

基于 SPEI 的东北地区农作物生长季干旱特征分析

王蔚丹, 孙丽*, 董沫, 李凤霞, 刘敏 (农业农村部耕地利用遥感重点实验室, 农业农村部规划设计研究院, 北京 100121)

摘要 利用 1968—2017 年东北地区 89 个站点的月值数据, 采用 Penman-Monteith 模型计算了潜在蒸散, 进而计算出标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)。分析多尺度 SPEI 与作物因旱受灾面积的相关关系, 结果表明, 8 月份的 4 个月尺度 SPEI 与受旱面积的关系最为密切, 故以此代表东北地区农作物生长季干旱。对东北地区生长季 SPEI 进行突变和趋势分析, 发现以 1983 年为突变点由干转湿, 且总体上呈现出湿润化的趋势。月时间尺度的 SPEI 表明, 除 9 月份出现干旱化趋势且不显著外, 其他月份均呈现变湿趋势, 其中 4 和 10 月份湿润化显著。空间上, 大部分区域表现为 SPEI 增加的趋势, 其中 SPEI 显著增加区域主要分布在东北中西部地区, SPEI 减小的站点主要分布在南部区域, 但均未通过 0.05 的显著性检验。生长季不同月份干旱的高发区各不相同。

关键词 SPEI; 生长季; 干旱特征; 东北地区

中图分类号 S162 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)03-0064-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.03.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis of Drought Characteristics of Crop Growing Season Based on SPEI in Northeast China

WANG Wei-dan, SUN Li, DONG Mo et al (Key Laboratory of Cultivated Land Use of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Engineering & Planning Design, Beijing 100121)

Abstract Using monthly data from 89 stations in Northeast China from 1968 to 2017, the Penman-Monteith model was used to calculate the potential evapotranspiration, and then the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated. The correlation between SPEI and the area affected by drought was analyzed. The results showed that the four-month scale SPEI in August had the strongest correlation with the area affected by drought, so it was used to represent the drought conditions in crop-growing season. The mutation and trend analysis of SPEI during the growing season in Northeast China found that the mutation point was changed from dry to wet in 1983, and there was an overall increasing trend, indicating a wetting trend. The monthly SPEI showed that except for the non-significant drying trend in September, there was a wetting trend all the other months from April to October, with significant wetting in April and October. Spatially, most regions showed an increasing trend of SPEI, among which the SPEI increased significantly mainly in the northeast and central regions, while the SPEI decreased in the southern regions more obviously, but none of them passed the 0.05 significance test. The areas with high incidence of drought in different months were different.

Key words SPEI; Growing season; Drought characteristics; Northeast China

干旱可直接导致大面积作物减产, 严重时甚至导致绝收, 对国家粮食安全和农业可持续发展造成严重威胁。作为我国重要的粮食生产基地, 东北三省的干旱状况备受重视。2007 年, 东北三省农作物受旱面积占该地区耕地面积的比例不低于 35%, 占全国农作物因旱受灾面积的 39.6%^[1]。研究干旱的时空分布特征, 揭示干旱的发展规律, 可为区域农地的合理规划利用、种植管理提供参考, 同时也是抗旱防灾、保障农业健康发展的迫切需求。一批学者对东北地区干旱的时空特征进行了定量研究, 但由于各自采用的方法、资料等不同, 结果不尽相同。王亚平等^[2]研究发现, 1980—2005 年东北三省大部分地区的干旱状况有所缓解; 马柱国等^[3]计算了 1951—2004 年的地表湿润指数、Palmer 干旱指数, 反演了土壤湿度, 结果发现东北表现明显的年代际干旱化趋势, 经历了 1965 年、1983 年和 20 世纪 90 年代中期 3 个转折点; 还有一些学者对东北干旱状况进行了分析, 大多基于干旱趋势、频率的年际变化、季节变化、空间分异等^[4-8]。总的来说, 基于生长季的研究相对偏少, 其中 Yu 等^[9]利用标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 对东北生长季干旱风险进行时空分析, 结

果发现 1965—1983 和 1996—2009 年降水显著减少, 且后者面临的干旱风险在程度和范围上都更为严重; 陈莉等^[10]研究东北地区 5—9 月的干燥度得出 1960—2008 年生长季干旱情况呈显著的增强趋势。

SPI 指数具有较强的数学统计机理, 可以得到不同时间尺度结果, 且易于实现, 被广泛应用, 但它仅考虑了降水数据, 未考虑其他可能造成干旱的因素。干燥度指数虽然考虑了潜在蒸散量和降水量 2 种因子, 但它不能反映干旱的多时间尺度特征。标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 与 SPI 指数相似, 具有多时间尺度的优势, 同时考虑了水量平衡^[11]。沈国强等^[12]从数学统计理论基础、拟合优度检验、SPEI 与典型干旱事件核准等角度验证了利用 FAO Penman-Monteith 法计算潜在蒸散, log-Logistic 分布拟合逐月累积水分亏缺量序列得到的 SPEI 适于东北地区的干旱监测。笔者在此基础上, 利用基于 Penman-Monteith 的蒸散模型计算得到东北地区 1968—2017 年 SPEI 指数, 分析农作物生长季干旱的时空变化规律, 并客观评估该地区整个生长季的干旱状况, 以为政府防灾减灾决策提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 东北三省为我国农业产量大区, 平均海拔 50~200 m, 地面起伏平缓, 土层深厚, 主要是黑土、白浆土、草甸土等。该区种植业发达, 是我国提供商品粮最多的“北大仓”。该区是我国纬度最高的地区, 夏季温和湿润, 冬

基金项目 国家重点研发计划 (2016YFB0501505)。

作者简介 王蔚丹 (1985—), 女, 河南开封人, 工程师, 博士, 从事农业旱情监测、自然灾害风险分析等方面的研究。* 通信作者, 高级工程师, 博士, 从事农业旱情遥感监测等方面研究。

收稿日期 2020-06-08; **修回日期** 2020-08-14

季严寒漫长,无霜期 100~200 d,年降水量为 400~800 mm,年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温在 1 300~3 700 $^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,年日照时数 2 300~3 000 h,基本能满足春小麦、大豆、玉米、水稻等作物的生长需要。该区主要农产品在全国占有重要地位,玉米、大豆、小麦、谷子、高粱是全区的五大粮食作物,常年向国家提供大量的商品粮和大豆。

1.2 资料来源 选取东北地区 89 个具有较完整时间序列(1968—2017 年)逐日气象资料的台站,将资料进行处理得到月尺度累积降水量、最高气温、最低气温、2 m 平均风速、日照时数、相对湿度等数据。气象数据源自中国气象数据网“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”(<https://data.cma.cn/data/>),该数据集经过严格的质量控制和检查。同时搜集整理《中国水旱灾害公报》辽宁、吉林和黑龙江的作物因旱受灾面积数据,时间序列为 2006—2017 年。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)。Vicente-Serrano 等^[11]于 2010 年提出了标准化降水蒸散指数(SPEI),当时选用了较为简单的 Thornthwaite 模型计算潜在蒸散,沈国强等^[12]认为基于 Penman-Monteith 的 SPEI 指数在东北地区干旱预测和定量化研究方面具有较好的适用性。该研究利用 FAO-56(1998 年)推荐的 Penman-Monteith 蒸散模型计算 SPEI 指数,主要分为 4 个步骤。

(1) 计算逐月潜在蒸散。计算公式如下:

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

式中, ET_0 为潜在蒸散量(mm); Δ 为温度随饱和水汽压变化的斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); U_2 为离地 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 为平稳气温($^\circ\text{C}$); γ 为湿度表常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); R_n 为到达地面的净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$]; G 为土壤热通量密度 [$\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$]。

(2) 计算逐月累积降水量 PREP 与潜在蒸散量 PET 的差值。计算公式如下:

$$D = \text{PREP} - \text{PET} \quad (2)$$

式中, D 值表示计算的时间尺度内降水与蒸散差额的累计值。可在不同的时间尺度上聚合,其过程与 SPI 相同。

(3) 对 D 数据序列采用三参数的 log-Logistic 概率密度函数进行拟合。计算公式如下:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \right]^{-2} \quad (3)$$

式中,参数 α, β, γ 可以采用线性矩(L-moment)方法拟合获得,可以得到 D 的概率分布函数:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, $\gamma > D > \infty$, α, β, γ 分别表示尺度、形状和起始参数。

(4) 对拟合结果进行正态标准化。计算公式如下:

$$\text{SPEI} = S \times \left(\frac{W - C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right) \quad (5)$$

式中, $W = \sqrt{-2\ln P}$, P 为某确定的 D 值被超越的概率;当 $P \leq 0.5$ 时, $P = 1 - F(x)$, $S = 1$;当 $P > 0.5$ 时, $S = -1$, 此时用 $1 - P$ 代替 P 。 $C_0 = 2.515\ 517$, $C_1 = 0.802\ 853$, $C_2 = 0.010\ 328$, $d_1 = 1.432\ 788$, $d_2 = 0.189\ 269$, $d_3 = 0.001\ 308$ 。

SPEI 指数具有多时间尺度特征,其对应的干旱等级划分标准见表 1。SPEI 值越小表示越干旱,反之越湿润。东北地区农作物生长季跨越 4—10 月,该研究对研究区 89 个站点 1968—2017 年生长季的 1、2、3、4、5、6、7 个月时间尺度的 SPEI 指数进行计算,得到的指数记为 $\text{SPEI}_n - M$, n 表示时间尺度, M 表示月份。比较各月份多时间尺度 SPEI 与作物因旱受灾面积的相关关系,进而分析东北地区生长季干旱的时空演变特征。

表 1 SPEI 干旱等级划分标准

Table 1 Classification of SPEI drought grade

序号 No.	SPEI	干旱等级 Drought grade
1	$-0.5 < \text{SPEI}$	无旱
2	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$	轻旱
3	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$	中旱
4	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$	重旱
5	$\text{SPEI} \leq -2.0$	极旱

1.3.2 趋势检验和突变检验。该研究主要用到线性倾向估计、Mann-Kendall(M-K)趋势检验和突变检验方法。

线性倾向估计可看作一种特殊的、最简单的线性回归形式,它表示的是变量 x 与时间 t 之间的关系。用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归:

$$\hat{x} = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式(6)中, b 为回归系数或线性倾向系数, a 为回归常数,二者可用最小二乘法估计。具体的计算方法见文献[13]。

M-K 法是世界气象组织(WMO)推荐并广泛使用的一种非参数统计检验方法,不需要样本服从一定的分布,不受少数异常值的干扰,计算方便,更适用于序列变量和类型变量。M-K 趋势检验和突变检验的详细计算过程见文献[14-15]。

2 结果与分析

2.1 SPEI 与作物因旱受灾面积的关系 东北地区作为我国粮食主产区之一,一旦发生干旱,农作物产量就会受到直接影响。为得到最佳 SPEI 表征东北生长季干旱,研究作物受旱情况与生长季 SPEI 指数之间的关系,将东北地区因旱受灾面积时间序列数据,与 4—10 月多时间尺度的 SPEI 进行相关分析,得到的结果如表 2 所示。各时间尺度的 SPEI 与受灾面积的相关系数均为负值,说明 SPEI 值反映了干旱导致作物减产面积的变化趋势。SPEI₄₋₈ 与受旱面积最相关,故采用 SPEI₄₋₈ 表征整个生长季干旱, SPEI_{1-i}} ($i = 1, 2, \dots, 10$) 表征逐月干旱状况。

2.2 农作物生长季干旱变化趋势

2.2.1 农作物生长季及各月的年际变化趋势。从表 3 可以

看出,东北地区农作物生长季的 SPEI 总体线性倾向率为 $0.11/10 a$,虽未通过 0.05 显著性检验,但达到 0.1 显著性水平,说明 SPEI 总体有增大趋势,即呈现湿润化,其中 21.35% 的站点呈湿润化且达到了 0.05 的显著性水平 ($b>0, P<0.05$)。SPEI_{-i} 线性倾向估计表明,除 9 月份出现干旱化趋势且不显著外,其他月份均呈现湿润化趋势,其中,4 和 10 月份湿润化显著。9 月份有 8.99% 的站点表现为干旱化趋势且通过了 0.05 的显著性检验 ($b<0, P<0.05$)。4、5 和 6 月份气候倾向率分别为 0.13 、 0.18 和 $0.07/10 a$,表现为湿润化趋势,分别有 30.34% 、 43.82% 和 10.11% 的站点通过 0.05 显著性检验;10 月份气候倾向率为 $0.12/10 a$,有 25.84% 的站点表现出湿润化且通过 0.05 显著性检验。相对来说,7、8 月份显著变干、变湿的站点极少。M-K 趋势分析结果显示,全生长季 $Beta=0.0122$,而 $Z=1.89$,约有 87.6% 的站点 $Beta$ 大于 0 ,其中 19.1% 的站点通过了 0.05 水平的显著性检验,与线性趋势结果基本一致。

表 2 生长季多尺度 SPEI 与受旱面积的关系

Table 2 Relationship between multi-scale SPEI and drought-affected area in the growing season

时间尺度 Time-scale	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October
1	-0.01	-0.11	-0.17	-0.42	-0.41	0.07	-0.04
2	—	-0.11	-0.25	-0.40	-0.52	-0.35	0.06
3	—	—	-0.22	-0.46	-0.57	-0.46	-0.32
4	—	—	—	-0.38	-0.63	-0.48	-0.41
5	—	—	—	—	-0.51	-0.53	-0.43
6	—	—	—	—	—	-0.44	-0.48
7	—	—	—	—	—	—	-0.40

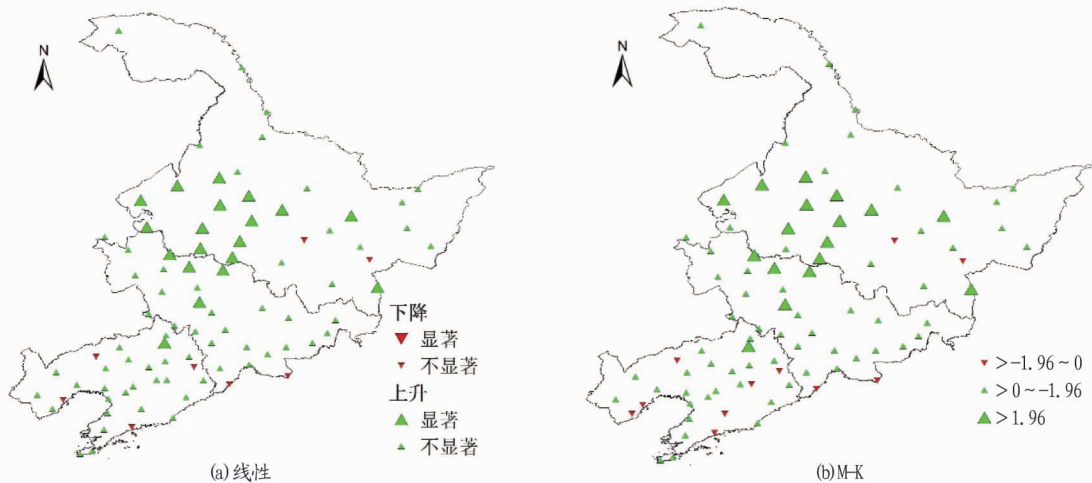


图 1 农作物生长季 SPEI 指数年际变化趋势空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of annual trends of SPEI during the crop growing season

2.2.3 农作物生长季干旱突变分析。如图 2 所示,由 UF 统计量曲线可见,1968—2017 年东北平原农作物生长季 SPEI 先呈现波动变化后下降转为增长趋势,到 20 世纪 90 年代中后期,SPEI 上升趋势达到显著水平;此后增长速度急剧下降,1999 年后干旱化迹象露头,但上升速度下降到一定程度后在

表 3 农作物生长季及各月 SPEI 年际变化趋势

Table 3 Interannual change trends of SPEI in crops growing season and months

时间 Time	气候倾向率 Climate tendency rate/ $(10a)^{-1}$	$b>0, P<0.05$ 站点数占比 Proportion of stations//%	$b<0, P<0.05$ 站点数占比 Proportion of stations//%
生长季 Growing season	0.11	21.35	0.00
4月 April	0.13*	30.34	0.00
5月 May	0.18	43.82	0.00
6月 June	0.07	10.11	1.12
7月 July	0.01	1.12	1.12
8月 August	0.04	3.37	0.00
9月 September	-0.06	1.12	8.99
10月 October	0.12*	25.84	1.12

注: * 表示通过 0.05 的显著性水平检验

Note: * means passing the 0.05 significance level test

2.2.2 年际趋势变化空间分布。当线性倾向率 $b<0$ 或 M-K 趋势系数 $Z<0$ 时说明指数下降,呈干旱化趋势,反之则湿润化。为便于验证两类方法所得结果是否一致,统一以是否达到 0.05 的显著性水平为标准。当线性倾向系数对应的 P 值小于 0.05 时,表明通过 95% 的置信水平,而对于 M-K 趋势来说,其系数的绝对值大于 1.96 即可。从图 1 可以看出,2 种方法表现出相对一致的趋势分布特征,东北地区大部分站点在 1968—2017 年表现为 SPEI 增大的趋势,呈现湿润化。其中,SPEI 显著增加区域主要分布在黑龙江省西南部,该区域农作物生长季干旱呈减轻趋势,且表现显著。辽宁省 SPEI 减小的站点较多,干旱化的范围比吉林和黑龙江省明显,但均未达到 0.05 的显著水平。由于黑龙江北部地区站点分布稀疏,虽然零星几个站点显示轻度湿润化趋势,但难以代表黑龙江北部区域。

一个相对平稳的状态上下波动(而 SPEI 整体上还是呈现上升趋势,呈湿润化)之后很快又波动上升,直至达到显著水平。1976—1982 年干旱发生范围较大,1983—1998 年为相对平静期,1999 年开始发生干旱的站次明显增加,2000 年是 1999—2004 年这一时段的干旱发生高峰年。

从图 2 可以看出,UF 统计量曲线和 UB 统计量曲线存在 3 个交叉点,分别出现在 1983、1999 和 2001 年,其中,1983 和 2001 年在 0.05 显著水平线之内。可以肯定的是,SPEI 突然转为增长趋势是突变现象,具体是从 1983 年开始的,这是个突变点。1999 和 2001 年这 2 个交叉点出现的原因可能是干旱化迹象刚刚露头但还没有发生趋势的转变就消失了。

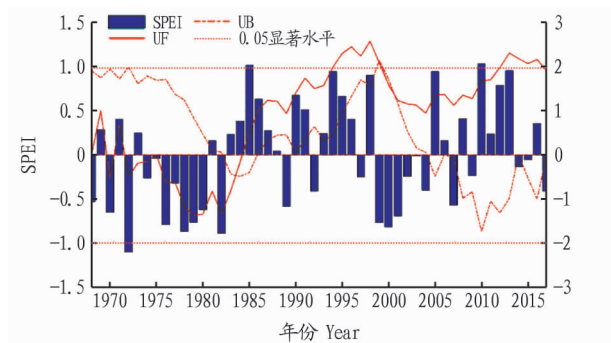


图 2 1968—2017 年农作物生长季 SPEI 指数的 M-K 突变分析
Fig. 2 M-K mutation analysis of SPEI index in crop growing season during 1968-2017

2.3 农作物生长季干旱频率

2.3.1 各月不同等级干旱发生频率。根据表 1 中的标准对东北地区 89 个站点的 $SPEI_{1-i}$ 进行了干旱分级划定,不同等级的干旱在 4—10 月的发生频率如表 4 所示。总体 4、5、6、7 月发生干旱的频率大于 8、9、10 月。4、5 月轻旱发生频率高;中旱 7 月发生次数多,10 月最少;重旱 6 月发生频

率明显高于其他月份;极端干旱在 4 和 10 月发生频率较高,8 月较低。

表 4 农作物生长季各月不同等级干旱发生频率

Table 4 The frequency of drought of different grades occurred in each month of the crop growing season %

月份 Month	轻旱 Light drought	中旱 Moderate drought	重旱 Severe drought	极旱 Extreme drought	合计 Total
4	16.02	10.43	4.25	1.78	32.48
5	15.93	10.79	4.65	1.33	32.70
6	14.65	10.72	5.89	1.12	32.38
7	14.83	11.71	5.12	1.01	32.67
8	15.37	10.72	5.01	0.72	31.82
9	14.88	10.79	4.76	1.15	31.58
10	14.67	9.87	4.31	1.73	30.58

2.3.2 生长季干旱的空间分布特征。为了分析农作物生长季内不同时段干旱状况,计算生长季内各月 $SPEI_{1-i}$ 并进行干旱分级,得到结果如图 3 所示,5 月发生干旱频率较高的区域主要集中在黑龙江中南大部及吉林、辽宁的局部地区;6 月发生干旱频率较高的地区主要分布在黑龙江东部、吉林西部以及辽宁中东部;黑龙江西南部和东部、吉林西部和东部以及辽宁大部是 7 月干旱高发区;黑龙江西北部和东北部、吉林中部及辽宁东部是 8 月干旱的高发区;9 月干旱主要分布在黑龙江西部、吉林西南部和东部以及辽宁东南部区域;10 月干旱则主要分布在黑龙江大部和辽宁环渤海北部地区。

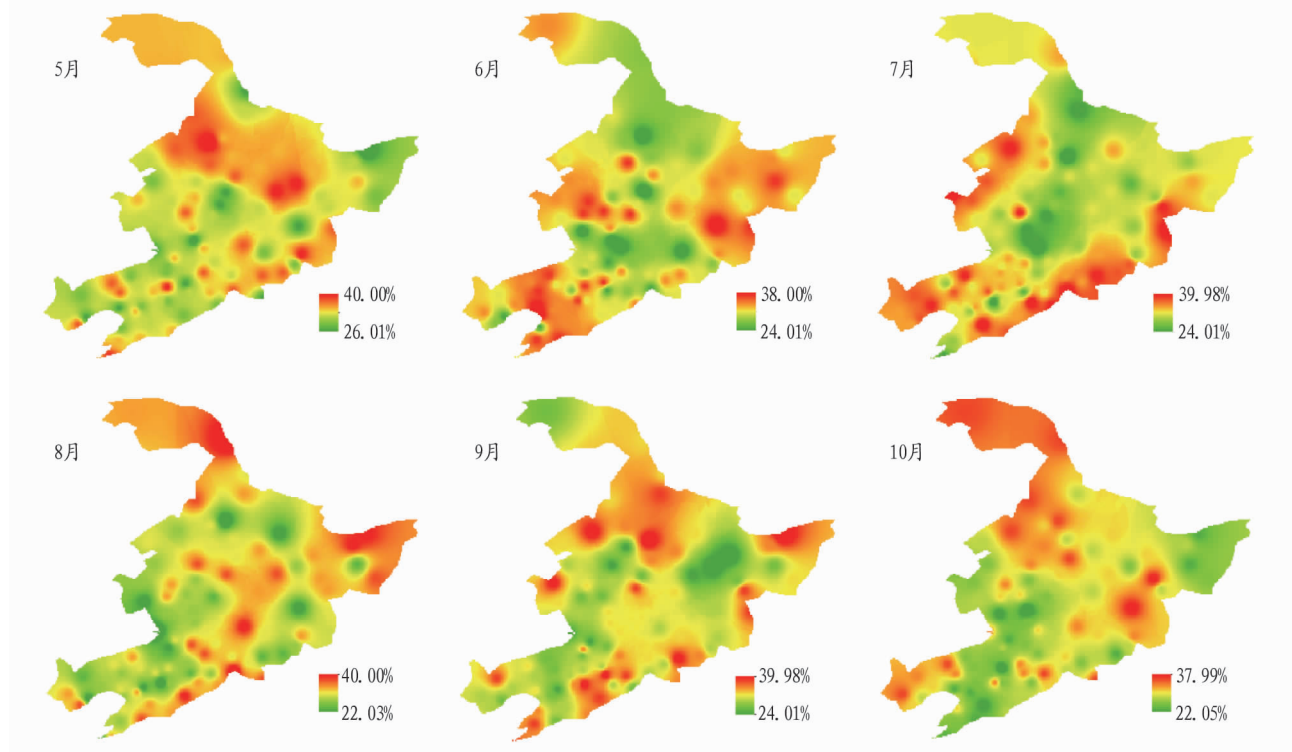


图 3 农作物生长季各月干旱频率分布

Fig. 3 Distribution of drought frequency in each month of the crop growing season

3 讨论

农作物生长季干旱直接影响粮食生产,如何度量生长季

干旱是必须首先直面的问题。张运福等^[16]以 9 月份 6 个月时间尺度的 SPEI 分析辽宁的生长季干旱,韦潇宇等^[17]利用

半年时间尺度的10月SPEI度量华北平原夏玉米整个生长季的干旱状况。有关东北生长季干旱的研究多以5—9月为研究时段^[9-10],该研究首先利用农作物生长季多时间尺度的SPEI指数与作物因旱受灾面积进行相关分析,结果表明SPEI₄₋₈和受旱面积相关性最高。研究区主要作物一般在4月中下旬或5月播种,9—10月进入成熟收获期,据分析该区域春旱和夏伏旱较多,秋旱比较少,且9月和10月大多作物已经度过需水关键期,即使发生气象干旱,作物也不一定受灾。虽然4月轻旱发生的频率高、极端干旱在4月和10月发生频率较高,由于为作物生长阶段初期和末期,与作物受旱面积相关性较小。SPEI₁₋₉与农作物受旱面积相关性低,同时考虑8、9月水分条件(SPEI₂₋₉),相关程度大大提升,从侧面反映了8月水分供给状况对农作物生长有重要影响。

该研究利用基于Penman-Monteith蒸散模型得到的1968—2017年的SPEI指数对东北地区农作物生长季进行干旱趋势和突变分析,发现SPEI以1983年为突变点由干转湿,总体上呈增大趋势,这与沈国强等^[8]利用时空模态分析方法对1961—2014年SPEI的年均变量场进行分解得到的结论类似;与Yu等^[9]利用M-K趋势分析得到1965—1983年降水显著减少,1996—2009年干旱范围和强度更严重,整体上干旱风险加重的结论不完全一致,主要因为其仅考虑了降水对干旱的影响。计算东北1968—2017年5—9月的累计降水,发现59.6%的站点呈减少趋势,但有92.1%的站点潜在蒸散减少,说明该区域虽然降水减少,但需水量降低,而1968—2008年降水和潜在蒸散减少的站点占比分别是79.8%和94.4%,说明研究时段的不同也会对结果造成一定影响。与陈莉等^[10]的东北地区生长季干旱呈增加趋势的结论有所差异,认为主要由于研究时段及考虑干旱的时间尺度不同造成的。

该研究通过对点状数据插值,得到干旱频率空间分布特征,但点状数据的代表性及空间分布的局限性给结论带来一定的不确定性,因此在研究农业干旱的过程中,将具有代表性的点状数据与遥感等面状数据综合起来,可能会得到更客观的结果。

4 结论

SPEI₄₋₈更能反映研究区生长季农作物受旱面积,以其表征东北地区整个农作物生长季的干旱状况。在此基础上,分析了东北地区农作物生长季干旱变化的时空特征。东北地区农作物生长季的SPEI整体上有增大趋势,即呈现湿润化。9月份出现干旱化趋势,其他月份均呈现湿润化趋势,其中4月和10月份湿润化显著。1983年是由干转湿的突变

点。黑龙江省西南部农作物生长季干旱呈减轻趋势,且表现显著;辽宁省干旱化的范围比吉林和黑龙江省明显,但均未达到0.05的显著水平。

生长季前期发生干旱的频率大于后期。4月和5月轻旱发生频率高;中旱7月发生频次高;重旱6月发生频率明显高于其他月份;极端干旱在4月和10月发生频率较高,8月较低。不同月份干旱的高发区也各不相同。

总体而言,5—8月是需要重点关注农业干旱的时期,5月发生干旱的频率最高,其他依次是7、6、8月,6月发生重旱频率明显高于其他月份,因此,既要注意春播缺墒情况的发生,也要防范夏伏旱带来的不利影响。9月虽有干旱化趋势,但对作物的影响有限。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. 2007中国水旱灾害公报[EB/OL]. (2007-12-31)[2019-09-15]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgh/zgshzhgh/201612/120161222_776085.html.
- [2] 王亚平,黄耀,张稳. 中国东北三省1960—2005年地干干燥度变化趋势[J]. 地球科学进展, 2008, 23(6): 619-627.
- [3] 马柱国,符宗斌. 1951~2004年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [4] 孙滨峰,赵红,王效科. 基于标准化降水蒸发指数(SPEI)的东北干旱时空特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 22-28.
- [5] 李明,胡炜霞,张蓬芝,等. 基于SPEI的东北地区气象干旱风险分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(7): 134-139.
- [6] 李明,王贵文,张蓬芝. 基于SPEI的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 65-70.
- [7] 蔡思扬,左德鹏,徐宗学,等. 基于SPEI干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 15-21.
- [8] 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[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [9] YU X Y, HE X Y, ZHENG H F, et al. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China[J]. Natural hazards, 2014, 71(1): 275-289.
- [10] 陈莉,方丽娟,李帅. 东北地区近50年农作物生长季干旱趋势研究[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 5-10.
- [11] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [12] 沈国强,郑海峰,雷振锋. 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, 2017, 37(11): 3787-3795.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [14] 康淑媛,张勃,柳景峰,等. 基于Mann-Kendall法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 501-508.
- [15] SOLTANI M, ROUSTA I, MODIR TAHERI S S. Using Mann-Kendall and time series techniques for statistical analysis of long-term precipitation in gorgan weather station[J]. World applied sciences journal, 2013, 28(7): 902-908.
- [16] 张运福,房一禾,龚强. 基于SPEI指数的辽宁省生长季干旱时空特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 190-197.
- [17] 韦潇宇,胡琦,马雪晴,等. 基于SPEI的华北平原夏玉米生长季干旱时空变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 554-560, 577.
- [18] 余新,钟辉丽,曹凯,等. 不同配比有机基质对番茄生长及品质和产量的影响[J]. 北方园艺, 2013(18): 9-11.
- [19] 赵斌,郝水源,朱圣杰,等. 养分配比对加工番茄产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(35): 54-55.
- [20] 朱婷婷,姜波. 加工番茄品质与影响因素的相关性分析[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(21): 5334-5337.
- [21] 余超. 对新疆加工番茄丸粒化和精量播种的思考[J]. 种子世界, 2004(5): 32-34.
- [22] 刘心雨,代数伟,王伟. 新疆加工番茄高产群体特征分析[J]. 新疆农业科技, 2014(3): 9-12.
- [23] 张余洋,李芳,郭玲,等. 加工番茄果实品质研究初报[J]. 中国蔬菜, 2010(20): 32-37.

(上接第54页)