

# 松花江流域气温时空变化规律

汪飞, 洪林, 吐尼亚孜·亚森, 熊继东, 江洪珊

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:**利用松花江流域上的 35 个台站 1956—2015 年气温资料,分别采用一元线性回归法、M-K 突变检验法和 Morlet 小波周期法研究了松花江流域近 60 年的年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温时空变化特征、突变特征和周期特征。结果表明:近 60 年来松花江流域气温整体呈现显著上升趋势,且存在明显的增温高值区;年平均气温增量为  $0.322^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,年平均最高气温和年平均最低气温分别为  $0.190, 0.429^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;气温在 1987—1992 年发生突变,突变后的气温变化趋势呈现明显的上升;松花江流域 3 种气温序列均存在 3 个主要的变化周期,分别为 28 年、14 年和 7 年。研究成果对于了解松花江流域气候变化趋势、合理开发利用水土资源具有重要意义。

**关键词:**气温; 时空变化; 趋势分析; M-K 检验; Morlet 小波分析; 松花江流域

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0347-06

## Spatiotemporal Variations of Air Temperature in Songhua River Basin

WANG Fei, HONG Lin, Tuniyazi · Yasen, XIONG Jidong, JIANG Hongshan

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Considering that climate change may bring great changes of regional development, it is of great significance to study the air temperature change over Songhua River basin, which is an important commodity grain base in China. Based on the air temperature data of 35 stations in Songhua River Basin from 1956 to 2015, the trend, variation and periodic characteristics of air temperature are studied through linear trend regression, Mann-Kendall test and Morlet wavelet analysis, respectively. The trend analyses show that during the past 60 years, the air temperature over Songhua River Basin has shown a significant upward trend; the increase of annual mean air temperature is  $0.322^{\circ}\text{C}$  per decade, while the annual mean maximum and minimum temperatures are  $0.190^{\circ}\text{C}$  and  $0.429^{\circ}\text{C}$  per decade, respectively. The spatial variation is analyzed through using GIS tools. The regional air temperature variation chart over Songhua River Basin is drawn by interpolating the increments of each station with inverse distance weighted average method (IDW). The chart shows that the increase ranges of air temperature are not uniform in regional distribution. For areas along the Songhua River and its tributaries, the increase range is much bigger than the other regions. Through the Mann-Kendall test, two sets of order series  $S_k$  are constructed by sets of forward and reverse time series, and then two curves are obtained by standard normalizing the order series. The two constructed curves  $UF_k$  and  $UB_k$  of these three temperature series intersect at one point which is between 1987 and 1992, and the statistical value of the point is between the upper and lower critical limits of the significance test. So, we can conclude that the air temperature has an abrupt change among this period. With the help of the wavelet analysis tool of MATLAB, the wavelet coefficients are obtained. After calculating the real part and modulus of the wavelet coefficients, the real part contour and modulus of the wavelet coefficients are plotted with Kriging interpolation method. Also, the wavelet variance of air temperature variation is calculated at different

收稿日期:2019-02-18

修回日期:2019-03-19

资助项目:国家自然科学基金重点项目(91547205);水利部公益性行业科研专项经费项目(201501013)

第一作者:汪飞(1995—),男,江苏省无锡市宜兴市人,在读硕士研究生,主要从事流域气象研究。E-mail:1239042167@qq.com

通信作者:洪林(1963—),女,安徽省合肥市庐江县人,博士,教授,农田水利水环境。E-mail:lhong@whu.edu.cn

time scales to draw the wavelet variance chart. The Morlet wavelet analysis results show that there are three main cycles of temperature change, corresponding cycles are 28-year, 14-year and 7-year, respectively.

**Keywords:** air temperature; spatiotemporal variation; trend analysis; M-K test; Morlet wavelet analysis; Songhua River Basin

随着全球气候变暖,气候的变化及其影响受到越来越多国内外学者的关注和研究<sup>[1-3]</sup>。根据 IPCC 第五次的研究报告<sup>[4]</sup>,近百年全球变暖已高达 0.85~0.89℃。与全球变化相一致,中国气温也呈现出增温特征<sup>[5-6]</sup>,其增长速率高于同期北半球水平,且在 20 世纪 80 年代中后期增温速率有加大趋势<sup>[7]</sup>。气候变化使得水资源的分布、循环以及生态系统发生改变,使得水土资源之间的矛盾进一步加剧,同时也增加了极端事件发生的可能性<sup>[8]</sup>。气温作为气候变化的重要指标,对生态系统的变化起着重要的作用。

松花江流域位于我国的东北地区,是我国重要的商品粮基地,气候变化对区域的发展具有重要影响。目前已有诸多学者对该区域的气候变化进行了分析和研究,姜晓艳等<sup>[9]</sup>分析了东北地区的冷暖交替特征;曾小凡等<sup>[10]</sup>利用距平法探讨了松花江流域气温和降水的变化趋势;孙文等<sup>[11]</sup>研究了全球变暖背景下松花江流域气温年内的趋势和突变特征。以往结果分析了流域内年平均气温的变化趋势,但对年平均最低和最高气温以及气温序列周期特征的研究相对较少。本文以松花江流域上年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温为研究对象,对其时空变化特征、变异特征和周期特征进行较为深入的研究分析,以期对流域的气温变化特征有更为深刻的认识,为当地的农业发展规划、生态环境保护、水土资源平衡调整提供一定的参考依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

本研究选取松花江流域上分布较为均匀、资料序列相对完整的 35 个气象站点,从中国气象数据网上获取这 35 个站点从 1956—2015 年的年值气象数据,建立松花江流域年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温的数据系列,并对由于迁站、漏测等原因导致的数据缺失项采取线性回归的方式进行插补,从而研究松花江流域气温变化趋势和规律。松花江流域上的气象站点的分布如图 1 所示。

### 1.2 研究方法

对松花江流域气温变化规律的研究主要包括气温的趋势分析、突变点分析和周期性分析。

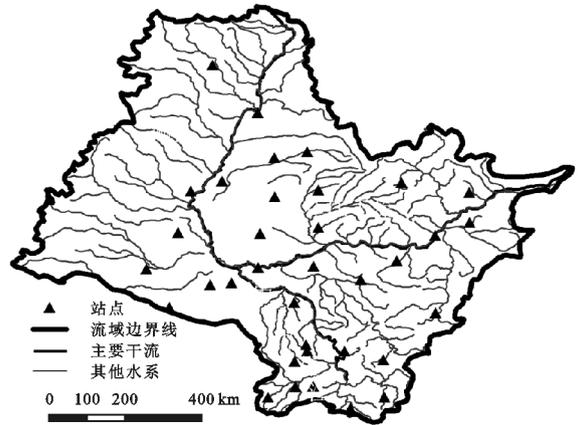


图 1 松花江流域气象站点分布

本文选取线性回归法并辅以 5 a 滑动平均趋势法来研究松花江流域气温的变化趋势<sup>[12]</sup>,趋势变化采用气温倾向率来定量分析;利用 ArcGIS 中的空间插值工具得到流域的气温变化率分布图,结合各站点的分布特征和倾向特征分析气温在流域空间上的差异性;利用 Mann-Kendall(M-K)检验法<sup>[13]</sup>对松花江流域气温序列进行突变识别,分析其变化规律及可能存在的突变特征,并结合 Pettitt 法进行突变结果检验;通过 Morlet 小波分析气温变化的周期性特征<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 气温时空变化分析

2.1.1 气温变化趋势分析 通过线性回归法和 5 a 滑动平均法对整个流域上的气温序列做趋势分析,分别得到年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温的变化趋势图,结果如图 2 所示;对气温变化的趋势进行显著性水平为 0.05 的非参数统计检验,显著性检验结果见表 1。

由线性趋势图可以看出,松花江流域上的 3 种气温序列均呈显著的波动上升趋势,其变化趋势也基本保持一致,但在增长率上存在一定的差异性。其中年平均最低气温的线性增长幅度最大,以 0.429℃/10 a 的幅值增长;其次是年平均气温,为 0.322℃/10 a;年平均最高气温的线性增长幅度为 0.19℃/10 a。这 3 种气温的增长趋势均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验,可认为增长是显著的。年平均气温上升程度处于同期全国增温范围内<sup>[5,15]</sup>,0.322℃/10 a 的增温略低于

姜晓艳等<sup>[9]</sup>对东北地区气温变化的研究成果,与孙文等<sup>[11]</sup>对松花江流域最新气温研究的结果基本一致,

同时年平均最低气温比最高气温增长更快也符合全国气温变化特征<sup>[5]</sup>。

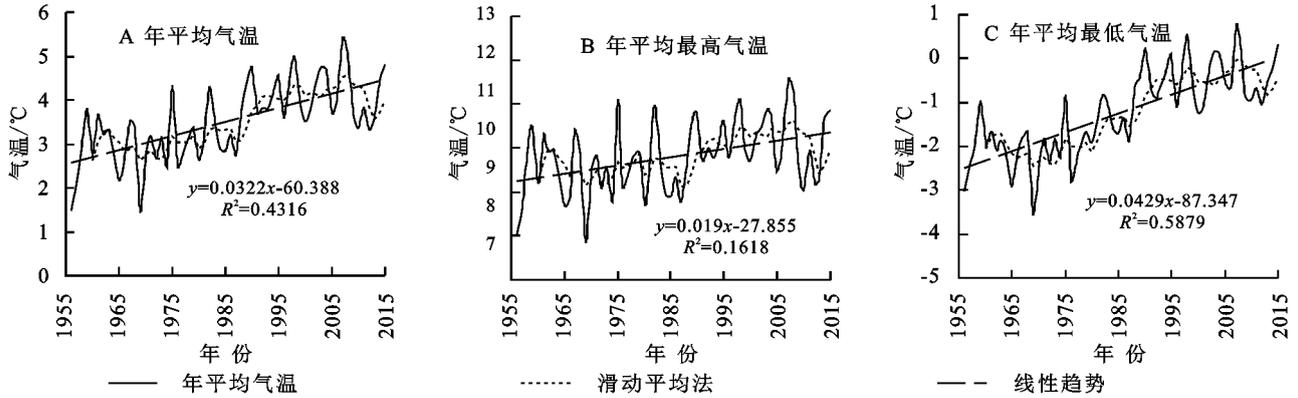


图 2 松花江流域气温变化趋势

表 1 气温变化趋势检验

系列名称	统计值	临界值	趋势	变化率/( $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )	显著性
年平均气温	44.11	4.01	上升	0.322	显著
年平均最高气温	82.63	4.01	上升	0.190	显著
年平均最低气温	12.11	4.01	上升	0.429	显著

从 5 a 滑动平均的结果来看,年平均气温和年平均最高气温的变化趋势较为一致,在 20 世纪 50 年代至 80 年代虽呈现波动上升趋势,但趋势较为平缓,相

比而言,从 20 世纪 90 年代开始,气温的增长趋势更为显著,且气温的波动更为剧烈;而对于年平均最低气温,气温序列从 20 世纪 80 年代开始即有较为剧烈的增长趋势,先于年平均气温和年平均最高气温。

2.1.2 气温空间变化规律 利用 ArcGIS 软件将各站点 3 种气温序列的变化趋势按照反距离加权平均(IDW)的插值方式绘制松花江流域气温变化的空间分布图(图 3)。

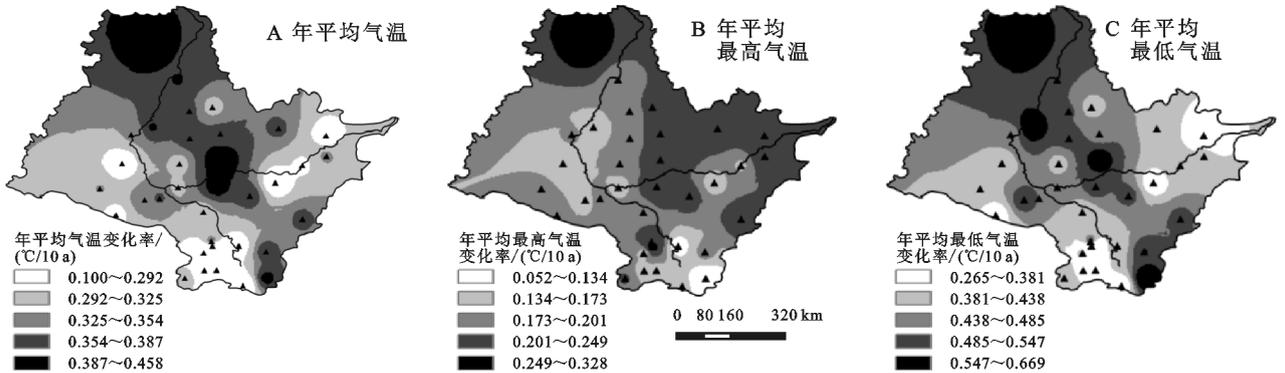


图 3 松花江流域气温空间变化

从空间分布图中可以看出,在整个松花江流域上,3 种气温序列的增长趋势大致相同。年平均气温上升范围在  $0.190\sim 0.458^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;年平均最高气温变化范围处于  $0.052\sim 0.328^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,同比另外两种气温序列而言变化较为平缓;年平均最低气温变化幅度非常剧烈,其上升范围在  $0.265\sim 0.669^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,这可能是由于东北地区冬季呈现明显的暖干变化,从而导致年平均最低气温整体上升较快。

3 种气温变化的空间分布都不均匀。且存在较为明显的高值区,其中嫩江流域的大兴安岭站、松花江干流的绥化站、黑龙江站的增长趋势最为显著,这些站点的 3 种气温均表现极高的增温趋势。整体上看,年平均气温和年平均最低气温的增长趋势具有非

常高的相似性,且变化倾向率较高的站点基本分布在流域的西北—东南沿江条带上,在其两侧的气温增幅则稍弱;而对于年平均最高气温来说,其变幅较大的区域在空间分布上整体向东北方向迁移。考虑到站点在松花江流域上的地理特征,气温变化的这种分布情况可能与区域自身的气候特征以及地理条件有关,另外也可能是受到靠近河流的地区城市化水平、土地利用以及工业、农业发展的影响。

2.2 变异分析

用 Mann-Kendall 法对松花江流域 1956—2015 年年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温进行突变检验(取 0.05 的显著性水平),分别绘制正向序列  $UF_k$ 、反向序列  $UB_k$  两条折线和显著性水平上、

下信度线( $U_{0.05} = 1.96$ ),见图 4。

M-K 法用于突变检验时,当正向序列曲线超过信度线,即表示存在明显的变化趋势时,若正、反曲线的交叉点位于信度线之间,这点便是突变点的开始<sup>[16-17]</sup>。

由图 4 检验结果分析可得:3 种气温的正向序列曲线  $UF_k$  均超过了上信度线,即都显示出气温序列存在明显的正向变化趋势;对于年平均气温和年平均最高气温,增温趋势在 20 世纪 80 年代后期非常显著,而年平均最低气温则在 80 年代前期就表现为明显的增长趋势,这与前面的趋势分析结果相符。

在上、下信度线内,3 种气温的正、反序列曲线均存在交点。其中,年平均气温序列交点位于 1989 年左右,年平均最高气温序列交于 1992 左右,年平均最低气温则落在 1987 左右。在交点之后,3 种气温

均呈明显的增温趋势。为进一步验证其突变的可能性,结合 Pettitt 检验法对气温序列做突变检验,其结果如图 5 所示,对于年平均气温和年平均最低气温,其 Pettitt 最低值均只有一处,对应的年份分别为 1988 年,1987 年,与 M-K 法识别结果基本一致;而对于年平均最高气温,M-K 法检验的突变年份 1992 年对应了一个低值,但其右侧仍存在较低值,从 M-K 检验图上可以看到,年平均气温在高于上信度线外,正、反序列曲线同样出现了交点,考虑到 M-K 法并不能肯定或排除其为该序列突变点的可能性,而 Pettitt 法不适用于多个突变点情况,可考虑该气温序列在其他点处依旧可能存在突变点的情况。结合两种突变识别的分析结果,可认为松花江流域的气温序列在 1987—1992 年之间存在突变。

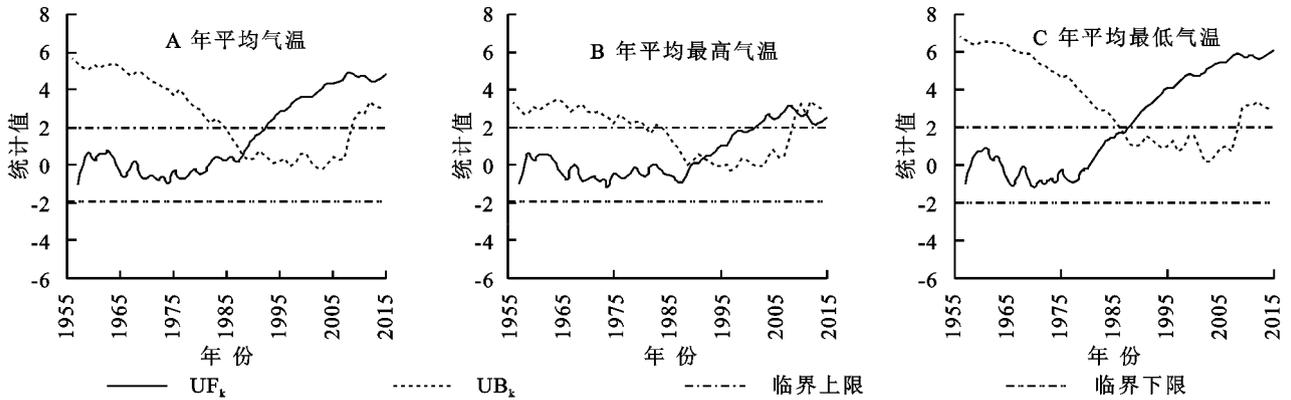


图 4 松花江流域气温 Mann-Kendall 法突变识别

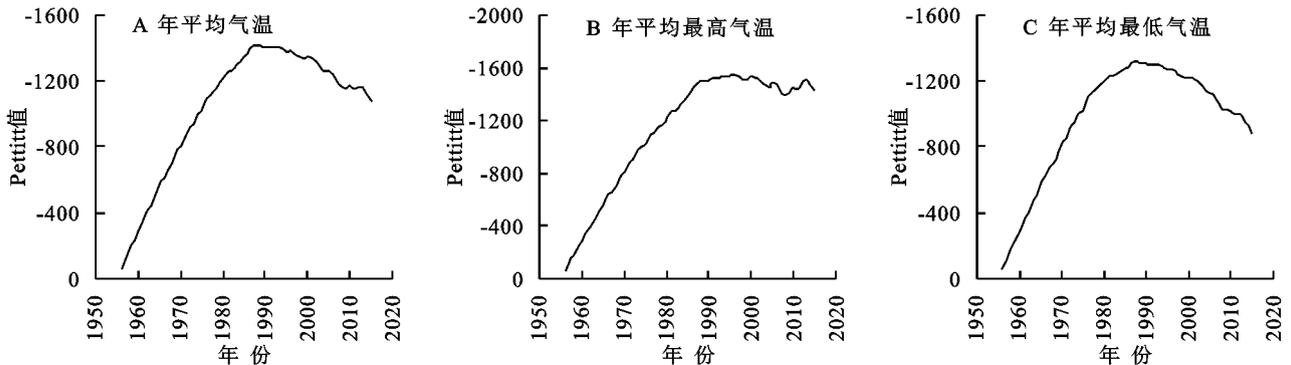


图 5 松花江流域气温 Pettitt 法突变识别

### 2.3 周期分析

借助 MATLAB 的小波分析工具,得到小波系数,通过提取小波系数的实部部分后,利用克里金插值法绘制小波系数实部等值线图,见图 6。对不同的时间尺度求取气温变化的小波方差值并绘制小波方差图,见图 7。对小波系数的模取平方,同样利用克里金插值法绘制小波系数模方图,见图 8。

小波系数实部等值线图能够反映在不同的时间尺度下序列的周期变化,同时能够体现不同周期在时

间域上的分布情况,小波方差图能够表明不同时间尺度下时间序列波动能量的分布情况。因此可以利用实部等值线图和方差图分析气温系列的周期分布特征;小波系数的模值显示了整个时间域上不同时间尺度下变化周期所对应的能量密度,因此小波系数模方图可用来分析对应尺度的周期性的显著性特征。

由图 6 和图 7 可以看出,3 种气温序列的周期性特征较为类似,均存在 3 个明显的峰值,其时间尺度分别为 28 a, 14 a 和 7 a,其中 28 a 所对应的周期震

荡最剧烈,可认为是气温变化的第一主周期;14 a 是峰值的次高点,其周期震荡较为明显,但弱于 28 a 所对应的周期,可认为是第二主周期;第三主周期为

7 a,从等值线图中可以明显得看出,该周期出现的次数最为频繁。流域在整个时间域内的气温变化周期基本是由以上 3 个周期波动控制。

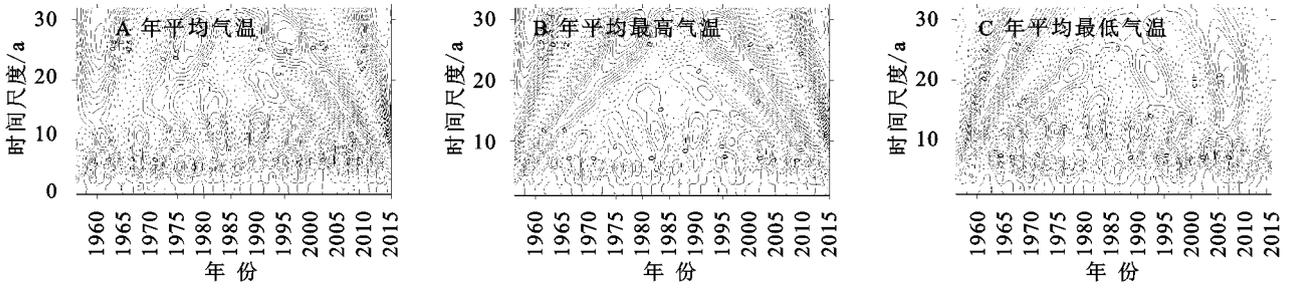


图 6 松花江流域气温小波系数实部等值线

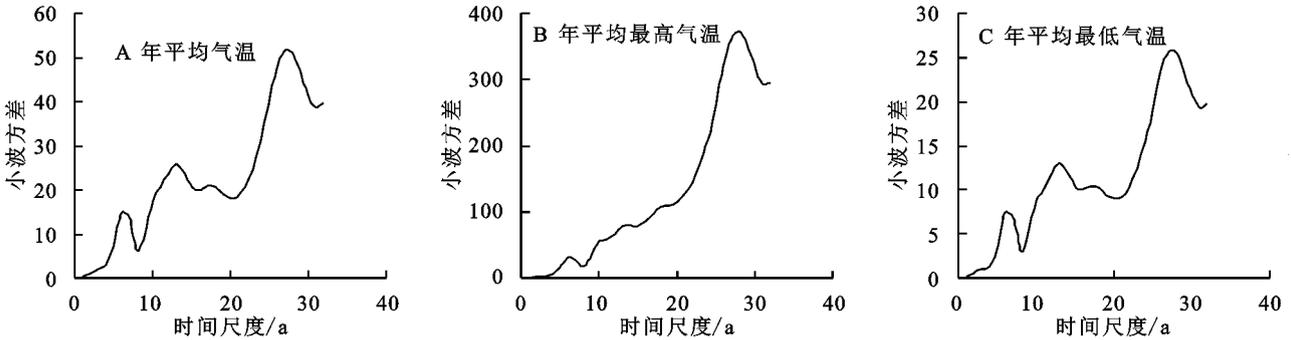


图 7 松花江流域气温小波方差

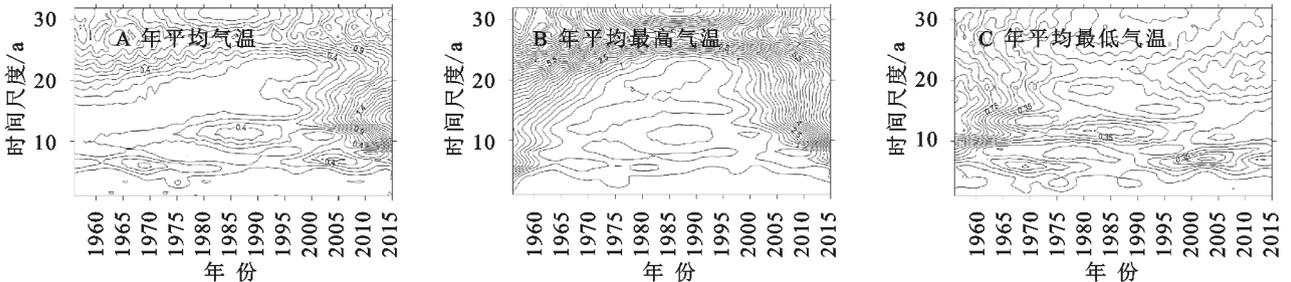


图 8 松花江流域气温小波系数虚部等值线

由图 8 可知,3 种气温序列中 20~30 a 时间尺度所对应的能量密度均最为集中,且贯穿于整个时间域内,说明该时间尺度内的变化周期最为明显,对整个研究时间域内的气温变化都起控制作用;但在 10~15 a 和 5~10 a 时间尺度,能量密度的表现形式并不一致。对于年平均气温和年平均最高气温,10~15 a 时间尺度的能量主要集中在 1990 年以后,而 5~10 a 时间尺度能量分布贯穿整个研究时间域;年平均最低气温在 10~15 a 时间尺度上的能量密度集中在 1990 年之前,而 5~10 a 时间尺度的主要分布于 1990 年之后。这可能与气温序列在 1987—1992 年时间段内出现了突变有关,从而导致气温序列出现了新的周期性变化特征。

### 3 结论

(1) 松花江流域 3 种气温序列总体呈上升趋势,且

上升趋势均是显著的。流域年平均气温以  $0.322^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的趋势增长,年平均最高气温增幅为  $0.190^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,年平均最低气温为  $0.429^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$

(2) 3 种气温序列变化的空间分布并不均匀,年平均气温和年平均最低气温变化在空间分布上具有较大的相似性,在西北—东南沿江条带上上升趋势大于其他区域,相比而言,年平均最高气温的增温变幅较大的区域更偏向东北方向。

(3) 从 M-K 法和 Pettitt 法突变检验结果来看,松花江流域气温序列在 1987—1992 年之间发生突变,突变后的气温呈现明显的上升趋势。

(4) 松花江流域气温变化存在 3 个主周期,对应的时间尺度分别为 28 a,14 a 和 7 a,其中 28 a 时间尺度的主周期贯穿于整个时间域内,起主要控制作用,而其他两个主周期在 1990 年前后出现了一定的差异性。

## 参考文献:

- [1] Lipczynska-Kochany E. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640:1548-1565.
- [2] Fanzo J, Davis C, McLaren R, et al. The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes[J]. *Global Food Security*, 2018, 18:12-19.
- [3] 王晓宇. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. *农业与技术*, 2018, 38(21):150-151.
- [4] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 回顾 IPCC 30 年(1988—2018 年)[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5):108-114.
- [5] Shi J, Cui L, Wang J, et al. Changes in the temperature and precipitation extremes in China during 1961—2015 [R]. *Quaternary International*, 2018.
- [6] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004, 62(2):228-236.
- [7] 任国玉, 郭军, 徐铭志. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6):942-956.
- [8] Shi C, Jiang Z, Chen W, et al. Changes in temperature extremes over China under 1.5°C and 2°C global warming targets[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(2):120-129.
- [9] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 中国东北地区近百年气温序列的小波分析[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(2):122-125.
- [10] 曾小凡, 李巧萍, 苏布达, 等. 松花江流域气候变化及 ECHAM5 模式预估[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4):215-219.
- [11] 孙文, 范昊明. 全球变暖背景下松花江流域气温最新变化特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3):97-104.
- [12] 杜军, 马鹏飞, 潘多. 1981—2014 年西藏各时次气温的变化趋势分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(3):422-432.
- [13] Hamed K H, Rao A R. A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/4):182-196.
- [14] 王文圣, 丁晶, 金菊良. *随机水文学*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [15] 佟金鹤. 1965—2014 年我国温度和降水变化趋势分析[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(12):229-235.
- [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] 师长兴, 周园园, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11):1361-1369.
- [18] 李芳兰, 包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. *植物学通报*, 2005, 22(S1):118-127.
- [19] 周智彬, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究[J]. *干旱区研究*, 2002, 19(2):35-40.
- [20] 吴林, 霍焰, 聂小兰, 等. 沙棘叶片组织结构观察及其与抗旱性关系的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(4):390-393.
- [21] 徐扬, 陈小红, 赵安玖. 川西高原 4 种苹果属植物叶片解剖结构与其抗旱性分析[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(11):2227-2234.
- [22] 任媛媛, 刘艳萍, 王念, 等. 9 种屋顶绿化阔叶植物叶片解剖结构与抗旱性的关系[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(4):64-68.
- [23] 潘昕, 邱权, 李吉跃, 等. 基于叶片解剖结构对青藏高原 25 种灌木的抗旱性评价[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(2):61-68.
- [24] 燕玲, 李红, 刘艳. 13 种锦鸡儿属植物叶的解剖生态学
- 研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1):100-106.
- [25] 梁颖. 内蒙古荒漠区锦鸡儿遗传多样性分析[D]. 呼和浩特, 内蒙古大学, 2018.
- [26] 赵小仙, 李毅, 苏世平, 等. 3 个地理种群蒙古沙拐枣同化枝解剖结构及抗旱性比较[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5):1293-1300.
- [27] 姚广前, 魏阳, 毕敏慧, 等. 干旱胁迫下 4 种锦鸡儿属植物叶脉密度与最低水势关系[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6):1252-1258.
- [28] 李洁, 周春娥, 梁志英, 等. 干旱胁迫对乌头部分生理指标的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3):93-100.
- [29] 李晶. 内蒙古高原 3 种锦鸡儿植物(*Caragana*)输水结构与抗旱性的相关研究[D]. 天津, 南开大学, 2008.
- [30] 周萌. 锦鸡儿属响应干旱胁迫的形态适应特征和生理机制的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [31] 赵一之. 小叶、中间和柠条 3 种锦鸡儿的分布式样及其生态适应[J]. *生态学报*, 2005, 25(12):3411-3414.

(上接第 346 页)