

文章编号: 1004-4353(2022)03-0273-05

图们江流域气温变化特征及成因研究

王昊¹, 李春景¹, 金爱芬¹, 赵晶²

(1. 延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002;

2. 延边朝鲜族自治州气象局, 吉林 延吉 133000)

摘要: 以图们江流域 7 个气象站 1965—2018 年共 54 年的年平均气温数据为研究数据, 运用 EOF 分析、滑动平均法、Mann-Kendall 检验和气候倾向率等方法, 从年际变化、年代际变化和突变等方面研究了图们江流域的气温时空变化特征. 运用合成分析研究了气温对海洋环境的响应, 并结合 R/S 分析预测了图们江流域的气温未来变化趋势. 结果表明: 1965—2018 年图们江流域的气温出现多次冷暖波动, 但整体呈上升的趋势; 流域内的升温率为 $0.261\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 该值与中国东部地区的升温率一致; 流域内气温发生突变的时间为 1991 年; 1998—2018 年出现气候变暖停滞现象, 其中 1998—2012 年呈降温趋势, 这与联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)认定的“全球变暖间断期”一致; 流域内未来 15~20 a 的气候变化趋势与 1965—2018 年的趋势相反, 即存在降温趋势, 但这仅是变暖大趋势下的短期扰动; 黄海和东海局部海域的海温下降以及海温周期变化是图们江流域的气候出现变暖停滞的主要成因.

关键词: 图们江流域; 气温变化; 变暖停滞; 海温周期

中图分类号: K903

文献标识码: A

Characteristics and causes of temperature variation in Tumen River Basin

WANG Hao¹, LI Chunjing¹, JIN Aifen¹, ZHAO Jing²

(1. College of Geography and Ocean Science, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. Yanbian Korean Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Yanji 133000, China)

Abstract: The annual mean temperature data of seven weather stations in the Tumen River Basin for 54 years from 1965 to 2018 were used as the research data. EOF analysis, moving average method, Mann-Kendall test and climate propensity rate were used to study the spatial and temporal variation characteristics of air temperature in the Tumen River Basin from the aspects of interannual variation, interdecadal variation and abrupt change. The response of air temperature to Marine environment is studied by synthetic analysis, and the future trend of air temperature in Tumen River Basin is predicted by R/S analysis. The results show that the temperature over the Tumen River Basin fluctuated several times from 1965 to 2018, but the overall temperature showed an upward trend. The warming rate in the basin is $0.261\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, which is consistent with the warming rate in eastern China. The abrupt change of air temperature in the basin occurred in 1991. There was a global warming hiatus in 1998 to 2018, and a climate cooling trend from 1998 to 2012, which was consistent with the “global warming hiatus” identified by the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The climate change trend in the next 15 to 20 years in the basin is opposite to the trend from 1965 to

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830643)

第一作者: 王昊(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为自然地理学.

通信作者: 李春景(1966—), 女(朝鲜族), 博士, 副教授, 研究方向为自然地理学.

2018, that is, there is a cooling trend, but it is only a short-term disturbance under the general warming trend. The decrease of SST and the change of SST cycle in parts of the Yellow Sea and East China Sea are the main causes of climate warming stagnation in the Tumen River Basin.

Keywords: Tumen River Basin; temperature change; stagnation of warming; SST cycle

0 引言

随着地球温室效应的增强,随之出现的气候异常及自然灾害等现象明显增加,给人类的生产生活造成了严重的影响.联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第6次(2021年)评估报告中指出,气候变化将导致多种气象灾害频发,且其强度会大幅提高,同时有可能产生不可逆的影响^[1];因此,研究气温变化特征及其驱动因素具有重要意义.由于图们江流域纬度较高,热量较低,易发生低温冷害^[2],因此该区域的气温变化受到学者们的关注.2006年,金爱芬等研究了图们江流域1954—2002年的气温年际变化特征,结果显示图们江流域的气温在1954—1972年呈现下降趋势,1972—2002年呈现上升趋势^[3];同年,金爱芬等研究了1957—2002年图们江流域气温的周期特征,结果显示图们江流域气温变化受海洋气象环境影响明显,且存在明显的周期振荡特征^[4];2020年,黄义强等研究了冻土对图们江流域气温的响应,结果显示气温变化与土壤冻融存在显著的负相关关系^[5].本文在上述研究的基础上,利用EOF分析、滑动平均法、Mann-Kendall检验、气候倾向率、R/S分析和功率谱分析等方法对图们江流域1965—2018年的气温变化特征及成因进行研究,以期为图们江流域的物候变化和生态保护研究以及农林业生产等提供参考.

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

图们江是中朝俄界河(发源于长白山),位于我国吉林省东部、长白山脉西侧,是延边朝鲜族自治州境内最大的水系^[6],流域面积为33 168 km².图们江流域(中国一侧)属中温带大陆性季风气候,多年平均降水量为602.5 mm^[3].

1.2 数据来源

气温数据来源于延边朝鲜族自治州气象局.

数据包括安图、和龙、珲春、龙井、图们、汪清、延吉7个气象站点的气温数据,其中安图站、和龙站、珲春站、龙井站、汪清站、延吉站的数据时间为1965—2018年,图们站的数据时间为1976—2018年(建站时间为1976年).海表温度数据来自NCEP再分析数据集.

1.3 研究方法

1.3.1 EOF分析

EOF分析也称为特征向量分析,是一种通过分析矩阵数据中的结构特征来提取主要数据特征量的统计方法^[7].由于该方法可以最大限度地利用降维思想将多个变量信息集中到少数独立的变量上,因此在地理学中常被用于分析气候空间分布类型.

1.3.2 滑动平均法

滑动平均法是通过平滑和滤波来处理数据的一种方法,该方法可以消除统计序列中的随机波动,从而可更明显地表示出时间序列的变化趋势^[8].滑动平均法的数学表达式为:

$$\hat{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1} (j=1, 2, \dots, n-k+1),$$

式中 k 为滑动长度, n 为样本数量, x 为自变量(在本文中 x 为气温).

1.3.3 气候倾向率

气候倾向率通常用以描述某一气象要素在时间序列内的变化趋势以及升温率^[9],其数学表达式为:

$$Y = a_0 + a_1 t,$$

式中 Y 为气象要素(本文中为气温), a_0 为常数项, a_1 为线性趋势项, t 为时间(本文中为年份).本文中用 $10a_1$ 代表每10 a的气温升温率.

1.3.4 Mann-Kendall检验

Mann-Kendall检验是一种非参数检验方法,由于该方法具有样本无需遵从特定分布和不受少数异常值干扰以及计算简便等优点,因此在地理学中常被用于分析气象要素的突变特征^[10].

在 Mann-Kendall 检验中,若 UF 统计量大于 0,则表明序列呈上升趋势;若 UF 统计量小于 0,则表明序列呈下降趋势.当 UF 曲线超过临界线时,表示气象要素上升或下降趋势显著.若 UF 统计量曲线和 UB 统计量曲线交叉后在临界线之间仅出现一个交点,则交点对应的的时间就是突变发生的时间.但若 UF 统计量曲线与 UB 统计量曲线交叉后在临界线之间出现多个交点,或交叉点不在临界线之间,则无法判断该交点是否为突变点,此时需要运用滑动 t 检验和累积距平等方法来确定交点所对应的时间是否发生了突变^[11].

1.3.5 R/S 分析法

R/S 分析法(重标极差法)^[12]是 Mandelbrot 等在 Hurst 研究的基础上提出的一种用于研究时间序列的方法.由于该方法能够区分系统中的随机序列与非随机序列,因此可用于研究时间序列的未来变化趋势.

1.3.6 功率谱分析

功率谱分析^[13]是基于傅里叶变换的一种计算气象因子周期性的方法.该方法能够将时间序列的总能量分解为不同频率上的分量,并根据不同频率的波方差贡献来确定时间序列的主要周期;因此,利用该方法可得到数据中隐含的显著周期.

2 结果与分析

2.1 代表性站点的确定

确定代表性气象站点时,若采用各站点的平均值,则会导致各站点的部分特征值丢失,进而影响气温变化特征的分析;因此本文采用 EOF 分析法确定代表性站点.确定方法为:首先对图们江流域内 7 个气象站点的气温数据进行主成分分析,由此得出各气象站点气温数据的因子载荷;然后利用各气象站点的经纬度以及第一因子载荷值进行反距离权重插值(IDW)和绘制等值线地图(见图 1),由此根据各气象站点对应的因子载荷值确定代表性站点.

由图 1 可见,第一因子载荷值均为正值,表明图们江流域气温的空间分布类型为全区一致型.其中图们站和延吉站的第一因子载荷值最大,但图们站因历史原因导致部分数据缺失,因此本文

选取延吉站的气温数据对全流域进行分析.

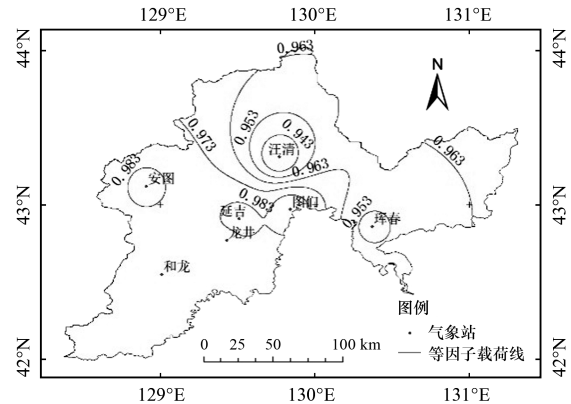


图 1 各气象站的因子载荷等值线图

2.2 气温年际及年代际的变化特征

采用滑动平均法对流域内的年平均气温进行冷暖波动分析的结果如图 2 所示.由图可以看出,气温在 1998—2012 年出现了较为明显的降温趋势,这与 IPCC 提出的 1998—2013 年为“全球变暖间断期”的结论一致^[14].利用 SPSS22.0 软件对气温和年份进行一元线性回归分析显示,图们江流域年平均气温的气候倾向率为 $y = 0.0261x + 4.8443$,升温率为 $0.261\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,该值与中国东部的升温率($0.26\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)^[15]基本吻合.

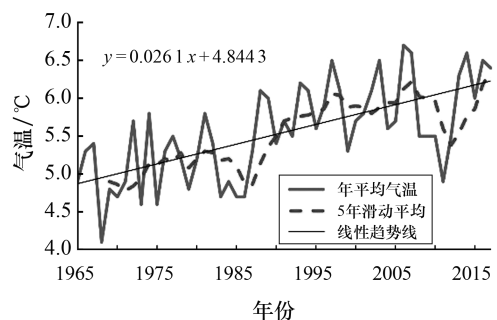


图 2 气温年际及年代际的变化特征图

2.3 气温突变

图 3 为图们江流域年平均气温的 Mann-Kendall 检验结果.由图 3 可以看出,年平均气温的 UF 统计量曲线与 UB 统计量曲线只出现了一个交点(位于 0.05 显著性水平临界线之间),由此可判断年平均气温在 1991 年(交点对应年份)发生了突变(暖突变).这表明,图们江流域于 20 世纪 90 年代进入了一个相对偏暖的气候状态.

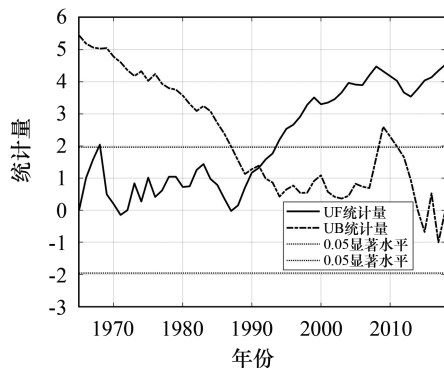


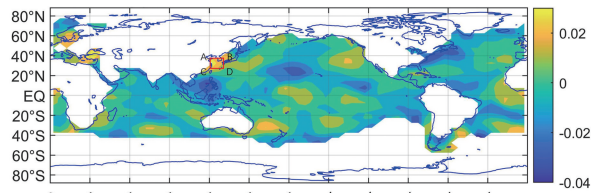
图3 年平均气温的 Mann-Kendall 检验图

2.4 气温变化的特点

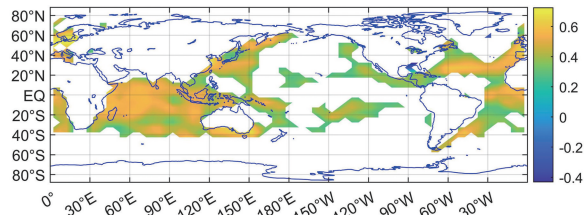
利用 R/S 分析法对图们江流域的年平均气温进行持续性分析(结果用 Hurst 指数表示). Hurst 指数的取值范围为 $[0,1]$,其值大于 0.5 表示该过程存在持续性,小于 0.5 表示该过程存在反持续性^[16].持续性分析结果显示 Hurst 指数为 0.3191,这表明图们江流域 1965—2018 年的年平均气温不具有持续升高的趋势,未来可能会再次出现下降或停滞现象.

2.5 气候变暖停滞的成因分析

对变暖停滞现象,目前学界给出了多种不同的解释,如太阳活动、大气气溶胶微粒(包括自然产生的气溶胶以及人类活动产生的气溶胶)和不同区域海温变化等^[17-18].但秦大河研究认为,地球气候出现变暖停滞现象主要与海洋吸收了多余的热量有关^[19].基于秦大河的研究结果,本文将图们江流域的年平均气温作为因变量,将全球海温作为自变量进行了偏最小二乘回归分析,并以偏最小二乘回归系数和皮尔森相关系数作为指标绘制了影响图们江流域年平均气温的关键海域分布图,如图 4 所示.偏最小二乘回归分析表明,黑海、黄海及东海局部海域的回归系数最高(见图 4(a)),但结合图 4(b)中的相关系数发现,黑海海域未能通过 0.05 显著性检验,由此可确定影响图们江流域年平均气温的关键海域为黄海和东海局部,即在图 4(a)中由点 A(37.5°N,122.5°E)、B(37.5°N,132.5°E)、C(27.5°N,122.5°E)、D(27.5°N,132.5°E)连线所包含的海域.以下本文将通过关键海域海温的年际变化和周期特征对变暖停滞的原因进行分析.



(a) 年平均气温与海温的偏最小二乘回归系数



(b) 年平均气温与海温的相关系数(通过0.05检验)

图4 年平均气温与海表温度的偏最小二乘回归系数和相关系数

2.5.1 海温年际变化对气温变化的影响

研究显示,北半球中高纬度海域的永久性海冰在 20 世纪 90 年代以来大量消融,其产生的冷海水通过洋流系统降低了中低纬海域的海水温度^[20].由关键海域的海温年际变化图(图 5)可知,关键海域的海温从 1997 年开始下降,该时间与图们江流域气候变暖停滞的时间(1998 年)基本吻合.这表明,图们江流域的气候变暖停滞与海温降低存在相关关系.

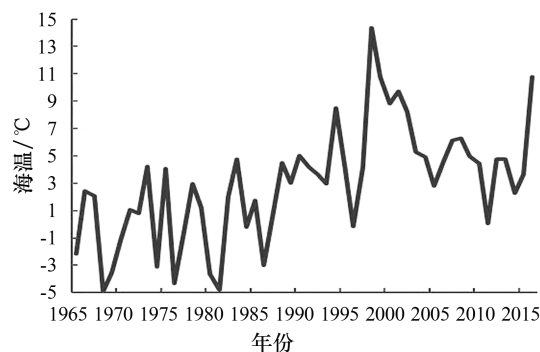


图5 关键海域海温的年际变化图

2.5.2 海温周期对气温变化的影响

研究显示,海温的周期变化会对气温产生影响^[21].由关键海域的海温周期图(图 6)可知,海水温度存在明显的 15~20 a 的振荡周期,即“下降(1965—1983 年)—上升(1984—1998 年)—下降(1998—2012 年)”周期.依据上述周期特征,本文

将整个时间序列分为 3 个时间段对海温和气温的关联性进行了合成分析,结果见表 1. 由表 1 可知,海温处于上升周期时的气温升温率显著高于处于下降周期时的气温升温率,这说明图们江流域的年平均气温与关键海域的海温周期存在显著的正相关关系.

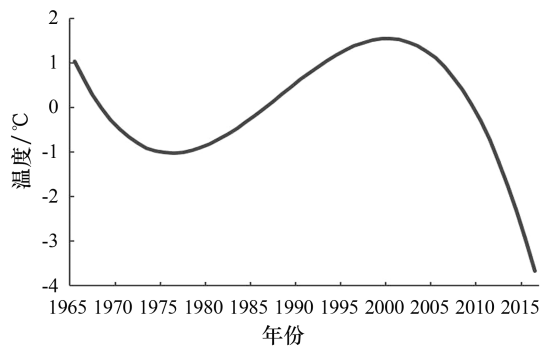


图 6 关键海域的海温周期图

表 1 各年代的海温与气温的对应关系

年代	海温周期	气温升温率/(℃·10a ⁻¹)
1965—1984	下降	0.313
1984—1998	上升	1.068
1998—2012	下降	-0.421

3 结论

本文研究表明,图们江流域 1965—2018 年的年平均气温整体呈上升趋势,但波动性较大,其中气温下降主要发生在 20 世纪 90 年代中期至 2012 年. 图们江流域的年平均气温在未来的 15~20 年可能会再次出现变暖减缓或停滞的现象,但关键海域的海温进入上升周期后,气温可能会出现与 1984—1998 年类似的急剧上升情况. 图们江流域出现变暖停滞与黄海及东海局部海域的海温进入下降周期(受到高纬海冰融化影响)密切相关. 本文研究结果可为图们江流域的物候变化和生态保护研究以及农林业生产等提供参考.

参考文献:

[1] 匡舒雅,周泽宇,梁媚聪,等. IPCC 第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. 环境保护,2022,50(9):71-75.
[2] 金爱芬. 图们江下游地区近 40 年气温和降水的变化[J]. 延边大学农学学报,2004,26(1):37-41.

[3] 金爱芬,裴洪淑,朱卫红. 图们江流域气温的周期和趋势分析[J]. 延边大学农学学报,2006,28(1):4-9.
[4] 金爱芬,黄菲. 图们江流域气温的低频变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2006,36(2):180-186.
[5] 黄义强,赵晶,佟守正,等. 延边地区季节冻土变化及其对气温变化的响应[J]. 延边大学学报(自然科学版),2020,46(4):339-343.
[6] 余凤. 气候变化对图们江干流径流变化影响研究[D]. 延吉:延边大学,2018.
[7] 秦箭煌. 南半球热带外大气对 ENSO 和热带降水的影响[D]. 南京:南京信息工程大学,2017.
[8] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:49-50.
[9] 阿布都克日木·阿巴司,胡素琴,努尔帕提曼·买买提热依木. 新疆喀什气候变化对棉花发育期及产量的影响分析[J]. 中国生态农业学报,2015,23(7):919-930.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:414-417.
[13] 邹明玮. 基于非线性时间序列分析方法的非线性系统特性研究[D]. 扬州:扬州大学,2007.
[14] 李军祥,张扬建,朱军涛,等. 藏北高山嵩草草甸群落特征及生产力对模拟增温幅度的响应[J]. 生态学报,2019,39(2):474-485.
[15] 唐红玉,翟盘茂. 1951—2002 年中国东、西部地区地面气温变化对比[J]. 地球物理学报,2005,48(3):526-534.
[16] 杜军,建军,洪健昌,等. 1961—2010 年西藏季节性冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,2012,34(3):512-521.
[17] XU Y, GAO X J, SHEN Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009,26(4):763-772.
[18] 张庆云,吕俊梅,杨莲梅,等. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系[J]. 大气科学,2007,31(6):1290.
[19] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展,2014,33(7):874.
[20] MAKSYM T. Arctic and Antarctic sea ice change: contrasts, commonalities, and causes[J]. Annual Review of Marine Science, 2019,11:187-213.
[21] 刘璐. 长江中下游流域夏季极端降水预测[D]. 南京:南京师范大学,2019.