

广西降雨亏缺型骤旱的演变过程及时空分布特征

杨星星¹, 杨云川^{1,2,3}, 田 忆¹, 廖丽萍^{1,2,3}, 谢鑫昌¹, 莫崇勋^{1,2,3}, 肖 良^{1,2,3}

(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.广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘 要:为研究降雨亏缺型骤旱在湿润地区的特性,以广西为研究区,在分析降雨亏缺型骤旱演变过程的基础上采用 Mann-kendall, Hurst, BG 分割算法、EEMD 等分析了该型骤旱在广西的时空分布特征。结果表明:(1) 该型骤旱在发生前期土壤湿度已明显偏低,在发生过程中,蒸散发、太阳辐射、气温等要素的变化特征显著相关,在发生后,土壤湿度会持续偏低 1~5 候;(2) 在广西地区发生频率为 1.0%~2.0%,发生面积主要集中在 10%以下,持续时间主要集中在 1~2 候,在夏季多发且历时长;(3) 在 1979—2015 年呈现出显著下降趋势,频次序列存在 3.45 a 的周期,且在 1999 年存在突变;(4) 骤旱频次在桂南较高,历时在桂西南等地较长;而桂中地区,频次和历时呈现出显著下降趋势;(5) 与季节性干旱同时发生的骤旱约有 6%~15%,其中桂中及桂西南地区较高。该成果可为完善广西地区旱灾预警机制提供参考。

关键词:广西; 降雨亏缺型骤旱; 时空分布; 季节性干旱

中图分类号:S423; P429

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0149-09

Characteristics of Spatiotemporal Distribution of Rainfall-Deficient Flash Drought in Guangxi

YANG Xingxing¹, YANG Yunchuan^{1,2,3}, TIAN Yi¹, LIAO Liping^{1,2,3},

XIE Xinchang¹, MO Chongxun^{1,2,3}, XIAO Liang^{1,2,3}

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Ministry of Education, Guangxi University,

Nanning 530004, China; 3.Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study the characteristics of rainfall deficient type sudden drought in humid areas, Guangxi was selected as the study area. Based on the analysis of the evolution of rainfall-deficient flash drought, we analyzed the characteristics of spatiotemporal distribution of the drought in Guangxi from 1979 to 2015 by using Mann-kendall, Hurst, BG, EEMD. The results show that: (1) this type of flash drought in the early stage of the drought, soil moisture is obviously low, in the course of the drought, evapotranspiration, solar radiation, temperature and other factors are significantly correlated; after the occurrence of the drought, soil moisture will continue to be low for 5~25 days; (2) it occurs at the frequency of 1.0%~2.0% in Guangxi, the area is mainly concentrated below 10%, the duration is 5~10 days, which often occurs in summer and lasts for a long time; (3) it had shown the significant downward trend from 1979 to 2015, the frequency was a period of 3.45-year and had a mutation in 1999; (4) the frequency of flash drought is higher in southern Guangxi and the duration of flash drought is longer in southwestern Guangxi, while the frequency and duration of sudden drought show the significant downward trend in central Guangxi; (5) the frequency of simultaneous occurrence of flash drought and seasonal drought in the region are between 6% and 15%. These results can provide reference for improving the early warning of drought in Guangxi.

Keywords: Guangxi; rainfall-deficient flash drought; spatiotemporal distribution; seasonal drought

收稿日期:2019-04-26

修回日期:2019-05-08

资助项目:国家自然科学基金(51609041,51569003,41901132);广西自然科学基金(2018GXNSFAA138187);广西教育厅科研项目(2018KY0027)

第一作者:杨星星(1993—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为洪旱灾害风险。E-mail:YangStars1@163.com

通信作者:杨云川(1982—),男,宁夏中宁人,博士(后),副教授,硕导,主要从事农业与城市生态水文学研究。E-mail:yye_sciences@163.com

“骤发性干旱(Flash Drought,简称骤旱)”是对因高温或降雨缺乏等引发的土壤湿度急速降低等现象的概称^[1-4]。骤旱历时较短,通常仅有几天,但土壤湿度的急速降低会严重影响农作物的正常生长,这种突发性也使得区域灾害预警、防灾措施的有效实施更加困难^[5]。2012 年,发生在美国中南部的骤旱事件造成大面积农作物减产、牧畜死亡,直接经济损失高达数百亿美金,成为美国历史上最为严重的自然灾害之一^[1,6-7]。骤旱由此引起了学界新一轮的关注,但是骤旱与传统干旱特性差异显著,现有旱灾理论在骤旱的监测、预警及防治中效果并不理想^[8-9]。骤旱的未知性以及危害性使得其成为当前旱灾领域的热点问题^[1,5]。

当前针对骤旱的研究多根据骤旱形成机理将其分为温度驱动型和降雨亏缺型^[1,10],研究发现,两种灾害在气候湿润地区均有发生^[11-12],本文主要研究降雨亏缺型骤旱。该型骤旱最早是由 Mo 等^[10]提出,Mo 等认为 2011 年的得克萨斯骤旱完全不同于普通的温度驱动型骤旱,其在发生以前已经发生降雨亏缺,其土壤湿度降低主要是由降雨亏缺造成的,并把这种干旱称为“降雨亏缺型骤旱(P-deficit flash droughts)”^[10];Mo 等^[10]还通过对各气象要素的敏感性分析确定了该型骤旱的判别标准,并分析了该型骤旱在美国的时空特征。国内,Wang 等^[13]运用该标准研究了该类型骤旱在我国的时空分布特征,并分析了其与季节性干旱的关系;Zhang 等^[12]基于该标准分析了我国赣江流域的降雨亏缺型骤旱与温度驱动型骤旱的时空特性差异;张翔等^[14]则采用基于多种干旱指数的骤旱定义研究了我国农业区域的骤旱时空分布特征。总的来说目前降雨亏缺型骤旱研究还处于起步阶段,现有研究多集中在区域骤旱时空分布特征分析。

广西壮族自治区地处热带季风气候区,年降水量丰沛但时空分布不均^[15],且雨热同季,易存在短时降水亏

缺现象;广西区内岩溶广泛发育^[16],使得土层浅薄且保水能力差,拥有骤旱易发的基础;而广西又是农业大省,旱灾频发造成损失巨大^[17],区域旱灾特性研究迫在眉睫。籍此,本文综合降雨、蒸散发、气温、太阳辐射等数据,在分析广西地区的降雨亏缺型骤旱的演变过程的基础上,采用多种方法全面讨论近 40 a 来该型骤旱在广西的时空分布特征。以期广西乃至华南地区的降雨亏缺型骤旱的监测、预警等工作提供科学参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

广西壮族自治区地处华南,位于 104°26′—112°04′E,20°54′—26°24′N,地跨珠江、长江、红河、滨海四大水系。全区气候温暖,平均温度 17.3~23.8℃,日照充足,年均日照时数 1 467 h,冬短夏长,干湿季分明。从地形上来看,广西东临云贵高原,西为两广丘陵,南部临海,区内四周多山,中南部则多丘陵平地。广西喀斯特地貌分布广泛,喀斯特地貌区约占总土地面积的 37.8%,其集中连片分布于桂西南、桂西北、桂中和桂东北。独特的气候条件加上特殊的地质条件使得广西地区洪旱灾害频发。

1.2 数据获取与处理

文中主要用到降雨(P)、土壤湿度(SM)、蒸散发(ET)、气温(T)、太阳辐射(Rad)5 类数据。各数据来源及属性见表 1。为同时使用多要素进行骤旱研究,需将不同来源的要素数据进行时空统一。为此,通过插值将 P 、 T 数据转换为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,将 SM 及 ET 数据按照北京时间转换为日尺度。对于 T 和 P 中数据异常较多的格点予以剔除,个别缺测数据则采用该日的多年平均值进行插补。最终可得广西地区 1979—2015 年 342 个 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 格点的 P , SM, ET, T 及 Rad(2008—2015 年)日尺度序列(图 1)。

表 1 各要素数据属性及来源

要素	所属数据集	时间分辨率	空间分辨率	时间	下载来源
P	中国地面降水日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集	日	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$	1979—2015 年	http://data.cma.cn/
SM, ET	GLDASV2.0/2.1 ^[18]	3 h	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	1979—2015 年	https://disc.gsfc.nasa.gov
T	中国地面气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集	日	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$	1979—2015 年	http://data.cma.cn/
Rad	CMADS V1.1 ^[19]	日	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	2008—2015 年	http://westdc.westgis.ac.cn

1.3 研究方法

1.3.1 骤旱判别标准 本文对于降雨亏缺型骤旱的判别主要采用以下标准^[10]: T 距平 >1 STD, ET 距平 <0 , $P<40\%$ 。其中 T , ET, P 等要素均采用候(5 d)平均值,STD 表示标准差, P 表示该候的降雨在整个时间序列内的分位数(%)。对于每一个格点,同时满足 3 个条件即认为该点发生降雨亏缺型骤旱,若一个格点连续多候均满足判别条件视为一个骤旱事件。

对于季节性干旱,则采用等 Yuan^[20] 判别标准: $D\geq 3$, $SM\%<30\%$,其中 D 表示连续月份, SM 表示月土壤湿度在整个时间序列内的分位数(%)。

此外,因为采用候(5 d)尺度进行骤旱研究,为方便统计,研究中剔除了 2 月 29 日,从每年 1 月 1 日起,每 5 d 算作 1 候,直到当年 12 月 31 日,每年即可算作 73 候。研究中还采用了旱灾频率、历时、面积等指标量化骤旱及季节性干旱。其中频率及面积的计算公式见表 2。

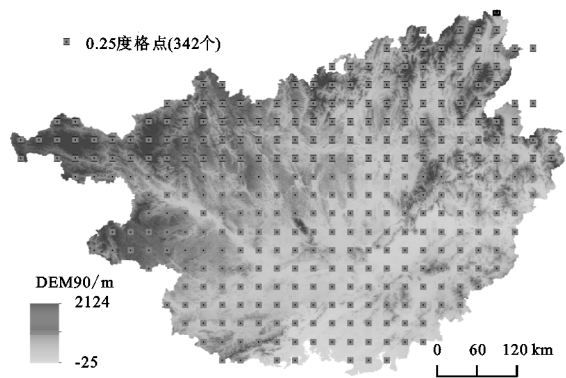


图 1 广西 0.25 度格点分布

表 2 骤旱评价指标计算公式

评价指标	计算公式	公式解释
频率(F)	$F = n / N_1 \times 100\%$	n 为某一个格点发生干旱事件的次数; N_1 为 1979—2015 年总候(月)数
面积(S)	$S = n_p / N \times 100\%$	n_p 为某一候发生干旱的格点数; N 为广西地区格点总数

1.3.2 时空分布特征分析方法 本文在统计出广西 1979—2015 年所有降雨亏缺型骤旱事件的基础上,进一步研究该型骤旱在广西地区的趋势性、突变性、周期性等特征。主要采用线性倾向率方法^[20]表示骤旱的历史变化量;采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[21]检验骤旱变化趋势的显著程度;采用 Hurst 指数法^[22]分析骤旱趋势变化在未来的延续情况;采用滑动平均法^[23]进行分期趋势分析^[24];此外,还采用了 BG 分割算法进行突变特征分析,采用 EEMD 方法进行周期特征分析。其中前几种方法已在旱灾研究领域有较多的运用,而 BG 分割算法则是一种非线性、非平稳时间序列的变异检测方法,研究发现其特别适合处理类似于气候资料的时间序列^[25-26];EEMD 是 EMD 方法的改进,其在 EMD 分解的基础上,通过引入白噪声,解决了模态混叠问题,目前也已被应用于水文气象等领域的多重周期研究^[25-26]。BG 分割算法和 EEMD 的具体计算公式可参考相关文献^[27-28]。

2 广西降雨亏缺型骤旱的演变过程及特性分析

2.1 降雨亏缺型骤旱的演变过程

为了较为准确清晰地研究降雨亏缺型骤旱的特性,选择广西地区一场典型降雨亏缺型骤旱事件,分析其演变过程。画出该次骤旱事件发生前 1 候($T-1$ 候)、骤旱发生时(T 候)、骤旱发生后 1 候($T+1$ 候)的降雨(P)距平、土壤湿度(SM)距平百分率、蒸散发(ET)距平百分率、气温(T)距平百分率的空间分布图(附图 1)。由附图 1 可知,在($T-1$)候,全区大部分地区的 SM、ET 距平百分率及 P 距平均为负值,其中桂中、桂南及桂东

的降雨距平均在 $-0.5 \sim 0$ mm, SM 与 ET 的距平百分率则表明其在桂中及桂南显著偏小,此时全区大部分区域的气温则是偏高 $0 \sim 10\%$;而 $T-1$ 候到 T 候,全区降雨亏缺程度进一步加重,桂中、桂南、桂东的降雨距平则是降至 $-2.0 \sim -1.5$ mm,桂中、桂南地区的 ET、SM 距平百分率也随之到达最低, T 也随之上升,在桂中及桂南地区偏高 30% ,且与 ET、SM 的空间分布表现出较好的相关性; T 候到 $T+1$ 候,全区降雨亏缺程度有所缓解,仅在桂东小部分地区降雨偏少,桂中桂南地区的 SM 及 ET 也随之回升,但依然偏低,气温也有所下降,依然偏高,全区 T 距平百分率为 $0 \sim 20\%$ 。

2.2 降雨亏缺型骤旱的演变特性分析

通过以上分析可知,前期 P 以及 SM 等要素偏低为降雨亏缺型骤旱的发生创造了条件,而骤旱发生的直接诱因则是 P 进一步减低。该次骤旱过程 $T-1$ 候到 T 候中 P 有显著减小的过程, P 的减少,导致土壤含水量得不到补充,从而导致 SM 降低,然后影响 ET, ET 的减小则会使得太阳辐射增加^[10],从而导致 T 偏大,同时由于下垫面的异质性等其他因素的影响,要素之间的影响并不是线性的,这也导致了要素之间的空间变化并不完全相关。该次骤旱事件中表现出的特性,在大范围统计中依然有所体现。统计广西地区 1979—2015 年所有降雨亏缺型骤旱事件中, $T-1$ 候至 T 候的降雨变化如图 2A 所示, $T-1$ 候及 $T-2$ 候的 P 距平和 SM 距平百分率如图 2D—E 所示, T 候(1998—2016 年)的太阳辐射强度距平见图 2G,骤旱时间发生后 SM 距平为负持续时间如图 2F 所示。由图 2A 可知,绝大部分降雨亏缺型骤旱事件 $T-1$ 候至 T 候之间都存在降雨减少,且减少量大都集中在 5 mm 以内。由图 2B—C 可知在降雨亏缺型骤旱发生前期降雨已经明显较少,约有 75% 的骤旱事件在 $T-2$ 候的降雨距平已经为负数,而到了 $T-1$ 候,降雨距平为负数的事件进一步增多, P 减小, SM 也随之降低, $T-2$ 候时,超过 50% 的骤旱事件的 SM 距平百分率小于 0, $T-1$ 候时则有 75%,且主要集中在 $-10\% \sim 0$ 。图 2G 则说明了 ET 的减少导致温度的增加,约有 75% 的骤旱事件在骤旱发生时太阳辐射距平百分率出现了增长。骤旱是农业干旱,其对农业的影响,则通过影响 SM 而体现。由图 2F 可知,骤旱发生虽然较为迅速,但其对农业影响依然很大,约有 75% 的骤旱事件在骤旱发生后 1~5 候, SM 距平百分率依然为负,偏低,而土壤长期缺水势必影响农作物生长发育^[5]。

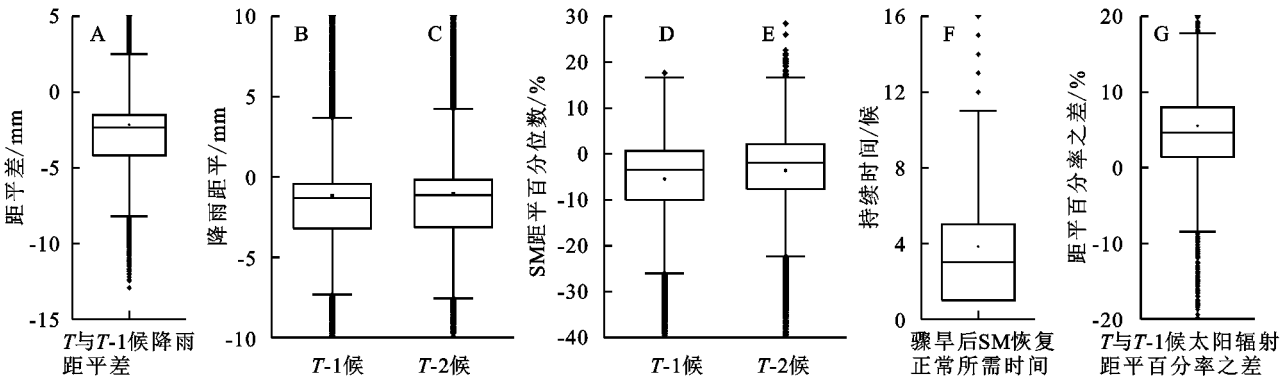


图 2 降雨亏缺型骤旱发生过程中多气象要素变化水平箱线

3 广西地区降雨亏缺型骤旱的时间分布特征

3.1 骤旱的时间分配特征

统计出广西地区 342 个格点在 1979—2015 年降雨亏缺型骤旱的频率、面积及持续候数(图 3)。由图

3 可知,降雨亏缺型骤旱在广西发生的频率并不高,其主要集中在 1.0%~2.0%,对于个别骤旱相对较多的区域,也不超过 3%;骤旱发生面积则大都在 30% 以下,以 10%以内的小范围为主;骤旱持续时间通常较短,以 1 候(5 d 以内)为主,约占 90%,2 候(10 d 以内)次之,约占 7%,大于 2 候(10 d 以上)的不足 1%。

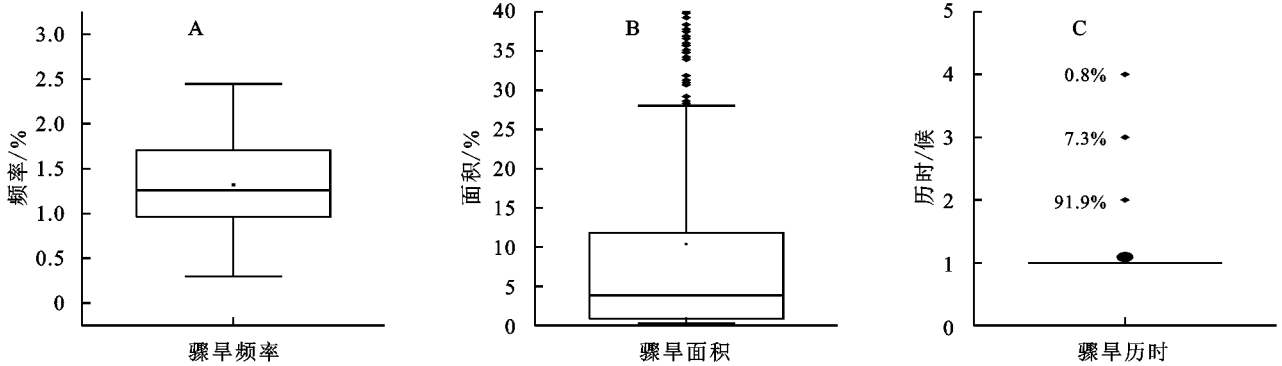


图 3 广西地区 1979—2015 年降雨亏缺型骤旱频率、历时、面积分布区间

统计出降雨亏缺型骤旱频次的各月占比、面积及历时的各月平均值(图 4)。由图 4A 可知,降雨亏缺型骤旱多发于夏季的 6—8 月份,其中 7 月份最高,约占全年的 16%,秋季的 9—11 月份骤旱较少,3 个月的占比均在 4% 以下,此外冬季 12—2 月份的骤旱占比要高于春季的 3—5 月份。由图 4B 可知,骤旱历时在月际间差异较为显著,各月平均历时为 1.0~1.4 候,在春(3—5 月)、夏(6—8 月)、冬(12—2 月)3 季各有 1 个峰值,且依次增大,秋季 3 月的骤旱历时均在 1.0 候左右。由图 4B 可知,骤旱面积在 7 月份最低,约为 18%,在 11 月份最小,约为 4%,就季节来说,夏季的骤旱面积较大,6—8 月占比均在 8% 以上,冬季次之,秋季最小,9—11 月份骤旱占比均为 4%~8%。综合频率、历时、面积来看,降雨驱动型骤旱在秋季较少,且影响也较小,而在夏季较多,历时较长,影响范围也较大;冬季骤旱的影响要高于春季,但总体上来说两季差别不大。

3.2 骤旱时间趋势变化

统计出广西地区 1979—2015 年平均每年降雨亏缺

型骤旱频次、历时、面积(图 5),并计算出序列的特征值见表 3。由图 5、表 3 可知,1979—2015 年广西地区降雨亏缺型骤旱的频次及面积序列波动显著,两者变差系数(Cv)值均大于 0.6,而骤旱历时序列则较为平缓。不过,3 指标的年序列均呈现出显著下降的变化趋势,三者的倾向率分别为-0.02 次/a,-0.002 候/a,-0.22%/a,三者的 Mann-kendall 趋势检验的 Z 值均小于-1.28(90% 显著性)。5 点滑动平均变化曲线则显示,骤旱频次与骤旱面积的变化较为相似,均呈现出逐渐下降的单一变化趋势,而骤旱历时则是在 1979—1989 年变化较为平缓,在 1989—1999 年逐渐下降,而 1999 年以后则又逐渐回升。从 Hurst 值来看,骤旱频次、面积、历时序列的变化趋势均有一定的可能会继续持续。综合来看,1979—2015 年降雨亏缺型骤发性干旱对广西的地区的影响呈现出减弱趋势。

3.3 骤旱序列突变特征

为分析 1979—2015 年降雨亏缺型骤旱的突变特征,采用 BG 分割算法,设置 $p=0.95$, $L=15$,分别检测骤旱的频次数列、历时序列及面积序列的突变点

(图6)。由图6可知,表征骤旱特性的3个序列均进行了一次分割,其中1999年为骤旱频次、面积的可能突变点,1991年为骤旱历时序列的可能突变点。再对各突变点进行显著性检验,可得,骤旱历时在1991

年处的突变点显著性检验值仅有0.68,突变不显著,骤旱频次和面积在1999年的显著性检验值虽均较大,但后者依然小于 p ,突变不显著,仅有骤旱频次的检验值大于 p ,为显著突变点。

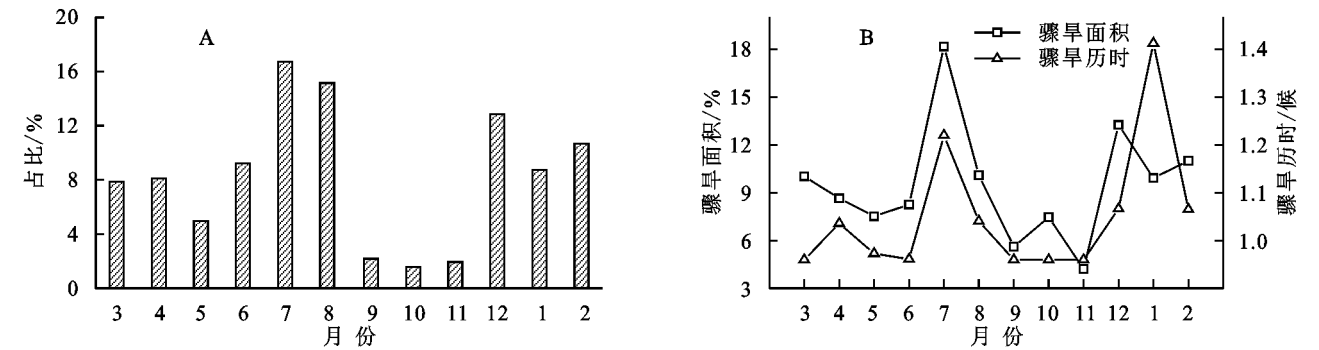


图4 降雨亏缺型骤旱年内月变化

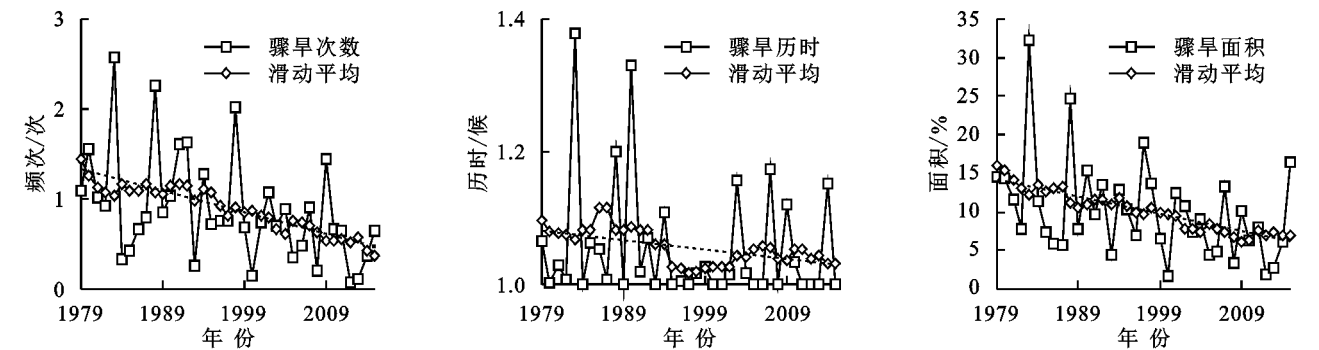


图5 广西1979—2015年降雨亏缺型骤旱频次、历时、面积变化曲线

表3 广西1979—2015年逐年降雨亏缺型骤旱频次、历时、面积序列特征值

骤旱指标	均值	Cv	倾向率	Z 值	Hurst 值
频次	0.89 次	0.66	-0.02 次/a	-2.92	0.59
历时	1.06 候	0.09	-0.002 候/a	-1.51	0.66
面积	10.11%	0.62	-0.22%/a	-2.50	0.59

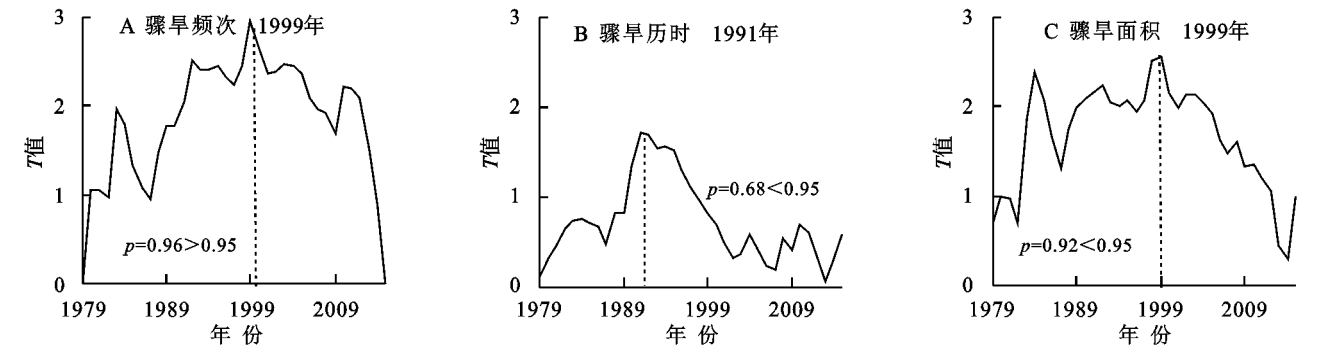


图6 1979—2015年广西地区骤旱三维度序列变异性检验

3.4 骤旱序列周期特征

采用EEMD方法对骤旱频次、历时、面积序列进行分解(图7),由图7可知,骤旱3特征序列均可分解为4个分量,各序列的IMF分量的波动均由IMF₁到IMF₄逐渐减小,其中IMF₄分量几乎没有波动,Res分量则体现了骤旱频次、历时、面积3序列的显著下降趋势,与3.2部分结论一致。通过计算中心频率可以求得各分量对应的平均周期(表4),由表4可知,骤旱历时和面积的

周期较为接近,其IMF₁对应的周期均接近3a,而骤旱频次则为3.45a;IMF₂对应的周期约为5a,而频次则为6.60a;IMF₃对应的周期约为10.5a,而频次则为12a;三者IMF₄对应的周期均较长,接近序列长度,准确性较差,故不考虑。为进一步确定所求周期的可靠性,对各序列IMF分量进行置信检验^[28](图8)。由图8可知,骤旱频次、历时、面积3序列的4个IMF分量中IMF₁的分量lnE最高,但历时的IMF₁分量值在80%置信线以

下,另外两者的值则在 80%置信线和 90%置信线之间。综上可知,表征骤旱特性的 3 特征序列中,骤旱

频次和面积的 IMF_1 包含具有实际物理意义的信息最多,其对应的 3.45,2.98 a 周期较为可靠。

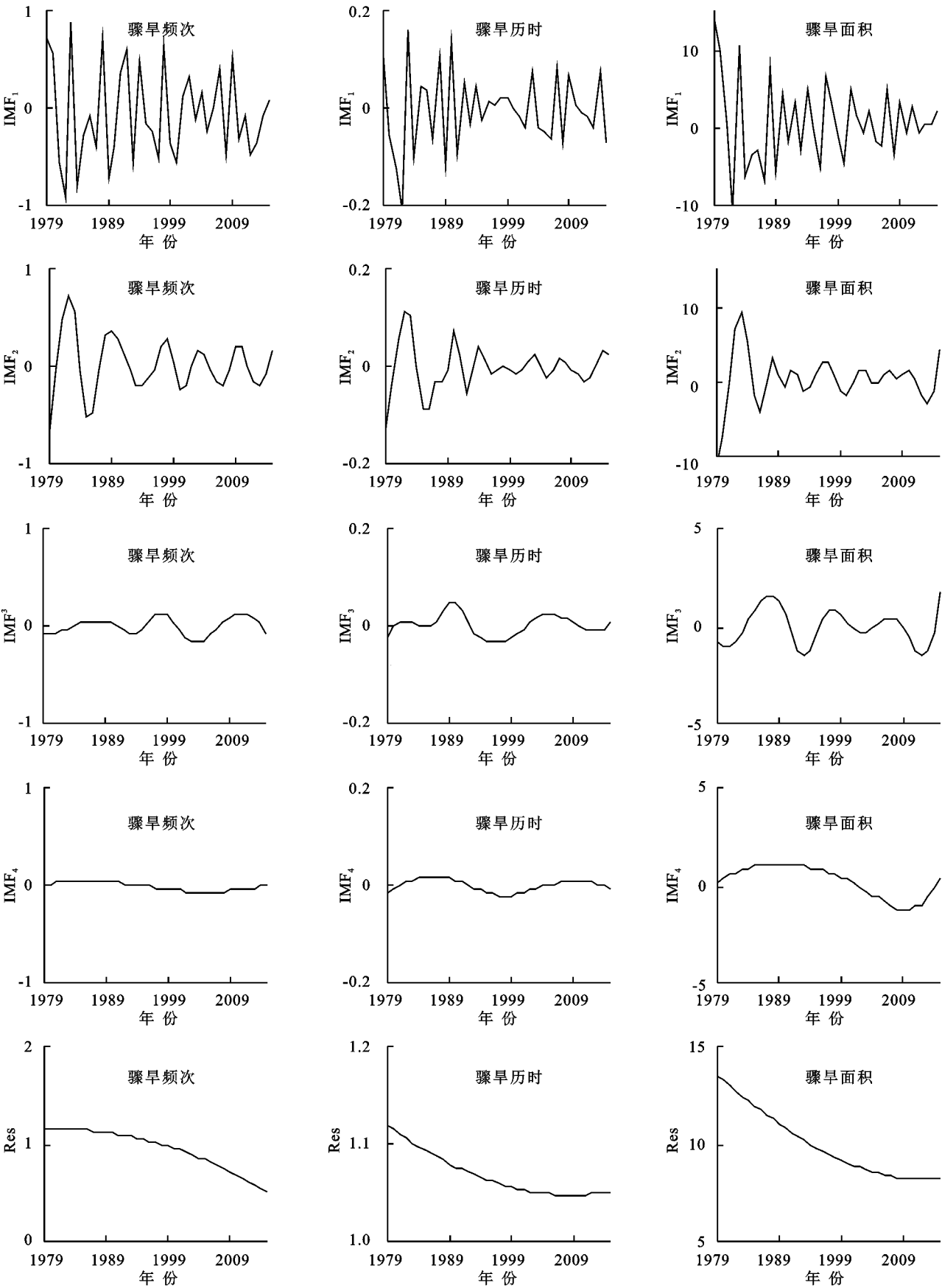


图 7 骤旱频次、历时、面积序列的 EEMD 分解

表 4 骤旱三维度序列中心频率及周期

项目	骤旱频次				骤旱历时				骤旱面积			
	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄
中心频率	0.29	0.15	0.08	0.03	0.35	0.18	0.09	0.05	0.34	0.20	0.10	0.03
平均周期/a	3.45	6.60	12.08	35.30	2.88	5.41	10.59	20.03	2.98	5.09	10.20	35.33

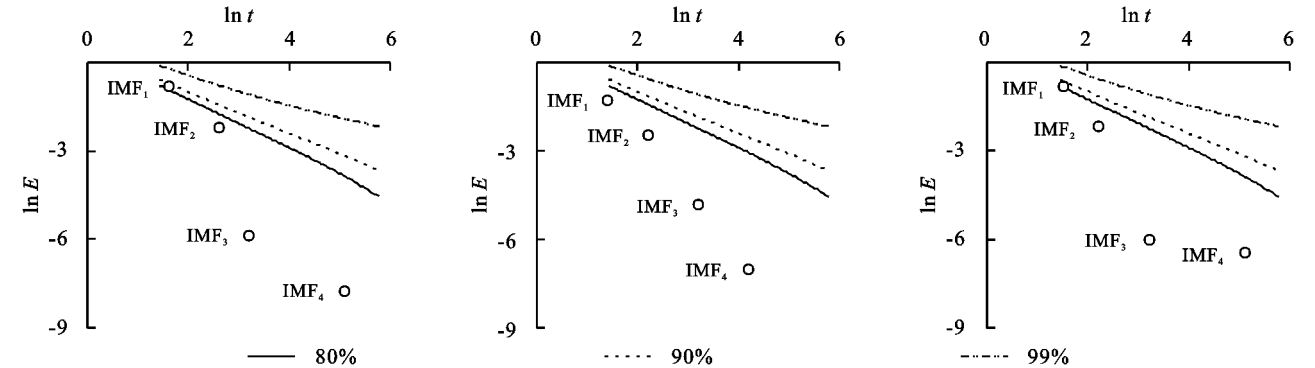


图 8 骤旱三维度各 IMF 分量的置信检验

4 广西降雨亏缺型骤旱的空间分布特征

4.1 骤旱的空间分布

统计出广西地区 342 个格点 1979—2015 年的降雨亏缺型骤旱事件的频率及平均历时,并空间插值得图 9。

由图 9A 可知,全区骤旱频率由桂北向桂南逐渐增加,其中桂北地区骤旱频率在 1.00% 以下,而桂中

以及桂南则在 1.50% 以上。由图 9B 可知,全区骤旱频率则主要集中在 1.05~1.15 候,其中桂西南及桂中的南宁、来宾、柳州等地的骤旱历时在 1.10~1.15 候,而贵港及桂林等小部分地区在 1.05 候以下,其余地区则在 1.05~1.10 候。综合来看,在空间分布上,骤旱频次和历时在总体上并没有呈现出显著的相关性,但在部分地区,例如桂西南的崇左、防城港,桂中的南宁、来宾等地,骤旱频次及历时均较高。

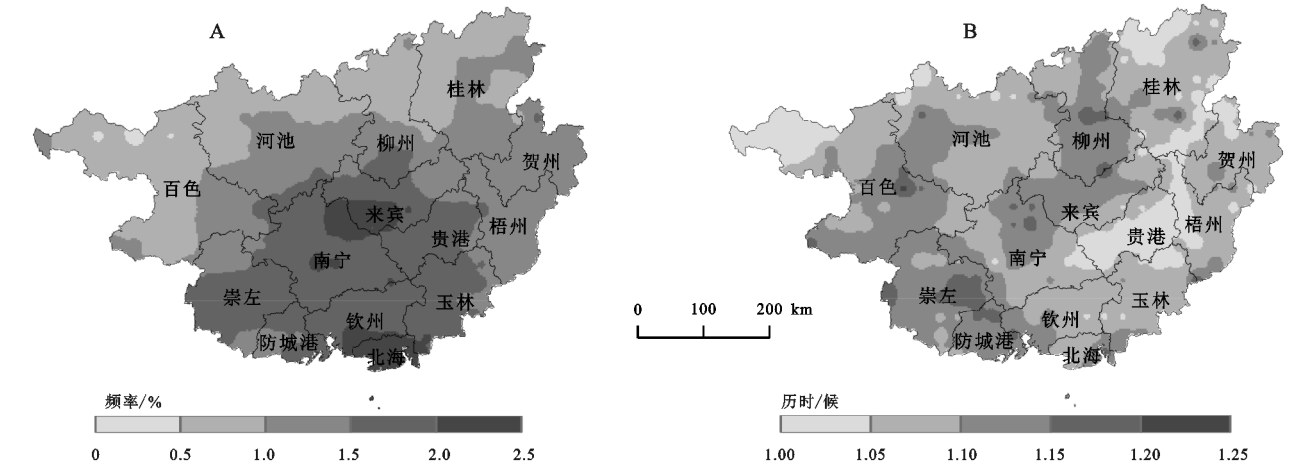


图 9 降雨亏缺型骤旱频率、历时空间分布

4.2 骤旱空间趋势变化

统计出广西 342 个格点 1979—2015 年降雨亏缺型骤旱发生次数的倾向率以及 Mann-kendall 趋势检验统计值并进行空间插值(图 10)。由图 10 可知,1979—2015 年,降雨亏缺型骤旱在全区大部均呈现出下降的趋势,其中倾向率为-0.04~-0.02 次/a 的区域最大。从空间分布上可以看出,桂东及桂西小部分地区倾向率为-0.02~0 次/a,且这些地区的 Z 值均大于-1.28,即下降趋势不显著,而在桂中、桂北及桂西南等地区的倾向率均在-0.02 次/a 以上,

且其对应的 Z 值则表明,骤旱频次在这些地区下降显著。骤旱频次下降最为显著的则是在桂中的河池、柳州、南宁、来宾 4 市的交界处,其倾向率在-0.06~-0.04 次/a,其 Z 值均小于-2.32,通过了 99% 的置信检验。

4.3 降雨亏缺型骤旱与季节性干旱

为研究降雨亏缺型骤旱与季节性干旱的关系,计算出广西地区 1979—2015 年季节性干旱的频率及平均历时以及骤旱与季节性干旱同时发生的频率并进行空间插值(图 11)。由图 11 可知,广西大部季节性

干旱的频率均在 16% 以上,季节性干旱历时以 4~6 个月为主,就空间分布来说,桂中的柳州、来宾、及河池部分地区的季节性干旱频率及历时均较高,而在桂西南及桂南地区季节性干旱的频率及历时均较低。将图 11A—B 分别与图 9A—B 进行对比,结果表明,整体上来看,降雨亏缺型骤旱与季节性干旱的频率及历时的空间分布并没有表现出显著的一致性,但在部分地区,例如桂中的柳州及来宾等地,降雨亏缺型骤旱与季节性干旱均相对较多,持续时间较长。由图

11C 可知,广西各地降雨亏缺型骤旱与季节性干旱同时发生频率在 20% 以下,较高的地区则主要集中在桂西南以及桂中,两者同时发生频率均在 10% 以上,而桂北的河池及桂林以及桂东地区则相对较小。对比图 11C 与图 9A—B,结果表明,降雨亏缺型骤旱与季节性干旱同时发生频率的空间分布图与骤旱历时的空间分布有较好的正相关关系,而对比图 11B—C,结果则表明两种干旱同时发生频率的空间分布与季节性干旱的历时的空间分布没有显著相关性。

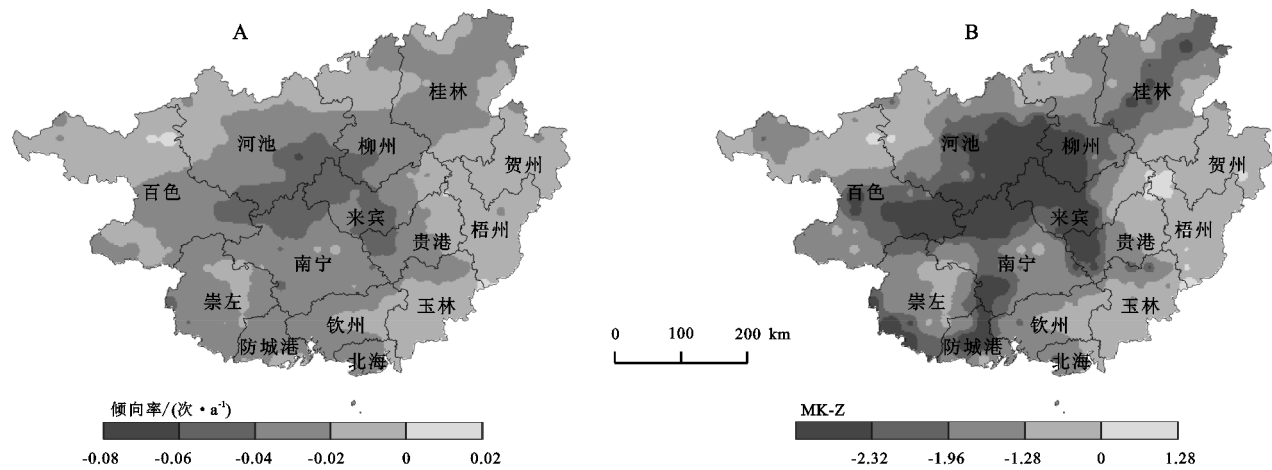


图 10 广西 1979—2015 年降雨亏缺型骤旱频次变化趋势空间分布

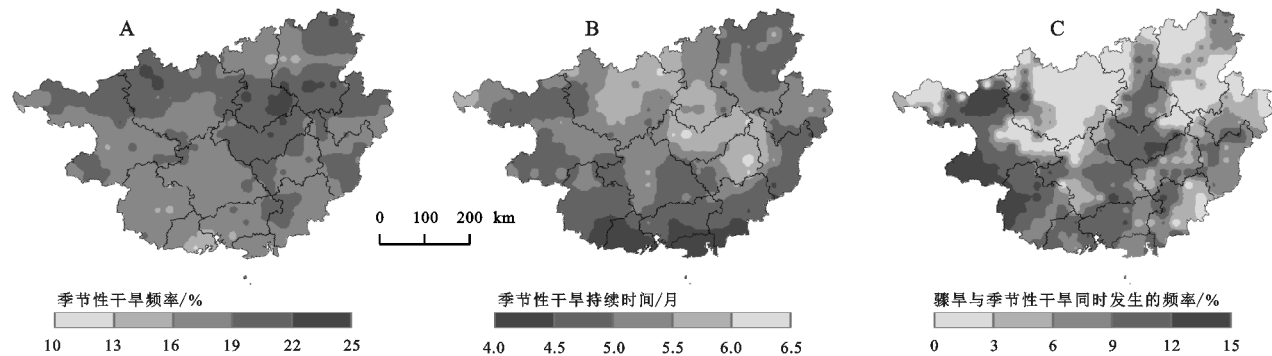


图 11 广西 1979—2015 年季节性干旱的频率及历时与骤旱和季节性干旱同时发生频率的空间分布

5 结论

- (1) 发生前期已发生降雨亏缺、土壤湿度偏低现象,其发生的直接诱因是在此基础上降雨的进一步降低,致使蒸发减少,并伴随着太阳辐射和气温增加,最终导致土壤湿度进一步下降形成骤旱。
- (2) 发生频率主要集中在 1.0%~2.0%,发生面积主要集中在 10% 以下,持续时间主要集中在 1~2 候(10 d 以内);在年内分配上,在秋季发生较少且影响也较小,而在夏季发生较多且历时较长。
- (3) 频次、历时、面积在 1979—2015 年呈现出显著下降趋势,且这种趋势有一定可能会继续延续,但仅有频次序列在 1999 年存在显著突变;频次序列存

- 在 3.45 a 的周期,面积序列存在 2.98 a 的周期。
- (4) 骤旱频次在桂南较高,历时在桂西南等地较长;在变化趋势方面,频次和历时均在桂中地区的下降趋势最为显著。
 - (5) 季节性干旱的频率及历时在桂中等地较高,在桂西南等地较低;有 6%~15% 的骤旱与季节性干旱同时发生,其中桂中及桂西南地区较高。

参考文献:

[1] Otkin J A, Svoboda M, Hunt E D, et al. Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the united states[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018,99(5):911-919.

[2] Mo K C, Lettenmaier D P. Heat wave flash droughts in

- decline[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2823-2829.
- [3] Otkin J A, Anderson M C, Hain C, et al. Examining rapid onset drought development using the thermal infrared: based evaporative stress index[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(4): 1057-1074.
- [4] Otkin J A, Anderson M C, Hain C, et al. Examining the relationship between drought development and rapid changes in the evaporative stress index[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(3): 938-956.
- [5] Ford T W, Labosier C F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 414-423.
- [6] Otkin J A, Anderson M C, Hain C, et al. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218: 230-242.
- [7] Anderson M C, Hain C, Otkin J, et al. An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS-2 simulations with U. S. Drought Monitor classifications[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(4): 1035-1056.
- [8] Sehgal V, Sridhar V, Tyagi A. Stratified drought analysis using a stochastic ensemble of simulated and in-situ soil moisture observations[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 545: 226-250.
- [9] Zhang Y, You Q, Chen C, et al. Evaluation of down-scaled CMIP5 coupled with VIC model for flash drought simulation in a humid subtropical basin, China[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(3): 1075-1090.
- [10] Mo K C, Lettenmaier D P. Precipitation deficit flash droughts over the United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(4): 1169-1184.
- [11] Wang L, Yuan X, Xie Z, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6. DOI: 10.1038/srep30571.
- [12] Zhang Y, You Q, Chen C, et al. Flash droughts in a typical humid and subtropical basin: A case study in the Gan River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 162-176.
- [13] Wang L Y, Yuan X. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(12): 1478-1490.
- [14] 张翔, 陈能成, 胡楚丽, 等. 1983—2015 年我国农业区域 3 类骤旱时空分布特征分析[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1048-1057.
- [15] 刘绿柳, 姜彤, 徐金阁, 等. 西江流域水文过程的多气候模式多情景研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(12): 1413-1421.
- [16] 周蕊, 郭纯青, 潘林艳. 中国西南岩溶区多因素组合下旱涝灾害分析[J]. *中国农村水利水电*, 2015(4): 101-104.
- [17] 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.
- [18] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394.
- [19] Meng X, Wang H, Shi C, et al. Establishment and evaluation of the China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model (CMADS) [J]. *Water*, 2018, 10(11). DOI: 10.3390/w10111555.
- [20] Xing Y, Roundy J K, Wood E F, et al. Seasonal forecasting of global hydrologic extremes: system development and evaluation over GEWEX basins[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(11): 1895-1912.
- [21] Kendall M G, Stuart A, Ord J K. The advanced theory of statistics, Vol. 3 [J]. *Technometrics*, 1947, 5(4): 525-528.
- [22] 周帅, 王义民, 郭爱军, 等. 黄河流域未来水资源时空变化[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(3): 28-39.
- [23] 王安琪, 高玉琴, 蔡涛. 大凌河流域朝阳地区 1955—2014 年降水趋势变化及突变分析[J]. *水文*, 2017, 37(5): 92-96.
- [24] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(4): 652-665.
- [25] 鲁颖, 毕硕本, 刘爱利, 等. 清代 1644—1911 年期间珠江流域旱涝灾害时空特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2867-2877.
- [26] 左慧婷, 娄运生, 李忠良, 等. 不同气候带典型区域水稻产量主控气候因子分析及预测[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(5): 114-125.
- [27] 封国林, 龚志强, 董文杰, 等. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(11): 5494-5499.
- [28] Wu Z. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.