

晏红明,肖子牛,马思源,等,2026. 云南冬春连旱事件的识别标准及环流特征分析[J]. 气象,52(7):784-798. Yan H M, Xiao Z N, Ma S Y, et al, 2026. Identification criterion and atmospheric circulation characteristics of persistent drought events across winter and spring in Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 52(7):784-798(in Chinese).

云南冬春连旱事件的识别标准及环流特征分析^{*}

晏红明¹ 肖子牛² 马思源¹ 王秀英³ 罗 蒙¹

1 云南省气候中心,昆明 650034

2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

3 云南省普洱市气象局,普洱 665000

提 要: 利用 1961—2024 年云南 125 个观测站的逐日降水和气温资料,以及 NCEP/NCAR 逐日再分析高低层大气环流资料,对云南冬春连旱事件的标准定义进行研究。通过对云南冬季和春季干旱时空特征分析发现,云南冬春干旱总体呈现西北多东南少的分布态势,干旱发生最多的区域主要集中在滇西北东部的丽江、大理、楚雄北部,而红河南部和西双版纳南部干旱发生较少。基于研究分析结果定义了云南单站和全省冬春连旱事件的标准为:当某年某站冬季和春季均出现轻旱或以上级别干旱,且其中某个季节达到中旱或以上级别干旱时,定义该站点发生了冬春连旱事件;当某年全省有 25 个观测站(全省总站数的 20%)出现冬春连旱事件,且冬季和春季全省平均降水量距平百分率 $\leq -10\%$ 时,则定义为一次全省冬春连旱事件。研究发现该指标能够有效识别云南的冬春连旱事件。进一步分析发现,500 hPa 东亚中低纬度地区北低南高的位势高度差异和 700 hPa 孟加拉湾异常反气旋的持续维持,对云南冬春连旱事件的发生有十分重要的影响。相关研究对于规范云南气候监测预测业务的冬春连旱事件标准有重要的科学意义和实际应用价值。

关键词: 冬春连旱事件,降水量距平百分率,气象干旱综合指数,识别标准,环流特征

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.040201

Identification Criterion and Atmospheric Circulation Characteristics of Persistent Drought Events Across Winter and Spring in Yunnan Province

YAN Hongming¹ XIAO Ziniu² MA Siyuan¹ WANG Xiuying³ LUO Meng¹

1 Yunnan Climate Center, Kunming 650034

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Pu'er Meteorological Office of Yunnan Province, Pu'er 665000

Abstract: Based on daily precipitation and temperature data from 125 observation stations in Yunnan Province from 1961 to 2024, as well as NCEP/NCAR daily reanalysis data of atmospheric circulation in upper and lower levels, this paper investigates the criterion for the persistent drought events across winter and spring (WSPDE) in Yunnan. By analyzing the spatio-temporal characteristics of WSPDE in Yunnan, we have found that the WSPDE distribution in Yunnan is characterized by more in the northwest but less in the southeast. The regions with the highest drought frequency are mainly concentrated in the eastern part of northwest Yunnan, including Lijiang, Dali, and northern Chuxiong, while the southern parts of Honghe and Xishuangbanna have less drought events. The WSPDE standards for single station and provincial region in Yunnan are defined as follows. The station standard refers to the occurrence of light or above

^{*} 云南省基础研究计划重大项目(202501BC070001)资助

2025 年 9 月 1 日收稿; 2026 年 4 月 2 日收修定稿

第一作者:晏红明,主要从事季风气候研究和短期气候预测. E-mail:yanhongming2013@163.com

level drought in both winter and spring in a year, with moderate or above level drought occurring in one of two seasons. When 25 observation stations (20% of the total number of stations in Yunnan) experience the WSPDE in a year, and the average precipitation anomaly percentage in both winter and spring is $\leq -10\%$, it is defined as a provincial WSPDE in Yunnan. Comparative analysis shows that this criterion can be reasonably used in identifying WSPDE in Yunnan. Further analysis reveals that the sustained maintenance of the geopotential height difference with high in the north and low in the south of the mid-low latitudes region at 500 hPa in East Asia, as well as anomalous anticyclones at 700 hPa in the Bay of Bengal has a significant impact on the WSPDE in Yunnan. The standard has an important scientific significance and application value for standardizing the WSPDE criterion for climate monitoring and prediction operations in Yunnan.

Key words: persistent drought event across winter and spring (WSPDE), precipitation anomaly percentage, meteorological drought comprehensive index, identification standard, circulation characteristic

引 言

云南地处低纬高原季风气候区,冬季和春季为干季,降水稀少、干旱频发,其所谓的“十年九旱”即指云南的冬春季干旱。近年来云南极端干旱事件发生频次、影响面积、受灾强度及干旱导致的综合损失显著增加(晏红明等,2007;2012;2013;2018;程建刚和解明恩,2008;金燕等,2018;玉院和等,2018;张强等,2020;王秀英等,2023),尤其是2009—2010年、2011—2012年、2022—2023年多次发生冬春特大干旱事件。其中2009—2010年发生的干旱事件导致云南2512万人受灾,757万人饮水困难,造成秋冬播农作物受灾面积21741.3 km²,农业直接经济损失超过200亿元(吕俊梅等,2012;Lü et al,2012)。春季的4—5月是云南大春作物栽种的关键时段,同时也是干湿季节转换的关键期,冬春干旱事件的叠加严重危害人民生产、生活,对农业、水电、生态等多个领域产生严重影响,造成巨大经济损失。因此,冬春连旱事件是影响云南社会经济与生态环境的重大核心问题之一。

针对云南冬春季干旱问题已开展大量研究,晏红明等(2007)分析了2005年春季云南发生的异常干旱事件,发现此次干旱事件与北印度洋持续的东风异常、偏西偏强的西太平洋副热带高压以及前期冬季东亚中纬度冷空气活动有关;杨辉等(2012)研究了2009/2010年冬季云南严重干旱事件发生的原因,表明干旱事件与青藏高原稳定的高压脊、弱南支槽、弱高空东亚急流等关键环流系统的影响密切相关;马双梅等(2021)分析了2019年春季云南持续性

高温干旱的环流成因,发现云南地区对流层上层显著的反气旋是引发高温干旱的关键系统,该异常反气旋的形成既与高纬度地区自北大西洋东传的罗斯贝波列、中纬度经北非—黑海—伊朗高原东传的罗斯贝波列的相互作用有关,同时受ENSO暖位相的影响;金燕等(2018)研究表明云南干旱空间差异大,干旱主要集中在中部区域,且未来可能面临更高的干旱风险。与独立的季节干旱事件相比,冬春连旱是一种更为严重的极端气候事件。但目前为止,鲜有研究针对云南冬季和春季持续叠加的冬春连旱极端气候事件开展分析。为了规范云南气候监测预测业务中的冬春连旱事件标准,系统深入地认识云南冬春干旱事件的分布特征和形成机理,进而提升区域气象防灾减灾服务能力,针对云南冬春连旱事件开展系统深入研究有重要的科学意义和实际应用价值。

干旱主要是因长期少雨引发的空气干燥、土壤缺水的气候现象,可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱、社会经济干旱等。其中气象干旱的标准通常依据降水量、降水量距平百分率(PA)、连续无降水日数、土壤湿度、帕默尔干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)、气象干旱综合指数(MCI)等来定义(马青荣等,2020;伍红雨等,2022;宋艳玲,2022;杨歆雨等,2022;谢五三等,2025)。以上指数定义主要与降水、气温、土壤湿度、蒸散等要素有关,在不同区域的适应性也存在一定差异(杨世刚等,2011;谢五三和田红,2011;熊光洁等,2014;王素萍等,2015;沈国强等,2017;左冰洁和孙玉军,2019;范浩男等,2025),因此针对不同区域定义合理有效的干旱识别指标对于提升气象服务

能力非常重要。

本文基于云南 125 个观测站的逐日降水和气温资料,以及目前气候监测业务中常用的 MCI,在分析云南冬季和春季气候变化及干旱时空特征的基础上,定义云南单站和全省冬春连旱事件标准,并对标准的代表性和合理性进行分析,同时分析云南冬春连旱事件大气环流持续性异常的特征。

1 资料和方法

使用的资料主要包括:(1)云南省气象信息中心收集整理的 1961—2024 年云南 125 个观测站逐日降水和气温资料;(2)美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的逐日 1961—2024 年高低层高度场及风场等再分析大气环流资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kistler et al, 2001)。

采用的方法包括标准化、相关分析、合成分析等数理统计诊断分析方法,其中气象干旱灾害标准中的 PA 干旱等级定义以及 MCI 的计算方法依据国家相关标准(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)。对于季节尺度而言, $PA > -25\%$ 为无旱, $-50\% < PA \leq -25\%$ 为轻旱, $-70\% < PA \leq -50\%$ 为中旱, $-80\% < PA \leq -70\%$ 为重旱, $PA \leq -80\%$ 为特旱。根据 MCI 等级划分, $MCI > -0.5$ 为无旱, $-1.0 < MCI \leq -0.5$ 为轻旱, $-1.5 < MCI \leq -1.0$ 为中旱, $-2.0 < MCI \leq -1.5$ 为重旱, $MCI \leq -2.0$ 为特旱。

其中 MCI 的计算方法为:

$$MCI = Ka \cdot (a \cdot SPIW_{60} + b \cdot MI_{30} + c \cdot SPI_{90} + d \cdot SPI_{150}) \quad (1)$$

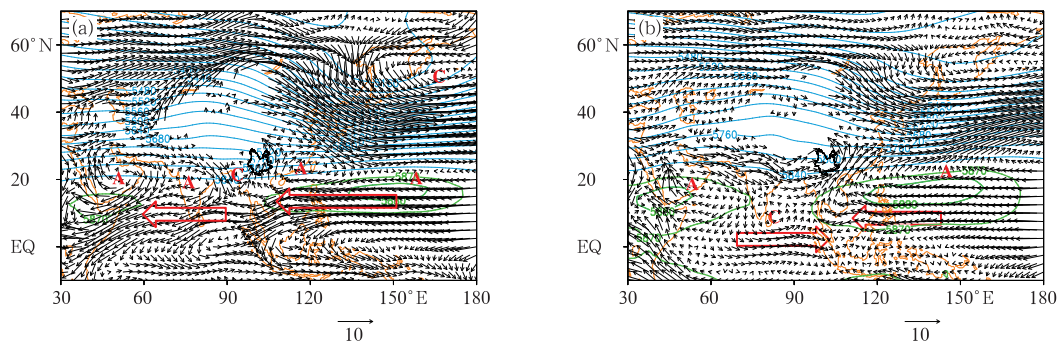
式中: MI_{30} 为近 30 d 相对湿润指数, SPI_{90} 和 SPI_{150} 分别为近 90 d 和近 150 d 标准化降水指数, $SPIW_{60}$ 为近 60 d 标准化权重降水指数,参数 a 、 b 、 c 、 d 分别取 0.3、0.5、0.3、0.2, Ka 为季节调节系数(在 1—12 月分别取 1.0、1.0、1.1、1.2、1.0、1.2、1.2、1.2、1.0、1.0、1.0、1.0)。其中近 30 d、近 60 d、近 90 d 和近 150 d 均是相对于计算当日而言。

本文气候平均为 1991—2020 年平均值。冬季为前一年 12 月至当年 2 月,春季为当年 3—5 月,冬春季为前一年 12 月至当年 5 月。

2 云南冬季和春季气候特征

2.1 大气环流特征

春季是冬夏大气环流转换的关键季节,其环流与冬季环流存在显著差异。图 1 为欧亚区域冬季和春季的高低层大气环流气候平均场。冬季青藏高原上空 500 hPa 气流平直、低层 850 hPa 的 $10^{\circ}N$ 附近,西太平洋—孟加拉湾—印度半岛—阿拉伯海一带为偏东气流,在印度半岛、非洲北部及西北太平洋附近分别有反气旋环流,孟加拉湾北部则有气旋环流,云南区域受孟加拉湾气旋环流东侧的西南气流和西北太平洋反气旋环流西侧的偏东南气流共同影



注:A、C 以及红色箭头分别为 850 hPa 反气旋、气旋环流和气流方向,绿色等值线为气候平均 5870 gpm 和 5880 gpm 等值线。

图 1 欧亚区域气候平均的(a)冬季和(b)春季 500 hPa 位势高度(蓝色等值线,单位:gpm)和 850 hPa 风场(风矢,单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 1 Climatological geopotential height (blue contour, unit: gpm) at 500 hPa and wind field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 850 hPa over Eurasia in (a) winter and (b) spring

响。春季东亚高低层大气环流与冬季明显不同,青藏高原南侧和孟加拉湾北部的上空 500 hPa 气流平直度发生变化,出现了较弱的气旋性弯曲,副热带高压增强、范围扩大,西脊点向西推进,东亚槽减弱;另外,低层 850 hPa 印度半岛与非洲的反气旋环流合并,在西亚地区形成反气旋环流,同时西北太平洋反气旋环流显著加强、范围进一步扩展,西亚反气旋与西太平洋副热带反气旋环流之间在孟加拉湾地区形成较明显的低压槽,孟加拉湾南部形成明显的气旋环流,云南主要受孟加拉湾低压槽前的西南气流影响。

2.2 降水和气温变化

冬季和春季是云南降水偏少最明显的两个季节,全省平均降水量分别为 55.3 mm 和 177.8 mm,分别占年降水量的 5% 和 17%。从空间分布来看,冬春季滇西北边缘地区降水量在年降水量中占比较大,普遍超过 30%,最高可达 50%,体现了此地区“双雨季”或“桃花汛”的气候特征;滇东南和滇东部分地区冬春季年降水量占比为 20%,其余地区占比相对偏小,其中丽江东部占比不足 10%,滇中大部分地区约为 15%(图 2a)。

云南春季气温偏高,仅次于夏季,冬季最低,春季、冬季平均气温分别为 18.3℃ 和 10.7℃。一般而言,在雨季开始前,云南大部地区春季会出现高温天气,昆明自有气象观测记录以来的历史日最高气温

(32.8℃) 出现在 2014 年 5 月 25 日。图 2b 为 1962—2024 年平均的春季云南 125 个观测站日最高气温高于 30℃ 的累计日数空间分布,可看出,除滇西北外,其余大部地区春季日最高气温高于 30℃ 的累计日数均达 20 d 以上,部分地区甚至超过 40 d,尤其以云南南部和干热河谷地区最为突出。

3 冬春连旱事件及其识别标准

3.1 冬春连旱事件标准的定义

气象干旱与降水量密切相关,本研究主要对降水变化进行分析。由于云南地形复杂,降水区域差异显著,冬春连旱事件判别标准指标若设定过于严苛,将难以筛选出冬春连旱事件;若标准指标设定过于宽松,筛选出的冬春连旱事件数量会偏多,既缺乏代表性,也无法准确反映冬春连旱事件的极端性特征。因此,为了合理定义冬春连旱事件标准,首先根据相关国家标准(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委员会,2017)中基于 PA 划分的干旱等级,对云南冬春季的干旱情况进行分析。根据分析结果,定义冬春连旱事件单站判别标准,并以此为基础,进一步定义全省标准。

图 3 分别为 1962—2024 年云南 125 个观测站,冬季和春季均达到不同级别干旱标准时的累计年数

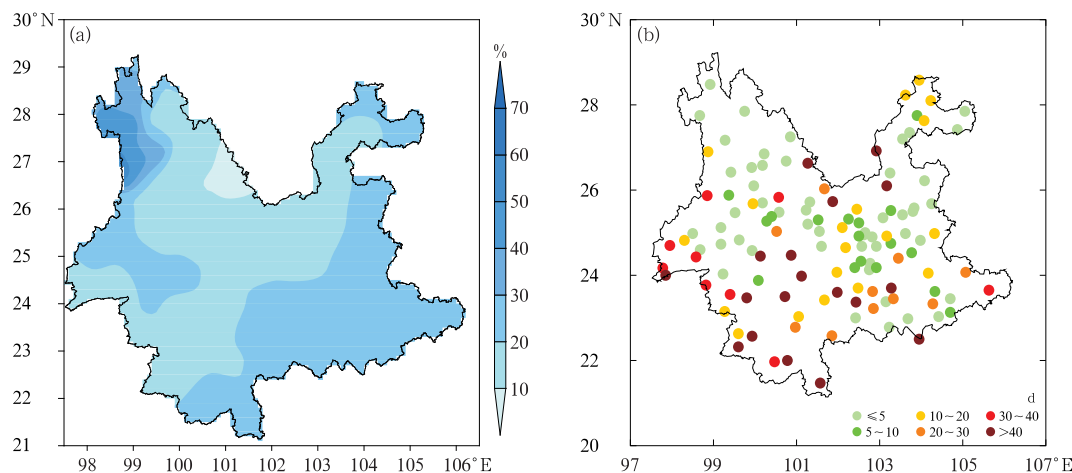


图 2 1962—2024 年平均的云南(a)冬春季降水量占年总降水量比例和
(b)春季日最高气温高于 30℃ 的累计日数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a) proportion of winter-spring precipitation to the annual total precipitation and (b) cumulative days with daily maximum temperature above 30℃ averaged in spring in Yunnan Province from 1962 to 2024

空间分布,可看出,累计年数空间分布的区域差异较大,整体呈现西北多、东南少的特征。当冬春两季 $PA \leq -25\%$ 时(图 3a),滇中及以北、以西地区达到标准的年份均在 9 a 以上,占 1962—2024 年总年数的 14% 以上,其中滇西北东部丽江的个别站点甚至高达 21 a,占总年数的 33%,而滇东南部分地区仅有不足 6 a 达到标准;当冬春两季 $PA \leq -50\%$ 时(图 3b),仅滇西北东部丽江个别站点有 9 a 以上达到标准,其余站点均低于 9 a,南部地区低于 3 a;当冬季 $PA \leq -50\%$ 且春季 $PA \leq -25\%$ 时(图 3c),滇中及以北、以西的大部地区有 6 a 以上达到标准,占总年数的 10% 以上,而滇东南和滇南地区达到标准

的年数较少,大部地区在 3~6 a;当冬季 $PA \leq -25\%$ 且春季 $PA \leq -50\%$ 时(图 3d),其分布与冬季 $PA \leq -50\%$ 和春季 $PA \leq -25\%$ 时基本一致,但达到标准的年数明显降低,全省大部地区有 3~6 a 达到标准,表明春季出现中旱及以上级别干旱的年数明显低于冬季。

基于以上分析,为了使标准既能反映冬春连旱事件“季节性连续干旱”特征,又能反映“干旱强度”的变化,初步将单站冬春连旱事件定义为:当某年某站冬季和春季均出现轻旱或以上级别干旱,且其中某季节发生了中旱或以上级别干旱时,定义为该站发生了冬春连旱事件。

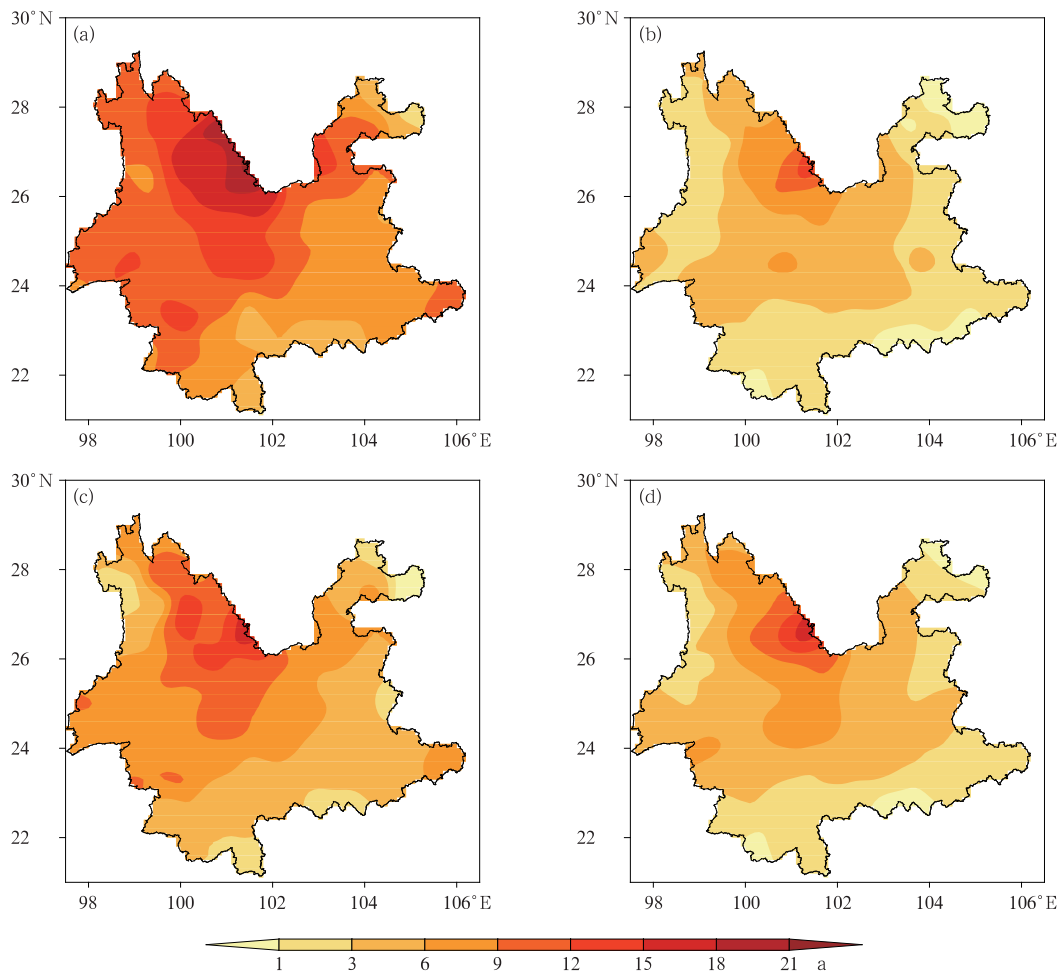


图 3 1962—2024 年云南冬季和春季均达到一定干旱等级标准的累计年数空间分布

(a) 冬春两季 $PA \leq -25\%$, (b) 冬春两季 $PA \leq -50\%$,

(c) 冬季 $PA \leq -50\%$ 且春季 $PA \leq -25\%$, (d) 冬季 $PA \leq -25\%$ 且春季 $PA \leq -50\%$

Fig. 3 Spatial distribution of cumulative years with droughts meeting different drought level standards in both winter and spring in Yunnan Province from 1962 to 2024

(a) $PA \leq -25\%$ in winter and spring, (b) $PA \leq -50\%$ in winter and spring, (c) $PA \leq -50\%$ in winter and $PA \leq -25\%$ in spring, (d) $PA \leq -25\%$ in winter and $PA \leq -50\%$ in spring

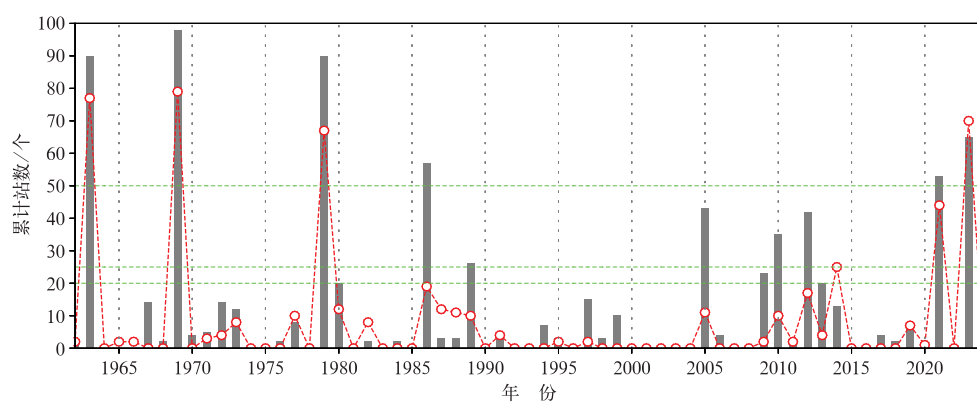
根据初步定义的单站冬春连旱事件标准,本文计算了1962—2024年逐年全省满足单站标准的累计站数(图4),其中1963年、1969年、1979年、1986年、2021年及2023年满足单站标准站数超过50个,尤其是1963年、1969年、1979年和2023年冬季和春季均有超过50个站出现中旱或以上级别干旱。目前,云南气象业务中沿用的全省性大雨过程站数标准为:全省 ≥ 22 个站(占总站数的18%)出现大雨(日降水量 ≥ 25.0 mm)时,即定义为一次全省性大雨过程。多年气象业务实践表明,对于某类气候事件,以全省约20%的站满足单站标准作为全省标准具有一定的合理性。由图4可知,1962—2024年全省有20个站(占总站数的16%)满足单站标准的年份共有14 a,占总年数的22%;25个站(占总站数的20%)满足标准的年份共有11 a,占总年数的18%。以下通过对比分析20个站和25个站达到单站标准的情况,进一步完善和确定全省冬春连旱事件标准。

由图4可看出,超过20个站达到标准的14 a中,1980年、2009年、2013年达到标准的站数分别为20、23和20个站,均不足25个站。图5给出了1980年、2009年、2013年冬季和春季PA空间分布,1980年冬季、春季全省平均降水量分别偏少13.2%和26.5%,冬季降水呈西北多、东南少分布,其中38个站偏少50%以上,26个站偏多50%以上;春季全省大范围降水偏少,80个站降水量偏少20%以上(图5a,5b)。2009年冬季、春季全省平均降水量分

别偏少58.0%和6.1%,冬季降水偏少非常显著,91个站偏少50%以上;春季降水分布不均,主要以略偏少为主,仅有2个站降水量偏少50%以上(图5c,5d)。2013年冬季、春季全省平均降水量分别偏少68.4%和0.2%,冬季降水偏少非常显著,105个站偏少50%以上;春季降水区域差异明显,仅4个站偏少50%以上(图5e,5f)。目前云南气候业务中分别以 $PA \geq 10\%$ 、 $PA \leq -10\%$ 作为季节平均降水偏多和偏少的标准。据此标准,在以上3年中仅1980年两个季节均达到降水偏少标准($PA \leq -10\%$),而2009年和2013年仅冬季降水显著偏少,春季均未达到偏少标准($PA \geq -10\%$)。

进一步逐年分析超过25个站满足单站标准的11个年份(1963年、1969年、1979年、1986年、1989年、2005年、2010年、2012年、2014年、2021年、2023年)(图略),发现1986年、1989年和2010年干旱主要出现在冬季,全省平均降水量分别偏少73.1%、56.6%和73.4%,而春季全省平均PA分别为-8.5%、0.6%、-3.4%,均未达到 $PA \leq -10\%$ 的偏少标准;2014年冬季和春季PA变化相反,冬季、春季PA分别为17.0%和-41.7%,冬季降水偏多,干旱主要出现在春季。

综上所述,如果选取全省超过25个站满足单站标准作为全省冬春连旱事件指标,可有效去除冬季和春季中某一季节降水偏少不显著的情况。为了进一步表征冬春连旱事件强度,在全省标准中再补充



注:绿色虚线分别表示累计站数达到20、25和50个,柱状表示满足冬季 $PA \leq -50\%$ 且春季 $PA \leq -25\%$ 的累计站数,折线表示满足冬季 $PA \leq -25\%$ 且春季 $PA \leq -50\%$ 的累计站数。

图4 1962—2024年云南满足不同干旱标准的累计站数

Fig. 4 Annual cumulative stations with droughts meeting different drought standards in Yunnan Province from 1962 to 2024

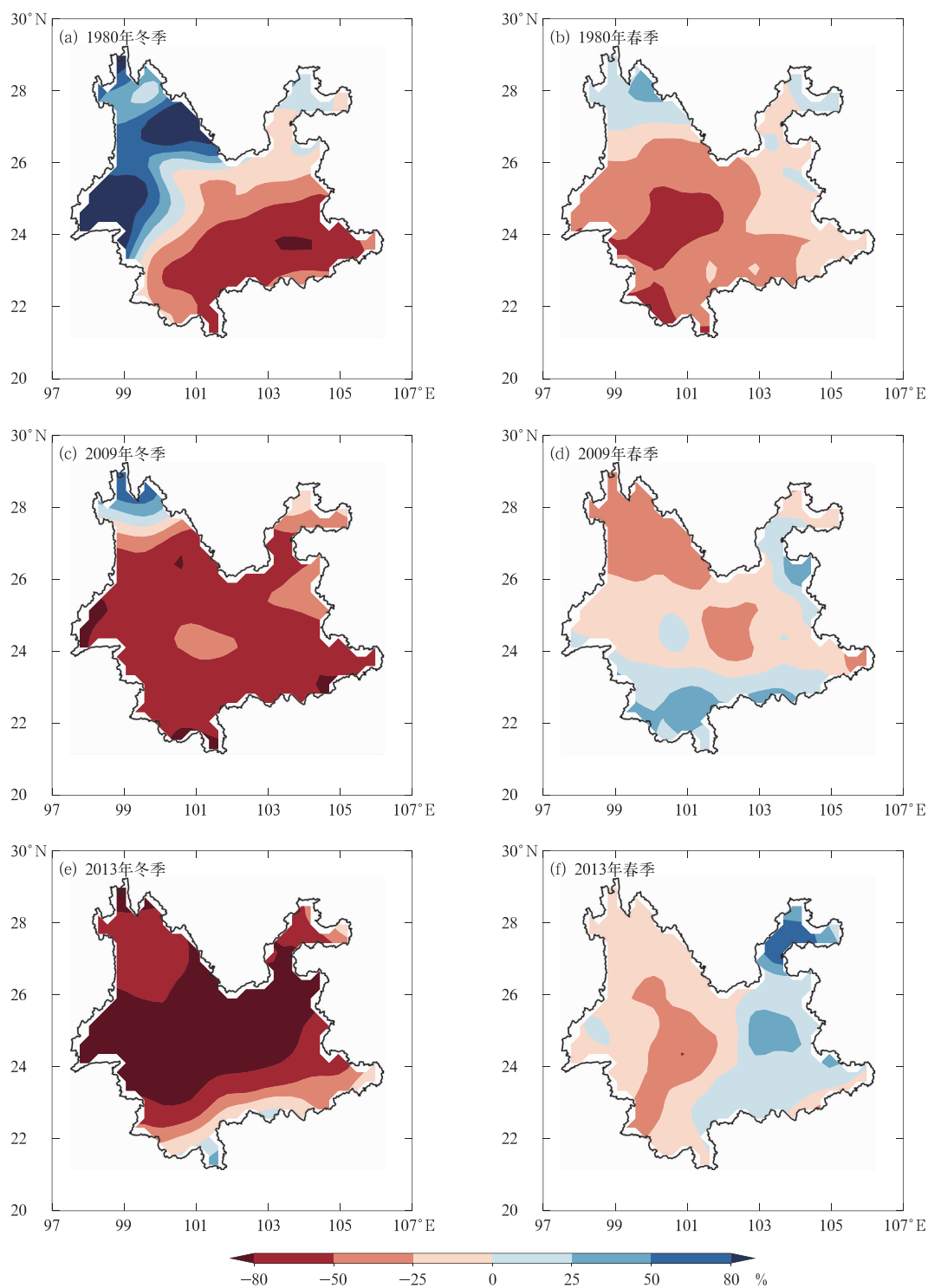


图 5 1980 年、2009 年、2013 年(a,c,e)冬季和(b,d,f)春季云南 PA 分布

Fig. 5 Distribution of PA across Yunnan Province in
(a, c, e) winter and (b, d, f) spring of 1980, 2009 and 2013

一个限制条件,即冬季和春季全省平均 $PA \leq -10\%$ 。对于单站和全省而言,补充完善后的冬春连旱事件标准为:当某年某站的冬季和春季均出现

轻旱或以上级别干旱,且其中某个季节达到中旱或以上级别干旱时,定义该站点发生了冬春连旱事件;当某年冬春季全省有 25 个站(全省站数的 20%)出

现冬春连旱事件,且冬季和春季全省平均 $PA \leq -10\%$ 时,则定义为一次全省冬春连旱事件。据此标准识别得到 1962—2024 年的冬春连旱事件有 1963 年、1969 年、1979 年、2005 年、2012 年、2021 年、2023 年共 7 年。

3.2 冬春连旱事件标准的合理性检验

3.2.1 冬春季降水持续异常指数

冬春季逐月 PA 累加值在一定程度上可以反映冬春季降水持续异常的特征,但由于各月气候平均降水量占全年降水量的百分率(PAP)差异较大,本研究采用冬春季逐月 PA 乘以对应月份 PAP 后再累加的指标(简称为加权 PA 累计,或冬春季降水持续异常指数 $Rpersis$),以研究分析云南冬春干旱的持续特征,其计算公式为:

$$Rpersis_i = PA_{i,12} \cdot PAP_{12} + \sum_{j=1}^5 PA_{i+1,j} \cdot PAP_j \quad (2)$$

式中: i 为年份, j 为月份。

图 6 为 1962—2024 年冬春季云南 $Rpersis$ 的标准化系列。其中,标准化值小于 -1 的年份共计 10 a,分别为 1963 年、1969 年、1979 年、1986 年、1987 年、2005 年、2012 年、2014 年、2021 年、2023 年。该结果与根据冬春连旱事件标准选取的年份相比,不一致的年份为 1986 年、1987 年、2014 年。1986 年的情况已在上文分析,此处不再赘述。对于其余两年:1987 年冬季和春季降水量分别偏少 -8.3% 和

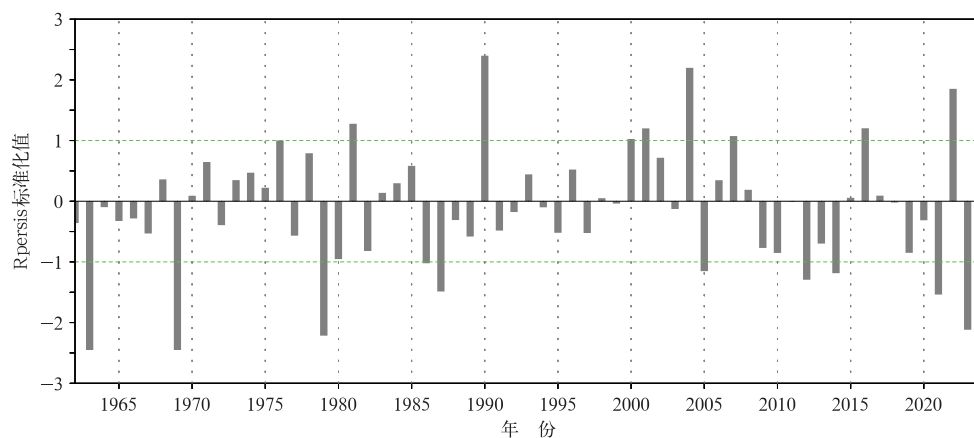
-41.2% ,其冬季降水未达到 $PA \leq -10\%$ 标准;2014 年冬季和春季全省平均 PA 分别为 17% 和 -41.7% ,季节降水呈相反变化,冬季降水明显偏多,冬春连旱特征不明显。

3.2.2 基于 MCI 的干旱分析

在全国气候监测业务中, MCI 是当前干旱监测的主要指标,其区域适用性也被广泛探讨。谢五三等(2021)比较了 MCI 在东北、长江中下游和西南地区的适用性,发现该指数对典型干旱过程的逐日刻画效果在长江中下游较好,西南地区次之,而东北地区相对较差。王素萍等(2020)也指出 MCI 对春旱监测有较好优势。对于云南地区,气候监测业务中发现该指数会高估云南冬春季的干旱监测,但具体成因还尚未进行系统对比分析。

图 7 为基于 MCI 统计的 1962—2024 年云南冬春季平均不同等级干旱日数分布,综合分析发现,滇西北西部的迪庆、怒江及滇东南的红河、文山等地干旱较少,尤其是中旱和特旱发生的日数最少,干旱发生最多的区域主要集中在滇西北东部的丽江、大理及金沙江河谷地带。该分布与图 3 基本一致。

图 8a 为基于 MCI 的 1962—2024 年冬春季云南平均的标准化轻旱、中旱或以上级别干旱日数。其中,中旱或以上级别干旱日数大于 1 个标准差的年份包括:1963 年、1969 年、1970 年、1979 年、1980 年、1985 年、1986 年、1989 年、2010 年、2012 年、2013 年、2021 年、2023 年,其中 1963 年、1969 年、1979 年、2010 年、2023 年主要以重旱和特旱为主,



注:绿色虚线表示标准化值为 ± 1 。

图 6 1962—2024 年冬春季云南 $Rpersis$ 的标准化值

Fig. 6 Standardized $Rpersis$ in Yunnan Province in winter and spring of 1962—2024

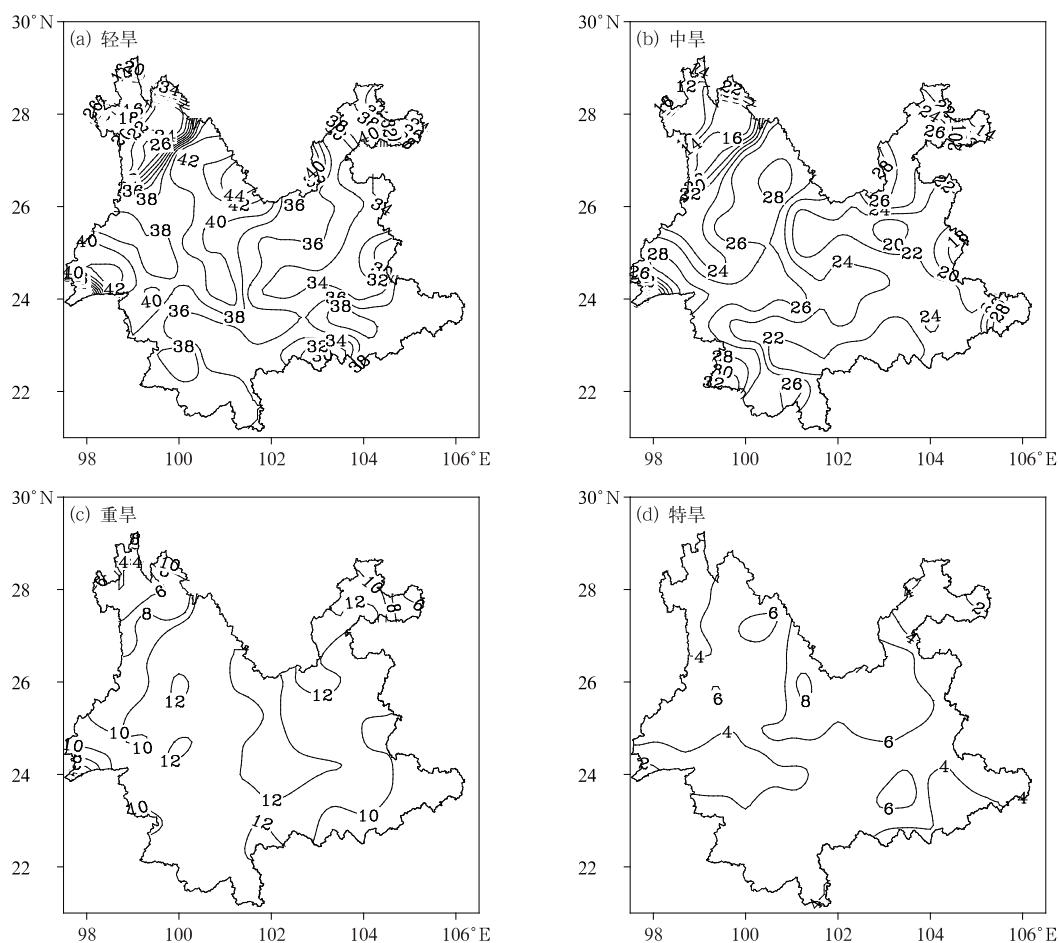


图 7 根据 MCI 统计的 1962—2024 年冬春季云南(a)轻旱,(b)中旱,
(c)重旱和(d)特旱平均日数空间分布(单位:d)

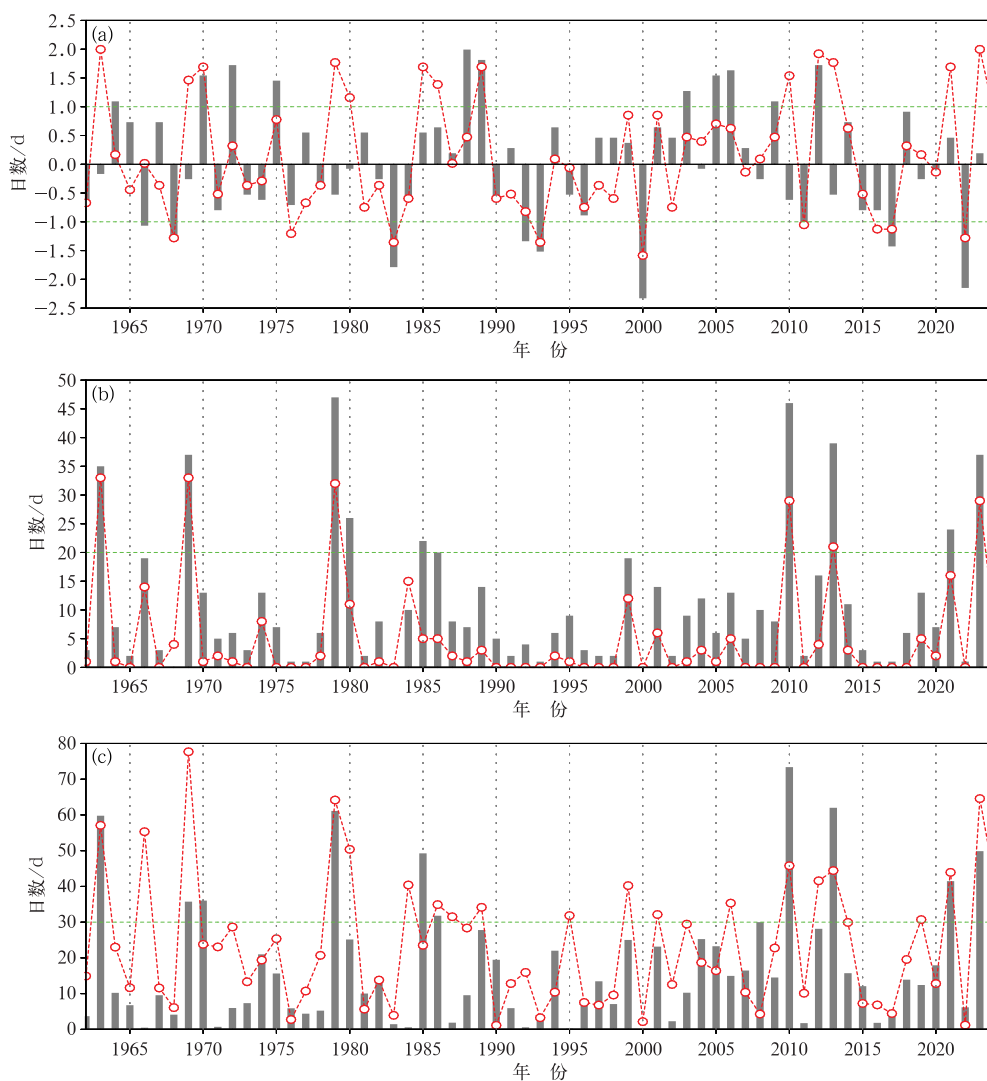
Fig. 7 Spatial distribution of annual average drought days (unit: d) of (a) light drought, (b) moderate drought, (c) severe drought and (d) extreme drought in Yunnan Province in winter and spring of 1962—2024 based on the MCI statistics

重旱和特旱的日数均超过 30 d(图 8b)。

由图 8 可见,在中旱或以上级别干旱的标准化值大于 1 的年份中,1963 年、1969 年、1979 年、1986 年、2010 年、2013 年、2021 年、2023 年春季和冬季中旱或以上级别干旱的日数均超过 30 d(图 8c),尤其 1963 年、1969 年、1979 年、2023 年的冬春季累计约 120 d(近 4 个月)发生了中旱或以上级别干旱。基于 MCI 的分析同样表明,1963 年、1969 年、1979 年、2021 年、2023 年云南发生了严重的冬春连旱事件,与上文分析的冬春连旱事件年份一致,仅 1986 年、2010 年、2013 年存在差异。差异年份中,2010 年和 2013 年出现在 2009—2013 年中国西南地区持续 5 年干旱期间,在该持续干旱期间,3.1 节判定该时段冬春连旱年为 2012 年。为研究冬春连旱事件

指标定义的合理性,进一步分析 2009—2014 年逐季节气温距平和降水变化(图 9a)可知,在持续干旱背景下,除 2012 年冬春季 PA 持续偏少 20% 以上且气温持续偏高外,其余年份的冬春季中仅单一季节 PA 偏少显著,其中 2011 年和 2014 年冬季 PA 为正,气温偏高也不明显甚至偏低,2011 年冬春季气温均为负距平。综上所述,在 2009—2013 年持续干旱期间,2012 年冬春降水持续偏少、气温持续偏高的特征最为明显,2010 年和 2013 年仅冬季降水显著偏少,春季降水偏少不显著,冬春季降水持续偏少的特征不明显。

MCI 表征的干旱与连续无降水日数的累积效应密切相关。图 9b 和 9c 分别为 2012 年和 2013 年冬春季连续无降水日数分布,可以看到 2012 年超过



注:图 a 中的绿色线表示标准化值为 ± 1 ,图 b 和图 c 中的绿色线分别表示 20 d 和 30 d 日数。

图 8 基于 MCI 的 1962—2024 年云南(a,b)冬春季平均的(a)标准化轻旱(柱状)和中旱或以上级别干旱(折线)日数,(b)重旱(柱状)和特旱(折线)日数,(c)冬季(柱状)和春季(折线)平均中旱或以上级别干旱日数

Fig. 8 Interannual variation of (a) average standardized light (column) and moderate or above level drought (curve) days and (b) severe (column) and extreme drought (curve) days during winter and spring, and (c) average moderate or above level drought days in winter (column) and spring (curve) in Yunnan Province from 1962 to 2024 based on the MCI statistics

40 d 连续无降水的范围较 2013 年大,但中心强度较 2013 年偏弱。2013 年连续无降水日数较大的区域比较集中,且持续时间较长,丽江、大理、楚雄部分地区的连续无降水日数超过 80 d。2012 年连续无降水日数主要出现在 2012 年 1 月中旬至 3 月下旬,跨越冬季和春季,而 2013 年冬春季的连续无降水日数则主要集中在冬季 2012 年 12 月至 2013 年 2 月。

因此,尽管 2013 年的持续无降水日数较 2012 年偏多、MCI 的干旱表征更强,但其连续无降水日主要出现在冬季,MCI 表征的干旱更多偏向于冬季干旱,因此 2013 年冬季和春季持续干旱的特征不如 2012 年明显。

综合以上两种方法判断得到的冬春连旱事件表明,本文定义的冬春连旱事件标准具有更好的合理

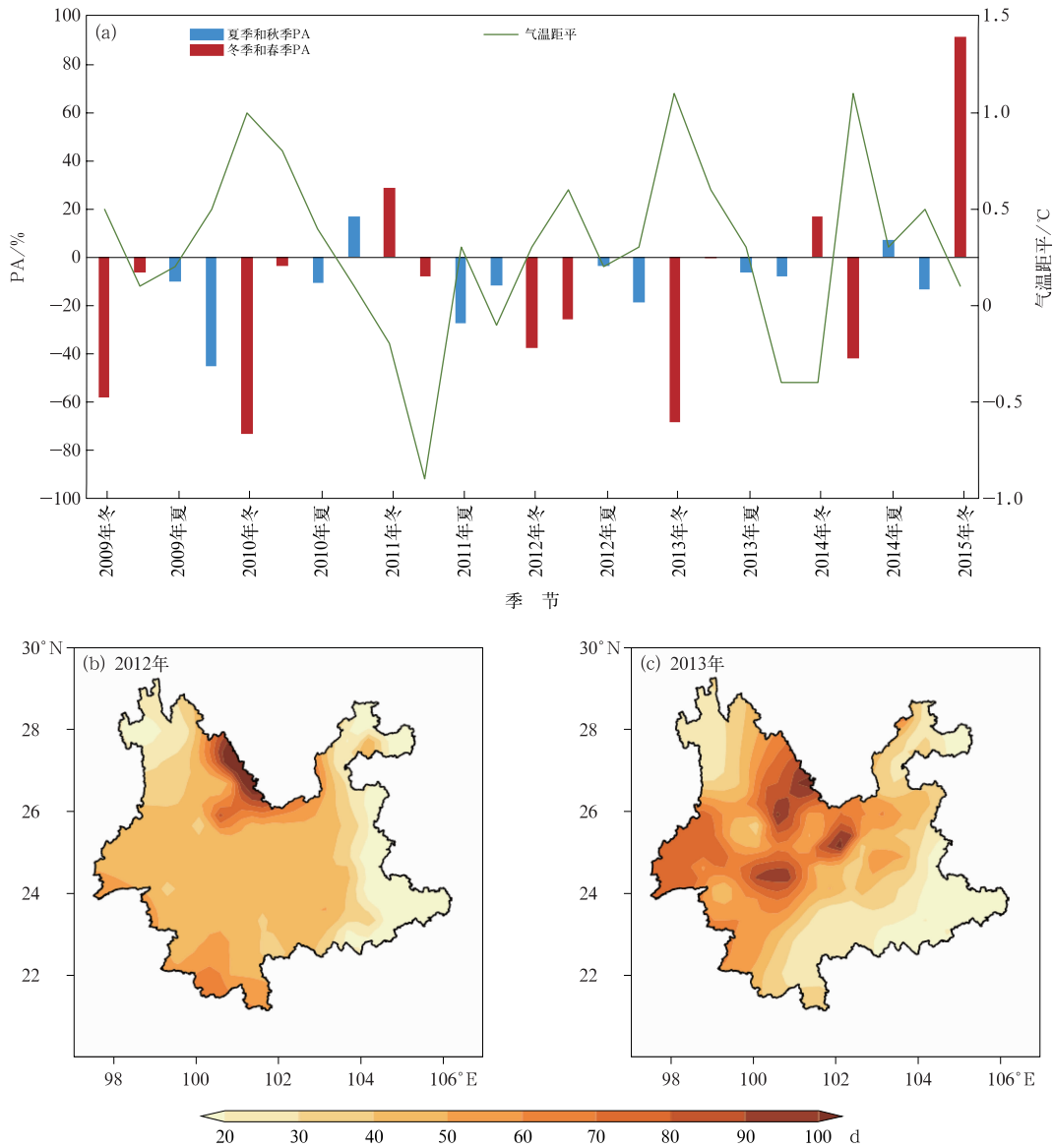


图 9 (a) 2009—2014 年云南逐季节 PA 和气温距平以及 (b) 2012 年和 (c) 2013 年冬春季连续无降水日数分布

Fig. 9 (a) Seasonal PA and temperature anomalies from 2009 to 2014, and (b, c) distribution of consecutive days without precipitation in winter and spring of (b) 2012 and (c) 2013

性和表征能力。

4 冬春连旱事件相关的大气环流持续性异常特征

对本文定义标准识别得到的 7 年 (1963 年、1969 年、1979 年、2005 年、2012 年、2021 年、2023 年) 冬春连旱事件进行冬季和春季 PA 合成 (图 10), 可看到, 两个季节云南大部分地区 $PA \leq -40\%$, 并通过 0.05 显著性水平检验, 表明识别标

准得到的 7 个年份具有显著的冬春连旱特征。

图 11 为云南 7 个冬春连旱事件年的高低层大气环流异常合成场, 可以看到, 500 hPa 欧亚中高纬度为正-负-正的高度异常场分布, 欧洲北部和西北太平洋地区为正高度异常, 亚洲东部为负高度异常; 中低纬度在云南及附近区域为正高度异常。与气候平均相比, 副热带高压范围较小, 位置偏东。在东亚地区, 500 hPa 高度异常场分布总体表现出北低南高的差异特征, 尤其是东亚北部负高度异常与云南及邻近地区正高度异常的差异显著, 不利于冷空气

南下影响云南。低层 700 hPa 在孟加拉湾北部有一个明显的异常反气旋环流,受其北部异常西风影响,不利于水汽向云南输送。

高低层环流异常变化表明,在冬春连旱年,高层 500 hPa 东亚中低纬度北低南高的高度场异常与低层 700 hPa 孟加拉湾的异常反气旋环流特征显著,二者均是影响云南降水异常的关键系统(晏红明等, 2007;2018)。为进一步分析大气环流持续异常特征,根据图 11a 选取 500 hPa A 区($50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)和 B 区($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)两个关键区域的平均位势高度差,代表东亚中低纬度地区的南

北高度差,并根据图 11b 选取 700 hPa 孟加拉湾区域($5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)平均涡度,表示孟加拉湾地区的环流异常。图 12a 为云南 7 个冬春连旱年合成的 12 月至次年 5 月逐日 700 hPa 孟加拉湾区域平均涡度和 500 hPa 东亚地区 A 区减去 B 区的位势高度差值,可看到,在冬春连旱年,孟加拉湾地区持续的涡度负异常表明孟加拉湾持续维持反气旋环流异常,不利于来自热带印度洋的西南水汽输送影响云南,导致在孟加拉湾北部、中南半岛至缅甸、云南大部地区水汽辐散(图 12b)。同时东亚东部中低纬度地区的位势高度差持续维持负异常,表明该区

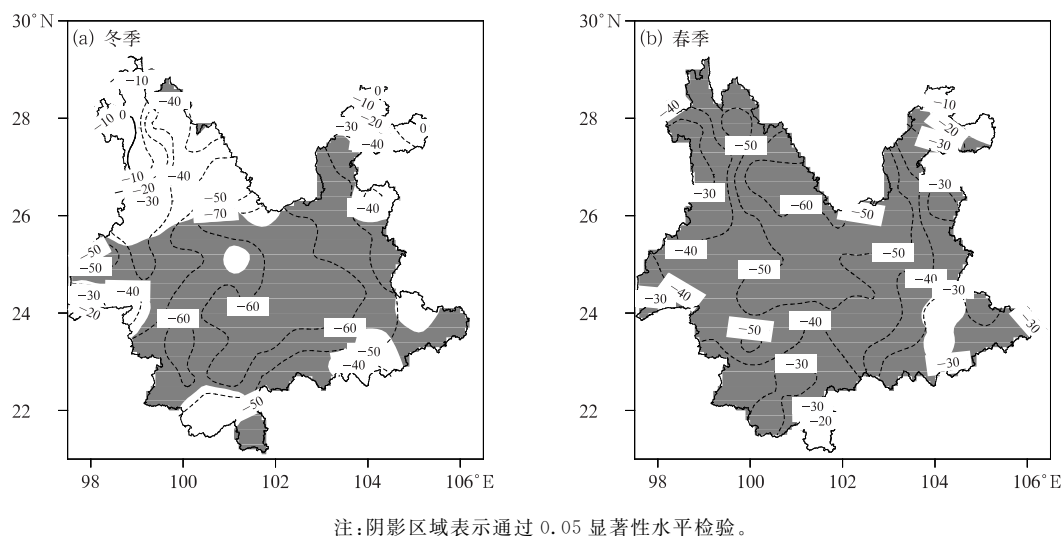


图 10 云南 7 个冬春连旱事件年的(a)冬季和(b)春季 PA 合成(单位:%)

Fig. 10 Composite PA (unit: %) for 7 WSPDE years in (a) winter and (b) spring in Yunnan Province

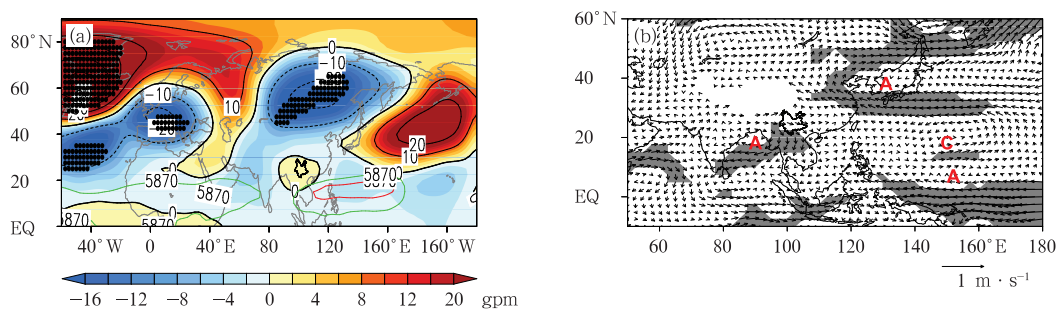


图 11 云南 7 个冬春连旱事件年去除线性趋势后的(a)500 hPa 位势高度场(黑色等值线,单位:gpm)及其距平场(填色), (b)700 hPa 异常风场

Fig. 11 Composite fields of (a) 500 hPa geopotential height field (black contour, unit: gpm) and its anomaly field (colored) and (b) 700 hPa anomalous wind field for 7 WSPDE years in Yunnan Province after removing the linear trend

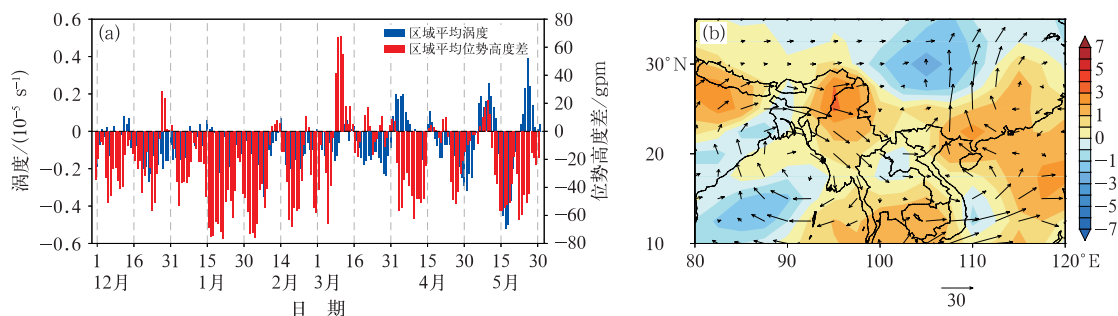


图 12 云南 7 个冬春连旱事件年 12 月至次年 5 月 (a) 700 hPa 孟加拉湾区域 ($5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)

平均涡度和 500 hPa 东亚中低纬度位势高度差的逐日变化, 以及 (b) 合成的整层

水汽输送距平 (矢量, 单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 和通量散度距平 (填色, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 12 (a) Daily variation of regional average vorticity at 700 hPa in the Bay of Bengal Basin

($5^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$) and the geopotential height difference at 500 hPa in the mid-low

latitudes of East Asia from December to May of the following year, as well as (b) the vertically integrated vapor transport anomalies (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) and flux divergence anomalies

(colored, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) for 7 WSPDE years in Yunnan Province

域北低南高的高度场差异不利于东亚冷空气南下影响云南。这些持续的环流异常变化会直接造成云南降水偏少, 出现冬春季节的持续性干旱。然而, 对于大气环流发生这种持续性异常变化的原因, 更深层的关键影响因子还需要进一步研究。

5 结论和讨论

通过对云南冬季和春季气候特征, 以及冬季和春季跨季节连续干旱的细致分析, 深入认识了云南冬春季干旱事件异常变化的时空特征, 定义了云南冬春连旱事件的标准, 同时也进一步分析了影响其发生的关键环流持续异常特征。得到如下结论:

(1) 冬季和春季欧亚高低层大气环流呈现明显不同的特征。冬季青藏高原上空 500 hPa 气流平直, 云南受孟加拉湾气旋环流东侧的西南气流和西北太平洋反气旋环流西侧的偏东南气流共同影响。春季 500 hPa 青藏高原南侧气流出现气旋性弯曲, 西太平洋副热带高压和西亚副热带高压均加强, 两高之间在孟加拉湾地区形成较明显的低压槽, 云南受槽前西南气流影响显著。

(2) 冬春季云南降水较少, 滇西北边缘地区降水占年降水量比例超过 30%, 体现了这些地区“双雨季”或“桃花汛”特征; 滇东南和滇东北的部分地区降水占年降水量达 20%, 丽江东部的占比不足 10%, 其余大部分地区占比 10%~20%。

(3) 云南干旱发生的区域差异较大, 发生频率总

体呈现出西北多东南少的区域差异特征, 干旱发生最多的区域主要集中在滇西北东部的丽江、大理、楚雄北部, 红河南部和西双版纳南部干旱发生较少。

(4) 云南单站和全省冬春连旱事件的标准定义为: 当某年某站的冬季和春季出现轻旱或以上级别干旱, 且其中某个季节达到中旱或以上级别干旱时, 定义该站点发生了冬春连旱事件; 当某年冬春季全省有 25 个站 (全省站数的 20%) 出现冬春连旱事件, 且冬季和春季全省平均 $\text{PA} \leq -10\%$ 时, 则定义为一次全省性的冬春连旱事件。对比分析表明, 该指标定义有很好的合理性。

(5) 高层 500 hPa 东亚中低纬度地区北低南高的位势高度差异以及低层 700 hPa 孟加拉湾异常反气旋的持续维持是造成云南冬春连旱事件发生的关键环流因子。

本文仅从气象的角度建立了云南单站和全省的冬春连旱事件标准, 并未考虑农业干旱、水文干旱等其他种类的干旱。下一步工作有必要与其他干旱指标对比分析, 进一步考察该指标对冬春干旱的表征能力。另外, 从气象的角度而言, 目前气象干旱的指标定义比较多, 本文的立意是指标计算的简单性和可推广性, 以及指标的表征能力来定义冬春连旱事件的标准。MCI 是目前气候业务干旱监测中普遍应用的指标, 但该指标计算复杂, 重点考虑了长时间无降水影响的累积效应, 对比分析表明该指数表征的冬春连旱事件与本文定义标准识别的冬春连旱事件基本一致。

由于篇幅限制,本文重点研究了冬春连旱事件期间关键影响系统的持续性异常特征,在后续的研究中,将从海洋等外强迫因子、热带季节内振荡以及中高纬度环流配置的不同差异等对典型的冬春连旱事件进行深入细致的分析。

参考文献

- 程建刚,解明恩,2008.近50年云南区域气候变化特征分析[J].地理科学进展,27(5):19-26. Cheng J G, Xie M E, 2008. The analysis of regional climate change features over Yunnan in recent 50 years[J]. Prog Geogr, 27(5): 19-26 (in Chinese).
- 范浩男,王玮,戴昂,等,2025.气象干旱指数在青藏高原东缘高寒草地的适用性评价及2022年干旱监测分析[J].干旱气象,43(3):366-374. Fan H N, Wang W, Dai A, et al, 2025. Applicability evaluation of meteorological drought index in alpine grassland at the eastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau and drought monitoring in 2022[J]. J Arid Meteor, 43(3): 366-374 (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).
- 吕俊梅,琚建华,任菊章,等,2012.热带大气MJO活动异常对2009~2010年云南极端干旱的影响[J].中国科学:地球科学,42(4):599-613. Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al, 2012. The influence of the Madden-Julian oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010[J]. Sci China Earth Sci, 42(4): 599-613 (in Chinese).
- 马青荣,刘荣花,胡程达,等,2020.干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J].气象,46(7):971-981. Ma Q R, Liu R H, Hu C D, et al, 2020. Impacts of drought and irrigation on root and yield of winter wheat[J]. Meteor Mon, 46(7): 971-981 (in Chinese).
- 马双梅,祝从文,刘伯奇,2021.2019年4—6月云南持续性高温天气的大气环流异常成因[J].大气科学,45(1):165-180. Ma S M, Zhu C W, Liu B Q, 2021. Possible causes of persistently extreme-hot-days-related circulation anomalies in Yunnan from April to June 2019[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1): 165-180 (in Chinese).
- 沈国强,郑海峰,雷振锋,2017. SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J].生态学报,37(11):3787-3795. Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F, 2017. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecol Sin, 37(11): 3787-3795 (in Chinese).
- 宋艳玲,2022.全球干旱指数研究进展[J].应用气象学报,33(5):513-526. Song Y L, 2022. Global research progress of drought indices[J]. J Appl Meteor Sci, 33(5): 513-526 (in Chinese).
- 王素萍,王劲松,张强,等,2015.几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J].高原气象,34(6):1616-1624. Wang S P, Wang J S, Zhang Q, et al, 2015. Applicability evaluation of drought indices in monthly scale drought monitoring in southwestern and southern China[J]. Plateau Meteor, 34(6): 1616-1624 (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).
- 王秀英,肖子牛,孙畅,2023.云南夏秋连续干旱事件及前期海平面气压异常信号[J].气候与环境研究,28(3):275-285. Wang X Y, Xiao Z N, Sun C, 2023. Identifying early abnormal signals of sea-level pressure for continuous drought events in Yunnan during summer and autumn[J]. Climatic Environ Res, 28(3): 275-285 (in Chinese).
- 伍红雨,吴遥,郭尧,2022.2020—2021年广东秋冬春干旱的成因分析[J].气象,48(6):783-793. Wu H Y, Wu Y, Guo Y, 2022. Cause analysis of drought in autumn, winter and spring in Guangdong from 2020 to 2021[J]. Meteor Mon, 48(6): 783-793 (in Chinese).
- 谢五三,田红,2011.五种干旱指标在安徽省应用研究[J].气象,37(4):503-507. Xie W S, Tian H, 2011. Study on the application of five drought indexes in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 37(4): 503-507 (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).
- 谢五三,张强,李威,等,2025.南水北调中线工程区域性干旱过程识别与评估[J].气象,51(10):1203-1214. Xie W S, Zhang Q, Li W, et al, 2025. Identification and assessment of regional drought processes of middle route project of South-to-North Water Diversion Project[J]. Meteor Mon, 51(10): 1203-1214 (in Chinese).
- 熊光洁,王式功,李崇银,等,2014.三种干旱指数对西南地区适用性分析[J].高原气象,33(3):686-697. Xiong G J, Wang S G, Li C Y, et al, 2014. Analysis of applicability of three drought indices for drought events in Southwest China[J]. Plateau Meteor, 33(3): 686-697 (in Chinese).
- 晏红明,程建刚,郑建萌,等,2012.2009年云南秋季特大干旱的气候成因分析[J].大气科学学报,35(2):229-239. Yan H M, Cheng J G, Zheng J M, et al, 2012. The climate cause of heavy drought in Yunnan in autumn 2009[J]. Trans Atmos Sci, 35(2): 229-239 (in Chinese).
- 晏红明,段旭,程建刚,2007.2005年春季云南异常干旱的成因分析[J].热带气象学报,23(3):300-306. Yan H M, Duan X, Cheng J G, 2007. Study on a severe drought event over Yunnan in spring 2005[J]. J Trop Meteor, 23(3): 300-306 (in Chinese).

- 晏红明,李清泉,孙丞虎,等,2013. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究[J]. 大气科学,37(5):1111-1128. Yan H M, Li Q Q, Sun C H, et al, 2013. Criterion for determining the onset and end of the rainy season in Southwest China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5):1111-1128(in Chinese).
- 晏红明,李清泉,王东迁,2018. 云南雨季的时空特征及与大气环流变化的关系[J]. 热带气象学报,34(1):12-22. Yan H M, Li Q Q, Wang D Q, 2018. Studies on spatial-temporal characteristics of Yunnan rainy season and its relationship with atmospheric circulation[J]. J Trop Meteor, 34(1):12-22(in Chinese).
- 杨辉,宋洁,晏红明,等,2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析[J]. 气候与环境研究,17(3):315-326. Yang H, Song J, Yan H M, et al, 2012. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010[J]. Climatic Environ Res, 17(3):315-326(in Chinese).
- 杨世刚,杨德保,赵桂香,等,2011. 三种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J]. 高原气象,30(5):1406-1414. Yang S G, Yang D B, Zhao G X, et al, 2011. Comparison of three drought indices in drought of Shanxi Province[J]. Plateau Meteor, 30(5):1406-1414(in Chinese).
- 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).
- 玉院和,王金亮,李晓鹏,2018. 基于 MODIS 数据的滇中地区干旱监测[J]. 灌溉排水学报,37(11):91-98. Yu Y H, Wang J L, Li X P, 2018. Monitoring the occurrence of drought in central Yunnan Province based on MODIS data[J]. J Irrig Drain, 37(11):91-98(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).
- 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:2-17. 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:2-17(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).
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al, 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(2):247-268.
- Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al, 2012. The influence of the Madden-Julian oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009—2010[J]. Sci China Earth Sci, 55(1):98-112.

(本文责编:侯翠梅)