

中国年洪峰季节性的区域特征

丁晨洋¹, 杨汉波¹, 杨文聪¹, 侯爱中²

(1. 清华大学土木工程学院, 北京 100084; 2. 水利部信息中心, 北京 100053)

摘要:为分析中国各地区易受洪水影响的季节,揭示气候变化对洪水季节性的影响,收集了中国2719个水文站1960—2020年的年最大洪峰数据,采用循环统计方法和聚类分析方法,分析了最大洪峰出现时间的季节规律、空间聚集特征、年际变化规律。结果表明:年最大洪峰发生时间的集中度很高,一般在6—9月,由东南向西北逐渐推迟;根据洪水季节性可以聚类为贵州省和重庆市地区(集群1)、华南地区(集群2)、云南省等地区(集群3)、秦岭淮河以北地区(集群4)4个集群,其中集群2在空间上分布最集中;集群2和集群4的年最大洪峰发生时间分别呈显著推迟和提前趋势,集群1的发生时间基本不变。

关键词:年最大洪峰;洪水季节性;循环统计;聚类分析;区域特征;中国

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0142-07

Regional characteristics of annual flood peak seasonality in China//DING Chenyang¹, YANG Hanbo¹, YANG Wencong¹, HOU Aizhong²(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to determine the flood-prone seasons in various regions of China, and reveal the impact of climate change on flood seasonality, the annual maximum flood peak data of 2719 hydrological stations in China from 1960 to 2020 were collected. The seasonal rules, spatial clustering characteristics, and interannual variation rules of the maximum flood peak occurrence time were analyzed by using cyclic statistical method and cluster analysis method. The results show that the occurrence time of the annual maximum flood peak is highly concentrated, generally from June to September, and gradually delayed from southeast to northwest. According to the flood seasonality, four clusters can be grouped into Guizhou Province and Chongqing (cluster 1), South China (cluster 2), Yunnan Province and other regions (cluster 3), and Qinling Mountains and Huaihe River north (Cluster 4), among which cluster 2 has the most concentrated spatial distribution. The occurrence time of the annual maximum flood peak in cluster 2 and cluster 4 shows a significantly delayed and advanced trend, respectively, while the occurrence time of cluster 1 is basically unchanged.

Key words: annual maximum flood peak; flood seasonality; cyclic statistics; cluster analysis; regional characteristics; China

洪水的季节性可以反映洪水事件在年内发生的规律,揭示洪水发生的季节,为采取洪水应对措施提供依据,对栖息地保护、洪泛平原基础设施和人类社区建设具有重要意义^[1]。目前,洪水季节性的研究重点主要是其与气候变化之间的关系^[2],因为气候变化会影响洪水频率的增减^[3-4]。

关于中国洪水季节性变化及其影响因素的研究较多:Zhang等^[5]分析了我国西北干旱区塔里木河流域洪水的量级、频率和时间变化;Zhang等^[6]利用循环统计方法和修正的Mann-Kendall趋势检测方

法,分析了广东地区洪水季节性及其影响因素。但这些研究仅限于特定区域,只反映了部分区域洪水季节性的变化特征。Yang等^[7]开展了全国范围的研究,揭示了洪水季节性随纬度的变化规律。但区域特征除了纬度,还包括地形等多种因素。Guo等^[8]研究发现,鄱阳湖流域地形对洪水季节性有重要影响;胡畔等^[9-10]研究表明,极端降水和下垫面条件对洪水发生时间具有重要影响。中国气候、地貌等因素多变,洪水成因复杂,不同区域洪水的季节性特征及其影响因素也不尽相同。因此,关于中国洪

基金项目:国家自然科学基金项目(51979140);国家洪水预报平台关键技术研究及应用项目(SKS-2022136)

作者简介:丁晨洋(2000—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:dcy22@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:杨汉波(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yanghanbo@tsinghua.edu.cn

水季节性的区域特征与变化规律及其影响因素,尚有待进一步系统深入研究。

本文基于覆盖中国大部分地区将近 3 000 个水文站的长系列年最大洪峰观测数据,采用循环统计方法和聚类分析方法,开展中国洪水季节性的时空特征以及不同区域的变化趋势研究。

1 研究数据

本文采用年最大洪峰分析洪水的季节性。采用的数据包括各水文站的年最大洪峰及其发生时间,水文站分布如图 1 所示,来自水利部网站 (<http://www.mwr.gov.cn/english/>, last access: 7 May 2020)。图 1(本文地图均基于审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作)中部分水文站位于俄罗斯境内,但控制的流域位于中国境内,因此也加以采用。部分水文站的水文观测值明显受到人为因素的影响,如上游水库的存在使河段的洪水事件频率发生变化^[11],在分析时将这部分流域排除,具体方法是将年最大洪峰流量小于 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 的数据全部剔除;同时,去掉数据长度不超过 10 a 的站点,最后留下 2 719 个水文站。各水文站集水区范围为 $1 \sim 1\,800\,000 \text{ km}^2$,数据长度为 11~61 a。

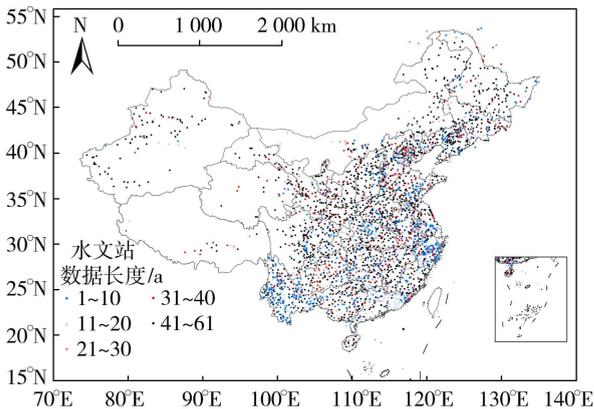


图 1 水文站数据长度空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of data length of hydrographic stations

2 研究方法

2.1 洪水季节性

首先采用圆形均匀性检验^[12]去掉洪水不具季节性变化的水文站。取显著性水平 $\alpha = 0.10$,对应的阈值为 1.620,当某水文站的检验统计量小于 1.620 时认为数据具有圆形均匀性(即不具季节性变化)。然后,对余下的水文站数据采用循环统计方法计算年最大洪峰的平均季节性^[13]。

a. 将第 g 年年最大洪峰发生的日期顺序数 D_g

($D_g = 1$ 表示该水文站年最大洪峰发生的日期为 1 月 1 日, $D_g = m_g$ 表示该水文站年最大洪峰发生的日期为 12 月 31 日, m_g 为第 g 年的天数(闰年为 366 d,其他为 365 d)),转化为平均日的余弦分量 \bar{x} 和正弦分量 \bar{y} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n \cos\left(D_g \frac{2\pi}{m_g}\right) \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n \sin\left(D_g \frac{2\pi}{m_g}\right) \quad (2)$$

式中 n 为研究期间该水文站记录洪峰的年数。

b. 由式(1)和式(2)可以进一步推导出该水文站所有有效年份下年最大洪峰平均发生时间(\bar{D}):

$$\bar{D} = \begin{cases} \uparrow [\tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x})] \bar{m}/2\pi & \bar{x} > 0, \bar{y} \geq 0 \\ \uparrow [\tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x}) + \pi] \bar{m}/2\pi & \bar{x} < 0 \\ \uparrow [\tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x}) + 2\pi] \bar{m}/2\pi & \bar{x} > 0, \bar{y} < 0 \\ \uparrow \bar{m}/4 & \bar{x} = 0, \bar{y} > 0 \\ \uparrow 3\bar{m}/4 & \bar{x} = 0, \bar{y} < 0 \\ \uparrow \text{无法定义} & \bar{x} = 0, \bar{y} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 \bar{m} 为每年平均天数,即 m_g 的均值,取为 365.25 d。

采用最大洪峰发生时间集中度(R)表示最大洪峰发生时间的集中程度:

$$R = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (4)$$

R 的取值范围为 $0 \sim 1$, $R = 0$ 表示各个日期洪水发生的概率相当, $R = 1$ 表示每年的年最大洪峰均发生于同一天。

2.2 聚类分析

因为 k 均值聚类方法受离群值的影响比较小,适用于大型数据集^[14],因此洪水季节性的相似区域划分采用 k 均值聚类方法。该方法以 Z -score 标准化^[15]后得到的年最大洪峰各月的相对月频率作为 12 个聚类变量。

根据轮廓系数(s_i)^[16]与聚类内平方和总和(T_s)两个指标,比较不同聚类数量下的聚类效果,选取最优聚类效果对应的聚类数量。 s_i 表示将某个对象与自己集群的相似程度和与其他集群的相似程度做比较,对于 k 个集群($k > 1$), s_i 为

$$s_i = \frac{b_i - a_i}{\max\{a_i, b_i\}} \quad (5)$$

式中: s_i 为水文站 i 的轮廓系数; a_i 为水文站 i 到其所在集群中其他水文站的平均距离; b_i 为水文站 i 到其所不在的其他集群内的所有站点的平均距离的最小值。 s_i 的取值范围为 $[-1, 1]$,取值越大表示聚类效果越好。最后求所有水文站轮廓系数的平均值

\bar{s} , 以表示所有站点的聚类效果之和。

聚类内平方和度量每个聚类内观测值的变异性, 为表示聚类的整体效果, 计算聚类内平方和总和 T_s 为

$$T_s = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (6)$$

式中: n_j 为集群 j 的水文站数量; Y_{ij} 为集群 j 中的水文站 i 的观测值; \bar{y}_j 为集群 j 中所有水文站观测值的均值。

随着 k 的增加, T_s 减小。综合考虑 \bar{s} 和 T_s , 选取 \bar{s} 尽可能大以及 T_s 的减少幅度尽可能小的 k 值作为聚类数量。

2.3 各聚类季节性的年际变化趋势分析

为揭示洪水季节性年际变化的区域特征, 对聚类后的各集群进行季节性的年际变化趋势分析。某一集群的第 g 年第 l 月发生年最大洪峰的频率 (p_{gl}) 为

$$p_{gl} = o_{gl} / o_g \quad (7)$$

式中: o_{gl} 为第 g 年第 l 月时该集群内出现年最大洪峰的水文站数量; o_g 为第 g 年该集群内出现年最大洪峰的水文站数量。

对于某一集群的第 l 月, 可通过序列 $p_{gl} (g=1, 2, \dots, 61)$ 的趋势分析反映该月的年际变化。考虑到大多数集群的部分月年最大洪峰发生的次数较少, 在进行分析时结果并不显著, 因而仅采用每个聚类出现洪峰次数较多的 5 个月进行趋势分析。此外, 计算各聚类每年的平均洪峰发生月, 并采用 t 检验判断某集群特定月下的年际变化趋势是否显著。

3 结果与分析

3.1 中国洪水的季节性特征

圆形均匀性检验结果显示, 2719 个水文站中有 28 个不具有洪水季节性。余下的 2691 个水文站年最大洪峰平均发生时间和年最大洪峰发生时间集中度如图 2 所示。

\bar{D} 具有明显的空间格局。大部分水文站的年最大洪峰发生在 6—9 月, 发生时间大致呈现由东南向西北逐渐推迟的格局。在长江中下游流域以南的区域, 年最大洪峰通常发生于 6 月。长江中下游地区年最大洪峰通常发生于 7 月。云南省和黄河流域附近年最大洪峰通常发生于 8—9 月。新疆和东北地区年最大洪峰发生时间以 7 月为主。此外, 海南省年最大洪峰发生时间通常为 9 月或 10 月。

年最大洪峰平均发生时间集中度普遍较高, R 均值为 0.787, 标准差为 0.139。仅沿海地区、长江

中下游平原等相对较低。

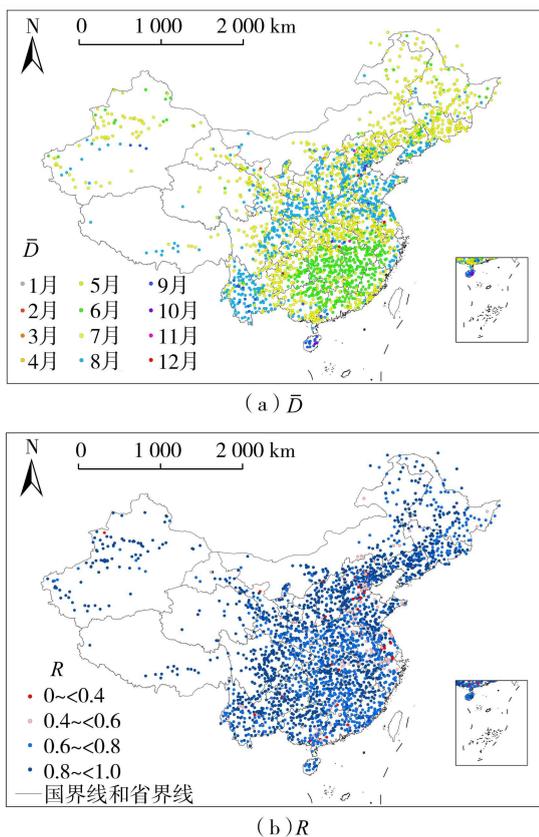


图 2 各水文站年最大洪峰平均发生时间和集中度分布

Fig. 2 Average occurrence time and concentration distribution of annual maximum flood peaks at each hydrological station

3.2 洪水季节性的区域特征

图 3 为 k 为 2~8 时的轮廓系数均值和聚类内平方和总和, k 取 4 或 7 的时候折线下降趋势变缓, 结合考虑较大的轮廓系数, 选择 $k=4$ 进行聚类, 结果如图 4 所示。

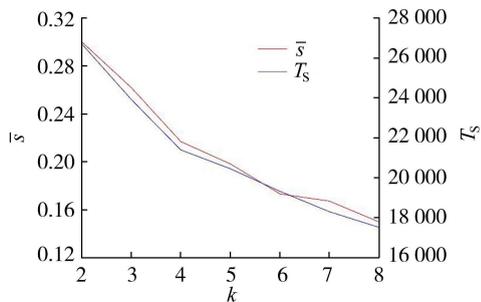


图 3 聚类的数量与 \bar{s} 、 T_s 的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of number of clusters with \bar{s} and T_s

由图 4 可知, 集群 1 (529 个水文站) 主要位于贵州省和重庆市, 年最大洪峰平均发生时间为 6 月中旬, 洪峰在 5—9 月发生的频率较高 (占 93.9%)。集群 2 (391 个水文站) 主要位于华南地区, 年最大洪峰平均发生时间为 5 月底, 洪峰在 4—8 月发生的

频率较高(占 89.1%)。集群 3(517 个水文站)位于云南省等地区,在空间尺度上比较分散,年最大洪峰平均发生时间为 7 月中旬,洪峰在 6—10 月发生的频率较高(占 85.8%)。集群 4 位于秦岭淮河以北地区,包含了最多数量的水文站(1 254 个水文站),年最大洪峰平均发生时间为 7 月中旬,洪峰在 5—9 月发生频率最高(占 95.8%),尤其是 7 月和 8 月洪峰发生的频率高达 74.8%。与图 2(a)相比,聚类后集群的空间一致性更好,尤其是集群 2 多数为最大洪峰平均发生时间为 6 月的水文站。这也表明相较平均发生时间这一时间信息,使用更多的时间信息能使聚类更合理,同一集群里的水文站的相似程度更高。

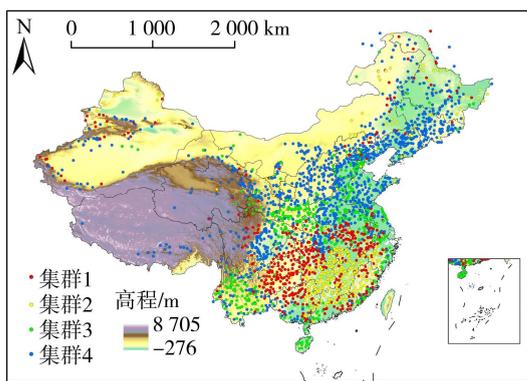


图 4 年最大洪峰的集群空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of clusters of annual maximum flood peaks

虽然地理位置信息没有被作为聚类变量,但从聚类结果看,除集群 3 在空间上呈现为几个分散的聚集群落,其余集群基本符合空间聚集的集群模式(西北地区的站点由于数量关系暂时忽略),而且相较最大洪峰平均发生时间的分布,聚类后集群的集聚性更强。

图 5 中到中心的距离代表 R ,线圈从里向外分别对应 R 从 0 到 1,以 0.2 的间隔表示。由图 5 可知,集群 3 的集中度最低,集群 4 中大多数水文站的平均季节性有较强的时间集中度(高 R 值),且基本在 7 月、8 月的汛期附近。集群 1 和 2 分布较为分散,与其他集群的平均季节性区别明显。

3.3 年最大洪峰的年际变化趋势

各集群年最大洪峰平均发生时间的年际变化表明,集群 1 和集群 2 的年最大洪峰发生时间呈现推迟的趋势,集群 3 和集群 4 年的最大洪峰发生时间呈现提前趋势,且只有集群 2 ($p=0.030$) 和集群 4 ($p=0.042$) 的趋势显著。

由表 1 可知,集群 1 中 6 月和 7 月发生洪峰的概率呈不显著上升趋势;集群 2 中 4 月发生洪峰的

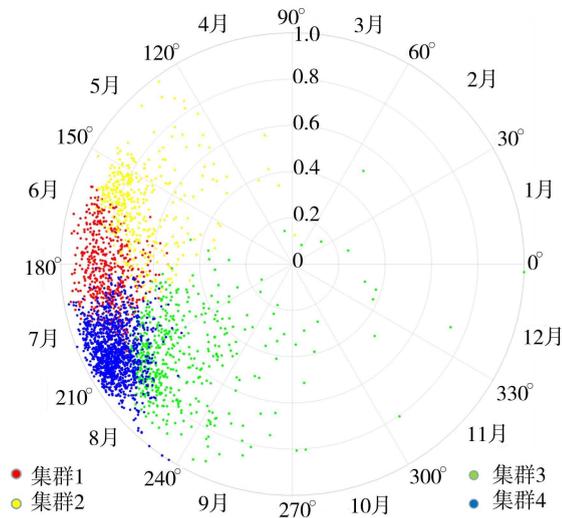


图 5 各水文站洪峰的平均季节性和时间集中度

Fig. 5 Average seasonality and time concentration of flood peaks at each hydrographic station

表 1 各集群特定月下发生年最大洪峰概率年际变化特征
Table 1 Characteristics of the annual maximum flood peak probability of each cluster in a specific month

集群	月份	一元线性回归模型 $y=a+bx$		决定系数	p
		a	b		
1	5	1.54241	-0.00071	0.02759	0.107
	6	-1.51389	0.00093	0.00845	0.225
	7	-0.74966	0.00053	0.00000	0.598
	8	1.29911	-0.00059	0.00964	0.215
	9	-0.41825	0.00024	0	0.496
2	4	3.21816	-0.00156	0.13790	0.002
	5	1.82001	-0.00080	0.00000	0.325
	6	0.38340	-0.00004	0.00000	0.962
	7	-3.09235	0.00163	0.07334	0.021
3	8	0.37353	-0.00014	0	0.770
	6	-1.46987	0.00079	0.03539	0.081
	7	0.34440	-0.00004	0.00000	0.951
	8	2.61083	-0.00120	0.05366	0.042
4	9	0.68930	-0.00025	0.00000	0.702
	10	0.16420	-0.00004	0	0.937
	5	-0.57848	0.00031	0.09940	0.008
	6	-0.91617	0.00051	0.02149	0.135
	7	1.16169	-0.00039	0.00000	0.506
	8	2.50407	-0.00108	0.05005	0.047
	9	-0.34446	0.00021	0	0.465

概率呈显著下降趋势($p=0.002$),7 月发生洪峰的概率呈显著上升趋势($p=0.021$);集群 3 中,8 月发生洪峰的概率呈显著下降趋势($p=0.042$);集群 4 中 5 月发生洪峰的概率呈显著上升趋势($p=0.008$),8 月发生洪峰的概率呈显著下降趋势($p=0.047$)。

4 讨论

4.1 洪水季节性的区域特征及影响因素

本文主要分析了中国年最大洪峰平均发生时间

的特征,识别出具有相似洪水季节性特征的4个集群。这与小范围尺度上的研究^[6]有所不同,流域数量较少的洪水信息不能反映相邻缺失资料流域季节性的特征,而本文采用更多的流域可以了解不同地区甚至是缺失资料流域季节性的特征,发现各地区季节性之间的差异和相似之处。

4个集群具有显著的空间格局,尤其是东部季风区的洪水发生季节大多为特定月,洪水季节性和地理信息有很大的关联性。由图6可知,随着流域面积的变化,流域面积适中的流域(流域面积介于 $10^2 \sim 10^5 \text{ km}^2$ 之间)年最大洪峰平均发生时间以6月居多,流域面积较大的流域(流域面积大于 10^5 km^2)年最大洪峰平均发生时间大多集中于7月、8月。此外流域面积与时间集中度的关系并不明显,这与Hall等^[17]的结论一致,即流域面积等因素对洪水季节性的解释程度较低。发生这种现象的原因一方面可能与大型集水区的空间分布不均匀有关(大型集水区分布在不同地区,地形地貌等因素造成的不确定性较大),另一方面大型集水区的调蓄能力强,雨季时期土壤水饱和时间的延迟等因素可能导致大型流域的洪水滞后。由图4可知,集群1多数分布于云贵高原,和与其相邻的位于四川盆地的集群4、位于东南丘陵地带的集群2有着明显的分界,由此判断出聚类后的站点对相同地形流域划分的效果较好。

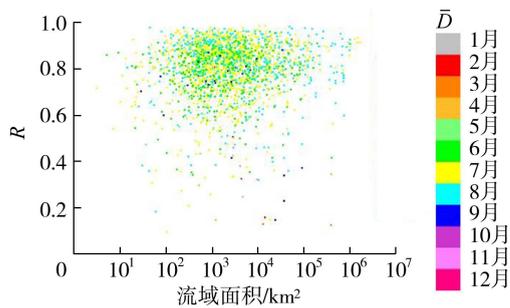


图6 水文站所在流域面积与R的关系

Fig. 6 Relationship between the catchment area where the hydrographic station is located and R

洪水季节性与降水的季节特征有较大的关联。在聚类分析中,发现在空间分布图上出现了大尺度的统一现象,而且检测到该聚类的分布与一些全国性降水研究的边界相似。如,本文中的聚类边界与降水数据的聚类边界相似^[18],尤其降水数据的聚类6与本文集群2有着相似的区域。另外季风在中国呈现西南至东北的区域走向,不仅包括常年季风区,还包括了季风边缘区,季风的降水趋势在空间上呈现由东南向西北递减的趋势^[19]。而洪水发生时间大致是由东南向西北逐渐推迟,大概率是受到东南

季风和西南季风的共同影响。此外,东南沿海部分地区,在9月或10月发生洪水的概率更高,可能是受到当地台风天气的影响。综上所述,洪水季节性受到季风和台风等因素的影响。

土壤水也是影响洪水季节性的重要因素之一。图7由ESA CCI土壤水分数据集计算得到,可以看出年内土壤湿度最大的时间具有一定的空间集聚性,并且与各水文站洪水发生时间有着类似的分布。年最大土壤湿度的发生月略微提前一些,大部分区域的年最大土壤湿度发生在6—9月,这也与流域产流的机制相符合。年最大土壤湿度的发生时间大致呈现由东南向西北逐渐推迟的格局,在长江中下游流域以南的区域,年最大土壤湿度通常发生于6月。该区域附近,尤其是该区域以北位于长江流域附近,年最大土壤湿度通常发生于7月。再往西北方向,在云南省和黄河流域附近,年最大土壤湿度通常发生于8月和9月。热带地区的洪水发生时间正在向年初转移^[2],而大陆西南部的洪水发生时间则向年末转移,这与平均降水量和极端降水量的变化以及热带扩张导致的最大土壤湿度发生时间的变化相一致。与极端降水相比,高土壤湿度和降水的联合作用是更广泛的洪水驱动因素^[20]。这些都可以看出年最大土壤湿度发生时间与洪水发生时间具有较强关联性。

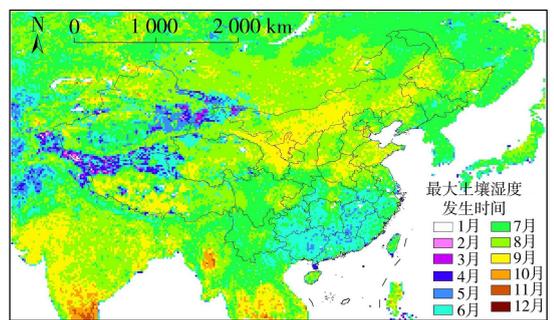


图7 最大土壤湿度发生时间的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of maximum soil moisture occurrence time

除了降水和土壤水等因素的影响外,还有许多因素也影响着洪水季节性特征。地形地貌就是洪水季节性的影响因素之一^[21]。此外,洪水季节性还与融雪等因素相关,降水、融雪和冰川融冰对河流流量的贡献随洪涝类型变化较大,且具有明显的季节性特征^[22-23]。除了这些自然因素外,人为活动也对洪水季节性影响较大,大坝和土地覆盖等人为因素对洪水变化起到重要的影响^[24],另外城市化等人为活动也可能影响洪水的季节性强度,但影响机制尚未明确^[6]。

从研究方法看,本文对研究数据进行了标准化

处理,这有可能会减小各月之间的差异性。从总体来看,本文的区域分布更为零散,误差除了与水文站分布不均、数据缺失有关外,还可能与洪水成因的多样性有关。但是这些因素的影响机制缺乏详细的研究,导致带来的差异可能影响了区域的划分。

4.2 洪水季节性的变化趋势

集群4的整体洪水季节性提前,可能与气候变化有关,因为随着全球气温的持续升高,融雪的时间将提前,进而导致融雪引发洪水的时间也提前^[25],并且在小流域地区,气候的变化对冰塞洪水的发生时间和规模具有显著影响^[26],因此洪水季节性与融雪有关联。另外,年极端降水事件在集群4附近区域夏季为减少趋势^[27],可能直接影响了洪水季节性的变化^[5]。

由图8可知,中国洪水季节性变化趋势在空间上的分布联系较弱,并且呈现显著趋势的水文站分布分散,数量较少,可能是因为各水文站时间序列较短,易受到离群值的影响。秦岭淮河以南大部分地区呈现晚发洪水的趋势,可能与8月下旬和9月登陆的热带气旋有关。秦岭淮河以北大部分地区开始呈现早发洪水的趋势,不仅与热带气旋被秦岭淮河阻隔相关,还与其他因素相关,如更偏北地区的早期洪水、温带天气系统和融雪。另外,华北雨季的降水主要出现在西太平洋副热带高压的西北侧,近年西太平洋副热带高压向北移动时间偏早、位置偏北,造成雨带直接北移至华北黄淮一带。综上,气候变化会导致整个中国的洪水发生时间渐渐趋于一致。

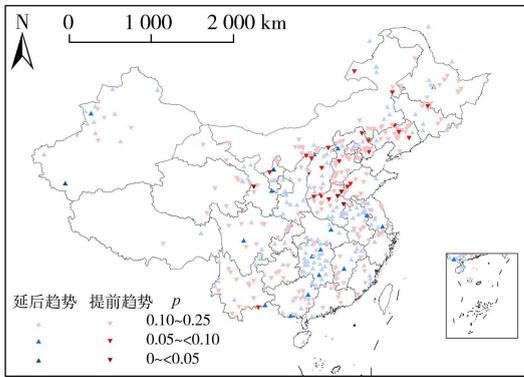


图8 各水文站的季节性趋势

Fig.8 Seasonal trends of each hydrographic station

由图4、图8可知,集群1和集群3水文站的年际变化趋势大多不明显,集群2水文站多数为晚发洪水,集群4中早发洪水的水文站较多,这与表1里的平均趋势吻合较好,验证了聚类后的集群能一定程度上综合反映季节性的年际变化趋势,而不仅仅是反映其地理特征。因此可以使用具有显著季节性趋势特征的集群判断该集群内无资料流域的洪水

季节性趋势。

5 结论

a. 中国各流域的洪水发生时间集中程度较高,即各流域每年发生洪峰的时间较为接近,可以用年最大洪峰发生时间将中国的流域聚类为4个集群,按地理位置大致为贵州省和重庆市地区、华南地区、云南省等地区、秦岭淮河以北地区。

b. 中国的年最大洪峰发生时间具有明显的区域年际变化特征。在秦岭淮河以北地区,年最大洪峰发生时间提前,特别是在8月发生的频率呈下降趋势。在云南省等地区,年最大洪峰在8月发生的频率呈下降趋势,在6月发生的频率呈上升趋势。在华南地区,年最大洪峰发生时间推迟,特别是在4月发生的频率呈下降趋势,在7月发生的频率呈上升趋势($p < 0.05$)。

c. 洪水季节性主要受到降水、土壤水等因素的影响,洪水季节性的变化趋势也与极端降水事件的变化规律和土壤水变化规律相似。另外,融雪、大气环流、土地覆盖等因素也是洪水季节性的重要影响因素。

参考文献:

[1] COLLINS M J. River flood seasonality in the Northeast United States: characterization and trends [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(5): 687-698.

[2] WASKO C, NATHAN R, PEEL M C. Trends in global flood and streamflow timing based on local water year [J]. Water Resource Research, 2020, 56(8): e2020WR027233.

[3] 吴娟,林荷娟,姜桂花,等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 164-170. (WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 164-170. (in Chinese))

[4] HODGKINS G A, WHITFIELD P H, BURN D H, et al. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 704-717.

[5] ZHANG Qiang, GU Xihui, SINGH V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River basin, China: changes, causes and implications [J]. Global and Planetary Change, 2016, 139: 44-55.

[6] ZHANG Qiang, GU Xihui, SINGH V P, et al. Timing of floods in southeastern China: seasonal properties and potential causes [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:

- [7] YANG Yixin, YANG Long, CHEN Xiaodong, et al. Climate leads to reversed latitudinal changes in Chinese flood peak timing [J]. *Earth's Future*, 2022, 10 (6): e2022EF002726.
- [8] GUO Hua, HU Qi, JIANG Tong. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1/2/3/4): 106-122.
- [9] 胡畔, 陈波, 史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素 [J]. *地理学报*, 2021, 76(5): 1148-1162. (HU Pan, CHEN Bo, SHI Peijun. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm induced flood disasters in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(5): 1148-1162. (in Chinese))
- [10] 谢志高, 贾文豪, 王霞雨, 等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(6): 128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(6): 128-136. (in Chinese))
- [11] CIPOLLINI S, FIORI A, VOLPI E. A new physically based index to quantify the impact of multiple reservoirs on flood frequency at the catchment scale based on the concept of equivalent reservoir [J]. *Water Resource Research*, 2022, 58(2): e2021WR031470.
- [12] MARDIA K V, JUPP P E. *Directional Statistics* [M]. New York: Wiley, 1999.
- [13] BAYLISS A C, JONES R C. *Peaks-over-threshold flood database: summary statistics and seasonality* [M]. Wallingford: Natural Environment Reserch Council, 1993.
- [14] EVERITT B S, LANDAU S, DANIEL M, et al. *Cluster Analysis* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [15] ESANTO J. Importance of individual variables in the *k*-means algorithm [C] // *Proceedings of the 5th Pacific-Asia Conference on Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Hong Kong: Springer, 2001: 513-518.
- [16] ROUSSEEUW P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1987, 20: 53-65.
- [17] HALL J, BLÖSCHL G. Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(7): 3883-3901.
- [18] 李良伟, 邹斌, 石立坚, 等. 基于机器学习的海表温度对中国降水的预测研究 [J]. *海洋预报*, 2021, 38(3): 29-37. (LI Liangwei, ZOU Bin, SHI Lijian, et al. Prediction of the influence of SST on precipitation in China based on machine learning [J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(3): 29-37. (in Chinese))
- [19] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 1961—2009年中国季风区范围和季风降水变化 [J]. *大气科学*, 2015, 39(4): 722-730. (JIANG Jiang, JIANG Dabang, LIN Yihua. Monsoon area and precipitation over China for 1961-2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(4): 722-730. (in Chinese))
- [20] BERGHUIJS W R, HARRIGAN S, MOLNAR P, et al. The relative importance of different flood-generating mechanisms across Europe [J]. *Water Resource Research*, 2019, 55(6): 4582-4593.
- [21] TANG Yihan, CHEN Xiaohong. Seasonality in a tidal reach: existence, impact and a possible approach for design flood level estimation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136478.
- [22] LIU Yan, LU Xinyu, ZHANG Liancheng, et al. Quantifying rain, snow and glacier meltwater in river discharge during flood events in the Manas River Basin, China [J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(1): 1137-1158.
- [23] 何朝飞, 王晓云, 陈伏龙, 等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(1): 15-21. (HE Chaofei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(1): 15-21. (in Chinese))
- [24] YANG Wencong, YANG Hanbo, YANG Dawen, et al. Causal effects of dams and land cover changes on flood changes in mainland China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(5): 2705-2720.
- [25] TEUTSCHBEIN C, GRABS T, KARLSEN R H, et al. Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region [J]. *Water Resource Research*, 2015, 51(12): 9425-9446.
- [26] CUNDERLIK J M, OUARDA T B M J, BOBÉE B. On the objective identification of flood seasons [J]. *Water Resource Research*, 2004, 40(1): W01520.
- [27] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50a 极端降水事件变化特征的季节性差异 [J]. *大气科学学报*, 2009, 32(6): 744-751. (CHEN Haishan, FAN Sudan, ZHANG Xinhua. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, 32(6): 744-751. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-04-17 编辑: 王芳)