

1961—2020年东北三省干旱时空分布特征

张筱渲, 王蕊*, 单凤君, 张婷婷, 王艺霖
(辽宁工业大学, 辽宁锦州 121000)

摘要:【目的】分析1961—2020年东北三省干旱时空分布格局。【方法】基于1961—2020年东北三省的86个气象站实测数据, 计算1961—2020年不同时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI), 并结合游程理论、Mann-Kendall检验、经验正交函数(EOF)分解等方法对东北三省的干旱时空变化特征进行分析。【结果】年尺度上, SPEI均呈缓慢减小趋势, 但整体上高于-2.0, 无显著突变点, 干旱发生频率为25.5%~37.6%, 中旱、重旱、特旱发生的频率自西向东呈“高-低-高”、“中间高两边低”、“逐渐降低”的分布规律; 季尺度上, 春夏秋冬呈下降趋势, 冬季呈现上升趋势, 这表明冬季东北三省干旱有所减轻, 而春夏秋三季的干旱有所加重, 干旱在空间上发生的频次为春季>冬季>夏季>秋季; 干旱历时越长其干旱烈度越小, 代表站点越干旱; 年际尺度上 EOF分解得到的前4个特征向量和四季尺度分解得到的第一个特征向量的主要空间模态表现为全区一致、南北反向分布特征。【结论】东北三省除春季和冬季外, 年和其余两季SPEI都呈现出下降趋势, 其中南部干旱有加重趋势, 北部呈现湿润趋势。

关键词: 标准化降水蒸散指数; 游程理论; 时空特征; 东北三省

中图分类号: P467

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023188

OSID:



张筱渲, 王蕊, 单凤君, 等. 1961—2020年东北三省干旱时空分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 78-88.

ZHANG Xiaoxuan, WANG Rui, SHAN Fengjun, et al. The spatiotemporal distribution characteristics of drought in the three northeastern provinces from 1961 to 2020[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 78-88.

0 引言

【研究意义】气象灾害是世界面临的共同挑战。干旱作为常见的气象灾害, 常被认为是一种复杂的、多方面的现象^[1]。降水量少、蒸发量大是造成干旱的直接因素, 而海陆和大气交互作用造成的降水量少则是造成干旱的主要原因^[2]。最新发布的IPCC第六次评估报告指出: 水循环会随着气候变化加剧, 可能会带来更多的降水与更强的洪水, 对于许多地区这意味可能会发生更严重的干旱^[3]。迄今为止, 干旱被定义为4种类型: 气象、农业、水文和社会经济干旱。气象干旱往往会受到更多的关注, 因为相较于其他类型的干旱最先发生^[4-5]。近年来, 干旱给世界各地的经济带来了沉重打击。东北三省是中国的“粮仓”, 位于我国中高纬度地区。其广阔的可耕地、寒冷的气候和低降水量使得自然灾害发生地更加频繁。干旱一直是威胁生产的主要自然灾害,

东北三省的旱灾更是频频发生, 强度不断加大, 持续时间逐渐延长。【研究进展】一些学者对东北三省地区干旱的时空变化进行研究, 但由于其资料、数据和方法选择上的不同, 导致其结果各不相同。王亚平等^[6]通过计算1980—2005年干燥度指数得出东北三省地表干旱呈现减轻态势; 但韩冬梅等^[7]统计1961—2010年的降水资料通过计算SPI分析东北地区历时时期的旱涝情况, 结果表明1961—2010年东北地区干旱发生次数高于洪涝; 王晓丹等^[8]基于1960—2017年的日值SPEI分析了东北地区的干旱情况, 得出东北地区干旱呈现上升趋势。

目前用于表征干旱的指数非常多, 有3种常见的干旱指数用于监测农业干旱和土壤水分平衡, Palmer干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[9], 其包括了地表降水、土壤湿度和潜在蒸发量。考虑了温度和初始天气对干旱的影响是该指数被广泛引用的一大优点^[10]。但是, 该指数在应用过程中参数难获得、计算复杂、且时间尺度固定, 导致该指数不能有效地被用于长期研究。Mckee等^[11]将不同的时间尺度与干旱相结合, 提出了标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)。SPI因为其计算简单而被科学家们广泛使用, 但它没有提到温度可能产生的影响, 因此在全球气候变暖的当下该指数并不适用。Vicente-Serrano等^[12]基于

收稿日期: 2023-04-27 修回日期: 2023-10-16

基金项目: 辽宁省科技厅博士科研启动项目(2021-BS-257); 辽宁省教育厅面上基金项目(LJKZ0615); 辽宁省教育厅青年基金项目(LJKQZ2021139)

作者简介: 张筱渲(1999-), 女, 辽宁大连人。硕士在读, 研究方向为农业气象灾害风险评价。E-mail: 1043417037@qq.com

通信作者: 王蕊(1993-), 女, 辽宁锦州人。博士, 讲师, 研究方向为灾害风险评价与管理。E-mail: wangrui@lnut.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

SPI 计算充分考虑了温度可能产生的影响, 提出了标准化降水蒸发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *SPEI*)。沈国强等^[13]通过 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 拟合优度检验等相关性分析验证了 *SPEI* 适用于东北地区的干旱监测。自 *SPEI* 被提出, 学者将其广泛应用于干旱的研究中, 例如利用逐日多尺度 *SPEI* 和作物生长过程模型综合定量评价干旱对作物产量的影响^[14]、一段时间内干旱时空特征分析^[15]、东北地区对 *SPEI* 的适用性分析^[16]、利用 *SPEI* 对内蒙古进行多时空尺度干旱特征分析^[17]。

【切入点】目前, 利用不同干旱指标对东北地区的干旱时空变化特征进行分析的研究很多, 但利用多尺度的较少。【拟解决的关键问题】为此, 基于 1961—2020 年的 86 个气象站点的实测数据, 计算 *SPEI*, 结合游程理论、M-K 检验、EOF 分析, 分析东北三省干旱的历时、烈度和频率, 分析东北三省不同时间尺度干旱的时空分布特征, 为今后东北三省的防灾、减灾提供更加多的科学依据。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

东北三省平均海拔高度约为 50~100 m, 地形平坦起伏, 土层深厚。研究区域地处 38°43'N—53°33'N, 115°53'E—135°05'E。总面积约 84.53 万 km²。土地面积大, 地貌主要为山地和平地, 拥有丰富肥沃的黑土资源, 是中国重要的粮食基地。东北三省地处中温带, 是温带季风气候, 东部年降水量为 400~700 mm, 西部 250~400 mm, 年平均气温 5.4 °C。但由于其纬度高, 致使其冬季格外寒冷且漫长。这些原因造成研究区域干旱总是多次发生, 是全球变化的敏感区域, 进入 21 世纪以来, 东北三省干旱事件发生的格外频繁, 并且干旱的持续时间也越来越长^[18]。

1.2 数据来源

本研究的气象观测数据从中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 获取, 选择 1961—2020 年东北三省 186 个国家标准气象站日常监测数据 (包括日降水量和气温数据)。在处理时, 首先检查气象站数据的连续性, 删除累计数据失踪时间超过 1 a 的气象站, 然后用线性方法和相邻站同年的数据, 对剩余的异常或失踪的数据进行修正和插值, 最后从 186 个站点中选择 86 个站点提供完整、一致的数据。研究区域气象站点的分布如图 1 所示。

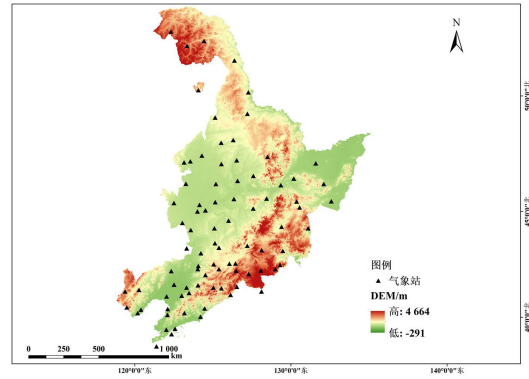


图 1 东北三省气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in the three provinces of northeast China

2 材料与方法

2.1 标准化降水蒸散指数

SPEI 是从地表缺水和积累的角度描述干旱的进展, 不仅反映了广泛的事件尺度, 还反映了气温上升对干旱的影响, 以及近年来降水和气温上升引起的东北三省干旱的时间和空间变化特征。

SPEI 由 Vicente-Serrano 等^[12]基于 *SPI* 指数提出, 在原有基础上增加降水量和蒸散发对干旱产生的影响, 易于计算。具体计算步骤如下:

1) 潜在蒸散量的计算。计算式为^[19]:

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m, \quad (1)$$

$$m = 6.75 \times 10^{-7} T^3 - 7.71 \times 10^{-5} T^2 + 1.79 \times 10^{-2} T + 0.492, \quad (2)$$

式中: T 为月平均温度 (°C); I 为年热量总和, 其计算式为 12 个月热量指数的总和; m 是由 I 决定的系数; K 为纬度和月份函数的校正系数。

2) 逐月降水与蒸散量的差值。计算式为:

$$D_i = P_i - PET_i, \quad (3)$$

式中: P_i 为月降水量; PET_i 为潜在蒸散量。

3) 采用三参数 log-logistic 函数进行差值序列拟合, 概率密度函数如下:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \right]^{-2}, \quad (4)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别表示尺度, 形状和位置参数。

利用上式得到 D_i 序列的累计概率分布函数:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

通过 $F(x)$ 的标准化值计算不同时间尺度对应的 *SPEI* 值:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}, \quad (6)$$

式中：其中 $W = \sqrt{-2 \ln(P)}$ ， $P = 1 - F(x)$ 。当累计概率 $P > 0.5$ 时，把 P 变换为 $1 - P$ 。常数为： $C_0 = 2.515 517$ ， $C_1 = 0.802 853$ ， $C_2 = 0.010 328$ ， $d_1 = 1.432 788$ ， $d_2 = 0.189 269$ ， $d_3 = 0.001 308$ 。

SPEI 表示干湿度。*SPEI* 值越高，越湿润，反之，越干燥。考虑到东北三省降水偏少，本研究主要对东北三省干旱状况下的 *SPEI* 数值进行详细分级，参考标准为国家气象干旱等级标准（GB/T 20481-2017）^[20]。

由于东北三省地处温带季风气候，四季分明，年际与季节变化差异大。为了更好的分析 *SPEI* 的演变规律本研究中选用季节尺度（*SPEI*-3）和年尺度（*SPEI*-12）来讨论东北三省的干旱变化状态。在分析季节性干旱时，将春季定义为 3—5 月，夏季定义为 6—8 月，秋季定义为 9—11 月，把 12 月—翌年 2 月定义为冬季。

表 1 气象干旱等级划分

Tab.1 Classification of meteorological drought levels

干旱等级	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
<i>SPEI</i>	>-0.5	(-1.0,-0.5]	(-1.5,-1.0]	(-2.0,-1.5]	≤-2.0

2.2 游程理论

游程理论也被称为轮次理论，主要被应用于揭示随机事件持续发生的规律。选取一个截距水平 k ，取 -0.5 作为阈值。当序列中在一段或多段时间内连续出现大于阈值的情况下，称为正游程，反之，则为负游程。通过游程理论从各个站点中分离出干旱事件的持续时间和强度。

2.3 干旱频率

干旱频率是指研究期内发生干旱的月份占全年 12 个月的比例。数值越大代表干旱的频率就越高。

$$DFI = \left(\frac{m}{M} \right) \times 100\% , \quad (7)$$

式中： DFI 为某一站点发生干旱的频率（%）； m 为发生干旱的月数； M 为研究期总月数。

2.4 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 趋势检验方法是被世界气象组织推荐的基于秩的非参数趋势检验的方法，构造标准 Z 统计量代表趋势检测值。其优点是样本不必遵循样本的特定分布，也不受少数异常值的干扰。

对于 n 个样本的时间序列，其标准化的检验统计量 Z 为：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} , \quad (8)$$

式中：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) , \quad (9)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} , \quad (10)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} , \quad (11)$$

式中： x_j 为序列 x 中第 j 个数； q 为数组的个数； t_p 代表第 p 个数组的数据数。

2.5 经验正交函数分解

通过对东北三省 1961—2020 年的 86 个站点的 *SPEI* 矩阵进行正交函数分解，得到东北三省的各个模态并对其进行干湿分布和变化趋势的分析。EOF 分析广泛用于气象数据分析，类似于关键组分的地理加权分析，可用于确定空间和时间变化的主要和次要模型。它可以在有限范围内快速扩展和收敛到不规则的位置，跨多个模式集中可变字段信息，并以特定的物理值分离空间结构。因此，此分析可以提供尽可能多的原始信息，还可以用于分析变量集之间的关系，并从空间模型和时间模型中提取数据分布。对 m 个台站共进行 n 次观测，将得到的数据组合成一个变量矩阵，运用 EOF 法对变量矩阵进行分解，把原变量矩阵中的 X_{mn} 分解成空间函数 V_{mi} 与时间函数 T_{in} 的乘积：

$$X_{m \times n} = V_{m \times i} \times T_{i \times n} \times X_m . \quad (12)$$

本文运用 EOF 法对东北三省的多尺度 *SPEI* 年平均变量场进行了分析，并提取了其基本空间格局和相应的时间系数，揭示了干旱的时间和空间变化规律。

3 结果与分析

3.1 *SPEI* 指数时空变化特征分析

3.1.1 年尺度变化特征

本研究计算东北三省 1961—2020 年 *SPEI*-12，为探究时间变化趋势对其进行 M-K 突变检验，结果如图 2 所示。可以看出，1961—2020 年以来东北三省 *SPEI* 值整体呈现下降趋势，下降幅度为 0.509/10 a，介于 -1.25~1.00，干旱程度大部分为轻旱。与此同时，从 1961—2020 年平均 *SPEI* 的正负波动趋势可以看出，1961—2020 年中国东北三省经历了“湿润-干旱-湿润-干旱-湿润”气候变化。1998 年以前 *SPEI* 波动较平缓；1999—2004 年，仅 2003 年没发生干旱事件，其余年份 *SPEI* 值皆小于 -0.5，说明干旱相对严重；

2009—2020 年 *SPEI* 指数正负波动最大。整体来看，东北三省 1961—2020 年的年均 *SPEI* 指数均未小于 -2.0，呈下降趋势，表明东北三省近 1961—2020 年虽无极端干旱灾害但干旱年份明显增多。图 2 中，UF 值在 1961—1969 年（除 1967 年、1968 年）间均为正值，说明 *SPEI*-12 在此期间呈现“上升”的趋势，处于一个相对湿润的时期。1970—2020 年（除 1987、1995 年外）皆为负值。在 1995 年后所有的 UF 值均小于 0，这意味着在该阶段年均 *SPEI* 指数呈现出显著的下降趋势，即表明该时期为东北三省的相对干早期。在显著水平 0.05 的临界线内，UF 和 UB 曲线频繁相交于 1968 年、1970—1973 年、1985—1987 年，表明发生突变，由湿润转为干旱，查阅《中国气象灾害年鉴》可知，1972 年吉林西南部、辽宁大部发生严重干旱事件；1986 年干旱严重，其中东北三省的秋旱比较严重，有 9 个区的受旱率 $\geq 20\%$ 。

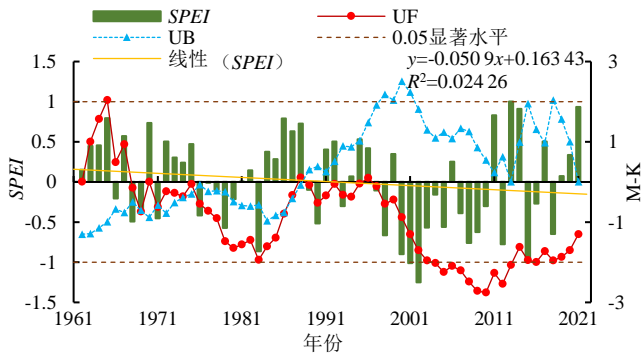


图 2 1961—2020 年东北三省 *SPEI*-12 变化趋势及 M-K 突变图
Fig.2 Changes in *SPEI*-12 and M-K Mutation in the three northeastern provinces from 1961 to 2020

为了进一步分析 *SPEI*-12 年际倾向率的空间差异性，本研究基于 IDW 反距离权重插值法对研究区各站点 1961—2020 年 *SPEI*-12 年际倾向率进行空间插值，结果如图 3 所示。由图 3 可知，东北三省年际倾向率表现为由南部向北部递增态势。其中，辽宁省年尺度倾向率皆为负值，介于 -0.209 3~-0.013 1，大洼站倾向率最低；吉林省有 18 个站点的倾向率为负值，表明大部分站点皆呈干旱趋势，高值区分布在吉林省东南部，桦甸站的倾向率最高为 0.055 4，最低值是长白站为 -0.255 4；黑龙江省大部分站点皆呈湿润趋势，其中绥芬河站倾向率最高，值为 0.167 9，说明该站点 1961—2020 年来湿润趋势最明显，长白站和营口站的倾向率最低值分别为 -0.255 4 和 -0.248 9，说明这 2 个站点 1961—2020 年呈干旱趋势。这说明东北三省南部干旱有加重趋势，北部呈湿润趋势。

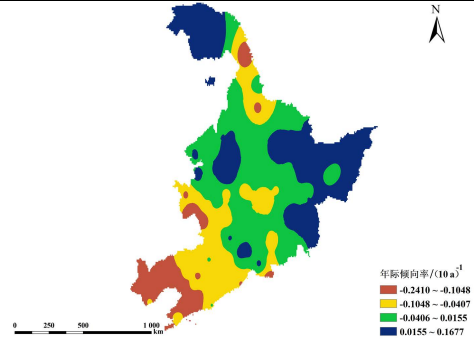


图 3 1961—2020 年东北三省 *SPEI*-12 倾向率空间分布图
Fig.3 Spatial distribution map of *SPEI*-12 propensity rate in the three northeastern provinces from 1961 to 2020

3.1.2 季节尺度变化特征

为探究东北三省的季节变化趋势，对 *SPEI*-3 进行分析及 M-K 突变检验，结果如图 4 所示。从图 4 (a) 中可以看出，东北三省 1961—2020 年春季的 *SPEI* 倾向率为 0.016/10 a，总体波动不大。1990 年之前，14 a 春季 *SPEI* 为负值，15 a 春季 *SPEI* 为正值，说明这段时间春季干旱状态不稳定，春季 *SPEI* 的 UF 和 UB 曲线多次在 $\alpha=0.05$ 的置信区间内相交，有 1963、1984、1986、1988、2006、2010 年，1988 年前 UF 和 UB 曲线频繁相交且 $UF > 0$ ，说明春季经历了多次干旱湿润交替的现象，自 2006 年开始，东北三省春季干旱开始加重，不同程度的干旱事件相继发生；夏季（图 4 (b)）*SPEI* 以 0.056/10 a 的速率连年下降，这是由于东北三省受副热带高压的影响，夏季少云无风，降水也少，干旱等级较大的年份主要集中在 2000—2010 年之间，UF 和 UB 曲线在 1965、1984、1985 年发生重合，即在 1965、1984、1985 年存在夏季干旱突变性增长，其中 1984 年的全国受旱率达 0.160，东北三省夏季少雨出现了较为严重的夏旱；秋季（图 4 (c)）*SPEI* 以 0.067/10 a 的速率下降，这可能是由于东北三省秋季时间短，加上西北太平洋的副热带高压不断输送暖气流北上，导致东北三省在秋季也有高温，降水量不多的现象，UF 和 UB 曲线共相交 2 次，分别是 1967 年和 1995 年，查阅资料发现 1995 年的降水距平百分率在 -30%~-90%；冬季（图 4 (d)）*SPEI* 的上升速率为 0.119/10 a，这与冬天气温较低、蒸发较小有关，对冬季 *SPEI*-3 进行 M-K 突变检验发现，UF 和 UB 曲线于 2004 年相交，交点后 UF 曲线高于 0.05 显著性水平的检验，这是由于 2004 年我国冬季降水较常年稍偏少。东北三省 1961—2020 年 *SPEI*-3 呈平稳趋势，春夏秋冬呈下降趋势，冬季呈上升趋势，即表明冬季干旱有所减轻，而春夏秋三季的干旱有所加重。春季干旱突变次数最多也是由于 3—5 月太阳直射点北移，此时陆地快速升温，地温高导致地面蒸

发量大，且此时东北三省的降水量少，导致干旱加剧。

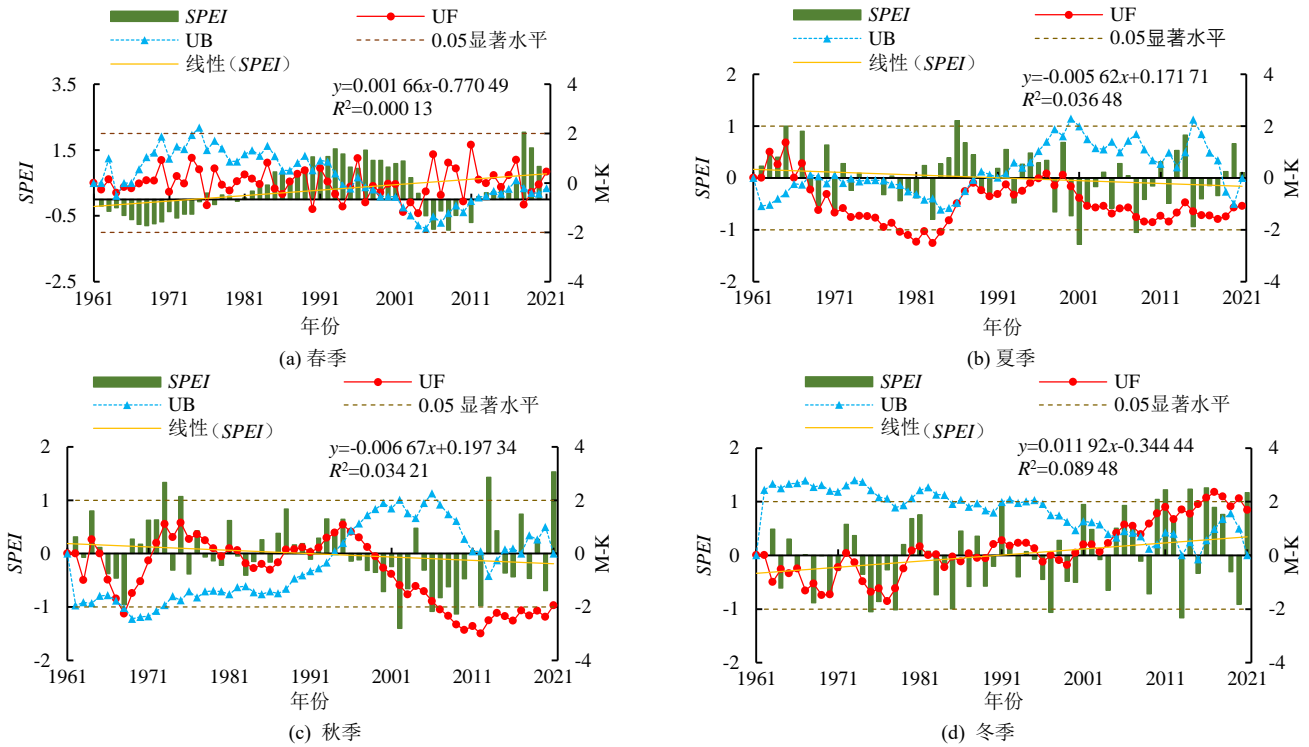


图 4 1961—2020 年东北三省 SPEI-3 变化趋势及 M-K 突变图

Fig.4 Changes in SPEI-3 and M-K Mutation in the three northeast provinces from 1961 to 2020

东北三省的季尺度倾向率存在一定的空间差异性（图 5）。从图 5（a）可以看出，春季倾向率在空间上分布较为均匀，大值区位于黑龙江省东部的绥芬河、牡丹江和鸡西一带，黑龙江省北部和辽宁省西部地区的值较小，大洼站的值最小为-0.249 1；夏季倾向率空间分布如图 5（b）所示，东北三省夏季倾向率北部高、南部低，高值区集中在黑龙江省北部，绥芬河站值最大，为 0.102 5，长白站点的值最低为-0.270 6；秋季（图 5（c））倾向率为-0.255

0~-0.074 6，仅 7 个站点的倾向率为正值，均集中在黑龙江省北部和东部一带，兴城站的值最低；冬季（图 5（d））倾向率在空间上分布大体同夏季一致，仅 14 个站点为负值，这表明冬季整体呈湿润状态，最低站点是营口，值为-0.098 8，最高站点为依兰，值为 0.345 7。总的来说，1961—2020 年东北三省夏秋二季倾向率低值多呈现干旱化趋势，冬季高值多呈现湿润状态。

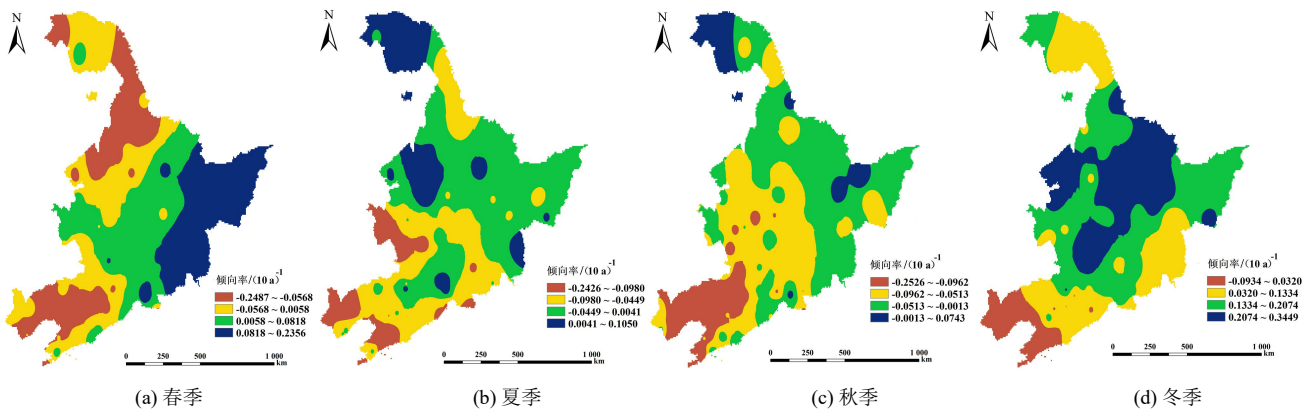


图 5 1961—2020 年东北三省 SPEI-3 倾向率空间分布图

Fig.5 Spatial distribution map of SPEI-3 propensity rate in the three northeastern provinces from 1961 to 2020

3.2 东北三省干旱特征分析

3.2.1 干旱历时、烈度、频率时间特征分析

干旱的持续时间与干旱强度也可以作为干旱强弱的检验标准。因此，本研究运用游程理论，依据 SPEI 等级划分原则，选取 $k=-0.5$ 作为干旱阈值，对

东北三省各站点的年尺度和季节尺度的干旱历时和干旱烈度进行统计分析，结果如图 6 所示。由图 6 可知，在年际尺度上，SPEI 干旱历时最长为 50 个月（1999—2003 年），干旱烈度最小值为-1.16，其中 2000 年 11 月至 2001 年 6 月发生了长达 8 个月的重

旱，这对东北三省的气候造成了极为严重的影响；在 2014—2019 年间也频频发生干旱，这也与东北三省实际发生干旱的年份相符。干旱持续时间越长，干旱烈度越小，反之亦然。

由图 6 (a) 可知，在季尺度上，1975 年春季干旱历时达到 3 个月；2000—2001 年连续 2 a 夏季干

旱历时达到 3 个月；1999、2001、2006、2011 年 4 a 秋季的干旱历时均长于其他年份；2008 年冬季干旱历时达 3 个月；由图 6 (b) 可以看出，*SPEI* 季节性干旱烈度与年际干旱烈度基本趋于一致。*SPEI* 干旱烈度最大发生在 1996 年的冬季，为-1.15；2001 年春季干旱烈度也低于-1.11。

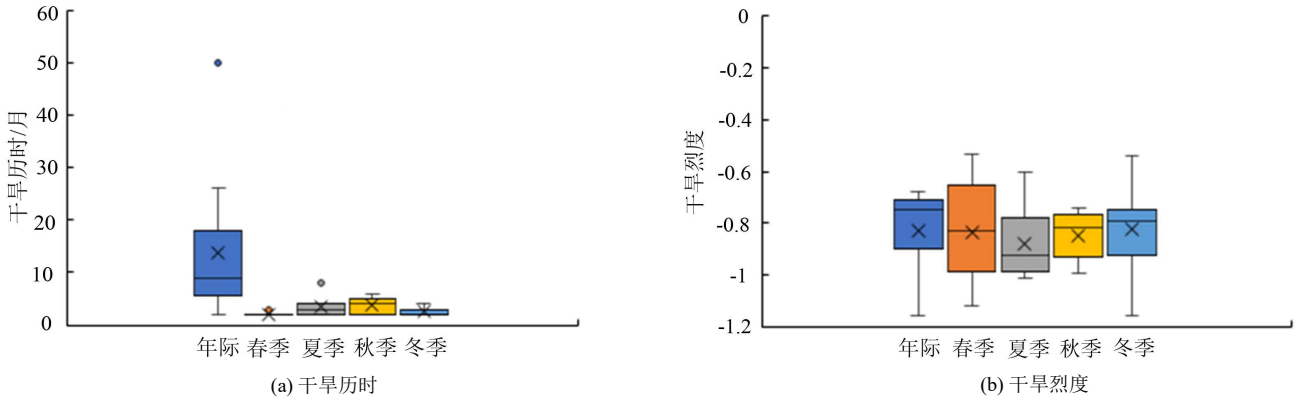


图 6 东北三省干旱历时和干旱烈度特征

Fig.6 Characteristics of drought duration and intensity in the three northeast provinces

图 7 是根据年及季节尺度的 *SPEI* 按干旱等级标准统计的干旱频率。在年际和季节尺度上，东北三省干旱频率的发生有明显的相似性，整体上轻旱、中旱、重旱和特旱发生频率比例接近 15 : 11 : 5 : 2，对比不同等级的干旱频次可以发现研究区内主要以轻旱和中旱为主，重旱和特旱发生的频率较低。季节干旱频率发生的概率为冬季>秋季>夏季>春季，轻旱频率发生在 15%左右；冬季发生中旱的频率高于其他三季；四季重旱发生的频率相似都在 5%左右。此外，秋季特旱发生的频率最高，达 1.80%，冬季特旱频率极低，仅有 0.49%。

3.2.2 干旱历时、烈度、频率空间特征分析

为探究 1961—2020 年东北三省干旱历时、烈度和频率的空间变化特征，本研究利用 ArcGIS 的反距离权重插值法对处理得到的数据进行空间插值，并分析其空间分布特征。图 8 为季节和年际干旱历时空间分布图。由图 8 (a) 中可以看出，年际变化趋势呈现为西部高东部低，干旱历时最久的站点为彰武站 (15.71 个月)。春季 (图 8 (b))、夏季 (图 8

(c)) 和冬季 (图 8 (e)) 干旱历时分布较年际分布差异明显，干旱历时较长的区域集中在黑龙江北部；秋季 (图 8 (d)) 与年际的变化较为一致，干旱历时较长的区域位于辽宁省西北部和吉林省西部，干旱历时为 2.53~4.50 个月。东北三省干旱历时空间变化较为显著，夏季和秋季的干旱历时较春季和冬季干旱历时长，这表明虽然东北三省夏秋二季进入雨季，降水集中但伴随着气温升高导致干旱严重。

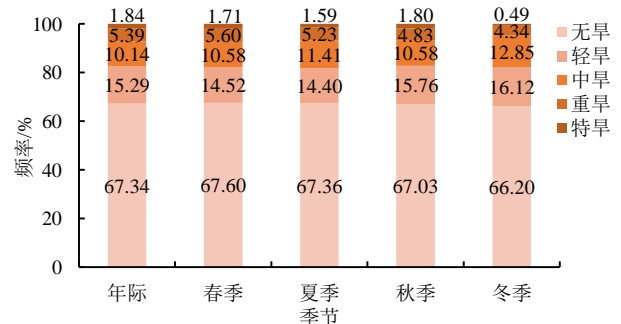
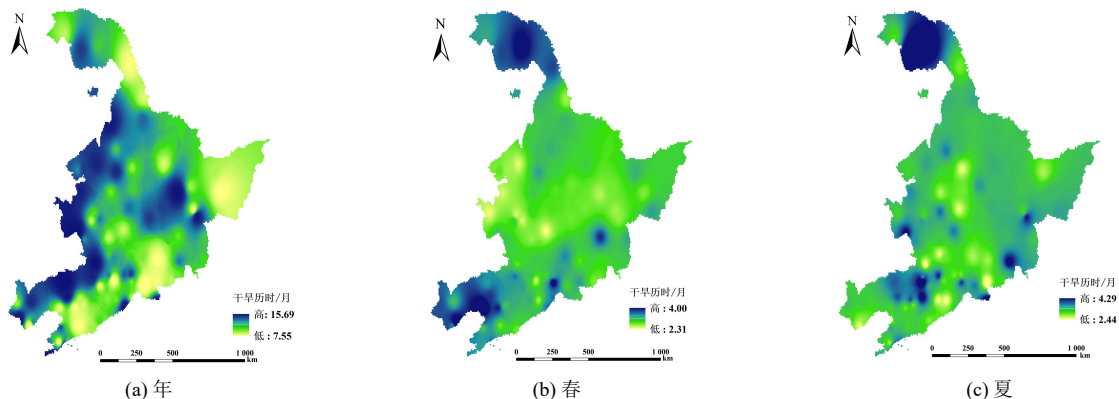


图 7 东北三省不同等级干旱频率变化

Fig.7 Changes in drought frequency at different levels in three northeast provinces



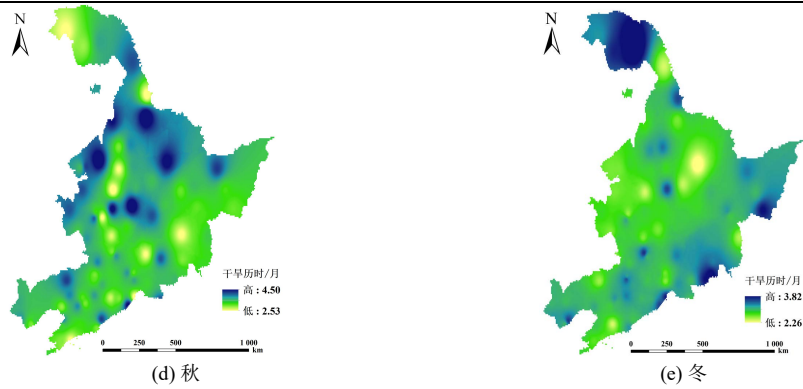


图 8 东北三省干旱历时空间分布

Fig.8 Spatial distribution of drought duration in the three northeastern provinces

图 9 为季节和年际干旱烈度的空间分布图。由图 9 (a) 可知, 辽宁省和黑龙江省的北部地区干旱烈度值较低, 代表干旱更强烈, 干旱烈度最低值在通河站, 值为-1.13。春季干旱烈度值最低, 介于-1.30~-1.37。由图 9 (b) 中可看出, 春季干旱烈度低值区集中在吉林省, 春、夏两季干旱烈度空间分布变化不大, 这是由于东北三省春季降雨少, 进入夏季后气温升高, 干旱持续, 导致春夏连旱; 由图 9 (d) 可知, 秋季干旱烈度最低的站点为长白和敦化, 为-1.30; 图 9 (e) 为冬季干旱烈度空间分布, 干旱烈度低值区集中在辽宁省和黑龙江省的北部, 最低站点为通河, 为-1.30。干旱烈度在四季变化中大体上是由北部向

南部迁移, 干旱化态势减弱。冬季干旱烈度与年际干旱烈度空间分布较为一致, 呈现为南部北部低中部高。

同时, 本研究还计算各个站点不同等级的干旱频率来研究 1961—2020 年东北三省干旱的空间分布情况, 插值结果如图 10 所示。东北三省干旱频率的空间差异随干旱程度的不同而有很大变化。由图 10 (a) 可知, 东北三省的干旱频率为 25.5%~37.6%, 最大值出现在大连站, 干旱频率为 37.6%, 最小值出现在鞍山站, 干旱频率为 25.5%。东北三省的中部、西北部和西南部的干旱频率较高, 而东南部和南部的干旱频率较低一点。

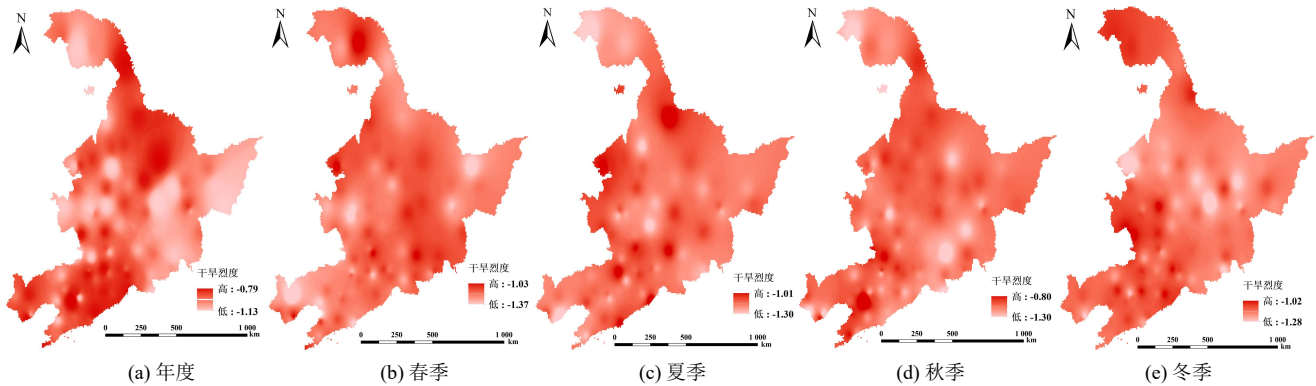


图 9 东北三省干旱烈度空间分布

Fig.9 Spatial distribution of drought intensity in the three northeastern provinces

从干旱等级上看, 不同干旱等级的频率也存在显著差异。由图 10 (b) 可知, 辽宁省西部和黑龙江省西南部的干旱主要以中旱为主, 干旱发生多集中在东北三省的西南部。鞍山站是东北三省中发生中旱次数最少的站点, 仅发生了 7 次, 黑龙江北部地区发生轻旱次数较少, 小于 70 次, 发生中旱次数最多的站点是长海站, 发生次数 110 次, 发生频率高达 15.51%。发生中旱次数较多的站点分布在辽宁南部和黑龙江中部地区。由图 10 (c) 可知, 重度干旱集中在辽宁省南部、吉林省西部、黑龙江省西部和北部, 分布较为均匀, 其中鞍山站从未发生过重旱。大兴安岭、长春等周边重旱发生次数较高, 发生重旱次数最多的站点是依兰站, 发生重旱 67 次,

发生频率 9.54%。发生重旱频率 4.23%~7.48% 的站点共有 65 个。由图 10 (d) 可知, 特旱频率较高区域主要集中在辽宁省东部、吉林省西北部和黑龙江省北部, 呈现西北多东南少的趋势分布。沈阳站发生特旱的次数最多, 共 27 次, 发生频率为 3.81%。发生次数最少的是蛟河站和朝阳站, 仅发生特旱 1 次。其中, 瓦房店站等 29 个站点特旱发生次数不超过 10 次。

综合来看, 东北三省年尺度中旱发生频率高于重旱和特旱频率, 除个别站点外年尺度中旱高频区集中在黑龙江省和辽宁省的西部, 重旱和特旱的空间分布相似。东北三省气温和降水的不均匀分布受地形和其他因素影响, 这导致干旱的区域分布变得复杂。

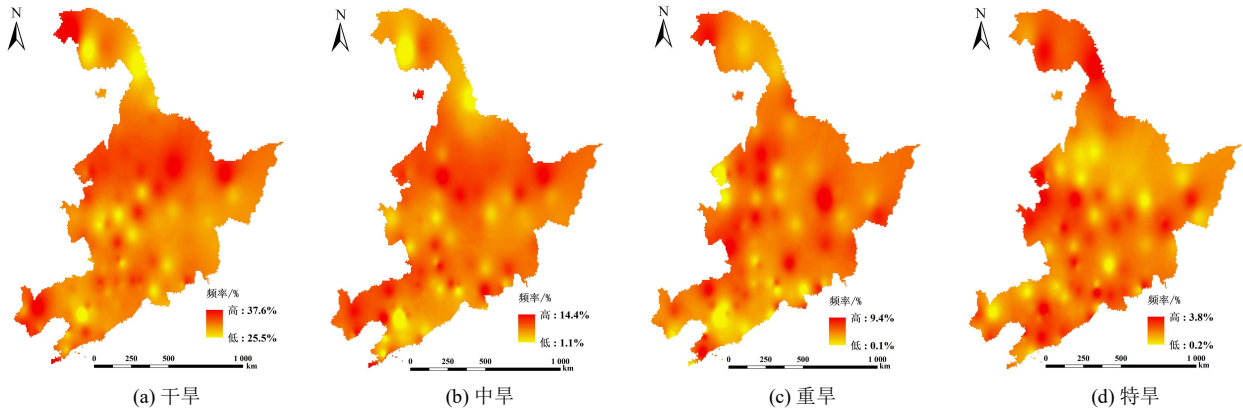


图 10 东北三省年尺度干旱频率分布图

Fig.10 Drought frequency distribution map of the three northeastern provinces

为进一步分析季节干旱的空间变化，计算不同季节的干旱发生频率，插值结果如图 11 所示。图 11 (a) 为东北三省春季不同站点发生干旱的频率，其值介于 25.0%~43.3%，干旱发生高频区集中在塔河站和熊岳站，低频区出现在大洼站和本溪站，干旱发生频率 30.9%~35.7%的区域占东北三省总面积的 2/3。主要分布于东北三省的东部和北部；夏季（图 11 (b)）干旱发生的频率介于 25.2%~41.4%，干旱发生频率 30.9%~33.9%的区域占东北三省总面积的 3/4 以上，各站间干旱频率差异较小，这与东北三省的气候特征一致，降雨主要集中在夏季，干旱高频区主要出现在昌图站、抚顺站、彰武站、加格达奇

站、齐齐哈尔站和牡丹江站，本溪站、嫩江站和瓦房店站等站点干旱发生频率低于 27%，不同地区干旱频率分布比较均匀，没有显著趋势；秋季（图 11 (c)）各站点发生干旱的频率介于 21.9%~40.1%，有 1/3 地区干旱发生频率大于 32.8%，最大值出现在双辽站、四平站和双阳站，最小值出现在鞍山站，干旱频率大体上由东北三省的北部、南部向中间部分上升；冬季（图 11 (d)）干旱发生的频率介于 22.0%~42.3%，主要集中在长岭站和牡丹江站，最小值出现在二道站，发生频率为 22.0%，干旱大体上由东北三省的东部和北部向西南上升，其中辽宁省西北部干旱最严重。

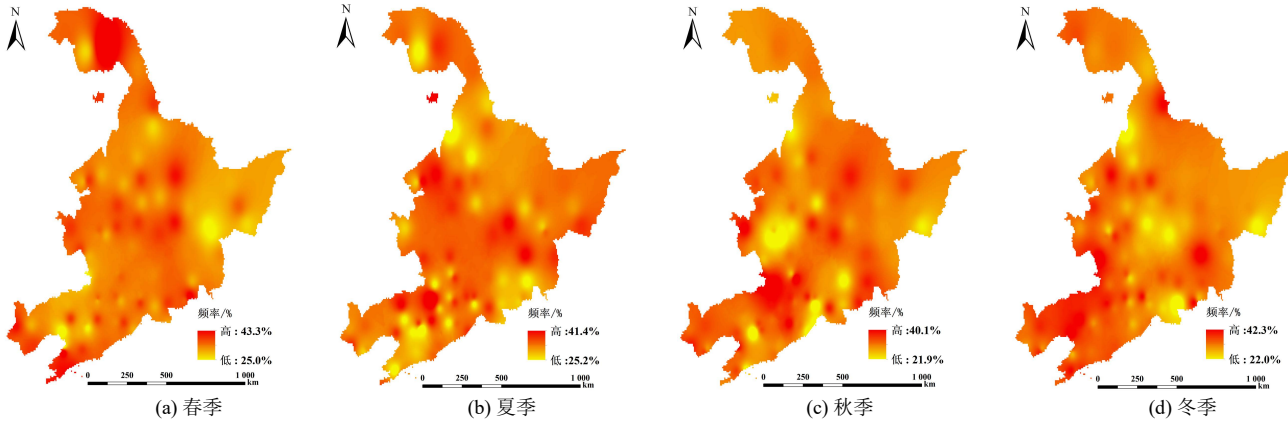


图 11 东北三省季节干旱频率分布图

Fig.11 Seasonal drought frequency distribution map of the three provinces in northeast China

3.3 东北三省干旱的多尺度空间模态分析

正交经验分解函数 (EOF) 分析主要是将某气象场的观测资料以矩阵形式，主要分析的内容为时间函数和空间函数。基于 86 个站点 1961—2020 年的月气温和降水量，对年尺度 SPEI 运用 EOF 分析，结果表明，前 4 个特征向量方差贡献总和为 60.6%，第 5 个特征向量之后，每个向量对方差的贡献很小，所以选择并分析前 4 个特征向量。

对计算出的数据采用 IDW 法插值处理（图 12），其中，第一特征向量（图 12 (a)）占最大的比重，其方差贡献率为 33.2%，是东北三省干旱分布的最

主要形态。图中可以看出第一特征向量只有 1 个为负值，其余皆为正值，介于-0.01~0.15，大值区位于东北三省的中部地区，黑龙江省北部地区特征向量值较小。说明 1961—2020 年来东北三省的干湿变化基本一致，全年湿润或干旱。辽宁省北部和吉林省西部作为高值中心区，表明该区域在 1961—2020 年间对干湿变化更敏感，干湿交替频繁，变化幅度大。第二（图 12 (b)）、第三（图 12 (c)）、第四（图 12 (d)）特征向量的方差贡献率分别为 14.4%、7.7% 和 5.3%，反映了干旱的空间变化，第二特征向量在空间上以长岭-延吉为界，呈南北反向分布特征，从

北都到南部数值从负值转为正值，具有“由干到湿”的变化特点，空间系数较高的地区为辽宁省，表明辽宁省对干旱变化更为敏感；第三特征向量中东北三省的东北部为正值，其余为数值从东部到西部经

历了由负值转为正值，具有“由干到湿”的变化特点；第四特征向量中只有东北三省的西南部为正值，数值从西南部到东北部经历了从正值向负值的转变，其变化特点为“由湿到干”。

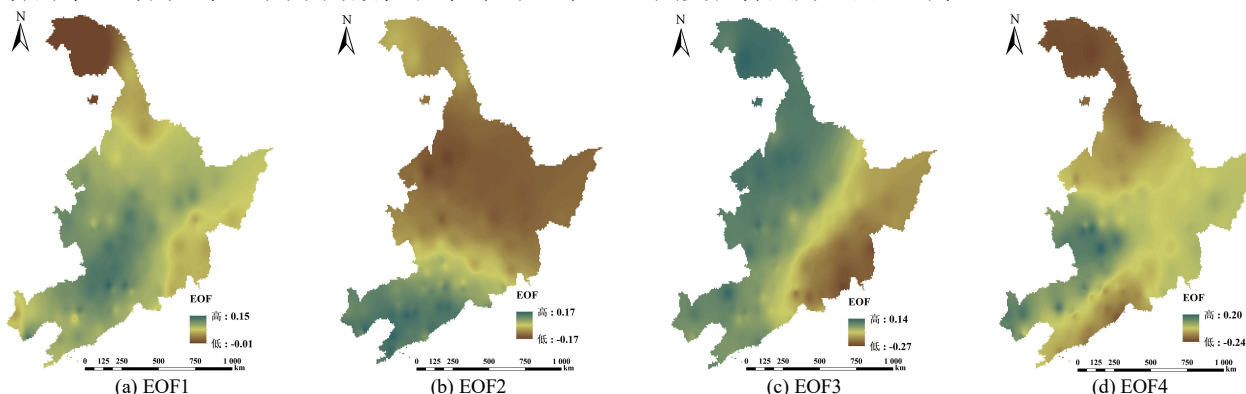


图 12 东北三省 $SPEI-12$ 指数 EOF 分解前 4 个特征向量图

Fig.12 The first four eigenvector maps of the EOF decomposition of the $SPEI-12$ index in the three northeastern provinces

运用正交经验分解函数 (EOF) 对季尺度 $SPEI$ 进行分析，空间插值后如图 13 所示。

前 4 个模态皆超过 50% 的方差。春季 (图 13 (a)) 第一特征向量皆为正值，说明整个东北三省在春季呈现出一致的变化特征。从数据的变化趋势来看，春季东北三省从四周逐渐向中部变湿润；由夏季 (图 13 (b)) 第一特征向量可知，只有黑龙江省北部个别站点呈负值，其余站点皆为正值，从数据变化趋势来看，夏季东北三省的中西部变化最显

著；秋季 (图 13 (c)) 第一特征向量的方差贡献率为 36.4%，只有黑龙江省北部个别站点呈负值，其余站点皆为正值，从数值变化趋势来看，秋季整个吉林省与其余二省的边界变化最显著；冬季 (图 13 (d)) 第一特征向量值均为正值，说明东北三省在冬季的变化特征整体一致，吉林省南部和辽宁省北部是变化最大的地区。从数据变化趋势看，东北三省冬季呈现更湿润趋势。

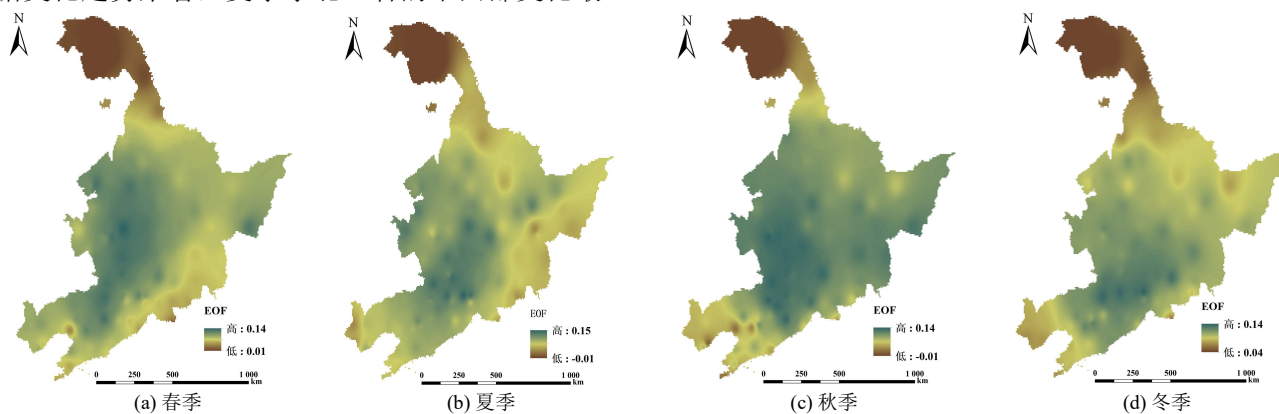


图 13 东北三省 $SPEI-3$ 指数 EOF 第一特征向量分布图

Fig.13 Distribution map of the first eigenvector of the EOF of the $SPEI-3$ index in the three provinces of northeast China

4 讨论

$SPEI$ 时间尺度灵活，充分考虑温度产生的影响，处理得到的干旱事件与前人的研究成果趋于一致^[21-22]，对于东北三省的干旱检测有良好的适用性^[13]。东北三省年尺度干旱的时间变化有明显的年际特征，2009—2020 年的正负波动最大，2000 年以后严重干旱事件发生的频率较高，根本原因可能是近年来全球气候变暖和东亚夏季风的减弱，从气象要素的表现来看，主要是由于降水量和相对湿度的减少及平均气温和最高气温的增加，这与蔡思扬等^[23]研究结

果大致相同。其中 1985—1987 年的突变发生严重干旱这一结果与 Bordi 等^[24]和 Yu 等^[25]研究相似，从 1970s 后干旱越来越严重。Bao 等^[26]重建 1854 年至 2009 年 4 月至 8 月的平均 $SPEI$ ，并确定了 1970 年代后期至 1880 年代初期、1920 年代和 1990 年代后期发生严重干旱，这一结果与图 2 所得结果相似。经过查阅资料发现黑龙江省 2006 年遇到严重春旱，吉林与辽宁春旱也比往常严重，吉林西部白城市和辽宁西部朝阳市的部分地区耕地受旱程度也是历时同期最重的，皆与本研究相对应。文中对于东北三

省干旱频率的统计结果也与李明等^[27]结论一致, 梁丰等^[21]研究表明春秋二季干旱发生频率较高, 与本研究略有不同, 这可能是因为他们研究期短且季尺度选择的月份不同造成的。本研究结合年和季节倾向率的空间分布对干旱进行分析, 目前还未查阅到有学者对此进行分析, 也是对前人成果的补充。东北三省干旱的空间分布文中给出 4 个主要模态, 其中前 3 个模态与沈国强等^[28]研究结果近似, 但研究中也存在 EOF 方差贡献百分比的偏差, 这可能是由于中国的大尺度天气系统具有不同的小尺度地理因素导致。为了能更准确地了解影响干旱时空模态的因素, 未来的研究应该更侧重于采用 EOF 方法的次区域尺度。

此外, 干旱的形成原因非常繁复, 与研究区域的气候条件、地貌和社会经济等因素密切相关。目前选择的干旱指数均不能在时间和空间上普适。近年来, 遥感技术已在农业、气象和水文等领域得到大规模高分辨率应用; 同时也有学者提出日值 *SPEI* 具有更灵活的时间尺度, 但对于东北地区还需考虑植被等因素对干旱的相应^[8]。从东北三省干旱频率分布来看, 各省干旱特征差异较大。因此, 为了更好地了解东北三省干旱发展的机制, 需要更多的物理和社会经济观测数据。未来的研究可以将遥感网络数据与实地观测数据相结合, 以便更好地了解干旱的发展和分布。

5 结论

1) 从时间尺度看, 东北三省 1961—2020 年虽无极端干旱灾害但干旱年份明显增多, 除春季和冬季外, 年尺度和其余二季都呈现出下降趋势; 年际倾向率表明东北三省南部干旱有加重趋势, 北部呈现湿润趋势, 夏秋两季倾向率低值多, 呈现干旱化趋势, 冬季高值多, 呈现湿润状态。

2) 从空间尺度看, 干旱历时空间变化较为显著, 夏季和秋季的干旱历时较春季和冬季干旱历时长; 干旱烈度在四季变化中大体上是由北部向南部迁移, 干旱化态势减弱。

3) 从干旱发生频率看, 东北三省年尺度中旱发生频率高于重旱和特旱频率, 重旱和特旱的空间分布相似; 四季干旱频率都比较高, 春季干旱发生频率同年尺度相同, 都表现为北高南低, 其余三季干旱发生频率表现为西南部高东北部低。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

[1] VAN LOON A F. Hydrological drought explained[J]. Wiley

- Interdisciplinary Reviews: Water, 2015, 2(4): 359-392.
- [2] 郭伟, 李莹, 杜莉丽. 基于 SPI 的山西省 1972—2012 年春夏干旱特征及对玉米产量的影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 230-236, 265.
- GUO Wei, LI Ying, DU Lili. Characteristic of spring and summer drought variations and its relation with maize yield in Shanxi Province in 1972—2012 based on SPI[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 230-236, 265.
- [3] 姜大膀, 王晓欣. 对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 650-653.
- JIANG Dabang, WANG Xiaoxin. A brief interpretation of drought change from IPCC Sixth Assessment Report[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 650-653.
- [4] WILHITE D A, GLANTZ M H. Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions[J]. Water International, 1985, 10(3): 111-120.
- [5] VAN LOON A F, GLEESON T, CLARK J, et al. Drought in the anthropocene[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(2): 89-91.
- [6] 王亚平, 黄耀, 张稳. 中国东北三省 1960—2005 年地表干燥度变化趋势[J]. 地球科学进展, 2008, 23(6): 619-627.
- WANG Yaping, HUANG Yao, ZHANG Wen. Variation and tendency of surface aridity index from 1960 to 2005 in three provinces of Northeast China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(6): 619-627.
- [7] 韩冬梅, 杨贵羽, 严登华, 等. 近 50 年东北地区旱涝时空特征分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 5-8.
- HAN Dongmei, YANG Guiyu, YAN Denghua, et al. Spatial-temporal feature analysis of drought and flood in Northeast China in recent 50 years[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(6): 5-8.
- [8] 王晓丹, 张勃, 马彬, 等. 基于日值 *SPEI* 东北地区近 58 a 干旱时空演变特征[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 721-732.
- WANG Xiaodan, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatial and temporal evolution of drought in Northeast China in recent 58 years based on daily *SPEI*[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3): 721-732.
- [9] PALMER W C. Meteorological drought[M]. Washington: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [10] DAI A G. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [11] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, 17(22): 179-183.
- [12] 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): 1 696-1 718.
- [13] 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): 3 787-3 795.
- SHEN Guoqiang, ZHENG Haifeng, LEI Zhenfeng. Applicability analysis of *SPEI* for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3 787-3 795.
- [14] WANG Q F, WU J J, LI X H, et al. A comprehensively quantitative method of evaluating the impact of drought on crop yield using daily multi-scale *SPEI* and crop growth process model[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61(4): 685-699.
- [15] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 *SPEI* 的山东省干旱时空变化特征及趋势分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 127-135.
- REN Jiancheng, WANG Feng, LU Xiaoning. Spatiotemporal variation of drought in Shandong Province analyzed using the standardized precipitation-evapotranspiration index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(12): 127-135.
- [16] 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[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431.

- WANG Lin, CHEN Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.
- [17] 谢岷, 高聚林, 孙继颖, 等. 基于 SPEI 指数的内蒙古多时空尺度干旱特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 140-146.
- XIE Min, GAO Julin, SUN Jiyang, et al. Spatiotemporal variation of drought in inner Mongolia estimated based on the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 140-146.
- [18] 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.
- [19] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 梁丰, 刘丹丹, 王婉昭, 等. 基于 SPEI 的中国东北地区 1961—2014 年干旱时空演变[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 148-157.
- LIANG Feng, LIU Dandan, WANG Wanzhao, et al. Temporal and spatial distributions of drought in Northeast China in 1961—2014 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 148-157.
- [22] 徐一丹, 任传友, 马熙达, 等. 基于 SPI/SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1 250-1 262.
- XU Yidan, REN Chuanyou, MA Xida, et al. Change of drought at multiple temporal scales based on SPI/SPEI in Northeast China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1 250-1 262.
- [23] 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.
- CAI Siyang, ZUO Depeng, XU Zongxue, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in Northeast China based on SPEI[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 15-21.
- [24] BORDI I, FRAEDRICH K, JIANG J M, et al. Spatio-temporal variability of dry and wet periods in Eastern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79(1): 81-91.
- [25] YU M X, LI Q F, HAYES M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951—2010?[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 545-558.
- [26] BAO G, LIU Y, LIU N, et al. Drought variability in eastern Mongolian Plateau and its linkages to the large-scale climate forcing[J]. Climate Dynamics, 2015, 44(3): 717-733.
- [27] 李明, 胡炜霞, 张莲芝, 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.
- LI Ming, HU Weixia, ZHANG Lianzhi, et al. Risk analysis of meteorological drought in Northeast China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(7): 134-139.
- [28] 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): 5 882-5 893.
- SHEN Guoqiang, ZHENG Haifeng, LEI Zhenfeng. Spatiotemporal analysis of meteorological drought(1961—2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5 882-5 893.

The spatiotemporal distribution characteristics of drought in the three northeastern provinces from 1961 to 2020

ZHANG Xiaoxuan, WANG Rui*, SHAN Fengjun, ZHANG Tingting, WANG Yilin

(Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: 【Objective】 The purpose of this paper is to analyze the spatial and temporal distribution pattern of drought in the three northeastern provinces from 1961 to 2020. 【Method】 Based on the measured data of 86 meteorological stations in the three provinces of Northeast China from 1961 to 2020, the standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*) at different time scales over the past 60 years was calculated, and the spatiotemporal variation characteristics of drought in the three northeastern provinces by using run theory, Mann Kendall test, empirical Orthogonal functions (EOF) decomposition and other methods were analyzed. 【Result】 On an annual scale, *SPEI* all tended to decrease slowly, but they were overall above -2.0 with no significant mutation points. The frequency of drought occurrence was 25.5%-37.6%. The frequency of moderate, severe and extreme droughts showed a distribution pattern of ‘high-low-high’, ‘high in the middle and low on both sides’, and ‘gradually decreasing’ from west to east; On seasonal scale, there was a downward trend in spring, summer and autumn, while an upward trend in winter. This indicated that the drought in the three northeastern provinces has been alleviated in winter, while the drought in spring, summer and autumn has intensified. The frequency of drought occurrence in space was spring>winter>summer>autumn; The longer the duration of drought was, the lower the intensity of drought was, which indicated that the site was drier; The main spatial modes of the first four eigenvectors obtained from EOF decomposition at the interannual scale and the first eigenvector obtained from seasonal scale decomposition were consistent across the entire region, with north-south reverse distribution characteristics. 【Conclusion】 In the three northeastern provinces, except for spring and winter, the annual and the remaining two seasons of *SPEI* showed a decreasing trend, with an increasing trend of drought in the south and a wetting trend in the north.

Key word: standardized precipitation evapotranspiration index(*SPEI*); run theory; spatiotemporal characteristics; three northeast provinces

责任编辑: 赵宇龙