

DOI: 10.5846/stxb202009112367

曹永强, 李玲慧, 路洁, 张若凝. 基于 SPEI 的辽宁省玉米生育期干旱特征分析. 生态学报, 2021, 41(18): 7367-7379.

Cao Y Q, Li L H, Lu J, Zhang R N. Analysis of drought characteristics of maize growth period in Liaoning Province based on SPEI. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7367-7379.

基于 SPEI 的辽宁省玉米生育期干旱特征分析

曹永强*, 李玲慧, 路洁, 张若凝

辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

摘要: 在全球气候变暖的背景下, 探究玉米生育期的气候变化及干旱特征, 对于预防干旱灾害对作物造成的损失, 以及农业可持续发展意义重大。基于 1967—2018 年辽宁省 33 个国家级气象站逐日观测数据, 计算了不同月尺度下玉米各生育期标准降水蒸散指数 (SPEI), 并结合干旱频率及干旱站次比综合分析了干旱时空变化情况。结果表明: (1) 辽宁省玉米生育期降水量以 13.31 mm/10a 的速率减少, 与 SPEI 呈显著正相关 ($P < 0.01$); 气温以 0.25℃/10a 的速率显著上升 ($P < 0.01$), 与 SPEI 呈负相关。(2) 播种-出苗期、出苗-拔节期和喇叭口期 SPEI 在时间上均呈上升趋势, 抽雄期和成熟期呈降低趋势; 在空间上全生育期 SPEI 表现为西北向东南递增趋势。(3) 全生育期干旱站次比以 0.41%/10a 的速率上升; 出苗-拔节期干旱站次比呈减少趋势, 其他生育阶段均呈上升趋势; 发生干旱类型频次区域性干旱 > 部分区域性干旱 > 局域性干旱 > 全域性干旱。(4) 全生育期干旱频率整体呈现出由西北向东南递减的特征, 且干旱频发区主要在辽西地区; 干旱发生频率轻旱 > 中旱 > 重旱 > 特旱。(5) 出苗-拔节期为干旱站次比最高的时期; SPEI 平均值和不同等级干旱频率最高的时期均为播种-出苗期。该研究成果可为区域农业干旱风险评估以及抗灾减灾等提供参考。

关键词: 干旱频率; SPEI; 玉米生育期; 气候变化; 辽宁省

Analysis of drought characteristics of maize growth period in Liaoning Province based on SPEI

CAO Yongqiang*, LI Linghui, LU Jie, ZHANG Ruoning

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: In the context of global warming, it is of great significance to explore the climate change and drought characteristics of maize growth period for preventing crop loss caused by drought disaster and agricultural sustainable development. Based on the daily observation data of 33 national meteorological stations in Liaoning Province from 1967 to 2018, this study calculated the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) at different growth stages of maize on monthly scales, and comprehensively analyzed the temporal and spatial variation of drought with the combination of drought frequency and drought station ratio. The results showed that: (1) the precipitation in the growth period of maize in Liaoning Province decreased by 13.31 mm/10a, which was significantly positively correlated with SPEI ($P < 0.01$); temperature increased significantly at a rate of 0.25℃/10a ($P < 0.01$), which was negatively correlated with SPEI. (2) In sowing-seedling stage, emergence-jointing stage and bell-mouth stage, SPEI all showed an upward trend, while in tasseling stage and maturation stage showed a downward trend. In terms of spatial variation, SPEI showed an increasing trend from northwest to southeast in the whole growth period. (3) During the whole growth period, the drought station ratio increased at a rate of 0.41%/10a. In the emergence-jointing stage, the ratio of drought stations decreased, while in other growth

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079060, 51779114); 辽宁省重点研发计划项目 (2020JH2/10200043)

收稿日期: 2020-09-11; **网络出版日期:** 2021-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

stages, it increased. The frequency of different drought types manifested as regional drought > partial regional drought > local drought > all regional drought. (4) The drought frequency of the whole growth period showed a characteristic of decreasing from northwest to southeast, and the drought-prone area was mainly in western Liaoning; and the drought frequency showed in order of light drought > medium drought > heavy drought > severe drought. (5) The emergence-jointing stage was the period with the highest drought station ratio; the highest average SPEI and the drought frequency of different grades were both in the sowing-seedling stage. The research results can provide reference for regional agricultural drought risk assessment and disaster mitigation.

Key Words: drought frequency; SPEI; maize growth period; climate change; Liaoning Province

气候是影响人类生产生活的众多地理环境要素之一,气候变化是人地关系领域研究的热点与前沿^[1]。近年来,全球气候的复杂多变已引起世界诸多国家干旱自然灾害频发,未来全球极端气象灾害仍将持续恶化^[2-3]。在全球气候变化的背景下,近 50 年来,中国地表约增温 1.1℃,速率达 0.25℃/10a,东部地区降水量相对减少^[4-5]。升温可直接引发干旱,当降水量在一定时期持续少于正常状态时,河湖水资源量、土壤含水量会相应减少,从而引发干旱^[6-7]。据统计,气象灾害在我国自然灾害中占比超过 70%,其中旱灾造成的损失高达 50%以上^[8]。研究干旱灾害发生规律并采取应对策略缓解灾损已成为当下科学研究的重点。

目前,国内外研究和使用的干旱指标已有近百种,代表性的有 McKee 等提出的标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI),该指数仅考虑降水这一因素,由于计算简单并可进行多种尺度干旱的表征,是目前应用较广的干旱指标之一^[9]。国内针对农业干旱评估的气象类指标包括降水 Z 指数、作物水分亏缺指数和综合气象干旱指数等^[10-13]。如苏永秀等基于水分盈亏原理提出的一种干旱指标,在水稻和甘蔗方面取得了较好应用^[14]。马晓群等在相对湿润指数的基础上添加了前期干旱的累积影响,构建出新的干旱指标,并利用土壤墒情数据检验其对江淮地区农业干旱的监测效果,结果表明具有很强的适用性^[15]。张强等提出了综合气象干旱指数 (Comprehensive Meteorological Drought Index, CI),这一指数同时结合了相对湿润指数和 SPI,目前已广泛应用于气象部门^[16]。Vicente-Serrano 等提出的标准降水蒸散指数 (Standard Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 受到国内外学者的广泛认可,在干旱评估、水资源管理等方面具有较高的科学性和实用性,该指数吸收了帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI) 和 SPI 表征干旱的优势,具有空间一致性、多时间尺度且计算简单等多重优点^[17-20]。因此,经综合比较,本文选取 SPEI 作为干旱指标进行研究,这对辽宁省农业种植规划有着十分重要的研究价值。

在众多干旱指标提出的基础上,干旱规律研究一直是国内外热点问题。例如,Edossa 等^[21]使用 PDSI 研究 1981—2015 年尼日利亚北部地区的干旱事件,结果表明,1998—2001 年和 2006—2008 年为干旱较为严重的时期。李伟光等^[22]利用 SPEI 评价了中国 1951—2009 年干旱的时空分布规律,发现我国四季均有干旱情况发生,且西部、华北和东北地区旱情较为严重;吴霞等^[23]基于 SPI 构建了夏玉米干旱指数,进而分析了 1961—2015 年黄淮海平原夏玉米在生长季内的干旱情况,结果表明,黄淮海地区夏玉米在生长阶段的干旱较严重。综合以上干旱方面的研究成果分析发现,这些研究大多集中在从气候角度和单一尺度等单方面入手,或仅结合单一的受旱面积、受灾站次比等参考指标来反映某一地区干旱特征,缺少综合多尺度、多因素、多指标的全面分析。因此,本文在前人研究的基础上,首先分析影响辽宁省玉米生育期干旱的两个关键气候因素 (降水量和气温) 的变化趋势,以 SPEI 作为干旱特征的评价标准,综合不同尺度 (2 个月、6 个月) 对其进行分析,同时结合辽宁省玉米完整生育期、旱灾不同影响因素等,选取干旱站次比和干旱频率全面研究区域农业旱灾特征^[24-26],并对气候变化与干旱的相关性进行分析,以期为进一步区域农作物干旱灾损评估及相应防灾减灾政策的制定等提供科学依据。

1 研究区概况

辽宁省地处欧亚大陆东岸、东北地区南部,按照地理空间分布情况可划分为辽西、辽南、辽中、辽东和辽北

5 个分区^[27]。年日照时数 1800—2400 h, 平均气温 6—10℃, 降水量 200—1000 mm, 气候条件非常适宜玉米的生长发育^[28-29]。省内玉米种植面积较广, 2018 年玉米播种面积 2712.98 千公顷, 占粮食总播种面积的 77.87%。辽宁省是我国粮食生产核心区, 玉米为其主要生产作物之一^[30]。近年来, 在全球气候变化的影响下, 辽宁省气温有所升高, 而日照和降水减少, 同时伴有旱涝灾害发生, 气候因素的改变影响了玉米等作物的生长发育, 从而对农业生产带来了不可小觑的影响^[31-32]。

2 资料与方法

2.1 数据来源

联合国粮食及农业组织 (FAO) 建议将作物的生育期划分为初期、发育期、中期和后期四个阶段^[33]。本文在此基础上依据辽宁省具体情况和实际生产状况, 进一步将辽宁省玉米生育期细化为 4—9 月, 包括播种-出苗期 (4 月上旬—5 月上旬)、出苗-拔节期 (5 月中旬—6 月中旬)、喇叭口期 (6 月下旬—7 月中旬)、抽雄期 (7 月下旬—8 月中旬) 和成熟期 (8 月下旬—9 月下旬) 5 个阶段^[27, 34]。本研究选用的气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/wa>) 1967—2018 年 4—9 月辽宁省逐日气象观测数据, 包括降水量、平均气温、湿度等。为保证空间插值精度, 选取辽宁省玉米种植区内分布均匀且连续性较好的 33 个国家级气象台站进行分析。辽宁省地理位置及气象台站分布情况如图 1 所示。

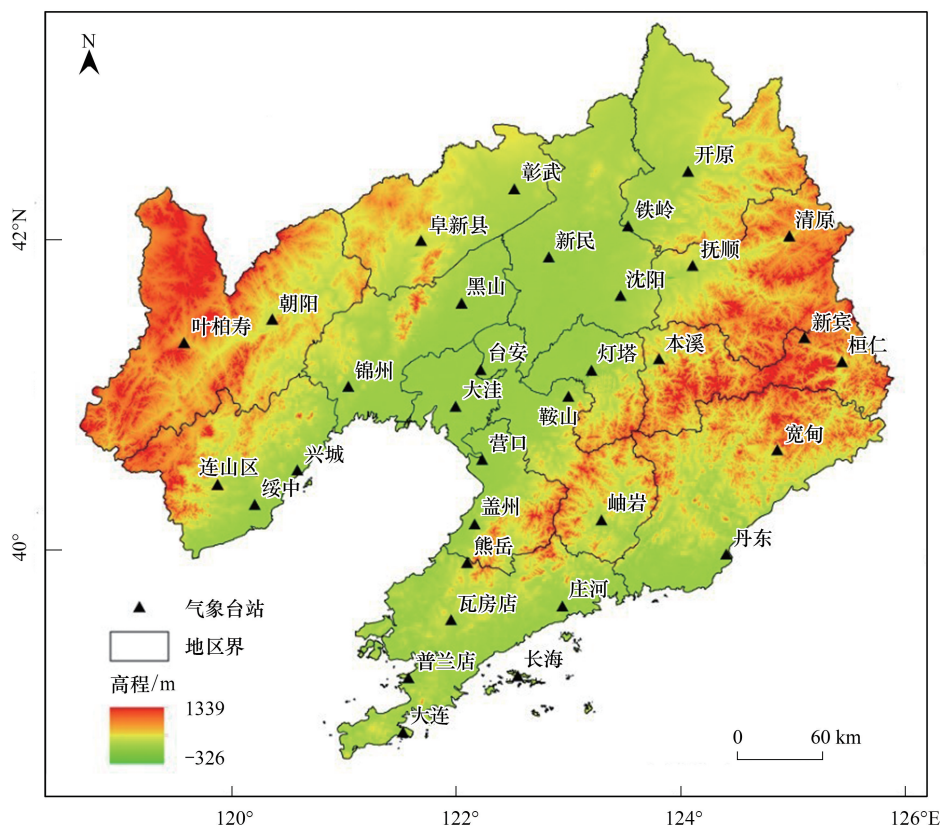


图 1 辽宁省气象台站分布

Fig.1 The distribution of meteorological stations in Liaoning Province

2.2 研究方法

2.2.1 SPEI 计算

SPEI 的计算主要利用月降水量和月平均温度等气象数据, 通过计算降水量与蒸散量的差值并将其正态标准化得到。具体计算步骤如下:

(1) 计算降水量与蒸散量差值,即气候水平衡:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

式中: D_i 为第*i*月降水量与蒸散量的差值(mm); P_i 为第*i*月降水量(mm); PET_i 为第*i*月潜在蒸散量(mm),采用FAO推荐的Penman-Monteith法进行计算,详见文献^[33]。

(2) 建立不同时间尺度气候学意义上的水分盈亏累积序列:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}), n \geq k \quad (2)$$

式中: k 为时间尺度(月); n 为计算次数。

(3) 采用3参数的Log-Logistic概率分布 $F(x)$ 对 D 序列进行拟合,并对序列进行标准正态分布转化,计算每个 D 对应的SPEI值:

$$SPEI = w - \frac{c_0 - c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}, w = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (3)$$

式中, P 为超过待定 D 值的累积概率,当 $P>0.5$ 时,SPEI值的符号被逆转; $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$, $d_3=0.001308$ 。

SPEI的计算可采用以月为单位的不同时间尺度^[35],考虑到辽宁省玉米生长期集中在4—9月,因此6个月尺度的SPEI(6-SPEI-Sep)表征其整个生育期干旱情况,为进一步比较玉米不同生育阶段的干旱情况,选择2个月尺度的参数计算并提取所有站点的2-SPEI-May(播种-出苗期)、2-SPEI-Jun(出苗-拔节期)、2-SPEI-Jul(喇叭口期)、2-SPEI-Aug(抽雄期)及2-SPEI-Sep(成熟期)。

2.2.2 干旱频率

干旱频率用来评价研究区某气象站在研究时间段内干旱频发的程度^[36],计算式为:

$$F_i = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中, F_i 表示干旱频率(%); N 为统计时段总年数; n 为统计时段内该生育阶段某等级干旱发生的次数。参考《中华人民共和国国家标准气象干旱等级》(GB/T 20481—2017),将SPEI分为5个干旱等级:无旱($SPEI>-0.5$)、轻旱($-1.0<SPEI\leq-0.5$)、中旱($-1.5<SPEI\leq-1.0$)、重旱($-2.0<SPEI\leq-1.5$)和特旱($SPEI\leq-2.0$)。

2.2.3 干旱站次比

用研究区内发生干旱气象站数量占全部气象站数量的占比来评价干旱影响范围的大小^[37],计算式为:

$$P_j = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (5)$$

式中, P_j 为干旱站次比(%); M 为研究区内气象站总数量; m 为某年发生干旱气象站点的数量。其中干旱影响范围等级可划分为5种:全域性干旱($P_j\geq 50\%$)、区域性干旱($50\%>P_j\geq 33\%$)、部分区域性干旱($33\%>P_j\geq 25\%$)、局域性干旱($25\%>P_j\geq 10\%$)和无明显干旱($P_j<10\%$)。

3 结果与分析

3.1 玉米生育期气候变化趋势

3.1.1 玉米生育期降水量变化趋势

玉米作为典型的高需水量作物之一,其生长发育过程中对降水量要求较高。同时降水量也是影响干旱的直接原因^[38]。因此,本研究从降水量入手,基于趋势分析法和Mann-Kendall突变检验法探究1967—2018年辽宁省玉米生育期降水量变化趋势,如图2所示。从全生育期来看,近52年降水量以13.31 mm/10a的速率减少,但变化趋势并不显著。其中,1985年和2010年达到该序列峰值,两年降水量均高于2700 mm。结合历史资料可知,2010年我国气候异常,以“康森”为首的共7次台风陆续登陆,在此影响下辽宁省自7月下旬开始发生强降雨,多站次日降雨量超过300 mm。此外,玉米各生育期降水量年际变化率如表1所示。可以看出

播种-出苗期、出苗-拔节期和抽雄期的多年平均降水量均呈上升趋势,速率分别为 8.03 mm/10a、12.15 mm/10a 和 0.10 mm/10a;而喇叭口期和成熟期降水量呈下降趋势,速率分别为-2.93 mm/10a 和-13.26 mm/10a。各生育期均未达到 0.05 显著性水平,说明玉米生育期间降水量变化并不显著。另外,根据 Mann-Kendall 突变检验法绘制 UF、UB 曲线,给定显著性水平 $\alpha=0.05$ ($u_{0.05}=\pm 1.96$),当曲线超过临界值线时,表明上升或下降趋势显著,超过临界线的范围确定为突变的时间区域。若两条曲线在临界线之间出现交点,则该点对应的时间为突变开始时间^[39]。图 2 中 UF、UB 曲线的交错情况发现其在临界线内有多处交点,但只结合其年际间变化趋势无法确定是否发生突变。

表 1 玉米各生育期降水量变化率/(mm/a)

Table 1 The rate of precipitation change in each growth period of maize					
生育期 Growth period	播种-出苗期 Sowing-seedling stage	出苗-拔节期 Emergence-jointing stage	喇叭口期 Bell-mouth stage	抽雄期 Tasseling stage	成熟期 Maturation stage
变化率 Rate of change	0.803	1.215	-0.293	0.010	-1.326

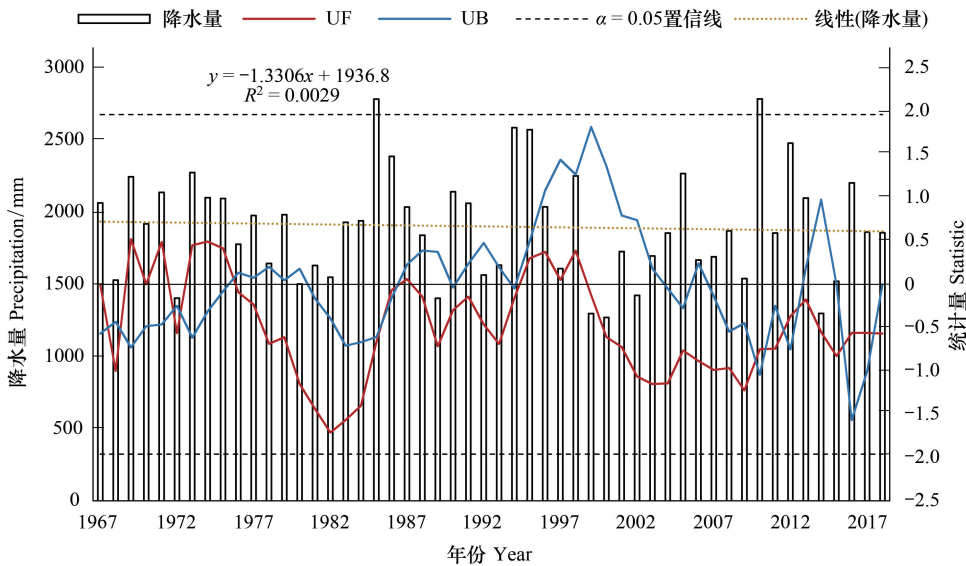


图 2 辽宁省玉米生育期降水量年际变化及其 Mann-Kendall 突变检验

Fig.2 The interannual precipitation changes and Mann-Kendall mutation test in the growth period of maize in Liaoning Province

UF:M-K 秩统计量正序列;UB:M-K 秩统计量反序列

3.1.2 玉米生育期气温变化趋势

高温也是引发干旱的主要原因之一。玉米作为喜温植物,气温对其生长发育有关键作用^[40]。平均气温的年际变化趋势及其 Mann-Kendall 突变检验结果如图 3 所示,近 52 年辽宁省玉米生育期平均气温为 19.09℃,并且以 0.25℃/10a 的速率显著上升($P<0.01$)。2000 年后 UF 曲线超过 0.05 显著性水平临界线,表明此增暖趋势开始显著。由 UF 和 UB 曲线的交点可知,1991 年起增暖速率是突变上升的。利用小波分析法对 1967—2018 年辽宁省玉米生育期平均气温进行周期分析,结果如图 4 所示。1967—2018 年辽宁省平均气温在 30—45 年尺度上振荡周期最为明显,高低值变化交替出现。结合小波方差分析图进一步分析可知,辽宁省玉米生育期平均气温在 35 年左右尺度下的小波方差极值最大,是主周期;其次在 20 年左右还存在一个峰值,峰值数值较小,为次周期,即辽宁省玉米生育期平均气温在 35 年左右会经历由高到低的变化过程。

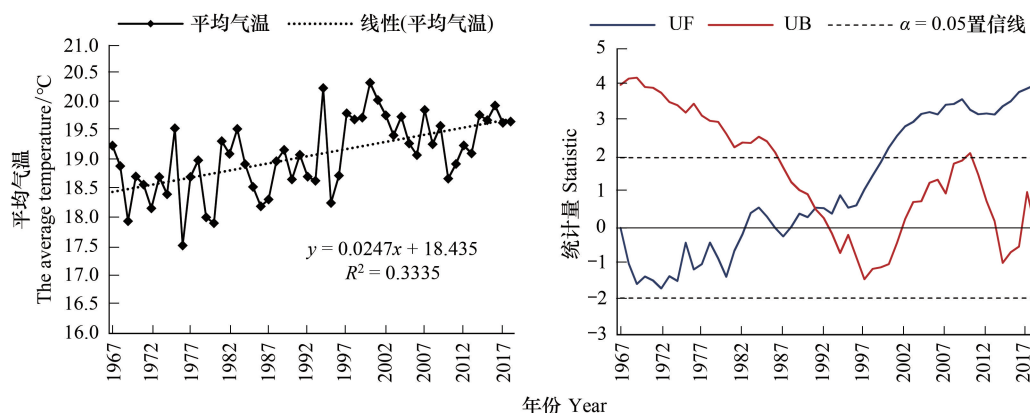


图3 辽宁省玉米生育期平均气温年际变化及其 Mann-Kendall 突变检验

Fig.3 The interannual variation of mean temperature during the growth period of maize and Mann-Kendall mutation test in Liaoning Province

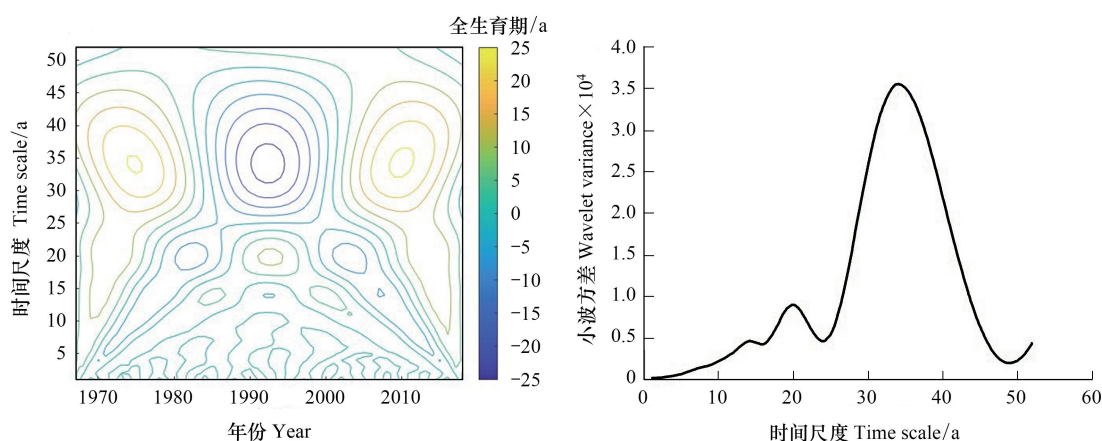


图4 1967—2018 年辽宁省玉米生育期平均气温小波变化分析

Fig.4 The wavelet change analysis of mean temperature during the growth period of maize in Liaoning Province from 1967 to 2018

3.2 玉米生育期 SPEI 时空分布特征

3.2.1 不同区域玉米生育期 SPEI 时间变化特征

为能更加具体直观地分析辽宁省玉米生育期干旱特征,以 SPEI 为指标对辽宁省进行分区研究,各区 SPEI 年际变化率见表 2。具体来看,在播种-出苗期,全区 SPEI 基本呈上升趋势,升幅表现为辽西>辽东>辽南>辽中>辽北,其中辽西和辽东在 4 月中旬均呈显著上升趋势(显著水平分别为 0.01 和 0.05),辽北在 4 月上旬呈显著下降趋势($P<0.01$);在出苗-拔节期,辽西、辽南、辽中和辽北基本呈上升趋势,上升幅度表现为辽西>辽北>辽中>辽南,且辽西 6 月上旬呈显著上升趋势($P<0.05$),而辽东 SPEI 则呈减小趋势;在喇叭口期和抽雄期,全区 SPEI 均呈总体上升趋势,上升幅度分别表现为辽北>辽南>辽西>辽中>辽东、辽西>辽中>辽南>辽东>辽北,辽东和辽西在 8 月中旬上升显著;在成熟期,辽西、辽南和辽中 SPEI 呈上升趋势,其中辽西上升幅度最大,辽中 9 月下旬显著上升($P<0.05$),辽东和辽北 SPEI 呈下降趋势,辽北在 9 月中旬下降趋势尤为显著($P<0.01$)。综上,播种-出苗期、出苗-拔节期、抽雄期和成熟期 SPEI 上升趋势均主要表现在辽西,喇叭口期则主要表现在辽北。

表 2 辽宁省各地区 SPEI 年际变化率/10a
Table 2 Annual change rate of SPEI in all regions of Liaoning Province

生育期 Growth period	时间 Time	辽西 Western part of Liaoning Province	辽南 South part of Liaoning Province	辽中 Centra part of Liaoning Province	辽东 East part of Liaoning Province	辽北 North part of Liaoning Province
播种-出苗期 Sowing-seedling stage	4 月上旬	0.230	0.876	0.219	0.418	-1.023 **
	4 月中旬	1.262 **	0.126	0.197	0.409 *	0.547
	4 月下旬	0.596	0.036	0.131	0.107	0.305
出苗-拔节期 Emergence-jointing stage	5 月上旬	0.002	-0.369	0.121	-0.191	0.210
	5 月中旬	0.585	0.092	0.111	0.234	0.191
	5 月下旬	0.086	0.281	0.156	0.080	0.131
喇叭口期 Bell-mouth stage	6 月上旬	0.955 *	-0.225	-0.135	-0.468	-0.176
	6 月中旬	0.417	-0.041	0.067	0.092	0.408
	6 月下旬	0.021	0.392	0.151	0.245	0.320
抽雄期 Tasseling stage	7 月上旬	0.173	-0.013	0.045	-0.136	0.245
	7 月中旬	0.106	0.103	0.100	0.059	0.150
	7 月下旬	0.200	0.244	0.139	0.023	0.140
成熟期 Maturation stage	8 月上旬	-0.080	0.438	0.079	-0.258	0.123
	8 月中旬	0.847 *	0.114	0.604	0.891 **	0.097
	8 月下旬	0.165	0.112	0.184	0.124	0.267
	9 月上旬	0.015	-0.112	-0.029	-0.087	0.006
	9 月中旬	0.669	0.151	0.188	0.261	-0.897 **
	9 月下旬	0.638	0.206	0.335 *	-0.559 *	0.042

SPEI:标准降水蒸散指数 Standard precipitation evapotranspiration index; * 表示通过 0.05 显著性水平检验; ** 表示通过 0.01 显著性水平检验

3.2.2 玉米生育期 SPEI 空间分布特征

辽宁省玉米各生育期 SPEI 空间分布见图 5。总体来看,全生育期 SPEI 表现为西北向东南递增趋势,即东南向西北越来越干旱,其中 SPEI 最小值出现在朝阳站,为-1.30。具体来看,播种-出苗期 SPEI 表现为由西向东递增,说明由东向西干旱程度加剧,最低值出现在兴城站(-2.00);出苗-拔节期和喇叭口期 SPEI 均表现为东北和西部高,南部和中部相对较低的分布特征,最低值分别为-1.95(彰武站)和-1.97(熊岳站);抽雄期和成熟期 SPEI 表现为由南向北递减,北部相对南部干旱严重,最低值均出现在彰武站,分别为-2.44 和-1.87。从各生育期 SPEI 平均值来看,播种-出苗期<出苗-拔节期<喇叭口期<成熟期<抽雄期。综上,辽宁省玉米不同生育期干旱情况总体表现为西北干旱程度最强,向东南逐渐减弱,其中,播种-出苗期干旱最强。

3.3 玉米生育期干旱时空分布特征

3.3.1 玉米生育期干旱站次比的时间变化

辽宁省玉米不同生育期干旱站次比和 SPEI 年际变化如图 6 所示。结合表 2 可知,1967—2018 年辽宁省玉米全生育期、播种-出苗期、出苗-拔节期和喇叭口期 SPEI 均呈上升趋势,抽雄期和成熟期 SPEI 呈降低趋势,变化均不显著。综上所述,玉米发生干旱强度表现为播种-出苗期>出苗-拔节期>成熟期>喇叭口期>抽雄期。在干旱站次比方面,经计算,1967—2018 年全生育期平均干旱站次比为 38.88%;播种-出苗期、出苗-拔节期、喇叭口期、抽雄期和成熟期分别为 34.24%、34.55%、33.94%、32.96%和 33.33%。全生育期干旱站次比呈微弱上升趋势,幅度为 0.41%/10a;其中,出苗-拔节期干旱站次比以 0.48%/10a 的速率减少,除此之外的播种-出苗期、喇叭口期、抽雄期和成熟期均呈增加趋势,幅度分别为 0.44%/10a、0.63%/10a、0.60%/10a 和 0.40%/10a。不同生育期干旱影响范围等级统计情况如表 3 所示,整体来看,辽宁省玉米生长过程中无全域性干旱或无明显干旱地区。其中,喇叭口期只发生过区域性和部分区域性干旱,其他时期均有区域性、部分区域性和局域性干旱发生。区域性干旱发生频次最高的是播种-出苗期,部分区域性干旱发生频次最高的是喇

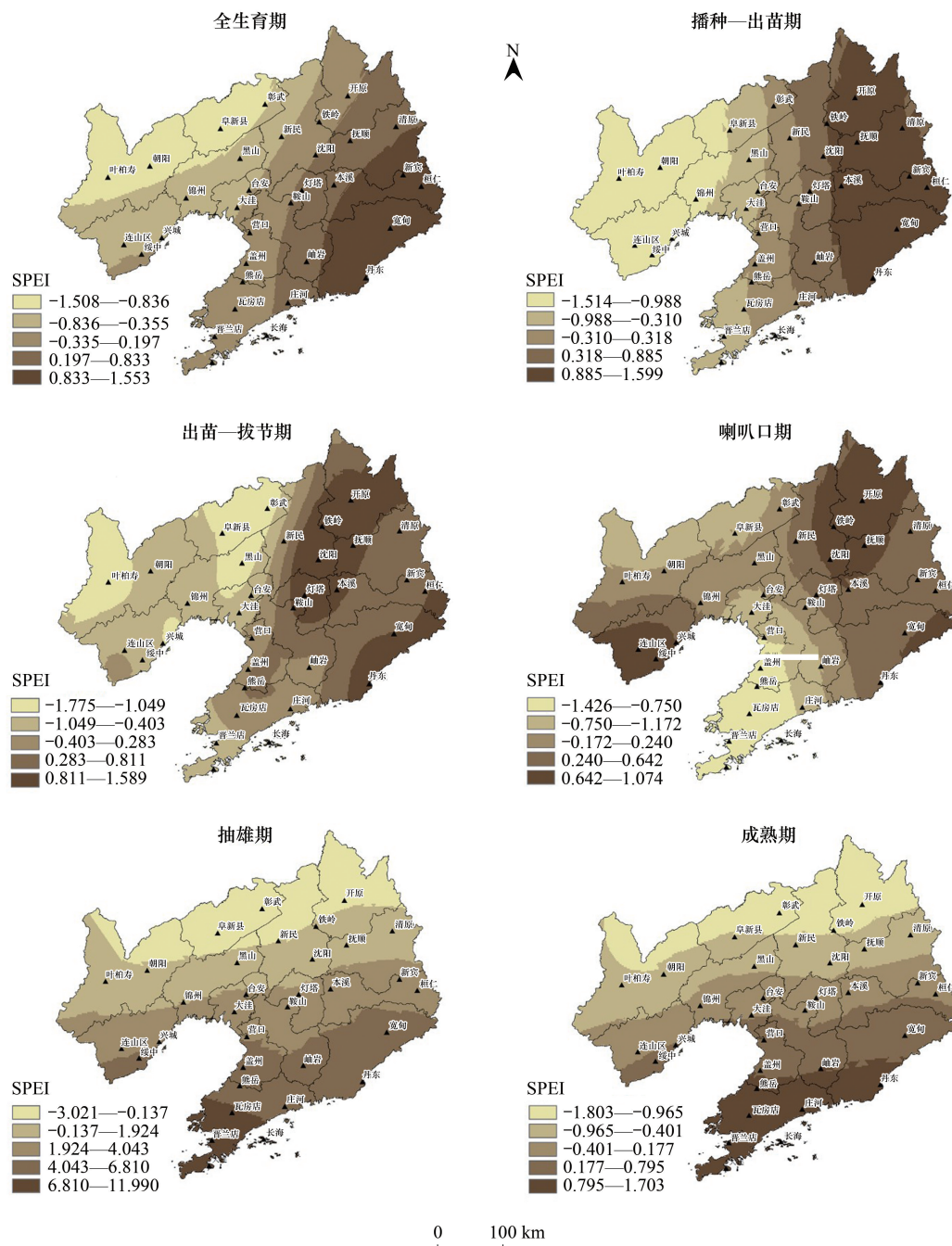


图5 1967—2018年辽宁省玉米各生育期 SPEI 空间分布

Fig.5 The spatial distribution of SPEI in various growth stages of maize in Liaoning Province from 1967 to 2018

SPEI: 标准降水蒸散指数 Standard precipitation evapotranspiration index

喇叭口期和抽雄期,局域性干旱发生频次最高的是成熟期。综上,辽宁省玉米全生育期发生干旱类型频次区域性干旱>部分区域性干旱>局域性干旱>全域性干旱,出苗-拔节期为干旱站次比最高的时期。

3.3.2 玉米生育期干旱频率的空间分布

1967—2018年辽宁省玉米各生育期不同等级干旱频率空间分布详见图7。由图7可知,在干旱发生频率方面,总体来看,辽宁省玉米全生育期干旱频率整体上呈现出由西北向东南递减的特征,干旱频率最大值出现在阜新站。受特殊地理位置和气候条件影响,阜新地区雨量较少且分布不均,加之风速较强,蒸发较快,导致

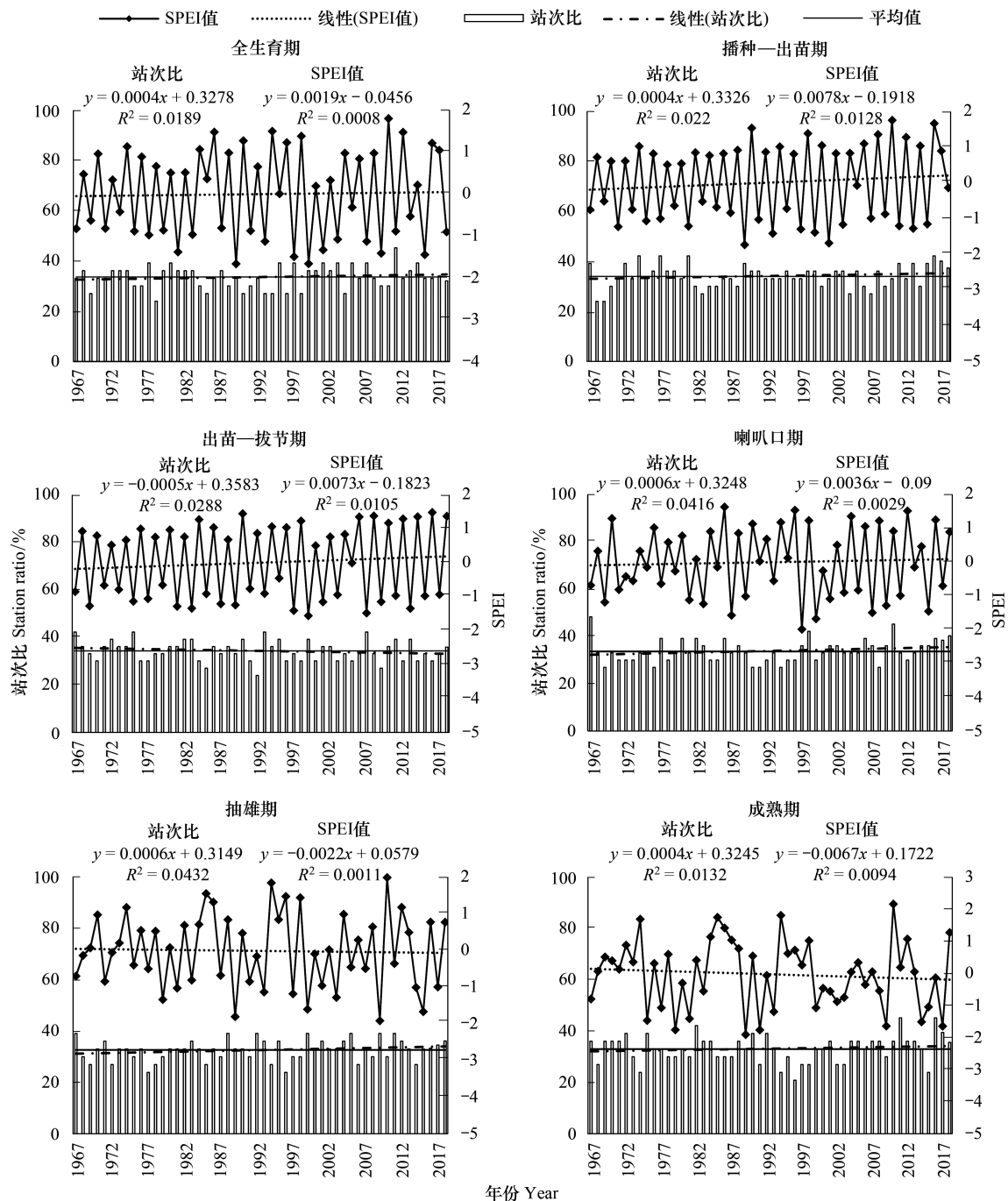


图 6 辽宁省玉米各生育期干旱站次比和 SPEI 值年际变化

Fig.6 The interannual changes of drought station ratio and SPEI values of maize in different growth periods in Liaoning Province

干旱次数多、程度重,尤以春旱显著,常常导致春播不能正常进行,农作物生长不利^[41]。具体来看,干旱频率在播种-出苗期表现为由辽西向辽东递减趋势;出苗-拔节期和成熟期表现为由西北向东南递减;喇叭口期表现为辽南和辽北最高,其次为辽中,辽西和辽东低;抽雄期表现为北部向南部递减。5个生育期干旱频率最高值均达到100%,分别出现在叶柏寿站、彰武站、盖州站、铁岭站和朝阳站。

在干旱等级方面,除喇叭口期外,全生育期和其他四个生育期不同等级干旱频率总体均表现为西北高东南低,且干旱程度为轻旱>中旱>重旱>特旱。播种-出苗期以轻旱为主,发生率为27.27%,有60.00%的站点轻旱频率大于20%,其中大连站轻旱、绥中站中旱、朝阳站重旱和兴城站特旱发生频率最高,分别达到86.00%、

94.00%、66.00%和 50.00%;出苗-拔节期未发生轻旱、中旱、重旱和特旱的站点占比分别为 69.70%、66.67%、81.82%和 90.91%,发生频率最大值分别出现在朝阳站(90.00%)、普兰店站(80.00%)、台安站(74.00%)和彰武站(34.00%);喇叭口期分别有 36.36%、24.24%、12.12%和 6.06%的站点发生轻旱、中旱、重旱和特旱,其发生频率最高值分别出现在庄河站(94.00%)、瓦房店站(88.00%)、大连站(74.00%)和熊岳站(48.00%);抽雄期分别有 30.30%、21.21%、12.12%和 6.06%的站点发生轻旱、中旱、重旱和特旱,其发生频率最高值分别出现在新民站、开原站、阜新站和彰武站,分别为 90.00%、86.00%、84.00%和 36.00%;成熟期的特旱发生频率最高,达 18.18%,超过重旱频率 15.15%,轻旱和中旱发生频率分别为 45.45%和 24.24%,其中,台安站发生轻旱频率最高(90.00%),开原站发生中旱频率最高(84.00%),阜新站发生重旱频率最高(66%),彰武站发生特旱频率最高(34.00%)。

表 3 玉米生育期干旱影响范围等级/%

Table 3 The influence range of drought in growth period of maize

生育期 Growth period	全域性干旱 All transit drought	区域性干旱 Regional drought	部分区域性干旱 Partial regional drought	局域性干旱 Local drought	无明显干旱 Unobvious drought
全生育期 The whole growth period	0.00	67.31	30.77	1.92	0.00
播种-出苗期 Sowing-seedling stage	0.00	73.08	23.08	3.85	0.00
出苗-拔节期 Emergence-jointing stage	0.00	69.23	28.85	1.92	0.00
喇叭口期 Bell-mouth stage	0.00	67.31	32.69	0.00	0.00
抽雄期 Tasseling stage	0.00	63.46	32.69	3.85	0.00
成熟期 Maturation stage	0.00	63.46	28.85	7.69	0.00

3.4 玉米生育期气候变化对干旱的影响

通过以上对辽宁省玉米生育期气温和降水量变化趋势的分析发现,近 52 年降水量表现为减少趋势,而平均气温显著上升,这种气候变化对于干旱的发生是十分有利的条件。为进一步厘清气候和干旱之间的相关性,借助 SPSS 17.0 分别对不同生育期的降水量、平均气温和 SPEI 进行皮尔逊相关性检验^[42](表 4)。结合上文对玉米生育期气候变化趋势的分析结果可知,整个玉米生育阶段降水量与 SPEI 呈显著正相关关系($P < 0.01$),而平均气温则与 SPEI 呈负相关关系,且未达到显著性水平,再次说明降水量越少、气温越高,干旱越严重,且降水量相比平均气温对干旱影响更为严重。具体来看,降水量和平均气温影响最大的时期均为成熟期、抽雄期和喇叭口期。这三个生育阶段覆盖了辽宁省夏季雨季最旺、温度最高的时期,降水量的大小和气温的高低可直接影响干旱的发生^[43]。相关部门应着重加强此三个阶段降水量和气温状况,做好玉米抗旱工作。

表 4 玉米生育期气候因素与 SPEI 相关系数

Table 4 The correlation coefficient between climatic factors and SPEI in maize growth period

气候因素 Climate factors	全生育期 The whole growth period	播种-出苗期 Sowing-seedling stage	出苗-拔节期 Emergence-jointing stage	喇叭口期 Bell-mouth stage	抽雄期 Tasselingstage	成熟期 Maturation stage
降水量 Precipitation	0.378 **	0.269	0.275	0.297 *	0.661 **	0.918 **
平均气温 Average temperature	-0.178	-0.102	-0.084	-0.164	-0.120	-0.190

* 表示通过 0.05 显著性水平检验; ** 表示通过 0.01 显著性水平检验

4 讨论

通过对玉米生育期干旱时空分布特征的分析发现,辽宁省玉米不同生育期不同等级干旱频率整体呈由西北向东南递减的分布特征,其中播种-出苗期不同等级干旱频率最高,且干旱频发区主要在辽西地区。一方面,辽宁省雨季大多集中在 6—9 月,且 4—5 月为雨季转换时期,干旱程度相对较强,播种-出苗期正处于这一

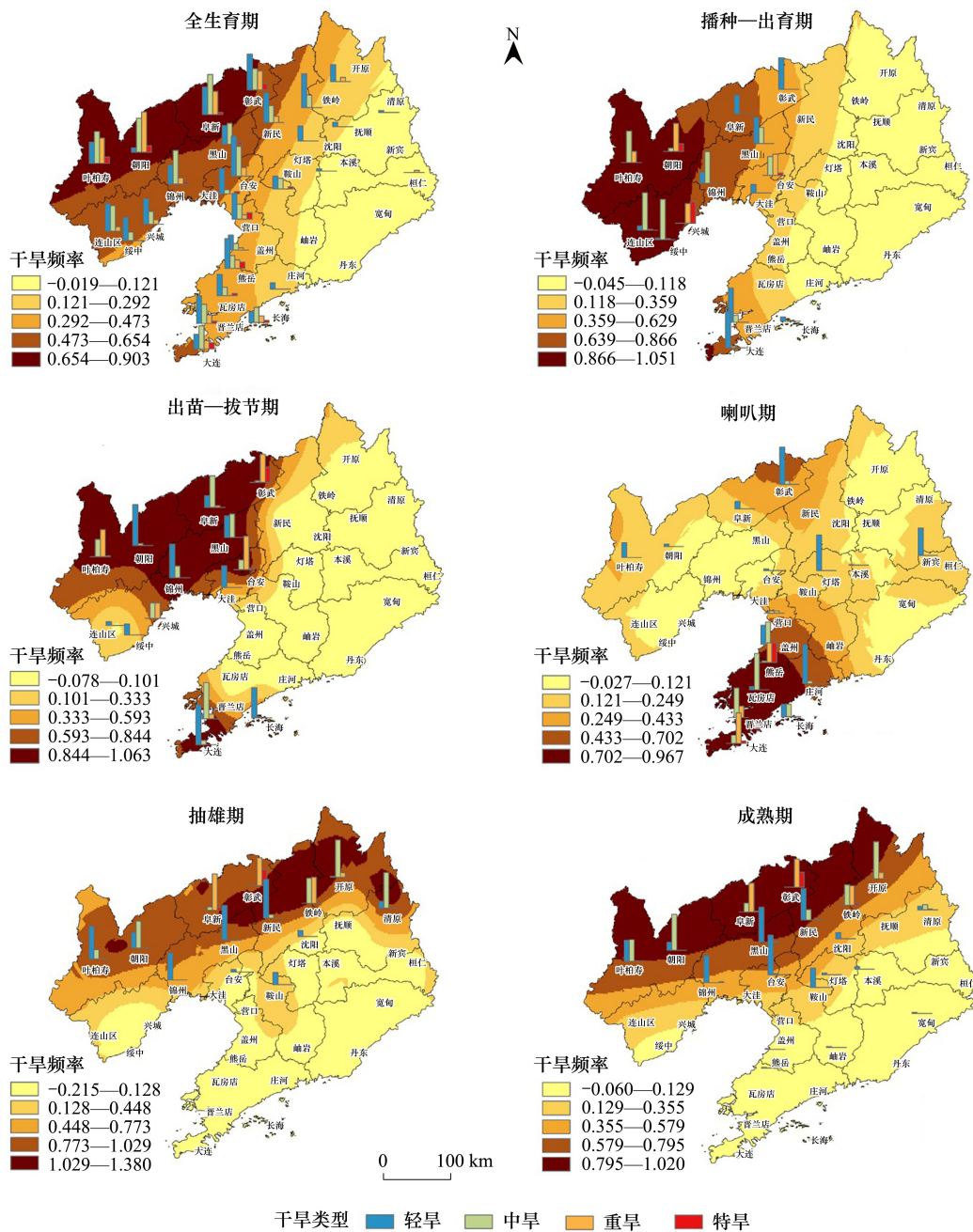


图 7 辽宁省玉米各生育期不同等级干旱发生频率空间分布

Fig.7 The spatial distribution of drought frequency at different grades in different growth stages of maize in Liaoning Province

时期;另一方面,受地理位置影响,辽宁西部为丘陵地区,属于干旱气候类型,极端高温事件频发,且降水量比较短缺,尤其西北部低山丘陵区是辽宁省湿度最低、干燥强度最大和旱灾高风险地区^[44],这也是阜新地区干旱频率最高的原因。

玉米是典型的喜温和高需水量作物,整个发育过程对气温及降水等气候条件要求较高^[45],干旱现象的发生必然对其生长发育产生影响。综合全文研究发现,对于玉米不同生育期 SPEI 的空间分布特征分析结果与干旱频率的空间分布特征结论一致,更加印证了辽宁省玉米不同生育期干旱特征总体表现为干旱程度由西北向东南递减,且播种-出苗期为干旱最严重的时期。播种-出苗期为玉米生育初始阶段,玉米在此期间需要吸收并储存大量养分,适宜的温度及降水有利于促进其体内的物质转换与运移,有益于其生长发育,从而提高产

量并提升甜度及颗粒饱满度^[46],因此玉米种植在此阶段应注重抗旱工作,以防旱灾造成玉米减产,另外,种植结构应根据干旱空间分布特征适当调整,优化作物布局,西北地区较东南地区干旱严重,更应加强抗旱减灾措施,改进农业管理模式。未来应针对干旱对玉米产量的影响关系及其对气候因素的响应进一步深入研究。

5 结论

(1)从气候因素变化趋势来看,近 52 年辽宁省玉米生育期降水量以 13.31 mm/10a 的速率减少,且与 SPEI 呈显著正相关($P<0.01$);平均气温以 0.25℃/10a 的速率显著上升($P<0.01$),主周期在 35 年左右,与 SPEI 呈负相关关系。

(2)从 SPEI 来看,抽雄期和成熟期 SPEI 呈降低趋势,其他 3 个时期均呈上升趋势;全生育期 SPEI 在空间上表现为西北向东南递增趋势,各生育期 SPEI 平均值播种-出苗期<出苗-拔节期<喇叭口期<成熟期<抽雄期。

(3)从干旱站次比来看,全生育期干旱站次比以 0.41%/10a 的速率上升;出苗-拔节期干旱站次比呈减少趋势,除此之外的 4 个时期均呈上升趋势;全生育期发生干旱类型频次区域性干旱>部分区域性干旱>局域性干旱>全域性干旱。

(4)从干旱发生频率来看,全生育期干旱频率整体呈现出由西北向东南递减的特征,干旱发生频率表现为轻旱>中旱>重旱>特旱;播种-出苗期不同等级干旱频率最高。

参考文献(References):

- [1] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展. 干旱气象, 2017, 35(5):709-723.
- [2] 阎莉. 辽西北玉米干旱脆弱性评价及区划研究[D]. 长春:东北师范大学, 2012.
- [3] 刘维,侯英雨,吴门新,魏丽. WOFOST 模型在东北春玉米产区的验证与适应性评价. 气象与环境科学, 2017, 40(3):7-13.
- [4] 牛晓栋,江洪,王帆. 天目山森林生态系统大气水汽稳定同位素组成的影响因素. 浙江农林大学学报, 2015, 32(3):327-334.
- [5] 陈明丽,丁志平. 1963—2012 年广宁县日照时数的变化特征. 广东气象, 2014, 36(6):28-31.
- [6] 陶然,张珂. 基于 PDSI 的中国近 30 年气象干旱特征及时空变化分析. 水资源保护. [2020-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20200713.1459.002.html>.
- [7] 屈艳萍,郦建强,吕娟,苏志诚,邱冰,李爱花. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术. 水科学进展, 2014, 25(2):297-304.
- [8] 刘维,李伟君,何亮,宋迎波. 基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响. 农业工程学报, 2018, 34(22):121-127.
- [9] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim: American Meteorological Society, 1993:179-183.
- [10] 费龙,邓国荣,张洪岩,郭笑怡,王晓东. 基于降水 Z 指数的朝鲜降水及早涝时空特征. 自然资源学报, 2020, 35(12):3051-3063.
- [11] Marcovitch S. The measure of droughtiness. Monthly Weather Review, 1930, 58(3):113-113.
- [12] McQuigg J. A simple index of drought conditions. Weatherwise, 1954, 7(3):64-67.
- [13] 李学文. 夏玉米生育期水分供需平衡状况及干旱时空特征[D]. 芜湖:安徽师范大学, 2018.
- [14] 苏永秀,李政,吕厚荃. 水分盈亏指数及其在农业干旱监测中的应用. 气象科技, 2008, 36(5):592-595.
- [15] 马晓群,吴文玉,张辉. 利用累积湿润指数分析江淮地区农业旱涝时空变化. 资源科学, 2008, 30(3):371-377.
- [16] 张强,鞠笑生,李淑华. 三种干旱指标的比较和新指标的确定. 气象科技, 1998, (2):48-52.
- [17] Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, Camarero J J, López-Moreno J I, Azorin-Molina C, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. Earth Interactions, 2012, 16(10):1-27.
- [18] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [19] Wang Q F, Wu J J, Lei T J, He B, Wu J T, Liu M, Mo X Y, Geng G P, Li X H, Zhou H K, Liu D C. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. Quaternary International, 2014, 349:10-21.
- [20] Matiu M, Ankerst D P, Menzel A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014. PLoS One, 2017, 12(5):e0178339.
- [21] Edossa D C, Woyessa Y E, Welderufael W A. Spatiotemporal analysis of droughts using self-calibrating Palmer's Drought Severity Index in the

- central region of South Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126(3/4):643-657.
- [22] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 陈汇林, 陈珍莉. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5):643-649.
- [23] 吴霞, 王培娟, 公衍铎, 杨建莹. 1961—2015 年黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析. *农业工程学报*, 2019, 35(18):189-199.
- [24] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 2002, 38(6):1068.
- [25] 曹永强, 齐静威, 王菲, 李玲慧, 路洁. 辽宁省潜在蒸散量演变规律及归因分析. *生态学报*, 2020, 40(10):3519-3525.
- [26] 史锐, 张红, 岳荣, 张霄羽, 王美萍, 石伟. 基于小波理论的干旱区内陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像遥感反演. *生态学报*, 2017, 37(3):1043-1053.
- [27] 曹永强, 李玲慧, 路洁, 张若凝, 宁月. 辽宁省玉米水分生产率时空变化规律及影响因素分析. *南水北调与水利科技(中英文)*. [2020-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200628.1405.002.html>.
- [28] 郝爽. 辽宁省 2019 年气候公报. *辽宁日报*, 2020-03-23(005).
- [29] 卢晓昱, 任传友, 王艳华. 气候变化背景下辽宁省未来气象干旱危险性风险评估. *自然灾害学报*, 2019, 28(1):65-75.
- [30] 曹永强, 冯兴兴, 李玲慧, 路洁. 气候变化下辽宁省春玉米水热时空特征及干旱风险研究. *生态学报*, 2021, (3). [2020-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20200717.1355.002.html>.
- [31] 徐丽娟, 李可用. 辽宁沿海经济带产业结构研究. *中国市场*, 2014, (8):11-13.
- [32] 刘洪敏. 1957—2009 年辽宁省气候变化趋势分析[D]. 兰州:西北师范大学, 2011.
- [33] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [34] 严俊. 基于作物水分亏缺指数的辽宁省玉米干旱时空变化特征分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- [35] 王芳, 王春乙, 郭定荣, 姚树然, 白月明, 张继权. 近 30 年中美玉米带生长季干旱特征的差异及成因分析. *中国农业气象*, 2018, 39(6):398-410.
- [36] 何斌, 刘志娟, 杨晓光, 孙爽. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(II):西北主要粮食作物干旱. *中国农业气象*, 2017, 38(1):31-41.
- [37] 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 冯利平, 黄彬香, 王靖, 施生锦, 武永峰, 张晓煜, 肖小平, 杨光立, 李茂松. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析. *农业工程学报*, 2010, 25(8):28-34.
- [38] 苏玉杰, 周景春, 张存岭, 陈若礼. 濉溪县夏玉米生产与气象因子关系分析. *玉米科学*, 2007, 15(S1):165-168.
- [39] Hirsch R M, Slack J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 1984, 20(6):727-732.
- [40] 王建迎, 李书平. 辽宁省玉米生产现状及发展前景. *国外农学—杂粮作物*, 1999, 19(6):45-49.
- [41] 蔡福, 张淑杰, 纪瑞鹏, 米娜, 武晋雯, 张玉书. 近 30 年辽宁玉米水分适宜度时空演变特征及农业干旱评估. *应用生态学报*, 2015, 26(1):233-240.
- [42] 胡添翼, 杨光, 陈波, 俞扬, 陶园. 基于 Pearson 相关性检验的 ARIMA 边坡位移监测模型. *水利水电技术*, 2016, 47(1):71-75.
- [43] 邓海军, 郭斌, 曹永强, 陈忠升, 张余庆, 陈兴伟, 高路, 陈莹, 刘梅冰. 1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局. *地理研究*. [2020-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1848.P.20200722.0921.002.html>.
- [44] 高淑新, 陈鹏心, 侯婉婷. 辽宁中西部气候干旱周期及降水满足程度研究. *湖北农业科学*, 2017, 56(22):4289-4294.
- [45] 姜修胜. 京津冀玉米生产技术效率比较分析[D]. 北京:北京农学院, 2017.
- [46] 徐玉秀, 蒋姗姗, 周福然, 温舟, 白雪, 史虹婷, 胡明, 张翠艳. 1981—2010 年锦州地区玉米生育期气象因子变化及其与气象产量的关系. *气象与环境学报*, 2017, 33(5):82-90.