

# 1956—2017 年东北地区气温和降水的时空变化特征

吴金华<sup>1</sup>, 盛芝露<sup>1</sup>, 杜加强<sup>1</sup>, 张杨成思<sup>1</sup>, 张 静<sup>1,2</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 兰州大学 生命科学学院, 兰州 730030)

**摘 要:**在气候变化背景下,探究东北地区近 60 年来气温和降水的时空变化特征。基于东北地区 102 个气象站点 1956—2017 年的气象观测资料,运用趋势分析法、突变检测法、Fisher 最优分割及空间分析等方法对气温和降水的时空变化进行了探究。结果表明:(1)东北地区年均温呈现显著上升趋势,倾向率为  $0.327^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p < 0.001$ ),1987 年前后分别是气温相对较低和较高的两个时期;1956—2017 年东北地区降水量波动性较大,平均倾向率为  $-3.634\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p > 0.05$ ),升降过程较不稳定。(2)气温在 1987—1988 年有一个增温的明显突变 ( $p < 0.05$ );气温的升高具有阶段性;降水量在 1964 年、1983 年、1999 年附近有显著突变 ( $p < 0.05$ );2010—2017 年降水波动相对较大,旱涝灾害频发。(3)气温由南向北逐渐降低,区域整体普遍升温;相邻时段间增温较大的区域依次是呼伦贝尔高原、小兴安岭、大兴安岭和辽河平原,同时增温幅度有所减缓;降水量由东南向西北递减,除大兴安岭北部外的绝大多数区域的降水量呈下降趋势;降水量在时段间呈现周期波动过程,2010 年后进入相对丰水期。

**关键词:**东北地区; 气温; 降水; 突变检测; 最优分割法; 时空变化

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0340-08

## Spatiotemporal Change Patterns of Temperature and Precipitation in Northeast China from 1956 to 2017

WU Jinhua<sup>1</sup>, SHENG Zhilu<sup>1</sup>, DU Jiaqiang<sup>1</sup>, ZHANGYANG Chengsi<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012,

China; 2. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** Under the background of climate change, the temporal and spatial variation characteristics of temperature and precipitation in Northeast China in recent 60 years were analyzed. Based on the observation data from 102 meteorological stations in Northeast China from 1956 to 2017, the temporal and spatial characteristics of temperature and precipitation were analyzed by methods of trend analysis, mutation detection, fisher optimal segmentation and spatial analysis. The results indicated that: (1) the annual average temperature presented significant increasing trend with a tendency rate of  $0.327^{\circ}\text{C}/\text{decade}$  ( $p < 0.001$ ); before the year 1987, temperature was relatively low, and increased since then; precipitation fluctuated greatly from 1956 to 2017, the decreasing rate was  $-3.634\text{ mm}/\text{decade}$  ( $p > 0.05$ ); the fluctuating process of precipitation was unstable; (2) an abrupt change of temperature increasing was observed in 1987—1988 ( $p < 0.05$ ); temperature increased in stages; abrupt changes of precipitation were observed around 1964, 1983 and 1999 ( $p < 0.05$ ); the fluctuation of precipitation was relatively great in 2010—2017, during which droughts and floods occurred frequently; (3) temperature decreased from southern to the northern gradually; the study area warmed up generally; the areas where temperature increased greatly in adjacent periods were Hulunbuir Plateau, Xiao Hinggan Mountains, Da Hinggan Mountains and Liaohe Plain in turn, and the temperature increase had slowed down; precipitation decreased from southeastern to northwestern; precipitation fluctuated cyclically in adjacent periods, and had entered the stage of wet season since 2010.

收稿日期: 2020-07-09

修回日期: 2020-08-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500401-5); 国家自然科学基金(41001055)

第一作者: 吴金华(1996—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: gis\_wujinhua@163.com

通信作者: 杜加强(1980—), 男, 山东临沂人, 研究员, 主要从事生态评估和生态遥感研究。E-mail: dujq@craes.org.cn

图 1 东北地区地理概况及气象站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析法 采用趋势分析法拟合气候要素的变化趋势,通过计算气候倾向率和累积距平值<sup>[14]</sup>定量分析气候要素的变化特征。

1.3.2 气候变率 气候变率可以表示气候变化幅度的大小<sup>[15]</sup>,并且气候变率与灾害性天气的发生频率有关。绝对变率  $V_a$  的计算公式为:

$$V_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

相对变率  $V_r$  则为:  $V_r = \frac{V_a}{\bar{x}}$

式中:  $x_i$  为气候序列逐年的数据;  $\bar{x}$  为气候序列数据平均值;  $n$  为序列长度。

1.3.3 突变检测 气候突变是普遍存在于气候系统的一种重要现象,是气候从一种稳定态跳跃式地转变到另一种稳定态的现象,表现为气候在时空上从一个统计特性到另一个统计特性的急剧变化<sup>[16]</sup>。检验突变情况的方法有很多种,本研究采用 Mann-Kendall 趋势检验法、滑动  $t$ -检验两种检验方法对气候要素时间序列的突变情况进行分析,以达到互相比对、互相检验的效果,两种检验方法均设置 0.05 显著性水平的信度线。

Mann-Kendall 法是由 Mann 和 Kendall 提出的,最初用于检测序列的一种变化趋势,后被发展用来检测气候突变。该方法是世界气象组织(WMO)推荐的一种在世界范围内广泛使用的非参数检验法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,且不受少数异常值的干扰,计算简单,被许多学者用来分析气温、降水量、径流和泥沙等要素时间序列的突变分析<sup>[17-19]</sup>。

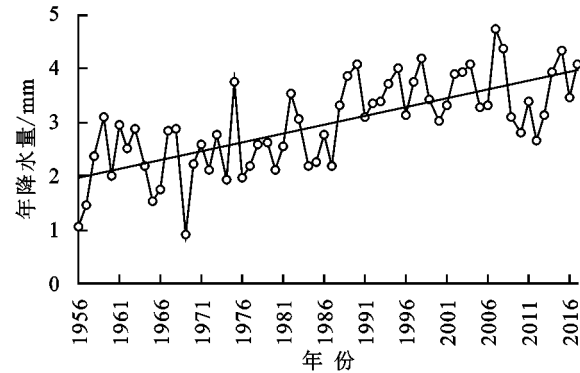


图 2 东北地区年平均气温年际变化趋势

由图 4 可知,1956—2017 年东北地区的降水量波动性较大,呈小幅减少趋势,倾向率为  $-3.634 \text{ mm}/10 \text{ a}$  ( $p > 0.05$ )。62 a 平均降水量为 499.52 mm,2013 年年降水量最高,为 649.02 mm,2001 年年降水量最低,为 377.66 mm,最高值与最低值间相差 271.36 mm。由图 5 可知,年降水量累积距平值有

滑动  $t$ -检验用来检验两组样本平均值的差异是否显著来检验突变<sup>[20-21]</sup>,为此将连续序列分成两段子序列,如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,可以认为均值发生了质变,有突变发生。具体应用中,为避免任意选择子序列长度造成突变点的漂移,可以反复调整子序列,提高计算结果的可靠性,在本研究中子序列长度分别取 5 a,10 a 和 15 a。

1.3.4 Fisher 最优分割法 Fisher 最优分割法是一种对有序样本进行聚类分析的方法,可用于对时间序列进行分段以确定不同时段特征<sup>[22-23]</sup>,较多应用于地震分期<sup>[24-25]</sup>和汛期分期<sup>[26-27]</sup>。该方法的原理是在对有序样本进行分割时,总希望段内差异愈小,一般采用离差平方和来表示段内数据的变化程度,在分割法中简称为变差,变差愈小则表明各段数据愈接近。当分段数确定,用分割后的各段变差之和,即误差函数作为比较不同分割的优劣标准,以误差函数值最小为最优。

2 结果与分析

2.1 气温和降水年际变化趋势特征

由图 2 可知,1956—2017 年东北地区年平均气温在波动中显著上升,倾向率为  $0.327^\circ\text{C}/10 \text{ a}$  ( $p < 0.001$ )。62 a 的年平均气温为  $2.97^\circ\text{C}$ ,年平均温度最高值为  $4.75^\circ\text{C}$ ,出现在 2007 年,年平均温度最低值为  $0.91^\circ\text{C}$ ,出现在 1969 年,最高值与最低值间相差  $3.84^\circ\text{C}$ 。由图 3 可知,年均温累积距平值呈现先下降再上升的过程,即年均温距平值在 1987 年前几乎持续为负,1987 年后距平值持续为正,表明 1987 年前后分别是气温相对较低和较高的两个时期。

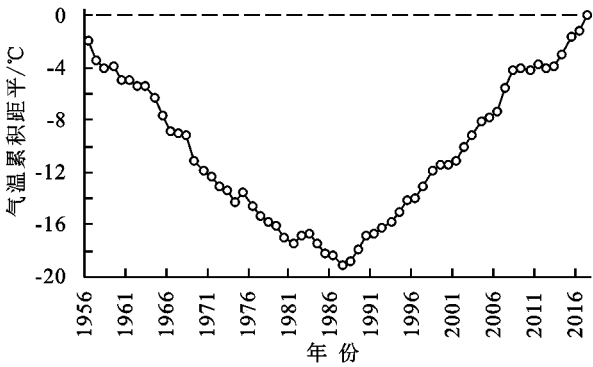


图 3 东北地区年平均气温累积距平值

多个升降过程,降水量累积距平峰值出现在 1964 年和 1998 年,谷值出现在 1982 年和 2009—2011 年期间。峰值往往表明对应年份前面一个时期降水较多而往后降水较少,谷值则相反。

2.2 气温和降水序列突变检测

年平均气温 Mann-Kendall 趋势检验法和滑动  $t$

检验突变检测的结果见图 6。UF 曲线整体位于 0 值以上,说明气温时间序列呈上升趋势。这种上升趋势在 1959 年和 1989 年以后超过了 0.05 的置信水平,达到了显著上升趋势。UF 曲线与 UB 曲线有一个交点,且交点在置信区间内,说明气温突变可能发生在

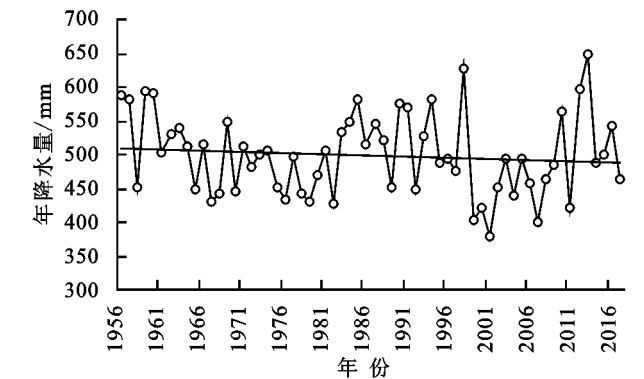


图 4 东北地区年降水量年际变化趋势

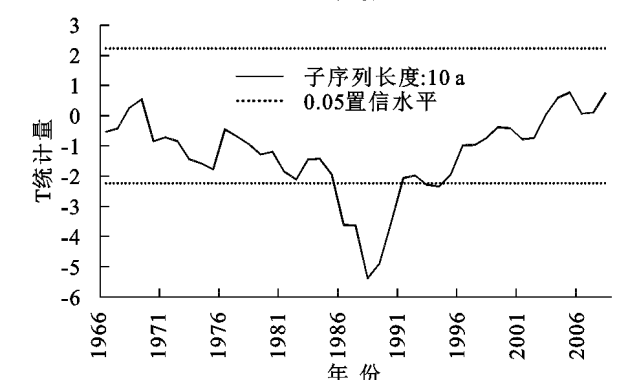
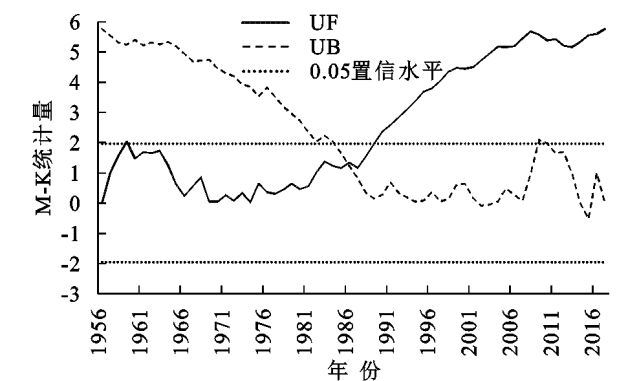


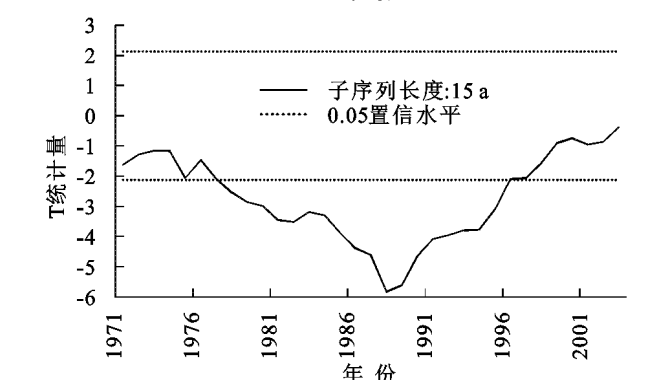
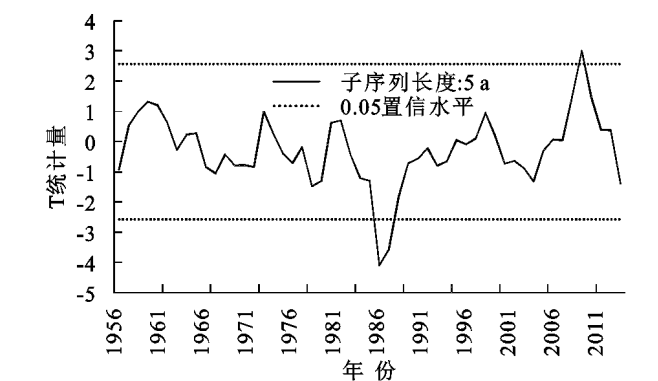
图 6 东北地区年平均气温 Mann-Kendall 检验和滑动 t 检验

东北地区降水量的 Mann-Kendall 趋势检验的结果见图 7,UF 曲线整体位于 0 值以下,说明区域内的降水量在时间段内呈下降趋势,这种下降趋势在 1967—1985 年期间超出了 0.05 的置信水平,达到了显著下降的趋势。UF 曲线与 UB 曲线有 4 个交点,分别是:1957 年、1959 年、1961 年、2016 年,突变检测效果不理想,结合滑动 t—检验的结果来看,1964 年左右存在一个的降水量减少的突变过程;在 1983 年降水量是一个增加的突变过程;之后降水量下降趋缓,在 1998—1999 年期间,降水量又有一个减少的突变。

1986—1987 年。为了检验结果的可靠性,本研究选用了 5 a,10 a,15 a 滑动步长进行滑动 t—检验,从滑动检验的结果来看,1987 年附近的确出现了一次增温的突变过程,从 5 a 滑动检验的图中可以看出在 2009 年气温在显著升高的过程还有一个变冷的突变。



图 5 东北地区年降水量累积距平值



### 2.3 气温和降水阶段性变化特征

结合东北地区年平均气温变化的特点,运用 Fisher 最优分割法将气温时间序列分割为:1956—1957 年、1958—1987 年、1988—2013 年、2014—2017 年 4 个时间段,表 1 为东北地区 4 个时间段年平均气温及其绝对变率和相对变率。各个时段的年平均气温呈上升趋势,从 1956—1957 年的 1.26℃升高到 2014—2017 年的 3.96℃;从气候变率上来看,1958—1987 年年均温的绝对变率和相对变率较大,气候变率大代表着更大的气候要素波动,往往与异常天气的频率及强度有关。



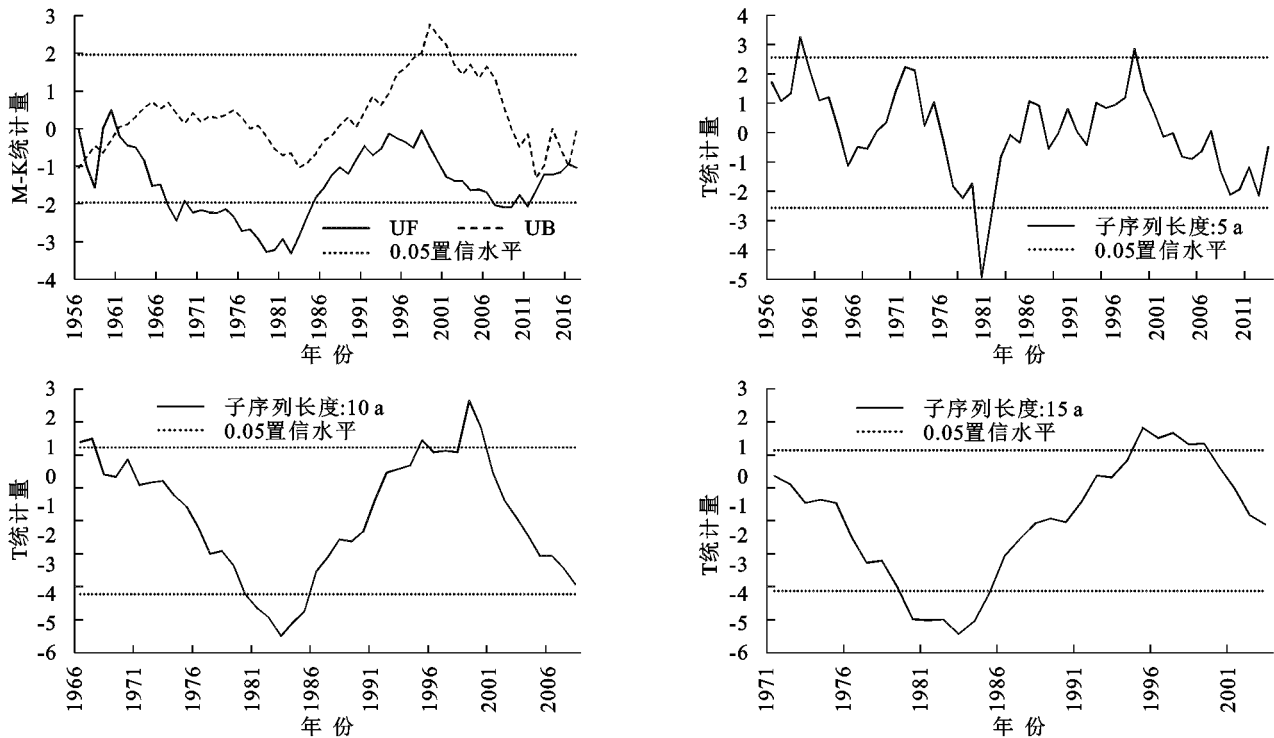


图 7 东北地区年降水量 Mann-Kendall 检验和滑动 t 检验

表 1 1956—2017 年东北地区不同时段年平均气温及其变率

时间段	1956—1957 年	1958—1987 年	1988—2013 年	2014—2017 年
年平均气温/℃	1.26	2.45	3.56	3.96
绝对变率/℃	0.20	0.45	0.43	0.24
相对变率	0.159	0.184	0.120	0.062

结合东北地区年降水量变化的特点,运用 Fisher 最优分割法将降水量时间序列分割为:1956—1964 年、1965—1982 年、1983—1998 年、1999—2009 年、2010—2017 年 5 个时间段,分割结果基本与累积距平和突变检测的分析结果基本一致,表 2 为东北地区 5 个时段年降水量及其绝对变率和相对变率。从中可以看出,1956—1964 年是年平均降水量最多的时期,降水量为 543.26 mm,降水量最少的时期是

1999—2009 年,为 444 mm。62 a 间,降水量经历了一个周期波动过程。2010—2017 年年降水量的绝对变率和相对变率较大,代表这一时间段内的降水情况不稳定。降水的多变常常预示旱涝灾害发生的频率有所增加。

查证该时期记录旱涝情况的文献资料,2011 年、2012 年东北地区是明显的干旱区之一<sup>[28-29]</sup>,2013 年东北地区的洪涝灾害严重,区域降水量较常年偏多 10%~20%,黑龙江、松花江流域汛期平均降水量较常年偏多 3~4 成<sup>[30]</sup>,2014 年以来虽然存在一些季节性的洪涝情况,但东北地区整体降水量偏少,干旱缺水情况在部分地区一直存在<sup>[31-34]</sup>。

表 2 1956—2017 年东北地区不同时段年降水量及其变率

时间段	1956—1964 年	1965—1982 年	1983—1998 年	1999—2009 年	2010—2017 年
年降水量/mm	543.260	471.360	530.540	444.000	527.990
绝对变率/mm	39.690	32.550	40.110	32.680	60.020
相对变率	0.073	0.069	0.076	0.074	0.114

2.4 气温和降水变化的空间分布

计算 1956—2017 年东北地区年平均气温的空间分布见图 8A 所示,可以看出气温的纬度地带性分布特征明显,由南到北呈现递减的趋势,气温较高的区域为渤海、黄海海湾地区,年均温在 10℃左右;气温较低的为大兴安岭北部,年均温低于-4℃;东北平原的气温相较于整个区域比较适中,年平均气温整体大于 2℃。计算 62 a 区域的气温倾向率,结果见图 8B

所示,可以发现整个区域的倾向率均为正值,说明 1956—2017 年区域整体的气温都呈上升趋势。气温倾向率较高的区域在小兴安岭区域,其次是呼伦贝尔高原、内蒙古高原以及东北平原的部分地区,气温倾向率较低的区域主要在辽河流域。

基于 Fisher 最优分割法分割年平均气温时间序列的结果,分别计算 1956—1957 年、1958—1987 年、

1988—2013 年、2014—2017 年 4 个时间段(下文将分别用气温时间分段 1,2,3,4 进行替代)年平均气温的平均值,将相邻时间段的平均气温栅格相减,得到时间段间的气温变化差值。分析结果可以得出:时间分段 2 相较于分段 1,除大兴安岭北部区域气温下降之外区域整体气温上升,其中气温增加最多的区域是在呼伦贝尔高原区域,内陆的增温幅度要高于沿海地

区;时间分段 3 相较于分段 2,区域气温也是有所增加,增温幅度较大的区域变成了小兴安岭地区,其次才是呼伦贝尔高原,增温较小的区域集中在辽河流域以及区域东北沿海地区;时间分段 4 相较于分段 3,大兴安岭和辽河平原的气温有所上升,而小兴安岭和三江平原部分区域气温有所下降;时段间的增温幅度有所减缓。

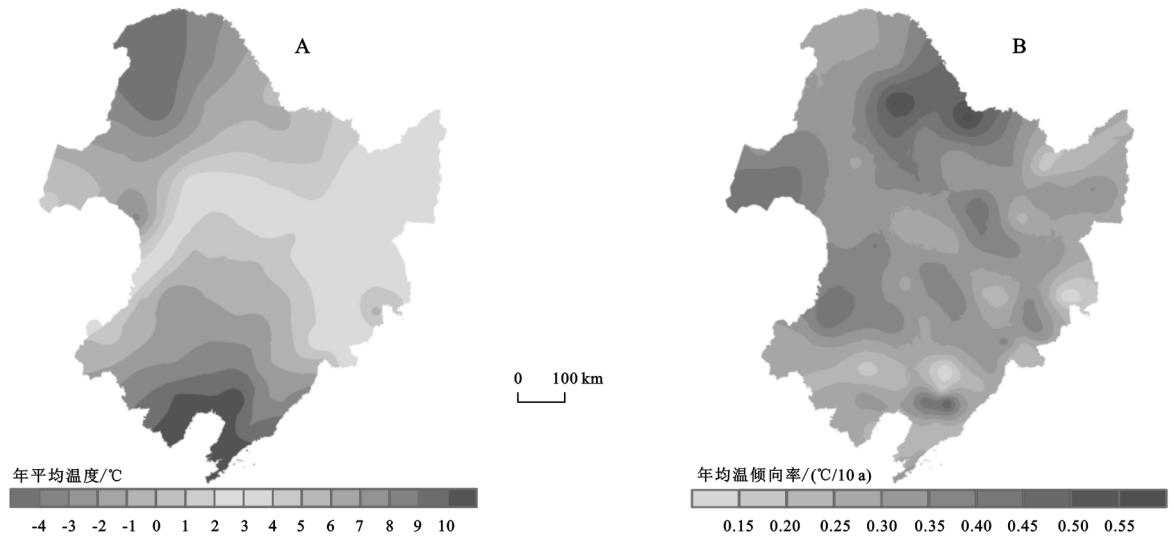


图 8 1956—2017 年年平均气温均值和倾向率的空间分布

计算 1956—2017 年东北地区年降水量的空间分布见附图 12A 所示。从图中可以看出,区域内降水量最多的区域在长白山区域南部临黄海的区域,平均年降水量超过 800 mm;降水量最少的区域是在呼伦贝尔高原,平均年降水量少于 350 mm,其次便是大兴安岭山脉和内蒙古高原,平均年降水量不超过 500 mm,在少雨的地区降水量呈现由东向西逐渐递减的趋势。附图 12B 是区域 62 a 降水量倾向率的空间分布,结果表明,区域内降水量增长和下降趋势同时存在,大兴安岭北部呈现增长趋势,其余大部分区域的降水量都呈下降趋势,包括辽东半岛、辽河平原、三江平原、内蒙古高原东部以及呼伦贝尔高原。

由 Fisher 最优分割法分割年降水量时间序列的结果,分别计算 1956—1964 年、1965—1982 年、1983—1998 年、1999—2009 年、2010—2017 年 5 个时间段(下文将分别用降水时间分段 1,2,3,4,5 进行替代)年降水量的平均值,将相邻时间段的平均降水量栅格相减,得到时段间的降水量变化差值。结果表明,区域整体的降水量均值经历了一个降低—升高—降低—升高的周期波动过程,在此过程中不同区域呈现出不同的变化特征。降水时间分段 2 与分段 1 相比,区域整体降水量降低,降幅较大的区域是长白山南部和三江平原,降幅较小的区域是大兴安岭山脉;降水时间分段

3 相较分段 2,降水量有所升高,主要的升高区域在松嫩平原北部靠近大兴安岭的区域;降水时间分段 4 相较于分段 3,降水量降低,东北地区西南部,包括大兴安岭、呼伦贝尔高原、内蒙古高原以及辽河平原,降水量减少明显;降水时间分段 5 与分段 4 相比,降水量整体上升,其中大兴安岭南部以及长白山脉西侧和南侧的降水量有较大提升。由降水量的变化过程可看出,2010 年后,降水量进入相对丰水期。

### 3 讨论

在以往的气候变化研究中,大多数学者计算区域平均温度或降水量多用区域内站点观测数据的均值来表示<sup>[7-9]</sup>,用算数平均作为区域气象要素平均情况的前提是各气象站点的分布是独立的,但实际情况是站点间气象要素值存在空间自相关,故将观测数据直接用于周边地区均值的推算不是最优的方法。另外一些学者提出城市化的影响是造成气候变化分析中结果不确定性的重要因素,在研究气温和降水变化特征时应该排除热岛效应,否则会出现虚假的增暖和降水格局<sup>[35]</sup>,这也是一些研究计算出的气候倾向率偏大的原因。如何区分长期气候变化中的自然气候变换项和人类活动作用项是一项关键的问题,有学者针对气候变化的城市化效应进行了定量评价<sup>[36-37]</sup>,但剔

除气候变化中的人类活动作用目前还没有一个公认有效的办法。本研究对气象观测资料进行 Kriging 插值,考虑气象要素的空间自相关,计算得到的区域均值更加合理,另外插值避免将城市气象站点观测值直接用作周边地区均值,减小了城市化效应对定量分析气候变化情况的影响。

本研究运用 Fisher 最优分割法对长时间序列进行分段处理和分析,有效地弥补了将时间序列作为整体分析的缺陷,即在对完整时间序列分析变化趋势时,会丢失序列内部相对短期的波动情况以及阶段变化信息。本研究将 Fisher 最优分割法与变率分析相结合,检测到 2010—2017 年为降水相对波动较大的时期,旱涝发生频繁;将 Fisher 最优分割法与空间分析方法相结合,分析得出不同地区的阶段升温情况以及时段间降水量呈现降低—升高—降低—升高的周期波动过程。Fisher 最优分割与常用的时空分析方法结合对于研究一个长时间序列中的局部特征提供一个新思路。

东北地区耕地资源集中,是国家重要的“粮仓”之一,气候变暖趋势和降水格局的改变正逐步改变区域农业种植结构。典型的例子就是在东北松嫩—三江平原,中晚熟水稻品种种植面积大幅扩张,显著提高了粮食产量<sup>[38]</sup>。随着区域水土资源开发强度不断增大,社会经济迅速发展,水资源供需矛盾尤为突出,这对水资源利用效率和配置情况提出了较高的要求<sup>[39]</sup>。气候变化还对东北地区的生态环境产生了重大影响。东北地区是我国湿地资源的主要分布区之一,气候变暖以及水分条件的不稳定导致了湿地生态系统的严重退化<sup>[40]</sup>,同时气候变化也是东北平原西部地区的土地荒漠化的重要影响因素<sup>[41]</sup>。因此,正确认识气候变化特征对于东北地区生产生活的开展和生态环境保护具有十分重要的意义。从本研究的结果来看,过去几十年内气温显著升高以及降水的波动减少使得东北地区的气候呈现暖干化的趋势,这一结论与其他学者的研究结果相一致<sup>[7-8]</sup>。从整个时间序列的气温变化情况来看,气温上升的趋势有所减缓;另一方面,虽然东北地区的降水呈现减少的趋势,但相比 21 世纪初的十年间,当前的降水量处在相对丰水期,同时水分条件不稳定,极端降水情况发生频繁,需要引起足够重视。建议通过水利工程措施和水源涵养、水分调节等生态服务功能提升措施,提高区域水资源利用效率,保证社会经济活动正常进行。

## 4 结论

(1) 1956—2017 年东北地区气温显著上升,平均气温倾向率为  $0.327\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $p < 0.001$ ),年均温的最高值与最低值相差  $3.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1987 年前后分别是气温相对较低和较高的两个时期。1956—2017 年东北地区降水量的波动性较大,总体呈减少趋势,平均倾向率为  $-3.634\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $p > 0.05$ ),最高年份与最低年份的降水量相差  $271.36\text{ mm}$ ,降水量的变化包含有多个升降过程;

(2) 气温在 1987 年有一个增温的明显突变,1989 年后气温增长的趋势达到显著;气温时间序列分割结果表明气温的上升过程具有阶段性,其中 1958—1987 年气温波动较大;降水量在 1964 年、1983 年、1999 年附近降水量都有一个突变的过程;降水时间序列分割结果表明降水量呈现周期波动过程,周期变化的时间点与突变时间基本一致,其中 2010—2017 年的降水量变率最高,降水情况较不稳定。

(3) 东北地区气温由南至北气温逐渐降低;1956—2017 年区域整体普遍升温,但不同区域的增温速率存在明显差异,其中增温较快是小兴安岭地区;通过计算不同时段间的气温差值发现区域内增温幅度较大的区域先是小兴安岭和呼伦贝尔高原,再是大兴安岭和辽河平原。多年平均降水量的空间分布表现为由东南向西北递减,1956—2017 年除大兴安岭北部外的绝大多数区域降水量呈下降趋势;降水量呈现降低—升高—降低—升高的周期变化过程,时段间的降水量变化存在区域分异;2010 年后,降水量进入相对丰水期。

### 参考文献:

- [1] 秦大河, STOCKER T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.
- [2] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.
- [3] 陈隆勋,周秀骥,李维亮,等.中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J].气象学报,2004,62(5):634-646.
- [4] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):948-952.
- [5] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2004,23(2):238-244.
- [6] 中国气象局.中国气候变化蓝皮书(2019)[R].北京:中国气象局气候变化中心,2019.
- [7] 付长超,刘吉平,刘志明.近 60 年东北地区气候变化时

- 空分异规律的研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):60-65.
- [8] 贺伟,布仁仓,熊在平,等.1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报,2013,33(2):519-531.
- [9] 孙凤华,袁健,路爽.东北地区近百年气候变化及突变检测[J].气候与环境研究,2006,11(1):101-108.
- [10] 赵春雨,任国玉,张运福,等.近50年东北地区的气候变化事实检测分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(7):25-30.
- [11] 常文渊,戴新刚,陈洪武.地质统计学在气象要素场插值的实例研究[J].地球物理学报,2004,47(6):982-990.
- [12] 李伟,李庆祥,汪志红.用Kriging方法对中国历史气温数据插值可行性讨论[J].大气科学学报,2007,30(2):246-252.
- [13] 马轩龙,李春娥,陈全功.基于GIS的气象要素空间插值方法研究[J].草业科学,2008,25(11):13-19.
- [14] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:49-69.
- [15] 金龙,缪启龙,周桂香,等.近45年长江三角洲气候变化及主要气象灾害分析[J].南京气象学院学报,1999,22(4):698-704.
- [16] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
- [17] Kahya E, Kalayci S. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2004, 289(1/4): 128-144.
- [18] Qiang Z, Tong J, Marco G, et al. Precipitation, temperature and runoff analysis from 1950 to 2002 in the Yangtze basin, China[J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2005, 50(1): 65-80.
- [19] Zhang S, Lu X X, Higgitt D L, et al. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China[J]. Global and Planetary Change, 2008, 60(3/4): 365-380.
- [20] 向亮,郝立生,安月改,等.51 a 河北省降水时空分布及变化特征[J].干旱区地理,2014,37(1):56-65.
- [21] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚.1961—2006年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J].自然资源学报,2009,24(12):2147-2157.
- [22] Fisher W D. On Grouping for maximum Homogeneity[J]. Publications of the American Statistical Association, 1958, 53(284): 789-798.
- [23] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,1990:194-197.
- [24] 和宏伟,张爱玲. Fisher 最优分割法在云南地震分期中的应用[J].地震研究,1994,17(3):231-239.
- [25] 洪时中.最优分割在地震分期中的应用[J].地震工程学报,1984,6(1):51-59.
- [26] 刘克琳,王银堂,胡四一,等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J].水利水电科技进展,2007,27(3):14-16.
- [27] 肖聪,顾圣平,崔巍,等. Fisher 最优分割法在李仙江流域汛期分期中的应用[J].水电能源科学,2014,32(3):70-74.
- [28] 段海霞,王素萍,冯建英.2011年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2012,30(1):136-147.
- [29] 段海霞,王素萍,冯建英.2012年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2013,31(1):220-229.
- [30] 闫淑春.2012年全国洪涝灾害情况[J].中国防汛抗旱,2013,23(1):17,79.
- [31] 段海霞,王素萍,冯建英.2014年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2015,34(2):349-360.
- [32] 王闪闪,王素萍,冯建英.2015年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2016,34(2):382-389.
- [33] 王闪闪,王素萍,冯建英.2016年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2017,35(2):342-351.
- [34] 张宇,王素萍,冯建英.2017年全国干旱状况及其影响与成因[J].干旱气象,2018,36(2):331-338.
- [35] 丁一汇,戴晓苏.中国近百年来的温度变化[J].气象,1994,20(12):19-26.
- [36] Ren G, Zhou Y, Chu Z, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in north China[J]. Journal of Climate, 2008, 21(6): 1333-1348.
- [37] 张爱英,任国玉,周江兴,等.中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差[J].气象学报,2010,68(6):957-966.
- [38] 莫兴国,章光新,林忠辉,等.气候变化对北方农业区水文水资源的影响[M].北京:科学出版社,2016.
- [39] 中国工程院“东北水资源”项目组,钱正英,沈国舫,等.东北地区有关水土资源配置生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究[J].中国工程科学,2006,8(5):1-24.
- [40] 潘响亮,邓伟,张道勇,等.东北地区湿地的水文景观分类及其对气候变化的脆弱性[J].环境科学研究,2003,16(1):14-18.
- [41] 裘善文,张柏,王志春.中国东北平原西部荒漠化现状、成因及其治理途径研究[J].第四纪研究,2005,25(1):63-73.