



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.003

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 Si yang, ZUO De peng, XU Zong xue, 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. (in Chinese)

基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征

蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 杨晓静

(北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 基于东北地区 86 个国家基本气象站 1960 年-2014 年逐月降水量和平均气温数据, 计算不同时间尺度下的标准化降水蒸散指数(SPEI), 分析不同时间尺度下东北地区季节、年际以及年代际干旱时空分布特征, 并与实际干旱成灾面积进行对比分析, 验证 SPEI 在东北地区干旱评估中的适用性。结果表明: 春季、夏季和冬季重旱发生频率随时间尺度增大而升高; 中旱发生频率随时间尺度增大而降低。近 55 年东北地区旱涝情势交替出现, 干旱频率随年代际变化逐渐升高, 干旱程度逐渐加重。整体来看, 随时间尺度增加, 极旱发生范围逐渐扩大。东北三省在春季、夏季和秋季均有不同频率的干旱事件发生; 冬季吉林和辽宁无极旱发生; 黑龙江中部无重旱发生。

关键词: 标准化降水蒸散指数; 多时间尺度; 东北地区; 干旱

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0015-07

Spatiotemporal characteristics of drought in Northeast China based on SPEI

CAI Si yang, ZUO De peng, XU Zong xue, YANG Xiao jing

(College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on monthly precipitation and average air temperature data from 86 national meteorological stations during the past 55 years (1960-2014) in the Northeast China, the values of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) at various time scales were calculated to represent drought conditions, and the characteristics of spatiotemporal distribution of drought at different time scales in the Northeast China were analyzed. The calculation results were compared with the actual drought area data to verify the applicability of the SPEI to the drought assessment of the Northwest China. The results showed that the frequency of severe droughts in spring, summer, and winter would increase with the increase of the time scale, whereas the frequency of medium droughts would decrease with the increase of the time scale. Droughts and floods in the Northeast China occurred alternatively during the recent 55 years. The frequency and intensity of drought increased gradually on a decadal basis. Generally speaking, the scope of extreme droughts would gradually expand with the increase of the time scale. Droughts occurred at different frequencies in spring, summer, and spring in the Northeast China. No extreme drought occurred in winter in Jilin and Liaoning provinces. No severe drought occurred in the middle of Heilongjiang province.

Key words: standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); multi timescale; Northeast China; drought

干旱是世界上普遍发生的一种气象灾害,是指 由于水分收支或供求不平衡而形成的水分短缺现象

收稿日期: 2016-04-14 修回日期: 2016-10-19 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1928.018.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目资助(201401036); 国家自然科学基金项目(51309010)

Funds: National Public Welfare Foundation of the Ministry of Water Resources of China(201401036); National Natural Science Foundation of China(51309010)

作者简介: 蔡思扬(1992-), 女, 辽宁铁岭人, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: caisiyang@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 左德鹏(1985-), 男, 宁夏石嘴山人, 讲师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: dpzuo@bnu.edu.cn

象、是一种水量相对亏缺的自然现象、是造成严重损失的气象灾害之一,其发生频率高、持续时间长、影响范围广,已经成为制约我国经济发展和社会进步的重要因素之一^[1]。2014 年我国因干旱所造成的粮食损失高达 2 006 万 t、经济作物损失达到 276 亿元、直接经济损失共 910 亿元。东北三省是我国最主要的商品粮和经济作物的生产基地,近年来,东北地区的干旱有所加重^[2],一些地区的降水量持续减少,已经接近或者突破历史极值,容易造成各种农作物的减产^[3]。针对目前东北地区的干旱情况,杨贵羽等^[4]通过对 1950 年-2010 年东北地区受旱面积率、干旱发生频次等进行统计分析,认为东北地区干旱灾害发生的频次和程度均有增加趋势;邹旭恺等^[5]利用综合气象干旱指数(CI)研究得出,东北地区由于气温升高的原因导致干旱加重;段佩利^[6]等利用标准化蒸散指数(SPI)分析吉林省东部山区的干旱时空特征,结果表明该地区的干旱呈加重趋势;张淑杰^[7]等通过计算玉米水分亏缺指数分析玉米在不同生长发育期的干旱时空分布及其年际的变化特征,结果表明:近 10 年来干旱呈显著增加,且在各发育阶段会同时发生;胡实等^[8]通过计算在 A1B、B1 和 A2 三种情境下基于降水年蒸发力标准化干旱指数(SPEI)预估中国北方地区未来 40 年呈现干旱化倾向;马建勇^[9]等通过在 A1B 情景下计算相对湿润指数,预估 2011 年-2100 年东北地区农作物生长季将持续干旱化;杨晓晨等^[10]进行标准化降水蒸散指数(SPEI)与东北春玉米气候产量的关系分析,结果表明提高玉米产量需增加灌溉和提高水分利用效率;韩晓敏等^[11]利用标准化降水指数(SPI)分析东北农牧交错带的旱涝特征变化,结果表明东北农牧交错带暖干化的趋势给该区农牧业带来不利影响,应及时启动干旱预警紧急方案。但是对于东北地区年代际和季节干旱情况的研究成果较少。

考虑到干旱的成因复杂,易受人类的活动影响,目前普遍使用干旱指数来描述干旱现象^[12]。常用的干旱指数有帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[13]、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)^[14]、标准化降水蒸发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)及自定义的干旱强度指数^[15]、水分亏缺指数^[16]等。PDSI 指数基于固定的时间尺度进行计算,因此无法分析多时间尺度下干旱时空变化的特点^[17];SPI 是一种基于降水的干旱指标,计算简便,能够很好地反映不同时间尺度下干旱变化,输入数据只需降水量,从而不能反映由于气温变化所导

致的干旱情势^[18];干旱强度指数、水分亏缺指数均基于降水和蒸散发的差值或比值,由于空间的不一致性,不易进行空间比较^[19]。标准化降水蒸发指数(SPEI)具有多时间尺度的优势,能够对不同时间尺度的旱涝情势进行比较,且具有良好的稳定性^[20]。

综上所述本文选取东北三省(黑龙江省,吉林省和辽宁省)作为研究区,选取标准化降水蒸发指数(SPEI)进行分析,文中选取研究区 86 个气象站点 1960 年-2014 年逐月降水和气温数据,计算在不同时间尺度(1 个月、3 个月、6 个月、12 个月和 24 个月)下,东北地区年代际干旱,年际干旱和季节干旱发生的时空分布特征。

1 研究区概况

东北地区位于 120°E-135°E, 38°N-56°N 之间,包括黑龙江省、吉林省和辽宁省,面积 78 8 万 km²,占中国陆地总面积的 8.2%。年平均降水量为 350~1 200 mm,平均气温为-4.8℃~11.3℃^[21]。东北三省受东亚大陆季风气候的控制,冬季寒冷漫长,夏季温暖而短促。自南向北跨暖温带、中温带与寒温带。东北地区典型植被有针叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林以及草甸草原等。地形以平原,山地为主;外围是黑龙江、鸭绿江等流域的低地,中间是山地和丘陵,内部则是广阔的原野。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文采用的数据是逐月降水和平均气温,均来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),东北三省包括 96 个国家气象站点。为保证气象站点数据序列的完整性,缺失的数据通过与其具有良好的相关性的邻近气象站建立线性回归关系进行插值,所有的确定性系数(R^2)均在 0.8 以上。最终选取其中 86 个基本气象站点 1960 年-2014 年逐月降水和平均气温数据进行干旱指数计算。研究区气象站点分布见图 1。本文采用的辽宁、吉林、黑龙江三省干旱成灾面积数据均来自于《中国统计年鉴》。

2.2 研究方法

Vicente-Serrano(2010)^[22]提出了标准化蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),计算过程如下。

(1) 潜在蒸散量的计算。计算公式如下^[23]:

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

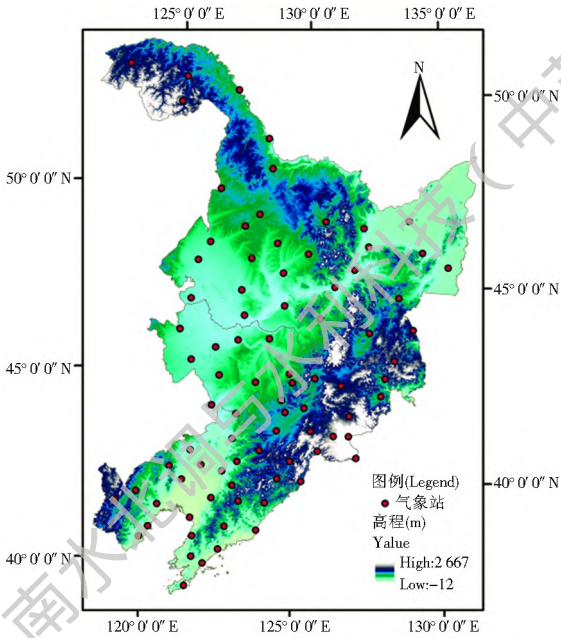


图1 东北三省气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Northeast China

式中: T 为月平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); I 为年热指数, 其计算公式为 12 个月指数值的总和; m 为系数, 取决于 I : $m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492$; K 为纬度和月份函数的校正系数。

(2) 不同时间尺度上月降水量和 PET 的差值。计算公式如下:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中: D_i 为不同时间尺度的净降水量, 第 j 年第 i 月 $D_{i,j}^k$ 取决于所选择的时间尺度 k 。例如, 12 个月时间尺度上第 j 年第 i 月的累积差计算公式为

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} \quad j < k$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l} \quad j \geq k \quad (3)$$

式中: $D_{i,j}$ 为第 j 年第 i 月 P 和 PET 之差 (mm)。

(3) 利用对数逻辑斯特 (log logistic) 概率分布标准化 D 序列, 以获得 SPEI 指数序列。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 分别是尺度, 形状和位置参数。

因此, D 序列的概率分布函数由下式给出:

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

由 $F(x)$ 的标准化值可以计算 SPEI:

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

式中: 当 $P \leq 0.5$ 时, $W = \sqrt{-2 \ln(P)}$, P 是超过 D 值的概率, $P = 1 - F(x)$; 当 $P > 0.5$ 时, P 替换为

$1 - P$, 将所得 SPEI 值反转。常数 $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ 和 $d_3 = 0.001308$ 。基于 SPEI 值将干旱划分为 7 个等级, 见表 1。

表 1 基于 SPEI 的旱涝等级划分

Tab. 1 Classification standard of drought and flood based on SPEI

干旱等级	SPEI 值
极度干旱	≤ -2.00
重度干旱	$-1.99 \sim -1.50$
中度干旱	$-1.49 \sim -1.00$
基本正常	$-0.99 \sim 0.99$
中度湿润	$1.00 \sim 1.49$
重度湿润	$1.50 \sim 1.99$
极度湿润	≥ 2.00

3 结果与分析

本文通过对不同时间尺度下 (1 个月、3 个月、6 个月、12 个月和 24 个月) 东北地区 SPEI 值进行计算, 分析不同时间尺度下东北地区季节、年际以及年代际干旱的演变特征。

3.1 东北地区干旱时间趋势特征

3.1.1 东北地区干旱季节变化

按照春季 (3 月-5 月), 夏季 (6 月-8 月), 秋季 (9 月-11 月), 冬季 (12 月-次年 2 月) 对东北地区不同时间尺度下季节干旱发生频率进行统计分析, 结果见图 2。

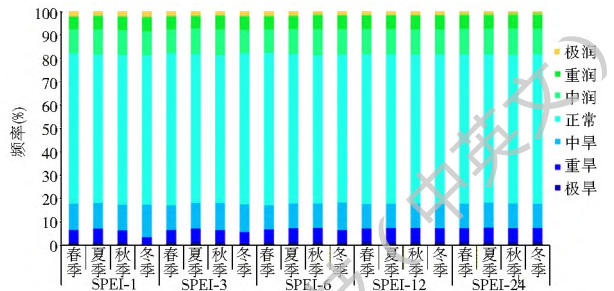


图 2 不同时间尺度下东北地区季节干旱发生频率

Fig. 2 Drought frequency in different seasons at various time scales in the Northeast China

由图 2 可以看出如下结果。

(1) 春季。SPEI 极早发生频率随时间尺度增加而升高, 发生频率在 1.37% ~ 1.77% 之间; 除 1 个月时间尺度外, SPEI 重早发生频率也随时间尺度增加而升高, 发生频率在 5.11% ~ 5.56% 之间; 而 SPEI 中早发生频率随时间尺度增加而降低, 发生频率在 10.32% ~ 11.28% 之间。

(2) 夏季。SPEI3 和 SPEI6 极早发生频率最

高,约为 1.7%;除 1 个月时间尺度外,SPEI 重旱发生频率随时间尺度增加而升高,发生频率在 5.51%~5.99% 之间;SPEI 中旱发生频率基本随时间尺度增加而降低,发生频率在 10.47%~11.07% 之间,但 24 个月时间尺度下中旱发生频率有所升高,为 10.79%。

(3) 秋季。SPEI 极旱发生频率随时间尺度增加而升高,发生频率为 1.21%~1.68%;1 和 3 个月时间尺度下 SPEI 重旱发生频率相对较低,分别为 5.05% 和 5.12%,6 个月时间尺度以上,SPEI 重旱发生频率相对较高,在 5.66%~5.87% 之间,且重旱发生频率随时间尺度增加而降低。1 和 3 个月时间尺度下 SPEI 中旱发生频率相对较高,分别为 11.03% 和 11.65%,6 个月时间尺度以上,SPEI 中旱发生频率相对较低,在 10.47%~10.62% 之间,且中旱发生频率随时间尺度增加而升高。

(4) 冬季。SPEI 极旱发生频率基本随时间尺度增加而降低,1 个月时间尺度下发生频率最小,为 0.22%,12 个月时间尺度下发生频率最大,为 1.83%;SPEI 重旱发生频率随时间尺度增加而升高,发生频率在 3.21%~5.62% 之间;而 SPEI 中旱发生频率基本随时间尺度增加而降低,发生频率在 10.49%~14% 之间。

3.1.2 东北地区干旱年际变化

不同时间尺度下东北地区 SPEI 值年际变化过程如图 3 所示。近 55 年来东北地区旱涝事件交替发生,2000 年以前,东北地区干旱发生频率低、干旱强度小且持续时间短;2000 年-2002 年,2007 年-2009 年东北地区发生干旱强度大。SPEI 值在 1、3 和 6 个月时间尺度下,旱情年际变化不明显;而 SPEI-12 和 SPEI-24 值表明东北地区在 2000 年-2002 年发生连续干旱。结果与孙滨峰等^[24] 计算结果相一致且与历史干旱事件相符合。

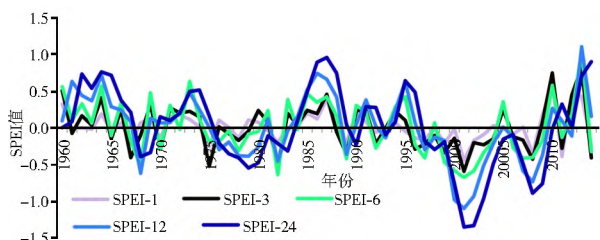


图 3 不同时间尺度下东北地区 SPEI 值年际变化过程
Fig. 3 Inter annual variation characteristics of SPEI values at various time scales in the Northeast China

3.1.3 东北地区干旱年代际变化

东北地区不同时间尺度下年代际干旱发生频率见图 4。由图 4 可以看出,不同时间尺度下,1960

年-2010 年间,极旱、重旱以及中旱发生频率基本都随年代际变化而升高。2000s 的 SPEI-24 极旱发生频率达到最高为 7.13%,重旱发生频率最高为 16.78%,中旱发生频率最高为 18.82%。

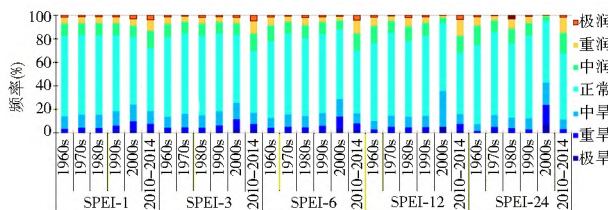


图 4 东北地区不同时间尺度下年代际干旱发生频率
Fig. 4 Drought frequency in different decades at various time scales in the Northeast China

东北地区 1978 年-2013 年干旱成灾面积如图 5 所示。干旱成灾面积波动变化,在 2000 年干旱成灾面积达到最大,为 658.9 万 hm^2 ,且在 2001 年发生连续严重干旱,干旱成灾面积为 529.8 万 hm^2 ;其次是 2007 年,干旱成灾面积为 604.4 万 hm^2 ;2009 年干旱成灾面积达 435 万 hm^2 。由图中可以看出,在 1990 年以前,干旱成灾面积较小且旱灾程度较弱,只在 1989 年较为严重,成灾面积为 486.8 万 hm^2 ;进入 20 世纪 90 年代后,干旱成灾面积整体有所扩大;进入 21 世纪之后,2000 年-2002 年、2007 年-2009 年发生连续严重干旱,其余年份的旱灾程度均在不同程度有所增加。干旱成灾面积与 SPEI 计算结果大体上相一致,验证了 SPEI 在东北地区干旱评估工作中的适用性。

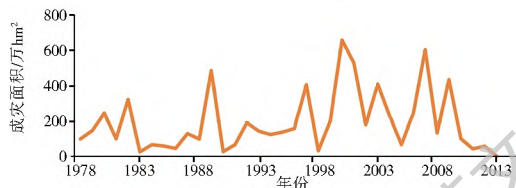


图 5 东北地区近 40 年干旱成灾面积变化
Fig. 5 The variation of drought affected area in the past 40 years in the Northeast China

3.2 东北地区干旱空间分布特征

3.2.1 东北地区干旱季节空间变化

本节以 SPEI-3 为例,以 5 月、8 月、11 月和次年 2 月的干旱发生频率分别代表春季、夏季、秋季和冬季干旱发生频率,分析东北地区季节干旱发生频率空间分布,结果如图 6 所示。春季极旱发生频率主要分布在辽宁西部、黑龙江西部和东部,吉林省几乎无极旱发生;夏秋两季极旱发生频率较高且主要集中在黑龙江中部和西部、吉林东西部地区;冬季极旱只发生在黑龙江中部。东北的中部在春夏两季发生重旱频率较高,秋冬两季除黑龙江中部,吉林和辽宁西部外其他地区重旱发生频率相差不大。中旱四季

发生频率在吉林省较低,春季黑龙江北部发生频率较高,夏季黑龙江东部发生频率较高,秋冬两季主要集中在辽宁西部以及黑龙江省与吉林省交界处。

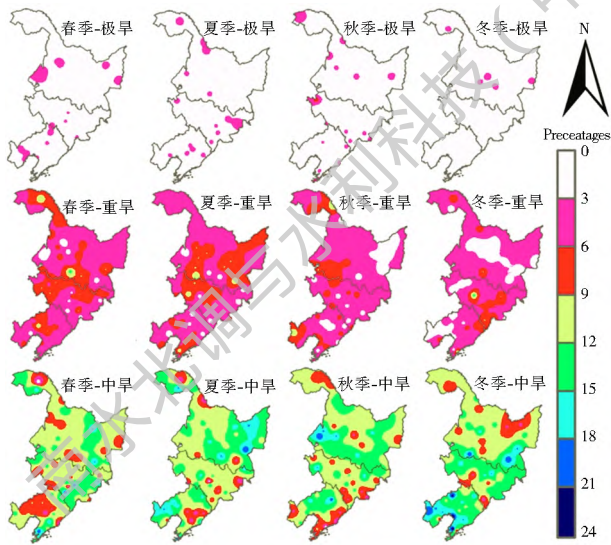


图6 东北地区 SPEI-3 干旱季节发生频率空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of drought frequency in different seasons at 3 month scale in the Northeast China

3.2.2 东北地区干旱年代际空间变化

东北地区不同时间尺度下不同年代际的 SPEI 值空间分布如图 7 所示,由图可以看出:1960s,东北地区 SPEI 值基本在正常范围内,干旱程度较弱。1970s,不同时间尺度下东北地区均有干旱趋势,对于 SPEI-3 而言,黑龙江省大部以及吉林东部干旱程度较显著。1980s,东北地区干旱程度稍有加重,但是干旱区域有所改变,除黑龙江中部外,黑龙江省其他地区干旱程度得到缓解,辽宁东部和西部干旱程度加重。1990s,1 个月,3 个月和 6 个月时间尺度下,黑龙江西北和东北地区,东北中部地区和辽宁西部地区干旱程度有所缓解,其他地区干旱程度稍有加重。2000s,东北地区不同时间尺度下的干旱程度达到最大值,东北西部地区 SPEI-12 干旱程度较重,黑龙江中部、吉林西部以及辽宁西部少数地区 SPEI-24 达到极旱程度。2010 年-2014 年,东北大部分地区干旱程度有所减弱,其中以黑龙江北部、吉林东南部和辽宁中部地区改善最为明显。

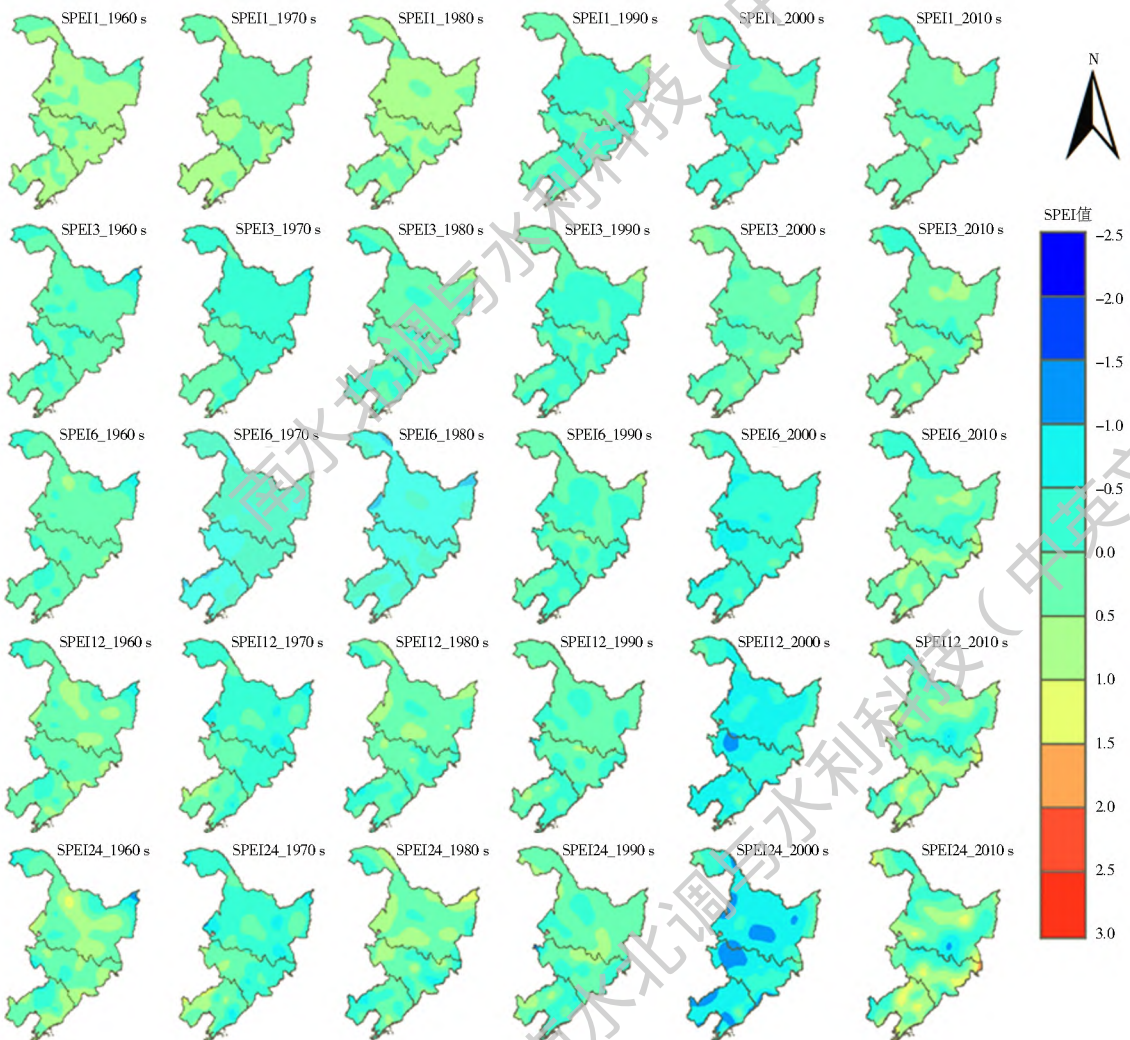


图7 东北地区不同时间尺度不同年代际的 SPEI 值空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of SPEI values in different decades at various time scales in the Northeast China

3.2.3 东北地区干旱频率空间变化

东北地区不同时间尺度下干旱发生频率空间分布如图 8 所示, 由图中可以看出: 随时间尺度的增加, 极旱发生范围逐渐扩大, 24 个月时间尺度下东北西部地区极旱发生频率较高。1 个月和 3 个月时间尺度下, 重旱发生频率在三省基本相同但黑龙江中南部发生频率稍大于其他省份地区; 6 个月、12 个月和 24 个月时间尺度下, 黑龙江东部, 吉林和辽宁西部地区重旱发生频率较高。1 个月时间尺度下吉林西部和中部、黑龙江西部以及辽宁南部中旱发生频率较高; 3 个月时间尺度下各省中旱发生频率相差不大; 6 个月时间尺度下吉林大部中旱发生频率高于其他地区; 12 个月和 24 个月时间尺度下, 黑龙江中部和吉林东部中旱发生频率较高。

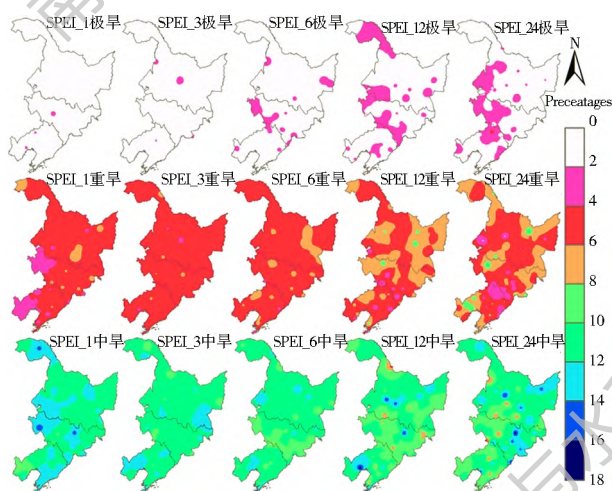


图 8 东北地区不同时间尺度下干旱发生频率空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of drought frequency at various time scales in the Northeast China

4 结论

(1) 从时间分布上来看, 东北地区春季和秋季极旱发生频率随时间尺度增加而升高; 春季、夏季和冬季重旱发生频率随时间尺度增加而升高, 中旱发生频率随时间尺度增加而降低。

(2) 从空间分布上来看, 以 SPEI3 为例, 冬季只有黑龙江发生极旱; 春季、夏季和秋季各省份均有较低频率的极旱发生; 春季和夏季重旱发生频率较高的地区为吉林和黑龙江交界处; 中旱发生频率在各省均较高且分布不均匀。

(3) 不同时间尺度下干旱发生频率随年代际变化而升高, 表明东北地区存在明显的变干旱趋势; SPEI 值在 2000 年以后明显小于 2000 年之前, 表明东北地区干旱程度日趋严重。

(4) 与东北地区实际近 40 年干旱成灾面积进行

对比分析, 结果证明了 SPEI 在东北地区干旱评估中的适用性。

参考文献(References):

- [1] 高宇, 冯婧, 张诚, 等. 干旱评价指标体系研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11659-11663. (GAO Yu, FENG Jing, ZHANG Cheng, et al. Research progress of drought evaluation index system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(23): 11659-11663. (in Chinese)) DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2012.23.082
- [2] 李宝林, 周成虎. 东北平原西部沙地的气候变异与土地荒漠化[J]. 自然资源学报, 2001, 16(3): 234-239. (LI Bao lin, ZHOU Cheng hu. Climatic variation and desertification in west sandy land of Northeast China Plain[J]. Journal of Nature Resources, 2001, 16(3): 234-239. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zzrxyb.2001.03.007
- [3] 王春艺, 蔡菁菁, 张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 238-245. (WANG Chun yi, CAI Jing jing, ZHANG Ji quan. Risk assessment of drought and chilling injury of maize in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 238-245. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.06.033
- [4] 杨贵羽, 韩冬梅, 陈一鸣. 1950-2010 年东北地区旱涝演变特征分析[J]. 中国水利, 2014(5): 45-48. (YANG Gui yu, HAN Dong mei, CHEN Yi ming. The evolution characteristics of drought in Northeast China during 1950-2010[J]. China Water Resources, 2014(5): 45-48. (in Chinese))
- [5] 邹旭恺, 张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687. (ZOU Xu kai, ZHANG Qiang. Preliminary Studies on Variations in Droughts over China During Past 50 Years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(6): 679-687. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2008.06.007
- [6] 段佩利, 秦丽杰, 张辉. 吉林省东部山区干旱时空特征[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(2): 35-39. (DUAN Pei li, QIN Li jie, ZHANG Hui. Spatiotemporal Characteristics of Drought in Mountains of Eastern Jilin Province[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(2): 35-39. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2012.02.009
- [7] 张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 东北地区玉米干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 231-236. (ZHANG Shu jie, ZHANG Yu shu, Ji Rui peng, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of drought for maize in Northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1): 231-236. (in Chinese))
- [8] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239-248. (HU Shi, MO Xing guo, LIN Zhong hui. Projections of spatiotemporal variation of drought in north China[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 239-248. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.02.00

- [9] 马建勇,潘婕,许吟隆,等. SRES A1B 情景下东北地区未来干旱趋势预估[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 329-335. (MA Jianyong, PAN Jie, XU Yinlong, et al. Drought Trend in Northeast China in the Future under SRES A1B Scenario[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(2): 329-335. (in Chinese))
- [10] 杨晓晨,明博,陶洪斌,等. 中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 758-767. (YANG Xiaochen, MING Bo, TAO Hongbin, et al. Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2015, 23(6): 758-767. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjca.141350
- [11] 韩晓敏,延军平. 东北农牧交错带旱涝特征对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2015, 25(2): 257-262. (HAN Xiaomin, YAN Junping. Droughts and Floods Response to Climate Change in agro-pastoral ecotone of Northeast China[J]. Bulletin of and Water Conservation, 2015, 25(2): 257-262. (in Chinese))
- [12] 李伟光,易雪,侯美亭,等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649. (LI Weiguang, YI Xue, HOU Meiting, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2012, 20(5): 643-649. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1011.2012.00643
- [13] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC: US Department of Commerce, 1965.
- [14] 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: 179-184.
- [15] 魏凤英,张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(3): 1-7. (WEI Fengying, ZHANG Ting. Frequency distribution of drought intensity in Northeast China and relevant circulation background[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(3): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2009.03.001
- [16] 张淑杰,张玉书,蔡福,等. 1961年至2007年东北地区水分盈亏变化趋势及其影响与响应[J]. 资源科学, 2010, 32(4): 663-670. (ZHANG Shujie, ZHANG Yushu, CAI Fu, et al. Changes of Water Budget and Their Effects and Responses in Northeastern China from 1961 to 2007[J]. Resources Science, 2010, 32(4): 663-670. (in Chinese))
- [17] 姚玉璧,董安祥,王毅荣,等. 基于帕默尔干旱指数的中国春季区域干旱特征比较研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 22-29. (YAO Yubi, DONG Anxiang, WANG Yirong, et al. Comparative research of the region arid characteristic based on palmer drought severity index in spring over China[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 22-29. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-6060.2007.01.004
- [18] 张丹. 朝阳地区干旱周期与演变规律研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(10): 4376-4378, 4380. (ZHANG Dan. Study on Drought Period and Evolution Law of Chaoyang Area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(10): 4376-4378, 4380. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2013.10.052
- [19] 钱锦霞,王振华. 山西省春旱趋势及对农业的影响[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 105-110. (QIAN Jinxia, WANG Zhenhua. Trend of spring drought in Shanxi Province and its influence on agriculture[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(4): 105-110. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2008.04.019
- [20] 庄少伟,左洪超,任鹏程,等. 标准化降水蒸散指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(05): 617-625. (ZHUANG Shaowei, ZUO Hongchao, REN Pengcheng, et al. Application of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(05): 617-625. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12007
- [21] 解文娟,杨晓光,杨婕,等. 气候变化背景下东北大豆干旱时空特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6232-6243. (XIE Wenjuan, YANG Xiaoguang, YANG Jie, et al. Spatiotemporal characteristics of drought for soybean under climate change in the three provinces of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6232-6243. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201302020219
- [22] Vincente Serrano S M, Begueria S, et al. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1719.
- [23] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55-94. DOI: 10.2307/210739
- [24] 孙滨峰,赵红,王效科. 基于标准化降水蒸散指数(SPEI)的东北干旱时空特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 22-28. (SUN Bin feng, ZHAO Hong, WANG Xiaoke. Spatiotemporal Characteristics of Drought in Northeast China Based on SPEI[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 22-28. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.01.004