

DOI: 10.5846/stxb201606121122

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.

Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961—2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5882-5893.

基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究

沈国强^{1,2}, 郑海峰^{1,*}, 雷振锋^{1,2}

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 干旱导致生态系统生产力降低, 已成为全球观测的事实, 并将在未来气候情景下继续加剧。揭示干旱的时空分布特征是抗旱防灾、保障农业生产安全、维持生态系统健康的迫切要求。应用标准化降水蒸散指数(SPEI)和经验正交函数(EOF)分解方法, 分析东北地区干旱特征, 揭示干旱发生的时空变化规律。基于东北地区 90 个气象台站, 计算 1961—2014 年的 SPEI 指数, 从干旱频率、干旱范围和干旱强度等方面研究其特征, 并利用 EOF 分解方法解构干旱空间模态和时间系数。研究结果表明: 1) 东北地区干旱的时间差异明显。1961—2014 年, 东北地区以 1983 年、1995 年和 2008 年为转折点经历了“干—湿—干—湿”的波动变化; 夏季发生的干旱范围最大、强度最强, 冬季的范围最小、强度最弱; 2) 东北地区干旱的空间分布差异大, 西部干旱发生频繁、发生次数多、持续时间长、旱灾强度大; 3) 在 1、3、6 和 12 个月的多时间尺度下, 东北地区年均 SPEI 变量场 EOF 分解的前 3 个主要空间模态均表现为全区一致型、南北相反型和东西相反型, 其方差累积贡献率约为 58%; 4) 随着研究时间尺度的增大, 干旱的空间分布规律和时间变化趋势逐渐明晰, 表明东北地区干旱具有明显的尺度特征。综上所述, 基于 SPEI 指数对东北地区干旱进行多尺度时空分解, 刻画了干旱的基本特征, 并解构了干旱的时空分异规律, 研究结果可为该区的干旱预警研究及生态系统灾害管理提供科学依据。

关键词: 标准化降水蒸散指数; 东北地区; 干旱定量; 多尺度特征; 空间模态

Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961—2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index

SHEN Guoqiang^{1,2}, ZHENG Haifeng^{1,*}, LEI Zhenfeng^{1,2}

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Drought-induced reduction in ecosystem production prevails globally and is expected to increase with future climate change scenarios. Understanding spatio-temporal distributions of meteorological drought is fundamental for drought disaster prevention and management, food security, and ecological balance. A standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), derived from the difference between the precipitation and reference evapotranspiration, was used to quantify drought events and consequently reveal the spatio-temporal variation of drought across Northeast China. SPEI at four lags (1, 3, 6, 12 months) was calculated from daily records of mean temperature, daily precipitation, atmospheric pressure, wind speed, relative humidity, and sunshine duration. These climate variables were measured at 90 meteorological stations in Northeast China during 1961—2014. Based on the monthly SPEI values (SPEI01) of each climate station, drought events and disaster were investigated and grouped. Temporal variations of drought events in moderate, severe, and extreme grades were investigated by annual occurrence times, seasonal occurrence ranges, and intensities. Spatial characteristics of meteorological drought in each class were quantified by frequencies of drought events, duration times, and intensities of

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371194); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-302-03); 中国科学院“协同创新团队”项目(DLSXT16001)

收稿日期: 2016-06-12; **网络出版日期:** 2017-04-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghaifeng@iga.ac.cn

drought disasters. To analyze the effects of time scale on the drought spatial distribution, the principal modes of variability of the SPEI at four time scales were identified using the empirical orthogonal function (EOF) method. Our results indicated that both interannual and seasonal droughts showed obvious variations across the study area during the period. Interannual drought fluctuated, called “dry-wet-dry-wet” from 1961 to 2014, and was associated with three turning year points of 1983, 1995, and 2008. Seasonal drought appeared more intensive and widely distributed in summer, whereas it was weaker with a smaller distribution range in winter. Drought frequency ranged from 15.2% to 19.2% over the study area. The average drought frequency for moderate, severe, and extreme drought grades was 10.61, 5.2, and 1.2%, respectively. The duration of continuous drought disaster ranged from 2 to 9 months, and the intensity of drought disaster ranged from -8.8 to -3.7 . Spatial heterogeneity and complexity of drought were observed in Northeast China. The western region was the most seriously affected area, with the highest drought frequency. The EOF results showed that there were three main spatial modes for drought in Northeast China. The explained variance of the three leading EOFs ranged between 57 and 58.9% as the time scale for calculating the SPEI increased from 1 to 12 months. The explained variance of EOF1 ranged between 37.4 and 39.4%, and the explained variance of EOF2 and EOF3 ranged between 10.6 and 13.1%, and 6.5 and 8.8%, respectively. The spatial coefficients of the EOF1 for all SPEI time scales showed a similar pattern, with spatially uniform variation over Northeast China. Based on the spatial distribution of the spatial coefficients of EOF2 at all SPEI time scales, we identified two homogenous regions; the southern and northern halves of Northeast China. Eastern and western parts of Northeast China were delimited by the spatial coefficients of EOF3. The spatial heterogeneity and temporal variation was more obvious as the time scale increased from 1 to 12 months. The results of this study provided valuable insights for early drought prediction and establishing ecosystem disaster management systems in Northeast China.

Key Words: SPEI; Northeast China; drought quantification; multi-scale analyses; spatial mode

干旱是威胁我国粮食安全和经济发展最严重的气象灾害之一。据统计,每年因旱灾造成的经济损失约占全国 GDP 的 1.1%—3.5%^[1]。自 1951 年以来,全国干旱区面积以每 10 年 3.72% 的速率扩大^[2];20 世纪 90 年代之后,全国特别是北方地区的干旱频率明显增加、干旱强度显著增强^[3]。鉴于干旱的危害程度及其严峻形势,定量刻画干旱时空特征、揭示干旱发展规律,成为抗旱防灾、保障农业健康发展的迫切要求。

东北地区是我国重要的粮食生产基地,也是对气候变化最敏感的地区之一。因此,该地区的干旱时空特征定量化研究备受学者关注。有研究表明,自 1961 年以来,东北地区存在着显著的干旱化趋势^[4],严重制约农业生产和生态系统平衡^[5];但部分学者认为该区降水量增加^[6],气候变化并未加剧东北地区的干旱化趋势^[7]。此外,有关东北地区干旱空间分异的研究结论也存在矛盾和差异^[8-9]。出现以上争议,是因为干旱的机理复杂,从而使得干旱定量化研究存在不确定性^[10]。比如,这些研究多以气象站点为基本分析单元,较少关注干旱的空间模态以及其对应的时间变化,对干旱的时空特征缺乏规律性和全局性的刻画;同时,所用到的诸如地表湿润指数、Palmer 干旱指数和 SPI 指数等均存在一定的缺陷,如没有考虑到干旱的多时间尺度特征^[11]、忽视了温度对于干旱的影响作用等。因此,选择合适的干旱指数并对其进行时空分解是干旱定量研究必须解决的两大问题。SPEI 指数^[11]不仅考虑了温度和降水对干旱形成的作用,还具备多时间尺度的特征,能准确反映干湿状况;而且,我们在前期的一篇研究中已验证 SPEI 指数在东北地区具有较好适用性。经验正交函数(EOF)^[12]分解方法是气候变量时空分解的重要手段,将该方法应用于多时间尺度的 SPEI 变量场,则能提取出干旱的主要时空分布及变化特征。综上所述,本文将基于 SPEI 干旱指数,在准确表征东北地区旱年际特征、季节特征和空间特征的基础上,分析东北地区干旱的范围、强度和频率等属性,并利用 EOF 分解方法,从多时间尺度的角度探讨其时间变化规律和主要空间模态,以期对东北地区气象灾害的预警研究提供借鉴。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区

东北地区($38^{\circ}43'—53^{\circ}33'N$, $118^{\circ}50'—135^{\circ}2'E$)行政上包括中国黑龙江省、吉林省和辽宁省(图 1),陆地总面积约 84.53 万 km^2 。该区地形以平原和山地为主,东北平原处于长白山系和大、小兴安岭之间,由 3 个平

原组成,自南向北依次为辽河平原、松嫩平原和三江平原。该区面积辽阔,土层深厚,黑土资源丰富,土壤肥沃,是我国重要的粮食生产基地之一。研究区气候属于温带大陆性季风气候,全年平均气温为 5.4℃,年降水量约为 600 mm,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。气候分布呈现明显的空间差异:气温南部高、北部低,降水量东部多、西部少,东部为湿润区、西部为半湿润区。该区植被类型以寒温带落叶针叶林、温带针阔叶混交林和温带森林草原为主。本区土壤类型复杂,主要包括棕色针叶林土、暗棕壤、棕壤、黑土、黑钙土等地带性土壤,以及草甸土、沼泽土、白浆土和盐碱土等非地带性土壤。

1.2 数据来源

本文计算干旱所用的气象数据集来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0),该数据集由中国气象局发布,记录了从 1961 年 1 月 1 日到 2014 年 4 月 30 日之间东北地区 90 个气象站点的气候数据,气象要素包括最高气温、最低气温、平均气温、日降水量、日平均气压、2 m 高处风速、平均相对湿度和平均日照时数。以上数据均经过中国气象局严格的质量控制,数据采集时间连续、完整,各要素项的数据实有率和正确率均在 99% 以上,满足研究的精度要求。本文季节划分采用气象学标准:春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月—次年 2 月。

2 研究方法

2.1 SPEI 计算

SPEI 的假设是历史同月的累积水分亏缺量(即降水量减去蒸散量)序列服从三参数 Log-logistic 分布。其主要计算步骤如下:先计算蒸散量和水分亏缺量,然后用 Log-logistic 概率密度函数拟合水分亏缺量序列,再用分布函数求累计概率,最后转化成标准正态分布得到。

(1) 本文采用 FAO Penman-Monteith 法^[13] 计算蒸散量,计算公式如下:

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)}$$

式中,PET 为潜在蒸散量(mm/d), R_n 为地表净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$), Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), γ 为干湿表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), μ_2 为 2m 高处风速(m/s), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa)。

(2) 用于拟合水分亏缺量序列的三参数 Log-logistic 概率密度函数为:

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

分布函数为:

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

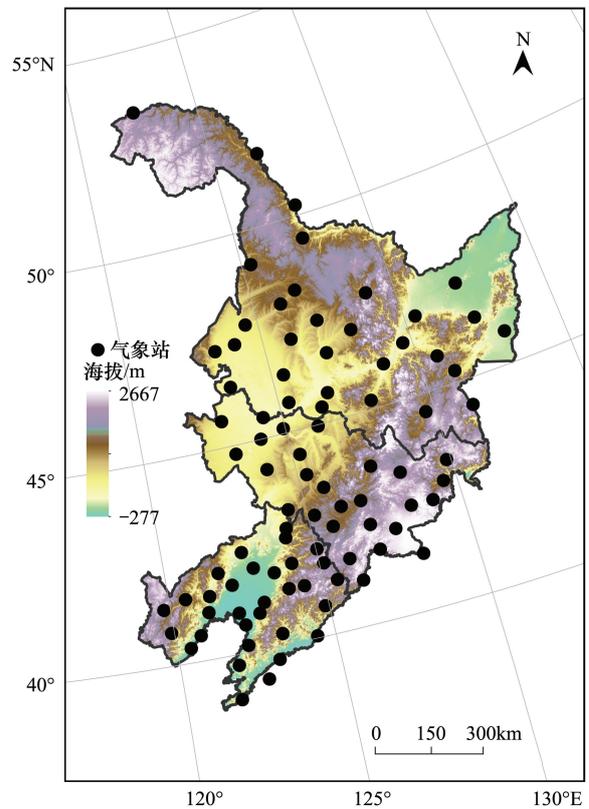


图 1 研究区及气象站分布

Fig.1 Study area and meteorological stations

式中, α 为尺度参数, β 为形状参数, γ 为位置参数, 可以通过线性矩的方法拟合获得。

(3) 对拟合结果进行标准正态分布转换, 获得对应的 SPEI:

$$\text{SPEI} = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}, W = \sqrt{-2 \ln(P)}$$

当 $P \leq 0.5$ 时, $P = 1 - F(x)$; 当 $P > 0.5$ 时, $P = 1 - P$, 同时 SPEI 的符号逆转, 式中其他常数项分别为 $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。具体计算步骤参见文献^[11]。蒸散量和 SPEI 值均在 R 语言 SPEI package (访问地址: <https://mirrors.tuna.tsinghua.edu.cn/CRAN/>, 访问时间: 2015 年 10 月 15 日) 中计算, 本文计算了 1、3、6 和 12 个月尺度的 SPEI 指数。

2.2 干旱与干旱灾害识别

干旱指由水分收支或供求不平衡所形成的水分短缺现象。干旱视其程度, 可划分为由轻到重的不同等级^[14], 如中旱、重旱、特旱。干旱灾害则是指造成了农业、经济损失, 对社会有较大影响的程度较重的干旱^[15]。根据中国气象干旱等级国家标准^[16], 本文划定: 当某站某月的 $\text{SPEI} \leq -1$, 则称为发生“干旱”, 记为 1 站次; 当某站连续 3 个月 $\text{SPEI} \leq -1$, 则称为发生“干旱灾害”。

2.3 干旱的定量表征

干旱的定量表征通过其属性来表示, 主要包括干旱强度、干旱比例和干旱频率。

(1) 干旱强度

干旱强度用来评价研究区内干旱的严重程度。其定义为, 在干旱过程内, 旱情达到中旱的 SPEI 值之和, 其值越小表明干旱越强。

$$\text{DII} = \sum \text{SPEI}_{\text{SPEI} \leq -1}$$

式中, $\text{SPEI}_{\text{SPEI} \leq -1}$ 为小于 -1 的 SPEI 值。

(2) 干旱站点比例

干旱站点比例是一定时段内发生干旱的站点数量占总站点数的比例, 其值越大表明干旱影响的范围可能越广。

$$\text{DRI} = \left(\frac{s}{S} \right) \times 100\%$$

式中, s 为发生干旱的站点数, S 为研究区总站点数。

(3) 干旱频率

干旱频率是研究期内发生干旱的月数占总月数的比例, 其值越大表明干旱发生越频繁。

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

式中, m 为发生干旱的月数, M 为研究期总月数。

2.4 SPEI 的空间插值

为了反映短期的干旱状况, 本文基于 1 个月尺度 SPEI 值 (SPEI01) 识别干旱与干旱灾害, 提取干旱定量特征, 最终提取结果以反距离权重插值法进行空间展示。反距离权重插值法是基于“相近相似”的地理学定律, 该方法认为与插值点距离最近的已知样本点对插值点值的贡献最大, 其贡献与距离成反比, 通过计算给定范围内或给定数量的已知采样点的加权平均值来确定插值。

$$Z(x) = \sum_i W(d_i) Z(x_i) / \sum_i W(d_i)$$

式中, $Z(x)$ 为点 x 估计值, d_i 为已知采样点 i 到点 x 的距离, $W(d_i)$ 表示 d_i 对应的权重, 本文使用常用的反距离权值函数: $W(d) = d^{-2}$ 。

2.5 经验正交函数分解

经验正交函数 (EOF) 分解是气候变化领域常用的时空分解方法。其原理是将某气候变量场的观测资料

以矩阵形式给出(m 是观测站, n 是时间序列长度):

$$X_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

将变量 $X_{m \times n}$ 看作是 p 个空间特征向量和对应的时间权重系数的线性组合:

$$X_{m \times n} = V_{m \times p} T_{p \times n}$$

式中, T 为时间系数, V 为空间特征向量, 又称空间模态。这一过程将变量场的主要信息集中由几个典型特征向量表现出来。为研究东北地区干旱发生的时间变化规律和空间模态, 本文对多尺度 SPEI 指数的年均变量场进行 EOF 分解, 提取其主要空间模态及其对应时间系数, 揭示干旱的时空变化规律。

3 结果分析

3.1 东北地区干旱的时间特征

3.1.1 年际变化特征

1961—2013 年, 东北地区各等级干旱发生次数的年际变化见图 2。从图中可以看出, 干旱发生次数呈现波动变化, 20 世纪 80 年代中期是干旱发生的低谷期, 之后逐渐增多, 到 2008 年后呈现减少趋势(图 2a)。1961—2013 年的 53 年间, 东北地区平均每年发生 182 站次干旱事件。干旱次数超过 250 站次的共有 10a, 其中 1982 年发生干旱的次数最多, 高达 318 站次。就不同等级干旱来看, 平均每年发生中旱 114 站次(图 2b), 其中, 1961 年发生中旱的次数最多, 达 190 站次, 2012 年中旱次数最少, 为 56 站次; 重旱和特旱发生最多的年份均是 2002 年, 分别达 122 站次(图 2c)和 60 站次(图 2d), 是同等级干旱平均发生次数的 2.2 倍(55 站次)和 4.8 倍(13 站次)。

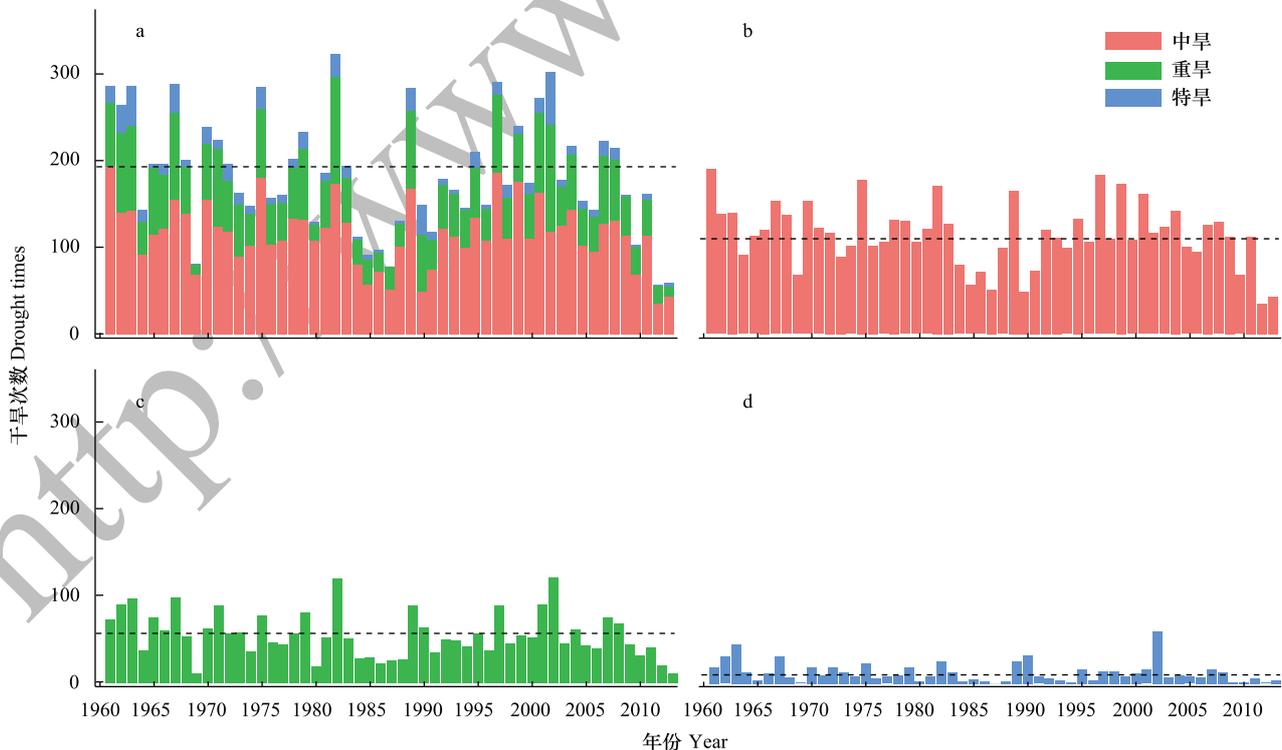


图 2 各等级干旱发生次数的年际变化

Fig. 2 Inter annual variation of the drought times in each grade

3.1.2 季节变化特征

图 3 显示干旱站点比例的季节差异。1963 年春季干旱站点比例最大,超过 45%,其次是 2002 年和 1989 年,干旱站点比例均超过 35%;夏季干旱站点比例超过 35%的则为 1982 年、2000 年和 2007 年;2001 年、1967 年和 1990 年发生过较大比例的秋季干旱;冬季干旱站点比例均小于 40%,其中比例最高的年份为 1981 年,其次是 2001 年和 1995 年。

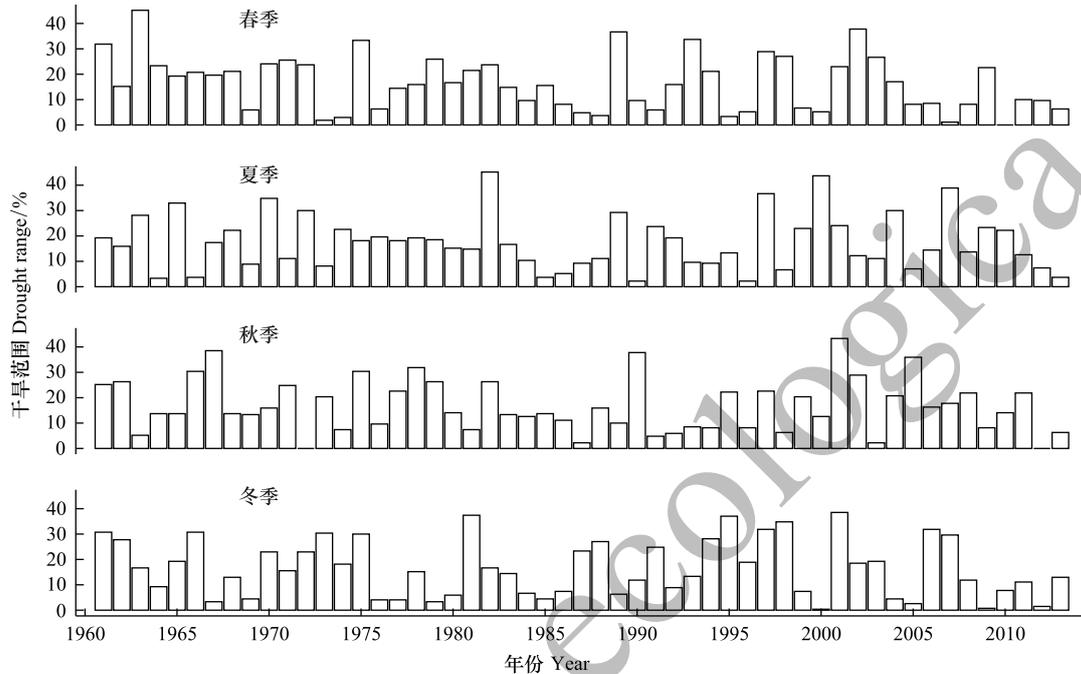


图 3 不同季节干旱比例年际变化

Fig.3 Inter annual variation of the drought range in different seasons

不同等级干旱的发生站点比例也存在季节差异(表 1),中旱发生比例最大的季节为夏季(11.16%),冬季最小(9.99%);重旱发生比例最大的季节也在夏季(5.39%),春季最小(4.68%);特旱发生比例最大的季节为冬季(1.36%),夏季最小(0.87%)。就干旱强度的季节差异来看:中旱和重旱强度最大的均是夏季,冬季和春季较小;特旱强度最小的是夏季,最大的是冬季。综合来看,夏季发生干旱的站点比例最大、强度最强,冬季发生干旱的站点比例最小、强度最弱。

表 1 不同等级干旱比例及强度的季节差异

Table 1 Seasonal difference of the drought range and drought intensity in each grade

季节 Season	中旱比例 Range of md	重旱比例/% Range of sd	特旱比例/% Range of ed	中旱强度/% Intensity of md	重旱强度 Intensity of sd	特旱强度 Intensity of ed
春季 Spring	10.60	4.68	1.19	-11.71	-7.16	-2.4
夏季 Summer	11.16	5.39	0.87	-12.41	-8.23	-1.7
秋季 Autumn	10.38	5.20	1.23	-11.45	-7.95	-2.45
冬季 Winter	9.99	5.25	1.36	-11.11	-8.09	-2.77

md: moderate drought;sd: severe drought;ed: extreme drought

3.2 东北地区干旱的空间分布特征

干旱发生频率的空间差异如图 4 所示。总体来看,东北地区干旱频率在 15.2%—19.2%之间,其中,中旱、重旱和特旱发生频率的区间分别为 7.8%—13.3%、3.1%—7.2%和 0.5%—1.9%(图 4),平均发生频率分别为 10.61%、5.2%和 1.2%;干旱越严重,其发生频率越低。从空间上看,不同等级干旱发生频率的地区差异明显。其中,中旱发生频率较高的区域分布在辽宁南部渤海湾地区、吉林西部和东南部山区、黑龙江南部和西

北部分地区;吉林东南部、辽宁中南部、黑龙江西部和三江平原地区是重旱发生频率较高的地区;特旱发生频率较高的地区主要是辽宁大部、吉林西部和黑龙江大部。

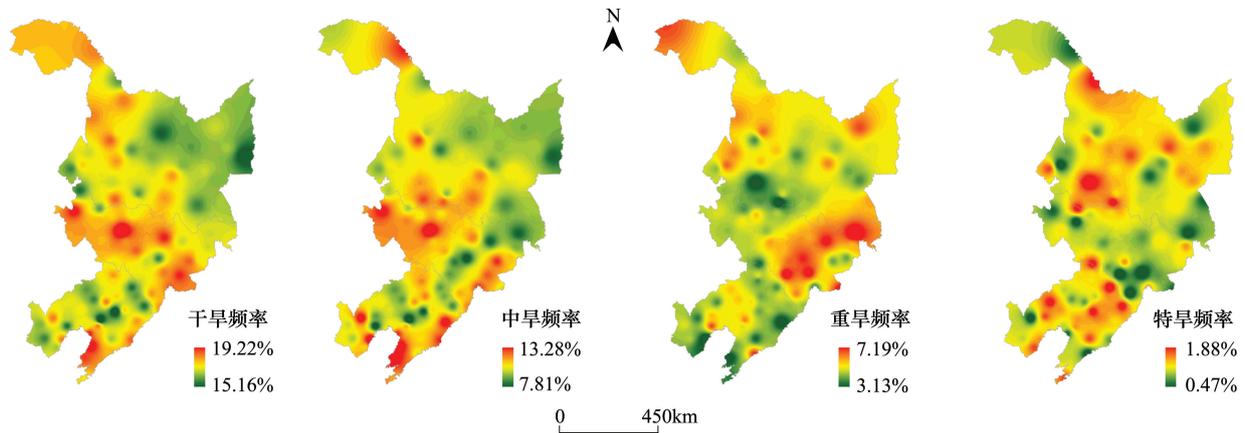


图4 不同等级干旱发生频率分布图

Fig.4 Frequency of drought in each grade

就干旱的最长持续时间(图5)而言,在全区范围内,干旱最长持续时间为2—9个月,平均为4.58个月。其中,东北地区东部的干旱最长持续时间较短,而西部地区易发生持续性干旱,尤以吉林省和黑龙江省交界的西部地区最为严重。

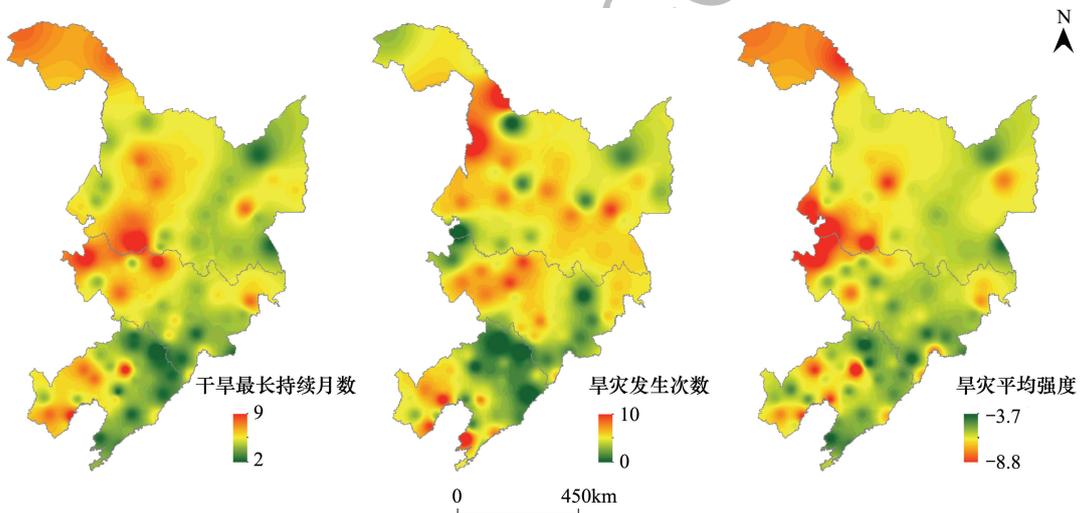


图5 干旱特征空间分布

Fig.5 Spatial distribution of Drought Characteristics

以旱灾的发生次数来看,1961—2013年东北地区平均发生旱灾5次,其中旱灾次数较高的站点是黑河、嫩江、瓦房店和葫芦岛站,为9—10次。在空间上看(图5),发生旱灾次数较多的地区主要包括黑龙江西北部、吉林中西部以及辽宁渤海湾地区;辽宁省北部地区较少发生旱灾。

以旱灾的发生强度来看,平均旱灾强度区间为-8.8—-3.7,强度最大的旱灾发生在吉林西部、辽宁中部和黑龙江西南部和西北部(图5)。

3.3 东北地区干旱的多尺度时空模态分析

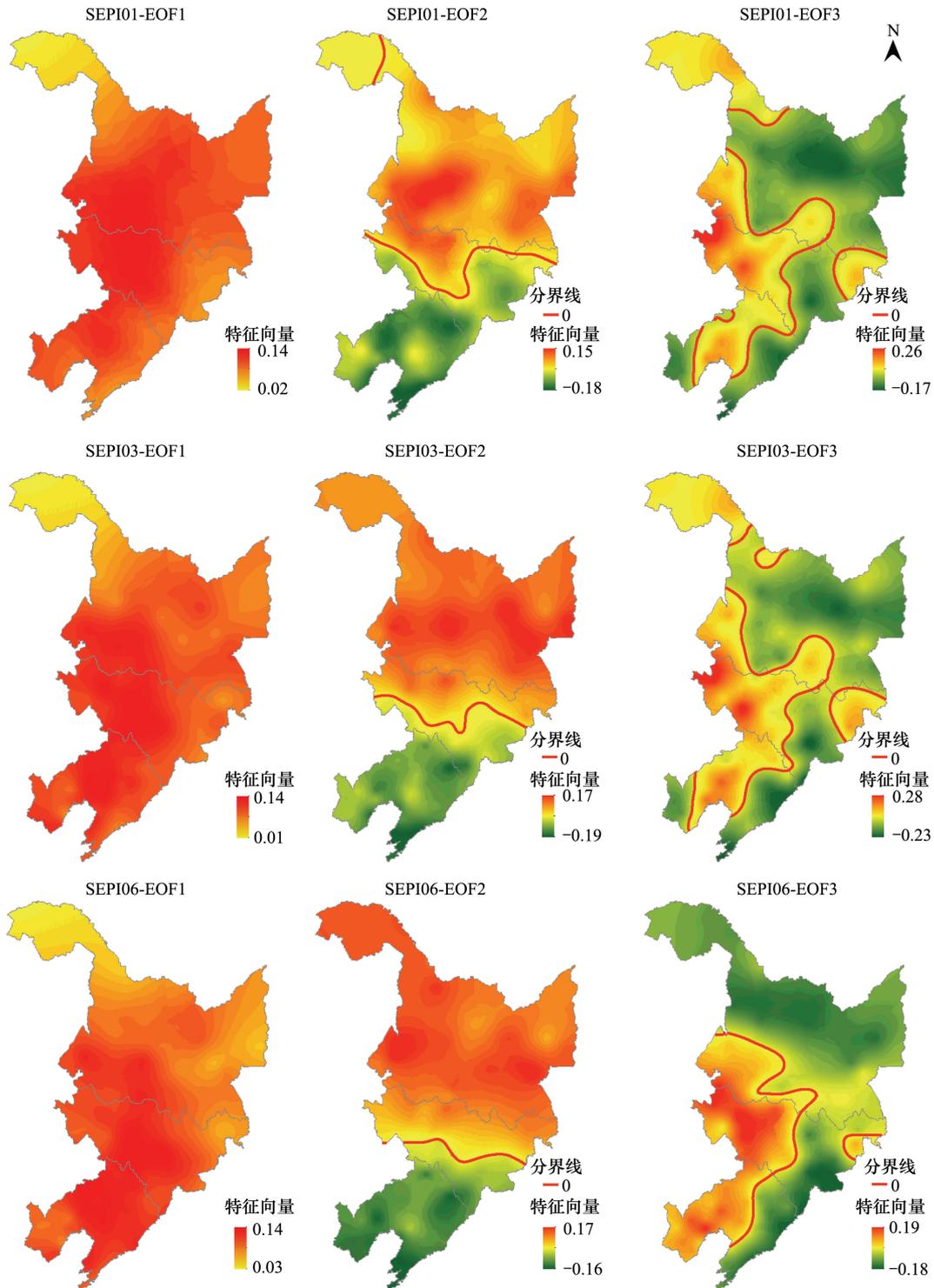
SPEI 年均变量场(SPEI01, SPEI03, SPEI06 和 SPEI12)的 EOF 分解结果显示,在4个时间尺度下,前3个主要特征向量的方差累积贡献率分别达58.9%, 58.2%, 57.1% 和 58.4%(表2)。下面,以 SPEI01 为例来说明东北地区的干旱时空分解特征。

表 2 前 3 个特征向量对多尺度年平均 SPEI 场的方差贡献率

Table 2 Explained variance of the leading EOFs of multiscale averaged SPEI

主要模态 Leading EOFs	贡献率(累积贡献率) Explained variance (Cumulative explained variance)			
	SPEI01	SPEI03	SPEI06	SPEI12
第一模态 EOF1	39.374(39.374)	38.892(38.892)	38.219(38.219)	37.427(37.427)
第二模态 EOF2	10.647(50.021)	12.041(50.933)	12.372(50.591)	13.126(50.553)
第三模态 EOF3	8.812(58.833)	7.275(58.208)	6.524(57.115)	7.89(58.443)

第 1 特征向量是东北地区干旱空间分布的主要模态,方差贡献率为 39.4%。由图 6 可以看出,第 1 特征



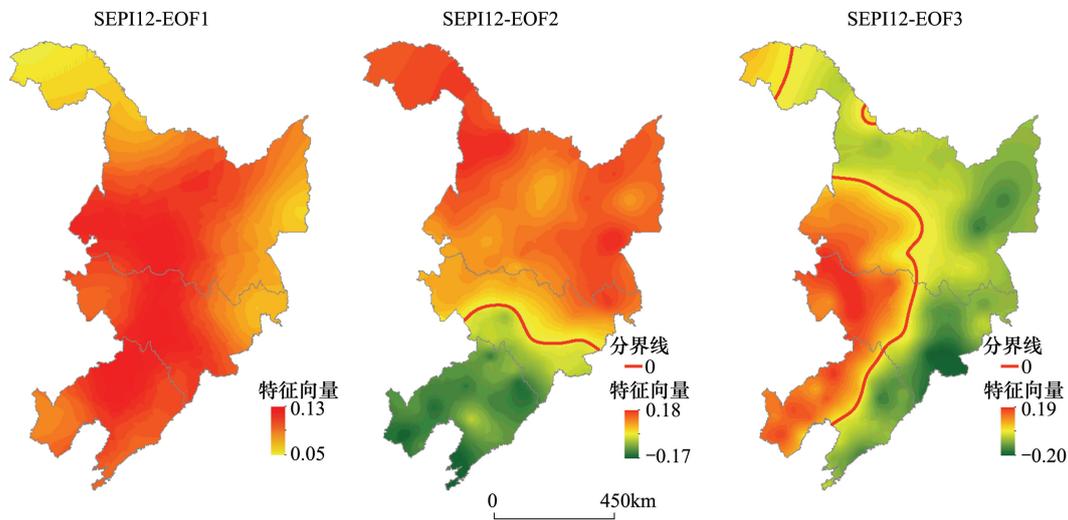


图 6 年均 SPEI 场的前 3 个特征向量

Fig.6 The first three feature vectors of the averaged SPEI

向量区间为 0.02—0.14, 均为正值, 这表明东北干旱的主要模态呈现区域一致性; 以黑龙江西南部和吉林中西部为高值中心逐渐向四周递减, 说明该区是发生干旱的敏感地区; 第 1 特征向量对应的时间系数 (图 7) 总体呈上升趋势, 以 20 世纪 80 年代中上期为界, 由负值转为正值, 即表明第一模态具有“由干转湿”的变化特点, 尽管在 2000 年前后几年里有干旱化迹象, 但之后急剧转为湿润。

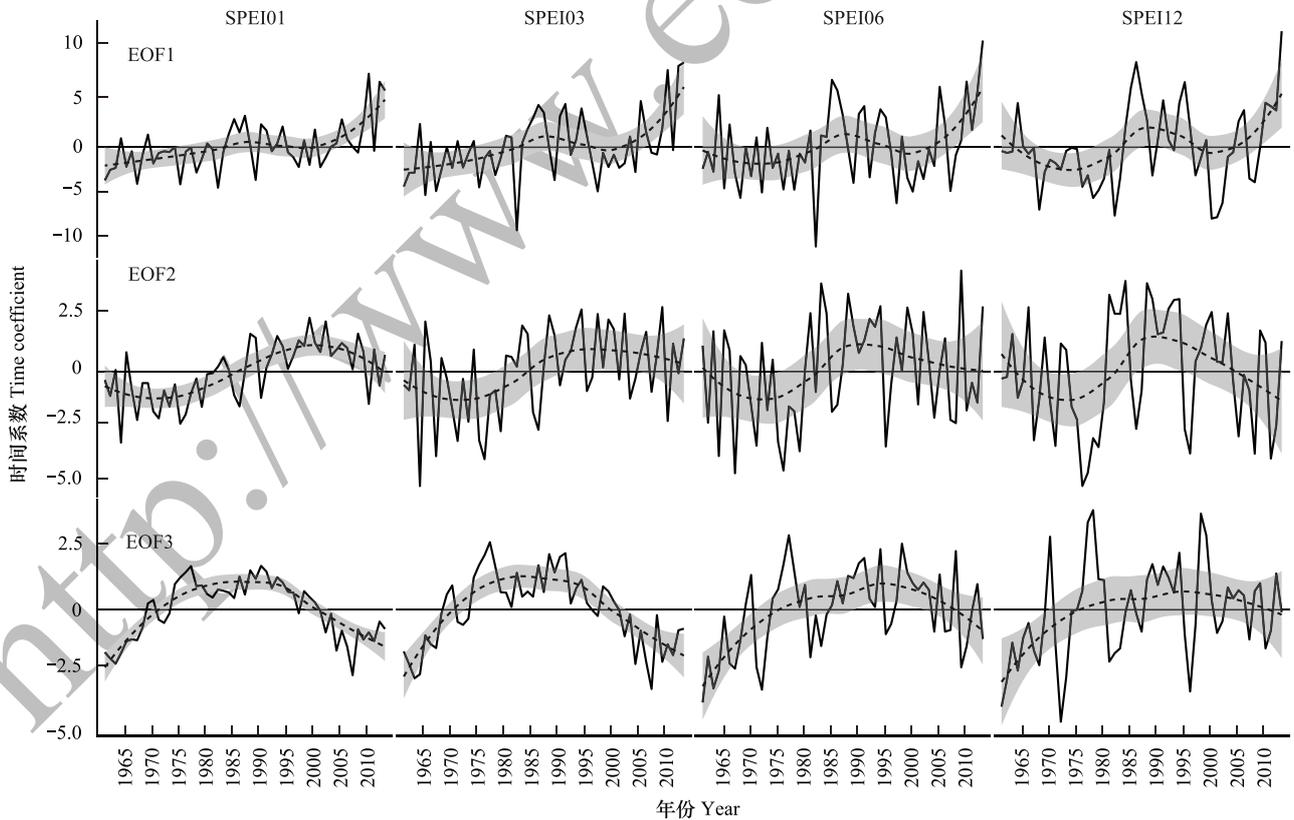


图 7 SPEI 年均变量场的前 3 个特征向量对应的时间系数

Fig.7 Time coefficients of the first three feature vectors

第 2 特征向量贡献率为 10.7%, 总体来看, 在空间上呈现南北相反的分布, 北部高值中心位于黑龙江西南部, 而南部则表现为多中心, 表明干旱的第二模态具地区复杂性; 其时间曲线为倒“S”波浪形, 80 年代中期和 2010 年前后分别是由负转正、由正转负的时间点, 即表明, 东北南部地区经历了“湿-干-湿”的轨迹变化, 而北部则与之相反。

第 3 特征向量的方差贡献率为 8.8%, 是东北干旱区域特征的第三重要模态, 总体呈东西相异分布格局, 西部地区在 20 世纪 70 年代初由于干旱转为湿润, 1977 年和 1990 年达到最湿润状态, 之后逐渐减弱, 2001 年之后转为干旱, 2007 年和 2008 年达到最大强度干旱, 东部地区反之。

SPEI03、SPEI06 和 SPEI12 与 SPEI01 的 EOF 分解结果呈现类似特点, 即前 3 个空间模态均为全区一致型、南北相反型和东西相反型(图 6)。多时间尺度的 EOF 分解对比表明, 随着时间尺度的增大, 特征向量的正负值分界线由复杂转向简单。这说明时间尺度越小, 干旱的细节越清晰, 而时间尺度越大, 干旱的空间规律性越明确。时间尺度对 EOF 分解的影响同样呈现在时间系数的变化上, 由图 7 可见, 随着研究时间尺度的增大, 时间系数的变化频率逐渐减弱, 而变化幅度逐渐增强, 即表明长时间尺度的 SPEI 对气候的响应减慢, 可以更清楚地反映旱涝变化的年际特征。

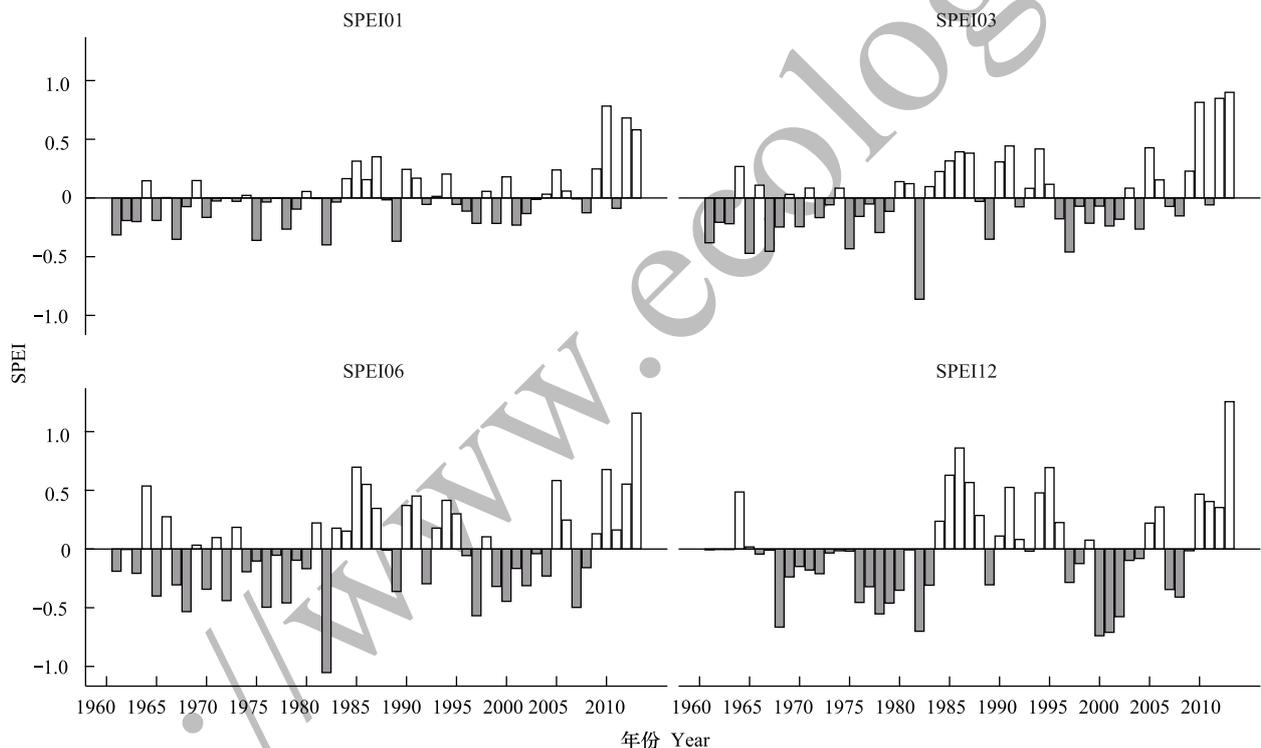


图 8 东北地区平均 SPEI 值的年际变化

Fig.8 Interannual variability of average SPEI index in Northeast China

4 讨论

(1) 东北地区干旱的时间变化具有明显的年代际特征。1961—1983 年干旱发生频繁、范围广, 1984—1994 年干旱发生次数减少, 1995—2008 年干旱发生严重, 随后逐渐转为湿润状态。胡娜娜^[17] 基于单站 Z 指数分析认为东北地区 1961—1975 年为偏涝期, 持同样观点的研究还包括马建勇等^[18]。但孙力认为该时段属于变干阶段^[19], 王亚平也认为潜在蒸散增加导致该时段地表干燥度指数呈增加趋势^[7]。可见, 东北地区 60 年代初至 70 年代中期的干湿状况和趋势究竟如何, 这在学界有较大争议。出现以上差异, 主要是由于胡娜娜和马建勇的研究仅仅基于降水单因素指标, 没有考虑到气温对干旱的影响, 而孙力和王亚平的研究是基于地表干燥度指标, 考虑到了温度在干旱形成中所起的作用。由图 8 可见, 在不同时间尺度下, 1961—1975 年东

北地区的平均 SPEI 值大多处于负值状态,因此,本文认为,1961—1975 年间多数年份处于水分亏损状态,东北地区这段时期是偏旱的。

(2)东北地区干旱范围和强度呈现季节差异。干旱范围由大至小依次为夏季>秋季>冬季>春季,干旱强度为夏季>冬季>秋季>春季。由此可见,东北地区夏、秋季比冬、春季的干旱更为严重,而夏季是作物生长的重要时段,大范围、高强度的夏季干旱严重威胁农作物的生长^[4],应当着重关注夏季干旱。以往的研究多集中于生长季或年度干旱,但近期出现了专门针对东北地区夏季干旱的研究。孟鑫^[20]用极点对称模态分解方法和 SPEI 指数对东北地区的夏季干旱进行了研究,认为夏季干旱呈现一致的干旱增加趋势,黑龙江部分地区干旱增加趋势显著,辽宁和吉林的南部地区干旱增加趋势较小。裘祝香^[21]定义并分析了夏季干旱综合风险指数,并据此对东北地区进行了夏季干旱风险分区,结论显示,黑龙江西南部、吉林和辽宁西部为夏季干旱高风险区。本研究发现,降水充足的夏季反而干旱更为普遍、更加严重,是因为 SPEI 指数以水分亏缺量而非降水量作为干旱评估的重要标准。可见,夏季高温引起水分蒸发支出对干旱的形成起了重要作用。WEI^[22]对中国西北地区的干旱研究也得出了类似结论:尽管降水不断增多,但是温度升高引起的蒸散量增加是导致西北地区干旱加剧的主要原因。

(3)东北地区干旱空间分布有 3 个主要模态,其中第一模态具有区域一致性,其次是南北相异和东西相反的两个模态,该结论与高蓓的研究结果较为接近^[23]。第一模态表明,东北干旱状况整体呈现一致性特点,以中西部为中心向四周递减,该模态对应的时间系数表明,东北地区经历了由干转湿的过程;时间尺度越大,干旱的时间系数和空间模态越趋向于表现全局而非局部、展示规律而非细节。由此可见,SPEI 指数具备的多时间尺度优势,是分析短期—中期—长期干旱的时间变化特征和空间分布特征的重要工具;而 EOF 分解方法能从复杂的干旱变量场中分解出相互正交的时空模态,准确表达干旱的时间变化和空间模态,是分解干旱特征的重要手段,由此剖析的干旱时空框架具有较强的规律性和可辨识性。

(4)将有限气象站点的 SPEI 值推算到整个研究区得到干旱的空间分布,其结果会因插值方法的不同而存在差异。本文所用的反距离权重插值法算法简单容易实现,但是没有明确考虑地形因子对干旱的影响,因此,分析结果可能存在局限性和不确定性。鉴于此,面源数据在干旱细化研究中的优势有待进一步挖掘。

(5)明晰干旱变化对生态学过程的影响是阐明生态系统对干旱响应机制的基础。目前的研究较多地从个体尺度入手,如李柏贞^[24]、樊宪伟^[25]分别分析了玉米和春小麦适应干旱的生理生态学过程,段洪浪^[26]研究了干旱胁迫下树木的碳水过程以及干旱死亡机理。如何从景观及更大尺度上探索干旱条件下植物的生态学适应过程,是生态学尺度效应分析的必然要求,也是重大挑战之一。

5 结论

本文基于东北地区可适用的 SPEI 指数和气象学常用的 EOF 分解等方法,分析了 1961—2014 年东北地区干旱特征(包括范围、强度和频率等),并探讨了干旱时间变化规律和空间分布模态。研究表明,东北地区干旱的年际和季节差异明显,以 1983 年、1995 年和 2008 年为转折点呈“干-湿-干-湿”的波动变化,夏季发生的干旱范围最大、强度最强,冬季发生的干旱范围最小、强度最弱;东北地区西部干旱发生频繁、发生次数多、持续时间长、旱灾强度大;干旱的空间模态主要为全区一致型、南北相反型和东西相反型,其方差累积贡献率约为 58%。该研究实现了 SPEI 指数在东北地区多时间尺度干旱研究中的应用,有助于理解干旱发生规律,为进一步预测气候变化背景下干旱发展趋势及减灾防灾提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 刘小龙,虞美秀. 中国近 60 年干旱演变特征分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 177-183.
- [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] Chen H P, Sun J Q. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate,

- 2015, 28(13): 5430-5447.
- [4] Yu X Y, He X Y, Zheng H F, Guo R C, Ren Z B, Zhang D, Lin J X. Spatial and temporal analysis of drought risk during the crop-growing season over northeast China. *Natural Hazards*, 2014, 71(1): 275-289.
- [5] Zheng H F, Shen G Q, He X Y, Yu X Y, Ren Z B, Zhang D. Spatial assessment of vegetation vulnerability to accumulated drought in Northeast China. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(8): 1639-1650.
- [6] He J, Yang X H, Li Z, Zhang X J, Tang Q H. Spatiotemporal variations of meteorological droughts in China during 1961-2014: an investigation based on multi-threshold identification. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2016, 7(1): 63-76.
- [7] 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. *地球科学进展*, 2008, 23(6): 619-627.
- [8] 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. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 22-28.
- [9] 李明, 王贵文, 张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 65-70.
- [10] Dai A G. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011, 2(1): 45-65.
- [11] Vicente-Serrano S M, Begueria 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.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Paper No 56. Rome: FAO, 1998: 56-56.
- [14] Xu K, Yang D W, Yang H B, Li Z, Qin Y, Shen Y. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 253-264.
- [15] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 冯建英, 赵艳霞. 我国气象干旱研究进展评述. *干旱气象*, 2013, 30(4): 497-508.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20481-2006 气象干旱等级. 北京: 中国标准出版社 2006.
- [17] 胡娜娜. 东北三省旱涝时空演变及趋势判断[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [18] 马建勇, 许吟隆, 潘婕. 基于 SPI 与相对湿度指数的 1961—2009 年东北地区 5—9 月干旱趋势分析. *气象与环境学报*, 2012, 28(3): 90-95.
- [19] 孙力, 沈柏竹, 安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 542-552.
- [20] 孟鑫. 东北地区夏季干旱的年际-年代际变化[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [21] 袭祝香, 杨雪艳, 刘实, 纪玲玲. 东北地区夏季干旱风险评估与区划. *地理科学*, 2013, 33(6): 735-740.
- [22] Wei K, Wang L. Reexamination of the aridity conditions in arid northwestern China for the last decade. *Journal of Climate*, 2013, 26(23): 9594-9602.
- [23] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 朱娴韵, 王艳君. 基于 SPEI 的 1961—2012 年东北地区干旱演变特征分析. *中国农业气象*, 2014, 35(6): 656-662.
- [24] 李柏贞. 玉米干旱过程及其动态模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
- [25] 樊宪伟. 春小麦适应干旱的生理生态学机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [26] 段洪浪, 吴建平, 刘文飞, 廖迎春, 张海娜, 樊后保. 干旱胁迫下树木的碳水过程以及干旱死亡机理. *林业科学*, 2015, 51(11): 113-120.