DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.014
曹永强, 李晓瑞. 河北省汛期降水集中度和集中期时空特征分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 96-105. (CAO Yongqiang, LI Xiaorui. Temporal and spatial characteristics of precipitation concentration degree and concentration period in flood season in Hebei Province[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 96-105. (in Chinese))

河北省汛期降水集中度和集中期时空特征分析

曹永强, 李晓瑞
(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 基于河北省1965—2015年25个典型气象站汛期(6—9月)逐日降水资料,利用小波分析、Mann-Kendall法和合成分析法对降水集中度(PCD)和集中期(PCP)时空变化特征进行分析。结果表明:①PCD值为0.18~0.56,PCP值为47.26°~194.70°,汛期最大降水集中在7月上旬和中旬;PCD和PCP均存在35 a左右的主周期和20 a左右的次周期;近50年,PCD和PCP均不存在突变年份。②PCD由东南向西北方向递减;河北南部PCP由东北向西南逐渐推迟,河北北部PCP由承德地区向东西两个方向逐渐推迟。③多水年和少水年PCD的空间分布均由东南向西北递减,但多水年的PCD高值区多于少水年;多水年和少水年PCP空间分布较一致,河北南部PCP由中部地区向南北两侧逐渐推迟,河北北部PCP由丰宁和围场向东西两侧逐渐推迟,但少水年比多水年PCP时间范围更长,空间差异更大。④从相关分析来看,汛期降水量与全省PCD具有较好的正相关性,仅与承德、涉县、清河和馆陶的PCP存在较好的负相关性。

关 键 词: 汛期; 降水; 降水集中度; 降水集中期; 时空特征; 河北省
中图分类号: P33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)04-0096-10

在全球气候变化背景下,近50年河北省降水量呈递减趋势,进入21世纪后年降水量虽略呈增加趋势,但降水时空分布不均,自然降水资源极度匮乏仍是不争的事实。河北省人均水资源量仅为全国平均值的1/7[1],其水资源供需情况及其变化趋势颇受关注。河北省汛期降水量占全年总降水量的80%左右,河北省既属于防汛大省,又属于干旱少雨的省份。因此,如何在确保防汛安全的同时,坚持防汛抗旱两手抓,科学合理地掌握汛期降水规律,储存和利用天然降水资源是河北省多年来研究的重大课题。

对于降水分布不均的地区,分析降水集中度(PCD)和降水集中期(PCP)可以较好地了解其降水的时空分布特征[2]。ZHANG等[3]把候降水量看作矢量,提出一种度量降水年内非均匀分配的方法,很好地反映了年总降水量在年内非均匀分配特性。曹永强等[4]的研究表明,浙江省西北部地区的降水比东部地区集中,且最大降水基本出现在8月7日左右;李远平等[5]的研究表明,渭河流域汛期降水量和PCD呈比较显著的正相关,与PCP呈微弱负相关;胡丽莉等[6]的研究表明,河西走廊东部降水时空分布具有不均匀性,若候内降水较少,PCD偏大,PCP偏迟,则发生干旱的概率较大;若候内降水过多,PCD偏大,PCP偏早,则发生洪涝灾害的可能性比较大;张天宇等[7]的研究表明,华北东部地区的降水较西部更为集中,华北地区集中期较晚,且雨季降水集中期空间分布有较好的整体一致性。

目前,针对河北省降水的研究主要集中在降水量变化的趋势和阶段性、极端性降水及其旱涝变化等方面[8-11],而关于降水集中度和降水集中期的研究较少。鉴于研究降水集中度与集中期对有效掌握河北省汛

收稿日期: 2017-11-27
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579126,51779114); 长江水利委员会长江科学院2016年对外开放研究基金资助项目(CKWV2016392/KY)
作者简介: 曹永强(1972—), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。
E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

期降水规律，合理存储、利用天然水资源有着重要意义，本文选取河北省 25 个典型气象站 1965—2015 年汛期（6—9 月）的逐日降水资料，对河北省 PCD 和 PCP 进行时空规律分析。

1　研究区概况

1.1　研究区概况及数据来源

河北省地处中纬度欧亚大陆东岸，地势西北高、东南低，由西北向东南倾斜，地貌复杂多样，主要为坝上高原、燕山和太行山山地、河北平原三大地貌单元；属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候，大部分地区四季分明；降水量分布特点为东南多西北少，年降水量为 350.70～842.84 mm，汛期主要集中在 6 月 1 日至 9 月 30 日[12]。

河北省气象站点资料来源于国家气象数据平台，对其进行可靠性分析，并剔除缺测及观测年限不足 51 年的站点，同时考虑地形分区（表 1），最终选用代表性较好的 25 个典型气象站 1965—2015 年 6—9 月逐日降水资料。河北省高程数据来源于地理空间数据云，研究区内站点分布情况如图 1 所示。

表 1　河北省气象站点地形分区

Tab. 1　Topographic zoning of meteorological stations in Hebei Province

地形分区	站点名称
坝上高原区	张北、张家口
山区	围场、丰宁、怀来、蔚县、涞源、承德、涉县
丘陵区	遵化、青龙、临城
山前平原区	霸州、保定、饶阳、石家庄、南宫、邢台、清河、邯郸、馆陶
沿海区	秦皇岛、乐亭、唐山、黄骅

1.2　研究方法

1.2.1　*降水集中度和集中期*　降水集中度（PCD）和集中期（PCP）是利用向量分析的原理定义区域降水量时间分配特征的参数[13-14]，可以定量描述一定时段内的降水集中程度和降水集中时段，计算式如下[4]

$$PCD = \sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2}/R_i \quad (1)$$

$$PCP = \arctan(R_{xi}/R_{yi}) \quad (2)$$

$$R_{xi} = \sum_{j=1}^{N} r_{ij} \times \sin\theta_j \quad (3)$$

$$R_{yi} = \sum_{j=1}^{N} r_{ij} \times \cos\theta_j \quad (4)$$

式中：R_{xi}，R_{yi}分别为某测站研究时段内总降水量在 x，y 轴方向的分量；R_i为某测站研究时段内总降水量；r_{ij}为研究时段内每日降水量；i 代表年份；j 代表研究时段内的日序；θ_j为研究时段内每日所对应的方位角（整个研究时段的方位角设为 360°），以汛期时长（122 d）为一圆周，每日平均分配，每日约 2.95°。

PCD 反映了降水在研究时段内的集中程度，取值为0～1，PCD 值越接近 1，表明降水量越集中，PCD 值越接近 0，表明降水越均匀。PCP 为合成向量的方位角，标示了向量合成后重心指示的角度，反映了最大降水量出现的时段。

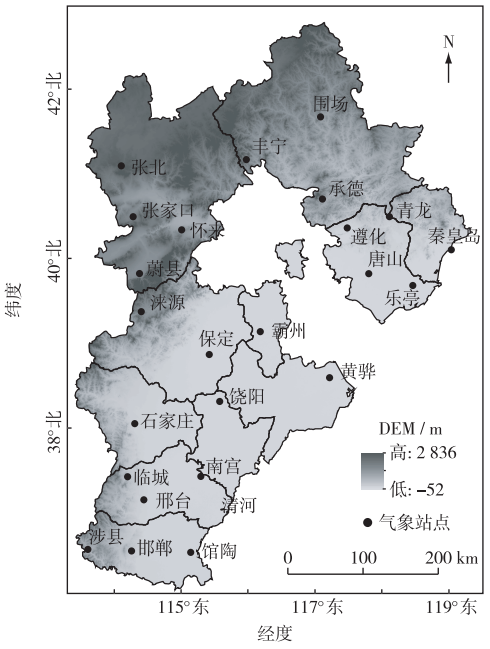


图 1　河北省气象站点分布

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in Hebei Province

1.2.2　*小波分析法*　Morlet 小波分析具有多分辨率分析的特点，是一种重要的时域-频域分析方法，具有表征信号局部特征的能力，可以对信号进行多尺度细化分析，常用来分析气候序列中所包含的周期性及其不均匀性[15]，通过小波方差图和小波等值线图来判定河北省汛期降水量、PCD 和 PCP 的周期变化。

1.2.3　*曼-肯德尔（M-K）法*　曼-肯德尔法是一种非参数统计检验方法。该方法借助 Matlab 软件进行计算，得到 UF 与 UK 两条曲线，并用于检验序列的变化趋势。若 UF 或 UK 大于 0，则表明序列呈上升趋势，小于 0 则表明序列呈下降趋势。当 UF 与 UK 两条曲线出现交点时，且交点在临界值之间则表示该时刻为突变

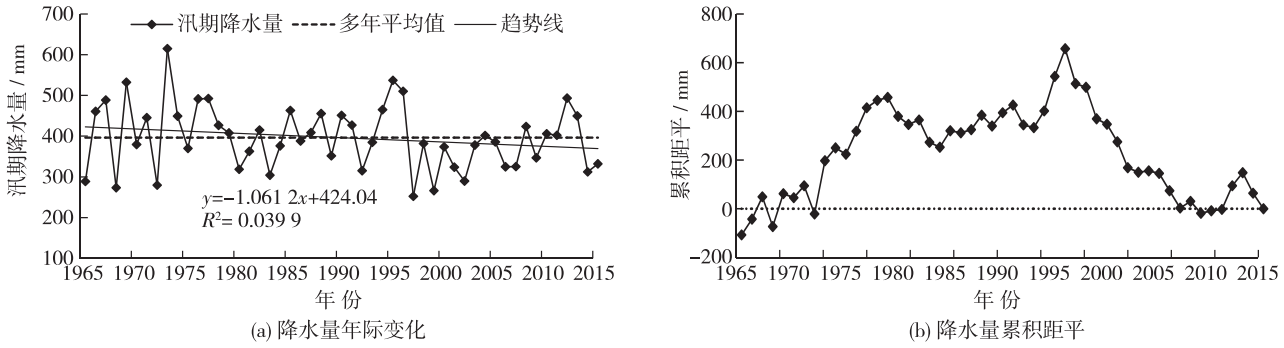
开始时刻[16]。为了检验气候要素转折是否达到突变的标准,对突变点进行信噪比 S/N 检验,计算式见文献[17],规定 S/N >1 时,认为该年存在突变,否则不存在突变。

1.2.4 合成分析法 合成分析常用来表达某一个气象场(例如:高度距平场、风应力距平场、海平面气压场、SSTA 场等)在一个标量时间序列的特殊时间子集下振荡的对称和反对称成分[18]。参考前人经验[3,19-23],将研究期内每年汛期降水量从大到小排序,前 5 位年份称为多水年,最后 5 位年份称为少水年,并分别求取多水年和少水年的 PCD 和 PCP 的平均值,即为合成分析。

2 汛期降水量基本特征

2.1 汛期降水量年际变化及突变分析

1965—2015 年汛期降水量(6—9 月)年际变化曲线如图 2 所示。由图 2(a)可知,1965—2015 年汛期降水量呈不显著下降趋势,变化率为-10.61 mm/10 a,多年平均值为 400.06 mm,最小值出现在 1997 年,为 252.66 mm,最大值出现在 1973 年,为 615.38 mm;整体来看,河北省汛期降水量年际变化较大,差值高达 362.72 mm。由图 2(b)可见,河北省汛期降水量累积距平在近 50 年中呈先升后降趋势,且基本均在正距平状态,仅有 7 年处于负距平状态。分阶段来看,累积距平在 1965—1979 年呈逐渐增加趋势,说明该阶段处于多雨期;1980—1996 年累积距平先降后升;自 1996 年至今,呈显著下降趋势,说明该阶段汛期处于少雨期。



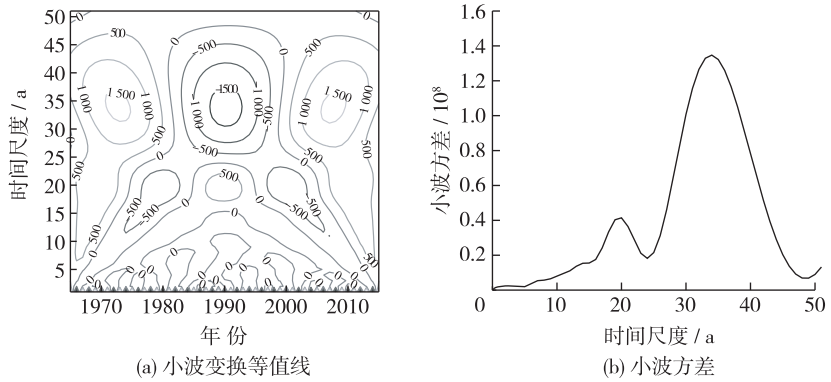
(a) 降水量年际变化 (b) 降水量累积距平

图 2 1965—2015 年汛期降水量分析

Fig. 2 Analysis of precipitation in flood seasons from 1965 to 2015

2.2 汛期降水量周期变化

图 3 为汛期降水量周期变化特征,图 3(a)为小波变换等值线,显示汛期降水量在 25~45 a 尺度上震荡周期最明显,在 12~23 a 尺度上震荡周期较明显,具有“大-小-大”的变化特征。图 3(b)为小波方差,图中汛期降水量在 35 a 左右尺度下的小波方差极值表现最为显著,为主周期,其次存在 20 a 左右的次周期。



(a) 小波变换等值线 (b) 小波方差

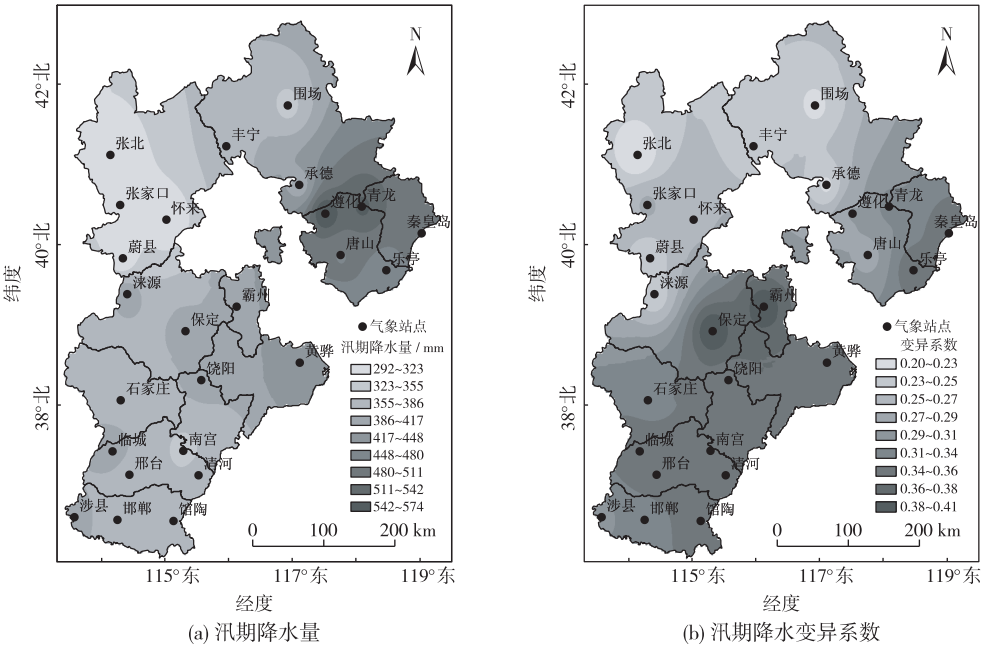
图 3 汛期降水量周期变化特征

Fig. 3 Characteristics of precipitation cycle in flood seasons

2.3　汛期降水量空间变化特征

河北省汛期降水量大致呈由东向西逐渐递减趋势（图 4（a）），变化范围为 292～574 mm，高值区集中在东北部的遵化和青龙地区，低值区主要集中在西北部的张北、张家口、怀来和蔚县地区；河北省南部汛期降水量大致呈由东北和西南向中部逐渐减少趋势，河北省北部汛期降水量大致呈由东向西逐渐减少趋势，河北省北部与南部地区相比，前者的汛期降水量东西地区差异更明显；整体来看，河北省的汛期降水量空间差异较大，差值高达 279 mm。

河北省汛期降水变异系数主要呈现东西差异（图 4（b）），这与汛期降水量的空间分布格局较一致。各站降水变异系数为 0.20～0.41，各站降水的年际变化差异较大；高值区集中在河北省中部的平原地区，为 0.27～0.41，其中霸州和保定的变异系数较大，均达到 0.4，说明这些地区的汛期降水量年际变化较大；河北省北部地区相较于南部地区变异系数较小，低值区主要集中在承德以西地区，变异系数为 0.20～0.27，说明该地区汛期降水量年际变化较小，承德以东地区相较于前者，变异系数较大，为 0.27～0.37，且呈由东向西逐渐减小的趋势。结合汛期降水量图，河北省北部承德以西地区，降水量少，变异系数小，而沿海地区降水量多，变异系数较大；河北省南部平原地区降水量较少，变异系数大。整体来看，河北省东部地区汛期降水的时空分布势必会给农业生产和旱涝灾害造成一定的影响。



(a) 汛期降水量　　(b) 汛期降水变异系数

图 4　汛期降水量空间变化及变异系数

Fig. 4　Spatial variation and variation coefficient of precipitation in flood seasons

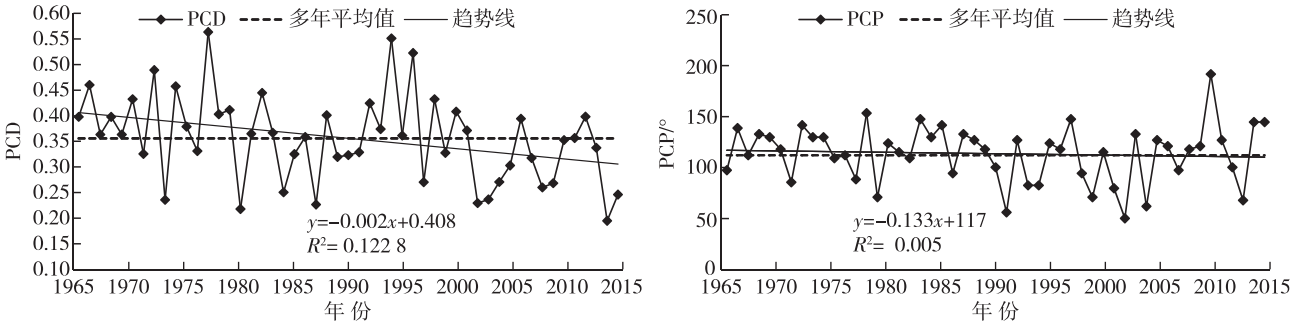
3　PCD 和 PCP 时空特征

3.1　PCD 和 PCP 的年际变化

图 5 为 PCD 和 PCP 的年际变化特征，从图 5（a）可知，PCD 呈较显著下降趋势，变化率为−0.02/10 a，PCD 的值为 0.18～0.56，多年平均值为 0.35。若 PCD 大于多年平均值，则认为该年降水比较集中；当 PCD 小于多年平均值，则认为该年降水比较均匀[21]。近 50 年中，PCD 最大值出现在 1994 年，为 0.56，说明 1994 年降水最集中，PCD 最小值出现在 2014，为 0.19，说明 2014 年降水最均匀。PCD 的年代际变化较大，1965—1972 年，PCD 均高于均值，降水比较集中；1973—1992 年，PCD 波动性很大，各年 PCD 差值较大，降水经历了多个降水集中和降水均匀多个变化；1993 年之后，PCD 呈波动性下降趋势，降水逐渐趋向均匀。整体看汛期

PCD 年际变化较大,波动性较强,变化规律不明显。

从图 5(b)可知,近 50 年 PCP 呈不显著下降趋势,变化率为-1.33°/10 a,PCP 值为 47.20°~194.70°,多年平均值为 112.10°,说明平均降水集中期为 7 月 8 日左右。1991 年的降水集中期最早,为 47.20°,说明最大降水提前到 6 月 16 日,2010 年的降水集中期最晚,最大降水推迟到 8 月 5 日,两者相差 51 d。整体来看,河北省降水集中期的变化不大,大部分年份集中期在 7 月上旬和中旬。



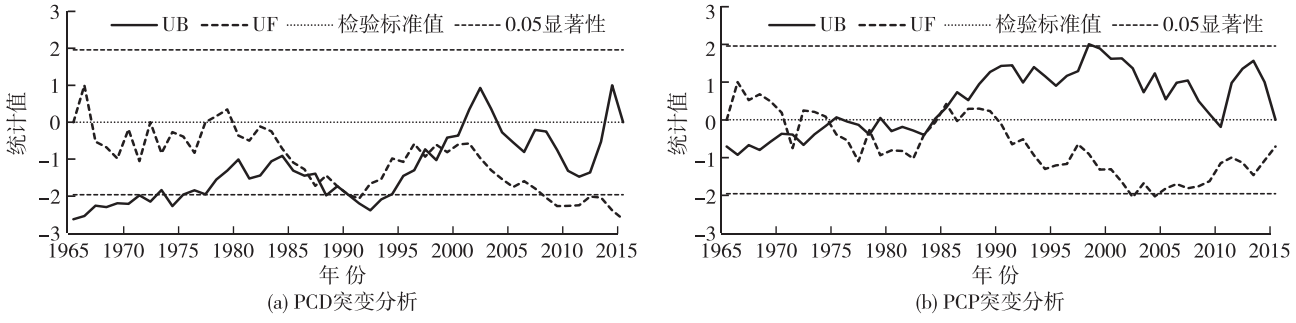
(a) PCD年际变化 (b) PCP年际变化

图 5 1965—2015 年 PCD 和 PCP 的年际变化

Fig. 5 Annual changes of PCD and PCP from 1965 to 2015

3.2 PCD 和 PCP 的突变分析

为了突出 1965—2015 年河北省汛期 PCD 和 PCP 较长时间变化的信号,采用 Mann-Kendall 法进行变化趋势及突变分析。由图 6(a)可知,UF 和 UB 曲线在±1.96 临界线范围内出现多个交点,特别是在 1985—2000 年表现最为突出。通过信噪比检验发现,所有交点 S/N<1,表明近 50 年河北省汛期 PCD 不存在突变年。1965—1991 年 UF 曲线呈下降趋势,且均未超过临界值,说明汛期 PCD 呈波动性下降趋势;1991 年之后,UF 曲线先上升后下降,并在 2008 年超出临界范围,说明汛期 PCD 在 2008 年之后下降趋势显著;整体来看,河北省汛期 PCD 存在多个集中和均匀的变化。由图 6(b)可知,UF 和 UB 曲线在±1.96 临界线范围内也出现多个交点,特别是在 20 世纪 70 年代到 80 年代末期,通过信噪比检验发现,所有交点 S/N<1,说明汛期 PCP 在研究时段内没有发生突变。UF 曲线在近 50 年内大致呈波动性下降趋势,且均为超过临界值,说明降水集中期经历了从逐渐推迟到逐渐提前的多个变化。



(a) PCD突变分析 (b) PCP突变分析

图 6 1965—2015 年 PCD 和 PCP 的突变分析

Fig. 6 Mutation analysis of PCD and PCP from 1965 to 2015

3.3 PCD 和 PCP 的周期变化

河北省 1965—2015 年 PCD 和 PCP 周期变化如图 7。可见 PCD 和 PCP 均在 27~45 a 尺度上周期震荡很明显,且呈现“大-小-大”变化特征。结合小波方差图 PCD 和 PCP,发现小波方差极值均在 35 a 左右出现峰值,此外在 20 a 左右出现第二峰值,说明河北省 PCD 和 PCP 变化存在 35 a 左右主周期和 20 a 左右的次

周期，即河北省汛期降水在 35 a 左右会经历 1 个由较为集中到较为均匀的过程，最大降水会在 35 a 左右经历 1 个由较晚到较早的过程。

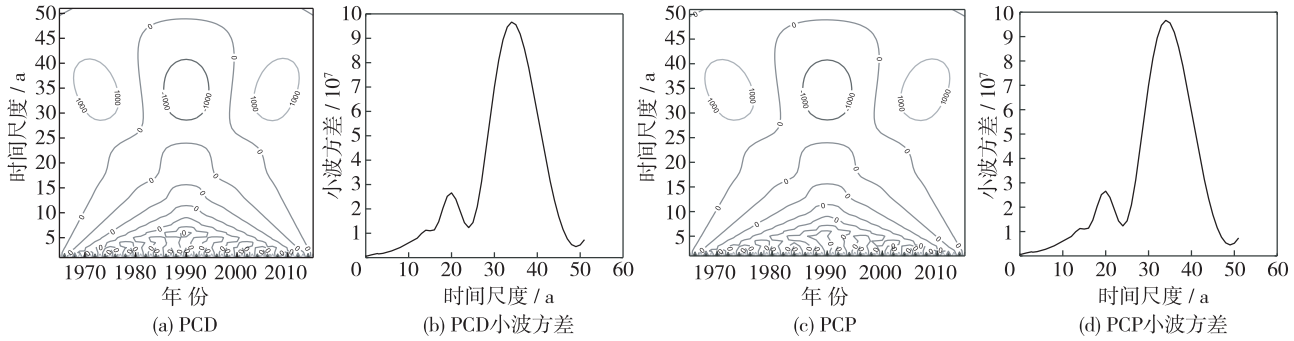


图 7　PCD 和 PCP 周期变化特征

Fig. 7　Periodic variation characteristics of PCD and PCP

3.4　PCD 和 PCP 的空间变化

河北省 1965—2015 年 PCD 和 PCP 的空间分布如图 8 所示。

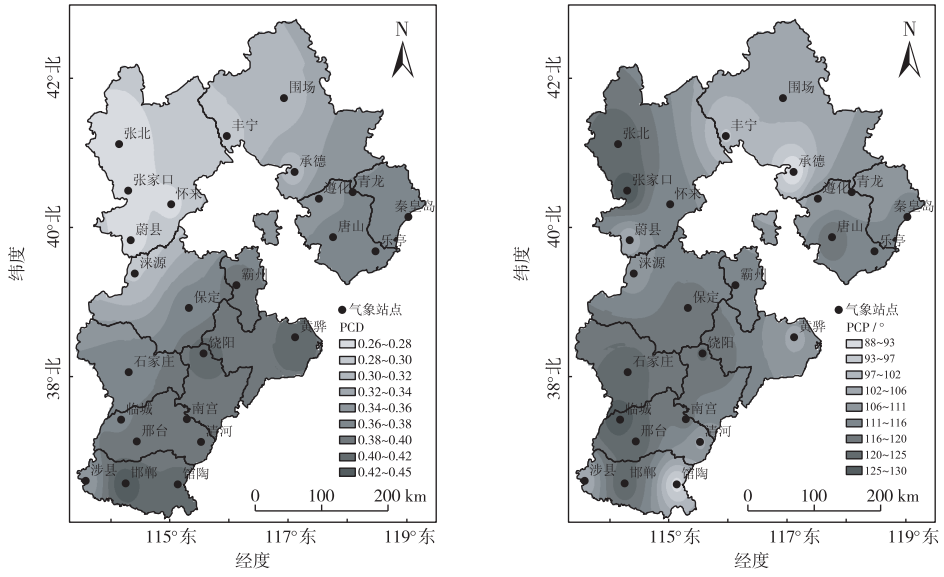


图 8　PCD 和 PCP 的空间变化

Fig. 8　Space changes of PCD and PCP

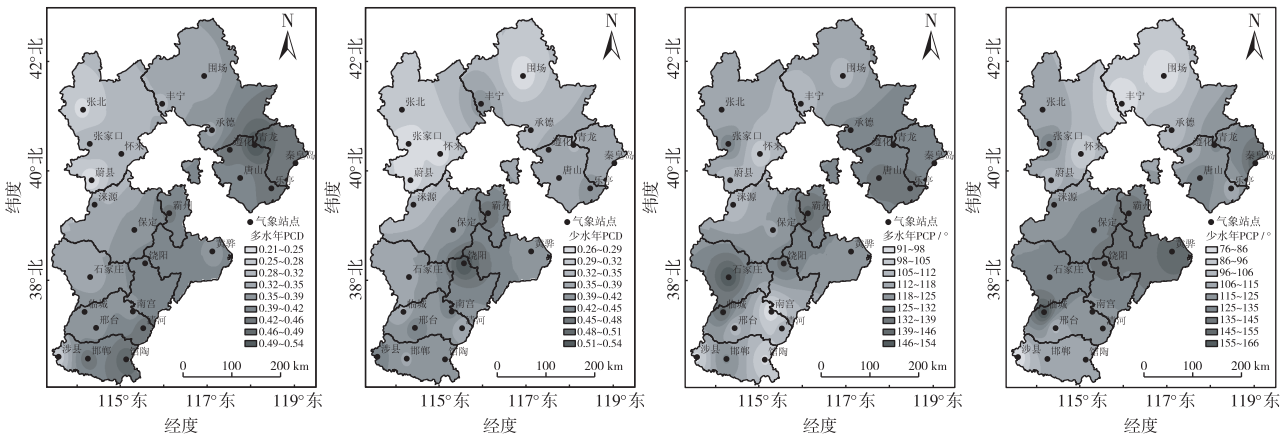
从图 8(a)可知，河北省 PCD 值大致呈由东南向西北逐渐减小趋势，变化范围为 0.26～0.45；高值区集中在黄骅、饶阳和邯郸地区，均超过 0.4；低值区集中在张北、张家口和蔚县地区，均未超过 0.28，高值区与低值区 PCD 值相差 0.19，说明东南部地区比西北部地区降水更集中。从图 8(b)可知，河北省南部 PCP 值大致呈由东北向西南逐渐增加趋势，说明降水集中期由东北向西南逐渐推迟，河北省北部 PCP 值空间差异较大，大致呈由承德地区向东西两个方向逐渐增加趋势，说明最大降水时间由承德地区向周围逐渐推迟；整体来看，承德地区最大降水出现最早，为 6 月 30 日，张家口地区最大降水出现最晚，为 7 月 14 日，河北省各地区降水集中期相差 15 d。

从上述对比可知，自承德向东(不包括承德)，降水越集中，最大降水出现时间越晚，在 7 月 3—9 日。河北省南部和承德以西地区，降水越集中，最大降水出现的时间越早，前者在 7 月 5—13 日，后者在 6 月 30 日

至 7 月 14 日。

3.5 PCD 和 PCP 的合成分析

采用合成分析法,分别对河北省 1965—2015 年 6—9 月降水量最多和最少的前 5 年进行合成。多水年依次为:1973 年、1995 年、1969 年、1996 年、2012 年,少水年依次为:1999 年、1997 年、1968 年、1972 年、1965 年。合成后河北省多水年和少水年的集中度和集中期的空间分布如图 9 所示。



(a) 多水年PCD (b) 少水年PCD (c) 多水年PCP (d) 少水年PCP

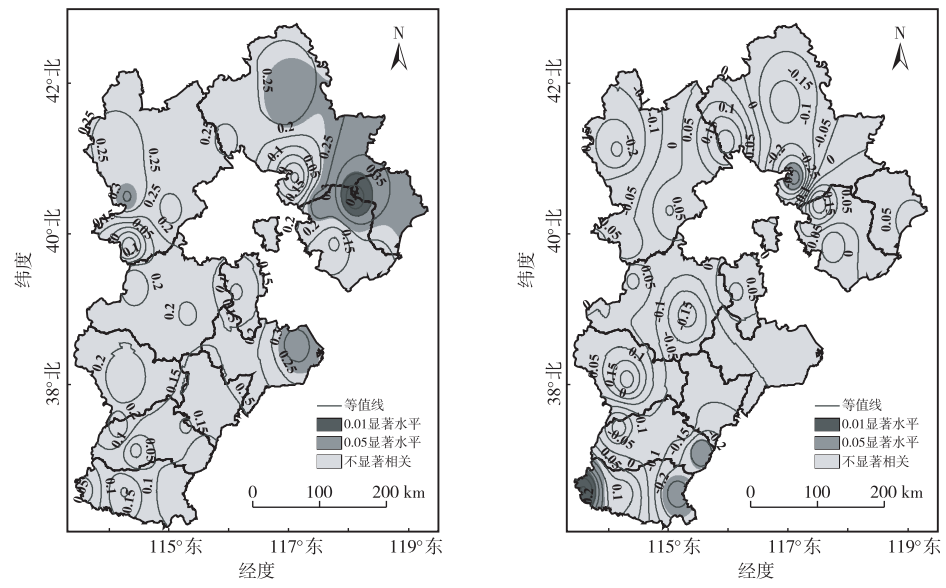
图 9 河北省 PCD 和 PCP 多水年、少水年合成分析

Fig. 9 Synthesis analysis of more water years and less water years of PCD and PCP in Hebei Province

由图 9 可见,多水年(图 9(a))和少水年 PCD(图 9(b))大致由东南向西北递减,高值区集中于饶阳、遵化、青龙,低值区集中于张北和张家口地区。不同的是,河北北部地区自东向西多水年 PCD 减少趋势与少水年相比更为明显,遵化、青龙和围场地区多水年和少水年的 PCD 值相差较多。总体来看,与少水年相比,多水年降水集中度高的地区更多,河北省东部地区比西部地区降水更集中,但考虑到山地地形,故防汛抗灾过程中应对东部地区和西部山地地区加以重视。由图 9(c)和图 9(d)可知,多水年的降水集中期和少水年的变化趋势较为一致,但差值不同,河北南部地区的高值区集中于中部,并由中部地区向南北两侧递减,少水年 PCP 值空间变化比多水年更均匀。河北省北部地区,PCP 值由丰宁和围场向东西两侧逐渐增加,高值中心集中在东部的秦皇岛和乐亭以及西部的张家口地区;河北省多水年最大降水出现的最早时间要晚于少水年,即与多水年相比,少水年降水集中期的时间范围更长,空间差异更大。

3.6 汛期降水与 PCD 和 PCP 相关性分析

为了探究河北省汛期降水量与 PCD 和 PCP 的关系,图 10 绘制了河北省汛期降水量与 PCD 和 PCP 的相关分布。汛期降水量和 PCD 的相关系数为-0.038~0.442(图 10(a)),仅有蔚县和承德表现出较弱的负相关,其他地区均表现出正相关性,其中青龙地区的相关系数最大,为 0.44,且相关性通过 0.01 显著性检验;相关系数较大地区集中在河北省东北部,该地区汛期降水量较大,且降水较为集中,暴雨多发。汛期降水量和 PCP 的相关系数为-0.355~0.188(图 10(b)),其中呈正、负相关的地区各占全省的 44%和 56%。呈正相关地区,主要集中在河北省东北部沿海地区,汛期降水量较大,最大降水出现的时间较晚;呈负相关地区,汛期降水量越大,最大降水出现的时间越早,主要集中在平原区和海拔较低的山区,其中涉县、清河、承德和馆陶均通过 0.05 显著性检验。整体来看,汛期降水量与全省 PCD 存在较好的正相关,与部分地区 PCP 存在较好的负相关。



(a) 汛期降水量与PCD相关性　　(b) 汛期降水量与PCP相关性

图 10　汛期降水量与 PCD 和 PCP 的相关性

Fig. 10　Correlation between precipitation in flood seasons with PCD and PCP

4　结　语

(1)河北省近 60 年汛期降水量呈不显著下降趋势，汛期降水量为 248.31～578.25 mm，年际差异较大，且汛期降水经历了多个多雨期和少雨期变化过程；汛期降水存在 35 a 主周期和 20 a 次周期；河北省汛期降水量大致呈由东向西逐渐递减趋势，且空间差异较大，平原地区变异系数较大，坝上地区和山区的变异系数较小。

(2)PCD 呈较显著下降趋势，PCD 值为 0.18～0.56；PCP 呈不明显下降趋势，PCP 为 47.26°～194.70°，汛期最大降水集中在 7 月上旬和中旬；PCD 和 PCP 均具有 35 a 左右的主周期和 20 a 左右的次周期；研究时段内，PCD 和 PCP 均不存在突变年份。PCD 由东南向西北方向递减，说明与西北部相比，东南部的降水更集中；河北南部 PCP 值大致呈由东北向西南逐渐增加趋势，说明最大降水时间由东北向西南逐渐推迟，河北北部最大降水出现时间由承德向东西两侧逐渐推迟。

(3)多水年和少水年 PCD 的空间大致由东南向西北递减，与少水年相比，多水年降水集中度高的地区更多，河北省东部地区比西部地区降水更集中；多水年和少水年的 PCP 在河北南部由中部地区向南北两侧逐渐递减，在河北北部由丰宁和围场向东西两侧逐渐增加，另外，少水年比多水年降水集中期范围更长，空间差异更大。

(4)相关分析发现，汛期降水量与全省 PCD 具有较好的正相关，表现为汛期降水量越多，降水越集中；与低海拔山地(承德、涉县)和山前平原区(清河、馆陶)PCP 存在较好的负相关，表现为汛期降水越多，最大降水时间越早，与其他地区 PCP 正、负相关性均不明显。

参　考　文　献：

[1] 马磊. 河北省地下水超采综合治理实践及启示[J]. 中国水利，2017(7)：51-54.(MA Lei. Comprehensive management for groundwater over-exploitation in Hebei Province[J]. China Water Resources，2017(7)：51-54.(in Chinese))

[2] 郑炎辉，陈晓宏，何艳虎，等. 珠江流域降水集中度时空变化特征及成因分析[J]. 水文，2016，36(5)：22-28.(ZHENG

Yanhui, CHEN Xiaohong, HE Yanhu, et al. Spatial-temporal variation of precipitation concentration degree in Pearl River basin and its causes[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(5): 22-28. (in Chinese))

[3] ZHANG L J, QIANG Y F. Annual distribution of the yearly precipitation in China and their interannual variation[J]. Acta Meteor Sinica, 2003, 17(2): 146-163.

[4] 曹永强, 路璐, 张亭亭, 等. 基于降水集中度和集中期的浙江省降水时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1001-1006. (CAO Yongqiang, LU Lu, ZHANG Tingting, et al. Spatio-temporal variation in precipitation in Zhejiang Province based on PCD and PCP[J]. Resources Science, 2013, 35(5): 1001-1006. (in Chinese))

[5] 李远平, 杨太保, 马建国. 渭河流域汛期降水集中度和集中期的变化特征[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 418-423. (LI Yuanping, YANG Taibao, MA Jianguo. Change characteristics of precipitation concentration degree (PCD) and precipitation concentration period (PCP) in the flood season in Pi River valley[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 418-423. (in Chinese))

[6] 胡丽莉, 李玲萍, 郭小芹. 河西走廊东部汛期降水集中度和集中期特征分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 758-765. (HU Lili, LI Lingping, GUO Xiaoqin. Precipitation concentration degree and precipitation concentration period in the East Hexi Corridor in flood season[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 758-765. (in Chinese))

[7] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 843-853. (ZHANG Tianyu, CHENG Bingyan, WANG Jifang, et al. Temporal and spatial change characteristics of precipitation-concentration degree (PCD) and precipitation-concentration period (PCP) over North China in rainy reason[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 843-853. (in Chinese))

[8] 王宏, 余锦华, 王万筠, 等. 河北省旱涝的变化特征及其相关的海气异常型分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2013(6): 487-493. (WANG Hong, YU Jinhua, WANG Wanjun, et al. Variability of drought/flood in Hebei Province and associated atmospheric and oceanic pattern analysis[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2013(6): 487-493. (in Chinese))

[9] 王宏, 余锦华, 李宗涛, 等. 基于 Z 指数的河北省旱涝多尺度变化特征[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(1): 43-47. (WANG Hong, YU Jinhua, LI Zongtao, et al. Multi-time scale characteristics of drought and flood based on Z index in Hebei Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(1): 43-47. (in Chinese))

[10] 王晓东, 潘学标, 龙步菊, 等. 近 50 年来河北省降水和温度极端事件分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 170-175. (WANG Xiaodong, PAN Xuebiao, LONG Buju, et al. Analysis of extreme precipitation and temperature events in Hebei Province over last 50 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(2): 170-175. (in Chinese))

[11] 高霞, 王宏, 于成文, 等. 近 45 年来河北省极端降水事件的变化研究[J]. 气象, 2009, 35(7): 10-15. (GAO Xia, WANG Hong, YU Chengwen, et al. Analysis of extreme precipitation events change for Hebei Province[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(7): 10-15. (in Chinese))

[12] 黄鹤, 杨超, 于雷, 等. 1958—2012 年河北省汛期暴雨气候变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 44-50. (HUANG He, YANG Chao, YU Lei, et al. Analysis of climate change characteristics of rainstorm during flood season from 1958 to 2012 in Hebei Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(2): 44-50. (in Chinese))

[13] DING Y H. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC). Part I: Sensitivity Study[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(3): 323-341.

[14] 任志艳, 延军平, 王鹏涛. 1960-2012 年内蒙古降水集中度和降水集中期时空变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 760-766. (REN Zhiyan, YAN Junping, WANG Pengtao. Spatio-temporal variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 760-766. (in Chinese))

[15] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1413-1422.(SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: Status and prospects [J]. Progress in Geography, 2013, 32(9): 1413-1422. (in Chinese))

[16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66. (WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 63-66. (in Chinese))

[17] 苗运玲, 张云惠, 卓世新, 等. 东疆地区汛期降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 949-956. (MIAO Yunling, ZHANG Yunhui, ZHUO Shixin, et al. Spatial and temporal variation characteristics of PCD and PCP in Eastern Xinjiang in flood season[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6): 949-956. (in Chinese))

[18] 尹乐. 湖南降水集中度变化特征分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015. (YIN Le. Analysis of precipitation concentration degree changes in Hunan province[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2015. (in Chinese))

[19] 张金玲，王冀，邹菊香，等. 广东地区后汛期降水集中度和集中期特征[J]. 气象科技，2011，37(4)：401-407.（ZHANG Jinling，WANG Ji，ZOU Juxiang，et al. Characteristics of precipitation concentration degree and precipitation concentration period during second rainy season in Guangdong[J]. Meteorological Science and Technology，2011，37(4)：401-407.（in Chinese））

[20] 张林梅，庄晓翠，胡磊，等. 新疆阿勒泰地区汛期降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 中国农业气象，2009，30(4)：501-508.（ZHANG Linmei，ZHUANG Xiaocui，HU Lei，et al. Temporal and spatial distribution of precipitation concentration degree and concentration period in flood season in Altay Region Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，2009，30(4)：501-508.（in Chinese））

[21] 唐亚平，张凯，张伟，等. 东北雨季降水集中度和集中期的变化特征[J]. 安徽农业科学，2010，38(2)：806-811.（TANG Yaping，ZHANG Kai，ZHANG Wei，et al. Change characteristics of precipitation concentration degree and centralism time in Northeast China during the rainy season[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2010，38(2)：806-811.（in Chinese））

[22] 曹永强，邵文婷，张亮亮，等.基于可变模糊评价法的辽西北地区干旱分区研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版)，2016，37(1)：29-34.(CAO Yongqiang，SHAO Wenting，ZHANG Liangliang，et al. Research on drought partition in the Northwest of Liaoning Province based on the variable fuzzy assessment method[J]. Journal of North China University of Water Research and Electric Power(Natural Science Edition)，2016，37(1)：29-34.(in Chinese))

[23] 左其亭. 最严格水资源管理保障体系的构建及研究展望[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版)，2016，37(4)：7-11.(ZUO Qiting. Guarantee system construction and research prospects of the strictest water resources management[J]. Journal of North China University of Water Research and Electric Power(Natural Science Edition)，2016，37(4)：7-11.（in Chinese））

Temporal and spatial characteristics of precipitation concentration degree and concentration period in flood season in Hebei Province

CAO Yongqiang，LI Xiaorui

(*College of Urban Planning and Environmental Science*，*Liaoning Normal University*，*Dalian* 116029，*China*)

Abstract：Based on the daily precipitation data of 25 typical meteorological stations in Hebei province from 1965 to 2015 (June to September)，the spatial and temporal variation characteristics of the precipitation concentration degree(PCD) and the precipitation concentration period (PCP) are analyzed by wavelet analysis and Mann-Kendall as well as the synthetic analysis method. The analysis results show that：① The PCD value is between 0.18~0.56，and the PCP value is between 47.26°~194.70°，the maximum precipitation in the flood season is concentrated in early and mid of July；both PCD and PCP exist in the main period of about 35 years and sub cycles about 20 years；in the last 50 years，neither PCD nor PCP has mutation years. ②PCD decreases from southeast to northwest，and the PCP in southern Hebei Province is gradually delayed from the northeast to southwest，the PCP of the northern Hebei Province is gradually delayed from the Chengde region to the east and the west in two directions. ③The spatial distribution of the PCD in the more-water year and the less-water year decreases from the southeast to the northwest，but the high value area of the PCD in the more-water year is more than that of the less-water year；The spatial distribution of the PCP is consistent in the more-water year and the less-water year，the PCP in the southern Hebei Province is gradually postponed from the central region to the north and the south sides，the PCP in the northern Hebei Province is gradually postponed from Fengning and Weichang to the east and the west sides，but compared with the more-water year，the PCP range of the less-water year is longer，and its spatial differences are greater. ④From the relevant analysis，the precipitation in the flood season has a good positive correlation with PCD in the whole province，and only has a good negative correlation with the PCP of Chengde，Shexian，Qinghe and Guantao.

Key words：flood season；rainfall；precipitation concentration degree(PCD)；precipitation concentration period(PCP)；spatial and temporal distributions；Hebei Province