



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.004

刘占明, 魏兴琥, 陈子燊, 等. 广东北江流域降水集中度 and 集中期的时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 19-25. LIU Zhan ming, WEI Xing hu, CHEN Zi shen, et al. Spatio-temporal change characteristics of PCD and PCP in Guangdong Beijiang river basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 19-25. (in Chinese)

广东北江流域降水集中度和集中期的时空变化特征

刘占明¹, 魏兴琥¹, 陈子燊², 江学顶¹

(1. 佛山科学技术学院 空间信息与资源环境系, 广东 佛山 528000; 2. 中山大学 水资源与环境系, 广州 510275)

摘要: 基于广东北江流域分布较均匀的 18 雨量站 1965 年-2009 年日降水资料, 统计出各站各年份降水集中度 (PCD) 和集中期 (PCP) 指标, 然后基于该指标分析流域降水集中度和集中期多年均值、变化趋势、与年降水量相关性、丰水年枯水年合成分析的空间分布情况, 以期研究流域降水年内非均匀分布的时空变化特征。结果表明: (1) 降水集中度总体表现为从南向北递减; 降水集中期主要表现为中北部的大部分区域较为提前, 南部区域较为滞后。(2) 大部分区域表现为年降水量随着降水集中度的下降而增加; 南部区域年降水量随着降水集中期的滞后而减少, 北部区域反之。(3) MK 趋势检验表明, 流域降水集中度、集中期均主要表现为上升, 但不显著。(4) 降水集中度空间分布上, 丰水年与枯水年比较一致, 但枯水年降水集中度更高; 丰水年降水集中期差别较大, 从流域平均来看, 丰水年集中期较枯水年约滞后 20 天。

关键词: 降水集中度; 降水集中期; 广东北江流域; 反距离权重插值

中图分类号: P461 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0019-07

Spatio-temporal change characteristics of PCD and PCP in Guangdong Beijiang river basin

LIU Zhan ming¹, WEI Xing hu¹, CHEN Zi shen², JIANG Xue ding¹

(1. Department of Resources and Environment, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data between 1965 and 2009 from 18 rainfall stations in Guangdong Beijiang river basin and the definitions of Precipitation Concentration Degree (PCD) and Precipitation Concentration Period (PCP), this paper studied the intra-annual inhomogeneous distribution characteristics of the precipitation in the basin by analyzing the spatial distribution of the multi-year mean values, variation trend, correlation with annual precipitation, and wet year and dry year composite values of PCD and PCP. The results are as follows: (1) PCD generally decreased from south to north; PCP was earlier in most of the north-central basin, but relatively later in the southern basin. (2) Annual precipitation would increase as PCD decreased in most of the basin; as PCP delayed, annual precipitation in the southern basin would decrease but that in the northern basin would increase. (3) As the Mann-Kendall test showed, the PCD and PCP in the basin were mainly on the rise, but not in a significant manner. (4) The spatial distribution of PCD in wet years was similar to that in dry years, but the PCD of dry years was higher. The PCPs in wet years were much more varied than those in dry years. On average, the PCP in wet years lagged about 20 days behind that in dry years.

Key words: precipitation concentration degree; precipitation concentration period; Guangdong Beijiang river basin; inverse distance weighted interpolation

收稿日期: 2016-04-15 修回日期: 2016-08-15 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金 (41371498; 31170486; 41571091); 佛山市科技发展专项基金 (2009031)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41371498; 31170486; 41571091) Foshan Special Fund for Science and Technology Development (2009031)

作者简介: 刘占明 (1979-), 男, 河南信阳人, 博士, 讲师, 主要从事水文学研究。E-mail: liuzhanming177@163.com

北江源于南岭山系, 源头深入江西、湖南边境, 全长约 582 km, 流域面积约 4.7 万 km² (广东境内约 4.3 万 km²), 是珠江水系第二大支流, 贯穿广东省中北部, 是广东境内重要河流。流域多年平均降水量约为 1 736 mm, 属我国降水较多的地区; 然而, 降水年内分布极不均匀, 汛期与非汛期差异明显, 汛期又有前汛期与后汛期之分^[1]。北江流域地形以山地、丘陵为主, 岩溶、红层地貌发育, 生态环境脆弱, 对该区而言, 降水的非均匀性分布特征造成的损失巨大, 不仅制约着区域经济可持续发展, 而且影响到社会的稳定^[2,3]。因此, 研究北江流域降水非均匀性分布特征具有重要的理论和现实意义。而集中度和集中期作为衡量降水年内非均匀分配的指标之一, 可以很好的反映出过程降水的年内分布情况^[4]。近年来, 已有很多学者对降水集中度和降水集中期进行了研究^[5], 并得出了有意义的结论, 如张录军^[6]、杨金虎^[7]、杨玮^[8]、李远平^[9]、邹立尧^[10]、纳丽^[11]、曹永强^[12]、刘文莉^[13] 等分别对长江流域、西北地区、青藏高原、渭河流域、东北地区、宁夏、浙江和陕西省降水相关的集中度和集中期时空特征进行了分析。目前, 关于北江流域降水的研究已做了不少工作, 但以往的研究主要集中于降水强度、频率时空变化原因分析及遥联分析^[12, 14, 15], 对于年内非均匀性分布特征的研究较少。本研究基于广东北江流域分布较均匀的雨量站点日降水资料, 运用集中度和集中期指标探讨流域降水年内非均匀分布的时空变化特征, 以期揭示流域降水相关变化规律, 对于科学认识区域水量平衡和洪旱灾害时空演化具有重要意义, 也可为指导区域工农业生产及防灾减灾提供科学依据。

1 资料与研究方法

1.1 资料来源

本文选取北江流域分布较均匀且没有发生位置变更的 18 测站 1965 年- 2009 年逐日降水数据资料, 数据来源于中国气象局气象信息中心, 连续完整, 各站点分布见图 1。

1.2 集中度与集中期的相关定义

本文采用 Zhang 等^[4] 的定义, 把一年中各月份

表 1 月份与方位角及降水矢量方向范围的对应关系

| Tab. 1 Corresponding relation between month and vector angle, vector range (unit: degree in direction) | | | | | | | | | | | | 方位角度 |
|--|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 集中期 | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| | 345 | 15 | 45 | 75 | 105 | 135 | 165 | 195 | 225 | 255 | 285 | 315 |

1.3 反距离权重插值法

本文在研究北江流域降水 PCD 和 PCP 多年均

降水均作为向量, 一年内 12 个月组成一个圆周 (360°), 将某月份降水量作为该月降水矢量的模, 该月月序 (从 0 算起) 与 30° 的乘积作为该月降水矢量的方向, 从而引进了表示降水年内时间分配特征的两个参数: 集中度 (PCD) 和集中期 (PCP), 即

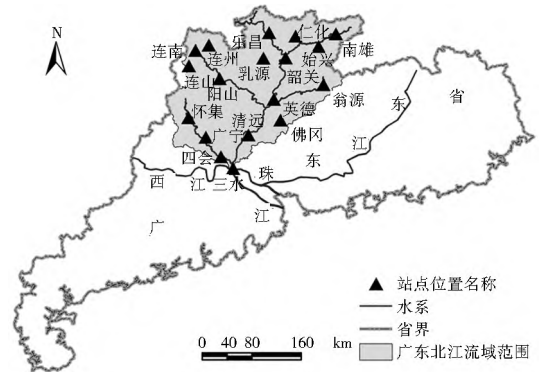


图 1 广东北江流域范围及站点位置

Fig. 1 The position of Beijiang basin and stations distribution

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

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

式中: $R_{xi} = \sum r_{ij} \cdot \sin \theta_j$, $R_{yi} = \sum r_{ij} \cdot \cos \theta_j$; pcd_i 和 pcp_i 分别代表第 i 年的降水集中度和集中期, R_i 为某测站第 i 年的总降水量; r_{ij} 为第 i 年第 j 月的总降水量; θ_j 为第 j 月对应的方位角; i 为年份 ($i = 1965, 1966, \dots, 2009$); j 为月序 ($j = 1, 2, \dots, 12$)。这里需要说明的是集中度、集中期可以有不同的定义, 在有的定义中 j 表示旬序^[13], 有的表示候序^[5], 也有的表示日序^[12]。

由以上描述可知, PCD 可以反映年降水在研究时段内各月份的集中程度, 在某研究时段内, 如果年降水全部集中于某一个月, 则合成向量的模与总降水量的比值为 1 (PCD 极大值); 相反, 如果各月降水量都相等, 则各分量累加后结果为 0 (PCD 极小值)。PCP 即合成向量的方位角, 指示各月降水量合成后的总体情况, 表 1 给出了月份与方位角及降水矢量方向范围的对应关系, 根据 PCP 值还可以推算具体旬序, 如 PCP 值介于 135~ 145、145~ 155、155~ 165 之间, 分别对应 6 月上旬、中旬、下旬。该方法的详细描述参见文献 [4]。

值、变化趋势、与年降水量相关性、多水年少水年合成分析的空间分布时, 采用反距离权重插值法 IDW

(Inverse Distance Weighted)^[16] 进行空间插值。该插值方法的前提假设是观测站间存在局部影响,并且这种影响与距离成反比。对于流域而言,测站间的气象水文变量存在空间相关性,空间变化过程也符合这种规律^[17],因此,IDW 插值法可以用来研究 PCD 和 PCP 的空间分布情况。

2 广东北江流域降水 PCD 和 PCP 的时空变化特征

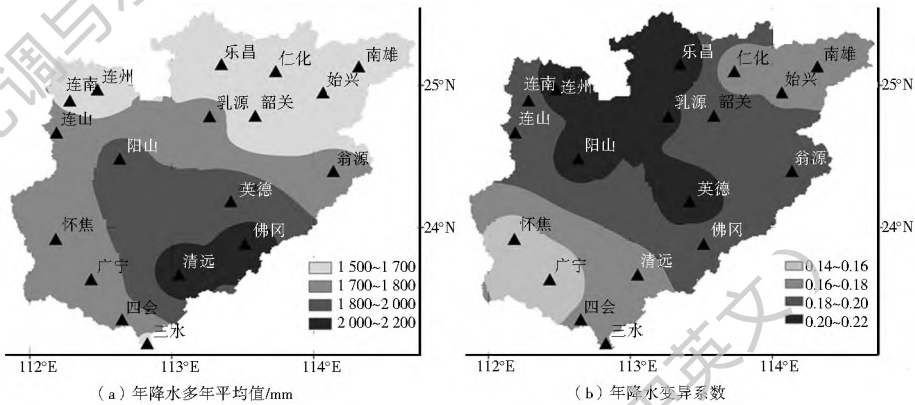


图 2 广东北江流域年降水多年平均值和变异系数空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of annual mean precipitation and variable coefficient in Beijiing river basin

由于变异系数能够反映数据序列长期变化的稳定程度及相对变化特征,研究中利用流域 18 站年降水量的变异系数值,采用反距离权重插值法进行空间插值。从图 2(b) 可以看出,18 站年降水变异系数介于 0.14~0.22 之间,空间上大致表现为西南-东北对称分布,英德、阳山、连州、乐昌所在的中西部变异系数在 0.2 以上,为流域高值区,即年降水量变化幅度较大;东北部、西南部多在 0.18 以下(其中,西南部的怀集、广宁在 0.16 以下),为流域低值区,即年降水量变化幅度较小。

2.2 PCD 和 PCP 多年平均值空间分析

流域 18 站 PCD 多年平均值介于 0.383~0.499 之间,从空间分布来看(图 3(a)),总体表现为

2.1 年降水量多年平均值及变异系数空间分析

流域 18 站 1965 年-2009 年年降水平均值介于 1 500~2 200 mm 之间,东南部的清远、佛冈地区年均降水量接近 2 200 mm,为全流域最高值,而韶关、南雄、连州、乐昌等站所在的北部片区在 1 700 mm 以下,其中乐昌站仅为 1 500.02 mm,为全区最低值。从空间分布来看(图 2(a)),总体表现为从东南部的清远-佛冈多雨中心向西、北方向递减。

从南向北 PCD 逐渐减小,东南部的英德、佛冈、清远所在区域为高值区域,PCD 都在 0.47 以上,佛冈、清远更是接近 0.50。流域北部、西北部的广大地区 PCD 都在 0.41 以下,为流域低值区域。

流域 18 站 PCP 多年平均值介于 125~165 之间,其中仁化、韶关、连南 3 站 PCP 在 125~135 之间,即对应时间为 5 月下旬;四会站为 157.2,对应时间为 6 月下旬前期;广宁、清远、三水、乐昌 PCP 在 145~155 之间,即 6 月中旬;其余各站 PCP 在 135~145 之间,即 6 月上旬。从空间分布来看(图 3b),主要表现为中部、北部的大部分地区 PCP 值偏小,对应时间较为提前,为 5 月末期及 6 月上旬;南部区域 PCP 值偏大,对应时间较为滞后,为 6 月中下旬。

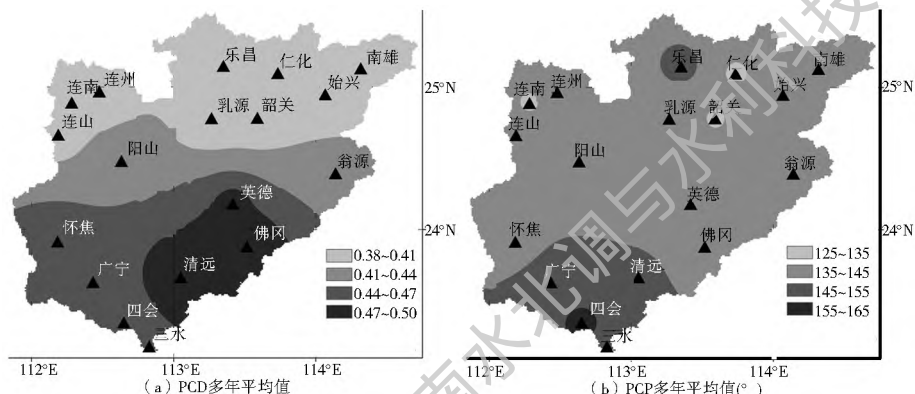


图 3 广东北江流域 PCD、PCP 多年平均值空间分布

Fig. 3 The annual mean spatial distribution of PCD(a) and PCP(b) in Beijiing river basin

2.3 PCD 和 PCP 变异系数空间分析

从图 4(a) 可以看出, 流域 18 站 PCD 变异系数介于 0.174~ 0.285 之间, 空间上大体表现为从东南向西北逐渐增大, 东南部的英德、佛冈、清远所在区域及个别零星地区变异系数较小, 在 0.20 以下, 其中清远变异系数为 0.174, 为流域最小值。西北部的连州、连南地区变异系数较大, 在 0.26 以上, 其中连州变异系数更是高达 0.285, 为流域最高值。这说明流域近 50 年来降水年内集中程度东南部较为

稳定, 从东南向西北变化幅度逐渐增大。

从图 4(b) 可以看出, 流域 18 站 PCP 变异系数介于 0.104~ 0.271 之间, 空间分布上大体表现为从南向北逐渐增大, 东南部的清远、佛冈变异系数最小, 为 0.104。北部的南雄、仁化、始兴、连州等地变异系数较大, 在 0.24 以上, 其中南雄变异系数是 0.271, 为流域最高值。这说明流域南部区域降水集中期年际差异较小, 北部区域尤其是东北部地区年际差异较大。

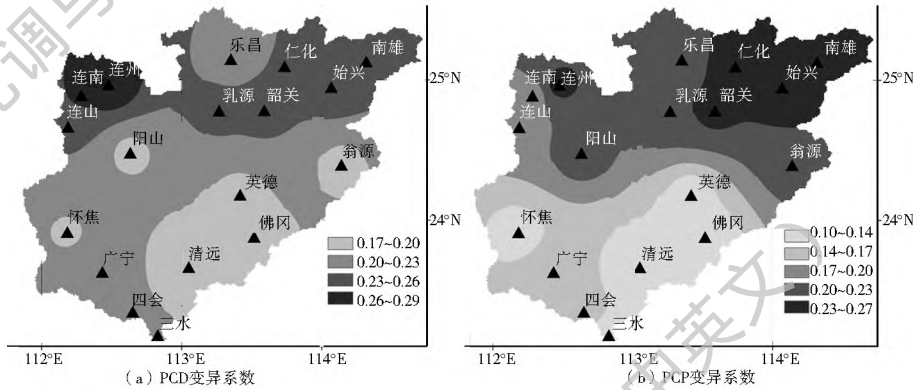


图 4 广东北江流域 PCD、PCP 变异系数空间分布

Fig. 4 The variable coefficient spatial distribution of PCD(a) and PCP(b) in Beijiang river basin

2.4 PCD 和 PCP 与年降水量的相关性分析

从流域 18 站 PCD 与年降水量相关系数空间分布来看(图 5(a)), 翁源、始兴、乳源所在区域及阳山、连州等地 PCD 与年降水量呈正相关关系, 其余大部分区域 PCD 与年降水量呈负相关关系, 但都不

够显著(0.05 置信水平)。从流域 18 站 PCP 与年降水量相关系数空间分布来看(图 5(b)), 南部区域为负相关; 北部区域为正相关, 其中, 韶关、乳源、始兴等地相关性显著(0.05 置信水平), 即随着 PCP 增大(降水集中期滞后), 年降水量增加。

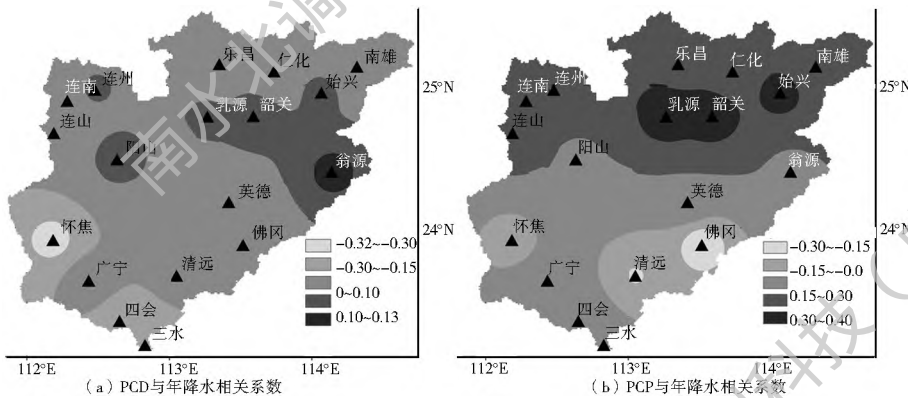


图 5 广东北江流域 PCD、PCP 与年降水量相关系数空间分布

Fig. 5 The spatial distributions of correlation coefficient between PCD, PCP and annual precipitation in Beijiang river basin

2.5 PCD 和 PCP 的变化趋势分析

Manr Kendall(简称 M-K) 检验法是一种用于对时间序列变化趋势检验的方法。最早由 Mann^[18] 提出, 之后经过不断的修改和完善, 目前在气象水文学领域已得到广泛应用, 也被世界气象组织(WMO)推荐^[19]。本研究采用 M-K 检验法对 1965 年- 2009 年北江流域降水 PCD、PCP 年际变化趋

势进行分析。研究中以置信水平 $\alpha=0.1$ (即 $|Z\alpha/2|=1.28$) 为界, 分为显著增加(减少)、不显著增加(减少)的变化情况, 研究结果见图 5。

从图 6(a) 可以看出, PCD 有 11 站不显著上升, 6 站显著上升, 1 站不显著下降。从空间分布来看, 不显著下降的站点(仁化) 位于北部边缘, 显著上升的站主要分布在中北部(乐昌、韶关、乳源、英德) 和

南部(广宁、四会),其余区域站点为不显著上升。因此,总体来看,流域大部分区域 PCD 表现为不显著上升,小部分区域(中北部和南部)PCD 表现为显著上升。

从图 6(b)可以看出,PCP 有 13 站不显著上升,1

站显著上升,4 站不显著下降。从空间分布来看,显著上升的站点(乐昌)位于北部边缘,不显著下降的站点(始兴、连山、英德、清远)零散分布于流域各处。因此,总体来看,流域 PCP 表现为以不显著上升为主,即降水集中期呈现出滞后的趋势,但不够显著。

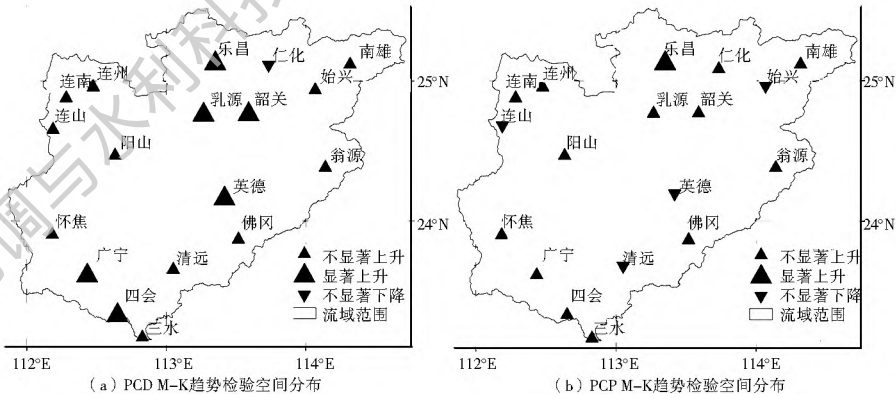


图 6 广东北江流域 PCD、PCP M-K 趋势检验空间分布

Fig. 6 The change trends spatial distribution of PCD(a) and PCP(b) by Mann Kendall in Beijiang river basin

2.6 PCD 和 PCP 的合成分析

研究中采用合成分析法,即分别对广东北江流域 1965 年-2009 年降水量最多和最少的前 5 年(即丰水年、枯水年)进行合成。见图 7、图 8,丰水年依次为 1973 年、1975 年、1983 年、1994 年、1997 年,年降水量均在 2 100 mm 以上,年降水正距平均 > 21%;枯水年依次为 1989 年、1991 年、2003 年、2004 年、2007 年,年降水量均在 1 430 mm 以下,年降水负距平均 < - 18%。然后利用合成后的流域 18 站点丰水年和枯水年的 PCD 和 PCP 均值,应用反距离权重插值法进行空间插值(图 9)。

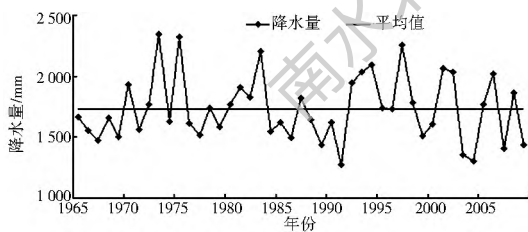


图 7 1965 年-2009 年北江流域降水量年际变化

Fig. 7 The annual precipitation variations over Beijiang river basin from 1965 to 2009

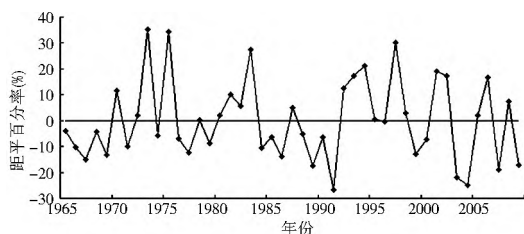


图 8 1965 年-2009 年北江流域年降水距平百分率

Fig. 8 The percentage of precipitation anomalies over Beijiang river basin from 1965 to 2009

丰水年 PCD(图 9(a))与枯水年 PCD(图 9(b))在空间分布上具有一定相似性,如:总体变化趋势上,均主要表现为从南向北逐渐减小;东南部的清远、佛冈、英德所在区域均为高值区;东北部仁化、始兴所在区域均为低值区。丰水年 PCD 与枯水年 PCD 的区别在于集中度值差别较大,对比发现丰水年流域 18 站 PCD 全部小于枯水年 PCD;从 18 站 PCD 平均值来看,丰水年为 0.410,枯水年为 0.473,说明降水少的年份降水集中度更高。

丰水年流域各站 PCP 差别较大,空间变化趋势规律不够明显(图 9(c))。东南部的佛冈、英德、清远、三水和西南部的怀集较小,在 133~145 之间,对应时间为 5 月末期和 6 月上旬;北部的乐昌在 165~175 之间,对应时间为 7 月上旬;南部的广宁、四会在 175~185 之间,对应时间为 7 月中旬;其余 10 站所在的广大区域在 155~165 之间,对应时间为 6 月下旬。

枯水年流域 PCP 空间变化趋势较为明晰,大致呈现出从南向北递减的趋势(图 9(d))。南部的三水、四会、广宁、清远在 145~155 之间,对应时间为 6 月中旬;怀集、佛冈、翁源、乐昌在 135~145 之间,对应时间为 6 月上旬;广大中部和北部的英德、阳山、连山、乳源、韶关、仁化、始兴、南雄在 125~135 之间,对应时间为 5 月下旬;西北部的连州、连南区最小,在 115~125 之间,对应时间为 5 月中旬。

从流域丰水年与枯水年 PCP 对比来看,18 站中有 14 站丰水年 PCP 大于枯水年 PCP;从流域平均来看,丰水年 PCP 为 156.5,对应时间为 6 月下旬

初期, 枯水年 PCP 为 135.9, 对应时间为 6 月上旬初期, 即丰水年集中期较枯水年约滞后 20 天。

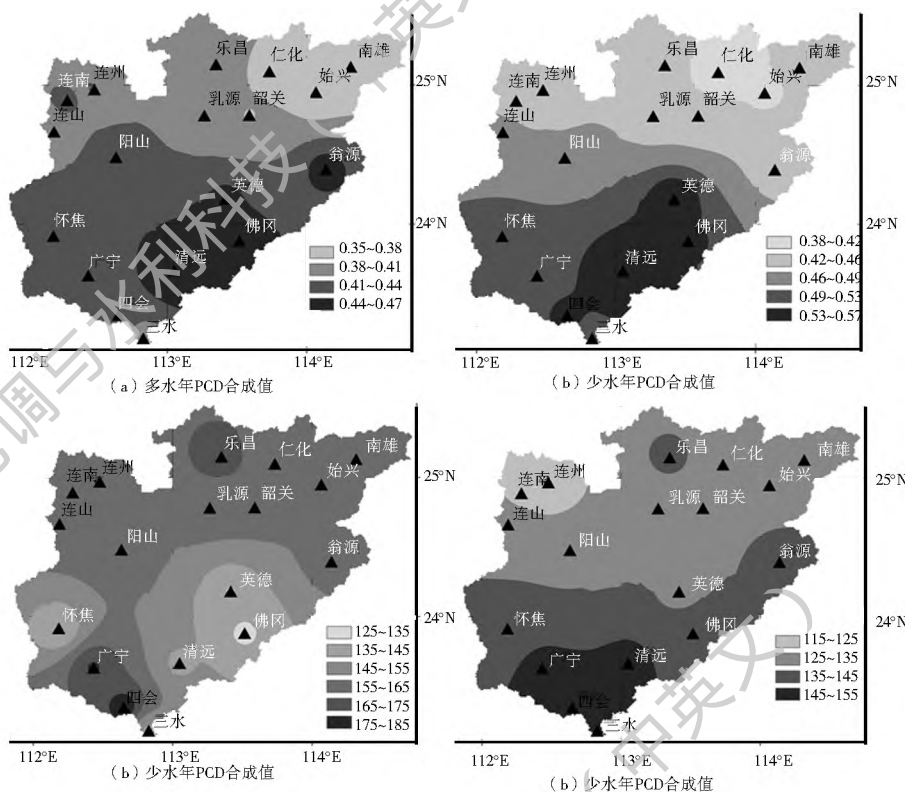


图 9 广东北江流域丰水年、枯水年期间 PCD、PCP 合成值空间分布

Fig. 9 Multi-water years and less-water years composite analysis of PCD and PCP in Beijiang river basin

3 结论

通过对广东北江流域 1965 年-2009 年降水集中度(PCD)和集中期(PCP)多年均值、变异系数、与年降水量相关性、变化趋势、丰水年枯水年合成分析的空间分布进行分析, 得到如下结论:

(1) 年降水平均值及变异系数空间分析表明, 年均降水量总体表现为从东南部的清远-佛冈多雨中心(接近 2 200 mm)向西、北方向递减; 变异系数大致表现为西南-东北对称分布, 中西部区域(英德、阳山、连州、乐昌)年降水量变化幅度较大。

(2) PCD 总体表现为从南向北递减; 变异系数分析表明, 东南部较稳定, 西北部变化幅度较大。PCP 在中北部地区主要为 6 月上旬, 南部地区主要为 6 月中旬; 从长期变化来看, 南部较为稳定, 北部变化幅度较大。

(3) 大部分区域 PCD 与年降水量呈负相关关系, 小部分区域呈正相关关系, 但都不显著。南部区域 PCP 与年降水量呈负相关关系; 北部区域为正相关, 其中, 曲江、乳源、始兴等地相关显著, 即随着降水集中期滞后, 年降水量显著增加。

(4) MK 趋势检验表明, 流域 PCD 呈上升趋势, 其中, 中北部和南部的小部分区域上升显著。总体

来看, PCP 表现为上升, 即降水集中期呈现出滞后的趋势, 但不显著。

(5) 丰水年与枯水年的 PCD 在空间分布上具有相似性, 区别在于集中度值不同, 丰水年 PCD 值小于枯水年 PCD 值, 即降水少的年份降水集中度更高。丰水年流域内 PCP 差别较大, 空间变化趋势不明显; 枯水年 PCP 空间变化趋势较明晰, 大致表现为从南向北递减。对比发现, 大部分站点丰水年 PCP 值大于枯水年 PCP 值; 从流域平均来看, 丰水年集中期较枯水年约滞后 20 天。

参考文献 (References):

[1] 刘占明, 陈子葵. 广东北江流域前汛期降水与全球海温及遥相关的相关性研究[J]. 地理科学. 2014, 34(10): 1239-1246. (LIU Zharr ming, CHEN Zr-shen. Correlational study between the precipitation in the first rainy season in Guangdong Beijiang river basin and the global SST and teleconnections[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(10): 1239-1246. (in Chinese))

[2] 刘占明, 陈子葵, 路剑飞, 等. 广东北江流域降水时空分布及其与 Nino 3 区 SST 相关性分析[J]. 自然资源学报. 2013, 28(5): 786-798. (LIU Zharr ming, CHEN Zr-shen, LU Jiarr-fei, et al. Analysis of correlation between the spatio-temporal distribution of precipitation in Beijiang River basin and SST in Nino 3 [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(5): 786-798. (in

- Chinese))
- [3] 罗律,张广存,吴俊宁. 1965-2010年广东北江流域汛期降雨量的气候特征分析[J]. 广东气象, 2012, 34(3): 13-15. (LUO Ly, ZHANG Guang-cun, WU Jun-ning. Climatic characteristic analysis of precipitation during the flood season in 1965-2010 over Guangdong Beijiang river basin[J]. Guangdong Meteorology, 2012, 34(3): 13-15. (in Chinese))
- [4] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 146-163.
- [5] 刘永林, 延军平, 岑敏仪. 中国降水非均匀性综合评价[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 392-406. (LIU Yong-lin, YAN Jun-ping, CEN Min-yi. Comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(3): 392-406. (in Chinese))
- [6] 张录军, 钱永甫. 长江流域雨季降水集中度和旱涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630. (ZHANG Lu-jun, QIAN Yong-pu. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood producing in the Yangtze River Valley of China [J]. Chinese J. Geophys., 2004, 47(4): 622-630. (in Chinese))
- [7] 杨金虎, 王鹏祥, 白虎志, 等. 中国西北降水年内非均匀性特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 276-281. (YANG Jin-hu, WANG Peng-xiang, BAI Hu-zhi, et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation over Northwest China [J]. Advances in climate change research, 2007, 3(5): 276-281. (in Chinese))
- [8] 杨玮, 何金海, 王盘兴, 等. 近42年来青藏高原年内降水时空不均匀性特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 376-384. (YANG Wei, HE Jin-hai, WANG Pan-xing, et al. Inhomogeneity characteristics of intra-annual precipitation over the Tibetan Plateau in recent 42 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 376-384. (in Chinese))
- [9] 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 Yuan-ping, YANG Tai-bao, MA Jian-guo. Change characteristics of PCD and PCP in the flood season in Pi River valley [J]. Resources Science, 2012, 34(3): 418-423. (in Chinese))
- [10] 邹立尧, 丁一汇, 王冀. 东北强降水时空变化的特征和原因分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1): 137-147. (ZOU Li-yao, DING Yi-hui, WANG Ji. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation long-term changes in Northeast China and causation analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(1): 137-147. (in Chinese))
- [11] 纳丽, 郑广芬, 任少云, 等. 宁夏春、夏、秋季干旱与降水集中期及集中度的关系[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 1015-1021. (NA Li, ZHENG Guang-fen, REN Shao-yun, et al. Relationship of drought with PCD and PCP in Ningxia in spring, summer and fall [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 1015-1021. (in Chinese))
- [12] 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 Yong-qiang, LU Lu, ZHANG Ting-ting, et al. Spatiotemporal variation in precipitation in Zhejiang province based on PCD and PCP [J]. Resources Science, 2013, 35(5): 1001-1006. (in Chinese))
- [13] 刘文莉, 张明军, 王圣杰, 等. 1960-2011年陕西省年内降水分配非均匀性特征及预测[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1877-1887. (LIU Wen-li, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, et al. Intra-annual inhomogeneity of precipitation and its prediction in Shaanxi Province of Northwest China in 1960-2011 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(7): 1877-1887. (in Chinese))
- [14] 刘占明, 陈子燊, 黄强. 基于Copula函数的广东北江流域极端降水指标概率分布特征[J]. 热带地理, 2014, 34(6): 758-766. (LIU Zhan-min, CHEN Zi-shun, HUANG Qiang. Probability distribution behaviors of extreme precipitation indices based on Copula function in Guangdong Beijiang river basin [J]. Tropical Geography, 2014, 34(6): 758-766. (in Chinese))
- [15] 梁胜华, 张灵, 千怀遂, 等. 广东省北江流域坡向与海拔对汛期降水量的影响[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 338-345. (LIANG Sheng-hua, ZHANG Ling, QIAN Huai-sui, et al. Effects of slope and altitude on the precipitation during the flood season in Beijiang river basins of Guangdong province [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(3): 338-345. (in Chinese))
- [16] 姚永慧, 潘志强, 孙英君, 等. ArcGIS地统计分析实用指南[M]. 北京: Arc Info 中国技术咨询与培训中心, 2002. 135-139. (YAO Yong-hui, PAN Zhi-qiang, SUN Ying-jun, et al. ArcGIS geostatistical analyst practical guide [M]. Beijing: Arc Info technology consulting and training center in China, 2002. 135-139. (in Chinese))
- [17] Su B D, Xiao B, Zhu D M, et al. Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China: 1960-2003 [J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 50(3): 479-492.
- [18] Mann H B. Nonparametric test of randomness against trend [J]. Econometrica, 1945, 13: 2-5.
- [19] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349: 350-363.