

# 基于CMIP5模式的东北地区干旱时空变化预估研究

聂语勃, 施红霞

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年10月29日; 录用日期: 2021年11月24日; 发布日期: 2021年11月30日

## 摘要

基于14个CMIP5模式集合平均的sc\_PDSI数据集, 运用趋势分析, 经验正交函数(EOF)等方法对东北地区未来100 a的干旱时空变化特征进行了预估研究。结果表明, 未来100年东北地区基本呈现出北部变湿润, 南部变干的趋势, 且主要以夏季干旱为主。从1986~2005年, 21世纪初期(EP: 2016~2035年)及21世纪末期(LP: 2080~2099年)EOF分解第一模态模态均表现为全区一致性, 其方差贡献率分别达到50.2%, 41.2%及45.0%, 但是在21世纪中期(MP: 2046~2065), 则呈现出南北相反型, 方差贡献率为31.4%。未来100 a东北地区冬春季将会变湿润, 夏秋季会变干, 而且夏季比秋季变干更明显。

## 关键词

东北地区, PDSI, 干旱, 预估

# The Study on the Projection of Temporal and Spatial Changes of Drought in Northeast China Based on the CMIP5 Models

Yubo Nie, Hongxia Shi

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 29<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 24<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the sc\_PDSI data set of 14 CMIP5 models' ensemble mean, and the methods including trend analysis and Empirical Orthogonal Function (EOF), the spatial and temporal characteristics of drought in northeast China in the next 100 a are projected. The results indicate that the north part of northeast China will become wet and the south part will be dry, and mainly depends on the

drought in summer. The first model of EOF during the period of 1986~2005, 2016~2035 (EP) and 2080~2099 (LP) suggests that conformation in the whole region, and the variance contribution reaches 50.2%, 41.2%, and 45.0%, respectively. However, in the middle of the 21st century (MP: 2046~2065), the first model exhibited opposite patterns in the north and the south part, the variance contribution is 31.4%. In winter and spring, it will become wet and becomes dry in summer and fall, and in summer it will be drier than that in the autumn.

## Keywords

Northeast China, PDSI, Drought, Projection

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 干旱化是一个全球性的重大气候和环境问题[1]。中国地域广阔, 不同地区所处纬度区域不同、海陆分布不同, 导致各地区的气候和自然环境状况也有所不同。近 30 年, 我国大部分地区发生了严重的干旱化倾向, 持续的干旱化已严重威胁这些地区的生态环境, 导致中国西北、东北、华北等地水资源严重匮乏、生态环境退化和荒漠化等一系列环境问题[2]-[9]。特别是在我国的东北地区, 干旱缺水造成了一系列社会、经济、环境问题。因此, 对于东北地区干旱时空变化的研究意义重大。

对于中国北方的干旱研究, 目前已展开了较多研究。胡实[10]运用 CMIP3 多模式集合平均的结果对未来不同典型排放路径下我国北方地区干旱频率、干旱强度、干旱发生面积比进行了分析, 认为温度和降水格局的变化使中国北方地区未来 40 a 呈现干旱发生次数减少, 极端干旱发生次数增加, 强度加剧, 波及范围扩大的特征。罗健[11]用年降水距平百分率研究了北方干旱的时空分布特征, 结果表明, 我国北方大部分地区自 60 年代以来进入了一个相对较长的干旱阶段, 在降雨量逐渐减少的同时, 降雨距平的波动幅度也正逐渐变小, 打破了原有的正常降雨波动, 形成相对稳定的干旱。冉津江[12]使用月降水数据对中国北方干旱区和半干旱区近 60 年气候变化特征及成因进行了分析, 通过线性趋势分析和合成分析, 认为 50 年内降水减少最明显地区在东北地区。李晓辉[13]通过马利科夫判据与 Palmer 指数结合的方法分析了辽宁省干旱特征, 具有明显的年代际变化趋势, 20 世纪 50 年代和 1980 年干旱严重, 60~70 年代是干旱情况比较正常, 1982 年左右达到极度干旱, 说明 20 世纪辽宁省朝阳地区干旱比较严重, 2000~2009 年持续干旱。梁丰[14]通过标准化降水蒸散指数、气候倾向率以及 M-K 检验方法对东北地区 1961~2014 年的干旱时空演变进行了研究, 得出结论东北地区多年平均的干旱发生频率为 26%~36%, 不同等级干旱发生频次以重度旱和严重干旱的增长速率最快。可见, 基于多种干旱指标, 对东北地区干旱已进行了相关研究。梁丰[15]等认为 PDSI 指数对东北典型干旱的描述更好。因此, 本文基于 14 个 CMIP5 模式集合平均的 sc\_PDSI 数据[16], 对东北地区未来干旱的时空变化特征进行预估, 这对东北地区应对气候变化为区域气象灾害预警和水资源的管控提供一定参考价值。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 数据

Dai [16]的研究表明 sc\_PDSI\_pm 对干旱时空变化研究有很好的预测性和拟合性。因此, 本文选用了基于 14 个模式(表 1)计算的 PDSI 数据进行相关研究, 时间段为 1900~2099。选取 1986~2005 年为参考年

(HIS), 根据 IPCC 第五次评估报告将 21 世纪分为三个时间段, 分别为前期(EP: 2016~2035 年)、中期(MP: 2046~2065 年)、后期(LP: 2080~2099 年)。

**Table 1.** The detail of 14 models from CMIP5  
**表 1.** CMIP5 中 14 个模式的信息

模式名称	单位及所属国家	分辨率
CanESM2	CCCMA, 加拿大	128 × 64
CCSM4	NCAR, 美国	288 × 192
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	256 × 128
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE, 澳大利亚	192 × 96
GISS-E2-R	NASA GISS, 美国	144 × 90
HadGEM2-CC	MOHC, 英国	
HadGEM2-ES	MOHC, 英国	
inmcm4	INM, 俄罗斯	180 × 120
IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	96 × 96
MIROC5	MIROC, 日本	256 × 128
MIROC-ESM	MIROC, 日本	128 × 64
MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	128 × 64
MPI-ESM-LR	MIROC, 日本	128 × 64
MRI-CGCM3	MIROC, 日本	128 × 64

## 2.2. 方法

### 1) 经验正交函数分析方法(EOF)

经验正交函数分析方法(empirical orthogonal function, EOF)把随时间变化的变量场分解为不随时间变化的空间函数部分以及只依赖时间变化的时间函数部分[17], 计算公式为:

$$X = EOF_{m \times m} \times PC_{m \times n} \quad (1)$$

式中:  $m$  为空间点个数;  $n$  为时间序列长度;  $EOF$  为空间特征向量或者空间模态, 在一定程度上反映要素场的空间分布特征;  $PC$  为时间系数, 反映相应空间模态随时间的变化。

### 2) 线性回归

运用最小二乘法拟合线性趋势变化, 公式为:

$$y = a + bx \quad (2)$$

式中,  $b$  为气候倾向率,  $y$  为 PDSI 指数,  $x$  为时间,  $a$  为常数。当  $b > 0$  时, 表示 PDSI 指数在增加, 意味着该地区随着时间的增加逐渐变湿润; 当  $b < 0$  时表示该地区呈现变干的趋势。 $b$  值的大小反映了 PDSI

指数上升或下降的速率[18]。

3) 干旱强度的定义:

干旱强度用于评价一次干旱发生的强弱程度。某段时间内的干旱强度可以用 PDSI 的绝对值表示, PDSI 的绝对值越大, 则发生干旱的程度越严重, PDSI 的绝对值越小, 则发生干旱程度越轻微。同时在判断绝对值之前要判断 PDSI 数值是否小于 0, 若某短时间内的  $PDSI < 0$ , 则代表有干旱发生, 若  $PDSI > 0$ , 则代表无干旱发生(表 2 所示)。

Table 2. Classification of drought grades

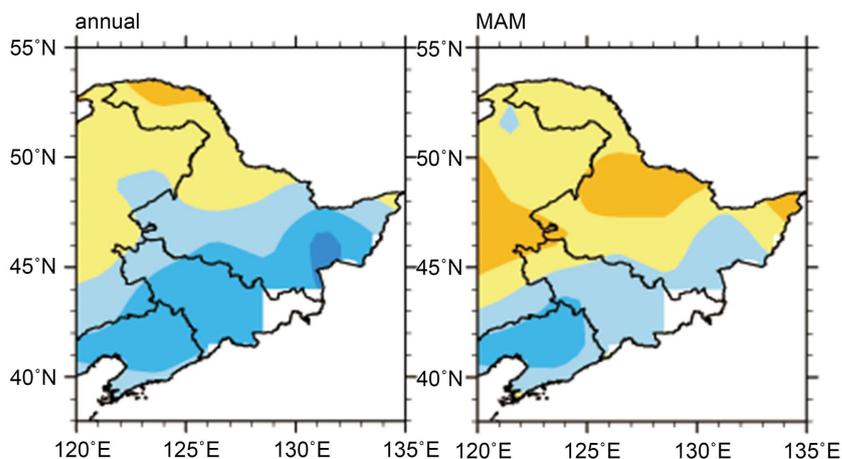
表 2. 干旱等级的划分

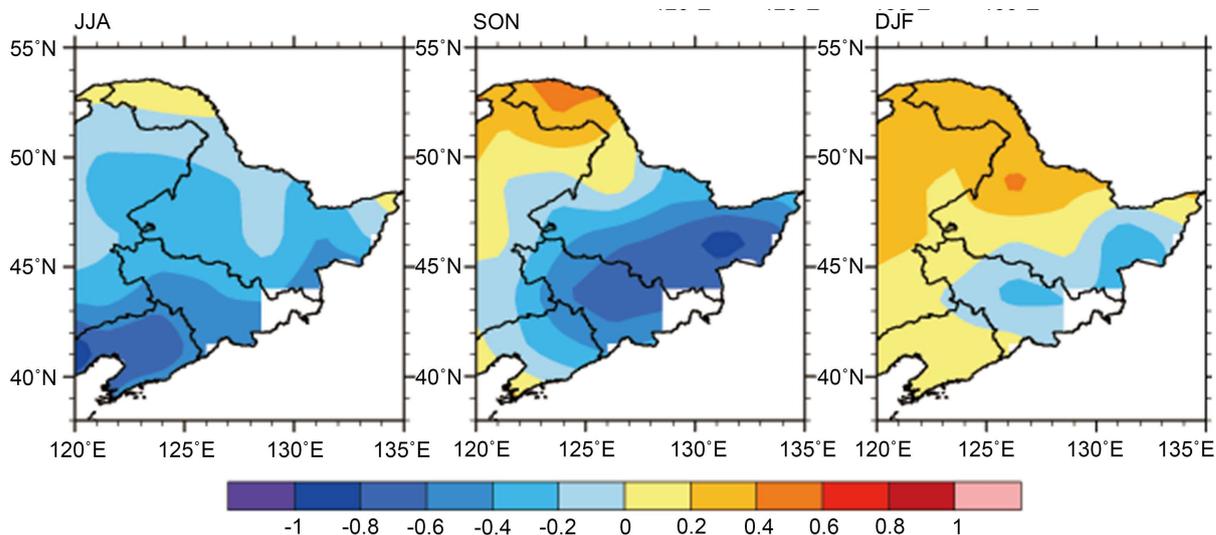
PDSI	等级	PDSI	等级
$\geq 4.00$	极度湿润	-1.00~-1.99	轻微干旱
3.00~3.99	严重湿润	-2.00~-2.99	中度干旱
2.00~2.99	中度湿润	-3.00~-3.99	严重干旱
1.00~1.99	轻微湿润	$\leq 4.00$	极度干旱
0.99~-0.99	正常		

### 3. 未来 100 年东北干旱的时空变化

#### 3.1. 未来 100 a 东北干旱的空间变化

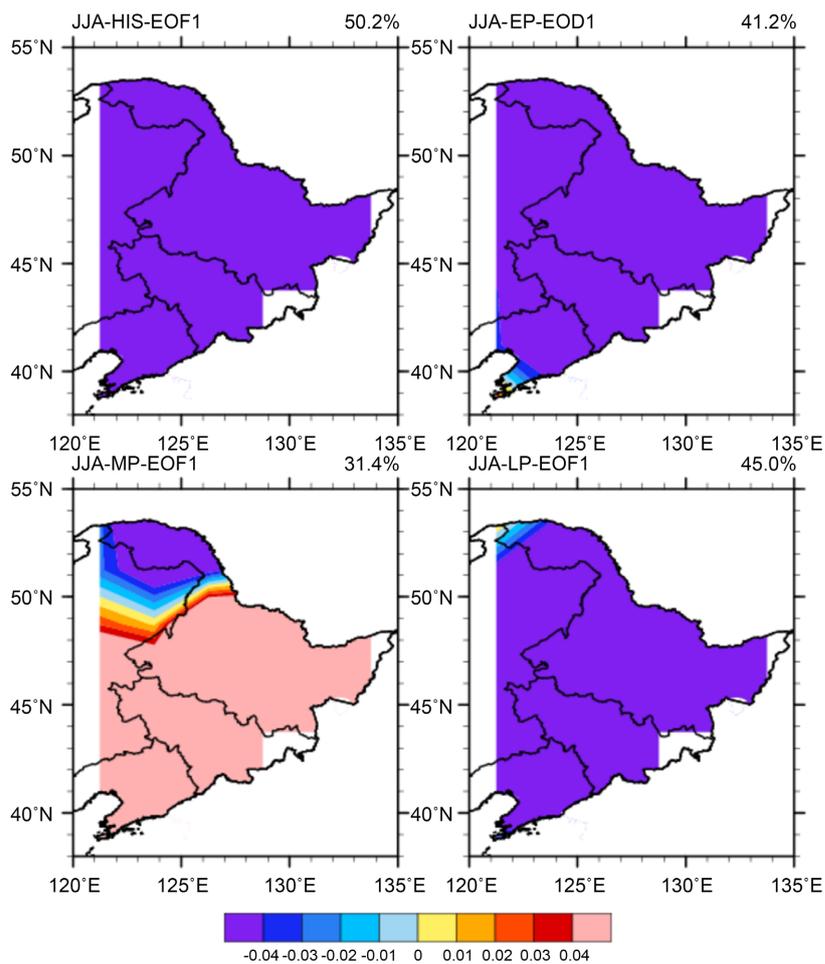
图 1 所示为 2006~2099 年东北地区年平均及季节平均 PDSI 的线性趋势的空间分布。可以看出, 在黑龙江北部未来 100 a 将呈现出变湿润的状态, 而在黑龙江南部, 吉林及辽宁等地则是呈现出干旱化的进程。春季东北地区干旱分布仍然是南北反向型的, 不同的是黑龙江大部分地区都以变湿润为主, 而辽宁和吉林地区变干的程度也在减弱。夏季几乎整个东北地区都是以变干为主, 尤其在辽宁地区, 干旱的趋势达到 0.6~0.8/a, 秋季黑龙江南部、吉林辽宁地区仍然呈现干旱化进程, 黑龙江北部以变湿润为主, 而到了冬季, 东北大部分地区将都有变湿润的趋势。总体来看, 2006~2099 年东北地区的干旱主要是以夏季干旱为主, 干旱的区域主要位于东北南部, 而东北北部以变湿润为主, 尤其在秋季变数润湿润的速率达到 0.4/a 以上。

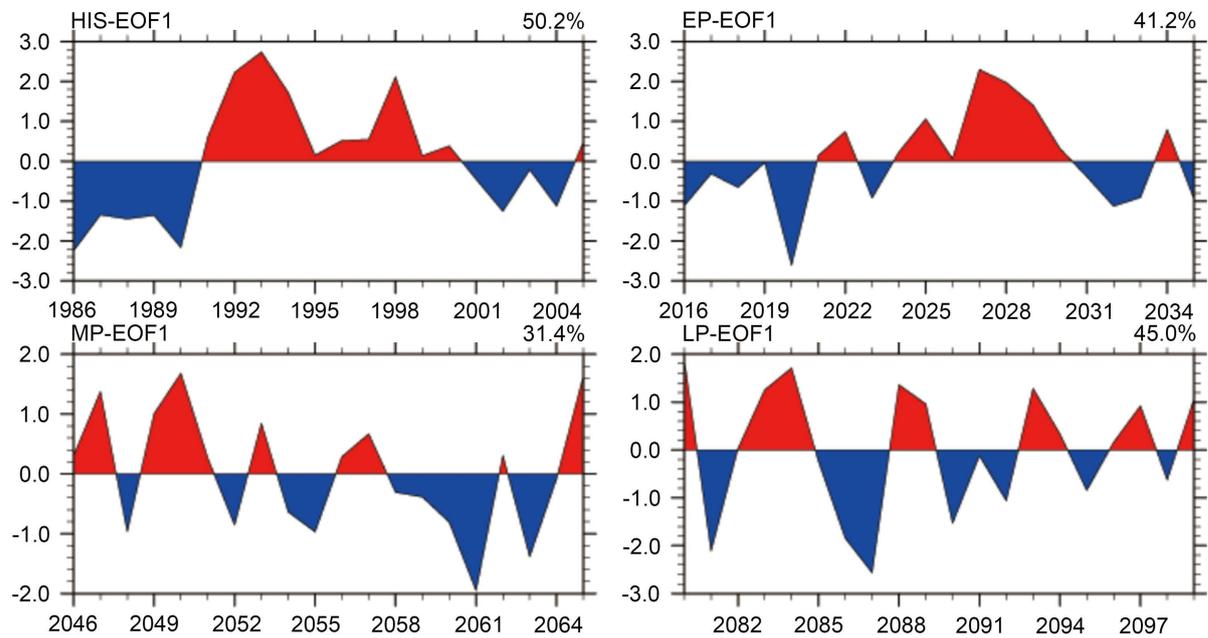




**Figure 1.** The spatial distribution of linear trend of PDSI index in northeast region of China during 2006~2099  
**图 1.** 2006~2099 年东北地区 PDSI 指数线性趋势的空间分布

为了进一步了解未来东北地区干旱的空间分布特征, 对东北地区 PDSI 进行 EOF 分析。由 EOF 展开的第一特征向量的空间分布及对应的时间系数演变如图 2 所示。第一特征向量是东北地区干旱空间分布



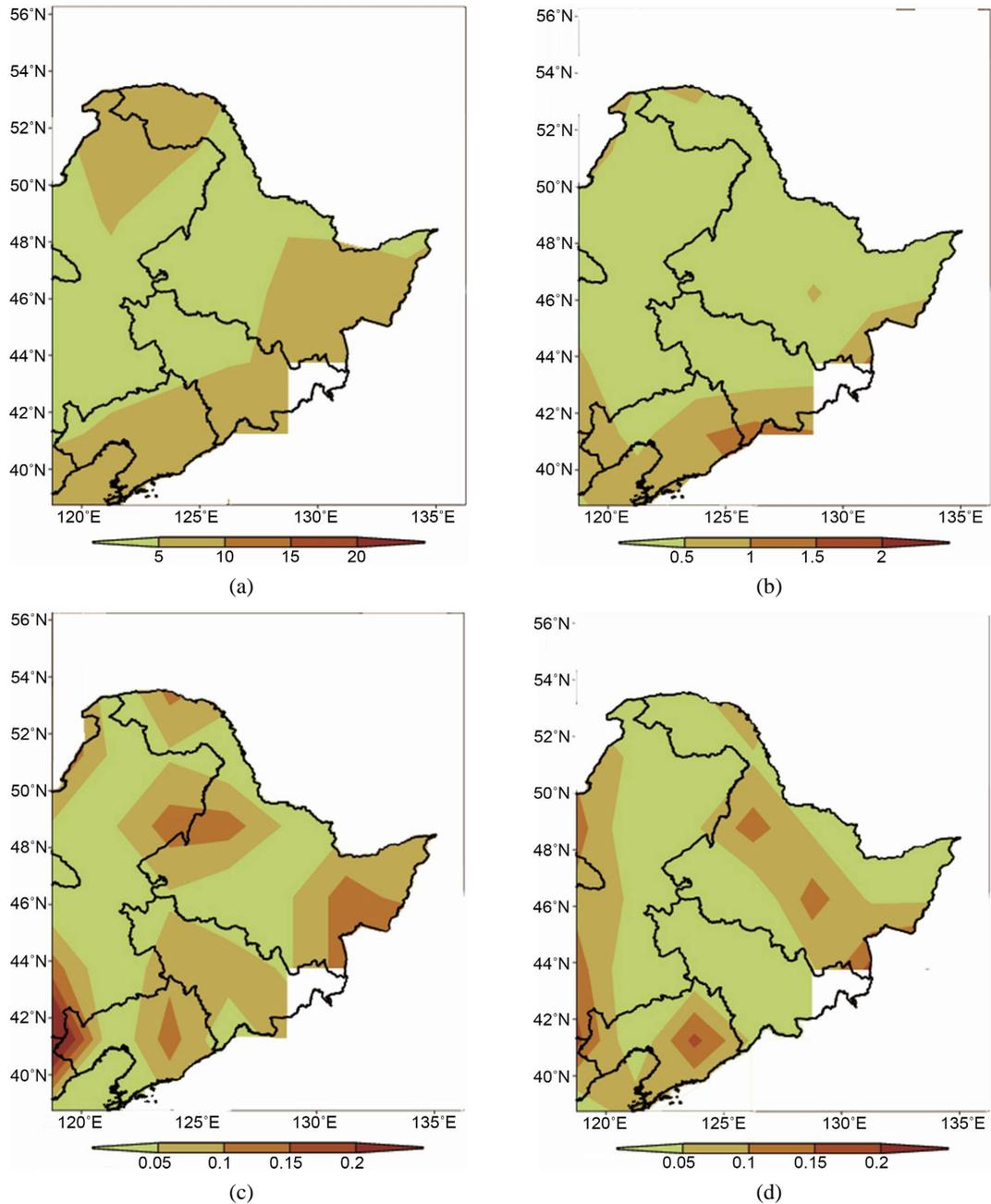


**Figure 2.** The spatial distribution and the variation of time coefficient of model one of EOF analysis in northeast part of China from 2006 to 2099 (HIS: 1986~2005; EP: 2016~2035; MP: 2046~2065; LP: 2080~2099)

**图 2.** 2006~2099 年东北地区 PDSI 的 EOF 分析第一特征向量场的空间分布及对应的时间系数演变(HIS: 1986~2005; EP: 2016~2035; MP: 2046~2065; LP: 2080~2099)

的主要模态, 在历史时期(HIS: 1986~2005), 以及 21 世纪三个时期(EP: 2016~2035; MP: 2046~2065; LP: 2080~2099)的方差贡献率分别为 50.2%, 41.2%, 31.4%, 45.0%。在历史时期, 第一特征向量值都小于-0.04, 均为负值, 这表明东北干旱的模式呈现区域一致性。第一特征向量对应的时间系数以 20 世纪 90 年代为界, 由负值转为正值, 在 2000 年以后又由正值转为负值, 表明 2000 年以前东北地区具有由干转湿, 又由湿转干的变化特点, 然后到 2004 年以后又急剧转为湿润。到 21 世纪初期(EP), 东北地区整体也呈现出区域一致性, 到 21 世纪中期(MP), 总体来看, 在空间上形成南北反向的分布, 北部的高值中心位于黑龙江北部, 南部的高值中心位于吉林及辽宁大部分区域, 表明 21 世纪中期的第一模态具有区域差异性, 其时间系数曲线也呈现出下降的趋势, 表明东北北部有变干的趋势, 而南部则与之相反。到 21 世纪末期, 整个东北地区又呈现出区域一致性。总的来看, 在历史时期, 21 世纪初期及末期三个时期东北地区干旱空间分布性是一致的, 而 21 世纪中期却呈现南北相反分布。

为了进一步了解东北干旱的变化特征。图 3 给出了东北干旱频率的空间分布。可以看出, 大部分地区的轻微干旱的干旱频率为 5% 以下, 而黑龙江省的南部地区, 吉林省的东部地区, 辽宁省的大部分地区达到了 5%~10%。中度干旱的干旱频率大部分地区仅为 0.5% 以下, 吉林省南部地区和大部分辽宁省则达到了 1%, 甚至部分地区达到了 1%~1.5%。重度干旱大部分地区干旱频率在 0.05% 以下, 而黑龙江省西部和东部部分地区, 吉林省大部分地区, 辽宁省的东部地区则达到了 0.05%~0.1%, 且有部分地区达到了 0.1%~0.15%。大部分地区极度干旱的干旱频率也仅为 0.05%, 而黑龙江中部地区, 辽宁省东部地区则达到了 0.05%~0.15%。总得来看, 除轻微干旱外, 其他三种程度的干旱频率还是普遍偏低的。只有轻微干旱, 发生较普遍, 且影响地区相较其他三种等级的干旱要更广。但并不代表没有严重干旱发生, 重度干旱和极度干旱的干旱频率从整体上来看还是偏高的, 预计未来 100 年内, 东北地区轻微干旱频率为 10% 以下, 且大部分地区均有轻微干旱发生, 而严重干旱也偶有发生, 但大部分地区的严重干旱频率保持在 0.05% 以下, 局部地区受严重干旱影响较大。



**Figure 3.** The spatial distribution of drought frequency in the northeast part of China during 2006~2009 ((a) Mild drought; (b) Moderate drought; (c) Severe drought; (d) Extreme drought)

**图 3.** 2006~2009 年东北地区干旱频率的空间分布(a) 轻微干旱; (b) 中度干旱; (c) 重度干旱; (d) 极度干旱)

### 3.2. 未来 100 a 东北干旱的时间变化

图 4 为 2006~2009 年东北地区年平均 PDSI 的时间序列图。可以看出, 2006~2009 年整个东北地区平均的 PDSI 呈现出减少的趋势, 意味着未来 100 a 东北将呈现出变干的趋势。从 21 世纪三个时间段上(EP, MP, LP)分别来看, 在 21 世纪初期, PDSI 指数呈现出减少的趋势, 表明初期东北地区是逐渐变干的, 但是在 21 世纪中期和末期, PDSI 指数均呈现出增加的趋势, 意味着 21 世纪后半期东北地区将会逐渐变湿润。

为了进一步了解东北地区季节性干旱的变化特征, 图 5 给出了 2006~2009 年东北春、夏、秋、冬四

季 PDSI 指数的年变化。可以看出, 2006~2099 年东北地区春季 PDSI 指数呈现出增加的趋势, 意味着未来东北地区春季是变湿润的, 而且主要是以 21 世纪前半期的变化为主, 后半期 PDSI 指数变化比较平稳, 变化趋势不明显。冬季 PDSI 也呈现出增加的趋势, 而且主要是以 21 世纪后半期的变化为主, 但是从线性变化率来看, 冬季变湿润的趋势大于春季。东北地区秋季和夏季 PDSI 指数均呈现出减少的趋势, 表明未来东北地区秋季和夏季都是变干的, 且夏季变干的趋势大于秋季。

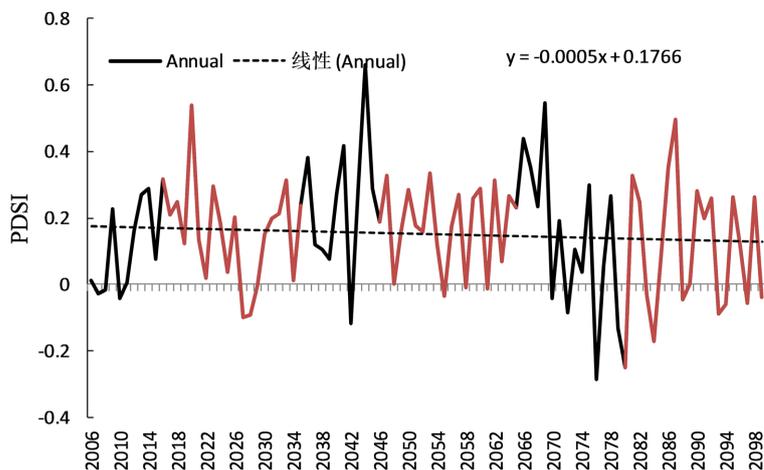


Figure 4. The annual variation of PDSI index in the northeast part of China during 2006~2099  
 图 4. 2006~2099 年东北年平均 PDSI 指数的年变化

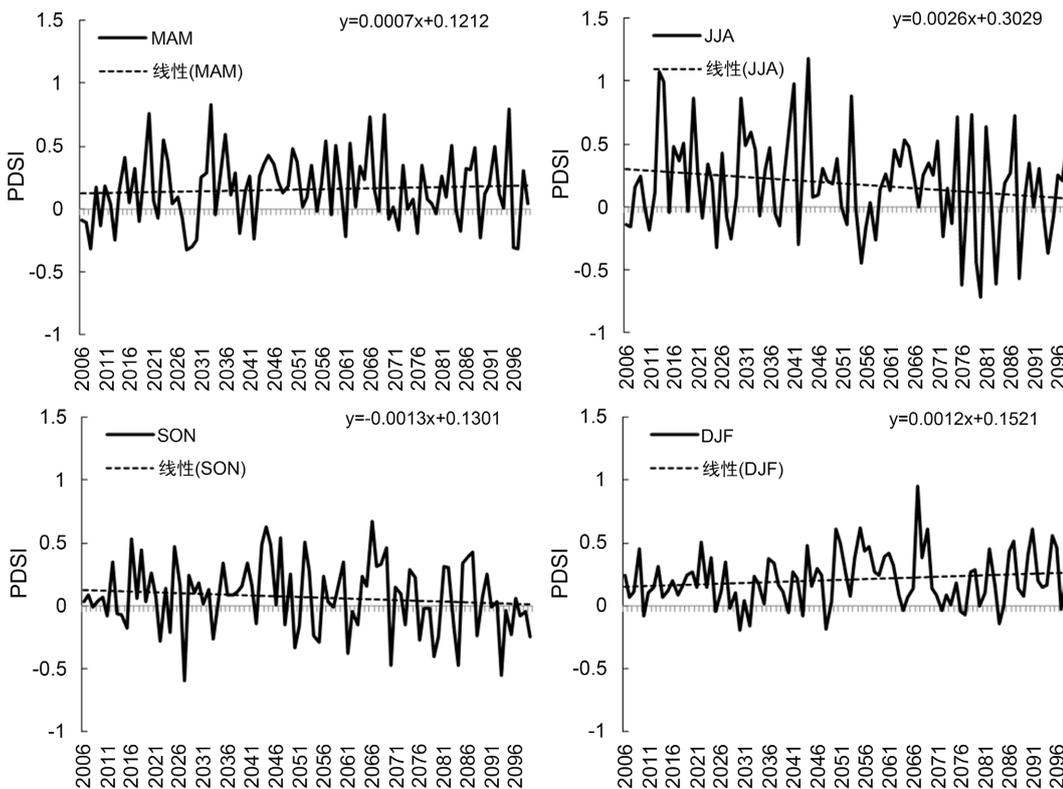


Figure 5. The annual variation of PDSI index in spring, summer, autumn and winter in the northeast part of China during 2006~2099

图 5. 2006~2099 年东北春、夏、秋、冬四季 PDSI 指数的年变化

总的来说, 未来 100 a 东北地区冬春季将会变湿润, 夏秋季会变干, 而且夏季比秋季变干更明显。

从 PDSI 指数的季节变化可以看出未来 100a 东北地区是以夏秋季的干旱为主, 图 6 进一步给出了未来 100 a 东北地区夏秋季干旱面积的变化。可以看出, 未来 100a 秋季干旱面积的比例呈现出增加的趋势, 到 21 世纪后期干旱面积比例达到 30% 左右。夏季干旱面积的比例也是增加的, 而且增加的速率和秋季接近, 但是到 21 世纪末期, 夏季干旱面积比例可以高达 60% 左右。从轻旱的统计结果来看, 秋季和夏季未来 100 a 东北轻旱的面积比例也是增加的, 而且仍是夏季的增加速率达于秋季。从变化幅度来看, 无论是秋季还是夏季, 都是 21 世纪后半期出现轻旱的面积比例较大, 前半期出现轻旱的比例较小。从中旱和特旱的统计结果来看(图略), 未来 100 a 东北地区发生中旱和特旱的比例较低, 大多数时间都没有发生中旱和特旱, 这意味着未来 100 a 东北地区的干旱主要是以轻旱为主。

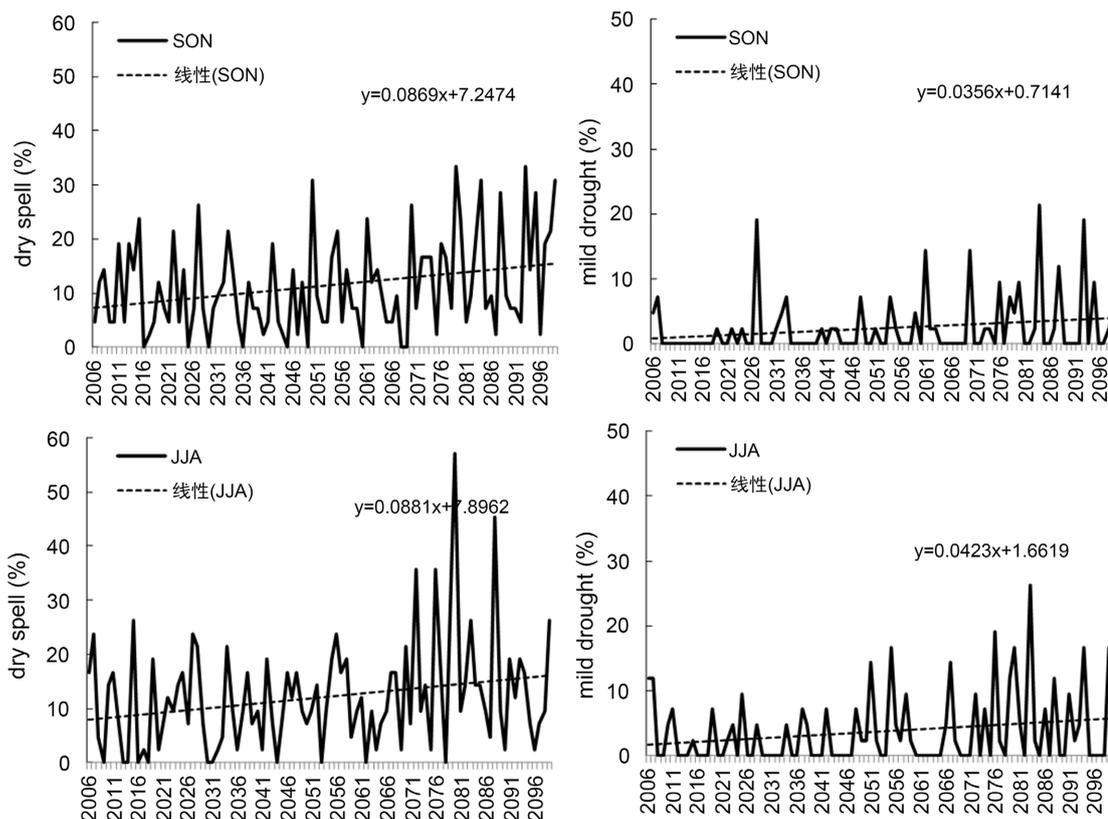


Figure 6. The variation of drought area in autumn (SON) and summer (JJA) in the northeast part of China during 2006~2099  
 图 6. 2006~2099 年东北地区秋季(SON)和夏季(JJA)干旱面积的变化(dry spell: 干旱; mild drought: 轻旱)

#### 4. 结论

本文利用 1900~2099 年间的 14 个 CMIP5 模式集合平均的 PDSI 干旱指数数据分析了东北地区未来 100 年干旱的时空变化特征情况。得出如下结论:

- 1) 2006~2099 年东北地区的干旱主要是以夏季干旱为主, 干旱的区域主要位于东北南部, 而东北北部以变湿润为主, 尤其在秋季变数润的速率达到 0.4/a 以上。
- 2) EOF 第一模态表明在历史时期, 第一特征向量值都小于-0.04, 均为负值, 这表明东北干旱的模式呈现区域一致性。21 世纪中期的具有地区复杂性, 其时间系数曲线也呈现出下降的趋势, 表明东北北部有变干的趋势, 而南部则与之相反。到 21 世纪初期(EP), 东北地区整体也呈现出区域一致性。到 21 世

纪末期, 整个东北地区又呈现出区域一致性。总得来看, 在历史时期, 21 世纪初期及末期三个时期东北地区干旱空间分布性是一致的, 而 21 世纪中期却呈现相反的分布。

3) 总得来看, 除轻微干旱外, 其他三种程度的干旱频率还是普遍偏低的。只有轻微干旱, 发生较普遍, 且影响地区相较其他三种等级的干旱要更广。

4) 未来 100 年, 东北地区干旱趋势在春季时先减弱, 进入夏季后干旱趋势明显增强, 到秋季时干旱趋势有所平稳, 干湿转换频繁, 且干湿程度均很明显。

综上所述, 预计未来 100 年内, 东北地区干旱主要集中在东北北部地区, 干旱整体有下降趋势, 但夏季干旱有明显上升趋势, 夏季严重干旱发生频繁, 且旱区大部分集中在辽宁至黑龙江北部地区。

## 参考文献

- [1] 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题[J]. 地学前缘, 2002(9): 271-275.
- [2] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1011-1018.
- [3] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 519-525.
- [4] 马柱国, 符淙斌. 1951-2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [5] 马柱国, 任小波. 1951-2006 年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195-201.
- [6] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 752-760.
- [7] 叶敏, 钱忠华, 吴永萍. 中国旱涝时空分布特征分析[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 1-13.
- [8] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.
- [9] 祁添焱, 张强, 孙鹏, 等. 气候暖化对中国洪旱极端事件演变趋势影响研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 143-152.
- [10] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 未来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.
- [11] 罗健, 郝振纯. 我国北方干旱的时空分布特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 61-66.
- [12] 冉津江, 季明霞, 黄建平, 等. 中国北方干旱区和半干旱区近 60 年气候变化特征及成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 46-53.
- [13] 李晓辉, 杨勇, 任传友. 东北半干旱地区 Palmer 干旱指数特征分析方法[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(3): 317-323.
- [14] 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(1): 148-157.
- [15] 梁丰, 刘丹丹, 徐红梅, 等. 不同干旱指数集对 1961-2009 年东北地区干旱描述的比较[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 183-189.
- [16] Dai, A. (2013) Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models. *Nature Climate Change*, 3, 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- [17] 张小龙, 付东洋, 刘大召, 等. 基于 EOF 分析中西太平洋金枪鱼围网渔场的海洋环境[J]. 海洋学研究, 2019, 37(2): 81-94.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.