

文章编号: 1008-2786-(2018)2-248-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000320

# 基于多源降雨的广西季节性干湿演变特征与未来趋势

胡甲秋<sup>1</sup>, 杨云川<sup>1,2,3\*</sup>, 廖丽萍<sup>1,2,3</sup>, 邓思敏<sup>1</sup>, 陈立华<sup>1,2,3</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 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, 南宁 530004;

3. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

**摘 要:** 基于高时空分辨率的 APHRODITE 和 TRMM 降雨数据, 采用降水量距平百分率、DEOF 及 R/S 分析等方法, 对近 65 年来广西季节性气象干湿演变的频率、范围、强度、时空分异及未来趋势进行了分析。结果表明: (1) 广西年湿润和年干旱频率均呈现从桂东南向桂西北逐渐递减的分布特征, 而年内不同季节的湿润和干旱频率空间分布差异显著; 湿润与干旱的影响范围和强度在年、季尺度上均呈交替出现且增减波动的变化特征, 但各自的变化差异显著。 (2) 广西干湿演变存在不同年、季周期的交替强弱振荡, 其空间特征主要表现为年、冬季的东南-西北相反型, 春季的全区一致型, 夏季的南北相反型, 秋季的东西相反型。 (3) 广西未来降雨量的增强趋势在年、夏季显著; 而在春、秋、冬季节总体一般或略呈减弱趋势。上述研究成果可作为进一步深入开展广西干湿演变预警与水旱灾害防治的重要科学基础。

**关键词:** 降水量距平百分率; 季节性干湿; 干湿演变; 气候模态

**中图分类号:** P429; P426.6

**文献标志码:** A

当前全球气候变暖已成常态 (IPCC, 2013)<sup>[1]</sup>, 致使全球众多地区干旱、洪涝等极端气候事件的发生频率和强度均呈显著增加趋势<sup>[2-3]</sup>; 中国是世界上旱涝灾害最为频繁和严重的少数国家之一<sup>[4]</sup>, 总体上旱涝强度呈加剧趋势, 但在不同地区频率特征差异显著<sup>[5]</sup>。广西地处亚热带季风气候区, 受冬夏季风交替和地理环境影响显著, 降雨分布不均, 年际变化大, 旱涝灾害频发, 并具有“旱涝并存、旱涝急转”的特点<sup>[6]</sup>; 研究表明, 全区历来干旱和洪涝灾害频次分别达总灾害的 60% 和 13%<sup>[7]</sup>。多年来, 频繁的旱涝灾害给广西地区社会经济和人民生活造成了巨大损失, 严重制约着区域社会经济的发展。

鉴于气象干湿灾害作为区域其他各类旱涝灾害发生的首要环节和研究的业务基础, 已有诸多学者通过采用 Z 指数<sup>[8]</sup>、SPI 指数<sup>[9]</sup>、SPEI 指数<sup>[10]</sup>等多

种干湿指数及方法对广西开展了相关研究。经研究发现, 广西全区性偏湿或偏旱是秋冬季旱涝分布的主要型态<sup>[8]</sup>, 不同时间尺度下旱涝均呈现一定的阶段性变化<sup>[9]</sup>, 且近年来广西干旱有进一步加剧的迹象, 对农业生产的不利影响亦有加重趋势<sup>[10-13]</sup>; 此外, 广西地区在季节尺度上呈现较显著的旱涝急转、降水突变和异常现象<sup>[6, 14]</sup>。总之, 目前针对广西气象干湿已开展较多深入的科学研究, 但这些研究多局限于某一季节或是对干湿特征的现象描述, 而对全年时段和干湿内在演变模式及未来趋势的研究相对较少; 其次, 这些研究均是基于地面观测站点气象数据开展分析, 存在地面站点数量稀疏、分布不均、观测数据序列长短不一且连续性较差等问题, 在一定程度上制约着研究结果的可靠性; 此外, 这些气象干湿指标应用于广西干湿特征评估、预测预警等方

**收稿日期** (Received date): 2017-06-13; **改回日期** (Accepted date): 2017-12-10

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (51609041); 广西自然科学基金资助项目 (2015GXNSFBA139222); 广西重点实验室系统性研究项目资助 (2016ZDX01)。[National Nature Science Foundation of China (51609041); Natural Science Foundation of Guangxi (2015GXNSFBA139222); Systematic Project of Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety (2016ZDX01).]

**作者简介** (Biography): 胡甲秋 (1993—), 女, 广西玉林人, 硕士研究生, 主要研究方向: 干旱灾害风险评估。[HU Jiaqiu, female, M. Sc. candidate, research on drought disaster risk assessment.] E-mail: hjiaqiu1993@163.com

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 杨云川 (1982—), 男, 宁夏中宁人, 博士, 硕导, 主要研究方向: 水文水资源。[YANG Yunchuan, male, Ph. D., research on hydrology and water resources.] E-mail: yyc\_sciences@163.com

面的分析还有待加强。

本文基于已被证实具有较高时空分辨率精度的连续长序列 APHRODITE (Asian Precipitation - Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources) 逐日降水数据集<sup>[15-16]</sup>和 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星降雨产品<sup>[17]</sup>,开展广西年、季尺度气象干湿的频率、范围、强度、时空演变分异模式及未来趋势的定量分析。一方面验证这两种降雨数据在广西干湿研究中的适用性,以期能在一定程度上弥补地面资料的不足;另一方面,通过深入分析气象干湿指标在广西干湿评估中的有效性,旨在为该地区旱涝灾害预警能力的提升提供更有力的支撑。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究数据

APHRODITE 是由日本综合地球环境研究所 (RIHN) 和日本气象厅气象研究所 (MRI/JMA) 联合实施计划,基于亚洲各国区域的地面雨量站观测资料,综合整编建立的一套逐日、高分辨率、长时间的网格化降水数据集<sup>[15]</sup>。其中,本研究采用的是 APHRO\_MAV1003R1 逐日降水数据集,其空间范围为  $15^{\circ}\text{S} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ ,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,时段为 1951—2007 年。这套数据集是目前唯一覆盖整个亚洲地区的陆地降水网格化资料,且研究表明该数据集在月、年尺度降水量与地面站点资料基本一致,已在中国区域气候变化和水循环研究中被广泛应用<sup>[16]</sup>。

TRMM 是美国和日本于 1997 年联合实施的遥感降水观测计划,本文所采用的 TRMM 3B42V7 是当前精度最高的卫星遥感降水数据产品之一,其空间范围为  $50^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{S}$ ,空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,时段为 1998—2015 年。研究表明该数据产品在中国除西北片区以外,其降水量在月、年尺度上与地面气象站点资料具有较好的相关关系和一致性<sup>[17]</sup>。

本研究综合上述两种降雨数据集,采用 IDL 8.3 系统平台编程、并结合 ArcGIS10.3 软件提取广西及其周边  $0.5^{\circ}$ 缓冲区范围共 546 个格点数据(如图 1,涠洲岛附近区域剔除了部分存在无效数据的格点);其中,APHRO\_MAV1003R1 逐日降水通过累加得到季、年尺度降水数据集,TRMM 3B42V7 的 3h 降雨通过累加得到季、年尺度降水数据集。本文通

过组合这两种数据集形成 1951 年 1 月—2016 年 2 月广西季、年尺度气象干湿特征研究的降雨数据;其中,年尺度按 1 月到 12 月计算,季节尺度按春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12—2 月计算。

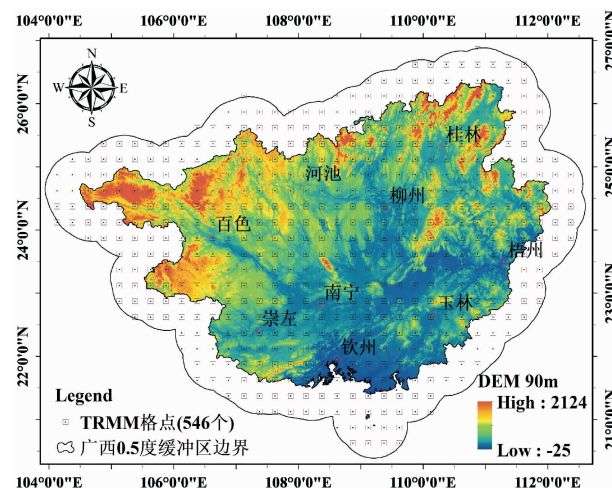


图 1 研究区域站点及范围分布图

Fig. 1 Distribution of sites and scope on research region

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 干湿综合特征评估方法

在众多气象干湿指标中,降水量距平百分率 ( $Pa$ ) 是表征某时段降水量较常年值偏多或偏少的指标之一,因其计算简单且不需要其他参数,能直观反映区域降雨异常引起的干湿变化,并具有较强的代表性和可对比性,在干湿监测和评价中被广泛应用<sup>[11]</sup>。近年,一些学者采用  $Pa$  指数对我国华南、西南等湿润区进行了干旱研究,并取得一定成效<sup>[11, 18]</sup>。因此,文中基于降雨序列的  $Pa$  指标,采用干湿频率、站次比、强度<sup>[12]</sup>分析广西季节和年尺度的干湿综合特征。 $Pa$  计算公式详见相关标准<sup>[19]</sup>,干湿等级划分如表 1。

#### 1.2.2 干湿时空模态的 DEOF 分析方法

经验正交函数分解 (EOF) 是大气科学领域的常用的气候特征研究方法,但逐渐发现并不是所有的 EOF 模态都代表着气候态的物理意义和机制<sup>[20-21]</sup>。为此,德曼吉 (Dommengot) 等<sup>[22]</sup> (2007) 将资料没有气候模态存在时的变量分布特征作为其空间结构的 0 假设,并找出与 0 假设差异最大的模态作为真实气候的最佳估计,从而提出了显著经验正交函数分解 (Distinct EOF, DEOF) 方法。德曼吉及冯志刚等人研究发现,DEOF 能从强的噪声中排除随机性特征并突出物理信息多的模态特征,能更

好估计真实的气候模态<sup>[22-23]</sup>。因此,本文采用 DEOF 方法开展广西地区干湿气候模态特征分析。具体计算过程详见相关文献<sup>[22-23]</sup>。

1.2.3 干湿趋势的 R/S 分析方法

R/S 分析方法最初由英国水文学家赫斯特 (Hurst) 于 1951 年提出<sup>[24]</sup>,现已被广泛应用于时间序列的分形特征和动态变化趋势研究中,计算过程详见相关文献<sup>[25-26]</sup>。文中结合气候倾向率,采用 R/S 分析对广西未来一段时期降雨的演变趋势做了预测,其稳定性检验<sup>[27-28]</sup>通过  $V_n^*$  统计量曲线进行判定( $V_n^* = (R/S)_n/\sqrt{n}$ )。

2 结果分析与结论

2.1 广西近 65 年气象干湿综合特征

2.1.1 广西干湿频率

(1) 年际干湿频率

结果表明,1951—2015 年,广西年  $Pa$  湿润频率变化范围为 4.62% ~ 24.62%,多年平均值为 14.08%。由图 2(a)可知,广西年  $Pa$  湿润频率空间分布大体呈现东南高(>15%)、西北低(<15%)、并由东南向西北逐渐递减的总体特征;并在柳州、玉林、梧州等桂东南局部地区、崇左等桂西南局部地区达到最高(局部>20%);而在河池、百色等桂西北地区及部分桂北地区湿润频率较低(总体<15%,局部<10%)。

同时段内,广西年  $Pa$  干旱频率变化范围为 3.08% ~ 43.08%,多年平均值为 17.10%。由图 2(b)可知,广西年  $Pa$  干旱频率空间分布大体亦呈现东南高(>15%)、西北低(<15%)的总体特征;而在桂林局部、北海和玉林东南沿海局部干旱频率高于 25%。该结果与黄晚华等<sup>[11]</sup>的研究结果较为一致。

(2) 季节干湿频率

由图 3(a~d)可知,广西季  $Pa$  湿润频率总体空

间分布的季节差异较为显著;尤其以夏季全区普遍小于 15%(且桂中、西部<10%),而秋季全区普遍大于 20%(且桂东部、桂西南局部>25%)最为突出;而冬、春季空间分布较为接近,均表现为从桂南沿海(>25%)向桂北(<15%)逐渐递减的总体特征。

由图 3(e~h)可知,广西季  $Pa$  干旱频率空间分布的季节差异总体上更为显著;主要表现为春、夏季节总体相反的空间分布特征和秋、冬季节在桂东南部相同而在桂西北相反的空间分布特征,且秋、冬季节干旱频率总体高于春、夏季节。就具体季节而言,春季呈现从桂东南、桂西南(普遍在 10%~20%)向桂东北(大部分地区<10%)递减的变化特征;而夏季则呈现从桂西局部(<10%)逐渐向桂中(普遍在 10%~20%)、桂东北(主要在 20%~30%)增大的变化特征;秋季呈现桂东南部较高(30%~40%)、其他地区普遍较低(主要在 20%~30%)的特征;冬季最高值出现在桂西北的百色地区(>40%),桂西北的其他地区和桂东南递减为 30%~40%,而在桂中及桂东北的主要地区进一步递减为 20%~30%。该结果与黄晚华等<sup>[11]</sup>的研究结果较为一致;其中,春、秋、冬季节的结果还与王东等<sup>[10]</sup>的研究结果相近,而夏季的结果相差较大,主要由选取的干湿指数不同造成。

2.1.2 广西干湿范围

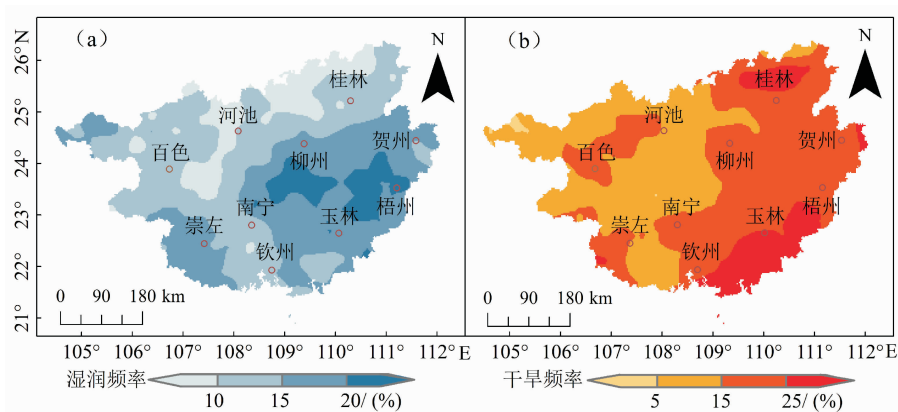
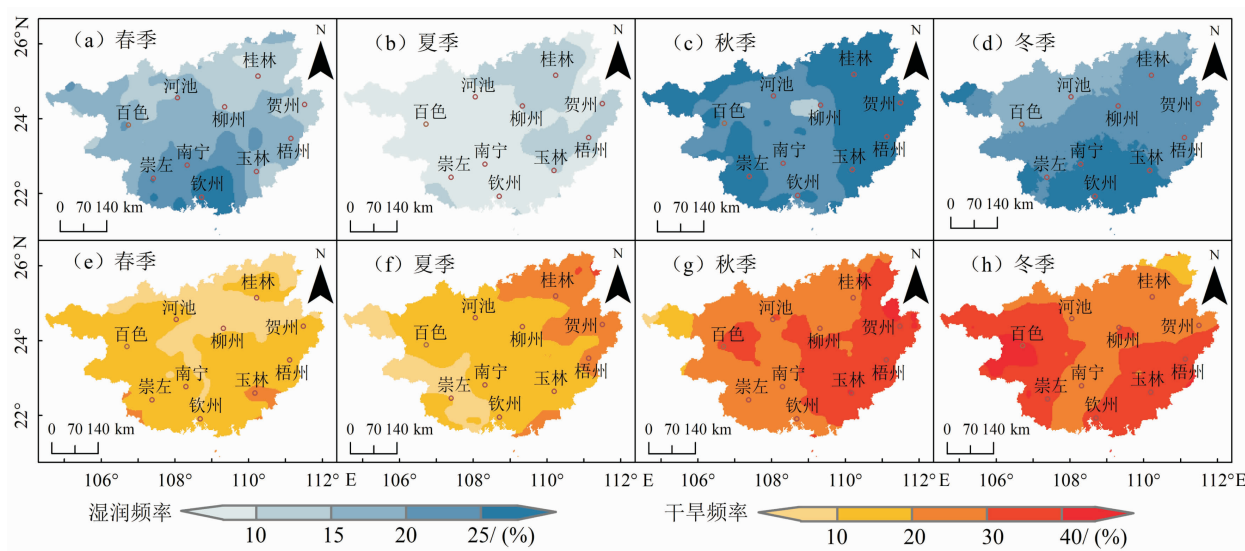
(1) 年际干湿范围

干湿站次比反映了区域干湿的影响范围。经计算(如图 4),近 65 年来,在年际尺度上,广西发生湿润年数为 21 年,占总年数的 32.31%;其中(按表 1 划分),局域性、部分区域性、区域性湿润年数分别为 5 年,3 年,10 年,全域性湿润年数为 3 年,分别是 1994 年、2008 年、2015 年。站次比总体趋势呈现先略减小后显著增大的变化特征。对于干旱影响范围而言(如图 4),近 65 年来,广西发生干旱年数 32 年,占总年数的 49.23%;其中(按表 1 划分),局域性干旱年数为 14 年(占总年数的 21.54%),且年份较为

表 1 降水量距平百分率( $Pa$ )干湿影响范围与强度等级划分区间表

Tab.1 Grade division of dry/wet influence range and intensity based on  $Pa$

干湿类别	湿润影响范围				正常	干旱影响范围			
	[50,100)	[33,50)	[25,33)	[10,25)		[10,25)	[25,33)	[33,50)	[50,100)
干湿范围	全域性	区域性	部分区域性	局域性	正常	局域性	部分区域性	区域性	全域性
干湿等级	极湿	重湿	中湿	轻湿	正常	轻旱	中旱	重旱	极旱
季尺度/%	$Pa \geq 80$	$70 \leq Pa < 80$	$50 \leq Pa < 70$	$25 \leq Pa < 50$	$-25 < Pa < 25$	$-50 < Pa \leq -25$	$-70 < Pa \leq -50$	$-80 < Pa \leq -70$	$Pa \leq -80$
年尺度/%	$Pa \geq 45$	$40 \leq Pa < 45$	$30 \leq Pa < 40$	$15 \leq Pa < 30$	$-15 < Pa < 15$	$-30 < Pa \leq -15$	$-40 < Pa \leq -30$	$-45 < Pa \leq -40$	$Pa \leq -45$

图2 基于  $P_a$  的广西年尺度湿润(a)、干旱(b)频率分布图Fig.2 Spatial distribution of annual wet/dry (a/b) frequency based on  $P_a$  in Guangxi图3 广西区基于降水量距平百分率( $P_a$ )的各季节干湿频率空间分布图(a~d:湿润;e~g:干旱)Fig.3 Spatial distribution of seasonal dry/wet frequency based on  $P_a$  in Guangxi (a~d: wet; e~g: dry)

分散;部分区域性干旱年数为4年,区域性干旱年数为9年,全域性干旱年数为5年,分别是1963年、1988—1989年、1991年、2007年。站次比总体趋势呈现先略增大后略减小的变化特征。

综合图4干湿站次比变化可知,近65年来,虽

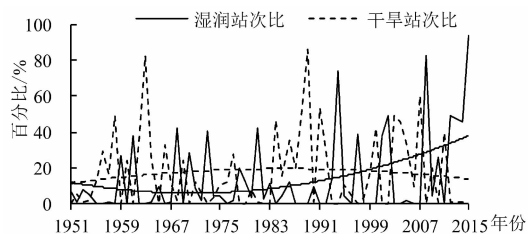


图4 1951—2015年广西干湿站次比变化特征

Fig.4 Annual variations characteristics of dry/wet station proportion in Guangxi from 1951 to 2015

然无湿润年数和无干旱年数分别达到了44年和33年,但其中同时无干湿的年数仅为13年,其他年份均为无湿润则必有干旱,或无干旱则必有湿润的年份。因此,年际尺度上,广西湿润与干旱的影响范围总体上呈交替出现且增减波动的变化特征,且连续的湿润或干旱现象并不显著。

## (2) 季节干湿范围

春季:近65年来,广西春季湿润年数为27年,占总年数的41.54%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性湿润的年数分别为12年、2年、5年、8年;站次比总体趋势呈现先减小后增大的变化特征(如图5(a))。另一方面,广西春季干旱年数为18年,占总年数的27.69%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性干旱的年数分别为10年、0年、2年、6年;站次比总体趋势呈现先略增大后略减小的



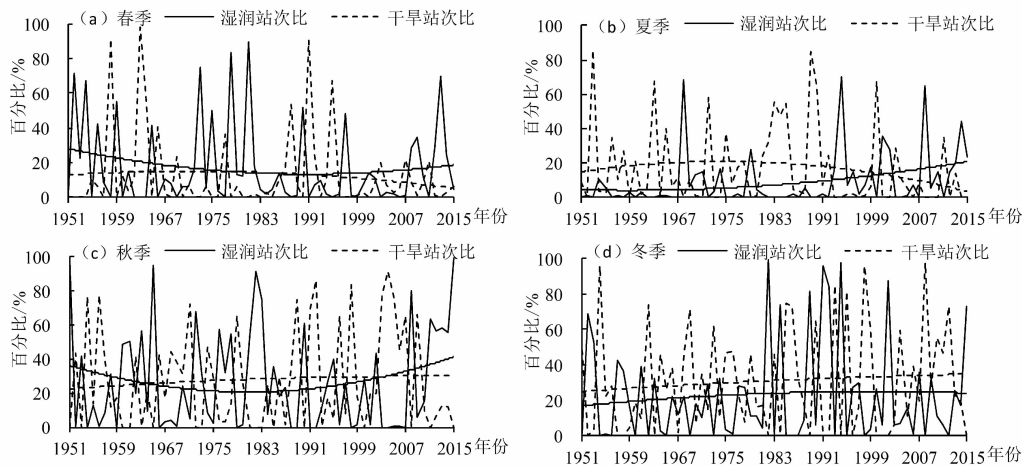


图5 1951—2015年广西不同季节干湿站次比变化特征

Fig. 5 Seasons variations characteristics of dry/wet station proportion in Guangxi from 1951 to 2015

变化特征(如图5(a))。此外,近65年来,广西春季同时无干湿的年数为21年,而湿润年数(38年)显著大于干旱年数(18年)。

夏季:广西夏季近65年来湿润年数为18年,占总年数的27.69%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性湿润的年数分别为11年、2年、2年、3年;站次比总体趋势呈现逐渐增大的变化特征(如图5(b))。另一方面,广西夏季干旱年数为26年,占总年数的40.00%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性干旱的年数分别为10年、3年、5年、8年;站次比总体趋势呈现先略增大后显著减小的变化特征(如图5(b))。此外,近65年来,广西夏季同时无干湿的年数为22年,干旱年数(26年)大于湿润年数(18年);且2000年之前,湿润总体影响范围小于干旱,而2000年之后,湿润总体影响范围大于干旱。

秋季:近65年来,广西秋季湿润年数为35年,占总年数的53.85%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性湿润的年数分别为7年、6年、5年、17年,且最近5年连续发生全域性湿润;站次比总体趋势呈现先减小后增大的变化特征(如图5(c))。另一方面,广西秋季干旱年数为40年,占总年数的61.54%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性干旱的年数分别为13年、4年、9年、14年;站次比总体趋势呈现缓慢增大的变化特征(如图5(c))。此外,近65年来,广西秋季同时无干湿的年数为0年,干旱年数(40年)略大于湿润年数(35年),且总体上干旱、湿润的影响范围都较大,干湿的交替出现情况显著。

冬季:近65年来,广西冬季湿润年数为35年,占总年数的53.85%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性湿润的年数分别为11年、10年、4年、10年,且全域性湿润多集中出现在20世纪80—90年代;站次比总体趋势呈现缓慢增大的变化特征(如图5(d))。另一方面,广西冬季干旱年数为43年,占总年数的66.15%;其中,局域性、部分区域性、区域性、全域性干旱的年数分别为13年、4年、11年、15年;站次比总体趋势呈现缓慢增大的变化特征如图5(d))。此外,近65年来,广西冬季同时无干湿的年数为2年,干旱年数(43年)大于湿润年数(35年),且在20世纪80年代之前,干旱影响范围大于湿润,而80—90年代湿润影响范围略大于干旱,但自90年代末至今,干旱影响范围显著大于湿润。

### 2.1.3 广西干湿强度

#### (1) 年际干湿强度

干湿强度反映了区域干湿的严重程度。经计算(如图6,本节结果均为广西所有湿润格点、干旱格点各自的强度平均值,也即研究区总体的旱、湿强度,并按表1划分等级,需注意图中显示的是干旱强度的绝对值),近65年来,在年际尺度上,广西轻湿、中湿、重湿、极湿灾害年数分别为43年、3年、0年、0年,湿润灾害年数占总年数的70.77%,但主要为轻湿。湿润强度总体趋势呈现先减小后显著增大的变化特征,即年际湿润强度近年呈增大趋势。另一方面,广西轻旱、中旱、重旱、特旱灾害年数分别为51年、0年、0年、0年,干旱灾害年数占总年数的78.46%,全部为轻旱;干旱强度总体趋势呈微弱减小的变化特征,即年际干旱强度近年增减趋势不显著。

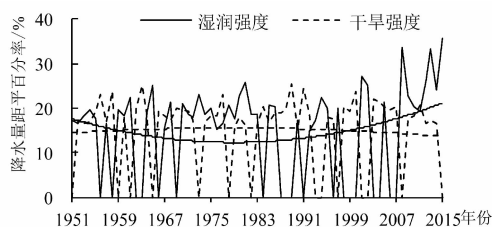


图6 1951—2015年广西干湿强度变化特征

Fig. 6 Annual variations characteristics of dry/wet intensity in Guangxi from 1951 to 2015

综上可知,近65年来,在年际尺度上,广西总体上干湿灾害年数(51年/46年)远大于无干湿灾害的年数(14年/19年),且在不同区域同时出现湿润和干旱灾害的年数为32年,区域湿润灾害总体增强趋势显著。

## (2) 季节干湿强度

春季:广西春季轻湿、中湿、重湿、极湿灾害发生年数分别为52年、1年、0年、0年,湿润灾害年数占总年数的81.54%,且主要为轻湿;如图7(a),湿润强度总体趋势呈现增大的变化特征,即春季湿润强度近年呈增大趋势。另一方面,广西春季轻旱、中旱、重旱、极旱灾害年数分别为47年、0年、0年、0年,干旱灾害年数占总年数的72.31%,且全部为轻旱;干旱强度总体趋势呈增大的变化特征(图7(a)),即春季干旱强度近年呈增大趋势。

夏季:近65年来,广西夏季轻湿、中湿、重湿、极湿灾害年数分别为43年、0年、0年、0年,湿润灾害年数占总年数的66.15%,全部为轻湿;湿润强度总体趋势呈现先微弱减小后显著增大的变化特征(图

7(b)),即夏季湿润强度近年呈增大趋势。另一方面,广西夏季轻旱、中旱、重旱、极旱灾害年数分别为47年、0年、0年、0年,干旱灾害年数占总年数的72.31%,且全部为轻旱;干旱强度总体趋势呈先微弱增大后显著减小的变化特征,即夏季干旱强度近年减弱趋势明显。

秋季:近65年来,广西秋季轻湿、中湿、重湿、极湿灾害年数分别为37年、12年、1年、2年,湿润灾害年数占总年数的80.00%,且主要为轻、中湿;湿润强度总体趋势呈现先减小后显著增大的变化特征(图7(c)),即秋季湿润强度近年呈增大趋势。另一方面,广西秋季轻旱、中旱、重旱、极旱灾害年数分别为45年、5年、0年、0年,干旱灾害年数占总年数的76.92%,且全部为轻、中旱;干旱强度总体趋势呈微弱增大的变化特征(图7(c)),即秋季干旱强度近年增减趋势不显著。

冬季:近65年来,广西冬季总体轻湿、中湿、重湿、极湿灾害年数分别为36年、11年、2年、3年,湿润灾害年数占总年数的80.00%,且主要为轻、中湿;湿润强度总体趋势呈现逐渐增大的变化特征(图7(d)),即冬季湿润强度近年呈微弱增加趋势。另一方面,广西冬季轻旱、中旱、重旱、极旱灾害年数分别为47年、6年、1年、0年,干旱灾害年数占总年数的83.08%,且主要为轻、中旱;干旱强度总体趋势呈先微弱减小后略增大的变化特征,即冬季干旱强度近年呈微弱增加趋势。

## 2.2 广西干湿演变的 DEOF 分析

本节通过对广西年、季节  $Pa$  要素场(资料场)

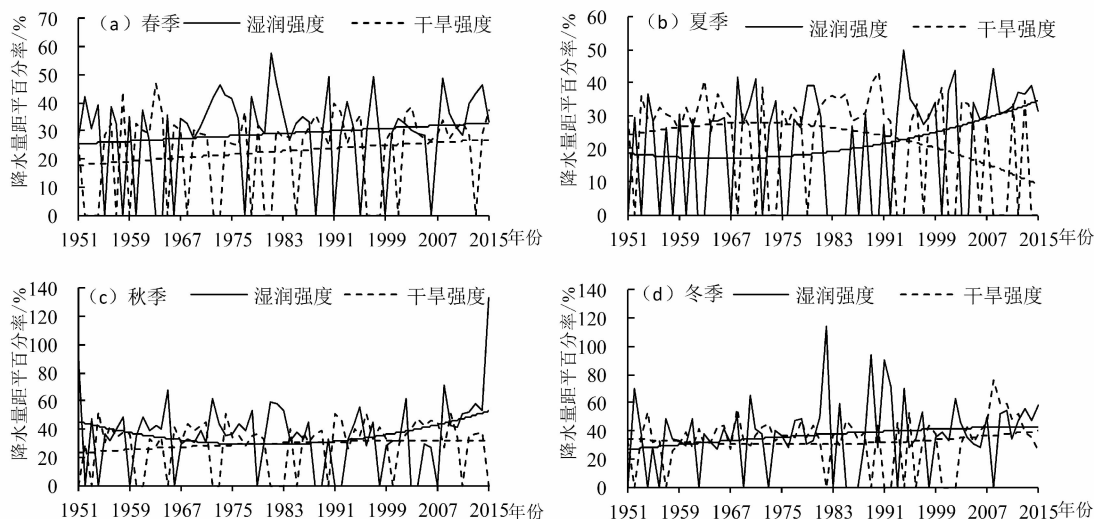


图7 1951—2015年广西不同季节干湿强度变化特征

Fig. 7 Seasons variations characteristics of dry/wet intensity in Guangxi from 1951 to 2015

进行 DEOF 分析,根据得到的 DEOF 各模态方差贡献可知(如图 8),前 2 个 DEOF 模态对资料场的解释方差均大于对 0 假设场的解释方差,而第 3 个以后的 DEOF 模态对资料场的解释方差与对 0 假设场的解释方差基本相近或更小,表明这些 DEOF 模态已接近随机模型,基本无法表达真实的气候模态信息,应被排除。因此,文中只对年、各季节的前两个模态(第一模态 DEOF-1、第二模态 DEOF-2)和对应的时间系数(DPC-1、DPC-2)进行分析(如图 9、10)。

### 2.2.1 年际 DEOF 分析

由图 8 可知,广西年  $P_a$  序列的 DEOF-1 解释资料场 35.10% 的方差,解释 0 假设场 18.23% 的方差,剩下 17.87% 的方差贡献代表着有价值的信息。根据图 9(a1),在空间分布上,DEOF-1 距平值由桂东南的正值逐级向桂西北递减至负值,表明广西在年尺度上存在一个“桂东南—桂西北”分异的空

间气候模态。结合 DPC-1 可知(图 9(a2)),在 20 世纪的 50 年代初、末期、70 和 80 年代初期、90 年代中后期、2000 年代初期、2008—2015 时段表现为桂东南湿润、桂西北干旱的空间特征,而在其他时段则与之相反,桂东南地区在 2001 年前后达到最大干旱强度,在 2011 年前后达到最湿润状态,桂西北与之相反。总体上,广西在年尺度上存在数年周期的显著强弱振荡特征。DEOF-2 解释资料场 5.07% 的方差,解释 0 假设场 2.68% 的方差,剩下 2.39% 方差贡献代表着有价值的信息。由图 9(b1)可知,广西在年尺度上还存在一个从桂西北正值向桂西北逐级递减至负值的空间分异气候模态。结合 DPC-2 亦可知(图 9(b2)),该气候模态亦存在数年周期的显著强弱振荡特征,并存在线性增强趋势。上述两个模态都在桂东南、桂西北局部表现出距平极值,表明该地区具有更剧烈的干湿交替演变异常。

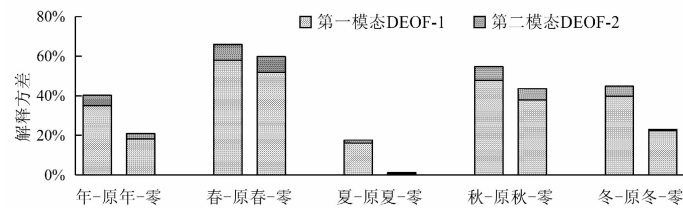


图 8 广西地区不同时间下 DEOF 分析的前 2 个模态对原资料和零假设的解释方差

Fig. 8 The variance of the first 2 modes for the original data and the null hypothesis by DEOF analysis in Guangxi

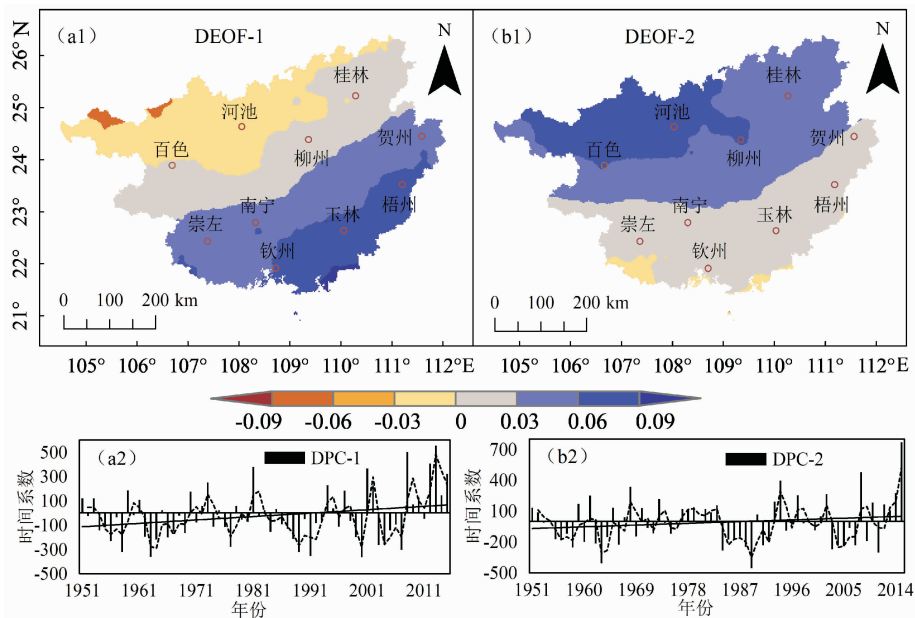


图 9 广西地区年降水量距平百分率 DEOF 分析的前 2 个模态(a1、a2)及对应的时间系数(b1、b2)

Fig. 9 The leading 2 spatial patterns (a1/a2) and its corresponding time coefficients (b1/b2) of annual  $P_a$  by DEOF analysis in Guangxi

### 2.2.2 季节 DEOF 分析

春季:广西春季  $Pa$  序列的 DEOF - 1 解释资料场 57.92% 的方差,解释 0 假设 51.81% 的方差,仅剩余 6.11% 的方差贡献代表有价值的信息。由图 10(a1)可知,DEOF - 1 距平值在整个区域为正值,

并呈现由桂西向桂东地区逐级递减的空间分异特征,该模态具有区域空间一致性。其对应的 DPC - 1 显示(图 10(a2)),该气候模态的线性趋势不明显,但存在数年周期的强弱振荡特征。DEOF - 2 解释资料场 8.03% 的方差,而解释 0 假设 7.92% 的方

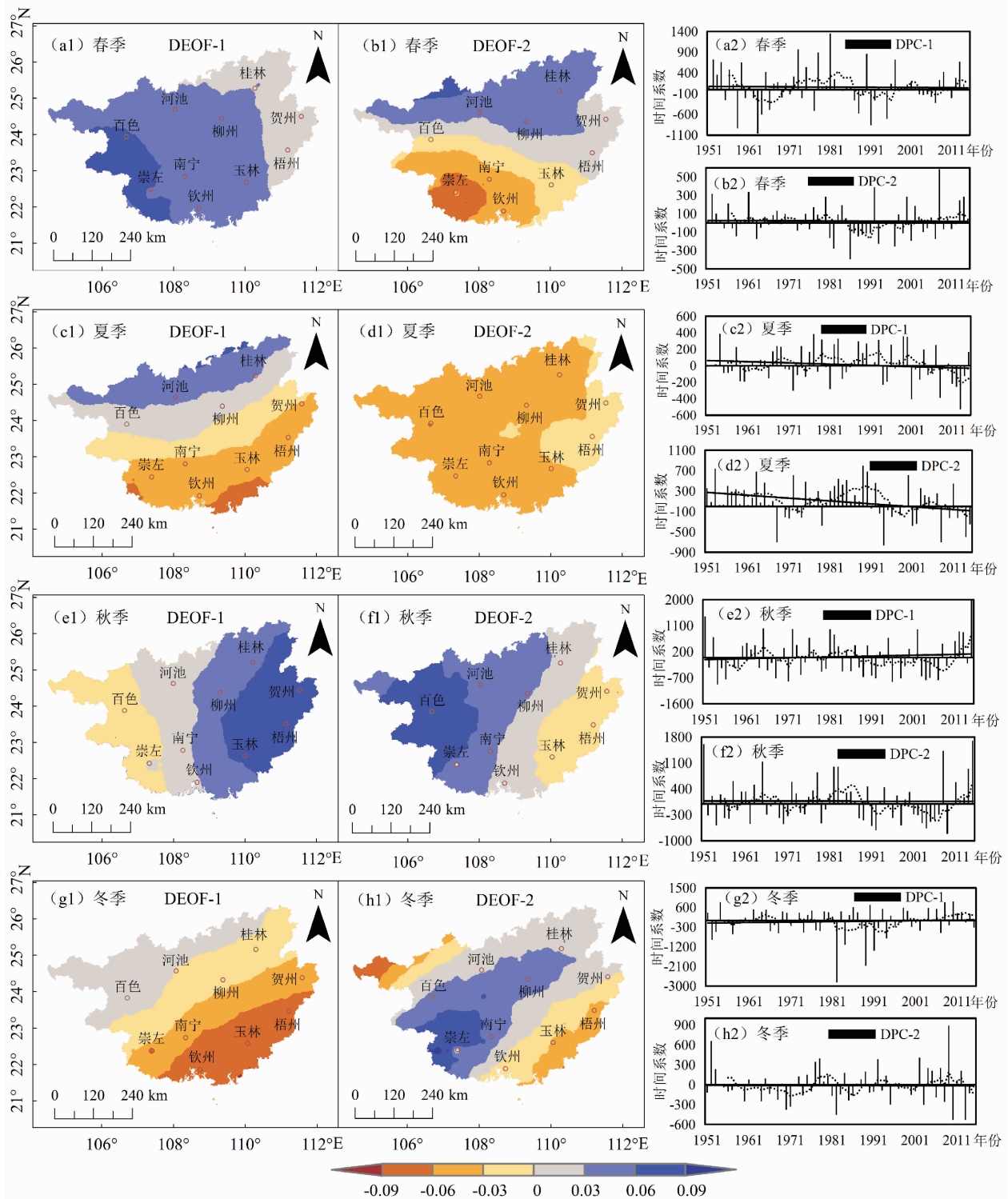


图 10 广西地区不同季节降水量距平百分率 DEOF 分析的前 2 个模态 (a1 ~ h1) 及对应的时间系数 (a2 ~ h2)

Fig. 10 The leading 2 spatial patterns (a1 ~ h1) and its corresponding time coefficients (a2 ~ h2) of seasonal  $Pa$  by DEOF analysis in Guangxi



差,二者已非常接近,这说明该模态基本与各向同性随机扩散过程一致,有价值的信息所剩无几,其空间分布和时间系数表达的多为随机过程信息,故在此不再论述(图 10(b1)、(b2))。

夏季:夏季  $Pa$  序列的 DEOF - 1 解释资料场 16.00% 的方差,解释 0 假设 0.47% 的方差,二者差异很大,说明该模态几乎包含了全部的真实气候模态信息。从图 10(c1)可知,DEOF - 1 距平值呈现由桂北正值向桂南逐级递减至负值的空间分异特征,代表了“桂北—桂南”相反的气候模态特征。结合 DPC - 1 可知(图 10(c2)),该模态在 2000 年之前主要表现为较强的南旱北湿空间分异特征,而在 2000 年之后则恰好相反,该模态亦存在数年周期的显著强弱振荡特征。DEOF - 2 解释资料场 1.58% 的方差,解释 0 假设 0.67% 的方差,所剩的有价值信息有限,呈现全区均为负值,并桂西向桂东递增的空间分异特征(图 10(d1))。对应的 DPC - 2 显示(图 10(d2))存在较为显著的线性下降趋势,并在 2000 年前后发生趋势逆转。

秋季:秋季  $Pa$  序列的 DEOF - 1 解释资料场 47.72% 的方差,解释 0 假设 37.89% 的方差,剩下 9.8% 的方差贡献代表着较多有价值的信息。在空间分布上(图 10(e1)),DEOF - 1 距平值呈现由桂东正值向桂西逐级递减至负值的空间分异特征,代表了“桂东—桂西”相反的气候模态特征。其对应的 DPC - 1(图 10(e2))没有明显的线性趋势,但仍存在数年周期的强弱振荡特征。DEOF - 2 解释资料场 7.00% 的方差,解释 0 假设 5.73% 的方差,仅剩余 1.27% 的方差贡献代表着有价值的信息,其空间分异特征与 DEOF - 1 恰好相反(图 10(f1)),而对应的 DPC - 2(图 10(f2))无显著的线性趋势,但

数年周期的强弱振荡特征仍存在。

冬季:广西冬季  $Pa$  序列的 DEOF - 1 解释资料场 39.67% 的方差,解释 0 假设 22.31% 的方差,剩余 17.36% 的方差贡献代表着较多有价值的信息。DEOF - 1 距平值呈现由桂西北正值向桂东南逐级递减至负值的空间分异特征,代表了“桂东南—桂西北”相反的气候模态特征。其对应的 DPC - 1 显示(图 10(g2)),没有明显的线性趋势,但数年周期的强弱振荡特征显著。冬季 DEOF - 2 解释资料场 5.16% 的方差,解释 0 假设 0.14% 的方差,剩余 5.02% 的方差贡献代表着有价值的信息。在空间分布上(图 10(h1)),呈现桂西北局部和桂东南为负距平值,而从桂西南到桂东北的中间广大区域为正距平值,并在桂西南出现正距平中心,反映了该区域干湿特征的异常变化。对应的 DPC - 2 显示(图 10(h2)),其线性趋势不明显,但数年周期的强弱振荡特征仍存在。

综上所述,所有季节的空间分异主要以第一模态为主,而第二模态所剩有价值的信息较少;其中春季 DEOF - 1 为全区一致分布,夏季则为南北反向分布,秋季为东西相反分布,而冬季为桂东南、桂西北相反分布。此外,所有的季节干湿演变均具有显著的数年周期强弱振荡特征。

### 2.3 广西干湿未来演变趋势

本节采用  $Pa$  序列的气候倾向率对广西历史降雨量的变化趋势进行说明,并通过 R/S 分析方法对其未来演变趋势进行预测,并采用统计量进行稳定性检验。图 11(a)和图 11(b)分别为广西全区年  $Pa$  序列倾向率及赫斯特指数空间分布图,由图可知,全区大部分地区过去 65 年的年  $Pa$  序列呈增加的趋势,全区赫斯特指数均大于 0.5,结合两者可

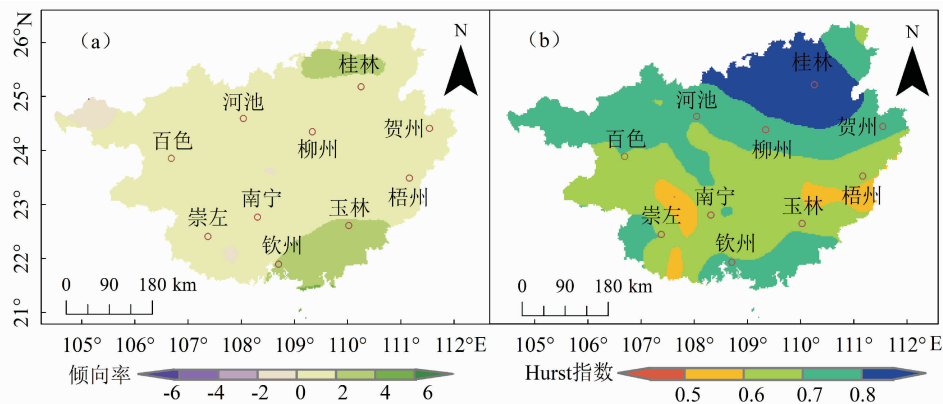


图 11 广西年降水量距平百分率倾向率(a)及赫斯特指数(b)空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution of annual  $Pa$  trend (a) and the Hurst index (b) in Guangxi

知,总体上广西降雨量近年及未来一段时间内增加趋势显著。

由图 13(a1~d1)可知,全区过去 65 年夏季  $Pa$  序列均呈现增加的趋势,但增大趋势存在明显空间差异,桂东南及桂东北局部地区增大趋势最为显著。而春季、秋季和冬季  $Pa$  序列全区均分布着两种变化趋势,其中,春季以减弱趋势为主,秋季以增大趋势为主,而冬季增减的范围相近。同时,由图 13(a2~d2)可知广西各季节的赫斯特指数在全区内均大于 0.5,表明全区所有站点的  $Pa$  时间序列具有持续性(即长期记忆效应),但这种持续性程度存在显著的季节差异和空间差异,其中夏季的持续性总体最强,尤其桂西北地区赫斯特指数大于 0.8(持续性很强),冬季总体上最弱。总而言之,广西各季节降雨量序列的未来变化趋势与过去一致,即夏季全区  $Pa$  序列未来呈增大趋势,春季以减弱趋势为主,但局部会出现增大的趋势,秋季以增大为主,桂西北局部地区呈减弱趋势,冬季  $Pa$  序列桂南及桂西北地区呈减弱趋势,桂东局部及桂西北地区呈增大趋势。

综上可知,在年际、夏季尺度,广西降雨距平序列近年及未来的增强趋势总体较强,但在空间分布上有较显著的差异;在春、秋、冬季尺度,广西降雨距平序列近年及未来的变化趋势一致,但增减趋势存在显著空间差异,其中春季以减弱为主,秋季以增加为主,冬季增减范围相当。

### 3 结论

根据文中对近 65 年来广西干湿演变特征的综合分析,得出以下主要结论:

(1)广西年尺度湿润和干旱频率均呈现从桂东南向桂西北逐渐递减的分布特征,其中多年平均湿润频率和干旱频率分别为 14.08%、17.10%。而季尺度湿润和干旱频率分布的季节差异显著,湿润频率在夏季普遍小于 15%,而在秋季普遍大于 20%;干旱频率在春、夏季节( $<20\%$ )普遍低于秋、冬季节( $>20\%$ )。

(2)广西湿润与干旱的影响范围在年、季尺度上呈交替出现且增减波动的变化特征,但各自影响范围的增减变化趋势、干湿差异显著。其中,年尺度干旱年数(32 年)大于湿润年数(21 年);春季湿润年数(38 年)大于干旱年数(18 年);夏、秋、冬季均为干旱年数大于湿润年数。

(3)在年、季尺度上,广西近年来湿润强度呈显著增强趋势,而干旱强度除夏季有明显减弱趋势外,其他均没有明显的增强或减弱趋势,但存在季节差异;65 年来发生湿润或干旱的年数基本都在 70% 以上,但对应强度均以轻、中湿或轻、中旱为主。

(4)广西干湿演变的空间分异在年、各季节均以第一模态为主,其中年尺度、冬季为东南—西北相反型、春季为全区一致型,夏季为南北相反型,秋季为东西相反型。此外,年尺度、各季节的干湿演变均具有显著的数年周期强弱振荡特征。

(5)在未来一段时期内,广西降雨距平的增强趋势在年际、夏季总体较强,并在空间分布上的差异显著;而在春、秋、冬季呈增减趋势共存,但存在显著空间差异。

上述结果可作为进一步深入开展广西干湿演变预警、干湿灾害防治的重要科学基础,也为广西区域社会经济发展提供重要的科学参考。

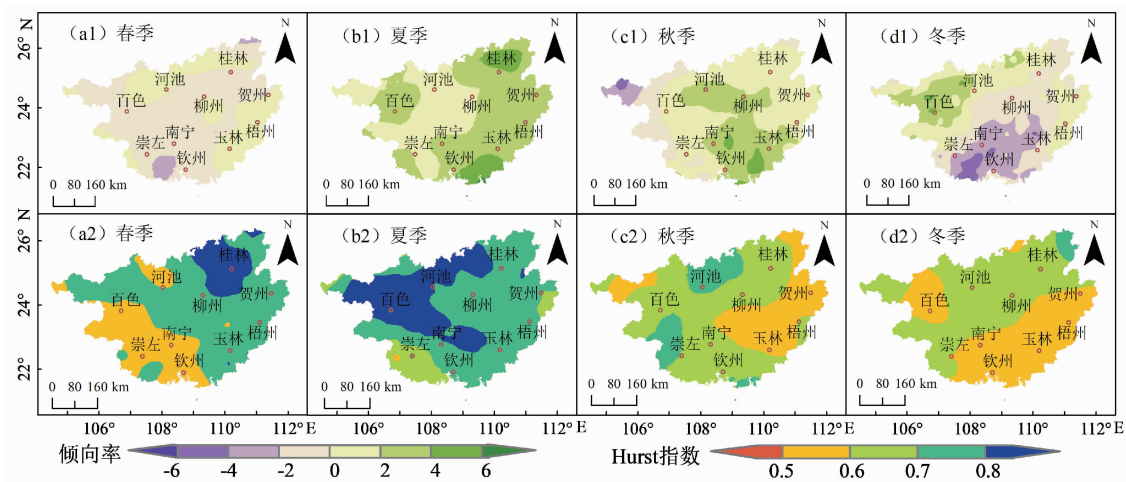


图 12 广西地区不同季节降水量距平百分率倾向率(a1~d1)及赫斯特指数(a2~d2)空间分布图

Fig. 12 Spatial distribution of seasonal  $Pa$  trend (a1~d1) and the Hurst index (a2~d2) in Guangxi

## 参考文献 (References)

- [1] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(5): 1068 – 1076. [SHEN Yongping, WANG Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(05): 1068 – 1076]
- [2] ZARCH M A A, SIVAKUMAR B, SHARMA A. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI)[J]. Journal of Hydrology, 2015, **526**: 183 – 195.
- [3] DAI A. Drought under global warming: a review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, **2**(1): 45 – 65.
- [4] 姚玉璧, 张强, 李耀辉, 等. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J]. 资源科学, 2013, **35**(9): 1884 – 1897. [YAO Yubi, ZHANG Qiang, LI yaohui, et al. Drought risk assessment technological progresses and problems [J]. Resources Science, 2013, **35**(9): 1884 – 1897]
- [5] XU K, YANG D, YANG H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015, **526**: 253 – 264.
- [6] 何慧, 陆虹. 广西 2013 年夏季旱涝急转特征[J]. 热带地理, 2014, **34**(6): 767 – 775. [HE Hui, LU Hong. Characteristics of the sharp turn from drought to flood over Guangxi in summer of 2013 [J]. Tropical Geography, 2014, **34**(6): 767 – 775]
- [7] 张凌云, 简茂球. AWTP 指数在广西农业干旱分析中的应用[J]. 高原气象, 2011, **30**(1): 133 – 141. [ZHANG Lingyun, JIAN Maoqiu. Application of AWTP index to the agricultural drought in Guangxi [J]. Plateau Meteorology, 2011, **30**(1): 133 – 141]
- [9] 唐伍斌. 广西秋冬季旱涝的时空分布特征及同期环流分析[J]. 气象, 2009, **35**(1): 108 – 113. [TANG Wubin. Analysis of spatial temporal characteristics of flood/drought and circulation characteristics in winter and autumn in Guangxi [J]. Meteorological Monthly. 2009, **35**(1): 108 – 113]
- [9] 姚蕊, 陈子桀. 基于标准降水指数的广西旱涝特征演变分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, **52**(2): 115 – 120. [YAO Rui, CHEN Zishen. Analysis of drought-flood spatio-temporal characteristics based on standard precipitation index in Guangxi [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2013, **52**(2): 115 – 120]
- [10] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(6): 1003 – 1016. [WANG Dong, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration Index [J]. Journal of Natural Resources, 2014, **29**(06): 1003 – 1016]
- [11] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应. III. 基于降水量距平百分率的南方地区季节性干旱时空特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(2): 397 – 406. [HUANG Wanhua, SUI Yue, YANG Xiaoguang, et al. Characteristics and adaptation of seasonal drought in southern China under the background of climate change III: Spatiotemporal characteristics of seasonal drought in southern China based on the percentage of precipitation anomalies [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(2): 397 – 406]
- [12] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(7): 50 – 59. [HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, LI Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(7): 50 – 59]
- [13] 王春林, 邹菊香, 麦北坚, 等. 近 50 年华南气象干旱时空特征及其变化趋势[J]. 生态学报, 2015, **35**(3): 595 – 602. [WANG Chunlin, ZHOU Juxiang, MAI Beijian, et al. Temporal-spatial characteristics and its variation trend of meteorological drought in recent 50 years, South China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(3): 595 – 602]
- [14] 李宇中, 黎伟标. 广西秋季异常干旱的气候背景及其成因[J]. 自然灾害学报, 2008, **17**(5): 101 – 107. [LI Yuzhong, LI Weibiao. Climatic background of abnormal autumn drought in Guangxi and its cause of formation [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, **17**(5): 101 – 107]
- [15] YATAGAI A, KAMIGUCHI K, ARAKAWA O, et al. APHRODITE: constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2012, **93**(9): 1401 – 1415.
- [16] 韩振宇, 周天军. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J]. 大气科学, 2012, **36**(2): 361 – 373. [HAN Zhenyu, ZHOU Tianjun. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2012, **36**(2): 361 – 373]
- [17] 刘少华, 严登华, 王浩, 等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. 水科学进展, 2016, **27**(5): 639 – 651. [LIU Shaohua, YAN Denghua, WANG Hao, et al. Evaluation of TRMM 3B42V7 at the basin scale over mainland China [J]. Advances in Water Science, 2016, **27**(5): 639 – 651]
- [18] 陈少勇, 郭俊瑞, 吴超. 基于降水量距平百分率的中国西南和华南地区的冬旱特征[J]. 自然灾害学报, 2015, **24**(01): 23 – 31. [CHEN Shaoyong, GUO Junrui, WU Chao. Characteristics of winter drought in southwest-south China based on precipitation anomaly percentage[J]. Journal of Natural Resources, 2015, **24**(01): 23 – 31]
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20481–2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 3 – 4. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20481–2006 Classification of meteorological drought [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006: 3 – 4]
- [20] DOMMENGET D, LATIF M. A Cautionary Note on the Interpretation of EOFs[J]. Journal of Climate, 2002, **15**(2): 216 – 225.
- [21] GERBER E P, VALLIS G K. A stochastic model for the spatial structure of annular patterns of variability and the North Atlantic Oscillation[J]. Journal of Climate, 2004, **18**(12): 2102 – 2118.
- [22] DOMMENGET D. Evaluating EOF modes against a stochastic null

- hypothesis[J]. *Climate Dynamics*, 2007, **28**(5): 517–531.
- [23] 冯志刚, 陈星, 程兴无, 等. 显著经验正交函数分析及其在淮河流域暴雨研究中的应用[J]. *气象学报*, 2014, **72**(6): 1245–1256. [FENG Zhigang, CHEN Xing, CHENG Xingwu, et al. DEOF analysis and its application to the research on the rainstorms in the Huaihe River Basin [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, **72**(6): 1245–1256]
- [24] HURST H E. Long term storage capacity of reservoirs[J]. *Trans American Society of Civil Engineers*, 1951, **116**(12): 776–808.
- [25] 刘琳, 徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测[J]. *自然资源学报*, 2014, **29**(10): 1792–1801. [LIU Lin, XU Zongxue. Drought/flood characteristics and trend prediction in southwest China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(10): 1792–1801]
- [26] 王孝礼, 夏军. 水文时序趋势与变异点的R/S分析法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002, **35**(2): 10–12. [WANG Xiaoli, HU Baoqing, XIA Jun. R/S analysis method of trend and aberrance point on hydrological time series [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, **35**(2): 10–12]
- [27] 孙东永, 黄强, 王义民. 基于V/S分析的河川径流长记忆性研究[J]. *水力发电学报*, 2011, **30**(6): 178–182. [SUN Dongyong, HUANG Qiang, WANG Yimin. Study on long memory on river runoff based on rescaled variance analysis [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, **30**(6): 178–182]
- [28] 郭长福, 涂志刚, 万佳威, 等. 基于R/S分析与V/S分析的滑坡变形趋势判断及稳定性研究[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(1): 111–114. [WU Changfu, TU Zhigang, WAN Jiawei, et al. Judgment of landslide deformation trends and study of landslide stability based on R/S and V/S analysis [J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(1): 111–114]

## Characteristics and Future Trend of Seasonal Dry and Wet Evolution in Guangxi Based on Multiple Rainfall Data

HU Jiaqiu<sup>1</sup>, YANG Yunchuan<sup>1,2,3\*</sup>, LIAO Li-ping<sup>1,2,3</sup>, DENG Simin<sup>1</sup>, CHEN Lihua<sup>1,2,3</sup>

(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. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The seasonal meteorological dry and wet evolution of Guangxi, which referred to frequency, range, intensity, temporal spatial variation and future trend adopted by precipitation anomaly percentage, DEOF and R/S methods, were analyzed in this paper over the past 65 years, based on APHRODITE and TRMM rainfall data. The results showed that: (1) Annual dry/wet frequency decreased gradually from southeast to northwest of Guangxi, however, seasonal dry/wet frequency presented significant differences in spatial distribution within a year. The affected range and intensity of dry/wet varied alternately and fluctuated both in annual and seasonal scales, but their variation were significant differences among these time scales. (2) The dry-wet temporal evolution emerged alternating strong and weak oscillations in all annual and seasonal scales, and the spatial variation declared different patterns, such as: the reverse type of southeast-northwest in the yearly scale and in winter, the uniformity type of whole region in spring, the opposite type of north and south in summer, and the reverse type of east and west in autumn. (3) The future rainfall in Guangxi would increase significantly in summer and in the annual scale, with slight decrease in spring, autumn and winter. This research would be an important scientific basis for further wet and dry evolution warning and dry-wet disaster prevention in Guangxi.

**Key words:** percentage of precipitation anomalies; seasonal dry and wet; dry and wet evolution; climate mode