



卢玢宇,裴占江,史风梅,等. 黑龙江省近 30 年气候变化特征分析[J]. 黑龙江农业科学,2019(5):19-26.

黑龙江省近 30 年气候变化特征分析

卢玢宇,裴占江,史风梅,高亚冰,徐红涛,左 辛,王 栗,刘 杰

(黑龙江省农业科学院 农村能源与环保研究所,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为揭示黑龙江省 1986-2015 年的气候变化规律,通过线性倾向率和小波分析等方法,研究分析了 1986-2015 年黑龙江省年平均温度和年降水量的时空变化特征。结果表明:黑龙江省 1986-2015 年气温上升率为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$,降水量上升率为 $4.31\text{ mm}\cdot 10\text{ a}^{-1}$;从南向北温度依次递减;以尚志市为中心,降水量向四周逐渐递减;温度主要存在 16 a 的主周期和 6 a、26 a 的变化周期,预测可知 2016-2018 年的年平均气温呈逐年递减趋势;年降水量存在 6、16 和 27 a 三个主周期,拟合可知 2016-2018 年的年降水量呈逐年递减趋势,同时黑龙江省的年气温和降水量变化整体平稳,不存在显著性突变时间点。

关键词:气候变化;气候倾向率;小波分析;黑龙江省

气候变化是当今社会普遍关注的全球性问题,全球气候变化不仅影响人类生存环境,而且也影响世界经济的发展和社会的进步。近 100 年来地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,这种变暖是由自然气候波动和人类活动共同引起的^[1-3]。为此,针对气候变化的研究成为气候学研究的重要问题之一^[4],张兰生等^[5]对中国气候变化在不同区域的特征进行了研究,孙凤华等^[6]对中国东北地区的气温变化进行了研究,侯依玲等^[7]对中国东北地区降水量的变化进行了研究,任国玉等^[8]对中国近 50 年地面气候的变化进行了研究,白美兰等^[9]以内蒙古呼伦湖区域为研究对象,分析了气候变化对其生态环境的影响,气候变化不仅会对生态环境产生不利影响,也会对不同区域的农业产生巨大影响,使其产量波动性大,种植熟制变化较大^[10],因而研究不同区域的气候变化具有重大意义。

黑龙江省位于中国东北最北部地区,东西分布有三江平原和松嫩平原,土地肥沃,物产丰富,全省耕地面积约为 $1\ 900\text{ 万 hm}^2$,是中国最大的商品粮生产基地。但由于黑龙江省四季气候变化差异显著,其农业生态系统受其影响而波动性强^[11-12],因而研究其气候变化特征对农业生产意

义重大。本研究以黑龙江省为研究区域,分析了黑龙江省近 30 年(1986-2015 年)的气候变化特征,揭示了 1986-2015 年黑龙江省的温度和降水主要气象因子的变化趋势及空间差异,以期为黑龙江省的气候变化监测、农事操作和生态建设提供基础数据支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究选取黑龙江省内 31 个气象站的月平均气温和降水资料,时间序列为 1986-2015 年,气象数据来源于黑龙江省气象局地面气候资料。站点选取考虑了时间序列的连续性、完整性、地域的代表性和空间分布情况等因素。

1.2 气候倾向率

气候倾向率反映气候要素的变化趋势,用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量,用 t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归方程:

$$x_i = a + bt_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, a 为常数, b 为回归系数。 $b \times 10$ 即气候要素每 10 a 的气候倾向率,气温和降水量的气候倾向率单位分别为 $^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ 和 $\text{mm} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ ^[1,13]。

1.3 小波分析

小波分析(Wavelet analysis)方法是基于傅立叶变换,在时域和频域方面都能够表征信号的局部特征,并且对信号进行多尺度细化分析,得到所有频率随时间的变化特征和不同频率之间的关系^[14-15]。

本文采用 Morlet 小波(Morlet wavelet)函数

收稿日期:2018-11-26

基金项目:中国清洁发展机制基金(2014101);国家“十三五”重点研发计划课题(2016YFD0501403);哈尔滨市科技局青年后备人才项目(RC2017QN002097);黑龙江省农业科学院院级课题(2017ZC07)。

第一作者简介:卢玢宇(1983-),女,博士,助理研究员,从事气候变化及环境污染研究。E-mail:lubinyu2004@163.com。

通讯作者:刘杰(1974-),男,博士,研究员,从事生态农业和气候变化研究。E-mail:Liujie1677@126.com。

对黑龙江省的气候数据进行分析研究。Morlet小波具有很好的时频局部性,多用于复制信号的分解和时频分析^[16],Morlet小波函数为非正交小波,定义为:

$$\psi_{(t)} = e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \omega \geq 5 \quad (2)$$

式中, $\psi_{(t)}$ 为小波函数; ω_0 为小波中心频率; t 为时间(a)。

小波方差图能够反映时间序列中的周期波动及其强弱随尺度变化的特性,公式如式(3),小波方差图可以表征在一个时间序列中起主要作用的时间尺度,即主周期^[17]。

$$\text{Var}_{(a)} = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3)$$

1.4 Mann-Kendall 检验

MK(Mann-Kendall)是气象学/气候学中经常用来进行突变检验的一种方法,它的优越性在于能够检验线性或非线性趋势^[18-19]。在检验中,零假设(H_0)为时间序列 $\{X_1, X_2, X_3 \cdots X_n\}$,由 X_n 这种独立、随机且分布相同的变量组成。检验统计量 S 可通过公式(4)获得:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (4)$$

其中, X_i 为时间序列中年份 i 所对应的数值; X_j 为时间序列中年份 j 所对应的数值; n 为时间序列数据长度;

统计量 S 为正态分布,均值为零,其中 $i, j \leq n$,且 $i \neq j$ 。则:

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1, & \text{若 } (X_j - X_i) > 0 \\ 0, & \text{若 } (X_j - X_i) = 0 \\ -1, & \text{若 } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

统计量 S 的方差可以通过公式(6)计算获得:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

标准化检验的统计值 Z 可以通过公式(7)计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{若 } S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{若 } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, Z 为时间序列数据的变化趋势,如 $Z > 0$,则时间序列随着时间的推移呈增加趋势,若 $Z < 0$,则时间序列随时间的推移呈减小趋势。如

果 $|Z| \geq Z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$,则为拒绝假设,认为时间序列存在显著趋势性。 $Z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$ 的值可在标准正态分布表中查询,当显著性水平 $\alpha=5\%$ 时,其对应的 $Z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$ 的值为1.96。

1.5 数据分析

气象因子的区域平均值采用算术平均法计算;利用GIS空间插值法对研究区域各因子进行插值分析,探讨其空间分布特征^[20];通过小波分析识别和对比各气象因子的多时间尺度特征,分析不同时间尺度下各气象因子的演变规律和发展趋势^[21];利用Mann-Kendall法对黑龙江省气象因子的变化趋势进行检验;采用Origin 2015软件对相关数据进行统计和分析。

2 结果与分析

2.1 气候变化趋势分析

2.1.1 气温变化特征 1986-2015年黑龙江省的年平均气温为 3.43°C ,变化特征如图1所示,从多年变化趋势看,年平均气温呈缓慢升高的趋势,与全国气温变化趋势相近^[22]。其中年平均气温最高出现在2007年,最低出现在1987年,通过线性倾向分析得出,黑龙江省的平均气温自1986年以来气候倾向率为 $0.12^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,且线性变化趋势较明显。

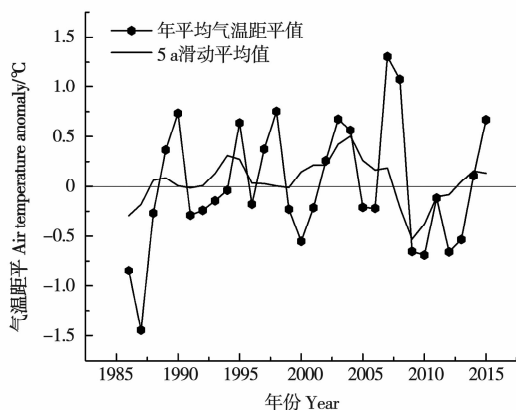


图1 1986-2015年黑龙江省年平均气温距平值逐年变化

Fig.1 Annual variation of air temperature anomalies in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

2.1.2 降水量变化特征 1986-2015年黑龙江省的年平均降水量为 522.08mm ,变化特征如图2所示,其中2001年的降水量最少,1994年的降水量相对较丰富,通过线性倾向分析得出,黑龙江省的年降水量自1986年以来气候倾向率为 $4.31\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$,且线性变化趋势较明显。

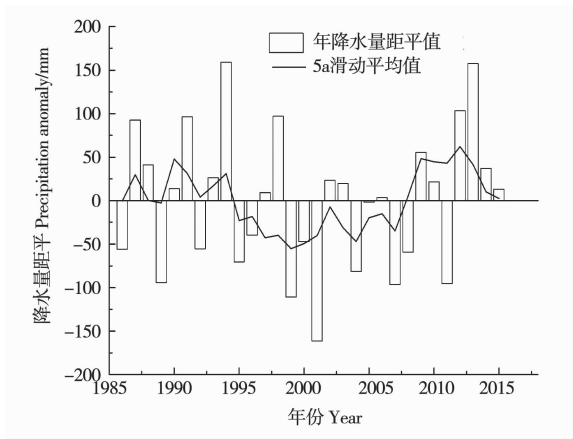


图 2 1986-2015 年黑龙江省年平均降水量距平值逐年变化
Fig. 2 Annual variation of precipitation anomalies in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

2.2 黑龙江省气候变化趋势的空间特征分析

2.2.1 气温变化趋势的空间特征分析 如图 3 所示,1986-2015 年黑龙江省年平均温度空间分布

地理差异显著,规律明显。黑龙江省从南向北温度依次递减,体现出较明显的纬度地带性,不同纬度的年平均温度差别较大。其中处于东南方向的勃利、集贤、宝清、穆棱和宁安以及正北方向的泰来、龙江、肇源、安达、哈尔滨、双城和五常等地的年平均温度高于其他地区;泰来县、哈尔滨市、肇源县等地的年平均温度均在 5℃ 以上。

2.2.2 降水量变化趋势的空间特征分析 如图 4 所示,黑龙江省年降水量空间分布地理差异显著,规律明显。以尚志市为中心,降水量向四周逐渐递减,体现出较明显的经度地带性,不同经度的降水量差别较大。黑龙江省西部地区年降水量比较低,嫩江市、安达县、富裕县、呼玛县、肇源县、泰来县、龙江县等地的降水量均低于 500 mm;中部地区降水量比较高,巴彦县、尚志市、方正县等地降水量均高于 580 mm,其中尚志市的降水量最高为 638.36 mm。

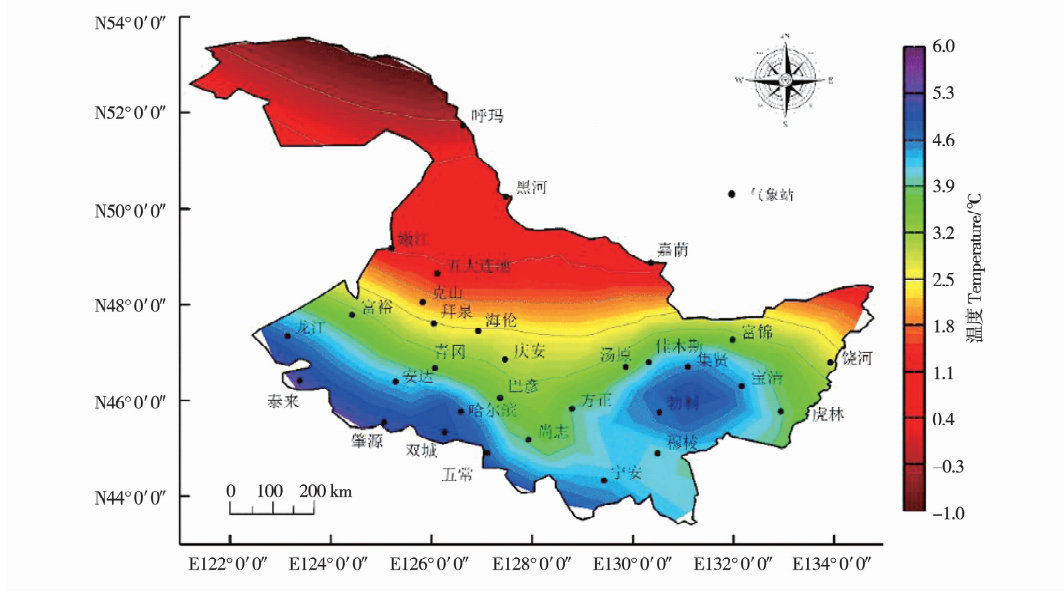


图 3 1986-2015 年黑龙江省年平均温度空间分布特征
Fig. 3 Spatial distribution of annual mean air temperature in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

2.3 黑龙江省气候周期性变化分析

2.3.1 气温的周期性变化分析 图 5 为 1986-2015 年黑龙江省年平均气温的 Morlet 小波变换系数的实部时频变换,正值表示气温偏高,负值表示气温偏低。图中可以看出年平均气温小波系数等值线在 6~8 a 和 15~18 a 时间尺度上较为密集,且发生了正负相位交替出现的现象,较强周期震荡几乎存在于整个研究时域内,周期性表现十分显著,在 25~30 a 尺度周期上表现为负正相位

交替出现的现象,周期性震荡表现得比较明显。
如图 6 所示,小波方差图有 3 个相对明显的峰值,分别对应 6、16 和 26 a 的时间尺度,均有一定的波动能量,而在 6 a 以下时间尺度、7~15 a 以及 16~25 a 的时间尺度上,波动能量都比较微弱,6 和 26 a 时间尺度上存在的周期性变化,仍需要更长时间的验证,因此可知,黑龙江省的年平均气温在中小尺度上的变化有 16 a 的主周期,另外还存在 6 和 26 a 的变化周期。

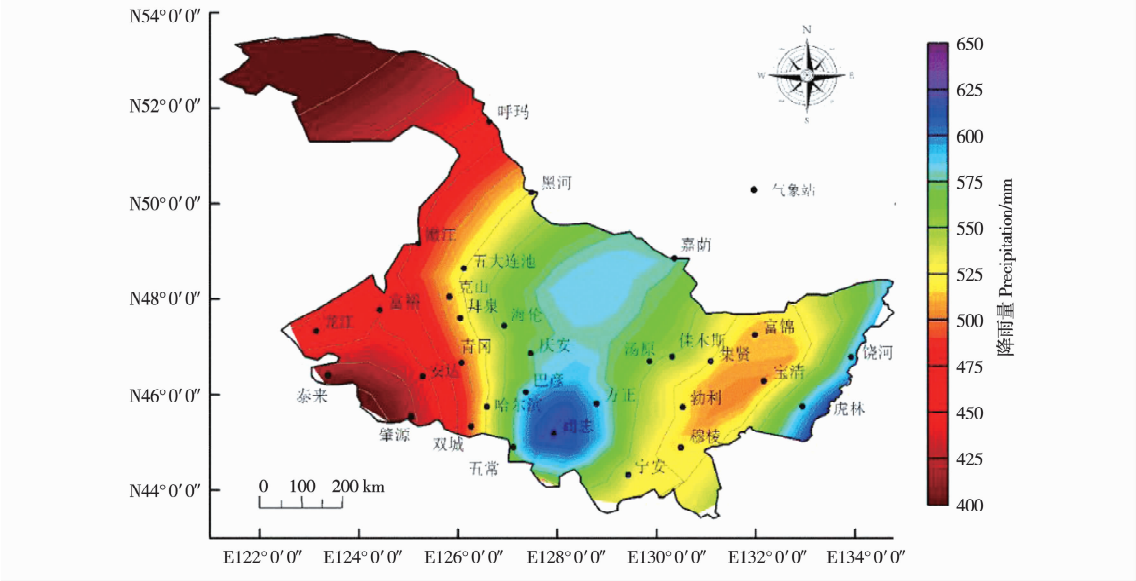


图 4 1986-2015 年黑龙江省年降水量空间分布特征
Fig. 4 Spatial distribution of annual mean precipitation in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

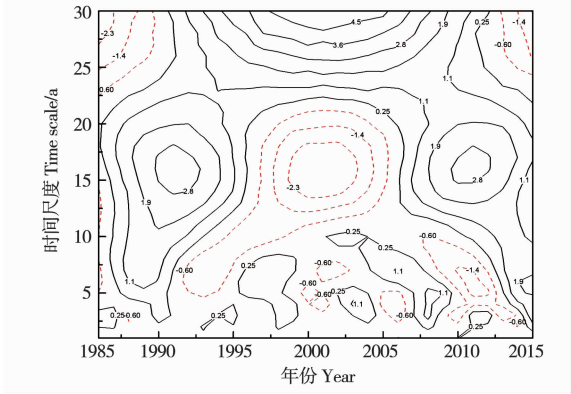


图 5 1986-2015 年黑龙江省平均气温小波系数变化
Fig. 5 Variation of Morlet wavelet coefficients of annual air temperature in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

典型尺度(主周期)的年平均气温过程线可以揭示小波分析的多尺度变化,也能体现其预测趋势。如图 7 所示,黑龙江年平均气温在 6 a 时间尺度上经历了 3 个正负相位的波动,平均变化周期为 9 a;其中 1987-1991 年、1995-1998 年、2005-2008 年和 2013-2015 年小波系数处于正相位,表明这些年份黑龙江省年平均气温相对偏高,而小波系数处于负相位的年份,表明黑龙江省年平均气温相对偏低,在 6 a 时间尺度上,1986-2015 年存在的回归关系见方程(8):

$$y = 0.10 + 0.81 \times \sin(\pi \times \frac{x + 61.81}{3.10}) \quad (R^2 = 0.301) \quad (8)$$

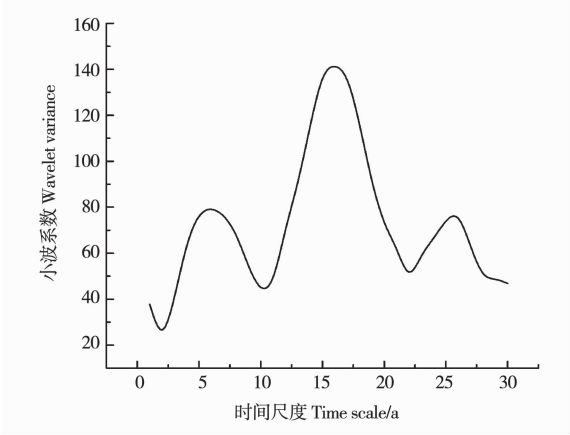


图 6 1986-2015 年黑龙江省年平均温度小波方差
Fig. 6 Morlet wavelet variance of annual mean air temperature in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

在 16 a 时间尺度上,黑龙江省年平均气温的平均变化周期为 20 a,其中 1987-1996 年、2006-2015 年小波系数处于正相位,表明这些年份黑龙江省年平均气温相对偏高,在 16 a 时间尺度上,1986-2015 年存在的回归关系见方程(9):

$$y = 0.21 + 3.13 \times \sin(\pi \times \frac{x - 689.22}{9.83}) \quad (R^2 = 0.999) \quad (9)$$

在 26 a 时间尺度上,1991-2012 年小波系数处于正相位,表明这些年份黑龙江省年平均气温相对偏高,在 26 a 时间尺度上,1986-2015 年存在的回归关系见方程(10):

$$y = -0.44 + 3.46 \times \sin(\pi \times \frac{x + 1096.35}{23.38}) \quad (R^2 = 0.996) \quad (10)$$

3 个周期 6 a、16 a、26 a 叠加的总过程线,代表着 1986-2015 年黑龙江省年平均气温在总时间尺度的变化情况,依次经历了 1986-1987 年 2 年的负相位,1988-1999 年 12 年的正相位,2000-2002 年 3 年的负相位,以及 2004-2015 年 13 a 的正相位。由此可知,1986-2015 年,黑龙江省的年平均气温的波动主要受到 6、16 和 26 a 这 3 个周期时间尺度的影响,其拟合公式(11)所示,叠加后的年平均温度主要受时间尺度 16 a 的影响。

$$y = 1.71 + 2.03 \times \sin(\pi \times \frac{x + 164.77}{8.16}) \quad (R^2 = 0.640) \quad (11)$$

通过公式(11)可以预测未来几年黑龙江省年平均温度变化情况。通过计算可知 2016-2018 年的年平均气温呈现逐年递减趋势,其中 2016 年高于年平均值,2017-2018 年均低于年平均值。

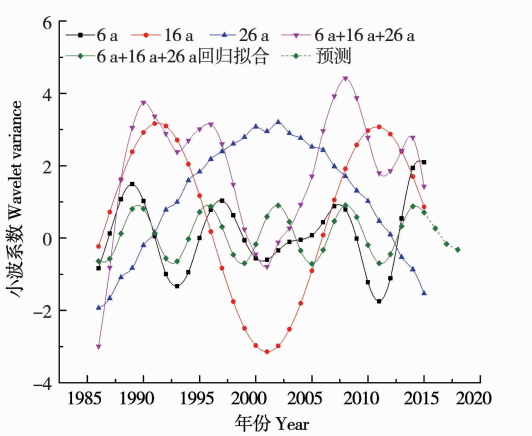


图 7 黑龙江省年平均气温主周期尺度小波系数变化
Fig. 7 Variation morlet wavelet coefficients on major cycle scale of annual mean air temperature in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

2.3.2 降水量的周期性变化分析 通过对近 30 a 来黑龙江省年降水量的统计分析,发现年降水量具有较为明显的多时间尺度特征,如图 8 所示。其中在 5~7、15~17 a 尺度周期表现出正负相位交替出现的现象,较强周期振荡几乎存在于整个研究时域内,周期性表现十分显著;在 25~30 a 尺度周期上表现出负正相位交替出现的现象,周期性振荡表现得比较明显。

如图 9 所示,小波方差图有 3 个相对明显的峰值,分别对应 6、16 和 27 a 的时间尺度,均有一定的波动能量,而在 6 a 以下时间尺度、7~15 a 以及 16~26 a 的时间尺度上,波动能量都比较微弱,因此可知,黑龙江省的年降水量在中小尺度上的变化有 6、16 和 27 a 三个主周期。

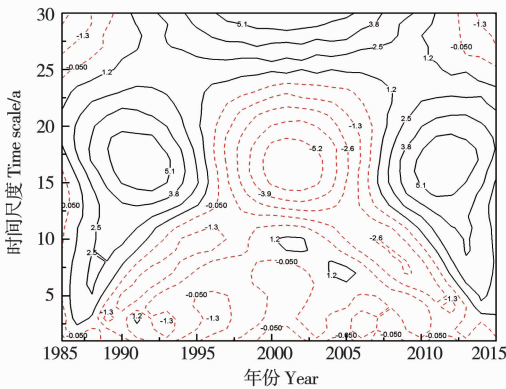


图 8 1986-2015 年黑龙江省年降水量小波系数变化
Fig. 8 Variation of morlet wavelet coefficients of annual mean precipitation in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

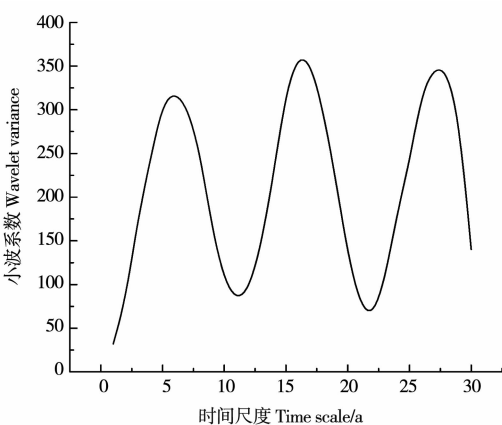


图 9 1986-2015 年黑龙江省年降水量小波方差
Fig. 9 Morlet wavelet variance of annual mean precipitation in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

如图 10 所示,黑龙江省年平均气温在 6 a 时间尺度上经历了 3 个正负相位的波动,平均变化周期为 9 a;其中 1986-1989 年、1994-1998 年、2003-2007 年和 2012-2015 年小波系数处于正相位,表明这些年份年降水量相对偏多,而小波系数处于负相位的年份,表明年降水量相对偏少,在 6 a 时间尺度上,1986-2015 年存在的回归关系见方程(12):

$$y = 0.12 + 1.68 \times \sin(\pi \times \frac{x - 240.87}{4.41}) \quad (R^2 = 0.755) \quad (12)$$

在 16 a 时间尺度上,黑龙江省年降水量的平均变化周期为 21 a,其中 1987-1996 年、2007-2015 年小波系数处于正相位,表明这些年份年降水量相对偏多,在 16 a 时间尺度上,1986-2015 年存在的回归关系见方程(13):

$$y = -0.054 + 6.32 \times \sin(\pi \times \frac{x - 648.52}{10.13}) \quad (R^2 = 0.999) \quad (13)$$

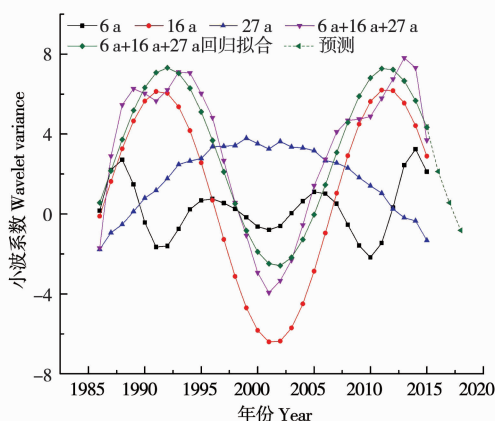


图 10 黑龙江省年平均气温主周期尺度小波系数变化

Fig. 10 Variation morlet wavelet coefficients on major cycle scale of annual mean precipitation in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

在 27 a 时间尺度上,1989-2012 年小波系数处于正相位,表明这些年份年降水量相对偏多,在 27 a 时间尺度上,1986-2015 年存在的回归关系见方程(14):

$$y = -31.06 + 34.67 \times \sin(\pi \times \frac{x + 8946.82}{82.62}) \quad (R^2 = 0.989) \quad (14)$$

3 个主周期 6、16、27 a 叠加的总过程线,代表着 1986-2015 年黑龙江省年降水量在总时间尺度的变化情况,依次经历了 1986 年 1 a 的负相位,1987-1998 年 12 a 的正相位,以及 2005-2015 年 11 a 的正相位。由此可知,1986-2015 年,黑龙江省年降水量的波动主要受到 6、16 和 27 a 这 3 个主周期时间尺度的影响,其拟合公式(15)所示:

$$y = 2.35 + 4.96 \times \sin(\pi \times \frac{x - 705.01}{9.71}) \quad (R^2 = 0.888) \quad (15)$$

叠加后的年降水量主要受时间尺度 6、16 和 27 a 的影响。通过公式(15)可以预测未来几年黑龙江省年降水量变化情况,计算可知 2016-2018 年的年降水量呈现逐年递减趋势,其中 2016-2017 年高于年平均值,2018 年均低于年平均值。

2.4 黑龙江省气候突变特征分析

2.4.1 气温突变特征分析 利用 Mann-Kendall 突变法对黑龙江地区 1986-2015 年的平均气温进行突变检验分析,如图 11 所示,UF 曲线呈标准正态分布,显著性水平为 0.05,从 1988 年之后到 2015 年,UF 数值都大于 0,这说明从 20 世纪 90 年代开始,平均气温逐渐升高,气温序列呈明显的上升趋势。UF 曲线在 1995、1997-1999 和 2008 年超过置信水平线,说明这几年来气温突变趋势显著。UF 曲线在置信区间内与 UB 曲线有 2 个交点,即突变点出现在 1987-1988、2008-2009 和 2014-2015 年,但根据交叉点以及 UF 和 UB 线的绝对值情况来看,并没有明显突破 ± 0.05 的置信水平线,因此可以大体判定黑龙江省的气温变化整体比较平稳,没有特别明显的突变年份。

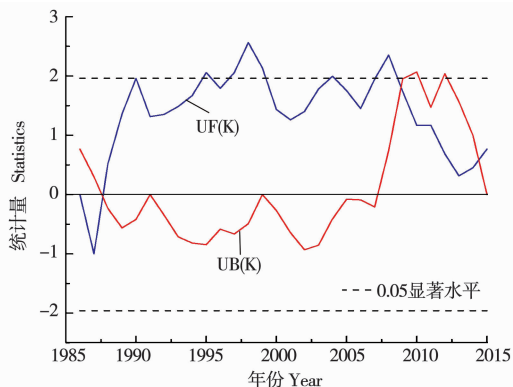


图 11 1986-2015 年黑龙江省平均气温突变性检验曲线

Fig. 11 Mann-Kendall curves of annual mean air temperature in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

2.4.2 降水量突变特征分析 1986-2015 年黑龙江省年平均降水量的 M-K 突变检验分析如图 12,UF 曲线呈标准正态分布,显著性水平为 0.05,1986-1999 年,除去 1989 和 1990 年 UF 曲线基本在 0 值以下,其余均大于 0 值,说明此时年降水量逐渐升高,降水量序列呈明显上升趋势。1999 年以后,UF 曲线基本在 0 值以下,此时期降水量呈现出下降趋势,UF 与 UB 曲线有多个交叉点,但均在置信水平范围内,说明该区域年平均降水量在 1986-2015 年不存在显著性突变时间点。

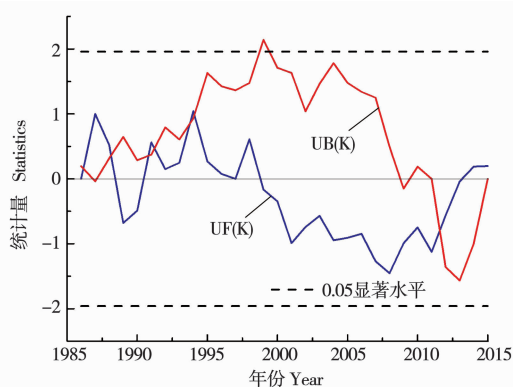


图 12 1986-2015 年黑龙江省年降水量突变性检验曲线
Fig. 12 Mann-Kendall curves of annual mean precipitation in Heilongjiang Province from 1986 to 2015

3 讨论

1986-2015 年黑龙江省的年平均气温呈上升趋势,这与王秀芬等^[1]和高永刚^[2]等的研究结果是一致的。近 30 年黑龙江省降水量的气候倾向率为 $4.31 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,且线性变化趋势较明显,这与王秀芬等^[1]认为“1980-2010 年黑龙江省降水量的气候倾向率为 $-23 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ”的研究结果稍有差异,究其原因可能是由于 2011-2015 年的年降水量普遍偏高,尤其是 2012 和 2013 年累积降水量达到 625.26 和 679.49 mm,使得近几年降水量有上升的趋势。

从空间分布来看,泰来县近 30 年来的年平均温度高于其他地区,为 $5.21 \text{ }^{\circ}\text{C}$,热量条件充足,但由于该地区处于干旱半干旱地区,沙地面积大,而且平均降水量处于较低水平,土地退化严重,生态环境脆弱,严重限制了该区农业生产的发展^[23]。尚志市虽然年平均温度处于中等水平,但年平均降水量却最高,根据李庆等^[24]对尚志市农业进行的可持续性评价可知,尚志市作物生长季降水量占全年降水量的 87%,雨热同季,水热协同作用较好,利于作物生长,促进了该区农业的发展,这与卢玢宇等^[21]的研究结果是一致的。

对黑龙江省年平均气温进行时间尺度分析,发现黑龙江省年平均气温在 6 和 26 a 时间尺度上存在的周期性变化,如果选择的时间尺度再大一些,则 6 和 26 a 时间尺度上周期性变化就能得到更好的体现。本文对黑龙江省年平均气温进行了周期变化和趋势变化的分析和预测,这对于干旱和半干旱地区气候变化特征的研究具有一定的

参考意义。由于现有数据的时间尺度稍小,一定程度上限制了小波分析功能和优势的发挥。

4 结论

1986-2015 年黑龙江省的年平均气温呈上升趋势,近 30 年来黑龙江省平均气温的气候倾向率为 $0.12 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,且线性变化趋势较明显。降水量自 1986 年以来气候倾向率为 $4.31 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,且线性变化趋势较明显。

黑龙江省从南向北温度依次递减,体现出较明显的纬度地带性,不同纬度的年平均温度差别较大;年降水量空间分布地理差异显著,规律明显。以尚志市为中心,降水量向四周逐渐递减,体现出较明显的经度地带性,不同经度的降水量差别较大。

通过对近 30 a 黑龙江省年平均气温和年平均降水量进行分析,发现年平均气温在中小尺度上的变化存在 16 a 的主周期,另外还存在 6 和 26 a 的变化周期。通过拟合预测 2016-2018 年的年平均气温呈现逐年递减趋势,其中 2016 年高于年平均值,2017-2018 年均低于年平均值。黑龙江省的年降水量在中小尺度上的变化有 6、16 和 27 a 三个主周期。通过拟合可知 2016-2018 年的年降水量呈现逐年递减趋势,其中 2016-2017 年高于年平均值,2018 年低于年平均值。

通过 M-K 突变检验分析发现,黑龙江省的气温变化整体比较平稳,没有特别明显的突变年份,年平均降水量在 1986-2015 年不存在显著性突变时间点。

参考文献:

- [1] 王秀芬,杨艳昭,尤飞. 近 30 年来黑龙江省气候变化特征分析[J]. 中国农业气象,2011,32(1):28-32.
- [2] 高永刚,那济海,顾红,等. 黑龙江省气候变化特征分析[J]. 东北林业大学学报,2007,35(5):47-50.
- [3] 杨春艳,沈渭寿,林乃峰. 西藏高原气候变化及其差异性[J]. 干旱区地理,2014,37(2):290-298.
- [4] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in stream flow and water availability in a changing climate[J]. Nature,2005,438: 347-350.
- [5] 张兰生,方修琦. 我国气温变化的区域分异规律[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),1988(3):78-85.
- [6] 孙凤华,杨修群,路爽,等. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析[J]. 气象科学,2006,26(2):157-163.

- [7] 侯依玲,李栋梁,施雅风,等. 50a 来中国东北及邻近地区年降水量的年代际异常变化[J]. 冰川冻土,2005,27(6): 839-845.
- [8] 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):943-956.
- [9] 白美兰,郝润全,沈建国. 近 46 a 气候变化对呼伦湖区域生态环境的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(1):103-107.
- [10] 赵慧颖. 呼伦贝尔沙地 45 年来气候变化及其对生态环境的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(11):1817-1821.
- [11] 李天霄,付强,孟凡香,等. 黑龙江省降水变化趋势及其对农业生产的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(5): 103-108.
- [12] 袁彬. 气候变化下东北春玉米气候生产潜力及农业气候资源利用率[D]. 北京:中国气象科学研究院,2012.
- [13] 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.
- [14] Ramírez I J, Grady S C. El Niño, climate, and cholera associations in Piura, Peru, 1991-2001: A wavelet analysis[J]. Ecohealth, 2016, 13(1):83-99.
- [15] Yang L, Cai X J, Zhang H, et al. Interdependence of foreign exchange markets: A wavelet coherence analysis[J]. Economic Modelling, 2016, 55:6-14.
- [16] Huang P, Zhang J, Tang Y, et al. Spatial and temporal distribution of PM 2.5 pollution in Xi'an City, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(6):6608-6625.
- [17] 李春强,杜毅光,李保国. 1965-2005 年河北省降水量变化的小波分析[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1340-1344.
- [18] Hisdal H, Stahl K. Have stream flow droughts in Europe become more severe or frequent[J]. International Journal of Climatology, 2001(21):317-333.
- [19] Wu H, Soh L K, Samal A, Chen XH. Trend analysis of stream flow drought events in Nebraska[J]. Water Resources Management, 2008, 22:145-164.
- [20] 张艺萌,张雪松,郭婷婷,等. 辽西北地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象,2015,36(2): 203-211.
- [21] 卢玢宇,杨波,裴占江,等. 黑龙江省气候生产潜力时空演变特征研究[J]. 生态环境学报,2017,26(10): 1659-1664.
- [22] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究[J]. 气象学报,1994,52(3): 261-273.
- [23] 张雪萍,郭艳清,高梅香,等. 黑龙江省西部沙地生态经济系统能值分析——以泰来县为例[J]. 经济地理,2005, 25(5):651-654.
- [24] 李庆,尚杰,于法稳. 黑龙江省尚志市农业可持续性评价[J]. 绿色经济,2008(4):91-94.

Analysis on Characteristics of Climate Change in Heilongjiang Province in Recent 30 Years

LU Bin-yu, PEI Zhan-jiang, SHI Feng-mei, GAO Ya-bing, XU Hong-tao, ZUO Xin, WANG Su, LIU Jie

(Institute of Rural Energy Environmental Protection, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: The spatial and temporal variations of annual mean air temperature and precipitation in Heilongjiang Province during the past 1986-2015 years was analyzed. The climate change characteristics of Heilongjiang Province from 1986 to 2015 were revealed by using the linear tendency rate and wavelet analysis methods. The results showed that, in the past 1986-2015 years in Heilongjiang Province, the annual mean temperature increased at the trend rate of $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot10\text{ a}^{-1}$, and the annual precipitation increased at the rate of $4.31\text{ mm}\cdot10\text{ a}^{-1}$. The temperature in Heilongjiang decreases in sequence from the south to north, showing the obvious latitudinal zonality. The precipitation shows distinct characteristics of longitude, which is centered on Shangzhi City, and gradually diminished outward. The annual mean air temperature in Heilongjiang Province from 1986 to 2015 had characteristics of significant multi-time scale, and the main cycle scales were 16 years with the change periods of 6 a and 26 a. The annual precipitation time series has three main periods: 6 a, 16 a and 27 a. Furthermore, it is predicted that annual mean air temperature and precipitation from 2016 to 2018 will be declining year by year. The annual variation of air temperature and precipitation in Heilongjiang Province are overall stable, and there is no significant mutation time point.

Keywords: climate change; climate tend rate; wavelet analysis; Heilongjiang Province