.006	0.074	1.490	0.151	1.640	5.844	34651.7	11575	46226	226554
12*	24.8	0	0.003	0.003	0.025	0.136	0.087	0.222	0.943	3108.9	6325	9434	59649
13	11.8	0	0.003	0.003	0.034	0	0.045	0.045	0.675	0	2308	2308	18676
14	29.2	0	0.002	0.002	0.007	0	0.062	0.062	0.210	0	4463	4463	13916
15	13.4	0	0.002	0.002	0.005	0	0.013	0.013	0.139	0	596	596	4402
16*	13.2	0	0.021	0.021	0.090	0.166	0.122	0.288	0.910	2898.2	6195	9093	27134
17	33.0	0	0.001	0.001	0.001	0	0.090	0.090	0.444	0	3178	3178	12283
18*	24.6	0	0.003	0.003	0.015	0.095	0.086	0.180	0.518	784.5	3973	4757	16019
19*	25.2	0	0.003	0.003	0.013	0.186	0.125	0.308	1.701	5207.5	6761	11969	44291
20*	20.6	0	0.012	0.012	0.046	0.217	0.124	0.339	0.621	4627.8	6884	11511	22150
21*	32.2	0	0.001	0.001	0.005	0.254	0.124	0.378	1.330	5072.2	6585	11658	43507
22*	25.4	0	0.005	0.005	0.061	0.216	0.126	0.338	1.013	4918.2	8332	13251	43793
23	17.2	0	0.001	0.001	0.008	0	0.011	0.011	0.089	0	624	624	4353
24*	32.0	0	0.001	0.001	0.005	0.103	0.103	0.202	0.619	1070.4	3982	5053	22335
25*	30.4	0	0.013	0.013	0.076	0.303	0.132	0.433	1.325	11097.3	10768	21865	69270
26*	37.0	0	0.025	0.025	0.122	0.480	0.140	0.620	1.742	15180.4	11464	26644	78422

注:* 表示陈旗流域出现地表流量的洪水场次。

上述滞时特征反映降雨、前期土壤含水量、流域坡度和形状、岩性对洪水过程的影响^[12],其中,降雨、流量形心值(t_{wc} 、 t_{qc})反映场次降雨和洪水过程的平均值,更能代表场次洪水全过程对降雨的响应时间,而降雨和流量峰值出现的时间(t_{wp} 、 t_{pk})更侧重于峰值的快速响应时间^[10-11,13]。

2.2 洪水时间序列的相似性分析

基于多尺度平滑内核 (multi-scale smoothing kernel, MUSS) 距离计算不同流量序列相似性程度^[4],其基本步骤如下:

对于长度为 n 的时间序列: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中长度为 k 的子时间序列为: $\mathbf{X}_{j,k} = (x_j, x_{j+1}, \dots, x_{j+k-1})$ ($1 \leq j \leq n-k+1$), 计算 $\mathbf{X}_{j,k}$ 值的总和, 即 $s_{k,j}$:

$$s_{k,j} = \sum_{i=0}^{k-1} x_{j+i} = x_j + x_{j+1} + \dots + x_{j+k-1} \quad (4)$$

S_k 组成新的时间序列:

$$\mathbf{S}_k = (s_{k,1}, s_{k,2}, \dots, s_{k,N-k+1}) \quad (5)$$

对于任意两个时间序列 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, 其对应的上三角矩阵 \mathbf{U}_X 和 \mathbf{U}_Y 为

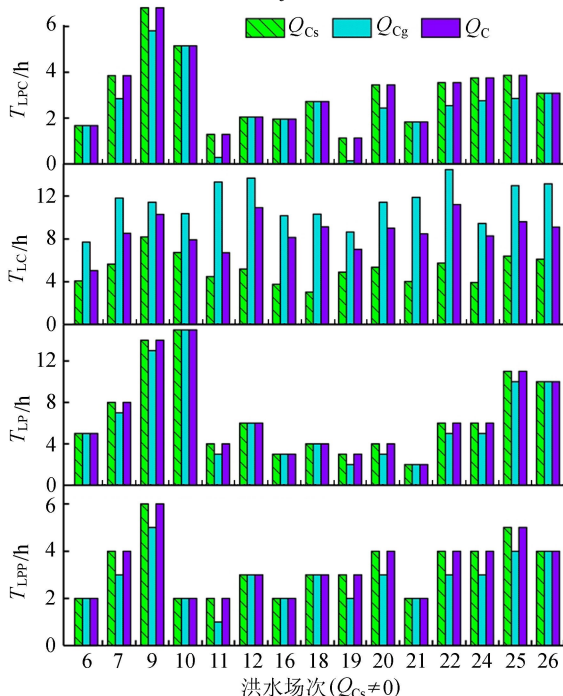
$$\mathbf{U}_X = [U_{X_1}, U_{X_2}, \dots, U_{X_n}] \quad (6)$$

$$\mathbf{U}_Y = [U_{Y_1}, U_{Y_2}, \dots, U_{Y_n}] \quad (7)$$

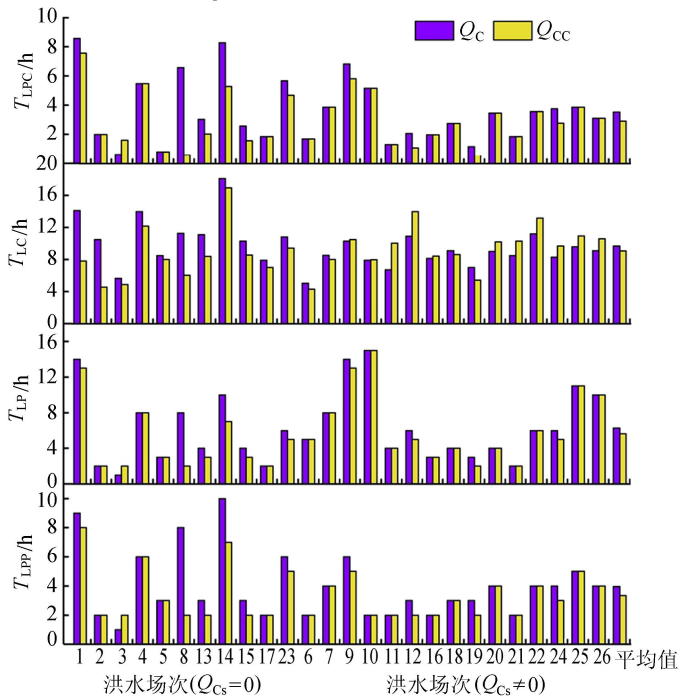
式中: U_{X_i} 和 U_{Y_i} 分别是矩阵 \mathbf{U}_X 和矩阵 \mathbf{U}_Y 的第 i 行, 由元素 $u_{X_{ij}}$ 和元素 $u_{Y_{ij}}$ 组成, 即:

$$u_{X_{ij}} = \begin{cases} s_{X_{ij}} & 1 \leq j \leq n - i + 1 \\ 0 & j > n - i + 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{Y_{ij}} = \begin{cases} s_{Y_{ij}} & 1 \leq j \leq n - i + 1 \\ 0 & j > n - i + 1 \end{cases} \quad (9)$$



(a) 陈旗流域



(b) 长冲流域与陈旗流域对比

图3 陈旗与长冲流域不同场次洪水过程滞时

最后, MUSS 距离 $K(X, Y)$ 被定义为矩阵 \mathbf{U}_X 和矩阵 \mathbf{U}_Y 行之间的点积和, 即:

$$K(X, Y) = \sum_{i=1}^n \langle U_{X_i}, U_{Y_i} \rangle \quad (10)$$

由方程(10)定义的函数是一个核函数, 因为它可以用高维特征空间中的内积 $\varphi(\cdot)$ 来表示, 即:

$$K(X, Y) = \langle \varphi(X), \varphi(Y) \rangle \quad (11)$$

$$X \rightarrow \varphi(X) = (U_{X_1}, U_{X_2}, \dots, U_{X_n}) \quad (12)$$

为消除流域面积差异的影响, 采用 Z-score 标准化方法^[14], 计算实测流量的标准化序列:

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta_x} \quad (13)$$

式中: \bar{x} 为时间序列 X 的平均值, δ_x 为时间序列 X 的标准差。

3 结果分析

3.1 洪水滞时特征分析

陈旗流域地表与地下河洪水形成及其差异显著, 当出现地表河流量 Q_{Cs} 时, 地下河流量和蓄量较大, 如图3中地表河洪峰流量 Q_{Csp} 、洪水总量 W_{Cs} 不等于0与等于0的洪水场次相比, Q_{Cgp} 、 W_{Cs} 显著增大, 说明地表河流量 Q_{Cs} 的形成存在“门槛效应”。由计算的陈旗流域26场洪水滞时指标的统计特征(图3(a))可知, 当地表河流量 $Q_{Cs} \neq 0$ 时:

a. 对比 Q_{Cs} 与地下河流量 Q_{Cg} 洪峰对降雨响应的滞时(图3(a)中 T_{LPC} 、 T_{LP} 、 T_{LPP}), Q_{Cs} 峰现滞时大于或等于 Q_{Cg} 的峰现滞时, 但 Q_{Cs} 降雨形心到流量过

程线形心的时间(T_{LC})值远比 Q_{Cg} 的小,表明陈旗流域“门槛效应”使得地表河流量的形成滞后于地下河,但地表河流量消退速度更快。

b. 对比 Q_{Cs} 与出口总流量 Q_C 的滞时特征,其洪峰滞时 T_{LPC} 、 T_{LP} 、 T_{LPP} 相同, Q_{Cs} 的 T_{LC} 值均比 Q_C 的小,说明 Q_C 峰现时间受 Q_{Cs} 控制,洪水消退受 Q_{Cs} 、 Q_{Cg} 共同作用。

c. 对比 Q_{Cg} 与 Q_C 洪峰滞时(图3(a)), Q_{Cg} 峰现滞时小于或等于 Q_C 的峰现滞时,但 Q_{Cg} 的 T_{LC} 值均比 Q_C 的大,说明当 $Q_{Cs} \neq 0$ 时,陈旗流域地下河流量比总流量峰现时间快,但受地下水含水层调蓄影响,地下河洪水消退时间长。

对比陈旗与长冲流域洪水滞时特征,长冲流域的洪水滞留时间短、洪峰出现时间早(图3中场次洪水滞时平均值),说明长冲流域的洪水响应更迅速,调蓄能力较弱。然而,控制消退过程的 T_{LC} 值受流域洪水量级大小影响,低水时($Q_{Cs} = 0$), Q_C 比长冲流域出口总流量 Q_{CC} 的滞时大,高水时($Q_{Cs} \neq 0$)则相反(图3(b))。结果表明,低水时陈旗流域“门槛效应”使得洪水消退时间延长,高水时陈旗流域“门槛效应”消失,受地表河流量成分快速消退影响,洪水消退比长冲流域快。

3.2 洪水相似性特征分析

在对上述两个流域的场次洪水过程标准化(式(13))后,采用式(4)~(12)计算 Q_{Cs} 、 Q_{Cg} 、 Q_C 之间,及他们与 Q_{CC} 之间的 MUSS 距离(图4),分析不同雨洪过程的相似程度,得出如下结论:

a. Q_{Cs} 、 Q_{Cg} 、 Q_C 之间相似性分析结果表明(图4(a)),对于 $Q_{Cs} \neq 0$ 的洪水场次, Q_{Cs} 与 Q_{Cg} 之间的 MUSS 距离最大, Q_{Cs} 与 Q_C 之间的 MUSS 距离最小。说明该流域地表河与地下河受不同调蓄作用影响,其洪水形态相似度低; Q_C 涨落形态受 Q_{Cs} 控制,其洪水形态相似度高。

b. Q_{CC} 与 Q_{Cs} 、 Q_{Cg} 、 Q_C 之间的相似性分析结果表明(图4(b)),总体上, Q_{CC} 与 Q_{Cs} 的 MUSS 距离最小, Q_{CC} 与 Q_{Cg} 的 MUSS 距离最大(图4(b)场次平均值)。但当陈旗流域地表河洪量 W_{Cs} 占总洪量 W_C 的比值低时(如 $W_{Cs}/W_C < 0.5$ 的第9、12、18与24场次洪水), Q_{CC} 与 Q_{Cs} 之间比 Q_{CC} 与 Q_{Cg} 之间的 MUSS 距离大,即 Q_{CC} 与 Q_{Cg} 的洪水形态更相似。因此,长冲流域洪水与涨落快速的陈旗流域地表洪水更相似,但随着地表水占比降低,洪水形态趋向于地下河洪水特征。

3.3 洪水特征的影响因素分析

由图1可知,两个流域形状和洼地岩性存在较大差异。流域形状越接近圆形(形状系数越接近1),降

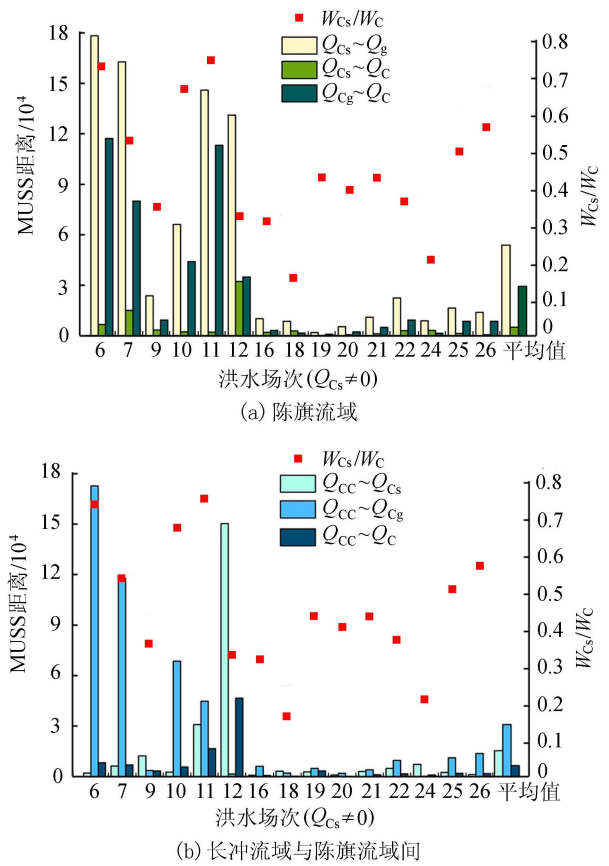


图4 陈旗与长冲流域不同场次洪水过程的 MUSS 距离

雨径流更容易向干流集中,产生较大的洪峰流量,洪峰滞时也相应较小^[15-16]。陈旗流域形状系数(0.67)大于长冲流域(0.49)(表1)、汇流长度短(图1),但陈旗流域的洪水过程滞时较长(图3(b)),表明流域形状不是两个流域洪水特征的控制因素。根据流域岩溶地质结构特征(图1和表1),陈旗流域洼地(以 T_2g^2 为主)灰岩溶解率大,漏斗、落水洞等发育,蓄水能力强,但出口处存在的不透水或弱透水跃迁部位,在含水层水位较低时阻碍水流排泄^[17],从而产生“门槛效应”,滞缓地下水流。因此,陈旗流域低水时洪水平缓(图3(b)中 Q_C 的4种滞时特征值大)。而长冲流域洼地出露地层 T_2g^1 占流域面积的46%,主要为不透水(弱透水)岩层^[18],洼地含水层浅、调蓄能力弱,洪水滞留时间短、洪峰出现时间早,与陈旗地表洪水特征相似性更大。

4 结论

a. 陈旗流域地表河与地下河受不同调蓄作用影响,地表河洪水滞后于地下河洪水,但受地下水含水层调蓄影响,地下河流量消退速度较慢,地表河与地下河洪水形态相似度低;流域总出口的洪水涨落形态受地表河控制,与地表河洪水形态相似度高。

b. 长冲流域暴雨洪水过程与陈旗流域地表河

洪水过程更相似,洪水滞留时间短、洪峰出现时间早,洪水对降雨响应更迅速;但当降雨量减小,洪水形态趋向于陈旗流域地下河洪水变化特征。

c. 不同流域之间以及同一流域不同洪水过程之间特征的差异反映喀斯特流域岩性空间分布的调蓄作用,陈旗流域洼地溶蚀性强的 T_2g^{2-1} 岩层和出口处阻水岩层形成地下径流“门槛效应”,增长了地下河洪水响应滞留时间,但当地下径流超过门槛阈值时,“门槛效应”消失,流域洪水接近于地表洪水形态。长冲流域下游及出口处 T_2g^{2-2} 岩层,无“门槛效应”,流域洪水滞留时间短、暴雨洪水响应迅速。

参考文献:

[1] 孔凡哲,芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. 地理研究, 2003, 22(6):709-715. (KONG Fanzhe, RUI Xiaofang. Hydrological similarity of watershed based on topographic features [J]. Geographical Research, 2003, 22(6):709-715. (in Chinese))

[2] HARMAN C, SIVAPALAN M. A similarity framework to assess controls on shallow subsurface flow dynamics in hillslopes. [J]. Water Resources Research, 2009, 45(1):206-218.

[3] 刘金涛,宋慧卿,王爱花. 水文相似概念与理论发展探析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2):288-296. (LIU Jintao, SONG Huiqing, WANG Aihua. Analysis of hydrological similarity concepts and theory development [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2):288-296. (in Chinese))

[4] TRONCOSO A, ARIAS M, RIQUELE J C, et al. A multi-scale smoothing kernel for measuring time-series similarity[J]. Neurocomputing, 2015, 167(11):8-17.

[5] 胡松,梁虹,刘善霞. 喀斯特流域洪水研究:以贵州省为例[J]. 水科学与工程技术, 2009(1):36-38. (HU Song, LIANG Hong, LIU Shanxia. Study on floods in karst basins:taking Guizhou Province as an example[J]. Water Science and Engineering Technology, 2009(1):36-38. (in Chinese))

[6] 许波刘,董增川,洪娴. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(2):37-42. (XU Boliu, DONG Zengchuan, HONG Xian. Construction and application of lumped karst hydrological model[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):37-42. (in Chinese))

[7] 石朋,侯爱冰,马欣欣,等. 西南喀斯特流域水循环研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1):69-73. (SHI Peng, HOU Yuanbing, MA Xinxin, et al. Research progress of water cycle in southwest karst basins [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1):69-73. (in Chinese))

[8] 谭明,梁虹. 贵州龙宫水系坡立谷湖群水文地貌结构与功能特征[J]. 湖泊科学, 1995, 7(1):14-20. (TAN Ming,

LIANG Hong. Hydrological and geomorphological structure and functional characteristics of the Poligu Lake group in the Longgong water system of Guizhou Province[J]. Journal of Lake Science, 1995, 7(1):14-20. (in Chinese))

[9] 张乐辰,陈喜,张志才,等. 喀斯特流域水化学特征及水-岩作用分析:以后寨河流域为例[J]. 地球与环境, 2018, 46(2):114-120. (ZHANG Lechen, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, et al. Analysis of water chemistry characteristics and water-rock interaction in karst watershed:a case study of the later Zhaihe River Basin [J]. Earth and Environment, 2018, 46(2):114-120. (in Chinese))

[10] HOOD M J, CLAUEN J C, WARNER G S. Comparison of stormwater lag times for low impact and traditional residential development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(4):1036-1046.

[11] 周敏敏,瞿思敏,石朋,等. 淮河上游大坡岭流域土地利用方式变化引起的流域滞时变化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(2):100-106. (ZHOU Minmin, QU Simin, SHI Peng, et al. Time-delay variation of watershed caused by land use change in the Dapoling Watershed in the upper reaches of the Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(2):100-106 (in Chinese))

[12] MCCUEN R H. Uncertainty analyses of watershed time parameters[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(5):490-498.

[13] GAAL L, SZOLGAY J, KOHNOVA S, et al. Flood timescales: understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology[J]. Water Resources Research, 2012, 48(4):511-531.

[14] 张军. 基于时间序列相似性的数据挖掘方法研究[D]. 南京:东南大学, 2006.

[15] 梁虹,杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统汇流分析:以喀斯特峰丛洼地谷地流域为例[J]. 中国岩溶, 1995(2):186-193. (LIANG Hong, YANG Mingde. Confluence analysis of hydrogeomorphic system in karst basin: a case study of valley basin in karst peak cluster depression [J]. Chinese Journal of Karst, 1995(2):186-193. (in Chinese))

[16] 何毅,蔺彬彬. 基于DEM的流域分割及子流域分类[J]. 人民黄河, 2014, 36(7):25-28. (HE Yi, LIN Binbin. Watershed segmentation and sub-basin classification based on DEM [J]. Yellow River, 2014, 36(7):25-28. (in Chinese))

[17] CHEN X, ZHANG Z, SOULSBY C, et al. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: an integrated approach [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(19):2932-2946.

[18] 章程. 贵州普定后寨地下河流域地下水脆弱性评价与土地利用空间变化的关系[D]. 北京:中国地质科学院, 2003.

(收稿日期:2018-09-16 编辑:郑孝宇)