

DOI: 10.5846/stxb201707011185

曹博,张勃,马彬,唐敏,王国强,吴乾慧,贾艳青.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,2018,38(17): - .
Cao B, Zhang B, Ma B, Tang M, Wang G Q, Wu Q H, Jia Y Q. Spatial and temporal characteristics analysis of drought based on SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析

曹 博,张 勃*,马 彬,唐 敏,王国强,吴乾慧,贾艳青

西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

摘要:基于长江中下游流域 1961—2015 年 129 个气象站点的逐日气温和降水数据,利用标准化降水蒸散指数(SPEI),对长江中下游流域近 55 年年尺度及各季节干旱变化趋势、站次比、强度和频率进行了分析,并探讨了干旱和区域气温、降水变化及 ENSO 的关系。结果表明:(1)在区域尺度,近 55 年长江中下游流域年尺度、春季和秋季呈干旱化趋势,春季干旱化趋势显著;夏季和冬季呈湿润化趋势。空间变化上,对于年尺度,汉江流域、中游干流区及洞庭湖流域以干旱化趋势为主,鄱阳湖流域、下游干流区和太湖流域以湿润化趋势为主;春季和秋季分别有 96.90%和 92.25%的站点呈干旱化趋势;夏季和冬季分别有 82.95%和 72.87%的站点呈湿润化趋势。(2)年尺度、春季和秋季干旱站次比及强度均呈增加趋势,春旱站次比与强度增加趋势显著;夏季和冬季干旱站次比和强度均呈下降趋势。(3)年尺度和春季干旱频率在 21 世纪初均达到最高,年尺度、春季和夏季干旱频率从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初均呈增加趋势。(4)春、秋季干旱化趋势与降水量的减少及气温的上升相关,夏、冬季降水量的增加使得夏、冬季呈湿润化趋势。冬季 SOI 和次年春季干旱相关性极显著,冬季发生拉尼娜事件时,次年春季更易发生干旱。
关键词:标准化降水蒸散指数;干旱趋势;干旱频率;长江中下游流域

Spatial and temporal characteristics analysis of drought based on SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin

CAO Bo, ZHANG Bo*, MA Bin, TANG Min, WANG Guoqiang, WU Qianhui, JIA Yanqing

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Drought is one of the major meteorological disasters in China. In the context of global warming, the losses caused by drought have increased significantly. As an important grain, edible oil, and cotton production area, the Middle and Lower Yangtze Basin is densely populated and economically developed. Although the area is rich in water resources, the temporal distribution of precipitation is uneven and interannual variation is large, which often induces terrible seasonal drought. Based on daily temperature and precipitation data of 129 stations in the Middle and Lower Yangtze Basin, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was used to analyze the trends, stations proportions, severity, and frequency of annual and seasonal droughts. The relationships between drought and temperature, precipitation, and ENSO (El Niño-Southern Oscillation) were also considered. The regional analysis of SPEI indicated that annual, spring and autumn droughts have become more serious, especially in spring; summer and winter showed a wetter trend. For annual drought, the Han River Basin, Midstream River area, and Dongting Lake Basin were increasingly dry, whereas the Poyang Lake Basin, Downstream River area, and Taihu Lake Basin mainly showed a decreasing trend. For the stations, 96.90% and 92.25% showed a drought trend in the spring and autumn, respectively; 82.95% and 72.87% of stations showed a wetting trend in summer and winter, respectively. The station's proportions and severity of annual, spring, and autumn droughts all

基金项目:国家自然科学基金项目(41561024);高校博士学科点专项科研基金项目(20136203110002)

收稿日期:2017-07-01; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

showed an increasing trend. In spring, these trends are significant, while the proportion and severity of summer and winter droughts all showed a decreasing trend. Annual and spring drought frequency peaked at the beginning of the 21st century. Frequency of annual, spring, and summer droughts increased from the 1990s to the beginning of the 21st century. The drought trends of spring and autumn are related to decreases in precipitation and increases in temperature, with the increase in precipitation contributing to the wet trends in summer and winter. There is significant correlation between the spring drought and SOI (Southern Oscillation Index) of last winter. If a La Nina event occurred in winter, the next spring would be increasingly prone to drought.

Key Words: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI); drought trend; drought frequency; the Middle and Lower Yangtze Basin

干旱是中国主要的气象灾害之一,近年来,在全球变暖的背景下^[1],全国遭受干旱的地区在扩大,干旱造成的损失大幅增加^[2-3],且未来几十年旱情可能呈加重趋势^[4-5]。长江中下游流域人口密集、经济发达,是我国重要的粮、油、棉生产基地,该区虽水资源丰富,但年内降水时间分布不均且年际变化较大,区域内季节性干旱时有发生,造成的影响不容忽视^[6-8],如 2011 年春旱给该区农业、人畜饮水、江河及湖泊水位、渔业生产、水运等带来了严重影响^[9]。而且相关研究表明,“骤发性干旱”在我国南方地区发生频率更高^[4],南方干旱会对生态系统^[8,10-11]产生严重的影响。

干旱指数是研究干旱的重要手段,黄晚华等利用标准化降水指数(SPI)^[12]和降水距平百分率^[13]对中国南方季节性干旱进行了分析,王文等^[6]用 Palmer 指数(PDSI)对长江中下游地区干旱特征进行了研究。SPEI 综合考虑了气温和降水对干旱的影响,弥补了降水距平百分率和 SPI 未考虑气温对干旱影响的缺点,同时与 PDSI 相比,具有计算简单、多时间尺度、多空间比较等优点^[14-16],在我国湿润地区有很好的适用性^[17-18]。马彬等^[19]基于 SPEI 对中国东部季风区的研究表明,气候出现暖干化,局部地区干旱出现极端化。李亮^[20]基于综合气象干旱指数和 SPEI 对长江中下游地区季节性干旱特征进行了分析,但仅仅是基于代表站点。张余庆等^[15]基于 SPEI 分析了赣江流域旱涝演变的周期性特征。赵林等^[21]用 SPEI 分析了湖北省年尺度干旱站次比、强度和频率。以上研究多在大区域或省域尺度开展,流域尺度干旱变化特征的研究对于流域水资源管理和生态平衡具有重要意义^[22],但是基于 SPEI 对长江中下游流域不同时间尺度干旱站次比、强度、频率的综合分析相对较少。考虑到干旱对长江中下游流域自然生态环境及社会经济影响的严重性,本文利用 SPEI 指数,结合干旱站次比、强度及频率,分析长江中下游流域 1961—2015 年年尺度和各季节干旱时空变化特征,并对干旱和流域气温、降水变化及 ENSO 的关系进行了研究,可以进一步丰富人们对该区域干旱发生规律的认识,以为流域水资源规划和防灾减灾提供科学依据。

1 资料来源与研究方法

1.1 研究区概况

长江是中国最长的河流,上游和中游的分界点为湖北宜昌,中游和下游的分界点为江西湖口。长江中下游流域由中游干流区(主要分布于湖北省)、汉江流域(主要分布于陕西省、河南省及湖北省)、洞庭湖流域(主要分布于贵州省、湖南省和湖北省)、鄱阳湖流域(主要分布于江西省)、长江下游干流区(主要分布于安徽省和江苏省)及太湖流域(主要分布于江苏省、上海市及浙江省)组成^[23](图 1)。长江中下游流域多为海拔较低的丘陵和平原,以亚热带季风气候为主,东亚季风活动明显^[7]。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),选用长江中下游流域 1961—2015 年资料序列较长的 129 个气象站点的逐日降水和气温数据,经过进一步计算得到月降水量和月平均气温。该数据经过了严格的质量控制,其中有 6 个站点存在数据缺测,缺测时间主要为 1967 和 1968 年的部分

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^m |\text{SPEI}_i|$$

式中, j 表示年份, i 表示不同站号, m 为发生干旱的站数, $|\text{SPEI}_i|$ 表示 j 年 i 站发生干旱时 SPEI 的绝对值。

1.3.4 干旱频率(drought frequency, F_i)

用于评价某站在某时段干旱发生的频繁程度^[12]。

$$F_i = (n/N) \times 100\%$$

式中, 下标 i 为不同站号, N 为某站有气象资料的总年数; n 为该站发生干旱的年数。

由于长江中下游流域水资源较为丰富, 轻旱造成的影响相对较小, 本文中的干旱站次比、强度和频率均按中旱(含中旱及以上)等级统计。采用线性倾向估计法分析 SPEI 及干旱站次比与强度的年际变化趋势^[27], 显著性检验为 F 检验。采用反距离加权插值法对 SPEI 变化趋势和干旱频率进行空间化处理。用偏相关分析法研究 SPEI 和气温、降水的关系^[28], 用相关分析对干旱和 ENSO 各表征因子的关系进行研究^[28]。

2 结果分析

2.1 干旱时间变化特征

2.1.1 SPEI 变化趋势

由表 1 可知, 1961—2015 年长江中下游流域年尺度 SPEI 呈下降趋势, 倾向率为 $-0.020/10a$ 。春季和秋季 SPEI 也均呈下降趋势, 即干旱化趋势, 倾向率分别为 $-0.121/10a$ 和 $-0.093/10a$, 春季干旱化趋势显著 ($P < 0.05$)。夏季和冬季 SPEI 呈上升趋势, 即湿润化趋势, 倾向率分别为 $0.077/10a$ 和 $0.049/10a$ 。

表 1 1961—2015 年长江中下游流域 SPEI 年际变化趋势

Table 1 Interannual variation of SPEI in the Middle and Lower Yangtze Basin from 1961 to 2015

变化趋势 Trend	年尺度 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
倾向率 Tendency rate	$-0.020/10a$	$-0.121/10a^*$	$0.077/10a$	$-0.093/10a$	$0.049/10a$
R^2	0.003	0.102	0.062	0.062	0.012

* 表示通过 0.05 水平的置信度检验

2.1.2 干旱站次比和干旱强度

为了进一步说明干旱变化趋势, 本文对 1961—2015 年长江中下游流域干旱站次比和强度进行了分析。由图 2a 和图 2b 可知, 年尺度干旱站次比和强度均呈增加趋势, 倾向率分别为 $1.065\%/10a$ 和 $2.15/10a$, 表明年尺度干旱呈加重趋势。年干旱站次比在 50% 以上的年份有 1966、1978 和 2011, 1978 年最高, 达 68.22%。年干旱强度最大的年份为 1978 年, 达 150.64, 其次为 2011(118.77) 和 1966(100.74)。

由图 2c 和图 2d 可知, 春旱站次比为极显著 ($P < 0.01$) 的增加趋势, 倾向率为 $3.969\%/10a$, 春旱强度为显著 ($P < 0.05$) 的增加趋势, 倾向率为 $8.785/10a$ 。春旱站次比在 50% 以上的年份有 2000、2001、2007 和 2011 年, 2011 年最高, 达 87.60%。春旱强度最大的年份为 2011 年, 达 235.61, 其次为 2007(125.04) 和 2001(105.29)。

由图 2e 和 2f 可知, 夏旱站次比和强度均呈现减小趋势, 倾向率分别为 $-2.145\%/10a$ 和 $-4.479/10a$, 表明夏旱呈减弱趋势。夏旱站次比在 50% 以上的年份为 1978 年, 达 61.24%。夏旱强度最大的年份为 1978 年, 达 137.12, 其次为 1972(104.21) 和 2013(90.57)。

由图 2g 和 2h 可知, 秋旱站次比和强度均呈增加趋势, 倾向率分别为 $2.934\%/10a$ 和 $6.004/10$, 表明秋旱呈加重趋势。秋旱站次比在 50% 以上的年份有 1979、1998 和 2007, 1998 和 2007 年均达到 63.57%。秋旱强度最大的年份为 1998 年, 达 149.64, 其次为 2007(121.76) 和 1979(104.37)。

由图 2i 和 2j 可知, 冬旱站次比和强度均呈下降趋势, 倾向率分别为 $-1.365\%/10a$ 和 $-1.939/10a$, 表明冬旱呈减轻趋势。冬旱站次比在 50% 以上的年份有 1962、1967 和 1998, 1998 年最大, 达 91.47%。冬旱强度最大的年份为 1998 年, 达 230.54, 其次为 1962(158.71) 和 1967(111.47)。年和各季节干旱站次比和强度的变

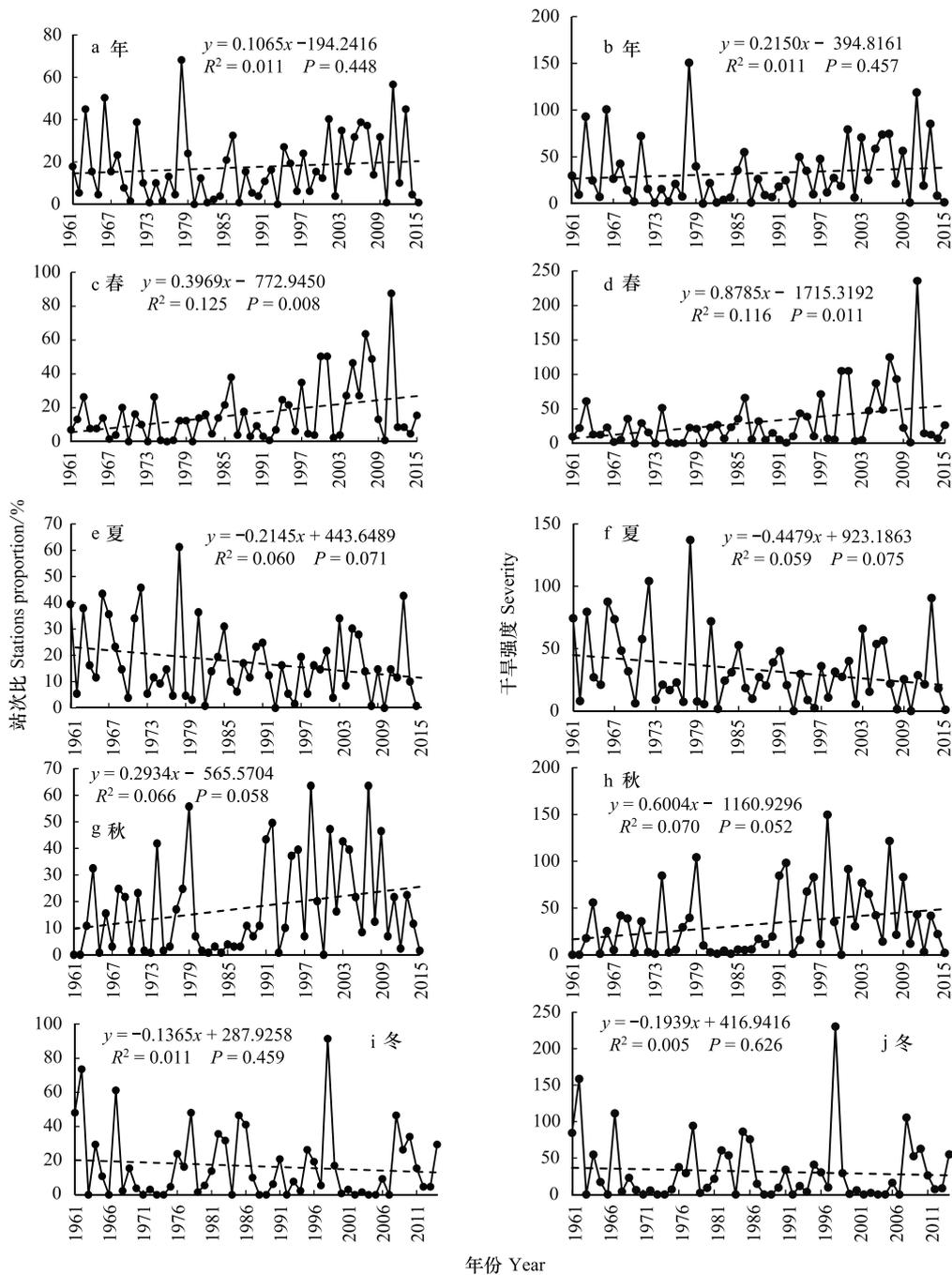


图 2 1961—2015 年长江中下游流域干旱站次比及干旱强度

Fig.2 Stations proportion and severity of drought from 1961 to 2015 in the Middle and Lower Yangtze Basin

化趋势与干湿变化趋势相对应,由于干旱站次比与强度确定的重旱年与相关文献的记录相吻合^[3,7,20]。

2.2 干旱空间变化特征

2.2.1 SPEI 变化趋势

图 3 是 1961—2015 年长江中下游流域年尺度及各季节 SPEI 变化趋势的空间分布图。1961—2015 年,长江中下游流域年尺度 SPEI 呈上升、不变和下降趋势的站点分别占总站点数的 44.96%、1.55%和 53.49%。区域西部的洞庭湖流域、中游干流区及汉江流域 SPEI 主要为下降趋势,倾向率集中在-0.1/10a—0 之间;东部的鄱阳湖流域、下游干流区及太湖流域 SPEI 主要为上升趋势,倾向率集中在 0—0.1/10a 之间。

96.90%的站点春季 SPEI 呈下降趋势,表明春季长江中下游流域整体以干旱化趋势为主,SPEI 下降幅度

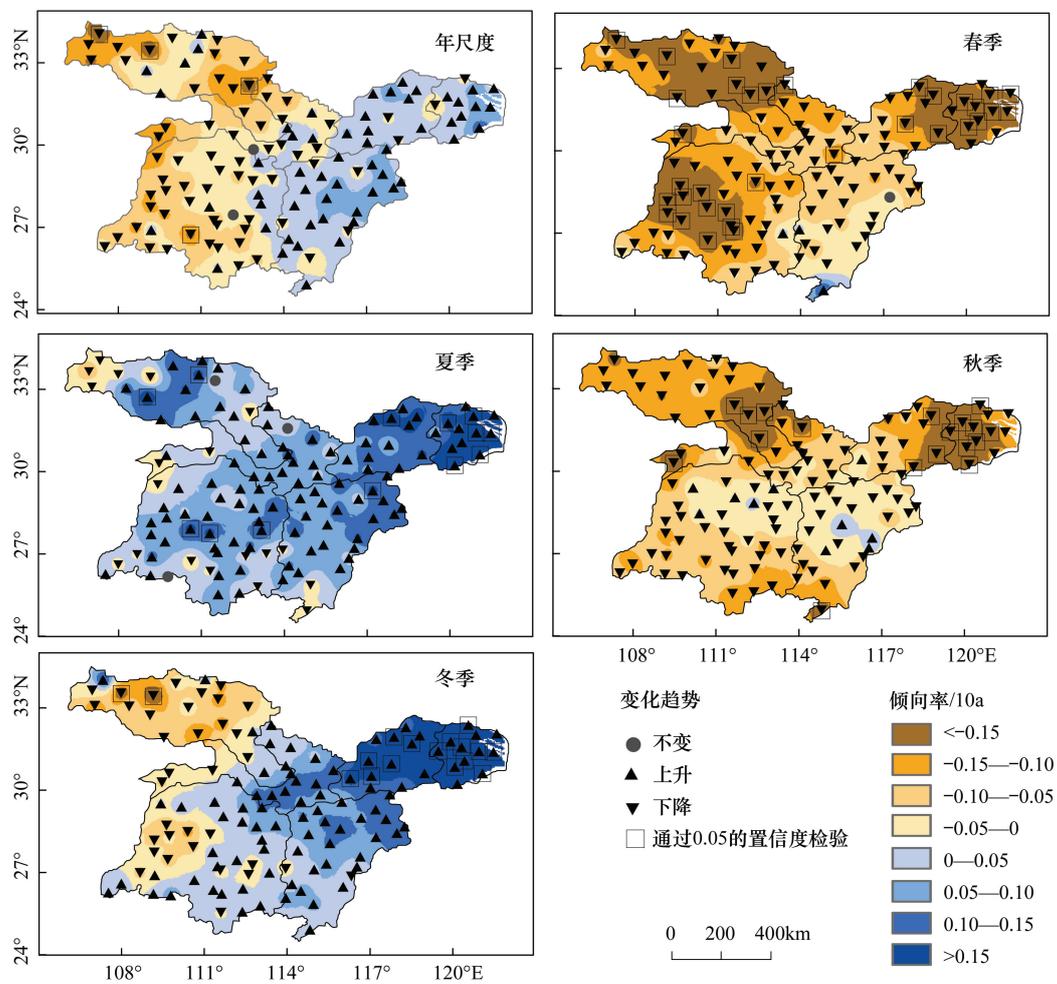


图3 1961—2015年长江中下游流域SPEI变化趋势空间分布

Fig.3 Spatial variation of SPEI from 1961—2015 in the Middle and Lower Yangtze Basin

空间差异明显,在鄱阳湖流域东南部较小,向外围逐渐增加。26.36%的站点春季SPEI呈显著($P < 0.05$)下降趋势,主要位于太湖流域、下游干流区东部、洞庭湖流域中西部及汉江流域,SPEI变化倾向率多小于 $-0.15/10a$ 。

82.95%的站点夏季SPEI呈上升趋势,表明夏季以湿润化趋势为主。SPEI上升幅度空间差异明显,上升幅度最高的区域在太湖流域,在 $0.15/10a$ 以上,其次为下游干流区、鄱阳湖流域东部及汉江流域中部,在 $0.1/10a$ — $0.15/10a$ 之间。10.08%的站点夏季SPEI显著($P < 0.05$)上升,在太湖流域分布集中。

92.25%的站点秋季SPEI呈下降趋势,表明秋季以干旱化趋势为主。SPEI下降幅度在鄱阳湖流域中部和北部及洞庭湖流域北部较低,向南北两侧逐渐升高,在汉江流域东部、下游干流区东部及太湖流域下降幅度较大,低于 $-0.15/10a$ 。13.95%的站点秋季SPEI呈显著($P < 0.05$)下降趋势,主要分布于太湖流域、下游干流区东部及汉江流域东部。

分别有72.87%和27.13%的站点冬季SPEI呈上升和下降趋势,表明以湿润化趋势为主。呈下降趋势的站点集中分布于洞庭湖流域中西部及汉江流域,其它区域以上升趋势为主。11.63%的站点SPEI上升趋势显著,主要分布于太湖流域和下游干流区,上升幅度多大于 $0.15/10a$ 。值得注意的是,太湖流域大部分站点在春季和秋季呈显著($P < 0.05$)的干旱化趋势,而在夏季和冬季呈显著($P < 0.05$)的湿润化趋势。洞庭湖流域中西部和汉江流域在春、秋、冬和年尺度均以干旱化趋势为主。

2.2.2 干旱频率变化特征

以 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2015 年划分时间段,分别代表 20 世纪 60 年代(1960s)、70 年代(1970s)、80 年代(1980s)、90 年代(1990s) 和 21 世纪初^[2,21]。1961—2015 年和各时间段干旱频率如图 4 所示。

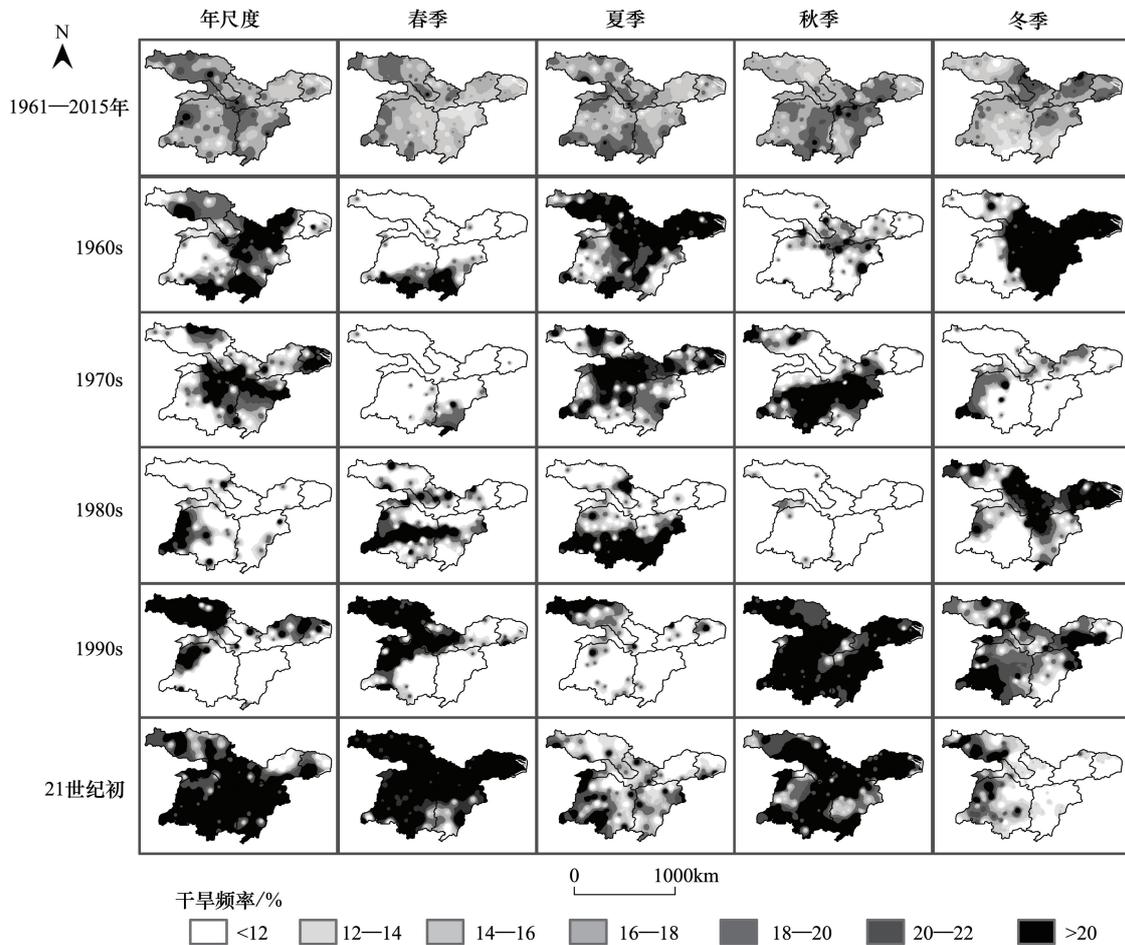


图 4 1961—2015 年长江中下游流域干旱频率空间变化

Fig.4 Spatial variation of drought frequency from 1961 to 2015 in the Middle and Lower Yangtze Basin

1961—2015 年,长江中下游流域年尺度、春、夏、秋、冬干旱频率分别为 17.56%、16.27%、17.24%、17.56% 和 16.53%,年尺度干旱和秋旱频率较高,其次为夏旱。年尺度干旱频率在 18% 以上的区域主要在汉江流域、洞庭湖流域西部和东部、鄱阳湖流域西部和东部、中游干流区中部。春旱频率在 18% 以上的区域主要为汉江流域中部和洞庭湖流域西部。夏旱频率在 18% 以上的区域主要分布在汉江流域、中游干流区、洞庭湖流域南部和鄱阳湖流域南部。秋旱频率在 18% 以上的区域主要为洞庭湖流域西北和东部、鄱阳湖流域中北部和下游干流区。冬旱发生频率在 18% 以上的区域主要为汉江流域东部、中游干流区东部、鄱阳湖流域西北部、下游干流区及太湖流域南部。

不同年代干旱频率差异显著。年尺度干旱频率年代际变化为减-减-增-增,在 21 世纪初达到最高,区域平均干旱频率为 24.40%。春旱频率年代际变化为减-增-增-增,在 21 世纪初达到最高,区域平均干旱频率为 27.05%。夏旱频率在 1960s 最高,年代际变化为减-减-减-增,在 1990s 达到最低,21 世纪初有所增加。秋旱频率年代际变化为增-减-增-减,在 1990s 达到最高,为 27.11%,在 21 世纪初下降为 24.22%。冬旱频率在 1960s 最高,年代际变化为减-增-增-减。年尺度、春季和夏季干旱频率从 1990s 到 21 世纪初均表现为增加趋势,秋旱频率虽未增加,但仍高于 1960s、1970s 和 1980s。

2.3 干旱变化影响因素分析

2.3.1 SPEI 和气温、降水的关系

由于各季节 SPEI 变化趋势具有较好的空间一致性,从区域角度对各季节 SPEI 变化和气温、降水的关系进行分析。由表 2 可知,1961—2015 年长江中下游流域各季节气温均呈增加趋势,除了夏季,均通过了 0.01 的置信度检验,春季气温上升最快,为 0.27℃/10a。夏季和冬季降水量均呈增加趋势,倾向率分别为 16.26mm/10a 和 5.40mm/10a,夏季降水增加显著 ($P<0.05$);春季和秋季降水量呈减少趋势,倾向率分别为 -7.62mm/10a、-5.08mm/10a。整体上 SPEI 和气温呈极显著 ($P<0.01$) 的负相关,和降水呈极显著 ($P<0.01$) 的正相关。春季和秋季降水量的减少和气温的上升共同导致春、秋季呈干旱化趋势;夏季气温变化不明显、但降水量显著增加,使夏季呈湿润化趋势;冬季气温和降水均呈增加趋势,但冬季气温对 SPEI 的影响较小,相关性仅为 -0.60,所以冬季呈湿润化趋势。

表 2 1961—2015 年长江中下游流域气温、降水变化及其与 SPEI 的偏相关性
Table 2 Variation of temperature and precipitation and their Partial correlation with SPEI

季节 Season	气温变化倾向率 Linear trend of temperature/(℃/10a)	气温与 SPEI 关系 Partial correlation between temperature and SPEI	降水变化倾向率 Linear trend of precipitation/(mm/10a)	降水与 SPEI 关系 Partial correlation between precipitation and SPEI
春季 Spring	0.27 **	-0.77 **	-7.62	0.98 **
夏季 Summer	0.04	-0.74 **	16.26 *	0.97 **
秋季 Autumn	0.20 **	-0.89 **	-5.08	0.99 **
冬季 Winter	0.25 **	-0.60 **	5.40	0.97 **

*, ** 分别表示通过 0.05 和 0.01 水平的置信度检验

2.3.2 干旱和 ENSO 的关系

厄尔尼诺/南方涛动 (ENSO) 与中国各地的干旱有密切的联系^[29],其特征值常用赤道太平洋中东部海洋表面温度距平值 (SSTA)、南方涛动指数 (SOI) 和多变量 ENSO 指数 (MEI) 表示。当发生厄尔尼诺事件 (ENSO 暖事件) 时, SSTA 和 MEI 为正值, SOI 为负值; 发生拉尼娜事件 (ENSO 冷事件) 时, SSTA 和 MEI 为负值, SOI 为正值^[30]。

对干旱和 ENSO 各特征值的相关性进行统计 (表 3), 表明冬季 ENSO 对次年春旱影响显著, 相对于 MEI 和 SSTA, 冬季 SOI 和次年春季 SPEI、干旱站次比及强度相关性更高, 相关性极显著 ($P<0.01$)。冬季 SOI 和次年春季 SPEI 呈负相关, 与干旱站次比和强度呈正相关, 表明冬季 SOI 值越大, 越易发生干旱, 即拉尼娜事件在冬季发生时, 次年春季更易发生干旱。1961—2015 年, 共有 14 年冬季发生拉尼娜事件^[31], 次年春季平均干旱频率、强度和站次比分别为 24.35%、51.54 和 24.36%; 而冬季未发生拉尼娜事件时, 次年春季平均干旱频率、强度和站次比分别为 13.37%、24.50 和 13.50%, 由此进一步说明拉尼娜事件在冬季发生时对次年春旱的影响。春季 MEI 及 SSTA 与同年夏季 SPEI 相关性显著 ($P<0.05$), 但是和干旱站次比及强度并不存在显著的关系。

3 结论与讨论

3.1 主要结论

(1) 区域尺度上, 1961—2015 年, 长江中下游流域年尺度、春季和秋季均呈干旱化趋势, 春季干旱化趋势显著; 夏季和冬季均呈湿润化趋势。年尺度、春季和秋季干旱站次比及强度均呈增加趋势, 春旱站次比与强度增加趋势显著; 夏季和冬季干旱站次比和强度均呈下降趋势。

(2) 空间变化上, 对于年尺度, 汉江流域、中游干流区及洞庭湖流域以干旱化趋势为主; 鄱阳湖流域、下游干流区和太湖流域以湿润化趋势为主。对于季节尺度, 春季和秋季分别有 96.90% 和 92.25% 的站点呈干旱化趋势; 夏季和冬季分别有 82.95% 和 72.87% 的站点呈湿润化趋势。

表 3 干旱和 ENSO 的关系

Table 3 Correlation between drought and ENSO

SPEI 和干旱特征 SPEI and drought characteristics	时间尺度 Time scale	MEI	前期 MEI MEI of last year/season	SOI	前期 SOI SOI of last year/season	SSTA	前期 SSTA SSTA of last year/season
SPEI	年尺度	0.20	0.13	-0.16	-0.05	0.14	0.10
	春季	0.25	0.36 **	-0.22	-0.39 **	0.18	0.35 **
	夏季	0.18	0.27 *	-0.10	-0.17	0.08	0.28 *
	秋季	0.18	0.15	-0.07	-0.22	0.15	0.09
	冬季	0.26	0.23	-0.25	-0.17	0.25	0.27 *
干旱站次比 drought stations proportion	年尺度	-0.18	-0.06	0.14	0	-0.11	0
	春季	-0.25	-0.3 *	0.24	0.37 **	-0.17	-0.25
	夏季	-0.14	-0.21	0.09	0.09	-0.05	-0.23
	秋季	-0.14	-0.08	0.06	0.22	-0.11	-0.03
干旱强度 drought severity	年尺度	-0.17	-0.05	0.13	-0.01	-0.1	0.01
	春季	-0.26	-0.32 *	0.28 *	0.4 **	-0.17	-0.26
	夏季	-0.11	-0.19	0.08	0.07	-0.02	-0.2
	秋季	-0.15	-0.06	0.08	0.23	-0.12	-0.03
	冬季	-0.15	-0.16	0.12	0.12	-0.16	-0.19

*, ** 分别表示通过 0.05 和 0.01 水平的置信度检验。对于年尺度,前期指上一年;对于季节尺度,前期指上一个季节。SPEI: 标准化降水蒸散指数, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; MEI: 多变量 ENSO 指数, Multivariate ENSO Index; SOI: 南方涛动指数, Southern Oscillation Index; SSTA: 海洋表面温度距平, Sea Surface Temperature Anomaly

(3) 干旱频率时空分布差异显著,年尺度和春季干旱频率在 21 世纪初均达到最高;年尺度、春季和夏季干旱频率从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初均呈增加趋势。

(4) 春、秋季干旱化趋势与降水量的减少及气温的上升相关,夏、冬季降水量的增加使得夏、冬季呈湿润化趋势。相对于 MEI 和 SSTA,冬季 SOI 和次年春旱相关性更强,相关性极显著,冬季发生拉尼娜事件时,次年春季更易发生干旱。

3.2 讨论

本文综合分析 SPEI、干旱站次比和强度的变化特征,表明长江中下游流域年尺度、春季和秋季干旱加重;夏季和冬季干旱减弱。黄晚华等^[12]基于 SPI 对中国南方干旱的研究以及王文举等^[32]基于 SPEI 对湖北省的研究同样发现,春旱和秋旱加重,夏旱和冬旱减轻。不同学者分别对中国^[2]和中国东部季风区^[19]的研究发现,近 20 年干旱事件增加;有学者^[21,32]对湖北省的研究表明,2000 年以后干旱加重;本研究发现,相对于之前的年代,长江中下游流域年尺度和春季干旱频率在 21 世纪初均达到最高,在干旱频率较高和干旱化趋势显著的区域应注重旱灾的防御。本文分析的气象干旱是其它类型干旱研究及干旱风险评估和区划的基础,干旱变化趋势对于农业、生态、社会经济等的影响仍值得探讨^[8,33-35]。

气温在干旱变化中起着重要的作用^[2,16],Huopo Chen 等^[5]发现,近 20 年中国干旱事件持续而显著的增加主要和气温大幅升高、降水却没有较大变化有关。本研究表明,长江中下游流域春、秋季干旱化趋势受气温上升和降水减少共同影响。当冬季发生拉尼娜事件时,次年春季更易发生干旱,这是由于拉尼娜事件会使西太平洋副热带高压势力减弱,暖湿气流无法深入长江中下游流域,从而造成干旱^[9,36]。本文从气温、降水及 ENSO 的角度对干旱变化的影响因素进行了初步分析,具体的机理有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2013.

- [2] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, Svoboda M, Heim R R. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index; 1951—2010? *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 545-558.
- [3] 温克刚, 丁一汇. 中国气象灾害大典(综合卷). 北京: 气象出版社, 2008.
- [4] Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, Wu P L, Li Y H. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30571.
- [5] Chen H P, Sun J Q. Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 306-318.
- [6] 王文, 许志丽, 蔡晓军, 高晶. 基于 PDSI 的长江中下游地区干旱分布特征. *高原气象*, 2016, 35(3): 693-707.
- [7] 秦鹏程, 刘敏. 气象干旱诊断评估方法及其在长江中下游地区的应用. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1969-1976.
- [8] 於琍. 干旱对生态系统脆弱性的影响研究——以长江中下游地区为例. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 1063-1070.
- [9] 王素萍, 段海霞, 冯建英. 2011 年春季全国干旱状况及其影响与成因. *干旱气象*, 2011, 29(2): 261-268.
- [10] Yuan W P, Cai W W, Chen Y, Liu S G, Dong W J, Zhang H C, Yu G R, Chen Z Q, He H L, Guo W D, Liu D, Liu S M, Xiang W H, Xie Z H, Zhao Z H, Zhou G M. Severe summer heatwave and drought strongly reduced carbon uptake in Southern China. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18813.
- [11] 张鹏霞, 叶清, 欧阳芳, 彭龙慧, 刘兴平, 郭跃华, 曾菊平. 气候变暖、干旱加重江西省森林病虫害. *生态学报*, 2017, 37(2): 639-649.
- [12] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 张晓煜, 王明田, 代姝玮, 马洁华. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 50-59.
- [13] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 代姝玮, 李茂松. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应. III. 基于降水量距平百分率的南方地区季节性干旱时空特征. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 397-406.
- [14] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 熊光洁, 李邦东, 董文成, 王利盈. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用. *气候与环境研究*, 2013, 18(5): 617-625.
- [15] 张余庆, 项瑛, 陈昌春, 危润初. 赣江流域旱涝时空变化特征研究. *气象科学*, 2015, 35(3): 346-352.
- [16] Liu Z P, Wang Y Q, Shao M A, Jia X X, Li X L. Spatiotemporal analysis of multiscale drought characteristics across the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 281-299.
- [17] 王林, 陈文. 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*, 2014, 33(2): 423-431.
- [18] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 马柱国. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(3): 337-353.
- [19] 马彬, 张勃, 周丹, 张耀宗, 王国强, 唐敏. 基于标准化降水蒸散指数的中国东部季风区干旱特征分析. *自然资源学报*, 2016, 31(7): 1185-1197.
- [20] 李亮. CI 指数及 SPEI 指数在长江中下游地区的适用性分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [21] 赵林, 于家焯, 薄岩, 杨娇, 李汉青. 基于 SPEI 的湖北省近 52 年干旱时空格局变化. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1230-1237.
- [22] Li B, Su H B, Chen F, Wu J J, Qi J W. The changing characteristics of drought in china from 1982 to 2005. *Natural Hazards*, 2013, 68(2): 723-743.
- [23] 王琼, 张明军, 王圣杰, 骆书飞, 汪宝龙, 朱小凡. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析. *地理学报*, 2013, 68(5): 611-625.
- [24] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析. *大气科学*, 2015, 39(1): 23-36.
- [25] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [26] 周丹, 张勃, 任培贵, 张春玲, 杨尚武, 季定民. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007: 37-38.
- [28] 徐建华. 计量地理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 47-57.
- [29] 卢爱刚, 葛剑平, 庞德谦, 何元庆, 庞洪喜. 40a 来中国旱灾对 ENSO 事件的区域差异响应研究. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 535-542.
- [30] 许武成, 王文, 马劲松, 徐邓耀. 1951—2007 年的 ENSO 事件及其特征值. *自然灾害学报*, 2009, 18(4): 18-24.
- [31] 中国气象局. QX/T 370—2017 厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法. 北京: 气象出版社, 2017.
- [32] 王文举, 崔鹏, 刘敏, 沈蕾, 李鑫, 秦鹏程. 近 50 年湖北省多时间尺度干旱演变特征. *中国农学通报*, 2012, 28(29): 279-284.
- [33] 李翔翔, 居辉, 刘勤, 李迎春, 秦晓晨. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析. *生态学报*, 2017, 37(6): 2054-2066.
- [34] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究. *生态学报*, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [35] Potop V, Možný M, Soukup J. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 121-133.
- [36] 万日金, 赵兵科, 侯依玲. 江南春雨的年际变率及其影响因子分析. *高原气象*, 2008, 27(增刊): 118-123.