

1961—2019 年长江中下游区域性干旱过程及其变化*

张 强¹ 谢五三² 陈鲜艳¹ 翟盘茂³ 吴必文² 段居琦¹

ZHANG Qiang¹ XIE Wusan² CHEN Xianyan¹ ZHAI Panmao³ WU Biwen² DUAN Juqi¹

1. 国家气候中心, 北京, 100081

2. 安徽省气候中心, 合肥, 230031

3. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

1. *National Climate Centre, Beijing 100081, China*

2. *Anhui Climate Center, Hefei 230031, China*

3. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2020-12-30 收稿, 2021-04-01 改回.

张强, 谢五三, 陈鲜艳, 翟盘茂, 吴必文, 段居琦. 2021. 1961—2019 年长江中下游区域性干旱过程及其变化. 气象学报, 79(4): 570-581

Zhang Qiang, Xie Wusan, Chen Xianyan, Zhai Panmao, Wu Biwen, Duan Juqi. 2021. Regional drought process and its variation characteristics in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2019. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(4):570-581

Abstract Objectively identifying regional drought processes and assessing their intensity is the operational basis for conducting accurate and detailed monitoring and assessment of drought impacts. Based on daily temperature and precipitation data collected at 502 national meteorological stations from 1961 to 2019 and the historical drought disaster information from 1971 to 2019 in the middle-lower reaches of the Yangtze River, 126 regional drought processes in the middle-lower reaches of the Yangtze River were identified using the meteorological drought composite index (MCI) and regional drought process identification method. The number of drought processes decreases obviously with the increase of duration days, and the determination coefficient reaches 0.89. From 1961 to 2019, there were 6 extremely strong regional drought processes, 19 strong regional drought processes and 38 sub strong regional drought processes in the middle-lower reaches of the Yangtze River, and the remaining 63 were general regional drought processes. The variation trend of duration days, average intensity, average affected area and comprehensive intensity index of regional drought processes present different forms. The distribution of annual drought days in the middle-lower reaches of the Yangtze River is generally "more in the north than in the south, more in the plain than in the mountainous area", and the trend shows a pattern of "increasing in the northwest and decreasing in the southeast". The variation trend of drought days is consistent with that of drought affected area, and the correlation coefficient reaches 0.66. According to the monitoring and assessment of typical regional drought processes, there is an obvious positive correlation between the comprehensive drought intensity index and the number of stations that experienced drought. The stronger the comprehensive drought intensity index, the larger the number of stations experiencing various levels of drought. The number of drought days in different regions is consistent with the size of drought disaster area. The more drought days, the greater the drought disaster area. In general, results of identification and assessment of regional drought processes are consistent with drought disaster information. The method of identification and assessment of regional drought processes can well identify the regional drought process, and monitor and assessment the drought process from the perspectives of duration days, average intensity, average affected area and comprehensive drought intensity.

Key words Regional drought process, Identification, Assessment, Meteorological drought composite index, the middle-lower

* 资助课题: 国家重点研发计划(2017YFC1502402)、安徽省自然科学基金(1908085MD109)、安徽省重点研究和开发计划(201904a07020099)。

作者简介: 张强, 主要从事气象灾害评估和气候应用研究。E-mail: zhq62@cma.gov.cn

通信作者: 谢五三, 主要从事气候监测评估与气象灾害风险研究。E-mail: xiewusan_2008@sina.com

reaches of the Yangtze River

摘要 客观识别区域性干旱过程,评估其强度是开展精准监测、评估干旱影响业务的基础。基于长江中下游地区502个国家气象站1961—2019年逐日气温、降水资料以及1971—2019年干旱受灾面积,运用气象干旱综合指数(MCI)及区域性干旱过程识别方法,识别出长江中下游地区126次区域性干旱过程,干旱过程的次数随着持续天数增多呈明显减少趋势,决定系数达0.89。1961—2019年长江中下游地区共发生6次特强区域性干旱过程、19次强区域性干旱过程、38次较强区域性干旱过程,其余63次为一般区域性干旱过程,区域性干旱过程的持续天数、平均强度、平均影响面积以及综合强度指数的变化趋势形态各异。长江中下游地区年干旱日数总体呈现“北部多于南部、平原多于山区”的分布特征,且总体呈现“西北部增多、东南部减少”的变化趋势,干旱日数与干旱受灾面积变化趋势较为一致,相关系数达0.66。由典型区域性干旱过程监测评估可知,干旱综合强度指数与干旱站数存在明显的正相关,干旱综合强度指数越强,各等级干旱站数越多;各地干旱日数的多少与干旱受灾面积的大小也较为一致,干旱日数越多的地区,干旱受灾面积越大。总体来看,区域性干旱过程识别方法及评估结果与干旱灾情较为吻合,能较好地识别出区域性干旱过程,并可从持续天数、平均强度、平均影响面积以及干旱综合强度等多角度对干旱过程进行监测评估。

关键词 区域性干旱过程,识别,评估,MCI,长江中下游

中图分类号 P462.3

1 引言

干旱是中国最主要的气象灾害之一,具有发生频率高、持续时间长、影响范围广等特点(叶笃正等,1996;邹旭恺等,2008),在全球变暖的大背景下,中国遭受干旱的地区在扩大,干旱造成的损失也在增加(Yu, et al, 2014; 张强等, 2015),且未来几十年干旱可能呈加重趋势(马柱国等, 2006; Chen, et al, 2017)。干旱灾害严重地威胁着粮食安全和生态安全,成为制约社会经济可持续发展的重要因素,因而对干旱的研究具有重要意义(姚玉璧等, 2013; 张强等, 2020)。

干旱指数是表征干旱的重要指标,据世界气象组织统计,常用的气象干旱指数超过50种(李忆平等, 2017),近年来,针对干旱指数及其适用性的研究相对较多,王芝兰等(2013)对比分析了标准化降水指数(SPI)和广义极值分布指数(GEVI)在中国西北地区干旱监测中的适用性;段莹等(2013)分析了帕默尔干旱指数(PDSI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)及综合气象干旱指数(CI)在江淮流域干旱监测中的优缺点;廖要明等(2017)基于气象干旱综合指数(MCI)研究了中国干旱时空分布及灾情变化特征;王素萍等(2020)评估了5种干旱指数在中国北方的适用性,并对各指数监测结果差异原因进行了初步探讨,相关研究(王林等, 2014; 张立杰等, 2018)指出了多种干旱指数在各个地区的适用性以及存在差异的可能原因,对中国干旱监测

评估业务中干旱指数的选取及改进具有重要的参考意义。

然而,目前针对干旱的研究所使用的要素或干旱指数大多是基于单站的,主要是以某个点的特殊情况代替区域旱情发生全貌,或是通过统计单站年、季或月等固定时段干旱指数的等级来确定某站是否发生了干旱。众所周知,干旱事件属于区域性极端天气、气候事件,不但具有一定的持续时间,还具有一定的影响范围,如何把干旱事件作为一个时间和空间的整体来进行识别和刻画,是研究干旱事件的关键,对干旱过程的监测评估业务具有重要意义(李忆平等, 2015)。Ren等(2012)提出了一种区域性极端事件客观识别方法(Objective Identification Technique for Regional Extreme Events, OITREE),该方法能较好地对区域性气象干旱事件进行识别(任福民, 2015);李韵婕等(2014)基于OITREE方法分析了1960—2010年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征,相关研究(安莉娟等, 2014; 金燕等, 2018)推动了中国区域性气象干旱事件识别与评估技术的发展。

长江中下游地区地处东亚季风气候区,受季风影响显著,干旱灾害发生频繁(李明等, 2019),研究表明,近年来长江中下游地区干旱事件开始增多、增强(王文等, 2016),特别是春季干旱化趋势显著,秋季极端干旱较多(曹博等, 2018; 刘诗梦等, 2020),如2001年春夏连旱、2010—2011年六十年一遇的冬春连旱(刘建刚, 2017)、2013年夏季高温

伏旱(王文等, 2017)、2019年夏秋冬三季连旱(Yu, et al, 2020; 杨光等, 2020)等, 严重影响人民的生产、生活和国家粮食安全, 引起政府和社会各界的高度关注。目前针对长江中下游地区区域性干旱过程的识别方法及监测评估方面的研究相对较少, 文中主要参考气象行业标准《区域性干旱过程监测评估方法》(QX/T 597-2021)(廖要明等, 2021)中区域性干旱过程识别方法, 基于目前中国气象干旱监测业务中使用的 MCI, 并对 OITREE 法进行了改进, 引入 EIDR(极端事件强度与历时、区域的理论关系)(Lu, et al, 2017)理论建立了区域干旱综合强度指数, 开展长江中下游地区区域性干旱过程识别与评估技术研究, 旨在进一步认识该区域干旱的发生、发展规律, 为干旱监测、评估及预警业务以及防灾、减灾等工作提供参考。

2 资料与方法

2.1 资料说明

长江中下游地区包括上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西等省(市), 人口密集、经济发达, 是中国重要的粮、油、棉生产基地。文中选用长江中下游地区 502 个国家级气象站 1961—2019 年逐日气温和降水资料(资料来源于国家气象信息中心, <http://data.cma.cn/>), 均经过质量控制, 满足研究需要。长江中下游地区高程、水系及气象站分布见图 1。

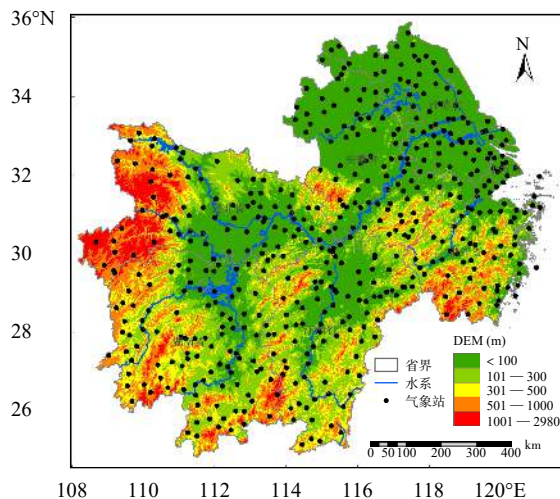


图 1 长江中下游地区高程、水系及气象站分布

Fig. 1 Distribution of DEM, river systems and meteorological stations in the middle-lower reaches of the Yangtze River

历史干旱灾情资料为长江中下游地区所包含的江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西、上海等省(市) 1971—2019 年历年干旱受灾面积(资料来自国家统计局, <http://www.stats.gov.cn/tjsj/>)。

2.2 区域性干旱过程的识别与评估方法

干旱指数选用适用性较好且目前在中国实时气象干旱监测业务中使用的气象干旱综合指数(MCI), 该指数考虑了近 60 d 内的有效降水(权重累计降水)、30 d 内蒸散(相对湿度)以及季尺度(90 d)降水和近半年尺度(150 d)降水的综合影响, 气象干旱综合指数的计算公式(张存杰等, 2017)为

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

式中, MI_{30} 为近 30 d 相对湿度指数、 SPI_{90} 为近 90 d 标准化降水指数, SPI_{150} 为近 150 d 标准化降水指数, $SPIW_{60}$ 为近 60 d 标准化权重降水指数, a 、 b 、 c 、 d 为经验系数, 随地区和季节变化进行调整, Ka 为季节调节系数, 根据不同季节各地主要农作物生长发育阶段对土壤水分的敏感度确定。MCI 对应的各干旱等级划分见表 1。

表 1 气象干旱综合指数等级划分表

Table 1 Drought level classification according to the meteorological drought composite index (MCI)

干旱等级	干旱类型	MCI 指数值
1	无旱	$-0.5 < MCI$
2	轻旱	$-1.0 < MCI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < MCI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < MCI \leq -1.5$
5	特旱	$MCI \leq -2.0$

区域性干旱过程的识别与评估方法主要参考气象行业标准《区域性干旱过程监测评估方法》(QX/T 597-2021)(廖要明等, 2021), 具体如下:

(1) 相邻监测站点: 指两个站点之间的距离在 200 km 以内, 站点 A ($LonA, LatA$)、B ($LonB, LatB$) 之间的距离 D 计算公式如下

$$D = R \times \arccos(\sin(LatA) \times \sin(LatB) + \cos(LatA) \times \cos(LatB) \times \cos(LonA - LonB)) \times \pi / 180 \quad (2)$$

式中, R 为地球平均半径, 取 6371 km; $\pi = 3.14$; $LonA$ 、 $LatA$ 和 $LonB$ 、 $LatB$ 分别为 A 站、B 站的经度和纬度(樊东卫等, 2019)。

(2) 区域性干旱日: 依据气象干旱综合指数的监测结果, 某日监测范围内(长江中下游地区)有 $\geq 10\%$ 的相邻监测站点出现中度或以上强度的干旱, 则定义为1个区域性干旱日。

(3) 区域性干旱过程的判定: 当连续的区域性干旱日之间站点重合率在50%以上, 且持续时间在15 d以上时, 则定义为一个区域性干旱过程。满足一次区域性干旱过程判定条件的首日为该次区域性干旱过程开始日; 某次区域性干旱过程开始后, 当连续5 d出现中旱或以上强度的站点数小于区域总站点数的10%或者与前一干旱日的站点数重合率低于50%时, 即表示该次干旱过程结束, 则将前一天确定为该次区域性干旱过程的结束日。

(4) 区域性干旱过程的综合强度指数(Z): 参考EIDR(Lu, et al, 2017)理论, 根据某次区域性干旱过程中的平均强度(I)、平均影响面积(A)和持续时间(T), 确定其综合强度指数(Z), 将各指标进行归一化后指数加权综合, 计算公式如下

$$Z = f(I, A, T) = |I| \times A^\alpha \times T^\beta \quad (3)$$

式中, I 为区域性干旱过程的平均强度, 即该区域内单日气象干旱综合指数达到和超过中旱以上程度的所有站的指数平均值; A 为区域性干旱过程的平均影响面积, 即该区域内单日气象干旱综合指数达到和超过中旱以上程度的干旱影响面积(单位: km^2)平均值; T 为区域性干旱过程持续时间, 即区域性干旱过程开始至结束之间的天数。 α 、 β 分别为面积和时间指数权重系数, 均取0.5。

(5) 区域性干旱过程的综合强度等级划分: 区域性干旱过程的综合强度等级按历年综合强度排序百分位数划分为4级, 一般区域性干旱过程(占50%), 较强区域性干旱过程(占30%), 强区域性干旱过程(占15%), 特强区域性干旱过程(占5%)。

3 区域性干旱过程的识别与变化分析

3.1 区域性干旱过程的识别

基于长江中下游地区502个站1961—2019年逐日气温和降水资料, 计算各站逐日气象干旱综合指数, 依据各站的干旱程度(中度或以上强度的干旱)以及相邻监测站点(两个站点之间的距离在200 km以内)的数量(监测范围内有超过10%的相邻监测站点), 识别出长江中下游地区1961—

2019年发生的所有区域性干旱过程。

长江中下游地区1961—2019年以来共发生126次区域性干旱过程, 持续天数在1个月以内(15—30 d)的区域性干旱过程共发生了47次, 占全部干旱过程的37%; 持续天数为1—2个月(30—60 d)的区域性干旱过程共发生了39次, 占全部干旱过程的31%; 持续天数为2—3个月(60—90 d)的区域性干旱过程共发生了17次, 占全部干旱过程的13%; 持续天数为3—4个月(90—120 d)的区域性干旱过程共发生了11次, 占全部干旱过程的9%; 持续天数为4—5个月(120—150 d)的区域性干旱过程共发生了5次, 占全部干旱过程的4%; 持续天数超过5个月(150 d)的区域性干旱过程共发生了7次, 占全部干旱过程的6%。持续时间最长的3次区域性干旱过程分别是: 1978年4月21日至11月10日(干旱过程持续204 d)、2011年4月6日至9月29日(干旱过程持续177 d)、1992年6月26日至12月11日(干旱过程持续169 d)。长江中下游地区区域性干旱过程频次分布见图2, 由图2可见, 随着干旱过程持续天数的增加, 干旱过程的个数呈明显的减少趋势, 决定系数(R^2)达0.89。

3.2 区域性干旱过程的变化特征

针对长江中下游地区1961—2019年126次区域性干旱过程, 结合区域性干旱过程综合强度指数(Z)计算方法, 对长江中下游地区历次区域性干旱过程进行评估, 计算各区域性干旱过程的持续天数(T)、区域性干旱过程平均强度(I)、区域性干旱过程平均影响面积(A), 进而得到区域性干旱过程综合强度指数。

根据区域性干旱过程综合强度等级划分(所占百分比), 1961—2019年长江中下游地区共发生6次特强区域性干旱过程(约为十年一遇)、19次强区域性干旱过程(约为三年一遇)、38次较强区域性干旱过程(约为两年一遇), 其余63次为一般区域性干旱过程(约为一年一遇)。从单因子强度排序来看, 持续天数最长的干旱过程是1978年4月21日至11月10日(204 d); 从平均强度来看, 最强的干旱过程是2000年3月20日至6月3日(平均强度为-1.70, 综合强度等级为强, 综合强度指数排序为14); 从平均影响面积来看, 最大的干旱过程是1988年10月25日至1989年1月6日(平均影

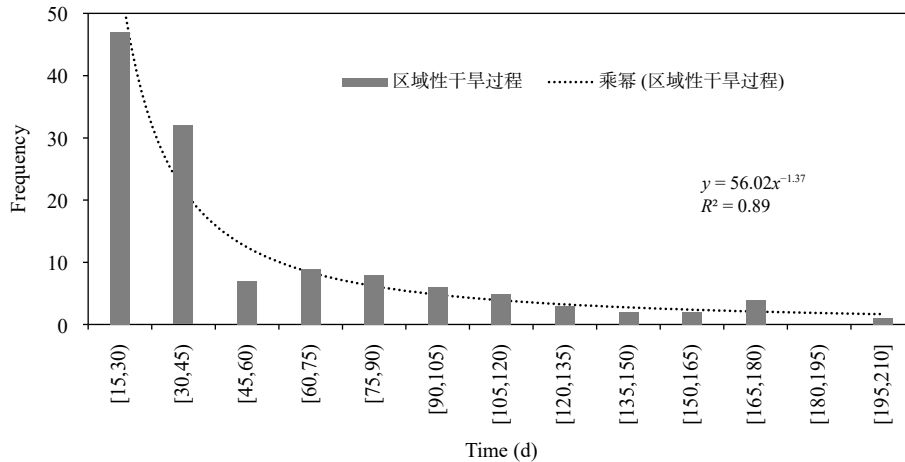


图2 长江中下游地区区域性干旱过程频次分布

Fig. 2 Frequency distribution of regional drought processes in the middle-lower reaches of the Yangtze River

响面积达 530582.4 km², 综合强度等级为强, 综合强度指数排序为 12); 从综合强度指数来看, 最强的干旱过程是 1978 年 4 月 21 日至 11 月 10 日。对长江中下游地区 1961—2019 年所有区域性干旱过程按综合强度指数由强到弱进行排序, 排名前 10 的区域性干旱过程及其相关特征量见表 2。进一步分析 126 次区域性干旱过程综合强度指数与持续天数、平均强度和平均影响面积的相关关系, 其相关系数分别为 0.93、0.42 和 0.61, 均通过 99% 的信度 *t* 检验 (以下简称信度检验)。

对长江中下游地区 1961—2019 年 126 次区域性干旱过程按发生时间进行排序, 分别计算每次干旱过程的持续天数、平均强度、平均影响面积以及综合强度指数, 演变结果见图 3。

由图 3 可见, 长江中下游地区区域性干旱过程的持续天数、平均强度、平均影响面积以及综合强度指数均存在较大波动, 其中持续天数的均值为 54 d, 最长达 204 d, 趋势线为二次项系数为正的二次函数, 即持续天数存在两头多中间少的变化趋势, 决定系数 (R^2) 为 0.0292 (通过 95% 信度检验); 平均强度的均值为 -1.40, 最强为 -1.70, 趋势线为三次项系数为正的三次函数, 即平均强度存在波浪形变化趋势, 决定系数 (R^2) 为 0.0322 (通过 95% 信度检验); 平均影响面积为 245244 km², 最大 530582 km², 趋势线为二次项系数为负的二次函数, 即平均影响面积存在两头小中间大的变化趋势, 决定系数 (R^2) 为 0.0134 (未通过 95% 信度检验); 综合强度指数的趋势线为二次项系数为正的二次函数, 即综合强度

表 2 长江中下游地区综合强度指数前 10 位的区域性干旱过程

Table 2 Regional drought processes with the top 10 comprehensive intensity indexes in the middle-lower reaches of the Yangtze River

序号	起始时间	结束时间	持续天数 (d)	区域性干旱过程 平均强度	区域性干旱过程 平均影响面积(km ²)	区域性干旱过程 综合强度指数	综合强度 等级
1	1978/04/21	1978/11/10	204	-1.54	364366.4	1.000	特强
2	2011/04/06	2011/09/29	177	-1.55	344656.5	0.897	特强
3	1966/06/04	1966/11/12	162	-1.52	360429.5	0.853	特强
4	2019/07/07	2019/12/18	165	-1.46	347190.8	0.803	特强
5	1992/06/26	1992/12/11	169	-1.40	312691.8	0.726	特强
6	1979/09/29	1980/01/11	105	-1.41	439469.2	0.674	特强
7	1973/10/29	1974/01/16	80	-1.48	515653.9	0.667	强
8	1967/07/15	1967/11/08	117	-1.53	317411.2	0.651	强
9	2003/07/03	2003/11/19	140	-1.43	298227.9	0.644	强
10	2001/06/24	2001/10/26	125	-1.47	303077.3	0.627	强

指数存在两头强中间弱的变化趋势, 决定系数(R^2)为 0.0104(未通过 95% 信度检验)。

为分析长江中下游地区年干旱日数空间分布及变化趋势, 根据其 1961—2019 年 126 次区域性干旱过程的起始和结束时间, 统计各站的年干旱日

数, 得到空间分布(图 4a), 由图 4a 可见, 年干旱日数总体呈现“北部多于南部、平原多于山区”的特征, 年干旱日数较多的地区位于苏皖北部以及湖北省的中部和北部, 年干旱日数超过 100 d, 较少的地区主要位于高海拔的山区。根据各站 1961—

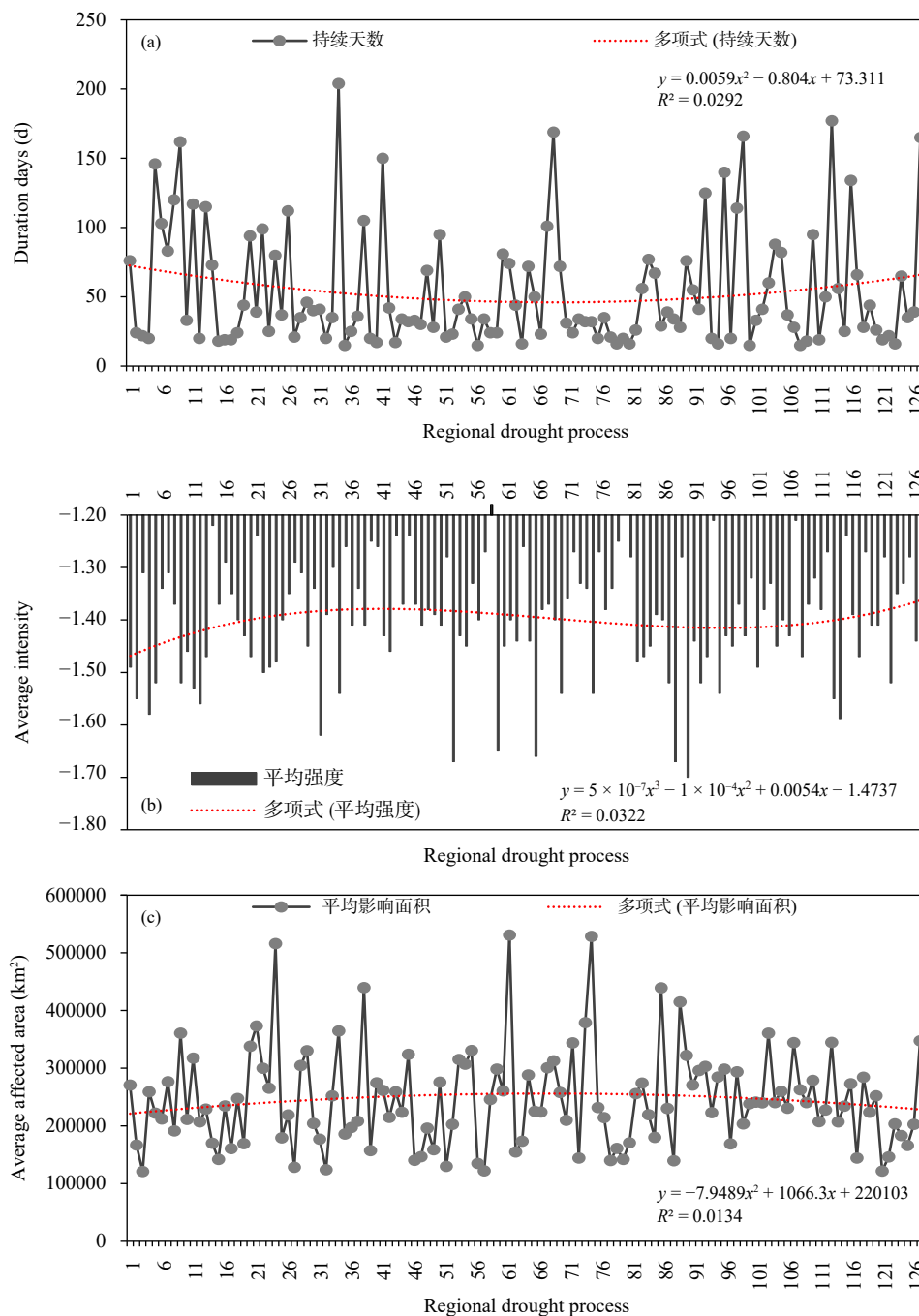
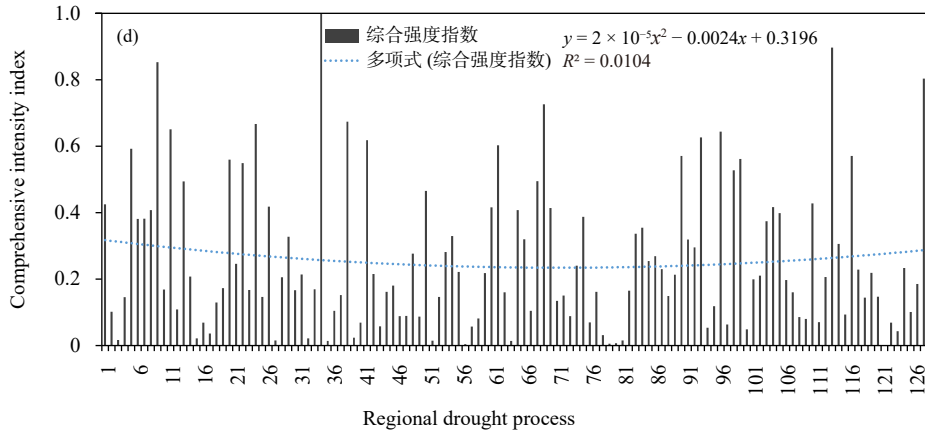


图 3 1961—2019 年长江中下游地区区域性干旱过程的持续天数(a)、平均强度(b)、平均影响面积(c)及综合强度指数(d)演变

Fig. 3 Variations of duration days (a), average intensity (b), average affected area (c) and comprehensive intensity index (d) of regional drought processes in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2019



续图 3

Fig. 3 Continued

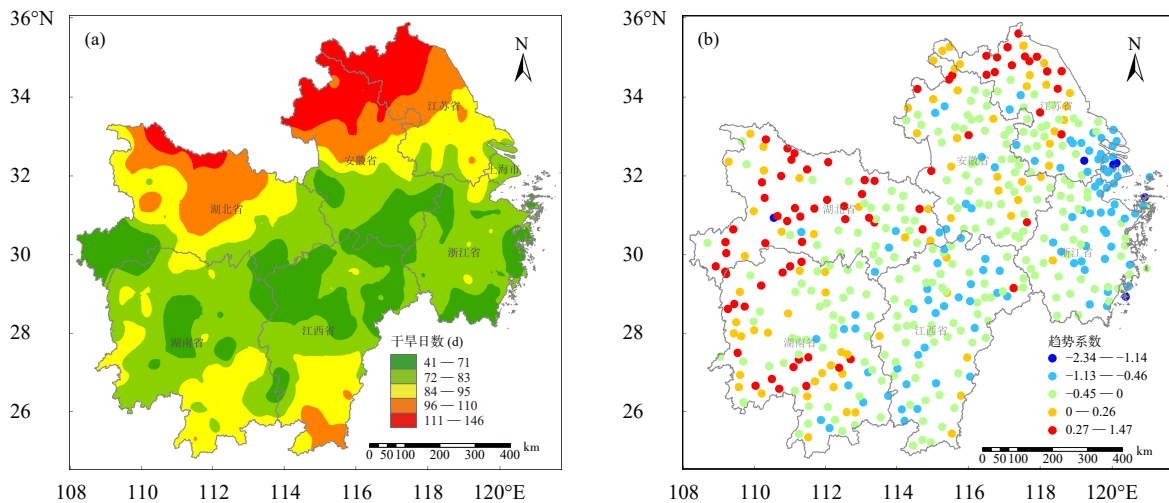


图 4 长江中下游地区年干旱日数空间分布 (a, 单位: d) 及变化趋势 (b, 单位: d/a)

Fig. 4 Spatial distribution (a, unit: d) and variation trend (b, unit: d/a) of annual drought days in the middle-lower reaches of the Yangtze River

2019年逐年干旱日数演变,得到各站干旱日数的线性趋势(图4b),由图4b可见,年干旱日数变化趋势总体呈现“西北部增多、东南部减少”的格局,增多较为明显的地区主要位于苏皖北部、湖北西北部、湖南西北部,最大为14.7 d/(10 a),而减少较为明显的地区主要位于苏皖南部、江西和浙江大部分地区,最大为23.4 d/(10 a)。

根据长江中下游地区所含省份1971—2019年历年干旱受灾面积,求和得到年干旱受灾面积,并提取同时段(1971—2019年)长江中下游地区各站的年干旱日数,得到1971—2019年长江中下游地区平均年干旱日数和年干旱受灾面积演变(图5),

由图5可见,平均年干旱日数与年干旱受灾面积变化趋势较为一致,其相关系数达0.66,通过了99%信度检验,表明识别出的区域性干旱过程与干旱受灾面积具有较强的相关。图5中有些年份(如1979、2004—2008、2019年等)干旱日数和受灾面积存在较大差别,主要是因为气象干旱只表征大气水分亏欠情况,并没有结合下垫面农作物状况,这些年份干旱日数主要分布在秋、冬季,而秋、冬季的农作物需水量少,气象干旱对其影响不大,造成的干旱灾情相对较轻;而同样的气象干旱发生在春、夏季,农作物需水量大,造成的干旱受灾面积就明显增大。

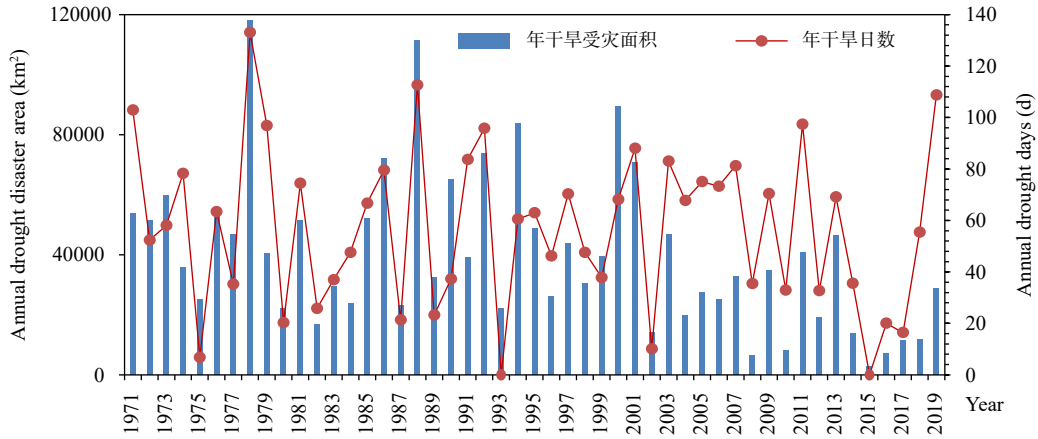


图5 1971—2019年长江中下游地区平均年干旱日数和年干旱受灾面积演变

Fig. 5 Variations of average annual drought days and annual drought disaster area in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 1971 to 2019

4 典型区域性干旱过程的变化监测评估

由长江中下游地区1961—2019年区域性干旱过程综合强度指数的排序可知,1978年4月21日至11月10日的区域性干旱过程综合强度指数最强;从历史干旱受灾面积可知,1978年干旱受灾面积历史最大(118100 km²),两者高度一致,因而选取此次区域性干旱过程作为长江中下游地区最典型干旱过程个例进行分析,该区域性干旱过程持续时间达204 d,平均强度为-1.54,平均影响面积为364366 km²,综合强度达到特强等级,各等级干旱站数及干旱综合强度逐日演变见图6。

由图6可见,该区域性干旱过程自1978年4月下旬开始,6月末干旱强度迅速加强,特旱站数明显增多,一直持续至10月末,干旱强度才有所降低。干旱站数与干旱综合强度指数存在明显的正相关关系,进一步计算可知:干旱综合强度指数与轻旱站数、中旱站数、重旱站数、特旱站数以及总干旱站数的相关系数分别为-0.128、0.324、0.869、0.892、0.788,也即与特旱站数的相关最好,其次是重旱站数,与总干旱站数的相关系数也达到0.788,均通过了99%的信度检验,表明干旱综合强度指数较好地表征了区域性干旱过程的强度。

区域内502个站不同等级干旱日数空间分布

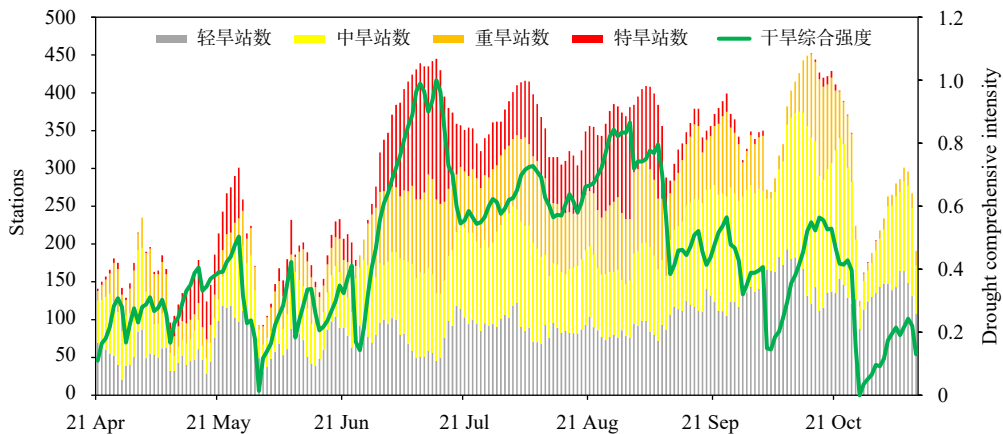


图6 1978年长江中下游地区典型区域性干旱过程各等级干旱站数及干旱综合强度逐日演变

Fig. 6 Daily evolution of the number of drought stations and drought comprehensive intensity during typical regional drought processes in the middle-lower reaches of the Yangtze River

如图7所示,可见,此次区域性干旱过程主要发生在苏、皖两省,从轻旱以上日数分布来看,苏、皖两省绝大部分区域超过130 d,两省中部地区超过160 d;从中旱以上日数分布来看,其分布型与轻旱以上日数分布基本一致,两省绝大部分区域超过90 d,中部地区超过120 d;从重旱和特旱日数分布来看,苏、皖两省仍是干旱日数最多的区域,两省大部分

地区重旱日数超过60 d,安徽中南部和江苏大部分地区特旱日数超过30 d。从历史干旱受灾面积来看,1978年长江中下游地区所包含的省份干旱受灾面积分别是:安徽(36700 km²)、江苏(26700 km²)、湖北(21300 km²)、湖南(17100 km²)、江西(11300 km²)、浙江(5000 km²),这与该典型区域性干旱过程各等级干旱日数空间分布基本一致。

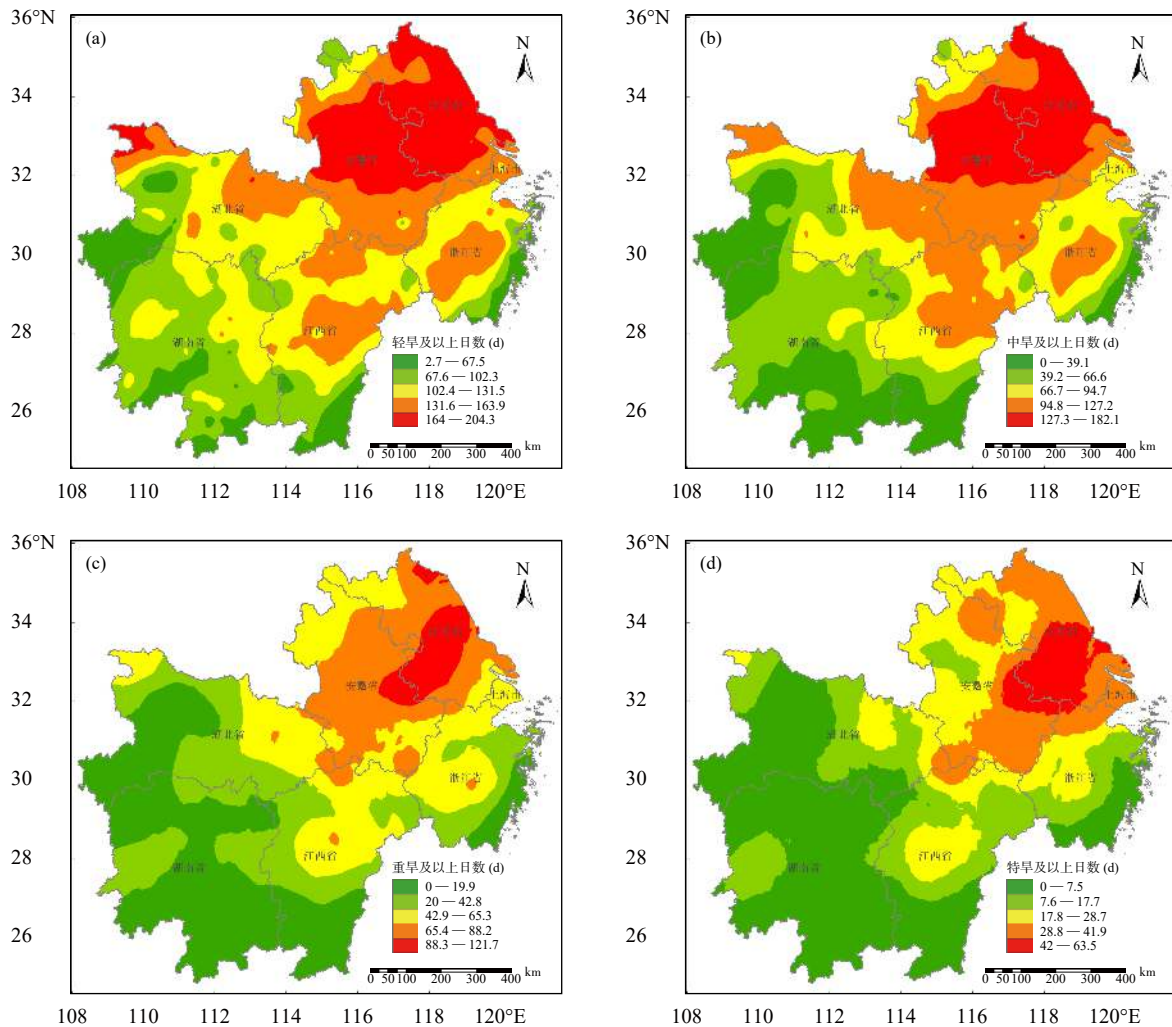


图7 长江中下游地区典型区域性干旱过程各等级干旱(a—d)日数空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of drought days in typical regional drought processes (a—d) in the middle-lower reaches of the Yangtze River

5 结论与讨论

(1)根据区域性干旱过程识别方法,识别出1961—2019年长江中下游地区共发生126次区域性干旱过程,持续天数在1个月以内的区域性干旱过程占全部干旱过程的37%、1—2个月的占31%、

2—3个月的占13%、3—4个月的占9%、4—5个月的占4%、超过5个月的占6%,持续时间最长的区域性干旱过程长达204 d,随着干旱过程持续天数的增加,干旱过程的个数呈明显的减少趋势,决定系数(R^2)达0.89。

(2) 根据区域性干旱过程综合强度指数, 1961—2019 年长江中下游地区共发生 6 次特强区域性干旱过程、19 次强区域性干旱过程、38 次较强区域性干旱过程, 其余 63 次为一般区域性干旱过程, 综合强度指数最强的干旱过程为 1978 年 4 月 21 日至 11 月 10 日。历次区域性干旱过程的持续天数、平均强度、平均影响面积以及综合强度指数均存在较大波动, 其中持续天数呈两头多中间少的变化趋势、平均影响面积呈两头小中间大的变化趋势、综合强度指数呈两头强中间弱的变化趋势、平均强度呈波浪形变化趋势, 持续天数和平均强度的变化趋势均通过 95% 信度检验, 平均影响面积和综合强度指数的变化趋势未通过 95% 信度检验。

(3) 长江中下游地区年干旱日数总体呈现“北部多于南部、平原多于山区”的空间分布特征, 苏皖北部及湖北省的中部和北部年干旱日数超过 100 d; 年干旱日数变化趋势总体呈现“西北部增多、东南部减少”的变化格局, 苏皖北部、湖北西北部、湖南西北部干旱日数明显增多, 而苏皖南部、江西和浙江大部干旱日数明显减少。干旱日数与干旱受灾面积变化趋势较为一致, 相关系数达 0.66, 通过了 99% 信度检验, 表明识别出的区域性干旱过程与干旱受灾面积具有较好的相关关系。

(4) 对长江中下游地区最典型的区域性干旱过程监测评估可知, 干旱综合强度指数与干旱站数存在显著的正相关, 与特旱站数的相关最好, 其次是重旱站数, 均通过了 99% 信度检验, 也即干旱综合强度指数越强, 各等级干旱站数越多, 特别是特旱和重旱站数; 此外, 各地干旱日数的多少与干旱受灾面积的大小较为一致, 干旱日数越多的地区, 干旱受灾面积越大, 表明干旱综合强度指数较好地表征了区域性干旱过程的强度。

本研究的区域性干旱过程识别与评估方法与 OITREE 法 (Ren, et al, 2012; 李韵婕等, 2014; 安莉娟等, 2014; 李忆平等, 2015; 金燕等, 2018) 相比, 总体思路和框架结构是一致的, 但在如下几个方面进行了改进: 一是使用的干旱指数由综合气象干旱指数 (CI) 替换为目前中国气象干旱监测业务中通用的气象干旱综合指数 (MCI), 针对单站逐日干旱监测, 考虑的要素更多、时间尺度更全, 区域性干旱日的识别与实况更加吻合; 二是用于监测评估的气

象站网更加稠密, 相邻站点距离阈值由 250 km 调整为 200 km, 异常带重合率由 0.3 调整为 0.5, 监测评估结果更加精细可靠; 三是根据 Lu 等 (2017) 提出的“极端事件强度与历时、区域的理论关系 (EIDR)”, 调整了综合强度指数计算方法, 由区域性干旱过程的平均强度、影响面积和持续时间三者加权综合改进为指数权重综合, 在实时干旱监测业务中, 计算方便, 可操作性更强。总体来看, 该区域性干旱过程识别方法较好地识别出长江中下游地区 1961—2019 年 126 次区域性干旱过程, 并从持续天数、平均强度、平均影响面积以及干旱综合强度等多角度对干旱过程进行监测评估, 评估结果与历史干旱灾情较为吻合。

干旱是一个非常复杂的科学问题, 与大气、土壤类型、下垫面以及人工措施等多方面因素相关, 其生消机制和致灾机理复杂; 此外, 中国南、北气候差异大, 干旱发生的区域、频率和强度也存在较大差异, 针对区域性干旱过程的识别与评估方法, 其干旱指数的选取、相邻监测站点的判定、异常带重合率阈值的设定、综合强度指数的构建等, 还需在实际业务应用中不断优化完善, 才能对区域性干旱过程做出更加准确客观的研判。

参考文献

- 安莉娟, 任福民, 李韵婕等. 2014. 近 50 年华北区域性气象干旱事件的特征分析. *气象*, 40(9): 1097-1105. An L J, Ren F M, Li Y J, et al. 2014. Study on characteristics of regional drought events over North China during the past 50 years. *Meteor Mon*, 40(9): 1097-1105 (in Chinese)
- 曹博, 张勃, 马彬等. 2018. 基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析. *生态学报*, 38(17): 6258-6267. Cao B, Zhang B, Ma B, et al. 2018. Spatial and temporal characteristics analysis of drought based on SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin. *Acta Ecol Sinica*, 38(17): 6258-6267 (in Chinese)
- 段莹, 王文, 蔡晓军. 2013. PDSI、SPEI 及 CI 指数在 2010/2011 年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析. *高原气象*, 32(4): 1126-1139. Duan Y, Wang W, Cai X J. 2013. Applied analyses on Palmer, SPEI and CI indices of drought process in Yangtze-Huaihe River Basins during winter of 2010/spring of 2011. *Plateau Meteor*, 32(4): 1126-1139 (in Chinese)
- 樊东卫, 何勃亮, 李长华等. 2019. 球面距离计算方法及精度比较. *天文研究与技术*, 16(1): 69-76. Fan D W, He B L, Li C H, et al. 2019. Research on spherical distance computation and accuracy comparison. *Astron Res Technol*, 16(1): 69-76 (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. *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. *Meteor Mon*, 44(9): 1169-1178 (in Chinese)
- 李明, 柴旭荣, 王贵文等. 2019. 长江中下游地区气象干旱特征. *自然资源学报*, 34(2): 374-384. Li M, Chai X R, Wang G W, et al. 2019. Research on meteorological drought in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Nat Resour*, 34(2): 374-384 (in Chinese)
- 李忆平, 王劲松, 李耀辉. 2015. 2009/2010年中国西南区域性大旱的特征分析. *干旱气象*, 33(4): 537-545. Li Y P, Wang J S, Li Y H. 2015. Characteristics of a regional meteorological drought event in Southwestern China during 2009-2010. *J Arid Meteor*, 33(4): 537-545 (in Chinese)
- 李忆平, 李耀辉. 2017. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展. *干旱气象*, 35(5): 709-723. Li Y P, Li Y H. 2017. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China. *J Arid Meteor*, 35(5): 709-723 (in Chinese)
- 李韵婕, 任福民, 李忆平等. 2014. 1960—2010年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析. *气象学报*, 72(2): 266-276. Li Y J, Ren F M, Li Y P, et al. 2014. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960—2010. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 266-276 (in Chinese)
- 廖要明, 张存杰, 邹旭恺等. 2021. 区域性干旱过程监测评估方法: QX/T 597-2021. 北京: 气象出版社. Liao Y M, Zhang C J, Zou X K, et al. 2021. Monitoring and Assessment Method of Regional Drought Process: QX/T 597-2021. Beijing: China Meteorological Press (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. *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. *Meteor Mon*, 43(11): 1402-1409 (in Chinese)
- 刘建刚. 2017. 2011年长江中下游干旱与历史干旱对比分析. *中国防汛抗旱*, 27(4): 46-50. Liu J G. 2017. A comparative analysis of current severe drought in the middle and lower reaches of Yangtze River 2011 with historical drought records. *China Flood Drought Manage*, 27(4): 46-50 (in Chinese)
- 刘诗梦, 张杰, 于涵. 2020. 影响初夏江淮流域年代际极端干旱的欧洲关键区能量演变特征分析. *高原气象*, 39(1): 143-152. Liu S M, Zhang J, Yu H. 2020. Analysis of energy evolution characteristics of key areas in Europe affecting decadal extreme drought in Yangtze-Huaihe River Basin during the pre-summer period. *Plateau Meteor*, 39(1): 143-152 (in Chinese)
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 51(20): 2429-2439. Ma Z G, Fu C B. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. *Chinese Sci Bull*, 51(23): 2913-2925
- 任福民, 龚志强, 王艳姣等. 2015. 中国干旱、强降水、高温和低温区域性极端事件. 北京: 气象出版社. Ren F M, Gong Z Q, Wang Y J, et al. 2015. China's Regional Extreme Events-Droughts, Intense Precipitations, Heatwaves and Low Temperature. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 王林, 陈文. 2014. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析. *高原气象*, 33(2): 423-431. Wang L, Chen W. 2014. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China. *Plateau Meteor*, 33(2): 423-431 (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. *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. *Plateau Meteor*, 39(3): 628-640 (in Chinese)
- 王文, 许志丽, 蔡晓军等. 2016. 基于PDSI的长江中下游地区干旱分布特征. *高原气象*, 35(3): 693-707. Wang W, Xu Z L, Cai X J, et al. 2016. Aridity characteristic in Middle and Lower reaches of Yangtze River Area based on Palmer drought severity index analysis. *Plateau Meteor*, 35(3): 693-707 (in Chinese)
- 王文, 许金萍, 蔡晓军等. 2017. 2013年夏季长江中下游地区高温干旱的大气环流特征及成因分析. *高原气象*, 36(6): 1595-1607. Wang W, Xu J P, Cai X J, et al. 2017. Analysis of atmospheric circulation characteristics and mechanism of heat wave and drought in summer of 2013 over the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Basin. *Plateau Meteor*, 36(6): 1595-1607 (in Chinese)
- 王芝兰, 王劲松, 李耀辉等. 2013. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析. *高原气象*, 32(3): 839-847. Wang Z L, Wang J S, Li Y H, et al. 2013. Comparison of application between generalized extreme value index and standardized precipitation index in Northwest China. *Plateau Meteor*, 32(3): 839-847 (in Chinese)
- 杨光, 黄慧. 2020. 2019年长江中下游地区夏秋冬三季连旱的应对经验与建议. *中国防汛抗旱*, 30(2): 1-4, 7. Yang G, Huang H. 2020. Experiences and suggestions on continuous drought in summer-autumn-winter in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2019. *China Flood Drought Manage*, 30(2): 1-4, 7 (in Chinese)
- 姚玉璧, 张强, 李耀辉等. 2013. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望. *资源科学*, 35(9): 1884-1897. Yao Y B, Zhang Q, Li Y H, et al. 2013. Drought risk assessment technological progresses and problems. *Resour Sci*, 35(9): 1884-1897 (in Chinese)
- 叶笃正, 黄荣辉. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社. Ye D Z, Huang R H. 1996. Study on the Regularity and Causes of Drought and Flood in the Yangtze River and Yellow River Basin. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press (in Chinese)
- 张存杰, 刘海波, 宋艳玲等. 2017. 气象干旱等级: GB/T 20481-2017. 北京: 中国标准出版社. Zhang C J, Liu H B, Song Y L, et al. 2017. Grades of Meteorological Drought: GB/T 20481-2017. Beijing: China Standards Press (in Chinese)
- 张立杰, 李健. 2018. 基于SPEI和SPI指数的西江流域干旱多时间尺度变化特征. *高原气象*, 37(2): 560-567. Zhang L J, Li J. 2018.

- Spatiotemporal change of drought at various time scales indicated by SPEI and SPI in Xijiang river basin. *Plateau Meteor*, 37(2): 560-567 (in Chinese)
- 张强, 韩兰英, 郝小翠等. 2015. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性. *气象学报*, 73(6): 1092-1103. Zhang Q, Han L Y, Hao X C, et al. 2015. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South. *Acta Meteor Sinica*, 73(6): 1092-1103 (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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 78(3): 500-521 (in Chinese)
- 邹旭恺, 张强. 2008. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. *应用气象学报*, 19(6): 679-687. Zou X K, Zhang Q. 2008. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years. *J Appl Meteor Sci*, 19(6): 679-687 (in Chinese)
- Chen H P, Sun J Q. 2017. Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China. *J Hydrol*, 544: 306-318
- Lu E, Zhao W, Zou X K, et al. 2017. Temporal-spatial monitoring of an extreme precipitation event: Determining simultaneously the time period it lasts and the geographic region it affects. *J Climate*, 30(16): 6123-6132
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events. *J Climate*, 25(20): 7015-7027
- Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951-2010. *Int J Climatol*, 34(3): 545-558
- Yu R, Zhai P M. 2020. Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern China. *Wea Climate Extremes*, 30: 100295