

杨歆雨,张容焱,潘航,等,2022. 福建省多维度气象干旱特征时空分布分析[J]. 气象,48(12):1565-1576. Yang X Y, Zhang R Y, Pan H, et al, 2022. Spatio-temporal distribution analysis of multi-dimensional meteorological drought characteristics in Fujian Province[J]. Meteor Mon, 48(12):1565-1576(in Chinese).

福建省多维度气象干旱特征时空分布分析*

杨歆雨^{1,2} 张容焱^{1,3} 潘 航³ 高诗妍³ 于 晨² 鲍瑞娟¹

1 福建省灾害天气重点实验室,福州 350007

2 福建省气象灾害防御技术中心,福州 350007

3 福建省气候中心,福州 350007

提 要: 21 世纪以来,福建省出现多次严重或较严重的干旱事件,尤其近年来干旱呈现多发频发态势,干旱灾害仍然是福建防灾减灾的重要内容之一。根据福建省 66 个国家气象站 1961 年 1 月至 2020 年 12 月的逐日气象干旱综合指数(MCI),参照本地算法及《区域性干旱过程监测评估方法》,识别全省区域及 66 个气象站的干旱过程,并通过 Copula 函数,揭示福建干旱过程变化规律和重现期特征。结果表明:福建干旱历时和强度变化趋势基本一致;干旱过程多为单季干旱和两季连旱,两季连旱主要为夏秋旱和秋冬旱,三季连旱仅出现过夏秋冬连旱;大部分干旱过程存在 1~3 a 的重现周期,严重干旱过程较少;超 50 年一遇的干旱过程是 1967 年和 2003 年的夏秋冬三季连旱;重现期较短的干旱,中南部沿海一带干旱历时长、强度强,由此往北逐渐缩短和减弱;重现期长的干旱,中南部沿海一带仍然是干旱历时长、强度强区域,但北部内陆山区同时出现了干旱历时长、强度较强的区域;60 年来,除 9 年无旱,18 年局部区域干旱重现期达 100 年以上外,其余 33 年干旱重现期均未超过 50 年。

关键词: 干旱过程, MCI 指数, 重现期, 福建

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2022. 072101

Spatio-Temporal Distribution Analysis of Multi-Dimensional Meteorological Drought Characteristics in Fujian Province

YANG Xinyu^{1,2} ZHANG Rongyan^{1,3} PAN Hang³ GAO Shiyan³ YU Chen² BAO Ruijuan¹

1 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350007

2 Fujian Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Fuzhou 350007

3 Fujian Climate Center, Fuzhou 350007

Abstract: Since the 21st Century, Fujian Province has witnessed several severe or relatively severe drought events. Especially in recent years, drought has still been an important part of disaster prevention and mitigation in Fujian Province. According to the daily meteorological comprehensive index (MCI) of 66 national meteorological stations in Fujian from January 1961 to December 2020, the drought processes of the regional and 66 meteorological stations in Fujian are identified by referring to the local algorithm and the "Regional Drought Process Monitoring and Evaluation Method". Besides, the Copula function is used to reveal the characteristics of drought process change and return period in Fujian. The results show that the variation trend of drought duration and intensity in Fujian is basically consistent. The drought processes are mainly single-season drought and two-season consecutive drought. The two-season consecutive drought

* 国家重点研发计划(2018YFC1505805, 2018YFC1505906)共同资助

2021 年 10 月 8 日收稿; 2022 年 7 月 29 日收修定稿

第一作者: 杨歆雨, 主要从事气候变化和预测研究. E-mail: yangxy827@163. com

通讯作者: 张容焱, 主要从事气候应用研究. E-mail: 504691782@qq. com

mainly covers summer and autumn and the three-season consecutive drought only occurred from summer to winter. There are 1—3-year recurrence periods for most drought processes, and fewer return periods for severe drought processes. The worst droughts with a return period of more than 50 years were the summer—autumn—winter droughts in 1967 and 2003. The droughts with short return periods have long durations and strong intensities along the central and southern coastal areas, becoming gradually shortened and weakened northward. The central and southern coastal areas are still the areas suffering from the droughts with longer durations and stronger intensity, but the inland mountainous areas in the north of the province once had droughts with long duration and strong intensity simultaneously. In the past 60 years, there were 9 years with no drought, 18 years with the drought recurrence period reaching more than 100 years in some regions, and other 33 years with the drought return period not exceeding 50 years.

Key words: drought process, MCI index, return period, Fujian

引言

全球变暖加剧了气候系统能量和水分循环相互作用的变化,水分平衡变化导致极端旱涝事件频发(张霞等,2018;倪深海等,2019)。干旱是最常见、最严重的自然灾害之一,由于其影响范围广、持续时间长、出现频率高,常常给人类生产、生活带来巨大的损失(金燕等,2018;张强等,2020),据统计,气象灾害引起的损失在各类自然灾害造成的总损失中约占85%,而干旱灾害又占气象灾害的50%左右。中国是干旱灾害发生频率最高且影响最严重的国家之一,旱涝格局呈现为北方易受旱灾影响、南方旱涝并发的特征(马柱国等,2018),大范围的干旱灾害连年发生,农作物每年平均受旱面积为 $2.09 \times 10^7 \text{ hm}^2$,最高年份达 $4.05 \times 10^7 \text{ hm}^2$,平均干旱成灾面积为 $8.87 \times 10^6 \text{ hm}^2$,最高年份达 $2.68 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。每年造成的粮食减产从数百万吨到3000多万吨,干旱的直接经济损失高达每年440亿元(Su et al, 2018)。干旱是个错综复杂的过程,根据不同的研究目标选择适宜的干旱指标来预测、评估旱情的发生、发展和变化情况,才能更好地为水资源的合理利用和科学抗旱提供依据(Obasi, 1994;谢五三等, 2019;左冰洁和孙玉军, 2019;杨歆雨和李栋梁, 2019;张强等, 2021)。考虑实际业务需求,2012年国家气候中心在业务中推行了改进的气象干旱综合指数(MCI),是综合考虑前期不同时间段降水和蒸散对当前干旱的影响而构建的一种单站干旱指数(杨帆等, 2015;廖要明和张存杰, 2017;王素萍等, 2020),并发现MCI指数对干旱过程的刻画效果最好(王荣江等, 2021;谢五三等, 2021)。

对于干旱事件需要多个干旱特征量来表征,如干旱历时、干旱强度、强度峰值和干旱空间范围等,目前对干旱的描述多侧重于干旱历时和干旱强度两个方面,中国气象局(2021)发布的气象行业标准(以下简称“行标”)中规定了区域性干旱过程的确定方法、评估指标和等级划分,根据该标准可以识别单站和区域干旱过程的历时和强度。另外,用于评价气候事件严重程度的重要指标——重现期,也备受人们的关注。近年来,学者们使用全历时重现期方法(冯国章, 1995)、多元平稳随机过程游程分析(张学成等, 1996)、模糊聚类分析(朱廷举和胡和平, 2001)、马尔科夫链模型(孙鹏等, 2014)等方法对重现期进行研究,但是不同的干旱变量(如:干旱历时和干旱强度)往往是用不同的分布函数进行拟合的,使得利用传统的统计方法建立多变量模型变得困难。Sklar(1959)提出的Copula作为一种联合函数近年来被广泛地引入到水文干旱、气象干旱等研究中。Copula函数能较好地对干旱问题中的多特征量进行多元拟合,并对多变量系统进行条件概率和重现期分析。许多研究也表明,游程理论和Copula函数的联合应用能够为多变量干旱特征分析提供有效的研究途径(徐春晓等, 2011;周玉良等, 2011),拟合得到的干旱历时和干旱强度的联合概率分布,其计算的重现期与实际受旱状况相符(李天水等, 2016)。

福建地理位置特殊,天气气候复杂,属于亚热带湿润季风区,虽然地处中国东南沿海,降水充沛,但由于降水量年际间和季节间的不均匀性以及季内分布的脉冲性,使季节性连旱发生频繁,干旱季节性、区域性很强(陈家金等, 2006)。21世纪以来,福建省出现多次严重或较严重的干旱事件,尤其近年来

干旱呈现多发频发态势:2003 年,发生自 1939 年以来最严重的夏秋冬连旱,全省农作物受旱面积达 17.50 万 hm^2 ,361 个乡镇 187 万人出现饮水困难;2018 年,发生春夏连旱,粮食作物受灾较重,特别是对早稻播种和秧苗生长不利,部分地区早稻改种旱地作物;2019 年,发生秋冬连旱,导致水稻、玉米、薏米、锥栗、茶叶等减产,全省 13.42 万人受灾,农作物受灾面积为 1.753 万 hm^2 ,绝收面积为 0.11 万 hm^2 ,直接经济损失达 1.52 亿元;2020 年,发生夏秋连旱和冬旱,福州、宁德等地出现明显人饮水困难和工业用水紧张情况。可见,干旱灾害已成为福建防灾减灾的重要内容之一。

回顾已有的工作发现,前人通过日雨量 $\leq 2\text{ mm}$ 连续日数(连旱日数)统计,对福建干旱气候态已有足够的认识,但由于连旱日数不属于随机变量,无法开展重现期的研究。另外,张容焱等(2019)分析改进的 MCI 指数在福建的适应性,认为该指数适用于福建干旱事件的研究,构建了适合福建的气象干旱过程监测预警和强度评估指标(以下简称“本地算法”),并开展了业务应用。本文根据“行标”及 MCI 指数的干旱等级(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2017),识别 1961 年 1 月至 2020 年 12 月福建省各站点的干旱过程和全省干旱过程。但是在研究中发现,根据“行标”规定方法,用 66 个站的 MCI 均值来表征全省区域的 MCI 值,识别出来的干旱过程与《中国气象灾害大典福建卷》(温克刚等,2007)及《福建水旱灾害》(福建省人民政府防汛抗旱指挥部办公室,2018)中记载的历史过程存在一定差距,而“本地算法”建立的全省 MCI 综合指数序列,识别出来的干旱过程更加接近历史过程,因此本文在研究全省区域干旱时使用“本地算法”,并进行重现期特征研究,以期对福建干旱风险的进一步认识提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

根据 GB/T 20481—2017 气象干旱等级(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2017)干旱综合指数计算方法,利用福建省 66 个国家气象站,1961 年 1 月至 2020 年 12 月逐日气温、降水等数据,计算逐日 MCI 指

数,并划分逐日干旱等级。

1.2 方法介绍

1.2.1 干旱过程的确定

(1) 单站干旱过程

根据单站逐日 MCI 指数,采用“行标”中单站干旱过程监测方法,计算单站干旱历时、干旱累计强度和干旱过程强度:当单站(区域)日干旱强度达轻旱及以上等级,且连续 15 天及以上,至少有 1 天干旱强度达中旱及以上等级,则发生一次单站干旱过程。单站干旱时段内第一次出现轻旱的日期,为干旱开始日;干旱过程发生后,但出现连续 5 天干旱等级为无旱时,则单站干旱过程结束,干旱过程结束前最后一天气象干旱等级达轻旱及以上的日期为结束日。开始到结束日(含结束日)的总天数为干旱过程持续日数,即干旱历时。

累积干旱过程强度是干旱指数强度与持续时间的综合,而:

$$D(n) = n^{\alpha-1} \sum_{i=1}^n I_d(i) \quad (1)$$

式中: $D(n)$ 为累积干旱强度, n 为干旱过程日数, $I_d(i)$ 为干旱过程内第 i 天的单站日干旱强度绝对值, α 为权重系数,一般取 0.5~1.0,推荐取 0.5。

通过滑动单站干旱过程内持续干旱天数计算单站累积干旱强度,取单站干旱过程内最强累积干旱强度作为单站干旱过程强度,而:

$$Z = \text{MAX}_{k=1,m} \{ \text{MAX}_{n=1,k} [D(n)] \} \quad (2)$$

式中: m 为干旱过程总天数, n 为干旱过程内干旱持续天数 $1 \leq n \leq m$; $D(n)$ 为单站累积干旱强度; $\text{MAX}_{n=1,k}()$ 为通过不断滑动单站干旱过程内持续天数 n ,比较寻找 $n=1,2,\dots,k$ 天的最大单站累积干旱强度; $\text{MAX}_{k=1,m}()$ 为通过不断滑动单站干旱过程内干旱日 $k(1 \leq k \leq m)$,比较寻找包含第 k 天的最大累积干旱强度。

(2) 区域干旱过程

采用“本地算法”,建立全省区域 MCI 综合指数序列,分析区域干旱等级和过程判断指标,具体定义和算法等详见张容焱等(2019)。

(3) 干旱过程命名规则

干旱过程严格按照福建气候季节命名,以 3—6 月为春旱,7—9 月为夏旱,10—11 月为秋旱,12 月至翌年 2 月为冬旱,冬旱年份命名以 12 月的年份为冬旱年。

跨季节连旱年份命名规则:以起始一季干旱的年份命名。如:秋冬连旱时间虽然跨入新年,年份命名为上一年的秋冬旱,冬春连旱也命名为上一年的冬春旱。

1.2.2 Copula 函数

当选用干旱历时和干旱强度两个干旱特征变量共同来描述干旱过程时,则需要解析两者之间的联系,即计算它们的联合概率分布函数。目前,应用较广泛的是 Archimedean Copula 函数族(Shiau and Modarres, 2009)。利用样本经验概率和 Copula 函数联合概率的离差平方和最小可选取最优 Copula 函数。本文选取 Gumbel Copula 函数来模拟干旱强度和干旱历时的依存关系。

1.2.3 边缘分布函数

干旱历时和干旱强度分别服从指数分布和 Gamma 分布,其模型参数可用极大似然估计法得到。干旱历时、干旱强度的联合分布函数和联合超越概率的计算方法详见杨歆雨和李栋梁(2019)。

1.2.4 重现期确定

重现期是用于评价气候事件严重程度的一项重要指标,近年来也受到学者们的广泛关注。干旱重现期定义为在一定年代的资料统计期间内,大于或等于某干旱持续时间(或强度)的干旱出现一次的平均间隔时间,通俗的来讲就是这么严重的干旱,多少年出现一次。Shiau and Shen(2001)推导出了干旱历时和干旱强度单变量重现期公式,但在干旱特征的分析中往往需考虑多个干旱特征量来分析干旱的重现期,因此本文引入干旱历时和干旱强度的联合属性。Shiau(2006)提出基于 Copula 函数的干旱历时和干旱强度联合分布的重现期可以分为两种情况:干旱历时或干旱强度其中一个达到某一阈值,干旱历时和干旱强度同时达到某一阈值。本文主要分析干旱的联合重现期,即第一种情况,其计算公式如下:

$$T_{DS} = E(L) / [1 - F_{DS}(d, s)] \quad (3)$$

式中: T_{DS} 为干旱历时和干旱强度的联合重现期, $E(L)$ 为干旱间隔的数学期望值, $F_{DS}(d, s)$ 为干旱历时和干旱强度的联合分布函数。另外,对于建立好的 Copula 函数,其边际函数概率分布值的不同组合可能产生相同的累计概率,在干旱风险评估中,往往对随机事件的超临界状态更感兴趣,因此引进第二重现期的概念(刘晓云等, 2015)。联合重现期与第二重现期不同在于,联合重现期是多元变量的联合

属性,第二重现期则是将多元变量投影到一元变量的属性。本文研究发现,由联合重现期计算得到的干旱典型年份多年一遇小于历史记载的干旱重现期,而第二重现期获得的多年一遇接近历史真实情况,因此最终选取第二重现期对福建干旱过程进行描述。

2 干旱气候特征

2.1 干旱过程年季变化特征

2.1.1 全省干旱过程年频数

60 年间,共发生 69 次干旱,年度干旱次数多为 1 次(共计 36 年,占 52.17%),一年中发生干旱次数最多为 3 次的有 5 年(1964、1971、1977、2007、2011 年),未出现干旱的有 9 年(1961、1965、1972、1975、1976、1997、2001、2010、2016 年)。

2.1.2 全省干旱季节分布

福建气象干旱以单季旱为多,占比达 58%,其中又以夏旱为最多,冬旱为次;两季连旱占比达 36%,以秋冬旱为多,夏秋旱次之,冬春旱最少;三季连旱占比仅 6%,皆为夏秋冬连旱,其他季节组合的三季连旱从未出现过。60 年间共发生 4 起夏秋冬连旱,分别出现在 1967、1978、1995 和 2003 年。

2.1.3 历年全省干旱过程强度和持续时间

由于指数累加的干旱强度包含有时间分量,不能充分体现干旱时间长强度弱,或干旱时间短强度强的过程差异,故采用平均强度分析历次全省干旱过程强度演变特征。

干旱平均强度最大的是 2011 年的春旱(图 1),其次是 1962 年的冬春旱,2003 年的夏秋冬旱仅位列第三。持续时间最长的是 2003 年夏秋冬旱,其次是 1967 年的夏秋冬旱。按照 95%、80%、50% 百分位数划分强度,特强干旱过程有 3 次(2011、1962 和 2003 年),强干旱过程有 10 次,较强干旱过程有 21 次,弱干旱过程有 35 次。同样采用百分位数划分持续时间,特长过程有 2003、1967 和 2020 年共 3 次。多年来,干旱持续时间变化不大(图 1 中绿虚线),但强度变化有所增加(图 1 中黑虚线)。

从图 1 可见,1962 年和 2003 年属于干旱强度高、持续时间长的类型,2011 年春旱属于干旱强度高、持续时间短的类型,2007 年春旱属于强度弱、持续时间短的类型,等等。

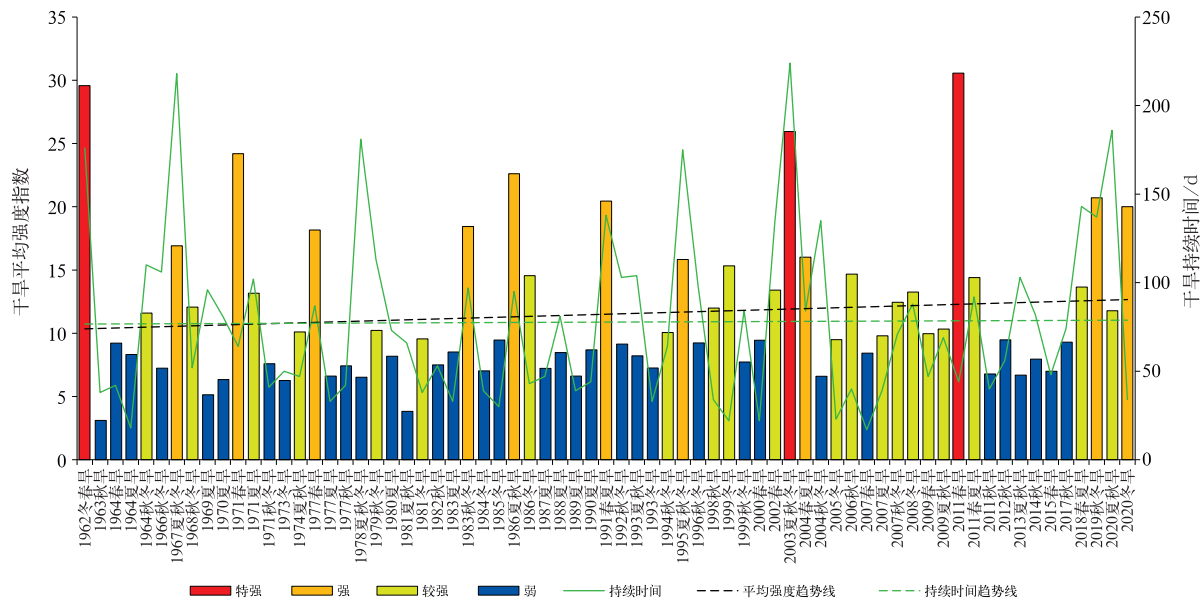


图 1 1961—2020 年福建省历史干旱过程平均强度和持续时间变化

Fig. 1 Changes in mean intensity and duration of historical drought processes in Fujian Province during 1961—2020

2.2 干旱空间分布

2.2.1 单站最强干旱过程强度及持续时间空间分布

各站历史最强干旱过程累计 MCI 指数最大是 28.7(平潭,2003 年),最小是 14.5(周宁,1967 年),从强度的空间分布(图 2a)看,宁德南部沿海至漳州沿海,以及南平地区闽江流域河谷盆地和九龙江流域河谷盆地强度强,鹭峰山区和闽西强度弱。

最强干旱过程持续时间也是以沿海和武夷山为长(图 2b),其中宁德沿海大部、福州内陆县市、泉州—厦门—漳州接壤县市、武平县超过 220 d,即干旱时长超过 7 个月,最长的是长泰 343 d(1962 年 7 月 8 日至 1963 年 6 月 15 日),最短的有 119 d(上杭,2019 年 10 月 8 日至 2020 年 2 月 3 日)。值得一

提的是,全省干旱过程最长持续时间 224 d(2003 年 6 月 19 日至 2004 年 1 月 28 日),远短于单站干旱最长持续时间,对全省而言没有四季连旱,符合气候区概念,但对于局地而言,由于降水年际间、地域间分配不均,局地先后出现极端的四季连旱属正常,但没有出现一年以上的连旱,总有一段时间有足够的降水,通常间断于 5—6 月的雨季或台风季。

最强干旱发生年份有一定的空间规律(图 2c),华安、大田、漳平、仙游,以及它们包围的泉州内陆县市(晋江和九龙江流域)、漳州南部发生年份最早(1962 年),其中九龙江流域最强过程具有强度强、持续时间最长的特点;宁德、福州沿海,及内陆大部县市(闽江流域和汀江下游)发生在 2002 年以后,特别是 2003 年的典型特旱年在这些区域成片出现。

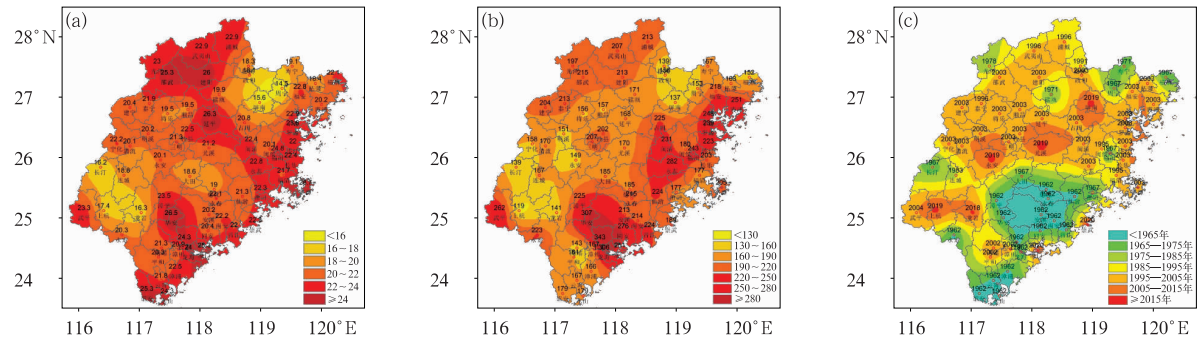


图 2 1961—2020 年福建省(a)最强干旱过程强度、(b)最强干旱过程历时(单位:d)、(c)最强干旱过程发生年份空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of (a) intensity of heavies drought process, (b) duration (unit: d) of the heavist drought process and (c) years with heavist drought process in Fujian Province during 1961—2020

2.2.2 单站不同干旱等级频数空间分布

统计各站历年 MCI 指数表征的各类干旱强度(轻旱、中旱、重旱、特旱)年平均次数(图 3),轻旱和中旱的空间分布相似,频数由中南部沿海向北部山区递减,其中轻旱 30.8 d(周宁)~65.7 d(崇武),中旱 18.0 d(周宁)~40.9 d(崇武);重旱以中南部沿海、三明南部和龙岩东部为多,年平均超过 12 d,最多是崇武的 15.4 d,最少是寿宁的 5.1 d;特旱年平均出现很少,分布散,长汀最少仅为 0.1 d,最多不超过 5.1 d(平潭和延平),超过 3.5 d 的县(市)还有诏安、南靖、永定和晋江。

综上所述,鹭峰山高海拔区域干旱少且轻,中南部沿海县市干旱多且重。

3 多年一遇干旱过程

多年一遇是指小概率事件,在决策服务中更关注某个干旱过程历时和强度是否偏离了常态,出现对自然界有显著不利影响的极端现象。为了进一步认识福建干旱小概率事件的气候特征,统计了全省和 66 个国家气象站 2、5、10、20、50 和 100 年重现期下干旱强度、干旱历时,以及干旱历时和干旱强度联合重现期,各种重现期的阈值可用来衡量干旱过程的极端程度。

3.1 多年一遇计算模型参数确定

由于干旱历时和干旱强度分别服从指数分布和 Gamma 分布,其中 Gamma 分布的密度函数是指在序列的有序性、事件发生率的齐次性、计数特征具有独立增量和平稳增量情况下,可以得到事件发生 i 次时间的概率密度。而指数分布实际上是 Gamma

分布的特殊情况,Gamma 分布可以看成是 N 个指数分布的数学期望,由此可以认为 Gamma 分布的模型参数是一种平均态(气候态)下估计出的参数。因此,本文在确定模型参数时,先识别“行标”法中全省干旱序列(即 66 个站逐日 MCI 指数逐日均值)的干旱过程,然后用极大似然法估计出气候态下全省干旱过程的模型参数,再利用“本地算法”的全省 MCI 序列识别用于计算多年一遇干旱过程,采用气候态下的模型参数和最优 Copula 模型,得到全省干旱过程的重现期。

为了验证确定模型参数方法使用的合理性,对“行标”法和“本地算法”形成的 2 套历史干旱过程,分别采用 Copula 函数确定多年一遇模型参数,结果“行标”法历史干旱过程多年一遇与史料记载的严重程度很不一致,多年一遇的年数皆偏小。究其原因,表示平均态的“行标”过程弱化了对福建有影响的干旱过程,而以“本地算法”过程估计参数是将有影响的干旱过程看做气候常态了,所以最终选择的方法明显提高了多年一遇的量值,特别是 2003 年福建百年一遇的特旱年,多年一遇值更接近历史。

3.2 区域干旱过程的重现期特征

3.2.1 全省干旱过程重现期时序特征

福建省严重干旱的年份较少,超 50 年一遇的干旱仅有 1967 年夏秋冬旱和 2003 年夏秋冬旱;超 30 年一遇的干旱为 1962 年冬春旱和 1995 年夏秋冬旱;超 20 年一遇的干旱为 2020 年夏秋旱;超 10 年一遇的干旱为 1991 年春夏旱、2002 年春旱、2018 年春夏旱及 2019 年秋冬旱;其余年份干旱重现期基本在 1~3 年(图 4)。

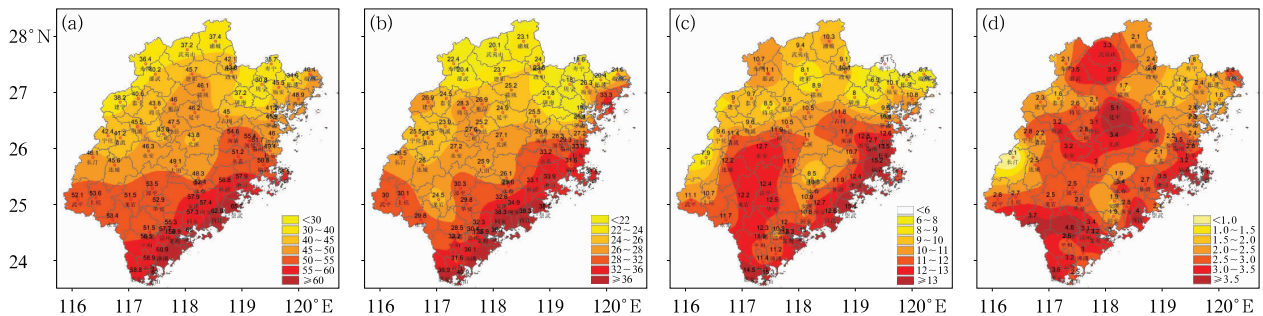


图 3 1961—2020 年福建省(a)轻旱,(b)中旱,(c)重旱和(d)特旱年平均出现天数(单位:d)

Fig. 3 Average annual days (unit: d) of (a) light drought, (b) moderate drought, (c) severe drought and (d) extreme drought in Fujian Province during 1961—2020

3.2.2 不同重现期下的干旱强度空间分布

根据单站干旱过程强度指数,分别统计了单站干旱过程强度的多年一遇阈值,如图 5 所示,无论多少年一遇,鹭峰山区都是最弱区;对于 2 a、5 a、10 a 一遇的干旱,其强度的空间分布较为相似,中南部沿海一带为干旱强区;对于 20 a、50 a、100 a 一遇的干旱,除了中南部沿海地区的干旱强区外,南平西北部

(光泽、邵武、武夷山)也是一个强区。50 年一遇强区干旱强度指数超过 18,最强的东山达到 20.1;百年一遇强区干旱强度指数超过 20,最强的仍然是东山,为 21.9。

3.2.3 不同重现期下的干旱历时空间分布

同样的,根据单站干旱过程历时,统计了单站干旱历时多年一遇阈值,干旱历时的阈值随着年数的

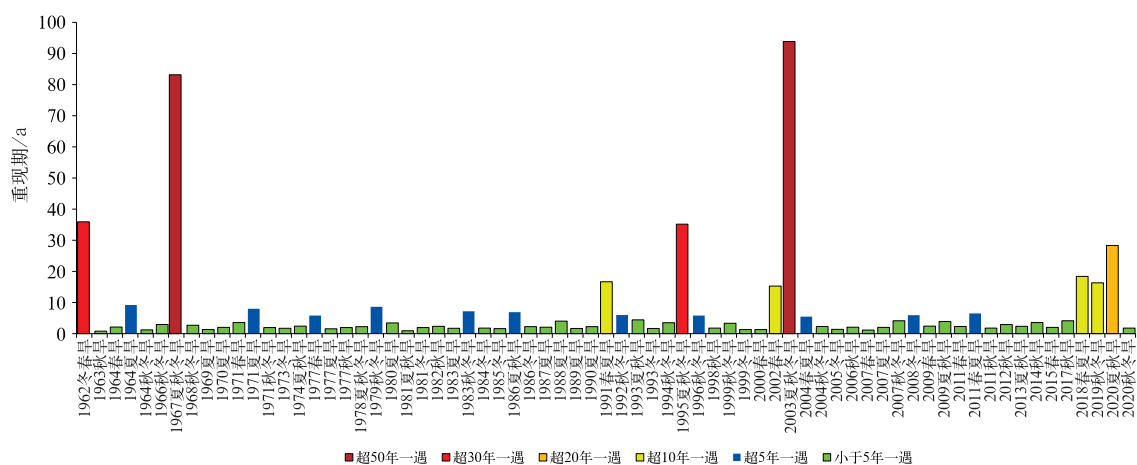


图 4 1961—2020 年福建省干旱过程重现期年变化

Fig. 4 Interannual variation of drought return periods in the whole province in Fujina Province during 1961—2020

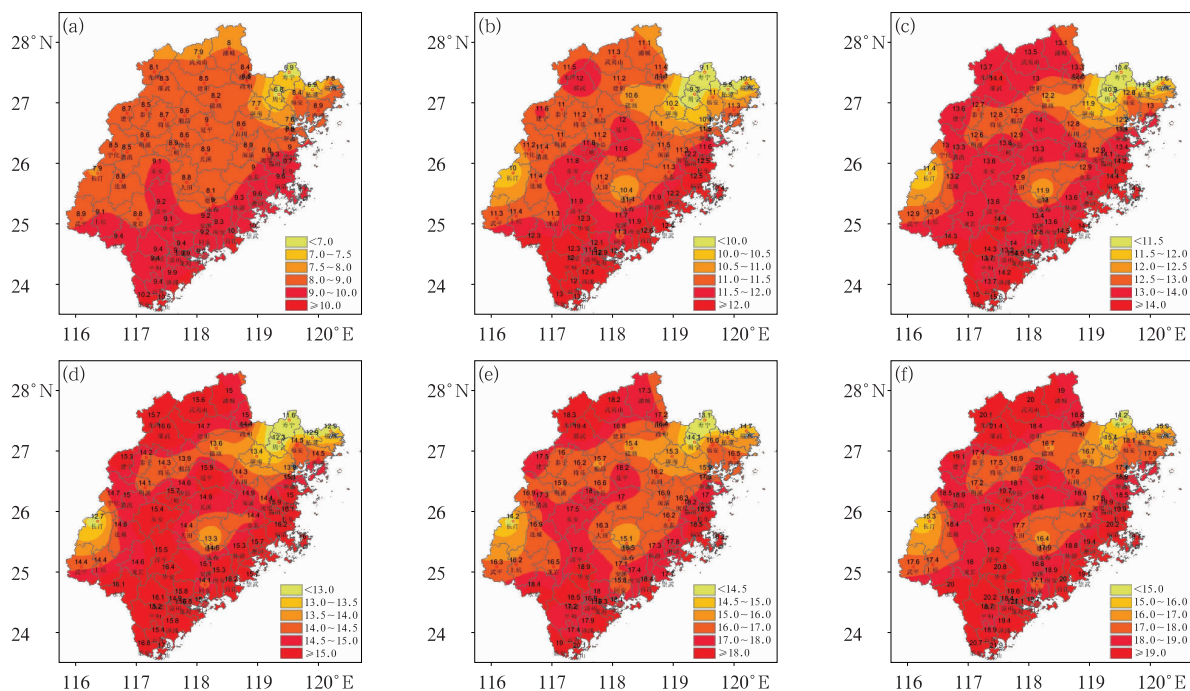


图 5 福建省不同重现期下干旱强度的空间分布

(a) 2 a, (b) 5 a, (c) 10 a, (d) 20 a, (e) 50 a, (f) 100 a

Fig. 5 Spatial distribution of drought intensity under different return periods in Fujian

(a) 2 a, (b) 5 a, (c) 10 a, (d) 20 a, (e) 50 a, (f) 100 a

增加,空间分布与强度阈值类似(图 6),鹭峰山区属于干旱历时短的区域,中南部沿海区域历时长。分析图 6a,平均 2 年就会遇到历时 40~80 d 的持续气象干旱;50 年一遇除了鹭峰山区,基本上都在 200 d 以上,持续气象干旱接近 4 个月(图 6e);而百年一遇全省都达到 200 d 以上,其中沿海区域接近或超过 300 d,历时近 10 个月(图 6f)。

结合图 5 可以看出,对于 2 a 和 5 a 这类重现期较短(频发)的干旱,中南部沿海一带有干旱历时长、干旱强度强的特点,越往北干旱历时短、干旱强度弱;但对于重现期长,特别是 50 年和 100 年一遇的干旱,中南部沿海一带仍有干旱历时长、干旱强度强的特点,另一个强度较强、历时较长的区域在南平西北部(光泽、邵武、武夷山);鹭峰山区属于干旱历时最短、干旱强度最弱的区域。

3.3 典型干旱年的重现期特征

为了分析 1961 年以来各年干旱的空间分布,将单站年内间隔小于 1 个月的干旱过程合并,重新统计干旱强度、历时和重现期,各站干旱起止时间差异很大,允许跨年统计。

首先分析 1962、1967、1971、2003、2004 年和 2020 年共 6 年,它们的共同特点是干旱强度之强(特强等级)、范围之广(大半个省域)、持续时间之长(特长等级)为历史罕见(图 7),史料记载的灾害严重的区域都发生了超 50 年一遇的干旱,局部超百年,而其余年份皆未出现超百年一遇的干旱。据史料记载,1962 年冬春连旱,加上 1963 年秋旱,中南部沿海成为全省最严重的旱区,九龙江、晋江流域发生了 50 年至超 100 年一遇的干旱,可以徒步过河。1967 年夏旱连秋旱,沿海和龙岩、三明干旱严重,其中闽江口周围和内陆局部发生了 50 年至超 100 年一遇的干旱。1971 年春旱、夏旱,接着又出现秋冬旱,严重干旱区主要分布在内陆,特别是南平地区,闽江中游流域发生了 50 年至超 100 年一遇的干旱,古田水库无水发电,福州照明用电受到影响。2003 年夏秋冬连旱是突破历史纪录的特旱年,宁德地区受灾最为严重,中北部沿海和三明、南平局部发生了 50 年至超 100 年一遇的干旱。续 2003 年冬季结束(跨年至 2004 年 2 月)的特旱年后,接着 2004 年发生的春夏旱,局部区域水资源短缺导致严重的饮用水紧张,龙岩西部出现了超百年一遇的干旱。2020 年

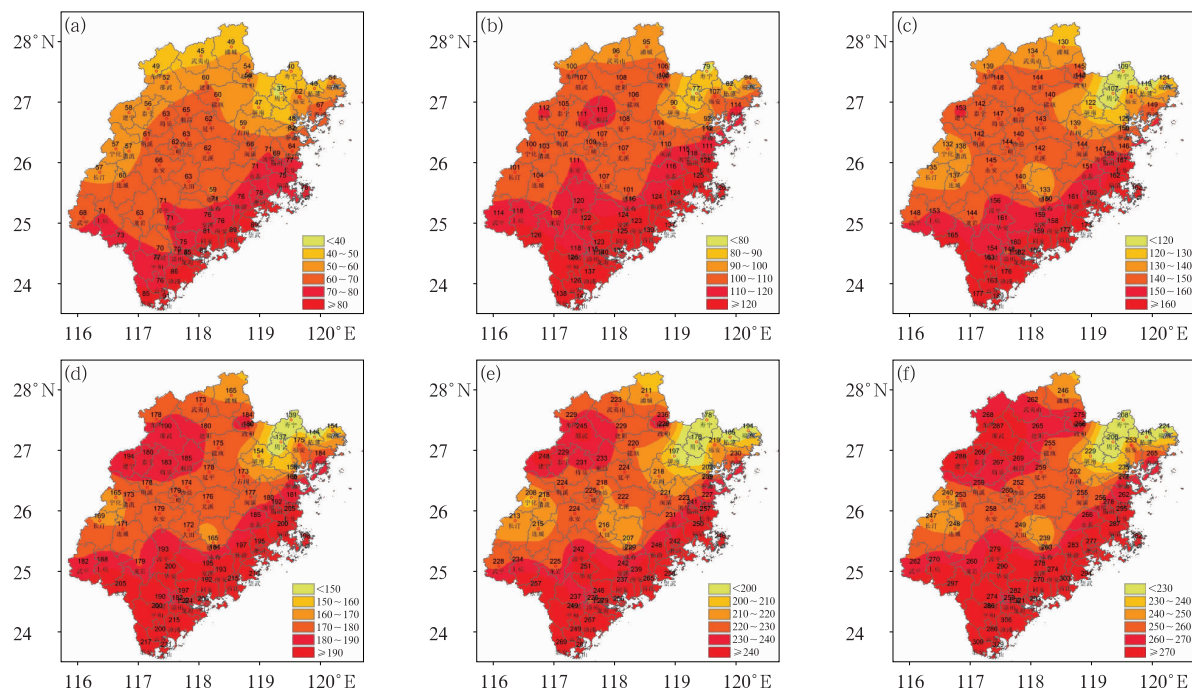


图 6 福建省不同重现期下干旱历时的空间分布(单位:d)

(a) 2 a, (b) 5 a, (c) 10 a, (d) 20 a, (e) 50 a, (f) 100 a

Fig. 6 Spatial distribution of drought duration under different return periods (unit: d) in Fujian Province

(a) 2 a, (b) 5 a, (c) 10 a, (d) 20 a, (e) 50 a, (f) 100 a

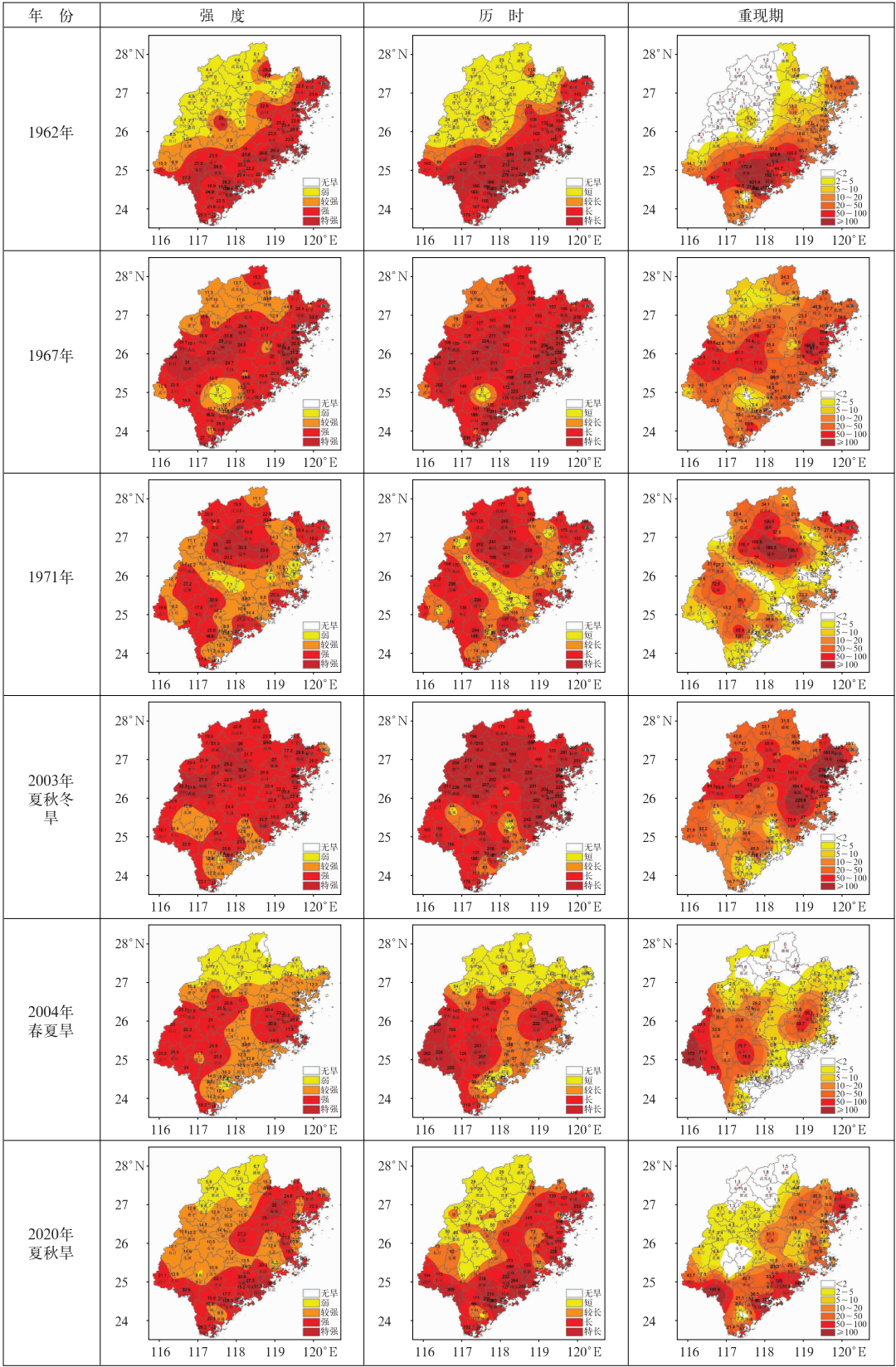


图 7 福建省重现期超 100 年一遇气象干旱年强度、历时和重现期(单位:a)空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of drought intensity, duration and return period (unit: a) over 100 years in Fujian Province

夏秋旱主要发生在沿海和龙岩南部,霞浦、崇武、南安、厦门、同安和永定发生超百年一遇的气象干旱。

除了上述大范围的典型干旱过程外,1963、1964、1977、1978、1979、1980、1991、1993、1996、2002、2007 年和 2011 年共 12 年局部出现了超 50 年一遇干旱,其中 1991 年和 2011 年干旱范围虽然大,但是强度和历时明显较典型特旱年逊色(图 8,仅列出 1991 年和 2011 年),这些年份受旱面积基本上都在 200 万亩($1 \text{ 亩} = 666.67 \text{ m}^2$)以上。有趣的是,1977—1980 年连续 4 年在不同的局地发生小范围严重的干旱:严重旱区 1977 年在福州和漳州;1978 年在三明和南平,以及中部沿海;1979 年在福州和宁德,以及龙岩局部;1980 年在福州及漳州局部,持续 4 年少雨导致 1980 年水资源特别紧张,全省最大受旱面积高达 548.14 万亩,粮食减产 6 亿 kg。除以上列出的 18 年,加上 9 年无旱年外,余下的 33 年干旱重现期均未超过 50 年。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文基于 MCI 干旱指数,利用“行标”法与福建“本地算法”,识别了 1961—2020 年福建省 66 个国家气象站及全省区域的干旱过程,分析了干旱的变

化特征及其重现规律,主要结论如下:

(1)福建省基本每年都会发生一次干旱,最多的可达三次;福建主要受单季干旱和两季连旱影响,两季连旱主要为夏秋旱和秋冬旱,全省区域无四季连旱;干旱历时和干旱强度的变化趋势基本一致;

(2)福建大部分干旱过程存在约为 1~3 a 的周期,严重干旱较少,超 50 年一遇的干旱仅有 1967 年夏秋冬旱和 2003 年夏秋冬旱;超 30 年一遇的干旱为 1962 年冬春旱和 1995 年夏秋冬旱;超 20 年一遇的干旱为 2020 年夏秋旱;超 10 年一遇的干旱为 1991 年春夏旱、2002 年春旱、2018 年春夏旱及 2019 年秋冬旱;

(3)对于重现期较短(频发)的干旱,中南部沿海一带有干旱历时长、干旱强度强的特点,越往北干旱历时短、干旱强度弱;但对于重现期长,特别是 50 年和 100 年一遇的干旱,中南部沿海一带仍有干旱历时长、干旱强度强的特点,另一个强度较强、历时较长的区域在南平西北部(光泽、邵武、武夷山);鹭峰山区属于干旱历时最短、干旱强度最弱的区域;

(4)1962、1967、1971、2003、2004 年和 2020 年干旱强度之强、范围之广、持续时间之长为历史罕见,灾害严重的区域都发生了超 50 年一遇的干旱,局部超百年;1963、1964、1977、1978、1979、1980、1991、1993、1996、2002、2007 年和 2011 年共 12 年局部出现了超 50 年一遇干旱;除上述 18 年及 9 年

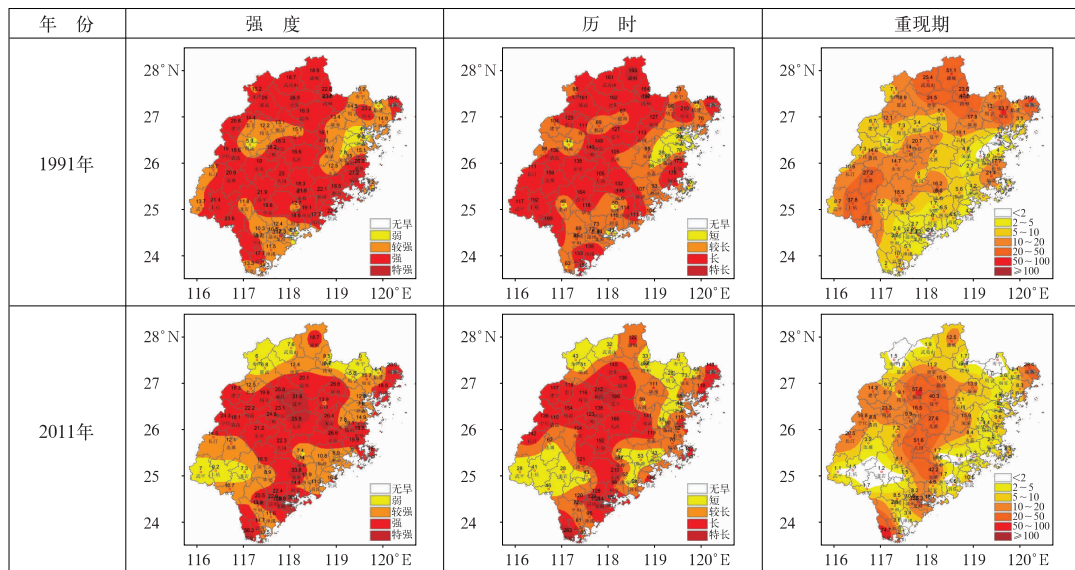


图 8 1991 年和 2011 年福建省重现期超 50 年一遇气象干旱年强度、历时和重现期(单位: a)空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the intensity, duration and return period (unit: a) of meteorological drought with a return of 50 years in Fujian Province in 1991 and 2011

无旱年之外,余下的 33 年干旱重现期均未超过 50 年。

4.2 讨 论

福建是一个干旱比较频发的省份,每年各地或多或少都会发生气象干旱,这种干旱气候格局已经造就了当地人类和生态景观的布局,对于一般的干旱灾害已具有防御能力。由于每年干旱空间差异非常大,导致针对性干旱防御策略存在很大的不确定性。本文仅对福建的干旱分布特征等做初步的分析与讨论,为干旱灾害风险评估奠定基础。实际上干旱灾害程度与承灾体、孕灾环境及天气系统息息相关,“沿海干旱强(多)于内陆”这一气候现象,究其原因,福建年雨量多呈双峰型,雨季主要为锋面系统性降水,集中在内陆地区;夏季主要是台风雨,集中在沿海地区。而沿海地区下垫面多为岩土砂石,植被相对内陆稀少,地下储水能力差,加上台风年际变化大,极易形成气象干旱。内陆植被覆盖率高,地下水蕴含量丰富,雨季降水相对台风雨充沛,因此气象干旱相对沿海弱。另外,干旱灾害的防御能力,还要考虑影响区域人口、经济状况,比如:人口、工业密集地区,对于用水的需求量大,干旱对其的影响相对较大;经济较好的区域对于干旱的防御水平更高,水库较多的地区对于干旱时用水的调节能力也更强等等,仍需要开展深入的探索。目前已分析了福建干旱的致灾因子危险性,今后将结合福建地形、环流背景等开展进一步的灾害风险评估研究。

参考文献

陈家金,林晶,陈惠,等,2006. 福建省干旱的时空分布及其对农业生产的影响[J]. 自然灾害学报, 15(6): 265-269. Chen J J, Lin J, Chen H, et al, 2006. Spatiotemporal distribution characteristic of drought in recent 44 years in Fujian Province and its impact on agricultural production[J]. J Nat Disasters, 15(6): 265-269 (in Chinese).

冯国章, 1995. 多年持续干旱历时的概率分布与重现期确定方法的研究[J]. 水文, (6): 6-13, 65. Feng G Z, 1995. A study on probability distribution of persistent multi-year drought durations and method for determination of its return periods[J]. Hydrology, (6): 6-13, 65 (in Chinese).

福建省人民政府防汛抗旱指挥部办公室, 2018. 福建水旱灾害[M]. 福州: 福建省人民政府防汛抗旱指挥部办公室. Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters of Fujian Provincial People's Government, 2018. Floods and Droughts in Fujian

[M]. Fuzhou: Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters of Fujian Provincial People's Government (in Chinese).

金燕, 况雪源, 晏红明, 等, 2018. 近 55 年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. 气象, 44(9): 1169-1178. Jin Y, Kuang X Y, Yan H M, et al, 2018. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteor Mon, 44(9): 1169-1178 (in Chinese).

李天水, 王顺, 庄文化, 等, 2016. 游程理论和 Copula 函数在二维干旱变量联合分布中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 30(6): 77-82. Li T S, Wang S, Zhuang W H, et al, 2016. Application of the theory of run and Copula function to the joint distribution of two-dimension drought variables[J]. J Arid Land Resour Environ, 30(6): 77-82 (in Chinese).

廖要明, 张存杰, 2017. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. 气象, 43(11): 1402-1409. Liao Y M, Zhang C J, 2017. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. Meteor Mon, 43(11): 1402-1409 (in Chinese).

刘晓云, 王劲松, 李耀辉, 等, 2015. 基于 Copula 函数的中国南方干旱风险特征研究[J]. 气象学报, 73(6): 1080-1091. Liu X Y, Wang J S, Li Y H, et al, 2015. Characteristics of drought risk in Southern China based on the Copula function[J]. Acta Meteor Sin, 73(6): 1080-1091 (in Chinese).

马柱国, 符凉斌, 杨庆, 等, 2018. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 42(4): 951-961. Ma Z G, Fu C B, Yang Q, et al, 2018. Drying trend in Northern China and its shift during 1951-2016[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 951-961 (in Chinese).

倪深海, 顾颖, 彭岳津, 等, 2019. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J]. 自然灾害学报, 28(6): 176-181. Ni S H, Gu Y, Peng Y J, et al, 2019. Spatio-temporal pattern and evolution trend of drought disaster in China in recent seventy years[J]. J Nat Disasters, 28(6): 176-181 (in Chinese).

孙鹏, 张强, 白云岗, 等, 2014. 基于马尔科夫模型的新疆水文气象干旱研究[J]. 地理研究, 33(9): 1647-1657. Sun P, Zhang Q, Bai Y G, et al, 2014. Transitional behaviors of hydrometeorological droughts in Xinjiang using the Markov chain model[J]. Geogr Res, 33(9): 1647-1657 (in Chinese).

王荣江, 李谢辉, 周任君, 等, 2021. 三种气象干旱指数在四川省的适用性分析[J]. 长江流域资源与环境, 30(3): 734-744. Wang R J, Li X H, Zhou R J, et al, 2021. Applicability analysis of three meteorological drought indices in Sichuan Province[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 30(3): 734-744 (in Chinese).

王素萍, 王劲松, 张强, 等, 2020. 多种干旱指数在中国北方的适用性及其差异原因初探[J]. 高原气象, 39(3): 628-640. Wang S P, Wang J S, Zhang Q, et al, 2020. Applicability evaluation of drought indices in Northern China and the reasons for their differences[J]. Plateau Meteor, 39(3): 628-640 (in Chinese).

温克刚, 宋德众, 蔡诗树, 2007. 中国气象灾害大典-福建卷[M]. 北京: 气象出版社. Wen K G, Song D Z, Cai S S, 2007. China

- Meteorological Disaster - Fujian Volume [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 谢五三,唐为安,宋阿伟,2019. 多时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的适用性研究[J]. 气象,45(11):1560-1568. Xie W S, Tang W A, Song A W, 2019. Applicability study of SPI in multiple time scales in meteorological drought monitoring in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1560-1568(in Chinese).
- 谢五三,张强,李威,等,2021. 干旱指数在中国东北、西南和长江中下游地区适用性分析[J]. 高原气象,40(5):1136-1146. Xie W S, Zhang Q, Li W, et al, 2021. Analysis of the applicability of drought indexes in the northeast, southwest and middle-lower reaches of Yangtze River of China[J]. Plateau Meteor, 40(5): 1136-1146(in Chinese).
- 徐春晓,袁萧晨,金菊良,等,2011. 基于 Copula 的区域干旱空间分布特征分析[J]. 资源科学,33(12):2308-2313. Xu C X, Yuan X C, Jin J L, et al, 2011. Analysis of characteristics of spatial distribution of drought based on Copula[J]. Resour Sci, 33(12):2308-2313(in Chinese).
- 杨帆,陈波,张超,等,2015. 新气象干旱综合监测指数(MCI)在黔东南本地化应用[J]. 高原山地气象研究,35(3):56-61. Yang F, Chen B, Zhang C, et al, 2015. Application of the new compound drought index in southeast Guizhou Province[J]. Plateau Mt Meteor Res, 35(3):56-61(in Chinese).
- 杨歆雨,李栋梁,2019. 中国华北东北强干旱事件的时空演变特征及重现期分析[J]. 干旱区地理,42(4):810-821. Yang X Y, Li D L, 2019. Temporal and spatial evolution characteristics of strong drought events in north and northeast China[J]. Arid Land Geogr, 42(4):810-821(in Chinese).
- 张强,谢五三,陈鲜艳,等,2021. 1961—2019 年长江中下游区域性干旱过程及其变化[J]. 气象学报,79(4):570-581. Zhang Q, Xie W S, Chen X Y, et al, 2021. Regional drought process and its variation characteristics in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2019[J]. Acta Meteor Sin, 79(4):570-581(in Chinese).
- 张强,姚玉璧,李耀辉,等,2020. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报,78(3):500-521. Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al, 2020. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):500-521(in Chinese).
- 张容焱,庄瑶,薛峰,等,2019. 福建气象干旱风险监测预警和评估技术[J]. 灾害学,34(3):114-122. Zhang R Y, Zhuang Y, Xue F, et al, 2019. Monitoring, early-warning and assessment techniques of meteorological drought risk in Fujian Province[J]. J Catastrophol, 34(3):114-122(in Chinese).
- 张霞,李明星,马柱国,2018. 近 30 年全球干旱半干旱区的蒸散变化特征[J]. 大气科学,42(2):251-267. Zhang X, Li M X, Ma Z G, 2018. Evapotranspiration variability over global arid and semi-arid regions from 1982 to 2011[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):251-267(in Chinese).
- 张学成,马秀峰,丁晶,等,1996. 多元平稳随机过程游程计算方法的探讨及其应用[J]. 水科学进展,7(3):231-238. Zhang X C, Ma X F, Ding J, et al, 1996. An approach to calculate runs in multi dimensional random processes and its application in drought events research[J]. Adv Water Sci, 7(3):231-238(in Chinese).
- 中国气象局,2021. 区域性干旱过程监测评估方法:QX/T 597—2021 [S]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2021. Monitoring and assessment method of regional drought process: QX/T 597 — 2021 [S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 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,2017. 气象干旱等级:GB/T 20481—2017[S]. 北京:中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2017. Grades of meteorological drought: GB/T 20481 — 2017 [S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- 周玉良,袁萧晨,金菊良,等,2011. 基于 Copula 的区域水文干旱频率分析[J]. 地理科学,31(11):1383-1388. Zhou Y L, Yuan X C, Jin J L, et al, 2011. Regional hydrological drought frequency based on Copulas[J]. Sci Geogr Sin, 31(11):1383-1388(in Chinese).
- 朱廷举,胡和平,2001. 基于随机模拟和模糊聚类的水文干旱特性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),41(8):103-106. Zhu T J, Hu H P, 2001. Drought analysis based on stochastic simulation and fuzzy classification[J]. J Tsinghua Univ (Sci Technol), 41(8):103-106(in Chinese).
- 左冰洁,孙玉军,2019. 福建省几种气象干旱指数的对比分析[J]. 气象,45(5):685-694. Zuo B J, Sun Y J, 2019. Comparative analysis of several drought indices to use in Fujian Province[J]. Meteor Mon, 45(5):685-694(in Chinese).
- Obasi G O P, 1994. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction[J]. Bull Am Meteorol Soc, 75(9):1655-1662.
- Shiau J T, 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional Copulas[J]. Water Resour Manag, 20(5):795-815.
- Shiau J T, Modarres R, 2009. Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran[J]. Meteor Appl, 16(4):481-489.
- Shiau J T, Shen H W, 2001. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity[J]. J Water Resour Plan Manag, 127(1):30-40.
- Sklar A, 1959. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. Publ Inst Statist Univ Paris, 8:229-231.
- Su B D, Huang J L, Fischer T, et al, 2018. Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 115(42):10600-10605.

(本文责编:王蕾)