

淮河中上游流域洪水主要类型及其时空分布特征

张永勇¹, 陈秋潭^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:洪水过程相似性挖掘对流域雨洪资源利用、水库防洪调度以及河流生态修复等具有重要的现实意义。论文以淮河中上游流域16个水文站2006—2015年125场洪水过程数据为基础,采用洪水量、时间、变化率和形态等特征指标对完整洪水过程进行了全面刻画,以主成分分析和层次聚类等多元统计分析手段辨识了流域内代表性洪水类型,揭示了各洪水类型的时空分布特征。结果表明:①淮河中上游流域主要有5类代表性洪水类型,分别为长历时且变化剧烈型、多峰长历时型、尖瘦短历时型、矮胖型以及常规型。②从时间分布来看,2006—2015年间洪水类型数量呈现减少趋势,常规型洪水的比例逐渐增大;丰水年份(如2007年)、平水年份(如2006年)的洪水类型较多,而枯水年份(2011—2013年)洪水类型较少,以常规型和矮胖型洪水出现频率居多。③从空间分布来看,源头站点的洪水类型较多,中下游站点的洪水类型比较单一,主要从尖瘦型洪水过程逐渐转变为矮胖型,这与流域内水源涵养能力、工程调蓄能力以及降水多样性等较大的关系。研究可为流域洪水信息挖掘和特征分析等提供参考借鉴,也可为淮河流域洪水的演变特征分析、水库防洪调控和雨洪资源利用等提供决策依据。

关键词:洪水特征;多元统计分析;淮河流域

洪水是径流过程的关键组成部分,对河道形态、水资源利用、污染物迁移转化、河漫滩与河道间物质交换、生物栖息地构成和生物生活史等均有重要的作用^[1-2]。受流域地形地貌、气候条件和人类活动等影响,洪水过程呈现出明显的时空异质性。洪水类型的辨识对流域雨洪资源利用、水库防洪调度、河流生态修复等具有重要的现实意义。

洪水类型的辨识主要是通过信息挖掘和相似性判别,将大量洪水过程样本划分为具有代表性的洪水。多元统计分析、神经网络、投影寻踪、决策树、成因分析、特征属性分析等大量分析方法常用于辨识洪水类型^[3]。多元统计分析、神经网络、投影寻踪、决策树等方法主要利用多个洪水特征指标对洪水过程进行刻画,并采用相似性指标最小为目标对各洪水场次类别进行分类,其中多元统计分析

方法(如层次聚类)具备操作简单、聚类快速等优势,已广泛应用于流域分类^[4-5]、径流情势分类^[2]、洪水分类^[6-7]等研究中;神经网络、投影寻踪则需要通过大量迭代计算,从而获得稳定的分类结果^[8-9];而决策树对使用者实际经验要求较高,需要设定初始的分类标准和类型^[10]。成因分析法从洪水的成因进行分类,如融冰融雪型洪水、暴雨型洪水、冰凌洪水等,但不能从洪水过程方面刻画洪水类型特征^[11-13]。特征属性分析主要是针对洪水类型的某一特征(如洪峰流量、持续时间、季节性、影响范围)进行分类,但不能代表洪水类型的所有特征^[14-16]。

淮河流域是中国7大江河流域之一。受上游山区降雨和来水集中、下游洪泽湖水位顶托等特殊地形以及人类活动影响,淮河流域也是洪涝灾害最频繁、灾情最严重的流域。据统计,平均2~3 a发生一

收稿日期:2019-11-04;修订日期:2020-02-17。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400902);国家自然科学基金项目(41671024)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0400902; National Natural Science Foundation of China, No. 41671024.]

第一作者简介:张永勇(1981—),男,湖北京山人,博士,副研究员,主要从事复杂流域水循环与环境水文学研究。

E-mail: zhangyy003@igsrr.ac.cn

引用格式:张永勇,陈秋潭. 淮河中上游流域洪水主要类型及其时空分布特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 627-635. [Zhang Yongyong, Chen Qiutan. Characteristics of main flood event types and their temporal-spatial variations in the upper and middle reaches of the Huai River Basin. Progress in Geography, 2020, 39(4): 627-635.] DOI: 10.18306/dlxxjz.2020.04.009

次洪水^[17],如1975年8月特大洪水等,对流域居民生命财产等造成巨大的损失。目前,流域洪水特征研究大多局限于洪水量的时空变化规律^[18-19]、洪水发生频率^[20]等方面,并不能全面刻画洪水过程(如历时、形态等)。洪水类型的划分主要是按照影响范围来进行,包括全流域性洪水、大范围暴雨洪水和局部地区暴雨洪水等^[21],尚没有从洪水过程特征指标进行分类的案例。因此,本文以淮河中上游流域16个重点水文站2006—2015年125场洪水过程为基础,采用洪水特征指标对洪水过程进行全面刻画,并以多元统计分析手段辨识流域内代表性洪水类型,分析各类型洪水的时空分布特征。研究可为淮河流域洪水的演变特征分析、水利工程防洪调控和雨洪资源利用等提供决策依据,也可为流域洪水信息挖掘和特征分析等提供参考借鉴。

1 研究思路与方法

1.1 洪水特征指标

Richter等^[22]于1996年正式提出了径流情势的5大主要特征,即径流量、出现时间、频率、历时和变率。随后Poff等^[23]进一步完善了径流情势特征,并提出了自然水流范式理论(Nature flow paradigm)。目前径流情势特征指标已广泛应用于环境流量评估^[24]、闸坝调控和气候变化对径流影响^[25-26]等方面。本文从径流情势的5大类特征指标中筛选洪水相关的指标,共计12个,即洪水量(洪水总量、洪峰

流量)、洪水时间相关的特征(洪水历时、洪峰出现时间)、洪水过程变化率(峰涨峰落速率)和洪水形态指标(变异系数、偏态系数)。这些特征指标能完整刻画各场次洪水过程,并能较好地分辨出各个洪水场次的差异性。另外,为了更好地对比不同场次不同指标之间的差异性,还针对各特征指标均进行了归一化处理。具体指标及其计算见表1。

1.2 洪水类型识别

洪水类型的识别采用主成分分析和层次聚类分析相结合的方法。主成分分析主要是为了消除所选取的洪水特征指标之间的相关性,形成几个独立的指标;层次聚类则是依据独立的指标对所有场次进行相似性判别,筛选特征属性较为类似的几组特征洪水。

(1) 主成分分析

不同洪水特征指标之间可能存在一定的相关关系,如洪水总量和洪峰流量之间。主成分分析方法能够通过正交变换将大量可能存在相关关系的指标转换为独立的几组指标,即降低洪水特征指标的维数,以减少相关性较强的指标对聚类结果的干扰。具体过程如下:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nk} \end{pmatrix} = (A_1, A_2, \dots, A_k) \quad (1)$$

式中: $A_i = (a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ni})^T$ 代表第 i ($i=1, 2, \dots, k$) 个洪水特征指标, k 表示洪水特征指标的个数, n 代表选取洪水场次的个数。本文中 k 为12, n 为125。

表1 用于刻画完整洪水过程的特征指标及其计算公式

Tab.1 Selected flood characteristic metrics and their equations

洪水特征	指标	名称	单位	计算公式	备注
洪水量	洪水总量	R_{sum}	mm	$R_{\text{sum}} = \sum_{t=t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} 86.4Q_t / A$	除以控制流域面积 A (km^2), 以消除流域大小的影响; t_{begin} 和 t_{end} 分别为洪水开始和结束时间(d); Q_t 为日平均流量(m^3/s)
	洪峰流量	Q_{pk_i}	—	$Q_{\text{pk}_i} = q_{\text{pk}_i} / Q_{\text{sum}} \quad (i=1, 2, 3)$	除以洪水总量 Q_{sum} (m^3/s), 以消除量纲的影响; q_{pk_i} 为第 i 大洪峰(m^3/s)
洪水时间	洪水历时	T_{duration}	d	$T_{\text{duration}} = t_{\text{end}} - t_{\text{begin}} + 1$	
	洪峰出现时间	T_{pk_i}	—	$T_{\text{pk}_i} = t_{\text{pk}_i} / T_{\text{duration}} \quad (i=1, 2, 3)$	除以洪水历时, 以消除量纲的影响; t_{pk_i} 为第 i 大洪峰出现时间(d)
变化率	峰涨速率	RQ_{rise}	h^{-1}	$RQ_{\text{rise}} = (q_{\text{pk}_i} - Q_{t_{\text{begin}}}) / [(T_{\text{pk}_i} - t_{\text{begin}} + 1) \cdot Q_{\text{sum}} \cdot 24]$	除以洪水总量, 以消除量纲的影响; $Q_{t_{\text{begin}}}$ 为洪水过程开始时流量(m^3/s)
	峰落速率	RQ_{down}	h^{-1}	$RQ_{\text{down}} = (q_{\text{pk}_i} - Q_{t_{\text{end}}}) / [(t_{\text{end}} - T_{\text{pk}_i} + 1) \cdot Q_{\text{sum}} \cdot 24]$	$Q_{t_{\text{end}}}$ 为洪水过程结束时流量(m^3/s)
洪水形态	偏态系数	CS	—	$CS = \sum_{t=t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} (Q_t - Q_{\text{av}}) / \sigma^3 \cdot N$	Q_{av} 为洪水过程平均流量(m^3/s); N 为洪水过程的观测数; σ 为标准偏差(m^3/s)
	变异系数	CV	—	$CV = \sigma / Q_{\text{av}}$	

为保证所有的主成分相互独立性,其相关矩阵应为对角矩阵,且与系数矩阵相减为0,具体如下:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_p \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

式中: $r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^p (a_{ii} - \bar{a}_i)(a_{ij} - \bar{a}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (a_{ii} - \bar{a}_i)^2 \sum_{j=1}^p (a_{jj} - \bar{a}_j)^2}}$ ($i, j = 1, 2, \dots, p$); 对角矩阵中的 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, p)$ 是矩阵 r_{ij} 的特征值。

本文累积方差的阈值设置为所有指标总方差的90%,筛选其对应的 m 个主成分因子作为独立的指标对洪水特征进行聚类分析。主成分分析在SPSS 19.0版本中实现。

(2) 聚类分析

聚类分析方法能够将多个复杂的数据集合划分为类似的对象组成的几个数据集合,在同一个数据集合中的数据具有很大的相似性,不同集合间的数据差异性较大。本文采用欧氏距离计算主成分之间的相似度,用Ward方法对场次洪水进行层次聚类分析。

聚类结果的评价采用Goodman-Kruskal指标(GKI)、C指标(CI)以及各类别中包含的最小场次数量来决定^[2,27-28]。聚类结果越好,GKI值将越大,而CI值越小;另外,为保证划分类别的代表性,所有类

别包含的场次数量占总场次的比例不小于5%,即6场。聚类分析和效果评估在R Studio 3.4.2版本上实现,其中使用amap程序包进行层次聚类分析,采用fpc程序包实现效果评估。

1.3 研究区概况与数据

淮河流域(111°55'~121°25'E, 30°55'~36°36'N)位于长江流域和黄河流域之间,总面积约为27万km²(图1)。流域多年平均降水量883 mm,多年平均气温14.7℃,降水和气温均呈现出由南向北逐渐递减的趋势,每年的6—9月为汛期,10月至次年5月为非汛期。流域洪涝灾害频发,近2000 a来共发生大洪水350余场^[18]。特别是21世纪以来,已在2001、2003、2007和2009年发生流域性大洪水,流域防洪形势依然严峻。本文以淮河中上游为研究区,选取淮河干流、沙颍河、洪汝河和南部山区水系16个水文站点2006—2015年125场洪水资料进行时空变化特征分析。洪水场次数据来自河南省和安徽省2006—2015年水文年鉴洪水要素摘录。

2 结果与分析

2.1 洪水特征指标降维与场次聚类结果

通过主成分分析,可将所筛选的洪水特征指标降维成6个独立的主成分因子,对应的累计方差达到91.6%(表2)。第一主成分包括的特征指标有最

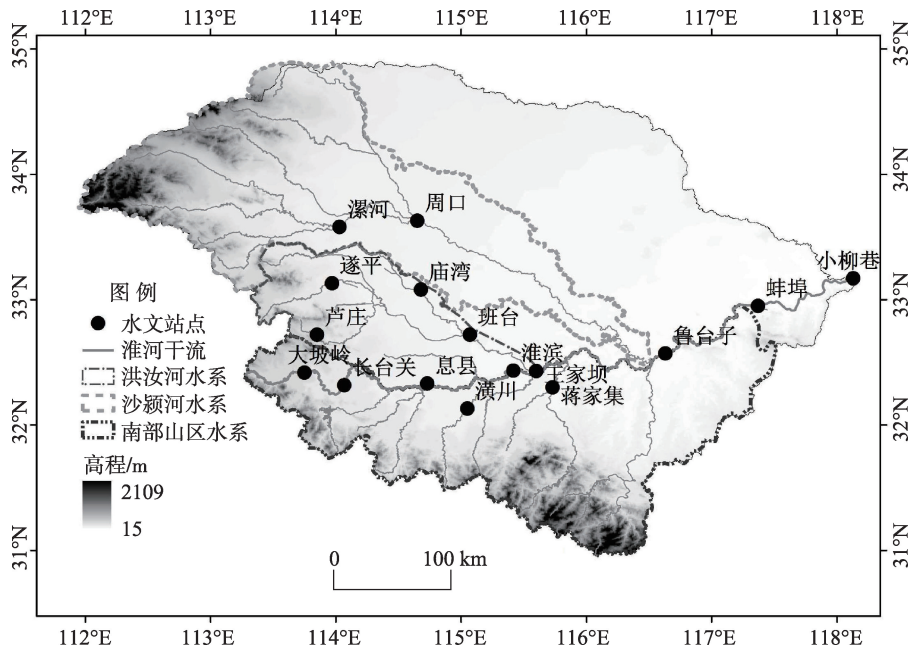


图1 淮河中上游流域区域位置与研究站点分布

Fig.1 Location of the upper and middle Huai River Basin and distribution of selected hydrological stations

大洪峰流量(Q_{pk_1})、峰涨峰落速率(RQ_{rise} 和 RQ_{down})及变异系数(CV),共可解释30.1%的指标变化;第二主成分为洪水总量(R_{sum})、历时($T_{duration}$)和第二大洪峰峰现时间(T_{pk_2})等,共解释16.8%的指标变化;第三主成分为第三大洪峰流量(Q_{pk_3})和峰现时间(T_{pk_3})等,共解释16.7%的指标变化;第四主成分为最大洪峰出现时间(T_{pk_1})等,共解释12.9%的指标变化;第五主成分为第二大洪峰流量(Q_{pk_2})等,共解释8.8%的指标变化;第六主成分也为最大洪峰峰现时间(T_{pk_1})等,共解释6.3%的指标变化。以上6个主成分因子涵盖了所有洪水特征指标的绝大部分信息。

基于6个主成分因子,采用层次聚类分析法对125场次洪水过程进行聚类,聚类结果见图2,不同

洪水类别数量的评估结果见表3。随着洪水类别数量的增加,GKI指数逐渐增加,而CI指数和最小场次占比均逐渐减少。总的来看,125场洪水分为5类不同洪水过程,具有显著的统计意义,其中GKI和CI指数分别为0.76和0.09;而且各类型的场次数量分别为22场(17.6%)、64场(51.2%)、11场(8.8%)、12场(9.6%)和16场(12.8%),均不低于10场,因此,每一类洪水类型均具有较强的代表性。

2.2 各类型的洪水特征识别

从5类代表性洪水类型总量和洪峰流量来看(图3),第1~4类洪水总量都较小,其平均值分别为39.2、67.5、65.2和4.0 mm,特别是第4类洪水总量最小,而第5类洪水总量最大,其平均值为130.5 mm。第1~3类洪峰流量占洪水总量较小,其平均

表2 各主成分对应的洪水特征指标相关系数和各主成分解释的方差

Tab.2 Correlation coefficients among different flood characteristic metrics in different principal components and their corresponding variance

特征指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4	主成分5	主成分6
R_{sum}	-0.47	0.54	-0.38	0.43	-0.23	-0.04
$T_{duration}$	-0.63	0.55	-0.29	-0.10	-0.23	0.07
Q_{pk_1}	0.90	0.13	-0.08	0.37	-0.01	0.04
Q_{pk_2}	-0.17	0.18	0.02	0.07	0.94	0.09
Q_{pk_3}	-0.06	0.44	0.89	0.07	-0.06	-0.03
T_{pk_1}	-0.29	-0.38	0.17	0.58	-0.10	0.58
T_{pk_2}	-0.38	0.66	-0.35	0.30	0.19	0.01
T_{pk_3}	-0.06	0.44	0.89	0.07	-0.06	-0.03
RQ_{rise}	0.72	0.16	-0.10	0.31	0.01	-0.43
RQ_{down}	0.74	0.07	-0.06	0.55	-0.02	0.09
CS	0.59	0.46	-0.13	-0.55	-0.04	0.24
CV	0.71	0.40	-0.09	-0.29	-0.03	0.39
主成分方差/%	30.1	16.8	16.7	12.9	8.8	6.3
累积方差/%				91.6		

注:加粗数字表示每个主成分中特定指标的相关系数。

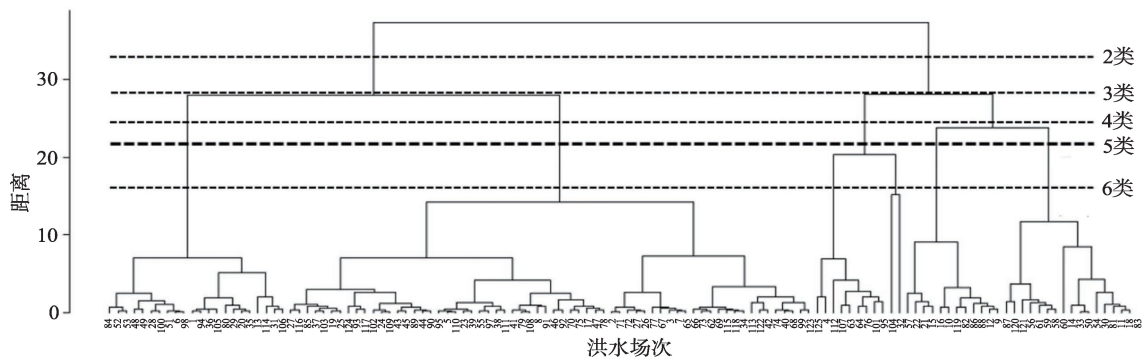


图2 125场洪水层次聚类树状图和聚类结果

Fig.2 Hierarchical clustering tree of 125 flood events and the classification results

表3 层次聚类结果效果评估
Tab.3 Classification performance assessment for different cluster numbers

洪水类型数量	GKI 指数	CI 指数	类型中最少场次数及其占比
2类	0.61	0.24	39 (31.2%)
3类	0.72	0.13	11 (8.8%)
4类	0.68	0.13	11 (8.8%)
5类	0.76	0.09	11 (8.8%)
6类	0.78	0.07	2 (1.6%)

值分别占洪水总量的2.6%、1.2%和1.1%，第4和5类较大，分别占洪水总量的7.0%和3.4%，其中最小和最大值分别是第3和4类。从洪水过程时间来看，第1~3和5类洪水类型历时平均值较为接近，分别为18 d、15 d、16 d和15 d；而第4类洪水类型历时最短，平均值仅为4 d。从洪峰出现时间来看，5类洪水的峰现时间平均值分别占总洪水历时的10%、15%、20%、8%和35%，其中第4类洪水峰现时间最靠前，第5类洪水峰现时间最靠后。从峰涨峰落速率来看，第1~3类速率均较小，其平均值分别为 $9 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $1.09 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 、 $3 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $5.31 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $3.78 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ ；第5类其次，为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 和 $5.6 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ ；而第4类速率最大，平均值为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 和 $9 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 。从洪水类型形态来看，所有洪水过程均呈现正偏，CS平均值分别为3.24、1.48、1.50、

2.25和1.26；而洪水过程变异性大，CV平均值分别为1.64、0.89、0.98、1.45和1.02。第1类洪水CS和CV值均最大。

总的来看，第1类洪水的偏态系数、变异系数和洪水历时均最大，属于长历时且变化剧烈型洪水；第3类洪水历时长，而且有多个洪峰，属于多峰长历时型洪水过程；第4类洪峰流量最大，峰涨峰落速率最大，而历时最短，属于尖瘦型短历时洪水过程；第5类洪水总量最大，而峰现时间最晚，偏态系数和变异系数最小，属于矮胖型洪水过程；而第2类洪水为常规型洪水过程。

2.3 洪水类型的时间和空间分布特征

从时间变化来看(图4)，丰水年(2007、2008、2010、2014和2015年)和平水年(2006和2009年)的洪水类型较多，而枯水年份(2011—2013年)洪水类型较少，且以第2和5类洪水出现频率居多。2006—2015年间洪水类型呈现减少趋势，第2类洪水的比例逐渐增大，这与淮河流域丰枯交替有关。第1类洪水主要分布在丰水和平水年份，所占比例为6.3%~42.9%之间，其中2014年比例最大；第2类洪水在各年份所占比例均最大，在30.8%~76.9%之间，特别是在枯水年比例较大；第3类洪水主要分布在丰水年份，所占比例为6.3%~42.9%之间；第4类洪水主要分布在丰水和平水年份，所占比例在6.3%

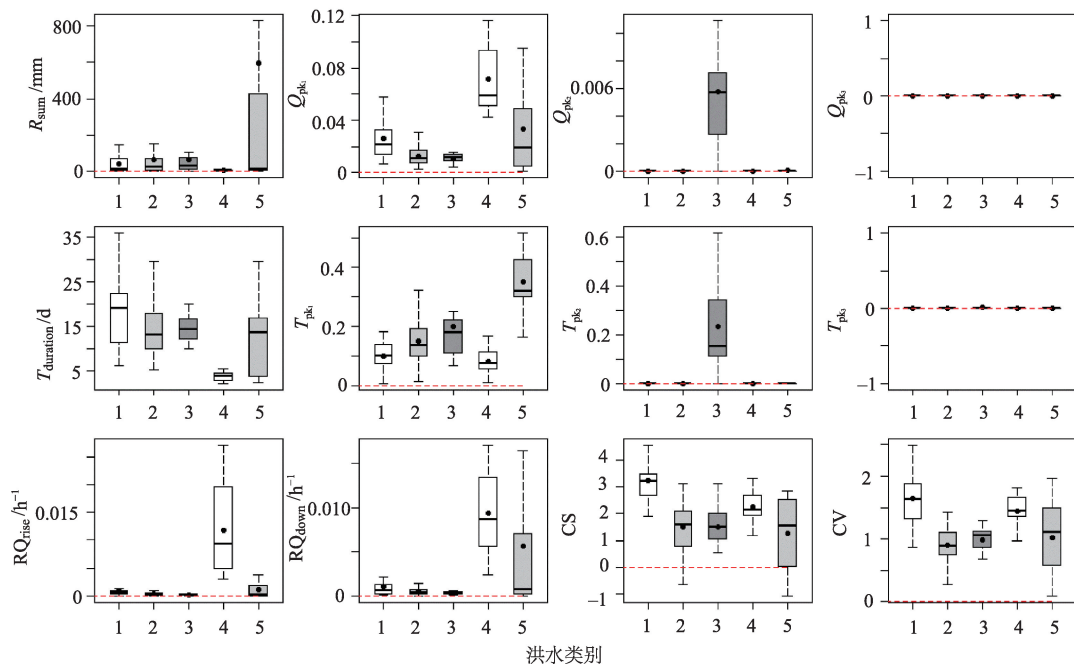


图3 洪水特征指标在各洪水类别间的差异

Fig.3 Differences of flood characteristic metrics among different flood event types

~23.1%之间,其中丰水年份比例较大,如2007年;第5类洪水在丰水、平水和枯水年份(2006—2009年和2011—2012年)均出现,所占比例为12.5%~25.0%,其中2006年和2012年比例最大。

从空间分布来看(图5),源头站点的洪水类型较为多样,而中下游站点的洪水类型较为单一,主要从尖瘦型洪水过程逐渐转变为矮胖型洪水过程,这与流域内水源涵养能力、水利工程调蓄能力和降水多样性等有密切的联系。第1类洪水主要分布在淮河干流上游和南部山区水系。这些水系地处山区,河道坡度大^[21,28],汇流时间短,洪水调节能力低,因此这些洪水过程均以尖瘦型洪水过程为主;另外受山

区地下水补给,洪水历时较长。第2类出现在大部分站点,特别是在洪汝河中下游遂平和班台站、淮河干流上游淮滨和王家坝站及南部山区蒋家集等。第4类主要出现在洪汝河上游芦庄和遂平站。这些站点集水面积相对较小,区域土地利用以旱地为主,水源涵养能力低,洪水陡涨陡落明显。第3类洪水出现在淮河干流上游长台关和息县站,汇集了北部支流洪汝河、南部山区水系以及淮河干流上游等不同水系的洪水过程,由于降雨雨型、降雨时间和汇流时间等的差异,易引起多峰出现。第5类洪水出现在淮河干流中游站点。淮河干流中游地区集水面积较大,区域内闸坝等水利工程密集,对洪水调节能力强,洪水过程逐渐坦化,洪峰出现时间延迟。

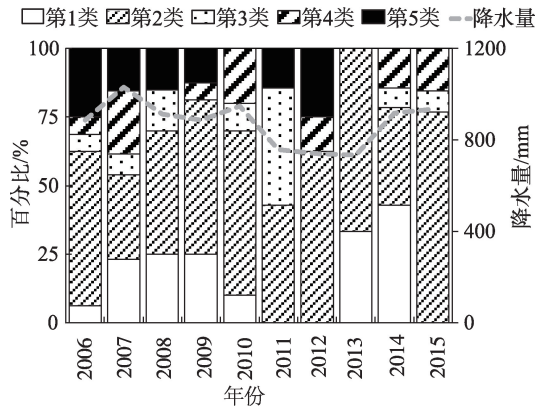


图4 各洪水类别在2006—2015年内的分布
Fig.4 Annual distribution of flood event types, 2006-2015

3 结论与结论

本文以淮河中上游流域为例,基于不同水系16个重点水文站2006—2015年125场洪水过程,采用洪水总量和洪峰流量、时间、变化率和形态等特征指标对完整洪水过程进行了刻画,并采用多元统计分析手段辨识了代表性洪水类型,揭示了洪水类型的时空分布特征。主要结论如下:

(1) 淮河中上游流域主要有5类代表性洪水类型,各类场次分别为总洪水场次的17.6%、51.2%、8.8%、9.6%和12.8%。对应的主要洪水特征分别为

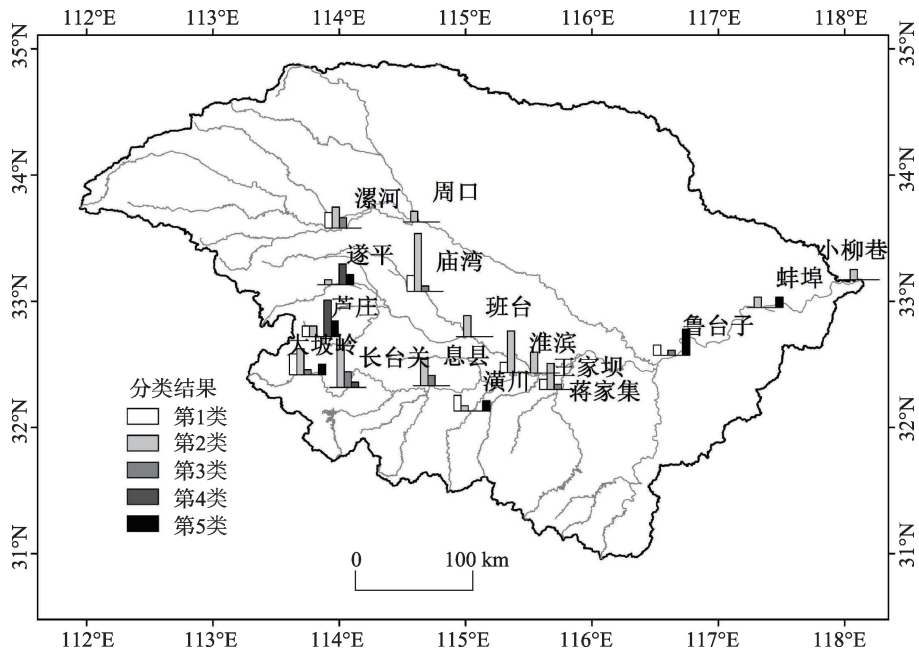


图5 各洪水类型的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of flood event types in the Huai River Basin

长历时且变化剧烈型、常规型、多峰长历时型、尖瘦短历时型和矮胖型。

(2) 从洪水类型的时间分布来看, 2006—2015 年间流域丰水年份向枯水年份的转变导致洪水类型呈现减少趋势, 常规型洪水的比例逐渐增大。丰水年份(如 2007)、平水年份(如 2006 年)的洪水类型较多; 而枯水年份(2011—2013 年)洪水类型较少, 以常规型和矮胖型洪水出现频率居多。

(3) 从洪水类型的空间分布来看, 源头站点控制流域河道坡度大、汇流时间短、洪水调节能力弱, 洪水主要受降雨多样性影响类型较多, 以汛前尖瘦型洪水过程居多。中下游站点控制流域集水面积大, 工程调蓄能力强, 受雨型影响较小, 洪水类型比较单一, 以矮胖型洪水过程居多。

洪水量向洪水过程特征指标的转变将更全面地认识流域洪水的演变特征, 对指导水利工程防洪调度、雨洪资源高效利用等具有重要的意义。本文初步辨识了淮河流域主要洪水类型及其时空分布特征, 今后随着洪水场次样本的进一步收集, 洪水类型的代表性将得到进一步的丰富和验证。另外, 还需加强其他聚类方法结果的交互验证, 以及代表性洪水类型的归因分析, 如地形地貌、气象、工程调控等。

参考文献(References)

- [1] Bunn S E, Arthington A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507.
- [2] Zhang Y Y, Zhai X Y, Shao Q X, et al. Assessing temporal and spatial alterations of flow regimes in the regulated Huai River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 384-397.
- [3] 赵雪花. 河川径流演变规律的挖掘与识别技术 [D]. 西安: 西安理工大学, 2005. [Zhao Xuehua. Mining and identifying technology of river runoff change law. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2005.]
- [4] Wagener T, Sivapalan M, Troch P, et al. Catchment classification and hydrologic similarity [J]. *Geography Compass*, 2007, 1(4): 901-931.
- [5] Kuentz A, Arheimer B, Hundecha Y, et al. Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21: 2863-2879.
- [6] Parajka J, Kohnová S, Bálint G, et al. Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine-Carpathian range [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(1-2): 78-89.
- [7] Hall J, Blöschl G. Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22: 3883-3901.
- [8] 董前进, 王先甲, 艾学山, 等. 基于投影寻踪和粒子群优化算法的洪水分类研究 [J]. *水文*, 2007, 27(4): 10-14. [Dong Qianjin, Wang Xianjia, Ai Xueshan, et al. Study on flood classification based on project pursuit and particle swarm optimization algorithm. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(4): 10-14.]
- [9] 伊璇, 周丰, 王心宇, 等. 基于 SOM 的流域分类和无资料区径流模拟 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(8): 1109-1116. [Yi Xuan, Zhou Feng, Wang Xinyu, et al. Classification and runoff simulation of data-scarce basins based on self-organizing maps. *Progress in Geography*, 2014, 33(8): 1109-1116.]
- [10] Sikorska A E, Viviroli D, Seibert J. Flood-type classification in mountainous catchments using crisp and fuzzy decision trees [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 7959-7976.
- [11] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 洪水灾害脆弱性研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 43-48. [Shi Yong, Xu Shiyuan, Shi Chun, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods. *Progress in Geography*, 2009, 28(1): 43-48.]
- [12] 金君良, 何健, 贺瑞敏, 等. 气候变化对淮河流域水资源及极端洪水事件的影响 [J]. *地理科学*, 2017, 37(8): 1226-1233. [Jin Junliang, He Jian, He Ruimin, et al. Impacts of climate change to water resources and extreme hydrological event in the Huaihe River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(8): 1226-1233.]
- [13] 向燕芸, 王志成, 张辉, 等. 干旱区融雪径流模拟的研究进展与展望 [J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 892-901. [Xiang Yanyun, Wang Zhicheng, Zhang Hui, et al. Study of snowmelt runoff simulation in arid regions: Progress and prospect. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 892-901.]
- [14] 李桃英. 陕西省灾害性洪水类型及成因分析 [J]. *水文*, 2004, 24(4): 40-43. [Li Taoying. Analysis on the types and causes of severe floods in Shanxi Province. *Hydrology*, 2004, 24(4): 40-43.]
- [15] Koutroulis A G, Tsanis I K, Daliakopoulos I N. Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(1-2): 90-100.
- [16] Saharia M, Kirstetter P E, Vergara H, et al. Characterization of floods in the United States [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 548: 524-535.

- [17] 张永勇, 李宗礼, 刘晓洁. 近千年淮河流域河湖水系连通演变特征 [J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 77-83. [Zhang Yongyong, Li Zongli, Liu Xiaojie. Evolution of interconnected river and lake networks in the Huai River Basin over the last millennium. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(4): 77-83.]
- [18] 杜鸿, 夏军, 曾思栋, 等. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟 [J]. 地理学报, 2012, 67(3): 398-409. [Du Hong, Xia Jun, Zeng Sidong, et al. Temporal and spatial variations and statistical models of extreme runoff in Huaihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 398-409.]
- [19] 姚梦婷, 高超, 陆苗, 等. 1959—2008年淮河流域极端径流的强度和频率特征 [J]. 地理研究, 2015, 34(8): 131-142. [Yao Mengting, Gao Chao, Lu Miao, et al. The intensity and frequency characteristics of extreme runoff over the Huaihe River Basin during 1959–2008. *Geographical Research*, 2015, 34(8): 131-142.]
- [20] 孙鹏, 孙玉燕, 张强, 等. 淮河流域洪水极值非平稳性特征 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 1123-1137. [Sun Peng, Sun Yuyan, Zhang Qiang, et al. Evaluation on non-stationarity assumption of annual maximum peak flows during 1956–2016 in the Huaihe River Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 1123-1137.]
- [21] 邹敬涵. 浅议“淮河洪水” [J]. 河南水利与南水北调, 2010(11): 8-11. [Zou Jinghan. Discussion on floods in Huai River. *Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion*, 2010(11): 8-11.]
- [22] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174.
- [23] Poff N L, Allan J D, Bain M B. The nature flow regime: A paradigm for river conservation and restoration [J]. *BioScience*, 1997, 47: 769-784.
- [24] Poff N L, Zimmerman J K. Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows [J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55: 194-205.
- [25] Zhang Y Y, Zhai X Y, Shao Q X, et al. Assessing temporal and spatial alterations of flow regimes in the regulated Huai River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 384-397.
- [26] Zhang Y, Fu G, Sun B, et al. Simulation and classification of the impacts of projected climate change on flow regimes in the arid Hexi Corridor of Northwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120: 7429-7453.
- [27] Goodman L, Kruskal W. Measures of associations for cross classification [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1954, 49: 732-764.
- [28] Hubert L, Schultz J. Quadratic assignment as a general data-analysis strategy [J]. *British Journal of Mathematical & Statistical Psychology*, 1976, 29(2): 190-241.
- [29] 宁远, 钱敏, 王玉太. 淮河流域水利手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. [Ning Yuan, Qian Min, Wang Yutai. *Huaihe River Basin hydrology handbook*. Beijing, China: Science Press, 2003.]

Characteristics of main flood event types and their temporal-spatial variations in the upper and middle reaches of the Huai River Basin

ZHANG Yongyong¹, CHEN Qiutan^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Flood similarity identification has important practical significance for floodwater utilization, flood control of reservoirs, and river ecological restoration. In this study, the observations of 125 flood events at the 16 hydrological stations in the middle and upper reaches of the Huai River Basin from 2006 to 2015 were collected, and the metrics of flood magnitude, timing, and rate of changes and patterns were adopted to characterize the entire flood events. Multivariate statistical analysis—principal component analysis and hierarchical clustering method—were adopted to identify the representative flood event types. Finally the temporal and spatial distributions of each flood event type were identified. The results show that: 1) there are five types of representative flood events in the upper and middle reaches of the Huai River Basin, including long duration and extreme variability type, multiple peaks and long duration type, thin and short duration type, fat and short duration type, and conventional type. 2) From the perspective of temporal distribution, the number of flood event types showed a decreasing trend during 2006–2015, and the proportion of conventional floods gradually increased. More flood event types were found in the high flow years (e.g. 2007) and normal flow years (e.g. 2006), and fewer types were in the low flow years (2011–2013) with high frequency of conventional and fat and short duration flood event types. 3) From the perspective of spatial distribution, many flood event types appeared at the source regions, and the flood event types at the middle reaches and downstream regions were relatively few. The flood event type of thin and short duration gradually changed to fat and short duration due to the increased water source conservation capacity, reservoirs' storage capacity, and precipitation diversity in the basin. The study provides some reference for flood information mining and characteristics analysis at the basin scale, and provides scientific foundations for decision makers in flood event analysis, reservoir flood control, and floodwater utilization in the Huai River Basin.

Keywords: characteristics of flood events; multivariate statistical analysis; Huai River Basin