

气候变化背景下东北地区气象干旱的时空演变特征

卢洪健^{1,2}, 莫兴国¹, 孟德娟^{1,2}, 刘苏峡¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于中国东北地区 98 个气象站点历史数据和 WCRP 多模式耦合 CMIP3 输出的 IPCC SRES A1B、A2 和 B1 气候变化情景下的降雨资料, 计算 3、6、12 和 24 个月尺度上的标准化降水指数(SPI), 结合 M-K 检测、EOF 分解和小波分析, 研究东北地区干旱的时空变化格局及其对气候变化的响应特征。结果表明: ① SPI 能较好地检测东北地区干湿变化状况, 4 个时间尺度上主要的空间模态具相似的分布型, 其中 12 个月尺度 SPI 显示东北大部分地区在过去 50 a 干旱程度呈显著加剧、范围有明显扩大的趋势, 其中南部和中部辽河流域是干旱严重区; ② 干旱时间变化特征具明显的空间差异, 南部干旱第一主周期为 11 a, 北部则为 3.5 a; ③ 气候变化情景下, 2011~2060 年的干旱以前 30 a 趋强, 之后趋缓, 且干旱高发区存在一定的北移趋势。

关键词: 干旱; 标准化降水指数; 时空模式; 气候变化; 东北地区

中图分类号: P467; P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2015)08-1051-09

干旱的发生通常与一个持续时期内降雨总量的减少关系最为密切; 同时, 高温、强风、低湿以及降雨分布特征在干旱的发生和演化过程中也起着重要作用^[1-3]。根据出现时间和影响对象的不同, 常将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 种类型^[1,2]。在 20 世纪的自然灾害中, 旱灾造成的损失影响面最广, 通常横跨农业、工商和交通运输等多个部门^[3]。近年来, 大尺度的严重干旱事件在欧洲、非洲、亚洲、澳大利亚和美洲大陆频繁出现, 造成高额的社会经济损失; 21 世纪气候变化影响下, 全球将可能面临干旱频率和强度增加的前景^[3,4]。

干旱指数是干旱检测、监测和影响评估不可或缺的基础工具^[2,3,5]。近 50 a 来, 基于水分平衡原理(如 Palmer Drought Severity Index, PDSI)、概率分布(如 Standardized Precipitation Index, SPI)和遥感监测(如 Vegetation Condition Index, VCI)等相关指数广泛用于区域干旱评估^[6-9]。与 PDSI 相比, SPI 具有计算简洁、空间可比性强、时间尺度可变等优势^[8,10], 不仅可用于监测短期的大气水分供应,

还能应用于监测河川径流、湖水和水库水位等长期水资源的变化。历经 20 a 来的发展, SPI 被广泛应用于干旱气候学、干旱预报和农业干旱风险评价等领域^[11-13], 特别是继“干旱指数林肯宣言”发表之后^[14], SPI 更被世界气象组织(WMO)推荐为世界范围通用的气象干旱指标^[15]; 但是, 在干旱地区出现较多降雨量为零的情况下应谨慎使用^[16]。

中国东北地区(Northeast China, NEC)地处中高纬度及欧亚大陆东端, 属温带季风气候区, 其夏季雨热同期的特点利于农业生产^[17-19]。但该地区水资源主要靠大气降水补给, 且降水的时空异质性较大, 加上区域经济的快速发展, 导致其水资源供需矛盾日益突出^[20,21]。自 20 世纪 90 年代中期以后, NEC 进入降水减少和干旱多发阶段, 如历史罕见的 1999~2001 年持续大旱, 严重威胁着区域国民经济发展^[21,22]。近年来, 有学者对 NEC 降水时空变化特征及干旱对气候变暖的响应做了较详尽的研究^[17,20]。还有研究表明, 蒙古高压增强、副热带高压偏弱以及西风带和西南水汽输送异常减弱是 NEC 夏旱发生频率高的主要环流背景^[22]; 而且其

收稿日期: 2014-02-17; 修订日期: 2014-05-04

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目(2010CB428404)和国家自然科学基金项目(31171451)资助。

作者简介: 卢洪健(1985-), 男, 江西修水人, 博士研究生。主要研究方向为干旱影响及风险评估。E-mail: luhj.11b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 莫兴国, 研究员。E-mail: moxg@igsrr.ac.cn

季节降水和温度具明显的年代际特征,与极端气候事件(如干旱)的发生密切相关^[23]。然而,还少有研究从多个时间尺度上分析 NEC 干旱的时空变化模式和干旱周期性的空间差异,且未来气候情景下其干旱程度的时空分布格局尚存较大的不确定性。因此,本文基于历史实测和 GCMs 模拟输出的降雨资料,计算 4 个时间尺度上的 SPI,探讨 1960~2010 年 NEC 干旱在不同时间尺度上的时空演变模式,并预估其在 IPCC SRES A1B、A2 和 B1 气候变化情景下未来 50 a 内干旱模式的响应特征,以期为该地区水资源的优化配置和未来气候条件下干旱的风险评价提供相关的基础科学依据。

1 研究区概况与数据来源

研究区(38°43'N~53°33'N, 117°16'E~135°2'E)包括中国东北辽宁、吉林、黑龙江省和内蒙古东部的赤峰、通辽和呼伦贝尔等地,面积约 161.3 × 10⁴ km²。该区大部分属温带气候,以松嫩平原为核心,西、北、东三面均环山,成为马蹄形的地貌格局。西北部为大兴安岭的北段,海拔 1 000 m 左右,东部包括一系列山地,北面的小兴安岭、中间的大黑山、吉林哈达岭、张广才岭、老爷岭、完达山等,以及南面的长白山。地带性植被有大兴安岭北部的寒温带针叶林、东部山地的温带针阔混交林和平原地带的温带半湿润森林草原,主要的土地覆盖类型为林地、旱地、草地和水田,分别约占 41.50%、27.78%、18.53%和 3.62%。全区多年平均降水量呈东南向西北递减,地表径流量主要取决于降水的时空分布状况,径流深度从东南向西北递减^[22-24]。

实测降雨数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供,包括 98 个气象站点 1961~2010 年的逐日降雨,GCMs 数据采用国家气候中心(<http://ncc.cma.gov.cn/cn/>)提供的 WCRP 耦合模式比较计划-阶段 3 的(CMIP3)A1B、A2 和 B1 情景下的逐月降水数据^[25,26]。为了确保计算结果的可靠与精确,气象站点降水数据经 Wijngaard 等^[27]方法进行检验,所选数据通过 95% 置信水平的一致性检验。对过去近 50 a 降雨数据分析表明,NEC 的区域平均降水年际变化大,年内分布不均匀,6~8 月的降雨量占到全年降雨量的 65% 以上,但呈显著下降趋势;降水的空间分异性显著,且其变异系数的空间分布也十分不均。

2 研究方法

2.1 SPI 算法原理

由于降水分布通常为偏态分布而非正态分布,故可以采用 I 分布概率函数来描述降水量的变化,再经正态标准化求得 SPI 值^[8,10]。本文采用 WMO 推荐使用的计算程序^[15],以上述处理过的月降雨资料为输入,计算 3、6、12 和 24 个月尺度上的 SPI,依次记为 SPI3、SPI6、SPI12 与 SPI24,基于 SPI 的旱涝等级划分见表 1^[8,10,15]。

表 1 SPI 指数旱涝等级的划分

Table 1 Drought and wetness categories for SPI

SPI 值	等级	概率(%)	SPI 值	等级	概率(%)
≥2.0	极端湿润	2.3	0.0~ -0.99	轻微干旱	34.1
1.5~1.99	严重湿润	4.4	-1.00~ -1.49	中等干旱	9.2
1.0~1.49	中度湿润	9.2	-1.50~ -1.99	严重干旱	4.4
0.0~0.99	轻微湿润	34.1	≤-2.0	极端干旱	2.3

2.2 时空分析方法

Mann-Kendall (M-K) 是一种非参数统计检验法,其优点是不需要样本遵从一定的分布和不受少数异常值的干扰,同时可以明确突变开始的时间并指出突变区域。经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解是将某气候变量的观测资料以矩阵的形式给出并做自然正交展开,分解为时间函数和空间函数两部分,空间函数部分概括变量的地域分布特点,不随时间而变化;而时间函数部分则由空间点的线性组合所构成,称为主分量,这些主分量的前几个占有原空间点总方差的很大部分。小波分析(Wavelet Analysis, WA)被认为是傅里叶分析法的突破性扩展,它将一个一维信号在时间和频率 2 个方向上展开,不仅可以给出气候系列变化的尺度,还可以显现出变化的时间位置。

3 结果分析

3.1 SPI 检测历史旱涝的适应性

SPI 能较好地表征 NEC 干旱程度与持续时间的变化过程,过去 50 a 东北地区干旱主要分布在 3 个时期(图 1),即 1960s 后期、1970s 中后期至 1980s 前期、1990s 后期至 2000s,以第 3 个时期最为严重(持续时间长且强度大),这与相关研究结

果一致^[21,22]。《中国干旱灾害数据集》(<http://cdc.cma.gov.cn/>)的记录显示,NEC在1965年、1980年、1989年、1993年、1994年和1999年均发生重旱,这与SPI所表征的结果基本吻合。对于典型旱涝年,如1998年松花江流域的特大洪水和2000年的严重干旱,SPI3和SPI12的检测效果均很好(图2)。

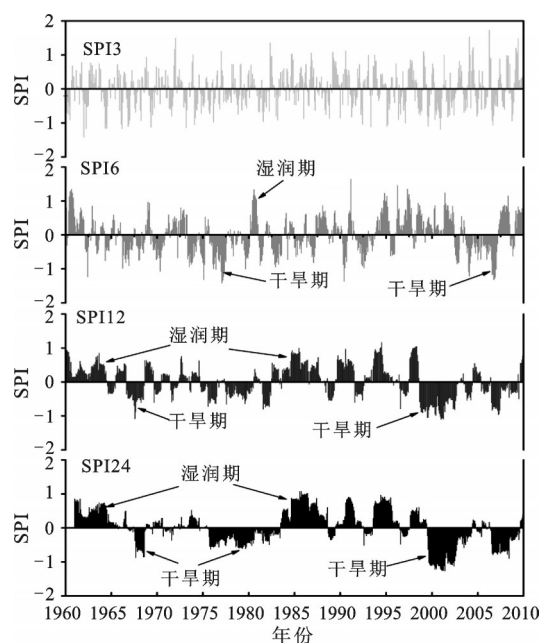


图1 1961~2010年区域平均多时间尺度SPI系列

Fig.1 Regional average of SPI series at multi-time scales during 1961-2010

不同的时间尺度上,干旱特征差异十分明显,3个月和6个月时间尺度上,干旱短期波动与季节性变化强,发生频次多但持续时间较短,说明SPI3和SPI6可用于监测短期水分亏缺和季节性农业干旱的发生;SPI12和SPI24具明显的年际与代际变化,干旱发生频次相对少而持续时间更长,对于区域持续性的长期水文干旱事件和河湖、地下水位变化具有一定的指示作用^[10,15]。

M-K检测结果表明,NEC在3个月和6个月尺度上分别有13和28个站点的干旱程度呈显著加强的趋势,而干旱显著减弱的分别为24个和10个,其余变化不显著;在12个月和24个月尺度上,干旱显著加强的站点数为60个和62个,而显著减弱的仅有7和9个。M-K统计值 Z (绝对值大于1.96表示在95%的水平上变化显著)的空间分布如图3所示,干旱显著加强的站点($Z < -1.96$)主要分

布在NEC的南部和中部地区;而干旱显著减弱的站点主要位于北部和东北部地区。南部大多数站点在各时间尺度上均呈干旱加剧趋势,随着时间尺度的增大,中部和东部的很多站点也呈干旱加剧趋势。虽然整个NEC年降水量下降趋势不明显^[20],但其南部大多数地区(尤其是6~8月)降雨变化明显,使得其干旱程度显著增加。

3.2 干旱的空间分布模式

EOF分解4个尺度SPI所得前4个空间模态如图4所示。EOF1解释方差(VAR)约为30%,第一特征向量符号的一致性分布表明NEC过去近50 a干旱发生一致的变化趋势,最严重的地区为南部和中部地区-辽河流域的中心地带。EOF2(VAR约为11%)表征干旱发生的南-北分布型,其特征向量符号分布的差异(0分界线)表明该模式控制下南部干旱变化呈加剧趋势,而北部相对来说为干旱减弱趋势,这除了与南部降水总量显著减少有关之外,还可能受局地降水的年内分配、年际变化以及极端降水事件增加的影响^[20,23]。EOF3(VAR约为8%)为东-西分布模式,西部地区干旱比东部严重,这可能是受海陆间的距离和大兴安岭下沉气流的影响;干旱核心区主要分布于辽宁省西北部和内蒙古高原东缘。EOF4(VAR约为5%)表征的干旱空间分布型为中部向两端递减分布型,干旱中心区为吉林省的东部地区。空间分布模式受时间尺度的影响不大,不同时间尺度上各相应模态的空间分布型相同,只有特征向量的值在局部地区存在较小的差异。

3.3 干旱的时间变化特征

近40 a来NEC发生中等、严重干旱($-2.0 < \text{SPI}_{12} \leq -1.0$)和极端干旱($\text{SPI}_{12} \leq -2.0$)站点数百分比的年际变化特征如图5所示,两者均呈较强的年际波动和年代际振荡,且增加趋势显著。同时,东三省过去40 a的农作物干旱受灾面积和成灾面积(资料来源于<http://www.moa.gov.cn/>)也呈一定的增加趋势,尤其是2000年以后,其增加幅度明显上升。分析表明,其与SPI统计的中等-严重干旱和极端干旱站点数百分比的相关系数分别为0.71和0.60($p < 0.01$),说明SPI对农业干旱(该地区以雨养农业为主)亦具较好的检测与评估效果。就过去50 a的时间来讲,NEC面临着干旱发生面积增大的威胁,尤以极端干旱的空间范围变化最为明显;近10 a是过去近50 a来干旱最为严重的时期,

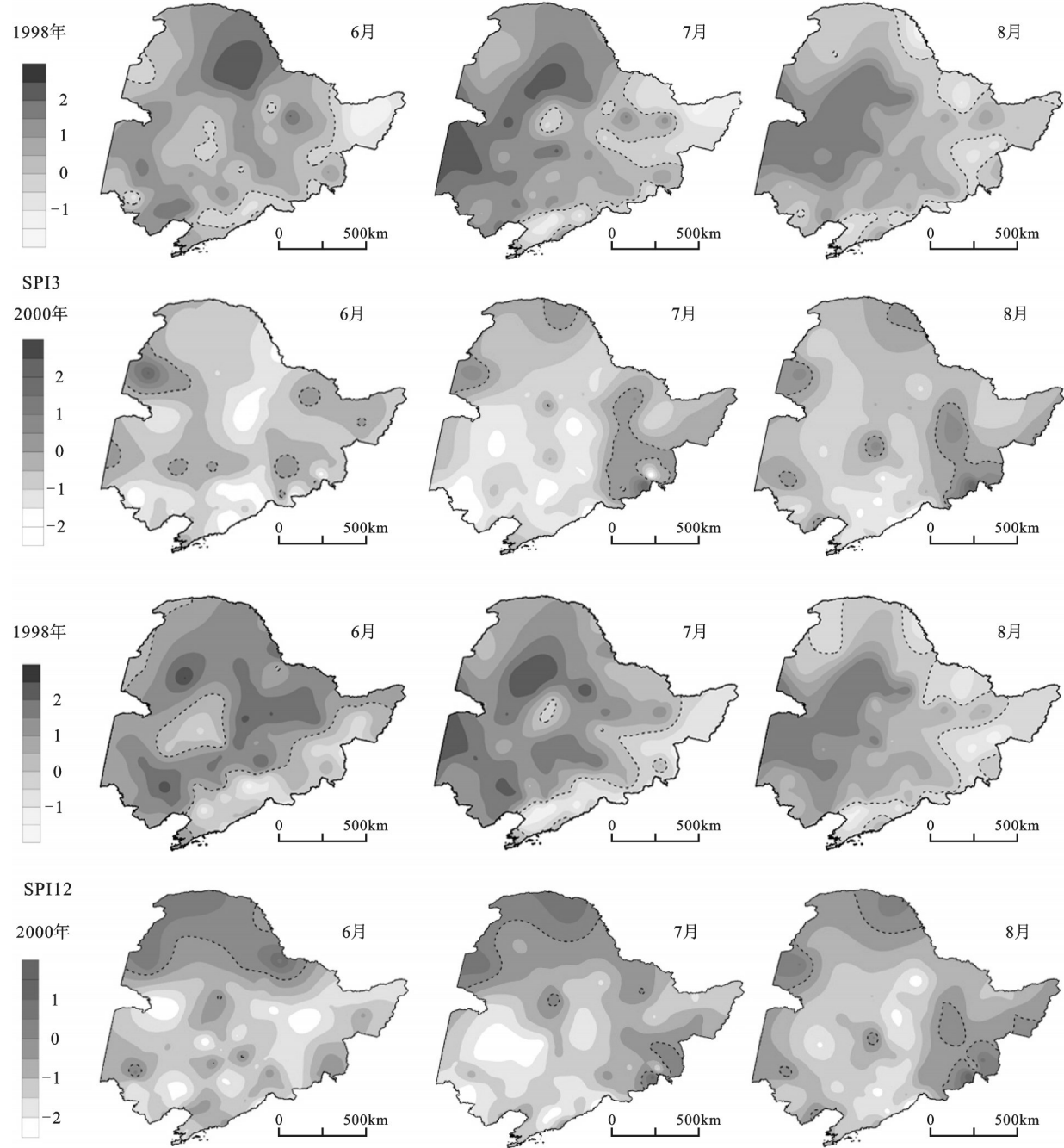


图2 SPI3 和 SPI12 表征的典型年旱涝程度空间分布(虚线为0分界线)
Fig.2 Spatial distributions of drought and wetness severity characterized by SPI3 and SPI12 in typical years

干旱持续时间延长,发生面积扩大,导致一些大尺度干旱事件的出现(如1999~2001年特大旱)。

对 EOF 分解 SPI12 得到的前两个模态的时间系数(PCA1 和 PCA2, 分别代表南部和北部)进行 Morlet 小波分析,图 6 为小波变换系数实部在时-频域的分布图,可见两者之间存在较大的差异。PCA1 的演变存在 12~24 a 和 2~9 a 的周期变化规律,其中,在 10~25 a 尺度上出现了干旱-湿润交替

的准 4 次震荡;在 5~10 a 时间尺度上的变化不稳定,自 1990 s 后进入干旱多发期。PCA2 的演变则存在着 15~25 a 和 7~12 a 的周期变化规律,小于 7 a 的干旱周期相对剧烈,但局部差异较大;在 20 a 左右的尺度上,周期变化具一定的连续性,经历了 5 个干旱发展-减缓的更替期。对小波方差分析发现,南部最大峰值对应着 11 a 的时间尺度,说明 11 a 左右的周期震荡最强,为第一主周期;北部的第

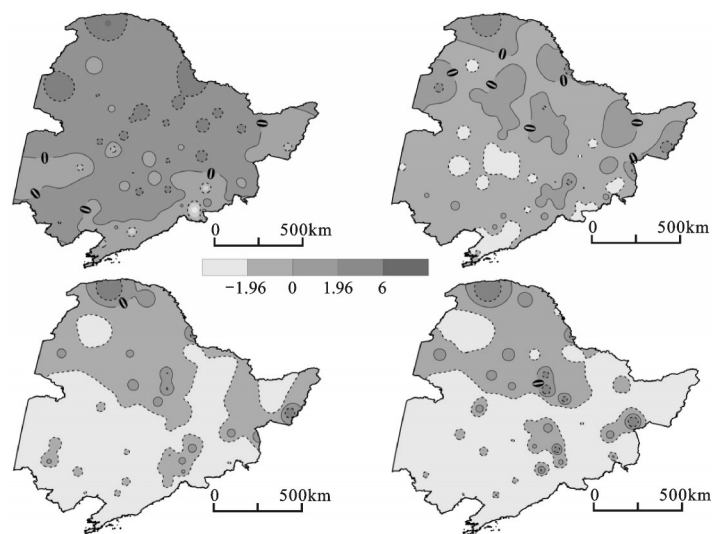


图3 干旱变化趋势空间分布(虚线为0值分界线)

Fig.3 Change trend of drought occurrences detected by the M-K method

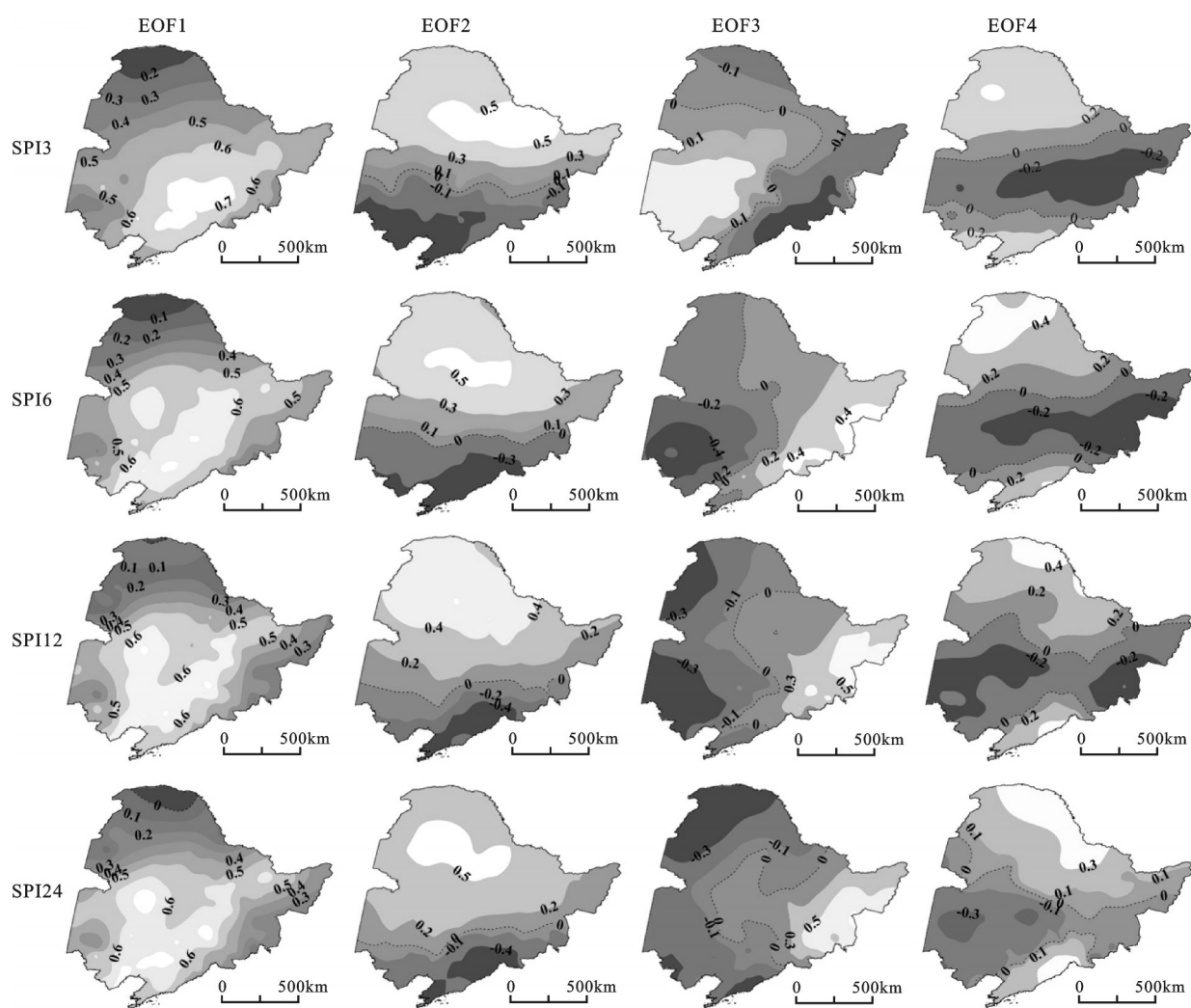


图4 EOF分解的4个主要空间模态

Fig.4 Four leading modes of SPI3 and SPI12 derived from EOF analysis

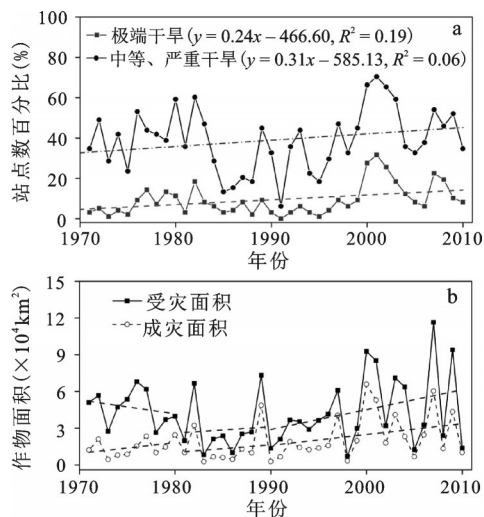


图5 干旱发生面积的年际变化

Fig.5 Interannual variability of spatial drought coverage

一主周期则为3.5 a。

3.4 干旱时空模式对气候变化的响应

A1B、A2 和 B1 情景下, 2011~2060 年 NEC 区域平均 SPI12 如图 7 所示, 可见 2040 年之前均为干旱多发期, 且以 A2 和 A1B 情景的干旱更为严重 (强度和持续时间都较大), 而 A2 情景在 2040s 还存在较长的干旱期, 说明未来 50 a 内 NEC 干旱的发生以前 30 a 为主, 在干旱规划中应当着重考虑。未来 50 a 各情景干旱发生的前 3 个空间分布模态 (EOF) 如图 8 所示。EOF1 的干旱严重区均位于 NEC 的中部地区, 其特征向量符号的一致性说

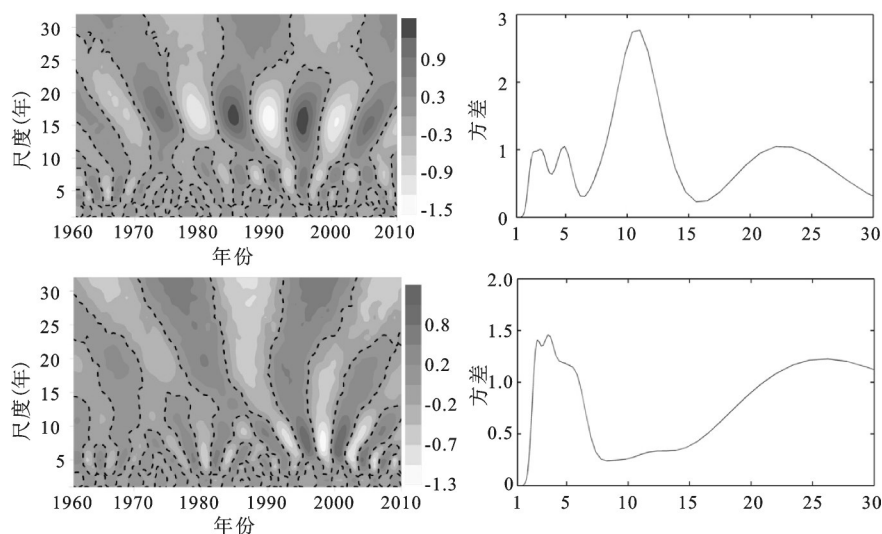
明各情景存在相同的变化趋势, 但不同情景之间也存在较大的局部差异。EOF2 均为南-北分布型, 但变化特征有显著差异, A1B 情景为北强南弱模式, A2 和 B1 情景则与之相反, 干旱严重区均位于南部辽宁省地区。

EOF3 的分布模式在不同情景下表现出更为明显的差异, A1B 情景为典型的东-西分布型, 干旱中心区为黑龙江省和吉林省的东部地区, A2 情景的中心区域则为 NEC 的中部地区, 南部和北部则为减弱趋势, 而 B1 情景的干旱中心区除了东部的小部分地区外, 还包括南部和北部的大部分地区, 中部地区反而是干旱减弱区。总的来讲, 未来 50 a NEC 的干旱主要发生在中部地区, 但不同情景下干旱的分布范围和空间变异存在较大差异。

4 讨 论

干旱的形成和演变是多种因素共同作用的结果, 其中气候变化和人类活动两大主导因素构成了干旱演变的驱动力系统, 且不同区域的主要驱动因素不同^[28]。研究表明, 太平洋副热带高压、东亚夏季风环流和厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 是 NEC 干旱发生的主要气候驱动因素, 且各因素的作用存在着非常明显的空间差异^[22,29]。此外, 复杂多变的地理地形、植被条件和社会经济状况使得 NEC 干旱脆弱性的空间格局更为复杂。

过去近 50 a, NEC 整体上呈干旱加剧的趋势和南北递减的分布模式, 干旱的时间变化特征与



注: 正负值分别用实线和虚线表示, 零值用加粗线表示。

图6 EOF 分解时间系数的小波系数实部与方差

Fig.6 The real part and variance of wavelet transformation for the time coefficients derived from EOF

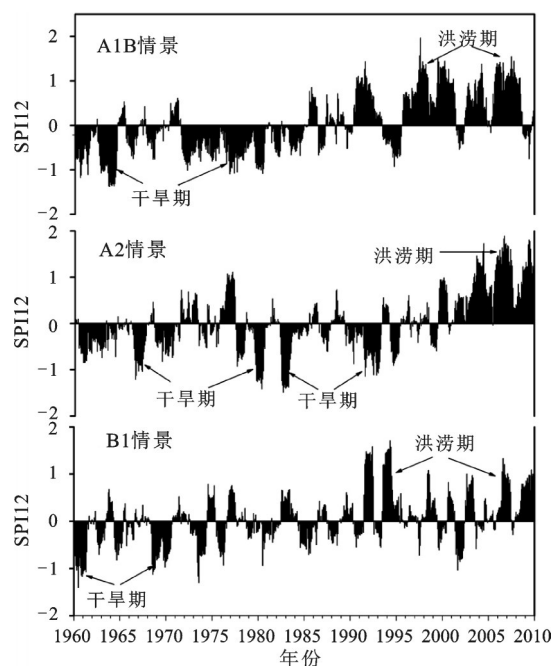


图7 气候变化下2011~2060年区域平均SPI12的变化趋势

Fig.7 Evolution of regional average of SPI12 series under climate change during 2011-2060

降雨模式变化基本一致,而干旱的空间变化模式主要由区域内降水的空间异质性所决定,这与其他研究得出NEC农业可利用水资源呈减少趋势、旱灾呈增加趋势的结论^[17,18,22]相一致。更有意义的是,NEC短期干旱(SPI3和SPI6)显著加剧的站点较少而长期干旱(SPI12和SPI24)显著加剧的站点明显增多,说明时间尺度是干旱变化趋势的重要影响因素,针对不同时间尺度的干旱变化特征,制订区域干旱减缓措施,具重要的决策参考价值。

气候变化情景下,就降水亏缺导致的干旱而言,NEC在未来50 a的干旱主要发生在前30 a,以A2情景的干旱最为严重,而且干旱核心区将主要分布于松花江流域南部和辽河流域。在全球变暖的大背景下,水分循环的加速将可能导致未来NEC的降雨总量增加,在一定程度上和意义上起着缓解干旱的作用,但降雨集中度和极端降雨事件频率的改变可能会导致新的旱涝格局。基于SPI12的干旱空间分布表明,干旱核心区存在一定的向北移动趋势,局部地区干旱程度将显著变化,因此,水资源管理与规划应对此进行加以考虑。

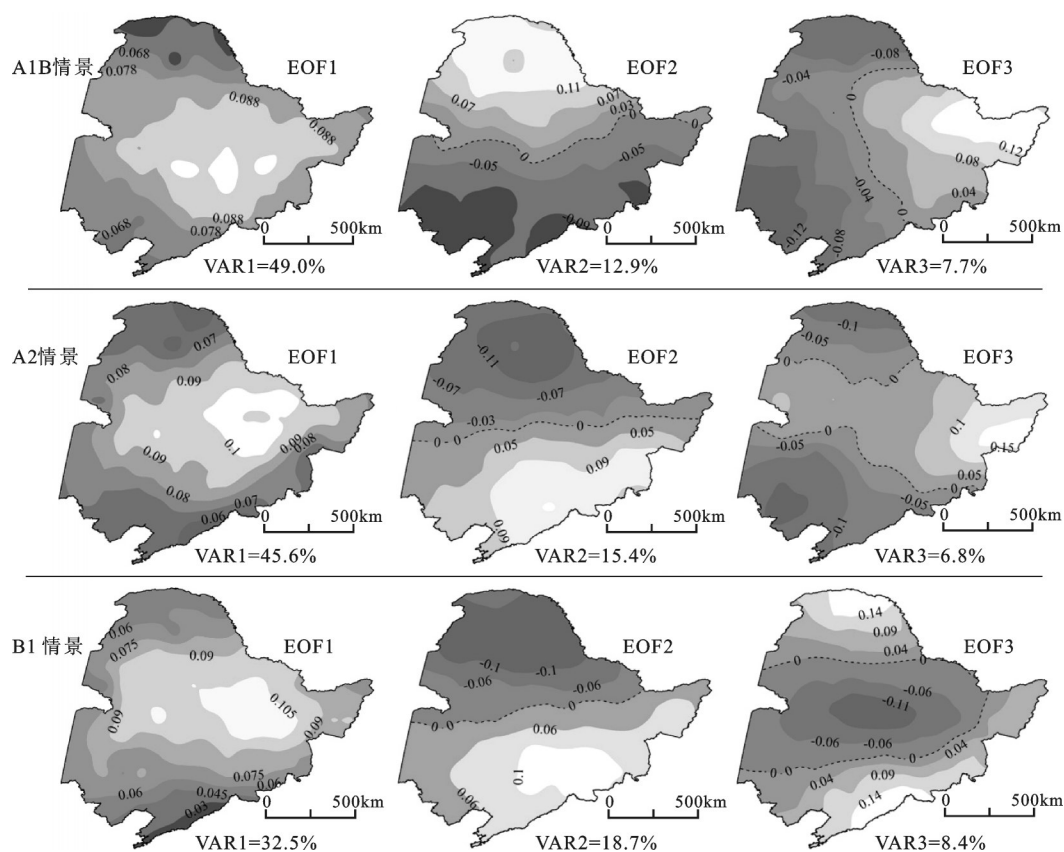


图8 未来气候变化情景下干旱发生的主要空间分布模态(虚线代表特征向量值为0)

Fig.8 Three primary spatial modes of drought occurrences under different climate change scenarios

5 结论与展望

SPI检测NEC历史干湿变化状况的效果较好,过去近50 a各站点干旱变化趋势受时间尺度的影响很大,12个月尺度上大部分站点干旱显著加剧。NEC南部和中部辽河流域是干旱严重区,但其干旱空间分布模式呈明显的“破碎化”状态。干旱发生范围在明显的年际波动中呈增加趋势;南部和北部干旱周期性的差异较大。未来50 a NEC干旱主要发生在前30 a,且其干旱中心区存在一定的北移趋势。

气候变化往往是降水和温度等气候因素耦合变化的结果。温度对干旱的形成和发展起着重要作用,因此,温度升高与降水变化的叠加效应可能会导致更多极端干旱事件的形成。NEC在过去近50 a温度明显上升,且未来依然存在升温趋势,虽然基于单一降雨变化因素的SPI能较好地揭示NEC干旱的时空分布模式,但忽略温度及相关气候要素对干旱严重程度的贡献,很可能造成对干旱事件(尤其是极端干旱事件)严重程度的低估。因此,采用多个干旱指标并综合考虑温度和降水变化对干旱程度的贡献,才能更好地阐述区域干旱模式对气候变化的响应特征。

致谢:研究使用的全球气候模式气候变化预估数据,由国家气候中心研究人员对数据进行的整理、分析和惠许使用。原始数据由各模式组提供,由WGCM(JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling)组织PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)搜集归类。

参考文献:

- [1] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions[A]. Wilhite D A. Drought: A Global Assessment[C]. London & New York: Routledge, 2000, 3-18.
- [2] HEIM R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of American Meteorological Society, 2002, **83**(8): 1149-1166.
- [3] MISHRA A K and SINGH V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, **391**: 202-216.
- [4] DAI Ai-guo. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2010, **2**: 45-65.
- [5] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, et al. A review of drought indices[J]. Environmental Reviews, 2011, **19**(NA): 333-349.
- [6] PANU U S and SHARMA T C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions[J]. Hydrological Science Journal, 2002, **47**: 19-30.
- [7] PALMER W C. Meteorological drought. U.S. Weather Bureau Research Paper 45, 85 pp. [Available from NOAA Library and Information Services Division, 1315 East-West Highway, Silver Spring, MD 20910.
- [8] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales, paper presented at 8th conference on applied climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA.
- [9] KOGAN F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of American Meteorology Society, 1995, **76**(5): 655-668.
- [10] GUTTMAN N B. Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm[J]. Journal of the American Water Resource Association, 1999, **35**(2): 311-322.
- [11] LLOYD-HUGHES B and SAUNDERS M A. A drought climatology for Europe[J]. International Journal of Climatology, 2002, **22**: 1571-1592.
- [12] CANCELIERE A, DI MAURO G, BONACCORSO, et al. Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index [J]. Water Resource Management, 2007, **21**: 801-819.
- [13] MANATSA D, MUKWADA G, SIZIBA E, et al. Analysis of multidimensional aspects of agricultural droughts in Zimbabwe using the Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, **102**: 287-305.
- [14] HAYES M, SVOBODA M, WALL N, et al. The Lincoln Declaration on Drought Indices[J]. Bulletins of American Meteorological Society, 2011, DOI: 10.1175/2010BAMS3103.1
- [15] World Meteorological Organization, 2012: Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). (WMO-No. 1090), Geneva.
- [16] WU Hong, SVOBODA M D, HAYES M J, et al. 2007. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons[J]. International Journal of Climatology, **27**: 65-79.
- [17] 安 刚, 孙 力, 廉 毅. 东北地区可利用降水资源的初步分析[J]. 气候与环境研究, 2005, **10**(1): 132-139.
- [18] 赵秀兰. 近50年中国东北地区气候变化对农业的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, **41**(9): 144-149.
- [19] 孙 力, 安 刚, 丁 立, 等. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析[J]. 气象学报, 2000, **58**(1): 70-82.
- [20] 唐 蕴, 王 浩, 严登华, 等. 近50年来东北地区降水的时空分异研究[J]. 地理科学, 2005, **25**(2): 172-176.
- [21] 谢 安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近50年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. 地理学报, 2003, **58**(增刊): 75-82.
- [22] 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.
- [23] 张耀存, 张录军. 东北气候和生态过渡区近50年来降水和温度概率分布特征变化[J]. 地理科学, 2005, **25**(5): 561-566.
- [24] 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.
- [25] Giorgi F and Mearns L O. Calculation of average, uncertainty and reliability of regional climate change from AOGCM simulations via the 'Reliability Ensemble Averaging (REA)' method. *Journal of Climate*, 2002, 15(10):1141-1158.
- [26] Giorgi F and Mearns L O. Probability of regional climate change based on the Reliability Ensemble Averaging (REA) method. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12):1629, doi: 10.1029/2003GL017130
- [27] WIJNGAARD J B, KLEIN TANK A M G and KONNEN G P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series[J]. *International Journal of Climatology*, 2003, 23:679-692.
- [28] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3):449~456.
- [29] LIU Xing-cai, XU Zong-xue, YU Rui-hong. Spatiotemporal variability of drought and the potential climatological driving factors in the Liao River basin[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 1-14.

Analyzing Spatiotemporal Patterns of Meteorological Drought and Its Responses to Climate Change Across Northeast China

LU Hong-jian^{1,2}, MO Xing-guo¹, MENG De-juan^{1,2}, LIU Su-xia¹

(1. *Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences; Beijing 100101, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to capture the spatiotemporal patterns of drought vulnerability and predict its response characteristics to climate change in Northeast China (NEC), observed precipitation data sets of 98 meteorological stations in 1961-2010 and output datasets of the WCRP coupled multi-model (CMIP3) for IPCC SRES A1B, A2 and B1 climate change scenarios during 2011-2060 were engaged to calculate the commonly used Standardized Precipitation Index, which analyzed with the popular methods of Mann-Kendall detection, Empirical Orthogonal Function and Wavelet transformation. The main results can be concluded as following. Historical drought-wetness evolution in NEC could be properly detected by the SPI series, and drought severity in most areas significantly increased during last 50 years especially on the 12-month timescale. While drought conditions in southern part and Liao River basin in NEC are always most serious, the first four EOF loadings on different time steps show a similar distribution pattern with some local differences. The drought spatial coverage took on an obviously increasing trend accompanied with drastic inter-annual and inter-decadal fluctuations, and the dominant period were differently identified for the south (11a) and the north (3.5 a). Under the three climate change scenarios, the period of the early 30 years would share most of the mega droughts during 2011-2060, and the A2 scenario may own more frequently and severe drought events than others; more importantly, the drought core may migrate northward to some extent.

Key words: drought; Standardized Precipitation Index (SPI); spatiotemporal patterns; climate change; Northeast China