

1960-2016年中国北方地区极端干湿事件演变特征

贾艳青¹, 张 勃²

(1. 忻州师范学院地理系, 忻州 034000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 基于中国北方地区 424 个气象站点 1960-2016 年的日气象数据, 应用 FAO Penman-Monteith 模型计算潜在蒸散 (ET_0), 基于降水量和潜在蒸散计算湿润指数, 对湿润指数进行标准化后统计极端干湿事件频率, 分析极端干湿事件频率的空间变化趋势、多时间尺度演变特征以及 ENSO 事件对极端干湿事件变化趋势的影响。结果表明: 北方极端干旱和极端湿润事件频率分别呈显著下降和显著上升趋势, 年际倾向率分别为 -0.10 次/10 年和 0.13 次/10 年。空间上, 极端干旱频率整体呈减少趋势, 包括青藏高原、西北和东北地区。西北极端干旱频率减少速率较大, 青藏高原中部、新疆北部和东北北部部分站点极端湿润频率增加幅度较大。各年代中, 华北极端干旱多发, 东北和青藏高原极端湿润多发。季节上, 分区极端干旱发生概率均大于极端湿润发生概率, 华北极端干旱发生概率最高, 青藏高原极端湿润发生概率最高。ENSO 与湿润指数存在滞后性的关系。El Niño 翌年, 气候偏湿润的年份较多; La Niña 翌年, 气候偏干旱的年份较多。SSTA 与翌年湿润指数在年际和夏季两个时间尺度上存在显著的正相关关系。

关键词: 北方地区; 极端干湿; 湿润指数; 潜在蒸散; ENSO

近几十年来, 中国北方气候环境发生了重大变化, 主要表现为气温持续升高、降水量季节分配不均加之区域差异明显^[1-3], 引起极端干旱灾害频发, 导致水资源匮乏、生态环境退化等一系列问题^[4-5]。由于北方极端干旱的频发性和严重危害性, 其研究成为气候变化的热点问题。研究表明, 近 50 年来北方地区存在明显的干旱化趋势且区域差异明显^[6], 华北干旱化趋势明显, 而青藏高原、西北和东北部分地区均有明显变湿的倾向^[7-12]。近期有研究指出, 增温背景下, 北方地区干旱和洪涝可能会同时增多^[5]。由于北方洪涝较少发生, 针对该区极端湿润及洪涝灾害的研究较少。而在气候干湿演变过程中, 旱涝事件的发生深刻影响水资源的可持续利用和工农业的进一步发展。目前, 气候干湿研究主要集中在区域大尺度和小流域干湿气候界线及地表干湿变化特征方面, 得出干湿气候带界线的移动规律和北方干旱演变的特点^[6,13-15], 缺乏对农业生态环境影响严重的旱涝和极端干湿事件的区域分异和时空演变的深入研究。然而, 深入了解北方极端干湿时空变化规律, 对可能的水旱灾害做出预测, 对该区的社会经济发展具有十分重要的意义。本文利用长时间序列的资料分析北方地区近 57 年极端干湿事件的时空变化特征, 探讨极端干湿变化的成因, 以期发现和总结北方极端干湿演变规律, 为进一步了解北方干湿气候变化提供理论依据。

收稿日期: 2018-12-29; 修订日期: 2019-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561024)

作者简介: 贾艳青 (1980-), 女, 山西忻州人, 博士, 副教授, 研究方向为气候变化与地表过程。

E-mail: jiayq5170@163.com

通讯作者: 张勃 (1963-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域环境与资源开发。

E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

干湿变化的成因是多方面的,普遍认为气候要素的变化影响了气候干湿变化。就干湿变化的机理而言,大气环流异常是导致干湿变化的直接原因,而热带海洋海表温度的持续变化,是大气环流异常的重要强迫源^[16]。厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)是热带太平洋区海气系统年际气候变率的最强信号,通过牵动大气环流并对全球的气候异常产生重要的影响^[17-19]。有研究也证实了赤道中东太平洋大尺度海表温度异常对区域气候及干湿变化的重要影响^[16,20]。本文分析 ENSO 及热带太平洋海表温度变化对中国北方极端气候干湿的影响,为深入认识北方极端气候干湿的区域分异及成因提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

研究区域为中国1月份0℃等温线以北的地区,包括华北、东北、西北、青藏高原、内蒙古地区,介于26°00′~53°33′N、73°40′~135°2′E之间。根据研究区气候特点将中国北方划分为4个分区:Ⅰ区为东北地区,Ⅱ区为华北地区,Ⅲ区为蒙新地区,Ⅳ区为青藏高原(图1)。北方424个气象站点1960-2016年的逐日降水量、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速及日照时数数据源自中国气象局气象数据中心。实际观测中,部分气象站由于迁址、仪器更换、观测场周边环境变化等原因造成气候资料时间序列的非均一性问题,研究中参考20个省(市、自治区)气象站简史资料,使用RHtest方法对马鬃山、五台山、海阳等28个台站的观测数据进行了均一化检验。ENSO数据来源于美国大气海洋局气候预测中心(CPC),ENSO事件采用赤道中、东太平洋El Niño 3.4区(120°~160°W, 5°N~5°S)的海温距平SSTA数据进行表征,数据源自NOAA网站(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>)。

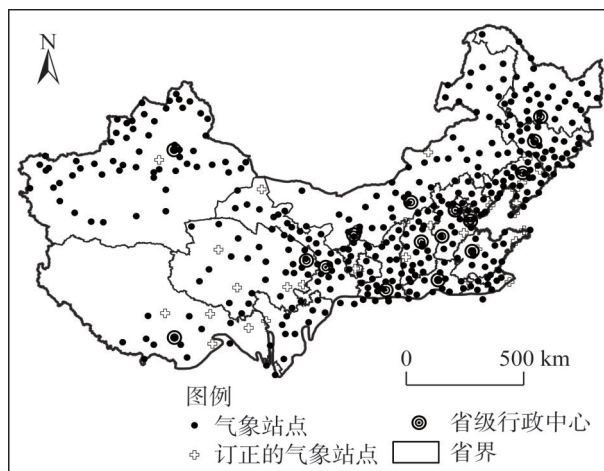


图1 北方地区气象站点分布

Fig. 1 Location of meteorological stations in the Northern China

1.2 研究方法

1.2.1 湿润指数

评价气候极端干湿状况的基础指标为湿润指数,计算方法为降水量与潜在蒸散之比:

$$H = \frac{P}{ET_0} \quad (1)$$

式中: H 为月湿润指数; P 为月降水量; ET_0 为月潜在蒸散。

根据月湿润指数(H)标准化变量的大小定义极端干湿事件。分别定义如下:当 H 的标准化变量 ≤ -0.5 时为极端干旱月,当 H 的标准化变量 ≥ 0.5 时为极端湿润月^[3]。采用以下公式计算月湿润指数标准化变量:

$$D_{H_{ij}} = \frac{H_{ij} - \overline{H}_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

式中: $D_{H_{ij}}$ 为第 j 年第 i 月湿润指数的标准化变量; H_{ij} 为第 j 年第 i 月湿润指数; \overline{H}_i 为 i 月多年平均值; σ_i 为 i 月湿润指数的标准差。

1.2.2 潜在蒸散

湿润指数计算的关键是 ET_0 , 采用FAO推荐使用的Penman-Monteith模型计算北方424个站点的潜在蒸散。公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中: ET_0 为日潜在蒸散 (mm); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); U_2 为2 m高处风速 (m/s); e_a 为空气饱和水汽压 (kPa); e_d 为空气实际水汽压 (kPa); T 为日平均气温 ($^\circ\text{C}$); γ 为干湿常数 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为太阳净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量密度 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。Yin等^[21]修正了该模型中计算太阳净辐射 R_n 的经验参数, 使其更好地适应中国气候特点。修正后的计算公式为:

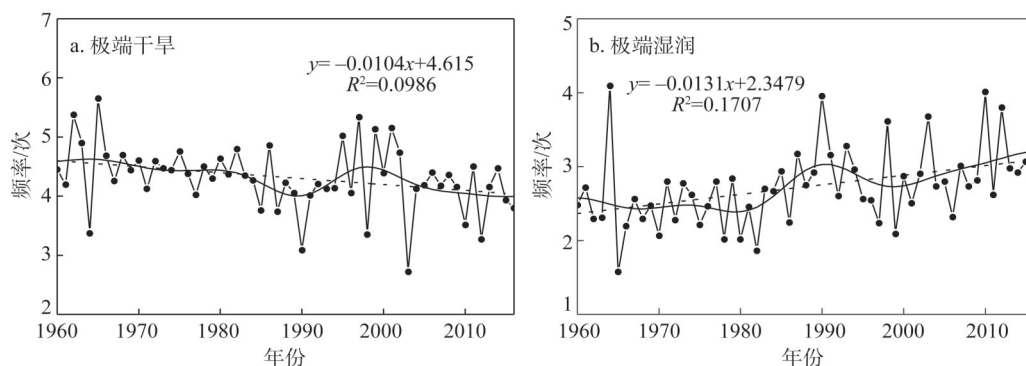
$$R_n = 0.77 \times \left(0.2 + 0.79 \left(\frac{n}{N} \right) \right) R_{so} - \sigma \left(\frac{T_{\max, k}^4 + T_{\min, k}^4}{2} \right) \times (0.56 - 0.25 \sqrt{e_a}) \left(0.1 + 0.9 \left(\frac{n}{N} \right) \right) \quad (4)$$

式中: σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $T_{\max, k}$ 为日最高气温绝对温标 (K); $T_{\min, k}$ 为日最低气温绝对温标 (K); n 为实际日照时数 (h); N 为可照时数 (h); R_{so} 为晴天太阳总辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

2 结果分析

2.1 北方极端干湿事件变化的总体趋势

1960-2016年, 北方极端干旱事件频率呈现明显的下降趋势 (图2a), 其年际倾向率为 -0.10 次/10年, 通过0.05的显著性检验。年平均极端干旱事件频率为4.32次, 其中, 极端干旱事件频率大于平均值的年份有29年, 1965年出现极大值 (5.65次), 2003年出现极小值 (2.72次)。北方极端湿润事件频率以0.13次/10年的速率呈明显的上升趋势



注: 折线表示极端干旱(湿润)事件频率变化; 虚线表示多年趋势; 粗实线表示7年低通滤波。

图2 1960-2016年北方地区极端干湿事件频率变化趋势

Fig. 2 The trends of extreme drought/wet events frequency in Northern China from 1960 to 2016

(图2b),通过0.01的显著性检验。年平均极端湿润事件频率为2.72次,极端湿润事件频率大于平均值的年份有27年,极大值出现在1964年(4.09次),极小值出现在1965年(1.58次)。

2.2 极端干湿事件变化的区域差异

2.2.1 年代际差异

图3为各年代和近57年极端干湿事件频率空间分布。1980s以前(图3a、图3b),极端干旱的高发区主要分布在青藏高原、北疆和东北部分地区。1980s和1990s极端干旱高发区的范围缩小(图3c、图3d),主要集中在华北。2001-2016年(图3e)极端干旱高发区的范围扩大至华北、东北和内蒙古地区。近57年,极端干旱的高发区主要分布在华北和西北东部(图3f)。分析发现,极端湿润发生的高频区逐步向青藏高原和东北转移,1960s极端湿润的高频区在华北和东北东部(图3g),1970s的高频区在华北和青藏高原东部(图3h),1980s和1990s的高频区转移到青藏高原和东北北部(图3i、图3j),2000-2016年极端湿润的高频区在青藏高原、新疆北部和东北(图3k)。总体上,近57年极端湿润的高频区在青藏高原和新疆北部(图3l)。

表1为北方4个分区年代际极端干湿事件频率的平均值。1960s-1990s,东北、蒙新区极端干旱频率有所减少,青藏高原极端干旱频率年代际变化呈逐渐减少趋势,华北极端干旱频率呈减少—增加的趋势。总体上,2000s,东北分区极端干旱多发,其余三个分区在1960s极端干旱多发。东北除在1970s极端湿润事件频率下降外,其他年代极端湿润频率呈连续增加趋势。蒙新区1960s-1990s极端湿润频率为增加趋势,2000s极端湿润频率略有下降,但蒙新区2000s极端湿润频率仍高于全区平均值。青藏高原极端湿润频率年代际变化呈增加趋势。华北极端湿润频率呈减少—增加—减少的趋势。分区中,东北、华北和蒙新极端湿润频率的高值均为2.9次/10年,青藏区极端湿润频率的高值为3.2次/10年。综上,1990s和2000s为北方极端湿润事件的高发期。

2.2.2 年际差异

图4为极端干湿事件频率变化趋势的空间分布。北方70%的站点极端干旱频率呈减少趋势(图4a),减少速率较大的站点主要分布在西北,年际倾向率为0.41次/10年。其余30%的站点极端干旱频率为增加趋势,多数站点在华北,平均速率为0.14次/10年。北方73%的站点极端湿润频率呈增加趋势(图4b),包括青藏高原、西北和东北,其中青藏高原中部、新疆北部和东北北部极端湿润频率增加幅度较大,平均为0.49次/10年;其余站点极端湿润频率处于减少趋势,华北极端湿润减少幅度较大,平均为0.19次/10年。分析可知,北方极端干旱增加的地区基本对应极端湿润减少的区域,极端干旱减少的地区对应极端湿润增加的区域。但西北东部、内蒙古东部和东北西部少数地区例外,极端干湿事件频率均呈现增加趋势。有研究表明,西北西部从1986年开始降水由前期偏少转为偏多,西北东部降水由前期偏多转为偏少^[22],华北分区降水逐年代减少,气候暖干化明显^[23]。任国玉等^[2]指出,中国大部分区域强降水事件特别是短历时极端强降水频率和降水量明显增多,而大范围地区小雨事件频次显著减小,表明北方气温升高并未导致极端干旱事件的普遍增多,而局部地区强降水量的增多对极端干湿变化可能有较明显的影响。

为了解北方极端干湿的演变特征,图5给出4个分区极端干旱和极端湿润发生月份百分比的年际演变序列。东北(图5a)极端干旱事件频率减少速率为-0.11次/10年,极端

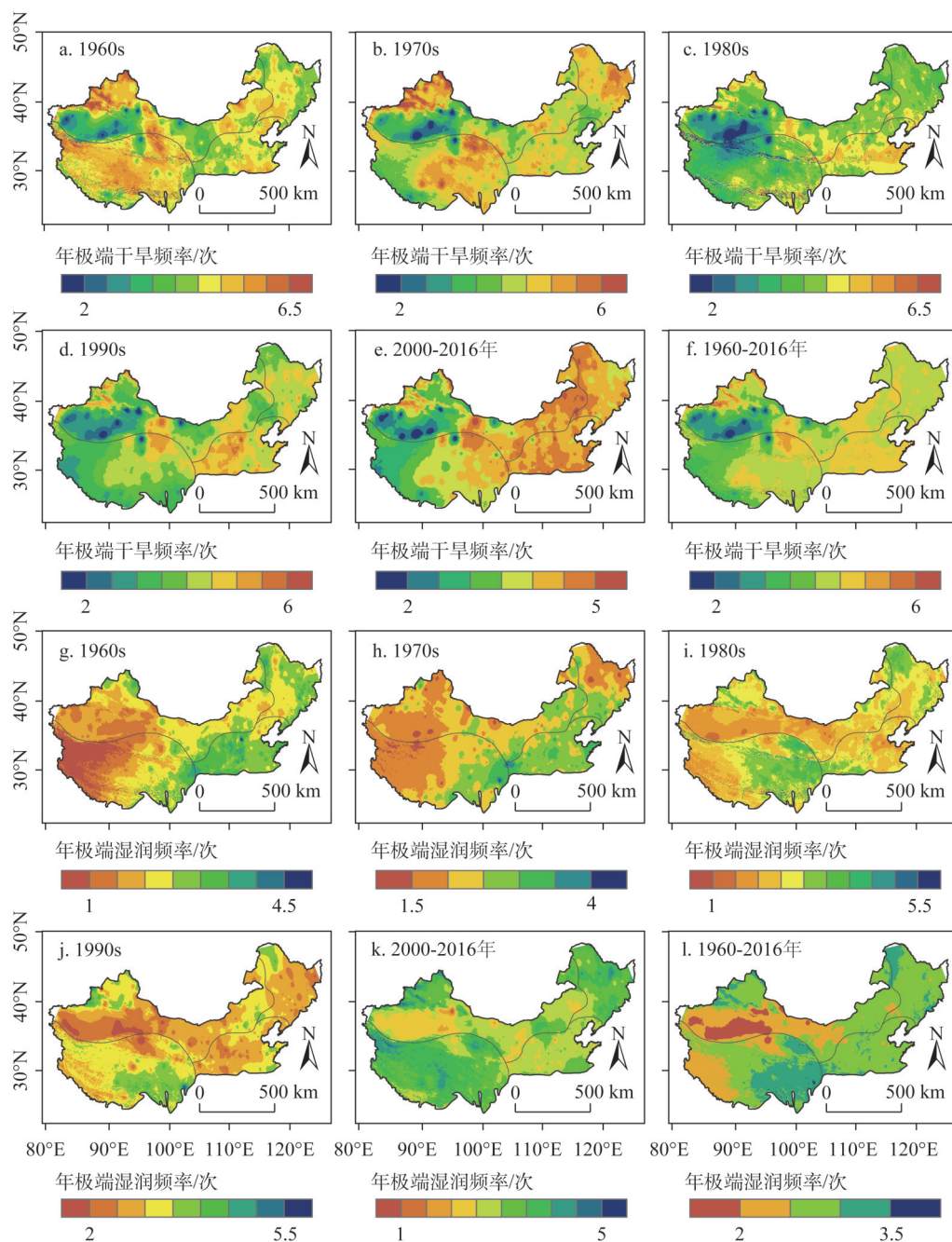


图3 北方地区不同年代极端干湿事件频率的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of extreme drought/wet frequency in Northern China in different decades

湿润事件频率增加速率为0.22次/10年,在不同阶段极端干旱与极端湿润发生概率变化呈此消彼长的关系。华北(图5b)极端干旱事件在波动中减少,极端湿润事件呈增加趋势,基本上极端干旱增加阶段对应极端湿润减少,极端干旱发生概率远大于极端湿润发生概率(分别为38%和23%)。蒙新区(图5c)极端干旱和湿润事件频率分别以-0.16次/10年和0.18次/10年的速率呈显著下降和显著上升趋势。1992年之前,极端干旱发生概率下降的

表1 北方4个分区不同年代极端干湿事件频率

Table 1 The extreme drought/wet events frequency in four sub-regions of Northern China (次/10年)

年代	东北地区		华北地区		蒙新地区		青藏地区	
	极端干旱事件	极端湿润事件	极端干旱事件	极端湿润事件	极端干旱事件	极端湿润事件	极端干旱事件	极端湿润事件
1960s	4.6	2.5	4.6	2.9	4.5	2.1	4.7	2.4
1970s	4.6	2.4	4.4	2.7	4.3	2.2	4.5	2.6
1980s	4.2	2.7	4.6	2.5	4.1	2.3	4.2	3.0
1990s	4.2	2.8	4.7	2.9	3.9	2.9	4.0	3.2
2000s	4.7	2.9	4.4	2.7	4.0	2.7	3.8	3.2
1960-2016年	4.4	2.8	4.5	2.8	4.1	2.5	4.2	2.9

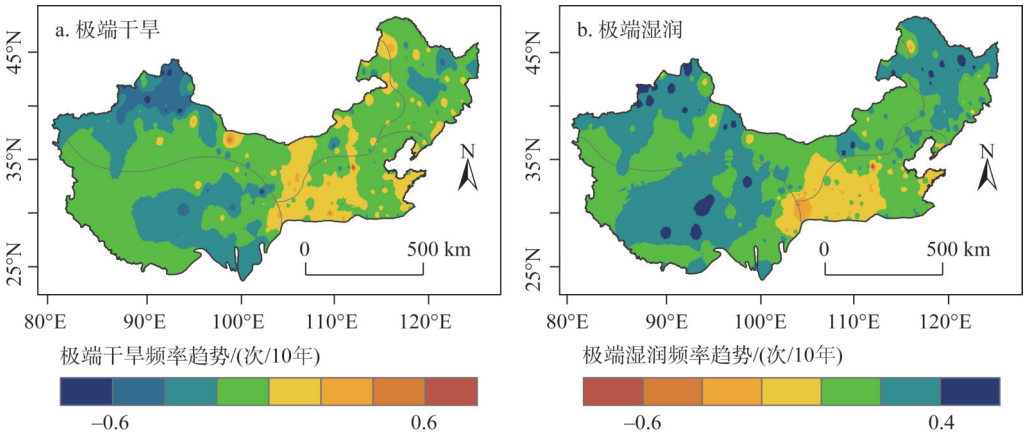


图4 北方地区1960-2016年极端干湿事件频率的变化趋势

Fig. 4 Changing trends of extreme drought/wet frequency in Northern China from 1960 to 2016

同时极端湿润发生概率在上升，但逐年极端干旱发生概率远大于极端湿润发生概率。自1993年始，极端干湿趋势变化波动较大，总体上极端干旱月份略有下降，极端湿润月份略上升。青藏高原（图5d）极端干旱和湿润事件频率分别以-0.17次/10年和0.17次/10年的速率呈显著下降和显著上升趋势。1990年以前，极端湿润发生概率远小于极端干旱发生概率，之后随着极端干旱事件的减少和极端湿润事件的持续增加，极端湿润发生概率只略小于极端干旱发生概率。可以看出，近57年来各分区极端干旱和极端湿润发生概率的变化不太一致。4个分区中，极端干旱发生的平均概率在华北最大，蒙新区最小；极端湿润发生的平均概率在青藏高原最大，蒙新区最小。东北、蒙新和青藏区极端湿润发生概率增加的时间较长，华北仅在1980年代极端湿润发生概率增加。

2.2.3 季节内差异

图6为北方每个月发生极端干旱和极端湿润的百分比。东北（图6a）在雨季（4-9月）极端湿润发生概率较高，冬季发生概率较低，东北每个月极端干旱的发生概率接近，均在35%以上。华北（图6b）极端湿润在夏季（6-8月）发生概率较高，冬季发生概率较低。华北月极端干旱发生概率远大于极端湿润发生概率，冬季（12月至次年2月）极端干旱发生概率较高。蒙新区（图6c）夏季极端干旱和极端湿润发生概率均最高，11-12月

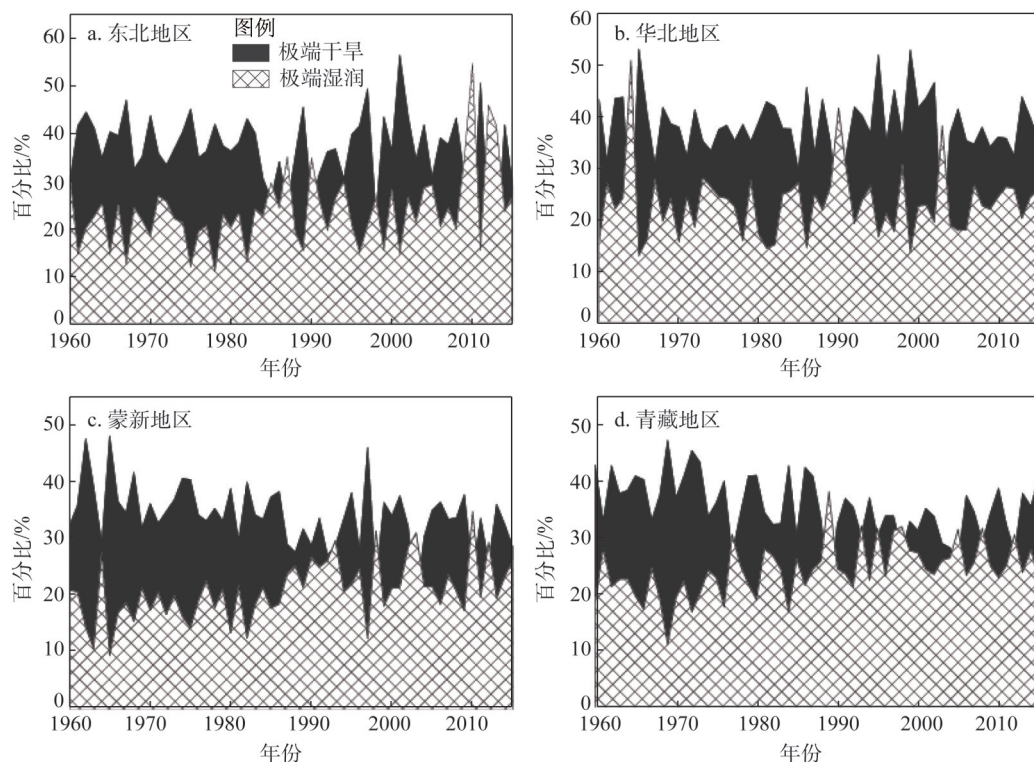


图5 各分区极端干旱和极端湿润月份占全年百分比的年际演变

Fig. 5 Percentage of extreme drought/wet months to the whole year in four sub-regions of Northern China in different years

极端干旱发生概率最低。青藏高原(图6d)夏季极端湿润发生概率最高,冬季极端湿润发生概率最低。各月极端干旱发生概率差异不大,均在35%左右。比较4个分区极端干湿发生概率,夏季各分区极端湿润发生概率较高,各月极端干旱发生概率均远大于极端湿润发生概率,其中华北极端干旱发生概率最高,青藏高原极端湿润发生概率最高。

2.3 ENSO对极端干湿的影响

2.3.1 湿润指数(H)与ENSO事件的关系

图7为ENSO强度与事件年和翌年 H 距平的关系。ENSO强度与事件年 H 负相关,与翌年 H 正相关并通过0.05的显著性检验。近57年,共有El Niño事件年14年,La Nina事件年22年。El Niño事件年 H 负距平9年,正距平5年,负距平年数多于正距平年数;翌年, H 负距平3年,正距平10年,正距平年数多于负距平年数。La Nina事件年 H 正距平10年,负距平12年;翌年, H 正距平7年,负距平15年,负距平年数远多于正距平年数。可见,ENSO与 H 的关系存在滞后性,即在ENSO事件翌年,北方干湿响应较明显。El Niño翌年,气候偏湿润的年份较多;La Nina翌年,气候偏干旱的年份较多。这表明,北方干湿变化对不同冷暖条件下大气环流异常的响应十分敏感,这一转变可能与ENSO对降水的影响有关。

2.3.2 湿润指数与SSTA的空间关系

SSTA与翌年 H 在年际和夏季尺度上显著正相关,相关系数分别为0.35 ($P \leq 0.05$)和0.48 ($P \leq 0.01$),表明海温对北方年际和夏季干湿变化均有重要影响。为了解海温对干湿

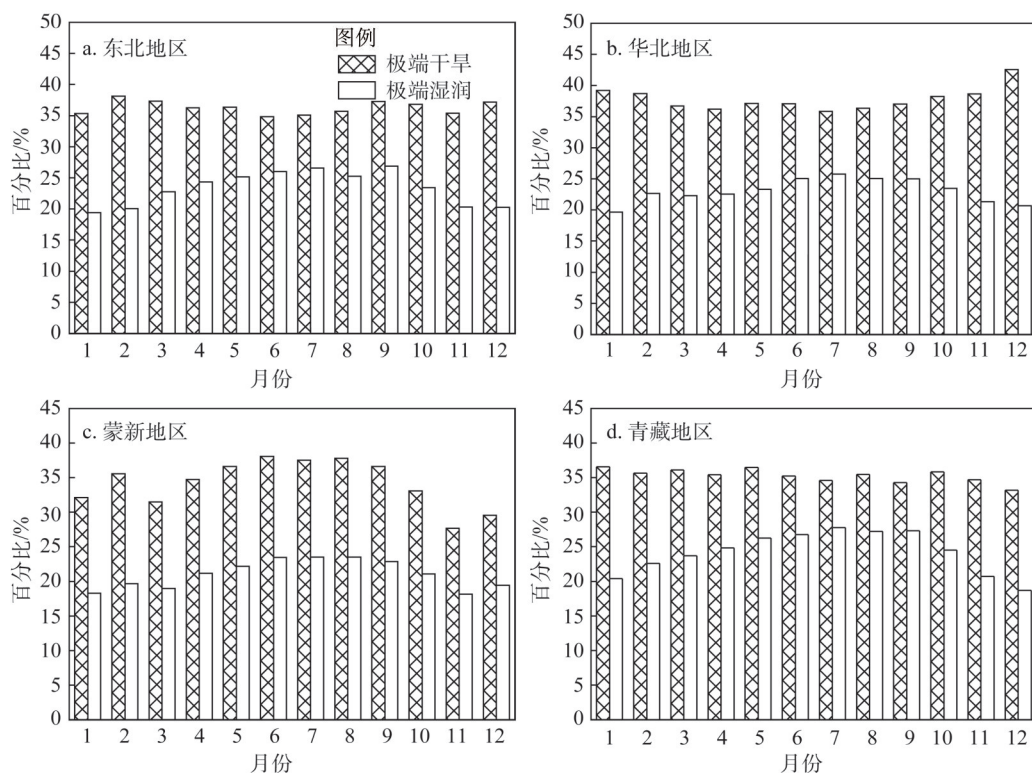


图6 分区每个月极端干湿发生的百分比

Fig. 6 Percentage of extreme drought/wet events in each month in four sub-regions of Northern China

变化影响的区域差异,通过计算各站点 SSTa 与翌年 H 的相关系数,分析海温变化对干湿影响的空间分布变化。图 8a 显示,85%的站点年 SSTa 与翌年 H 之间呈正相关关系,其中新疆东北部、内蒙古东部和黑龙江西北部的相关系数在 0.27~0.48 之间,呈显著正相关关系。15%的站点(主要分布在青藏高原)年 SSTa 与翌年 H 相关性较弱,表明受海温的影响不显著。由图 8b 可知,82%的站点 SSTa 与翌年夏季 H 之间呈正相关关系,其中新疆北部、东北中部和河套地区的相关系数值较高,介于 0.27~0.47 之间,呈显著正相关关系。其余 18% 的站点 SSTa 与翌年夏季 H 相关性较弱,零散分布在华北东南部、青藏高原及东北东部局部地区。以上分析表明,北方大部分地区夏季干湿状况受到海温的影响,原因可能是热带西太平洋海温异常对厄尔尼诺发展阶段夏季降水异常的影响有关^[20]。

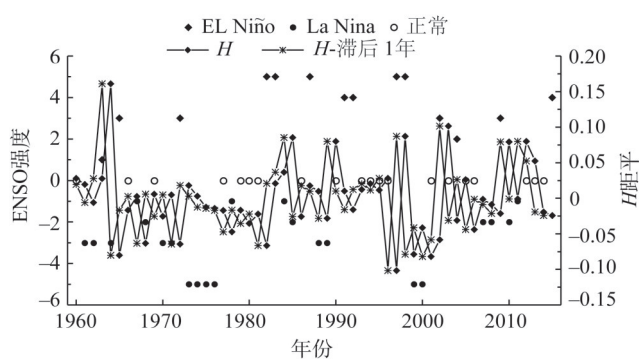


图7 ENSO强度与北方地区湿润指数距平关系

Fig. 7 The relationship between ENSO events and humidity index anomaly over Northern China from 1960 to 2016

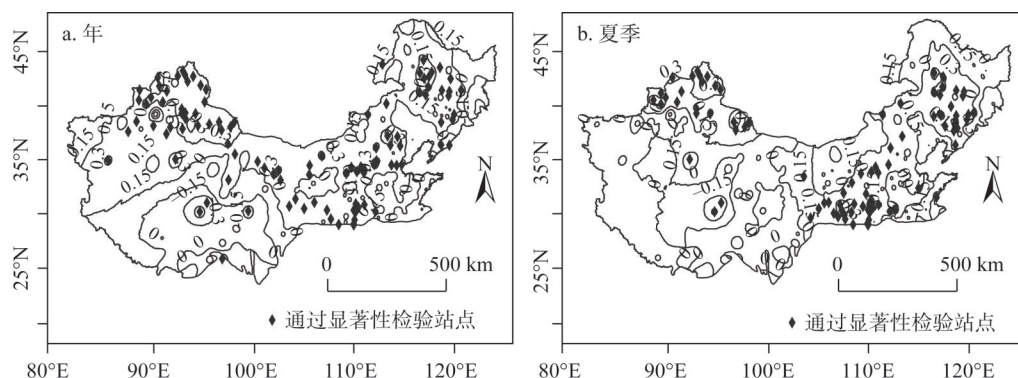


图8 SSTA与翌年湿润指数的相关系数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of correlation coefficients between SSTA and humidity index of next year

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 北方极端干旱事件以 -0.10 次/10年的速率呈显著下降趋势, 西北部分站点极端干旱减少速率较大。极端湿润事件以 0.13 次/10年速率呈显著上升趋势, 青藏高原中部、新疆北部和东北北部极端湿润频率增加幅度较大。总体上, 北方极端干旱减少的地区对应极端湿润增加的区域, 极端干旱事件年均发生频率大于极端湿润事件频率。

(2) 4个分区东北、华北、蒙新和青藏高原极端干旱频率一致减少, 极端湿润频率一致增加。在年代际尺度上, 华北极端干旱事件多发, 东北和青藏高原极端湿润事件多发。季节尺度上, 夏季极端湿润发生概率较高, 各月份极端干旱发生概率均远大于极端湿润发生概率。

(3) SSTA与翌年湿润指数在年际和夏季两个时间尺度上呈显著正相关, 北方大部分地区夏季干湿状况受到海温的影响。ENSO与湿润指数的关系存在滞后性的关系。El Niño翌年, 气候偏湿润的年份较多; La Nina翌年, 气候偏干旱的年份较多。

3.2 讨论

利用标准化后的湿润指数研究北方极端干湿事件的演变特征, 结果表明全区及4个分区极端干旱频率均呈减少趋势, 极端湿润频率呈增加趋势。北方不同区域极端干湿事件频率变化趋势存在差异, 华北极端干旱多发, 东北和青藏高原极端湿润多发。本研究结果与姜江等^[24]得出的中国北方极端干旱区面积在缩小的结论内一致。申双和等^[25]、胡琦等^[26]认为中国湿润化地区在增多, 表明北方极端湿润事件的增多是中国湿润化进程中重要的一部分。本文与马柱国等^[3]得出的极端干旱事件频率在华北、东北和西北东部增加, 在西北西部减少的结论存在差异, 这可能与气候变化周期的多时间尺度特征有关。本文讨论了1960-2016年北方极端干湿的变化, 时间序列周期异于马柱国等^[3]的北方极端干湿变化的事件序列周期(1951-2000年)。北方不同区域自然地理环境差异较大, 整体的平均干湿状况掩盖了干湿变化的区域差异, 研究4个分区的干湿变化差异有助于准确了解北方区域性干湿变化对气候变化的响应。分区中, 东北、蒙新和青藏高原极端干湿事件频率均表现为明显的变化趋势, 仅华北极端干湿事件频率变化不明显, 分析其原

因, 华北年代际极端干湿事件变化并无明显上升或下降规律, 尤其近10年华北极端干旱和极端湿润事件频率均处于上升趋势, 因而在长时间尺度上华北极端干湿频率变化并不显著。

在农业气候区划中, 湿润指数是重要的参考指标, 对规范和指导农业种植规划和作物布局具有重要的参考价值^[11,27]。理论上北方大部分地区极端湿润事件增加, 地表湿润程度有所好转, 但还需要关注升温背景下极端干旱趋势较严重的华北和干旱程度虽减弱但自然环境依旧脆弱的西北的干湿变化。此外, 北方极端干旱频率减少的地区一般对应极端湿润增加的地区, 极端湿润减少的地区也一般对应极端干旱增加的区域, 而西北部、内蒙古东部和东北西部少数地区却例外, 极端干湿事件频率均呈现增加趋势, 这种异常特征形成的原因有待继续研究。

参考文献(References):

- [1] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99-110. [GAO J Q, YANG X G, DONG C Y, et al. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in Northern China with climate changes. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 99-110.]
- [2] 任国玉, 柳艳菊, 孙秀宝, 等. 中国大陆降水时空变异规律 III: 趋势变化原因. 水科学进展, 2016, 27(3): 327-348. [REN G Y, LIU Y J, SUN X B, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland of China III: Causes for recent trends. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 327-348.]
- [3] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. 地理学报, 2003, 58(s1): 69-74. [MA Z G, HUA L J, REN X B. The extreme dry/wet events in Northern China during recent 100 years. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(s1): 69-74.]
- [4] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9-14. [HUANG J P, JI M X, LIU Y Z, et al. An overview of arid and semi-arid climate change. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2013, 9(1): 9-14.]
- [5] 黄建平, 冉津江, 季明霞. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析. 气象学报, 2014, 72(6): 1096-1107. [HUANG J P, RAN J J, JI M X. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1096-1107.]
- [6] 马柱国, 符淙斌. 1951-2004年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439. [MA Z G, FU C B. Primary fact of droughts in Northern China during 1951-2014. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2429-2439.]
- [7] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961-2015年中国气候干湿状况的时空分异. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(11): 1339-1348. [YUAN Q Z, WU S H, DAI E F, et al. Spatio-temporal variation of the wet-dry conditions from 1961-2015 in China. Sciences in China Series D: Earth Sciences, 2017, 60(11): 2041-2050.]
- [8] 黄小燕, 张明军, 贾文雄, 等. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素. 水科学进展, 2011, 22(2): 151-159. [HUANG X Y, ZHANG M J, JIA W X, et al. Variations of surface humidity and its influential factors in Northwest China. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 151-159.]
- [9] 郑然, 李栋梁. 1971-2011年青藏高原干湿气候区界线的年代际变化. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1106-1115. [ZHENG R, LI D L. Decadal changes of the wet and dry climate zone boundaries in the Qinghai-Tibet Plateau during 1971-2011. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1106-1115.]
- [10] 戴升, 申红艳, 李林, 等. 柴达木盆地气候由暖干向暖湿转型的变化特征分析. 高原气象, 2013, 32(1): 211-220. [DAI S, SHEN H Y, LI L, et al. Analysis on climatic transition characteristic from warm-dry to warm-wet in Tsaidam Basin. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 211-220.]
- [11] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 不同时间尺度下华北平原干湿气候时空变化及成因分析. 中国农业气象, 2017, 38(5): 267-277. [HU Q, DONG B, PAN X B, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate at different timescales in North China Plain. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(5): 267-277.]
- [12] 王利平, 文明, 宋进喜, 等. 1961-2014年中国干燥度指数的时空变化研究. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1488-1498.

- [WANG L P, WEN M, SONG J X, et al. Spatial-temporal variation of aridity index during 1961-2014 in China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1488-1498.]
- [13] 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951-2010年中国主要气候区划界线的移动. *地理研究*, 2013, 32(7): 1179-1187. [BIAN J J, HAO Z X, ZHENG J Y, et al. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1179-1187.]
- [14] 王菱, 谢贤群, 李运生, 等. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化. *地理研究*, 2004, 23(1): 45-54. [WANG L, XIE X Q, LI Y S, et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in Northern China over the past 40 years. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 45-54.]
- [15] 黄亮, 高苹, 谢小萍, 等. 全球变暖背景下中国干湿气候带变化规律研究. *气象科学*, 2013, 33(5): 570-576. [HUANG L, GAO P, XIE X P, et al. Variation laws of wet and dry climatic zones in China under global warming. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, 33(5): 570-576.]
- [16] 华丽娟, 马柱国. 亚洲和北美干湿变化及其与海表温度异常的关系. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1184-1196. [HUA L J, MA Z G. The evolution of dry and wet periods in Asia and North America and its relationship with SSTA. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(5): 1184-1196.]
- [17] TIMILSENA J, PIECHOTA T, TOOTLE G, et al. Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term Colorado River Basin streamflow. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3-4): 289-301.
- [18] 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 阿拉伯半岛—北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系. *中国科学: 地球科学*, 2008, 38(6): 750-762. [SUN J Q, YUAN W, GAO Y Z. Arabian Peninsula-North Pacific Oscillation and its relationship to the Asian monsoon. *Sciences in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(7): 1001-1012.]
- [19] 陈文, 兰晓青, 王林, 等. ENSO和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响. *科学通报*, 2013, 58(8): 634-641. [CHEN W, LAN X Q, WANG L, et al. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(8): 634-641.]
- [20] 顾薇. 夏季热带西太平洋海温对厄尔尼诺发展阶段我国东部汛期降水的影响分析. *气象*, 2016, 42(5): 548-556. [GU W. Possible impact of the western tropical pacific SSTA on precipitation during the El Niño developing summers in eastern part of China. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(5): 548-556.]
- [21] YIN Y H, WU S H, ZHENG D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 77-84.
- [22] 王艳姣, 闫峰. 1960-2010年中国降水区域分异及年代际变化特征. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1354-1363. [WANG Y J, YAN F. Regional differentiation and decadal change of precipitation in China in 1960-2010. *Progress in Geography*, 2014, 33(10): 1354-1363.]
- [23] 宁亮, 钱永甫. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析. *高原气象*, 2008, 27(5): 1010-1020. [NING L, QIAN Y F. Analyses on trends of annual and seasonal four kinds of daily precipitation in China. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(5): 1010-1020.]
- [24] 姜江, 姜大膀, 林一骅. 中国干湿区变化与预估. *大气科学*, 2017, 41(1): 43-56. [JIANG J, JIANG D B, LIN Y H. Changes and projection of dry/wet areas over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(1): 43-56.]
- [25] 申双和, 张方敏, 盛琼. 1975-2004年中国湿润指数时空变化特征. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 11-15. [SHEN S H, ZHANG F M, SHENG Q. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1): 11-15.]
- [26] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961-2014年中国干湿气候时空变化特征及成因分析. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 124-132. [HU Q, DONG B, PAN X B, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961-2014 in China. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(6): 124-132.]
- [27] 徐羽, 吴艳飞, 徐刚, 等. 长三角地区地表干湿状况及极端干湿事件特征研究. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1579-1590. [XU Y, WU Y F, XU G, et al. Characteristics of surface humidity and extreme drought/wet events in Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1579-1590.]

Spatio-temporal changes of the extreme drought and wet events in Northern China from 1960 to 2016

JIA Yan-qing¹, ZHANG Bo²

(1. Department of Geography, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, Shanxi, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Global warming has caused non-uniform changes in precipitation intensity and distribution. Therefore, drought and flood events may increase accordingly in Northern China. Based on the daily data of 424 meteorological stations in northern China from 1960 to 2016, ET_0 was calculated by using the Penman-Monteith method to examine the changes of extreme drought and wet events in the study region. We calculated the surface humid indexes based on ET_0 and precipitation, and used the Mann-Kendall (MK) trend test to analyze the frequencies of extreme drought and wet events by standardized surface humid indexes. All spatial distribution maps were plotted using the linear regression interpolation method embedded in the ArcGIS 10.1 software. This paper analyzed the spatio-temporal variations and multiple scale evolvement of extreme drought and wet events in northern China from 1960 to 2016, and explored the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the extreme drought and wet events threshold using the correlation analysis method. The tendency rates of extreme drought and wet frequency were about -0.10 per decade and 0.13 per decade, respectively. In terms of spatial trends, the frequency of overall trend of extreme drought and wet events decreased and increased significantly from 1960 to 2016, respectively. The area where the number of extreme drought events decreased corresponded to the area where that of extreme wet events increased, including Tibetan Plateau, Northwest China, and Northeast China. The frequency of extreme drought decreased significantly in Northwest China, while that of extreme wet events increased significantly in central Tibetan Plateau, northern Xinjiang, and north of Northeast China. The annual occurrence frequency of extreme drought events was greater than that of extreme wet events. In different sub-regions, the frequency of extreme drought decreased, while that of extreme wet events increased. In different decades, the frequency of extreme drought events was higher in North China, while that of extreme wet events was higher in Northeast China and Tibetan Plateau. On month scales, summer witnessed higher probability of occurrence of extreme wet events, and the probability of occurrence of extreme drought in each month was far greater than that of extreme wet events. The probability of extreme drought was greater than that of extreme wet events in sub-regions, with the probability of extreme drought being the highest in North China and that of extreme wet events being the highest in the Tibetan Plateau. The relationship between the ENSO and the humidity index arrived with a delay. The wet events occurred frequently following El Niño, the drought events happened generally following La Nina. SSTA and the humidity index of next year had a significant positive correlation on annual and summer time scales. The SSTA had an important effect on drought and wet conditions in most parts of Northern China. Finally, this paper can benefit drought/flood characterization from the perspective of the overall dimensions of Northern China, and help decision making in risk-based drought/flood management in the context of global warming.

Keywords: Northern China; extreme drought/wet event; surface humid indexes; ET_0 ; ENSO