

谢鑫昌,杨云川,田忆,等.广西降水非均匀性多尺度特征与综合评价[J].地球科学进展,2019,34(11):1152-1164.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2019.11.1152.[Xie Xinchang, Yang Yunchuan, Tian Yi, et al. Multi-scale characteristics and comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in Guangxi[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(11): 1152-1164. DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2019. 11. 1152.]

广西降水非均匀性多尺度特征与综合评价*

谢鑫昌¹,杨云川^{1,2,3*},田 忆¹,廖丽萍^{1,2,3},韦钧培¹,周津羽¹,陈立华^{1,2,3}

(1. 广西大学土木建筑工程学院,广西 南宁 530004;2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室,广西 南宁 530004;3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室,广西 南宁 530004)

摘 要:针对广西降水时空分配不均、旱涝灾害频发的现象,开展降水非均匀性多尺度特征和综合评价,可为区域应对旱涝灾害及水资源智慧管理提供科学支撑。基于1961—2017年广西87个格点的逐日降水资料,采用降水集中度(PCD)、降水集中期(PCP)指数构建日、候、旬、月、季多时间尺度的降水非均匀性等级评价体系,借助R/S分析和地理空间分析方法讨论了广西时空演变和气候分区特征。研究表明:日、候、旬尺度的PCD和PCP时空变化特征相对一致,较月、季尺度更能表达广西降水的非均匀性特征;广西降水的PCD历时变化在东北地区主要呈现递增趋势,而在西南地区主要呈递减趋势,其未来一段时期的变化趋势与历时演变相同;广西降水的PCD空间分布存在显著的空间自相关性和分层异质性,主要表现在PCD的均值、变异系数和发生频率上;广西降水的综合非均匀性总体呈现东北部地区高度分散、南部地区高度集中、西北和中部地区则为轻度集中或分散的分布格局。月以内的时间尺度是表达广西降水非均匀性的最佳尺度,若要考虑候、旬尺度更加稳定和日尺度更加精细的优势,则采用候尺度进行逐日滑动计算分析将是最佳方式。

关 键 词:降水集中度;降水集中期;降水非均匀性;多尺度特征;等级评价体系

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2019)11-1152-13

1 引 言

伴随着全球气温升高,区域性极端气候事件频发^[1,2],降水作为全球水和能量循环的关键要素之一^[3-5],呈现出更为显著的多尺度时空非均匀性,其剧烈的时空变化和变率不断地增加着区域性洪旱灾害的风险^[6,7],由此必然会造成农业减产、城市雨涝、山体滑坡、人民生命安全和财产损失等多方面的严重后果^[8,9]。因此,准确掌握区域降水的多尺度时空非均匀性特征^[10],对进一步明晰水文变异、水资源演变、调控及应对旱涝、地质灾害预警与防

治、水资源智慧管理以及理解气候变化效应等均具有重要意义^[11]。针对我国降水呈“南涝北旱^[12]”空间非均匀性总体格局以及年内的季节乃至月、旬、候、日等多尺度分异特征,对区域降水分布的时段、频次和强度等要素开展精细化分析至关重要^[13,14],该问题可采用降水集中度(Precipitation Concentration Degree, PCD)和降水集中期(Precipitation Concentration Period, PCP)指数来定量描述。

PCD和PCP指数最早是由Zhang等^[15]为分析和研究长江流域降水时空分配特征、集中程度与旱

收稿日期:2019-09-05;修回日期:2019-10-25。

* 基金项目:国家自然科学基金项目“基于AquaCrop模型的甘蔗干旱机制模拟及旱灾风险评估方法研究”(编号:51609041);广西自然科学基金项目“广西甘蔗的骤发性干旱响应机理与三维度量及前兆信号诊断研究”(编号:2019GXNSFAA185015)资助。

作者简介:谢鑫昌(1995-),男,广西灵山人,硕士研究生,主要从事农业水资源问题研究。E-mail: xiexinchanggx@163.com

* 通信作者:杨云川(1982-),男,宁夏中卫人,副教授,主要从事农业与城市生态水文学研究。E-mail: yyc_sciences@163.com

涝相关关系而提出的。近年来,国内外许多学者采用这两个指标来探讨各区域降水非均匀性的时空变化特征。国内代表性的有:曹永强等^[16]、庞欣欣^[12]、刘占明等^[17]和张波等^[7]基于 PCD 和 PCP 指数,通过水文变异和空间插值的方法分别分析探讨河北省、淮河流域、北江流域和贵州山区等典型国内气候研究区的降水非均匀性时空变化特征,结果表明我国大部分地区 PCD 越高、PCP 越晚,PCD 越低、PCP 则提前。国外学者如 Silva 等^[6]、Abolverdijee 等^[8]、Yesilirmak 等^[11]和 Chatterjee 等^[18]基于月 PCD 和 PCP,分别对巴西里约、伊朗法尔斯、土耳其西部和印度孟加拉邦等区域的降水分配格局进行了分析,发现当地降水分配受地形、气候和人类活动等因素共同制约。然而,上述研究主要针对单一时间尺度降水进行了 PCD 分析,仅通过 PCD 数值大小来反映区域降水非均匀性空间变化,对 PCD 的空间变化等级和降水非均匀性分区方面的论述相对缺乏。为此,Simões 等^[19]利用 PCD 建立降水结构特征分区,对巴伊亚州进行了降雨均质与非均质气候区划分,并评估年降水量与月降水量的同质性;刘永林等^[14,20]在 PCD 和 PCP 基础上,结合干旱指数,探讨降水非均匀性与我国气象旱涝灾害的对应关系,发现气象旱涝与 PCD 显著相关,并通过建立全国降水非均匀性等级评价体系,划分了 7 个 PCD 气候等级评价区域。综上所述,应对区域日益增强的降水时

空变异而引发的旱涝灾害,结合各区域特征构建降水非均匀性评价等级体系,获得 PCD 等级和气候分区极为必要;此外,还有必要讨论年内的季节乃至月、旬、候、日等多个尺度的 PCD 和 PCP 特征,以便确定针对研究目标的最佳表达尺度。

广西属于亚热带季风湿润区,大部分区域年降水量可达 1 500~2 000 mm,是我国降水资源最丰富的地区之一^[21];但区域降水时空分配很不均匀,洪旱灾害频繁发生^[22],特别是全球气候变暖导致的降水非均匀性日益加剧,常年洪旱灾害并存且多次急转,社会经济损失巨大^[21]。因此,本文通过对季、月、旬、候、日等多个时间尺度的 PCD 进行尺度效应分析,进而选择适宜尺度的 PCD 构建广西降水非均匀性评价体系,并讨论区域降水非均匀性的时空变化格局和相应的气候分区。

2 数据与方法

2.1 数据

本文采用的降水数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>)的《中国地面降水日值 0.5°×0.5°格点数据集(V2.0)》;赵煜飞等^[23]在全国范围对该数据集进行了精度评估,表明其具有良好的精度和应用价值。在此,通过 Python 编程从该数据集中批量提取广西地区 1961—2017 年 87 个 0.5°×0.5°格点的逐日降水资料(图 1),并对个别缺测日进

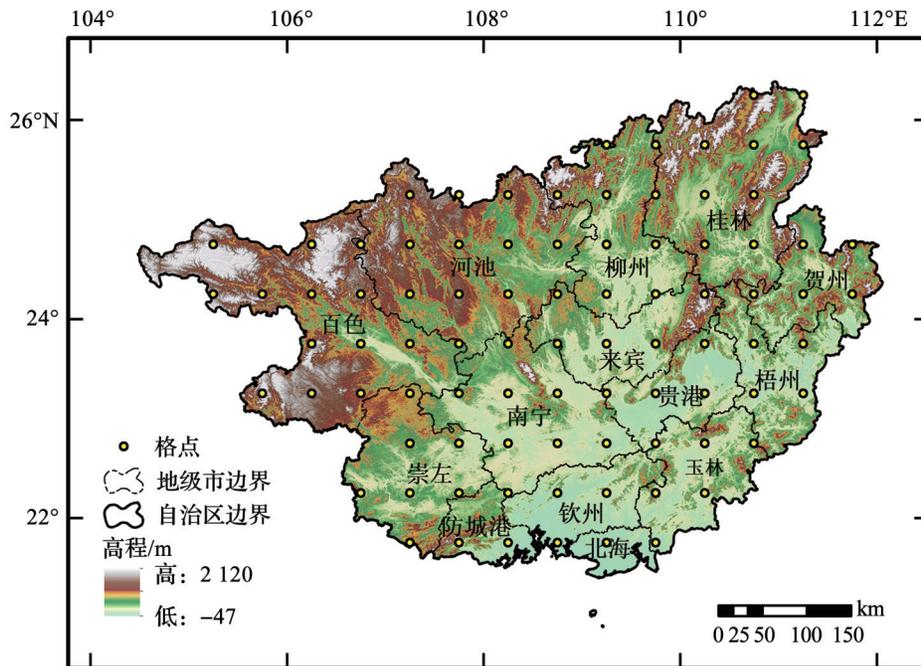


图 1 广西降雨格点空间分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of rainfall grid points in Guangxi

行多年平均值插补,由于闰年2月29日降雨量在同一年占比很小(0~0.32%),对广西历年降雨非均匀性影响不显著,考虑计算的方便,分析中剔除了闰年2月29日的降水数据。

2.2 研究方法

2.2.1 集中度与集中期方法

采用张录军等^[15,24]提出的PCD和PCP指数进行计算,通过向量矩阵分析方法来定义研究区域单点降水量时空非均匀性分配的特征参数。其中,PCD指数反映的是研究区域内单点相应时段内的降水量集中程度,PCP指数则用来反映研究区域内单点年内降水量最大值所出现的具体时间;PCD在不同时间尺度分配采用魏鹤举^[25]提出的计算公式[公式(5)]。具体计算过程如下:

$$PCD_i = \frac{\sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2}}{R_i}, \quad (1)$$

$$PCP_i = \tan^{-1}\left(\frac{R_{xi}}{R_{yi}}\right), \quad (2)$$

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

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

$$\theta_j = [j - (\frac{n}{2} + 0.5)] \times \frac{\pi}{(\frac{n}{2} - 0.5)}, \quad (5)$$

式中: i 为研究时段年份($i=1961, 1962, 1963, \dots, 2017$); j 为年内的时间尺度[日(365天)、候(73候)、旬(36旬)、月(12月)、季(4季)]; n 为第 i 年内总的的时间尺度个数; PCD_i 和 PCP_i 则为第 i 年所对应的研究区域内单点的降水集中程度和降水集中期(日、候、旬、月、季); r_{ij} 为第 i 年内相应时间尺度对应的降水量; θ_j 则为第 i 年内相应时间尺度所对应的矢量角。其中, PCD_i 的取值范围为0~1,若其值接近于1,表明研究区域内单点降水量集中在年内某一个相应的时间尺度; PCD_i 值越接近于0,则表明研究区域内单点降水量在年内分配均匀。 PCP_i 表示合成的时间方位角,可以很好地反映研究区域内单点第 i 年内最大降水量出现时间。

2.2.2 降水非均匀性评价等级、指标与方案确定

文中采用刘永林等^[14]提出的降水非均匀性评价方案对广西PCD进行等级划分。具体地,把1961—2017年按30年一个阶段,共分为28个气候阶段(1961—1990年,1962—1991年, ..., 1988—2017年),其评价等级及指标的确定流程如下:

(1)在进行评价等级阈值确定之前,必须对

PCD进行分布检验,因为在气象统计学中,气象要素变量需要服从正态分布,对于每个气候阶段的PCD值均要符合该假设要求。所以,每个气候阶段计算过程中,可以通过PCD值的偏度系数、峰度系数进行PCD要素的正态分布判断,其判断标准需要符合下述判别式:

$$|g_1| > 1.96 \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}, \quad (6)$$

$$|g_2| > 1.96 \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}, \quad (7)$$

式中: g_1 和 g_2 分别为对应各气候阶段的偏度系数、峰度系数, n 为各个气候阶段总气象要素个数($n=87 \times 30=2610$)。如果满足上述2个判别式,则表明相应气候阶段PCD值均不服从正态分布,而是遵从偏态分布。

(2)由步骤(1)得到相应气候阶段若不遵从正态分布,需要对其进行正态化处理。其中正态化处理的方法有平方转换、立方转换、平方根转换、立方根转换和反正弦转换等多种转换方式,对各气候阶段的PCD进行正态化处理,记原始序列为 X_i ,并对处理后的序列定为 Y_i ,重新对转换后的新序列进行正态分布检验,对比各种方法的正态分布检验结果,选取最优。若最优结果仍不满足正态分布要求,需要对转换后的PCD要素值,进行标准化处理,按照Z指数标准正态化转换:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \phi_i + 1\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6}, \quad (8)$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n\sigma^3}, \phi_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}, \quad (9)$$

式中: Z_i 为经过标准正态转换的气象要素序列, C_s 为偏度系数, ϕ_i 为气象要素序列标准变量, x_i 为第 i 个气象要素值, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 为气候要素均方差, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 为气候要素均值。标准正态化的PCD序列值即为 Z_i 。

(3)根据步骤(2)对PCD原始序列标准正态化后,PCD气象要素值基本遵从正态分布,满足假设要求。由于降水非均匀性分布与旱涝的发生存在一定相关关系,根据刘永林等^[14]提出的评价等级方案,可以参考旱涝指数Z的评价等级划分广西区域PCD降水集中度等级。将PCD等级共划分为高度集中、中度集中、轻度集中、正常、轻度分散、中度分散和高度

分散 7 个。将各个气候阶段标准正态化后的 Z_i 值分别从小到大依次排列(共 $n=2\ 610$ 个气象要素值),并参考 Z 指数评价等级累积频率,得到其相应的 Z 指数,并通过公式(10)转换为原序列 PCD 值:

$$X_i = \sin(Z_i\sigma + \bar{y}), \quad (10)$$

式中: $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, y_i 为经过第一次正态转换后的 PCD 值。在每个气候阶段计算过程中,往往很难存在与相应频率对应的单一气象值,则可以取该频率微小变动范围内 PCD 均值作为每个气候阶段相应频率下的 PCD 值。最后通过取 28 个气候阶段相应频率 PCD 的平均值作为相应累

积频率的阈值,即为各个等级所对应的阈值。

通过上述降水非均匀性等级区划阈值的确定方案,分别从日、候、旬、月、季 5 个时间尺度进行相应的降水非均匀性等级划分,其划分结果如表 1 所列。可观察到日、候、旬 3 个时间尺度的对应评价等级划分阈值变化相对不大,阈值范围为 0.245~0.623;但月、季尺度间的阈值差异较大,月尺度阈值范围为 0.209~0.573,季尺度范围为 0.153~0.490。初步表明日、候、旬尺度属同一聚类,且其阈值变化幅度大于月、季尺度,采用日、候、旬尺度进行广西降水非均匀性评价具有明显的效果,月、季尺度虽然阈值差异较大,但采用其进行广西区域降水非均匀性评价效果差异不显著。

表 1 各时间尺度非均匀性评价等级表
Table 1 Precipitation heterogeneity evaluation grades of each time scale

等级	类型	实际频率/%	PCD(日)	PCD(候)	PCD(旬)	PCD(月)	PCD(季)
1	高度集中	5	PCD>0.623	PCD>0.617	PCD>0.612	PCD>0.573	PCD>0.490
2	中度集中	10	0.575<PCD≤0.623	0.568<PCD≤0.617	0.561<PCD≤0.612	0.524<PCD≤0.573	0.438<PCD≤0.490
3	轻度集中	15	0.526<PCD≤0.575	0.519<PCD≤0.568	0.511<PCD≤0.561	0.472<PCD≤0.524	0.390<PCD≤0.438
4	正常	40	0.407≤PCD≤0.526	0.399≤PCD≤0.519	0.390≤PCD≤0.511	0.346≤PCD≤0.472	0.280≤PCD≤0.390
5	轻度分散	15	0.342≤PCD<0.407	0.334≤PCD<0.399	0.325≤PCD<0.390	0.279≤PCD<0.346	0.223≤PCD<0.280
6	中度分散	10	0.274≤PCD<0.342	0.265≤PCD<0.334	0.254≤PCD<0.325	0.209≤PCD<0.279	0.153≤PCD<0.223
7	高度分散	5	PCD<0.274	PCD<0.265	PCD<0.254	PCD<0.209	PCD<0.153

3 尺度效应讨论

3.1 PCD 尺度效应讨论

对各尺度的年均 PCD、标准差(Standard Deviation, STD)、变异系数(Coefficient of Variation, CV)统计整理,由表 2 可知:①日、候、旬尺度的年均 PCD, STD 和 CV 相应的最大值、最小值和均值差异不明显,结果相近,其波动范围均在 0.008~0.0158,而月、季尺度变化范围为 0.0034~0.1151,说明月、季尺度的差异相对显著;②日、候、旬尺度各统计参数对应的最大值、最小值和极差值(Range)在 0.0002~0.0048 范围内变化,而月、季尺度极差值明显较前者大,均在 0.0134~0.1257 范围内;③由年均 PCD 的极差值波动变化可知,日、候、旬尺度的 PCD 值均在 0.22 以上,而季尺度仅为 0.0926,表明季尺度的尺度效应变化不明显。综上可得,日、候、旬尺度评价效果具有同一聚类属性,而月、季尺度间差异较大,且与前者间差异明显,相似性差,这表明时间尺度越精细越能反映区域降水非均匀性变化^[14];日、候、旬 PCD 波动范围相对月、季尺度显著,适用于城市

表 2 各时间尺度 PCD 均值、STD、CV 统计表
Table 2 statistical tables of PCD mean value, STD and CV of each time scale

时间尺度	最大值	最小值	均值	极差值
日	STD	0.1192	0.0721	0.0965
	年均 PCD	0.5557	0.3288	0.4589
	CV	0.2871	0.1302	0.2145
候	STD	0.1199	0.0730	0.0973
	年均 PCD	0.5488	0.3221	0.4519
	CV	0.2918	0.1338	0.2200
旬	STD	0.1200	0.0732	0.0978
	年均 PCD	0.5434	0.3130	0.4442
	CV	0.2978	0.1350	0.2253
月	STD	0.1215	0.0805	0.1013
	年均 PCD	0.5000	0.2781	0.4024
	CV	0.3329	0.1611	0.2576
季	STD	0.1389	0.0845	0.1047
	年均 PCD	0.3849	0.2923	0.3267
	CV	0.3810	0.2435	0.3209

或行政区划等小区域尺度,甚至大区域尺度,如曹永强等^[26]、苗云玲等^[27]和叶正伟等^[28]在降水时空分

配研究中均有显著效果,而月、季尺度适用范围局限在全国或跨区域等空间尺度,具有较好效果^[29-31]。因此,采用日、候、旬尺度PCD对广西降水非均匀性综合评价具有显著效果。

3.2 PCP 尺度效应讨论

由PCP空间分布(图2a~e)可知,日尺度中广西东北部降水主要集中在6月11~22日,包括桂林、贺州、柳州及梧州等地区,西部及南部降水集中在8月11~26日,以百色、崇左、防城港、钦州和北海为主,中部地区降水则主要集中在7月7~30日,主要城市有南宁、来宾、贵港和玉林;候尺度中广西东北部降水主要集中在33~36候,中部地区集中在37~46候,西部地区则集中在47~49候,空间分布与日尺度相似;旬尺度中广西东北部主要集中在6月中下旬,主要在桂林和贺州市,中部大部分地区集中在7月中下旬,如柳州、来宾和贵港等城市,南宁和河池部分地区则主要集中在8月中旬,广西西部的防城港、钦州和百色降水集中在8月下旬;月PCP中东北部只有桂林部分地区降水集中在6月,桂

林、贺州等大部分地区集中在7月,其余地区降水均在8月份;而季尺度中全区降水集中在夏季。综上,广西最大降水时间总体由东北向西部推迟^[32],日、候、旬尺度存在明显的相似属性,对集中期的空间异质性表达良好;而月、季差异大,集中期总体呈现空间均一化,对降雨时空非均匀性的表达相对较弱。

根据各尺度的PCP空间分析可知,广西近57年来最大降水主要集中于6~8月,57年来最大降水集中月份的月内PCP分布情况如图2f~h所示,图2f中6月最大降水的PCP空间分布总体呈“广西西部向东部推迟”的变化趋势,广西西部主要集中于6月7~15日,如百色、河池、崇左和钦州等大部分城市,东部如桂林、贺州及梧州等城市,主要集中在6月15~20日;而7月最大降水的PCP空间分布(图2g)趋势与6月分布相反,呈“西部向东部提前”的空间特征;8月内的PCP空间分布(图2h)则与6月分布特征相似,但柳州、来宾等地区也出现了不同程度的时间推迟。

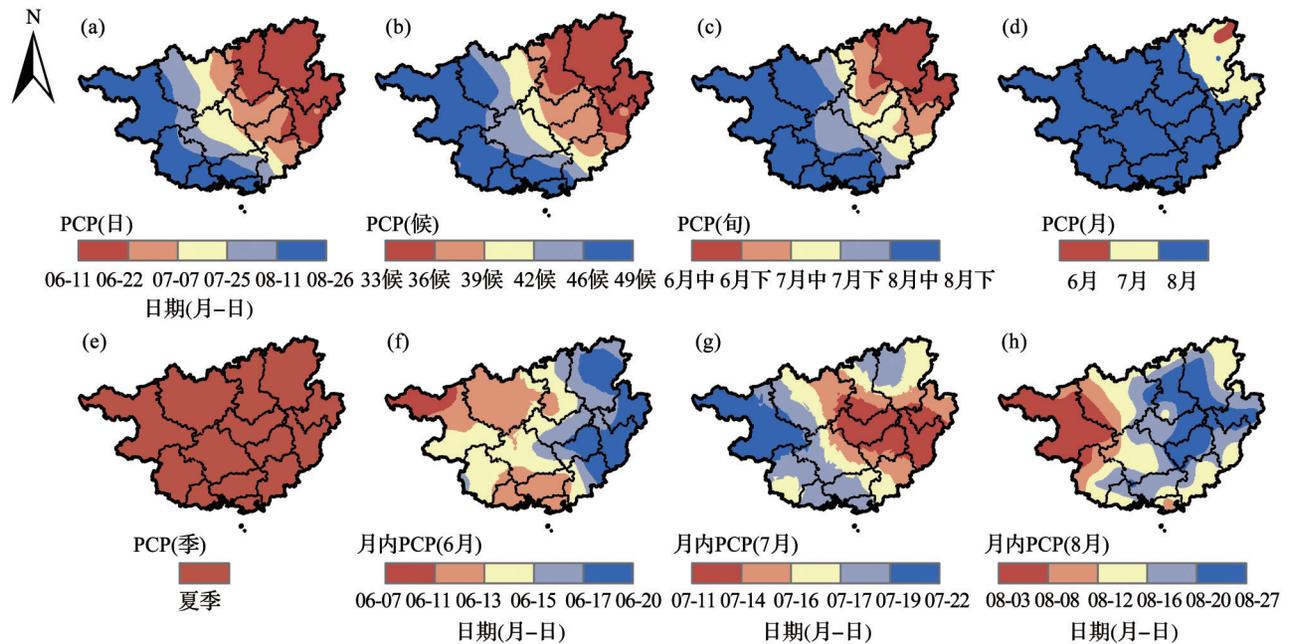


图2 不同PCP时间尺度效应变化图

Fig.2 Time scale effect changes of different PCP

从PCP尺度效应分析可知,日、候、旬尺度具有很好的相似性^[33],在广西降水非均匀性研究中具有显著效果,对区域旱涝灾害事件的应对和防治具有更好的科学支撑价值;而月、季尺度则适合在多年及全国的时空尺度上^[33],对旱涝灾害长期演变规律的评价具有较好的用途。

4 广西降水非均匀性综合评价

广西降水非均匀性综合评价分析主要从时间和空间上探讨广西区域降水非均匀性变化特征,利用PCD降水非均匀性等级评价体系对广西进行相应等级的气候区划分。由多尺度效应分析可知,

日、候、旬尺度具有较好的一致性,能较精细地反映广西降水非均匀性,所以选用日、候尺度为代表;而月、季尺度对广西的研究描述较粗,选用月尺度为代表,分别从日、候、月尺度分析广西区降水非均匀性的时空分布特征,建立广西降水非均匀性综合评价分区,进一步探讨各尺度对广西降水非均匀性综合评价研究的适用性。

4.1 降水非均匀性时间变化

通过线性倾向率^[34]分析和表征 PCD 时间序列历史趋势变化,采用 R/S 分析中的赫尔斯特指数^[35]

揭示地区气候要素序列是否具有持续性或反持续性,即分析和表征 PCD 时间序列未来趋势特征。

由图 3a~c 可知,日尺度中河池西北部、崇左、防城港西北部、钦州东北部、河池西南部、南宁、来宾西南部、贵港南部及玉林中部等主要地区的 PCD 时间序列呈现出整体递减趋势,由广西西部向东部递减,广西其他地区则呈现出递增的历史趋势,由南方向东北方向逐渐递增^[32,36];候尺度历史趋势与日尺度相近,但差异不大;月尺度中河池北部出现 PCD 序列整体递增的趋势。

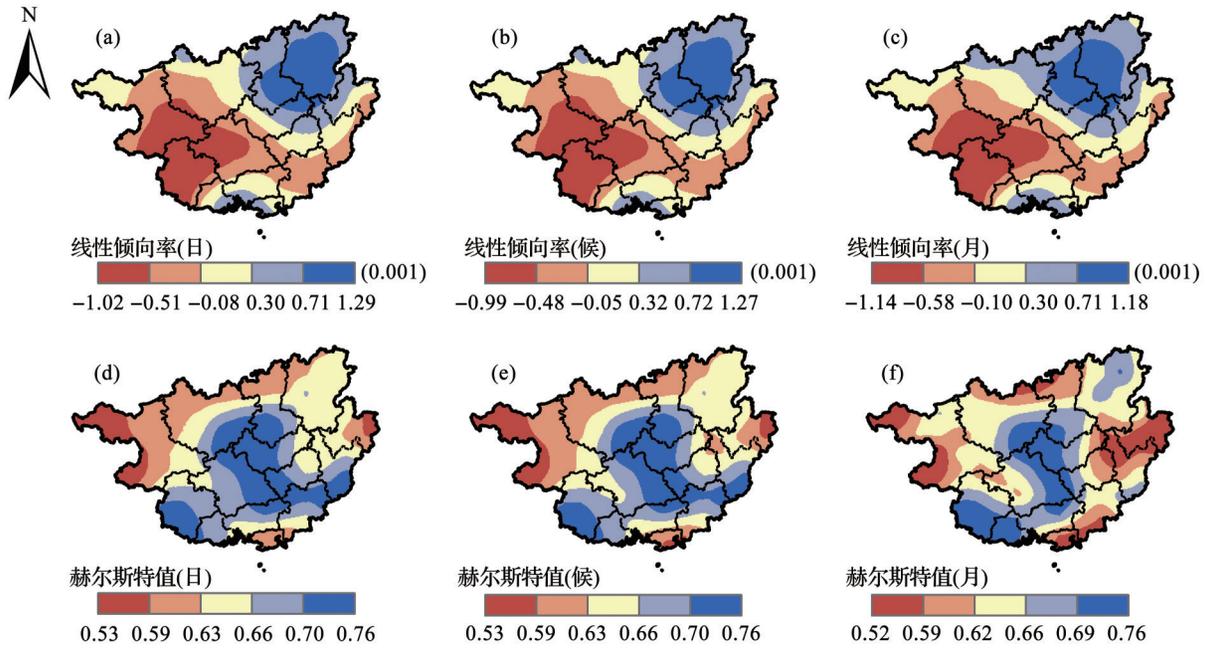


图 3 日、月、候尺度 PCD 时间趋势空间分布图

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of daily, monthly and pentad scale PCD

从图 3d~f 可知,日、候、月 PCD 的赫尔斯特指数主要集中在 0.52~0.76,三者具有相似的空间分布格局,表明 PCD 序列未来变化趋势与过去的变化趋势相一致。广西河池西北部、崇左、防城港西北部、钦州东北部、河池西南部、南宁、来宾西南部、贵港南部、玉林中部及梧州东南部等地区属于历史递减区,这些地区未来保持与过去同样的递减趋势;而广西其余地区属于历史递增区,表明该区未来呈现与过去相同的递增趋势。

4.2 降水非均匀空间特征

空间分异性是指层内方差小于层间方差的地理现象,如气候分区、经济区差异、地理分区等,而“层”为统计学概念对应于地理统计中的类与子区域,在地理探测器分析中以 q 统计量衡量其空间分异显著性^[37]。空间自相关主要通过全局及局部两

个指标衡量,全局主要反映整个研究区的自相关模式;局部则主要通过计算每一个空间单元与邻近单元就某一属性的相关程度^[38-40]。依据广西降水非均匀性评价体系,建立日、候、月 PCD 平均等级空间分区(图 4),并对日、候、月尺度 PCD 进行计算分析,整理得到各时间尺度相应的 PCD 空间分异性和自相关性数值统计表(表 3 和表 4)。

表 3 中,日、候、月 PCD 对应的 q 统计量均在 0.65 以上,且通过 p 显著性检验,具有较强的空间分异性,说明 PCD 气候区等级划分揭示了广西降雨具有显著的空间分层异质性,其与广西气候变化复杂的区域性与局地性特征密切相关^[41]。由表 4 可知,日、候、月尺度 Moran's I 指数、z 得分均为正值,且通过 p 检验,说明广西区域 PCD 具有显著的空间自相关性,形成这样的空间模式,与广西地处低纬度地

区,南邻海洋,属亚热带季风区,降水分配不均,洪旱灾害频繁密不可分^[22]。根据全局 Moran's I 指数统计结果,可知广西 PCD 分布具有很强的空间聚集现象,但不能反映空间聚集分布情况。因此,通过 Lisa 图(图 5),能够较好地反映具有统计学显著性的高聚集区、低聚集区及空间异常值^[42],其中日尺度下高一高聚集区主要分布在百色中部、河池西部及防城港南部,低—低聚集区则分布在桂林东北部;候尺度与日尺度相似,但低—低聚集区影响到柳州东北部;月尺度中高—高聚集区影响钦州西南

部,低—低聚集区与候尺度相似;日、候、月尺度中不存在空间异常值(即高一低或低—高区),说明广西大部分地区的 PCD 空间自相关性为不相关区域,但部分地区则主要为高值聚集(空间正相关显著)。

综上可得,广西区域降水集中度具有较强的空间分异性与空间自相关性,说明广西降水非均匀性在空间上存在显著的气候分区差异,因此通过 GIS 插值的方式进一步分析广西降水非均匀性等级空间变化,并通过空间叠置绘制降水非均匀性综合评价气候分区图,可直观反映广西降水分配格局。

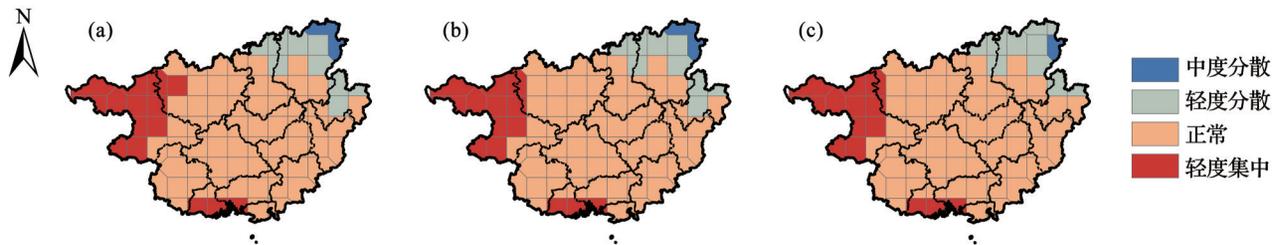


图 4 日、候、月尺度 PCD 平均等级空间分异图

Fig. 4 Spatial differentiation of average grades of daily, pentad and monthly PCD

(a) 日尺度 PCD 平均等级空间分异图; (b) 候尺度 PCD 平均等级空间分异图; (c) 月尺度 PCD 平均等级空间分异图

(a) Spatial differentiation map of average grade of daily scale PCD; (b) Spatial differentiation map of average grade of pentad scale PCD;

(c) Spatial differentiation map of average grade of monthly scale PCD

表 3 日、候、月尺度 q 统计量数值表
Table 3 q statistical values of daily, pentad and monthly scales

时间尺度	q 统计量	p 检验值	显著性
日	0.703150	0	显著
候	0.709575	0	显著
月	0.680029	0	显著

表 4 日、候、月尺度 Moran's I 数值表
Table 4 Moran's I values of daily, pentad and monthly scales

时间尺度	Moran's I	z 得分	p 检验值	显著性
日	0.715481	8.349583	0	显著
候	0.761723	8.881113	0	显著
月	0.757252	8.823312	0	显著

4.2.1 降水非均匀性评价等级空间变化

由图 6a 可知,日尺度下广西降水非均匀性空间等级变化特征主要呈现出“广西东北部分散,中部正常,西北部及西南部集中”的空间格局,与局部 Lisa 图高聚集特征具有很好的一致性。广西东北部地区则主要以中度分散和轻度分散等级为主,主要呈现为西南向东北递减的趋势,轻度分散区则主要

集中在桂林东北部,中度分散区则分布在桂林中部、贺州北部及柳州东北部;中部大部分地区则主要以正常区为主,分布在柳州西南部、桂林西南部、贺州南部、梧州、来宾、贵港、玉林、河池东部、南宁、百色东南部、崇左、钦州北部、防城港北部及北海东北部等多个城市区域;西北部及西南部以轻度集中为主,主要分布在河池南部、白色西北部、防城港南部、钦州南部及北海西南部等区域,由此可见,这些地区的降水较为集中,应加强对这些地区洪涝灾害的监测与预防。

由图 6b 变异系数空间分布可知,广西降水非均匀性的稳定性主要呈现为“广西区域整体稳定,东部、北部较西部、南部波动”的空间分布特征。波动较大的区域如桂林北部、柳州、来宾中部、南宁东部及贵港西部等地区,需要注意降水的时空调节,以便于有效地应对旱涝急转灾害的发生。

4.2.3 降水非均匀性等级发生频率空间变化

主要针对广西日尺度 PCD 的集中、分散、正常等级的发生频率进行分析研究,根据刘永林等^[14]提出的空间分析方案,将 0~20% 的发生频率定义为极少发生,20%~40% 定义为较少发生,40%~60% 定义为经常发生,60%~80% 定义为频繁发生,80%~

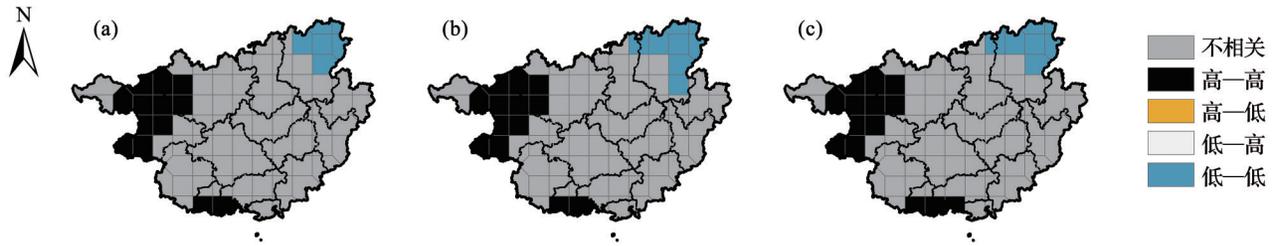


图 5 日、候、月尺度 PCD 局部 Lisa 聚类图

Fig.5 Partial Lisa clustering diagram of daily, pentad and monthly PCD scales

(a) 日尺度; (b) 候尺度; (c) 月尺度

(a) Daily scale; (b) Pentad scale; (c) Monthly scale

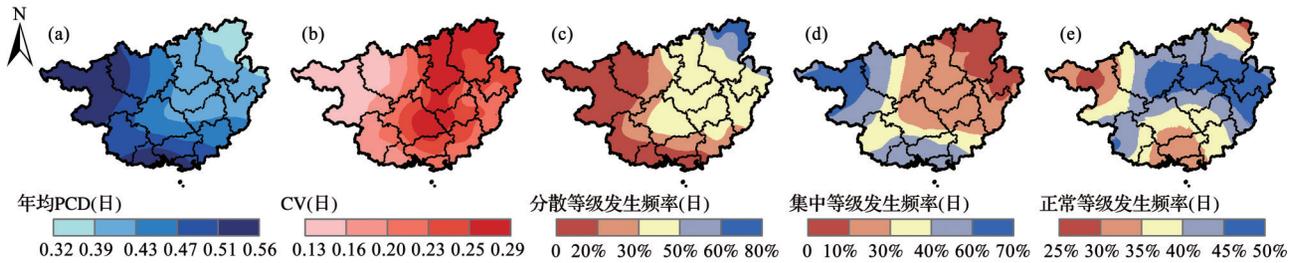


图 6 PCD 空间非均匀性变化(日尺度)

Fig.6 Spatial heterogeneity variation of PCD (daily scale)

100% 定义为极频繁发生。

(1) 分散等级发生频率空间分布主要呈现“东北高、中部及西部低”的空间特征格局(图 6c), 其中只有桂林东北部发生频率在 60%~80%, 属于降水非均匀性分散等级频繁发生区域; 柳州北部、桂林中部、贺州北部及南宁、来宾、贵港交界处属分散等级经常发生区, 柳州南部、来宾、南宁、贵港、玉林、河池东部和崇左东北部属于分散等级较少发生区; 广西其余地区则是极少发生区。

(2) 集中等级发生频率空间分布格局主要呈现为“东北低, 西南及西北高”(图 6d), 桂林、柳州、来宾北部、贺州及梧州北部为集中等级极少发生区; 而河池中部、来宾西部、南宁、贵港、玉林北部、南宁、崇左中部及钦州北部属于集中等级较少发生区; 只有百色中部及河池西北部为集中等级频繁发生区, 其余区域为集中等级经常发生区。

(3) 正常等级空间分布特征主要表现为“东北、西北及南部低, 中部高”(图 6e), 桂林东北部、河池西部、防城港、钦州、北海、崇左东部、南宁南部、贵港西南部及玉林西南部属于正常等级较少发生区, 广西其余大部分地区则主要为正常等级经常发生区。

4.3 综合评价

通过考虑不同时间尺度广西降水非均匀性等级的 PCD 多年平均等级(图 6a)、发生频率(图

6c~e)、变异系数(图 6b)等空间分布变化特征, 采用 GIS 空间叠置的方法, 得到不同时间尺度下广西降水非均匀性综合评价图(图 7)对广西区域降水进行评价与分类。

日尺度综合评价图(图 7a)中广西降水高度集中区分布在防城港、钦州及北海, 中度集中区则集中在南宁南部及部分钦州、防城港地区, 轻度集中区分布在崇左东部、南宁中部、玉林、百色中部和柳州南部等地区; 广西高度分散区以桂林及贺州东北部为主, 中度分散区则集中在桂林中部、贺州南部及梧州北部, 轻度分散区主要分布在河池中部、柳州北部、贵港北部及来宾东、西部等地区; 广西其余地区则主要以正常区为主。候、月尺度与日尺度相似(图 7b 和 c), 但月尺度中降水轻度集中区出现向东移动、中度集中区向北部移动的现象。

对广西降水非均匀性进行综合评价后, 需要检验综合评价的分区准确性, 因此, 绘制不同尺度不同气候分区的等级变化特征图(图 8)分析广西降水非均匀性综合评价准确性。

(1) 正常区: 日尺度正常年共有 30 年, 轻度分散年 5 年, 中度分散年 7 年, 轻度集中年 8 年, 中度集中年 7 年, 高度集中年 1 年; 候尺度正常年份 29 年; 月尺度正常年份 20 年。日、候、月尺度中正常年份占大多数。

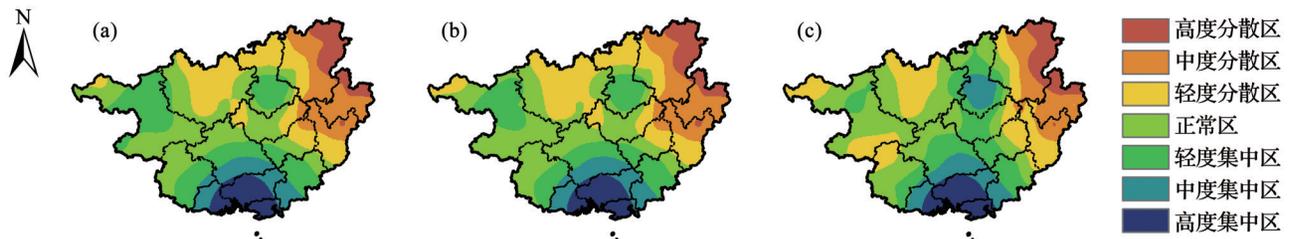


图 7 1961—2017 年广西区域综合评价图

Fig 7 Guangxi regional comprehensive evaluation map 1961-2017

(a)日尺度;(b)候尺度;(c)月尺度

(a) Daily scale; (b) Pentad scale; (c) Monthly scale

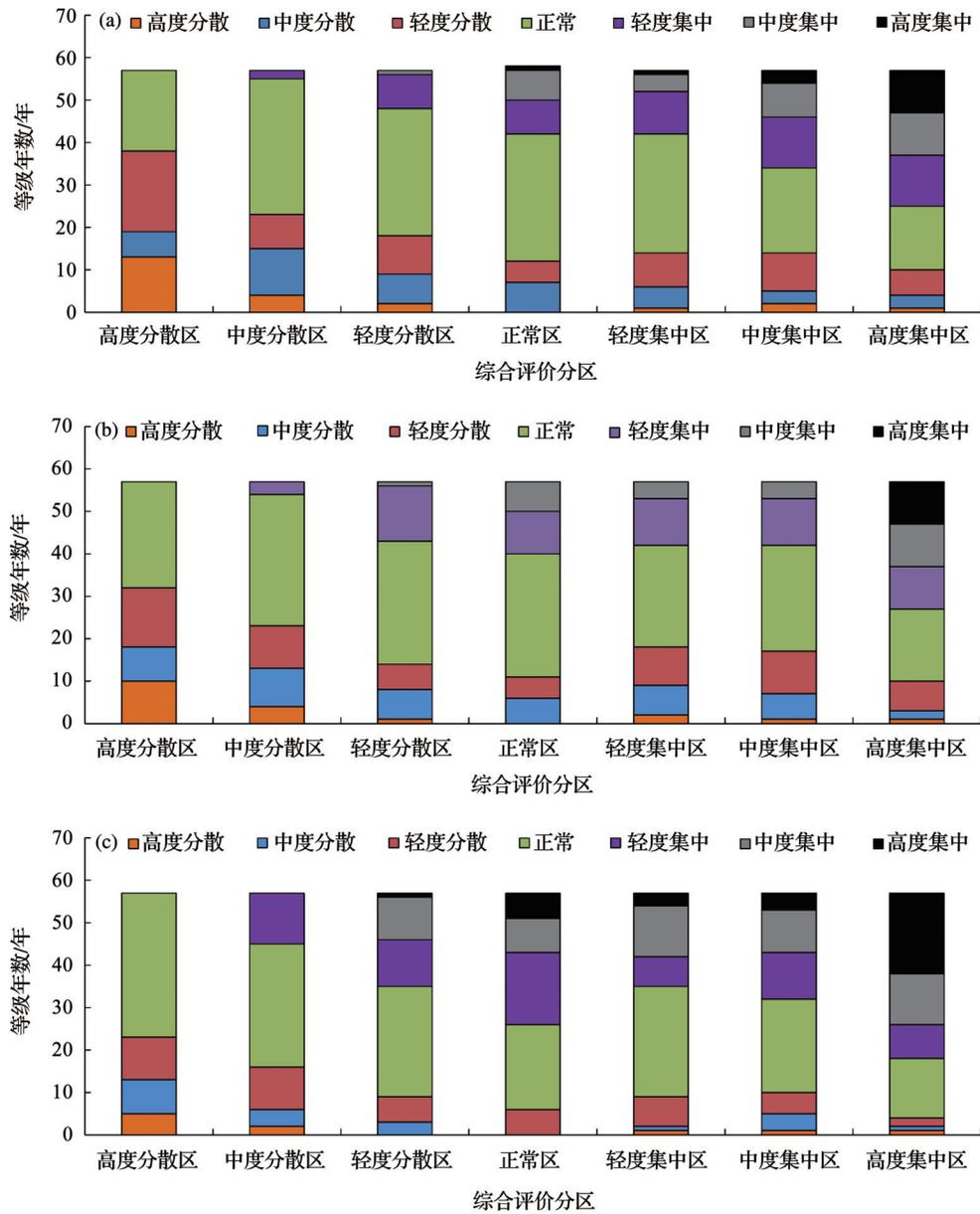


图 8 1961—2017 年不同时间尺度区域等级变化图

Fig. 8 Grading changes of different time scales from 1961 to 2017

(a)日尺度;(b)候尺度;(c)月尺度

(a) Daily scale; (b) Pentad scale; (c) Monthly scale

(2)轻度分散区:日尺度正常年 30 年,轻度分散年 9 年,中度分散年 7 年,高度分散年 2 年,轻度集中年 8 年,中度集中年 1 年;候尺度轻度分散年 6 年,中度分散年 7 年,高度分散年 1 年;月尺度轻度分散年 6 年,中度分散年 3 年。日、候分散年多于正常区,而月尺度轻度分散年与正常区相同。

(3)中度分散区:日尺度正常年共有 32 年,轻度分散年 8 年,中度分散年 11 年,高度分散年 4 年,轻度集中年 2 年;候尺度轻度分散年 10 年,中度分散年 9 年,高度分散年 4 年;月尺度轻度分散年 10 年,中度分散年 4 年,高度分散年 2 年。日、候、月尺度的中度、高度分散年均高于轻度分散区。

(4)高度分散区:日尺度正常年共有 19 年,轻度分散年 19 年,中度分散年 6 年,高度分散年 13 年;候尺度轻度分散年 14 年,中度分散年 8 年,高度分散年 10 年;月尺度轻度分散年 10 年,中度分散年 8 年,高度分散年 5 年。日、候、月尺度的中度、高度分散年多于中度分散区。

(5)轻度集中区:日尺度正常年 28 年,轻度分散年为 8 年,中度分散年 5 年,高度分散年 1 年,轻度集中年 10 年,中度集中年 4 年,高度集中年 1 年;候尺度轻度集中年 11 年,中度集中年 4 年;月尺度轻度集中年 7 年,中度集中年 12 年,高度集中年 3 年。日、候尺度轻度集中年多于正常区,而月尺度轻度集中年少于正常区。

(6)中度集中区:日尺度正常年 20 年,轻度分散年为 9 年,中度分散 3 年,高度分散年 2 年,轻度集中年 12 年,中度集中年 8 年,高度集中年 3 年,中度集中年比轻度集中区明显增多;候尺度轻度集中年 11 年,中度集中年 4 年,中度集中年与轻度集中区相同;月尺度轻度集中年 11 年,中度集中年 10 年,高度集中年 4 年,中度集中年少于轻度集中区。

(7)高度集中区:日尺度正常年 15 年,轻度分散年 6 年,中度分散年 3 年,高度分散年 1 年,轻度集中年 12 年,中度、高度集中年为 10 年;候尺度中轻度、中度、高度集中年均均为 10 年;月尺度中轻度集中年 8 年,中度集中年 12 年,高度集中年 19 年。日、候、月尺度高度集中年多于中度集中区。

不同时间尺度不同气候类型分区的降水非均匀性存在很大的时空差异,但由于广西研究区域 PCD 变化差异小于全国研究区域,其正常年份占多数,但日候尺度能较准确地反映广西区降水非均匀性的分区和评价,即尺度越小,时间方位角分配越细,则能很好地体现降水非均匀性时空变化,而月

尺度则在部分分区出现偏差,综上,日候尺度对广西降水非均匀性综合评价具有较好的效果。

5 结 论

本文主要通过建立广西区域内的降水非均匀性分区等级评价体系,对 1961—2017 年广西降水非均匀性时空变化进行综合评价,得到以下结论:

(1)广西在日、候、旬尺度上的 PCD 和 PCP 的时空变化特征基本一致,数值波动范围较大,能较好地表达广西降水非均匀性特征,而在月、季尺度上的 PCD 和 PCP 时空变化较月内几个尺度更加均质化,对广西降雨的非均匀性特征表达相对较差。

(2)广西东北地区的 PCD 历时变化在日、旬、月尺度上主要呈现递增趋势,而广西西南地区的 PCD 历时变化则主要呈递减趋势;广西区 PCD 序列的 Hurst 指数范围为 0.52~0.76,表明未来 PCD 变化总体保持与历时演变相同的趋势,其中,在广西中部地区的同趋势性最强。

(3)广西降水集中度 PCD 空间分布在日、候、月尺度上均呈现显著的空间自相关性和分层异质性特征;其中,日尺度 PCD 的均值呈西北和南部地区高、东北地区低的分布格局,变异系数呈东北和中部地区高、西北地区低的分布格局,发生频率呈东北地区的分散等级高而集中等级低、西北和南部的分散等级低而集中等级高的分布格局。

(4)广西降水非均匀性综合评价可划分为 7 个等级分区,全区在日、候、月尺度上均呈现东北部地区高度分散、南部地区高度集中、西北和中部地区则为轻度集中或分散的总体分布格局,但日、候尺度的表达更为一致和稳定。

参考文献(References):

- [1] Gao Tao, Xie Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 577-589. [高涛, 谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577-589.]
- [2] Gao Li, Chen Jing, Zheng Jiawen, et al. Progress in researches on ensemble forecasting of extreme weather based on numerical models [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(7): 706-716. [高丽, 陈静, 郑嘉雯, 等. 极端天气的数值模式集合预报研究进展 [J]. 地球科学进展, 2019, 34(7): 706-716.]
- [3] Qian W, Lin X. Regional trends in recent precipitation indices in China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 90(3/4): 193-207.
- [4] Yang T, Shao Q, Hao Z C, et al. Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes

- in the Pearl River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(3/4): 386-405.
- [5] Huang Ping, Zhou Shijie. Advances and challenges in the study on the tropical rainfall changes under global warming [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(11): 1 181-1 192.[黄平, 周士杰. 全球变暖下热带降水变化研究回顾与挑战 [J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1 181-1 192.]
- [6] Silva B K N, Lucio P S. Characterization of risk/exposure to climate extremes for the Brazilian Northeast-case study: Rio Grande do Norte [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 122(1/2): 59-67.
- [7] Zhang Bo, Gu Xiaoping, Gu Shuhong. Spatial and temporal variation characteristics of precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Guizhou Mountain area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(6): 63-67.[张波, 谷晓平, 古书鸿. 贵州山区降水集中度和降水集中期的时空变化特征 [J]. 水文, 2017, 37(6): 63-67.]
- [8] Abolverdi J, Ferdosifar G, Khalili D, et al. Spatial and temporal changes of precipitation concentration in Fars Province, southwestern Iran [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2015, 128(2): 181-196.
- [9] Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(3): 279-304.
- [10] Tian Y, Peters-lidard C D, Choudhury B J, et al. Multitemporal analysis of TRMM-Based satellite precipitation products for land data assimilation applications [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(6): 1 165-1 183.
- [11] Yesilirmak E, Atatanir L. Spatiotemporal variability of precipitation concentration in western Turkey [J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(1): 687-704.
- [12] Pang Xinxin. Inter-annual variations of precipitation concentration degree and concentration index in Huaihe River Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(9): 43-47.[庞欣欣. 淮河流域降水集中度和集中指数年际变化分析 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 43-47.]
- [13] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1 096-1 108.
- [14] Liu Yonglin, Yan Junping, Cen Minyi. Comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 392-406.[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.]
- [15] Zhang L, Qian Y. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(2): 146-163.
- [16] 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.[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.]
- [17] Liu Zhanming, Wei Xinghu, Chen Zishen, 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.[刘占明, 魏兴琥, 陈子森, 等. 广东北江流域降水集中度和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.]
- [18] Chatterjee S, Khan A, Akbari H, et al. Monotonic trends in spatio-temporal distribution and concentration of monsoon precipitation (1901-2002), West Bengal, India [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 182:54-75.
- [19] Simões Y, Cohim E, De Araujo H. Rainfall zoning of Bahia State, Brazil: An update proposal [J]. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2018, 13(1): 1-18.
- [20] Liu Yonglin, Yan Junping, Cen Minyi. Response relation between precipitation heterogeneity and climate change in Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science Edition)*, 2015, 54(5): 138-146.[刘永林, 延军平, 岑敏仪. 广东省降水非均匀性与气候变化的响应关系 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2015, 54(5): 138-146.]
- [21] Sun Guikai, Gao Mo, Huang Ya, et al. Spatial-temporal variations of precipitation characteristics in Guangxi over the last 50 years [J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(9): 1-4.[孙桂凯, 高沫, 黄亚, 等. 广西近 50 年降水结构时空变化特征分析 [J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 1-4.]
- [22] Qin Weijian, Li Dongliang. A study on the climate change characteristics of all kinds of precipitation events in recent 50 year of Guangxi [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 666-676.[覃卫坚, 李栋梁. 近 50 年来广西各级降水气候变化特征分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 666-676.]
- [23] Zhao Yufei, Zhu Jiang, Xu Yan. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(4): 414-420.[赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50 年中国降水格点数据集的建立及质量评估 [J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414-420.]
- [24] Zhang Lujun, Qian Yongfu. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood-producing in the Yangtze River valley of China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 622-630.[张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630.]
- [25] Wei Guanju. Calculation method of precipitation concentration degree and precipitation concentration period based on excel [J]. *Yellow River*, 2017, 39(4): 58-61.[魏鹤举. 降水集中度与集中期的 Excel 计算方法研究 [J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 58-61.]
- [26] 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): 1 001-1 016.[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): 1 001-1 016.]

- [27] 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.[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.]
- [28] Ye Zhengwei, Yin Peng. Changes of precipitation concentration degree and precipitation concentration period in flood season in the Huaihe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 295-299.[叶正伟, 殷鹏. 淮河流域汛期候尺度降水集中度与集中期的时序变化特征 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 295-299.]
- [29] Zhu Yanxin, Sang Yanfang. Spatial variability in the seasonal distribution of precipitation on the Tibetan Plateau [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1 533-1 544.[朱艳欣, 桑燕芳. 青藏高原降水季节分配的空间变化特征 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1 533-1 544.]
- [30] Huang Y, Wang H, Xiao W, *et al.* Spatial and temporal variability in the precipitation concentration in the Upper Reaches of the Hongshui River Basin, Southwestern China [J]. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018: 1-19.
- [31] Yin Y, Xu C Y, Chen H, *et al.* Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River basin, India [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 145:116-29.
- [32] Qin Weijian, Wang Yongqing, Qin Zhinian. Study on the variation characteristics of precipitation concentration degree in Guangxi under the background of global climate becoming warm [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(21): 11 224-11 227.[覃卫坚, 王咏青, 覃志年. 全球气候变暖背景下广西降水集中程度的变化特征研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(21): 11 224-11 227.]
- [33] Wang Chengbo, Li Shuangshuang, Yan Junping, *et al.* Spatio-temporal variation of extreme precipitation regimes in the Hanjiang River Basin during 1970-2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1 209-1 222.[汪成博, 李双双, 延军平, 等. 1970—2015年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征 [J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1 209-1 222.]
- [34] Tan Fangying, Wang Jianlin, Song Yingbo, *et al.* Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources over last 45 years in North China Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 19-24.[谭方颖, 王建林, 宋迎波, 等. 华北平原近45年农业气候资源变化特征分析 [J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 19-24.]
- [35] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-799.
- [36] Liu Zhanming, Hu Baoqing, Yan Yan, *et al.* Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation in Guangxi Beibu Gulf economic zone [J]. *Water Power*, 2017, 43(6): 23-27.[刘占明, 胡宝清, 闫妍, 等. 北部湾经济区降水年内非均匀性特征分析 [J]. 水力发电, 2017, 43(6): 23-27.]
- [37] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.[王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.]
- [38] Moran P A P. Notes on Continuous stochastic phenomena [J]. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [39] Song Wen, Chen Ying. Selection of observed variables and measuring indicators for the land use spatial autocorrelation analysis [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(10): 37-42.[宋文, 陈英. 土地利用空间自相关分析中观测变量和衡量指标的选择研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 37-42.]
- [40] Zhang Songlin, Zhang Kun. Contrast study on Moran and Getis-ord indexes of local spatial autocorrelation indices [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(3): 31-34.[张松林, 张昆. 空间自相关局部指标 Moran 指数和 G 系数研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(3): 31-34.]
- [41] Huang Jiahong, Li Jiangnan, Li Zi 'an, *et al.* Climatic characteristics of precipitation and temperature in the past 45 years in Guangxi [J]. *Tropical Geography*, 2006, 26(1): 23-28.[黄嘉宏, 李江南, 李自安, 等. 近45a广西降水和气温的气候特征 [J]. 热带地理, 2006, 26(1): 23-28.]
- [42] Li Jiaxu, Zhao Yinjun. Spatial statistical analysis of the distribution of minorities in Guangxi based on GIS [J]. *Journal of Nanning Teachers Education University (Natural Science Edition)*, 2019, 36(1): 114-120.[李家旭, 赵银军. 基于GIS的广西少数民族人口分布的空间统计分析 [J]. 广西师范学院学报: 自然科学版, 2019, 36(1): 114-120.]

Multi-scale Characteristics and Comprehensive Evaluation of Precipitation Heterogeneity in Guangxi*

Xie Xinchang¹, Yang Yunchuan^{1,2,3*}, Tian Yi¹, Liao Liping^{1,2,3},
Wei Junpei¹, Zhou Jinyu¹, Chen Lihua^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education,
Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Key Laboratory of Disaster
Prevention and Engineering Safety, Guangxi, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the uneven spatial and temporal distribution of precipitation and frequent occurrence of drought and waterlogging disasters in Guangxi, the multi-scale characteristics and comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity can provide scientific support for regional response to drought and waterlogging disasters and intelligent management of water resources. Based on the daily precipitation data of 87 grid points from 1961 to 2017 in Guangxi, the Precipitation Concentration Degree (PCD) and Precipitation Concentration Period (PCP) index were used to build day, pentad, ten days, month, season precipitation heterogeneity of multiple time scale level evaluation system. By using R/S analysis and geographical spatial analysis methods, the space-time evolution characteristics and climate division in Guangxi were discussed. The study showed that the spatial and temporal variation characteristics of PCD and PCP at the diurnal, synoptic and monthly scales were relatively consistent, and the heterogeneity of precipitation in Guangxi could be better expressed than that at the monthly and seasonal scales. The diachronic change of PCD in precipitation in Guangxi shows an increasing trend in northeast China and a decreasing trend in southwest China, and the trend of its future period is the same as the diachronic evolution. The spatial distribution of PCD in Guangxi has significant spatial autocorrelation and stratification heterogeneity, which are mainly reflected in the mean value, coefficient of variation and frequency of PCD. The comprehensive heterogeneity of precipitation in Guangxi is highly dispersed in the northeast, highly concentrated in the south, and slightly concentrated or dispersed in the northwest and central regions. The time-scale within a month is the best scale to express the non-uniformity of precipitation in Guangxi. If the advantages of more stable climatic and ten-day scales and more fine daily scales are taken into account, the use of climatic scale for daily sliding calculation and analysis will be the best way.

Key words: Precipitation concentration degree; Precipitation concentration period; Precipitation heterogeneity; Multi-scale characteristics; Level evaluation system.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Study on simulation of sugarcane drought mechanism based on AquaCrop model and drought risk assessment method" (No.51609041); The Natural Science Foundation of Guangxi Province "Study on response mechanism, three-dimensional measurement and precursory signal diagnosis of sugarcane in Guangxi" (No. 2019GXNSFAA185015).

First author: Xie Xinchang (1995-), male, Lingshan County, Guangxi Province, Master student. Research areas include agricultural water resources. **E-mail:** xiexinchanggxdx@163.com

* **Corresponding author:** Yang Yunchuan (1982-), male, Zhongning County, Ningxia Province, Associate professor. Research areas include ecohydrology of agriculture & urban. **E-mail:** yyc_sciences@163.com