



田宝星,吴双,杨帆,等.黑龙江省夏季低温指数变化特征分析[J].黑龙江农业科学,2019(4):6-10.

黑龙江省夏季低温指数变化特征分析

田宝星^{1,2,3},吴双^{1,2,3},杨帆⁴,陈晶⁵,赵放⁶,宫丽娟^{1,2,3}

(1. 黑龙江省气象科学研究所,黑龙江 哈尔滨 150030;2. 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室,黑龙江 哈尔滨 150030;3. 黑龙江省气象院士工作站,黑龙江 哈尔滨 150030;4. 黑龙江省气象局机关服务中心,黑龙江 哈尔滨 150030;5. 巴彦县气象局,黑龙江 哈尔滨 151800;6. 宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021)

摘要:为了解近44年来黑龙江省夏季低温指数的分布规律和变化趋势。利用1971-2014年黑龙江省80个气象台站夏季日最低气温和平均气温观测资料,结合低温指数模型,通过趋势变化、小波分析和Mann-Kendall检测等方法,分析黑龙江省夏季低温指数的变化特征。结果表明:黑龙江省夏季平均低温指数呈减少趋势,夏季低温指数在20世纪80、90年代和21世纪初变化不明显,而2010s以来明显减少,夏季平均低温指数较春季小。气温从1980s升温以来,低温指数明显减少,夏季低温指数自1970s中期以来明显减少,低温指数序列突变开始于1983年前后,夏季低温指数变化与气温呈负相关。夏季低温指数存在18~32 a,6~14 a和4~8 a三个尺度的周期变化,其中18~32 a尺度非常稳定且具全域性,在1980s中期以前6~14 a尺度较为稳定,在1980s中期以后4~8 a尺度较为稳定,7~12 a尺度年周期变化最明显但有局域性(1980s中期以前),24~31 a尺度能量虽弱且具有全域性。夏季低温指数有26、8、和5 a的主周期,其中第一主周期为8 a,平均周期为5.5 a;第二主周期为26 a,平均周期为14.5 a。

关键词:黑龙江省;夏季;小波分析;低温;突变检验

IPCC第四次评估报告^[1]指出20世纪90年代是过去一百年中最暖的时期,全球增暖区域在中国东北地区响应尤为显著^[2],气候变化对黑龙江省的影响不容忽视^[3]。黑龙江省是我国大豆的主产区,据国家统计局统计,黑龙江省大豆种植面积约占全国的1/3^[4]以上,黑龙江省大豆生产对我国大豆生产及相关经济具有重要的影响,如果夏季出现持续的低温,将造成障碍性和延迟性冷害并发,进而影响产量^[5]。21世纪以来,受气候变化影响,黑龙江省夏季低温事件频繁发生,夏季(介于春季和秋季之间,广义上在每年的6-8月^[6])是作物生长的主要时期,夏季气候具有典型的年际尺度特征,为气温和降水在时间和空间尺度上的异常而导致的极端气候事件或气象灾害

等^[7-8],夏季低温事件影响作物快速生长,生育延迟,并导致不能正常成熟。夏季低温冷害是东北地区主要的气象灾害,同时夏季气温对作物产量的影响至关重要^[9]。因此,研究黑龙江省夏季低温指数的变化特征和规律,对于充分利用气候资源,合理农业生产布局具有重大的意义。

小波分析方法中平移和伸缩功能分析信号或函数序列不同尺度变化,是研究气象要素周期分析的重要手段^[10]。Mann-Kendall(M-K)检验法不受各别奇异值的影响,也不需样本遵从一定的分布,如气象、水文等领域使用广泛^[11]。应用在天气分析、气候变化、气象灾害的研究上,如热量资源^[12-13]、降水^[14-15]、洪涝^[16]、霜雪^[17]和旱涝灾害^[18]等的多尺度变化特征,研究了冬小麦不同生育阶段SPI(标准化降水指数)的Mann-Kendall趋势分析^[19]和中国1982-2006年平均的NDVI突变和变化趋势^[20]。

本文运用小波分析、趋势性分析和Mann-Kendall(简称M-K)非参数检验等方法,以逐日最低温度为基础,结合低温指数模型,对黑龙江省1971-2014年的夏季低温指数时间序列变化特征进行分析,揭示了夏季低温指数的周期特征、变化趋势及显著的升降趋势,从而为选取适熟品种,优

收稿日期:2018-10-25

基金项目:国家自然科学基金(41665007,31801253);中国气象局气候变化专项(CCSF201606);中国气象局核心业务发展专项(CMAHX20160205);中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金(stqx201705, stqx201706);黑龙江省气象局科学技术研究(HQJJ2015018, HQ2016015)。
第一作者简介:田宝星(1986-),男,硕士,工程师,从事气象服务、应用气象和农业气象研究。E-mail: bx_tian@163.com。
通讯作者:宫丽娟(1982-),女,硕士,高级工程师,从事气候变化对农业生态影响及评价。E-mail: footprint05@126.com。

化耕作制度,及时预防低温冷害的措施,确保农业生产高效平稳发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黑龙江省是中国位置最北、纬度最高的省份,处于中国的东北部, $N43^{\circ}26' \sim 53^{\circ}34'$, $E121^{\circ}13' \sim 135^{\circ}06'$,属大陆性季风气候,主要的气候特点是春季干旱低温,夏季炎热多雨,秋季霜早易涝,冬季寒冷漫长,无霜期短,地理差异明显。夏季受东南季风的影响,降水量充足,冬季受干冷西北风的控制,少雨干燥^[21]。夏季温度高,降水多,日照长,有利于农作物生长。全省耕地面积居全国第一位,平原占全省总面积的 37.0%,同时该区域土地肥沃,有机质含量高,是世界上有名的三大黑土带之一^[22]。

1.2 材料

应用的 1971-2014 年气象数据逐日最低气温资料来自黑龙江省气象信息中心。缺测资料连续不超过 5 d 采用线性内插法插补,超过 5 d 采用线性回归法插补。小波分析采用 Morlet 函数变换。运用 Matlab 软件编程计算小波系数,采用 Surfer 和 Office 软件制作小波系数实部等值线图、小波系数模方等值线图和小波方差图。

1.3 方法

1.3.1 低温指数 低温指数^[23]定义为一年中(或某一时段)至少 5 d 最低温度低于多年日最低温度平均值 5°C 的总日数。假定 T_{ij} 为第 j 年第 i 天的日最低温度, $T_{i,\text{平均}}$ 为第 i 天 1971-2014 年日最低温度平均值。则低温指数为某段时间至少 5 d 的 $T_{ij} < T_{i,\text{平均}} - 5^{\circ}\text{C}$ 的总日数。

1.3.2 趋势性分析 利用直线回归的方法对原时间序列拟合线性方程,消除其他成分变动,揭示出数列长期直线趋势,可用 $y_i = at_i + b$ 表示,其中 a 为回归系数表示气候倾向率, b 为回归常数, a 的正负值代表变化方向^[24-25]。

1.3.3 小波分析 小波分析是时域和频域不断变化的一种新兴技术,小波分析优点在于有良好的局部化性质,借助时频局部化功能剖析时间序列内部精细结构,已广泛应用到气象要素中时间序列的周期性分析中。小波方差图反映了能量波动随时间尺度变化的情况,确定时间序列中的主要周期成分^[26-27]。

1.3.4 Mann-Kendall 方法 采用 Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法分析变化趋势和幅度,可推断时间序列变量是否存在升降变化。M-K 检验优点在于计算简单,明确突变开始的时间和突变区域,是一种常用的气候突变检验方法,被世界气象组织推荐应用于气象要素随时间变化的突变分析^[28-29]。

2 结果与分析

2.1 夏季低温指数序列的变化趋势分析和突变检验

2.1.1 趋势分析 黑龙江省近 44 a 夏季平均低温指数(图 1)呈现减少趋势,气候倾向率为 $0.85 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$,平均值为 2.04 d,较春季低温指数明显减少^[30],最大值为 10.35 d,出现在 1972 年,最小值不到 0.50 d,出现在 1998 年和 2010 年,最小值和最大值差值明显,年际变化较大。夏季低温指数年代际变化表现明显,夏季低温指数从 20 世纪 70 年代的 4.56 d 减少到 80 年代的 1.46 d,20 世纪 80、90 年代和 21 世纪初夏季低温指数平均值为 1.00 d 左右,夏季低温指数自 21 世纪 10 年代来明显减少。

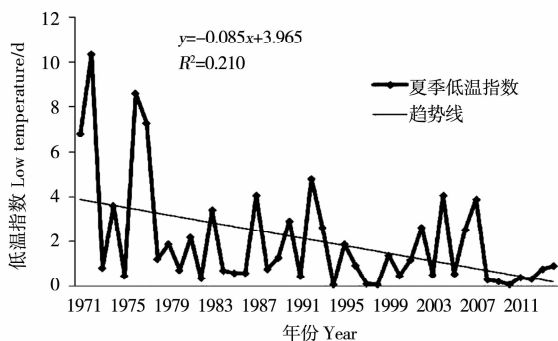


图 1 黑龙江省 1971-2014 年夏季平均低温指数变化趋势

Fig. 1 The trend of mean lowest temperature index in summer of Heilongjiang Province from 1971 to 2014

2.1.2 突变检验 由图 2 中的 UF 曲线可见,自 1970s 中期以来,黑龙江省夏季低温指数有一明显的减少趋势。这种减少趋势在 1990s 后超过了 0.05 显著水平线,甚至超过 0.001 显著水平线,可见黑龙江省夏季低温指数的减少趋势是十分显著的。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定黑龙江省夏季低温指数 1970s 中期的减少是一突变现象,具体是从 1983 年开始的。

黑龙江省夏季低温指数的减少趋势及发生突

变的时间与黑龙江省年平均气温变化基本吻合^[22],1980s后气温明显增加,夏季低温指数明显减少。可见黑龙江省气温的变化与低温指数负相关。

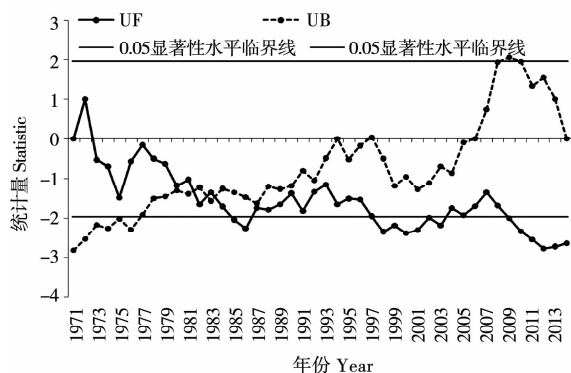


图2 黑龙江省夏季低温指数的MK突变检测

Fig. 2 Mann-Kendall statistic curves of mean lowest temperature index in summer of Heilongjiang Province

2.2 夏季低温指数序列变化的小波分析

2.2.1 夏季低温指数的多时间尺度分析 黑龙江省夏季低温指数序列的 Morlet 系数实部等值线图(图3),显示出夏季低温指数在不同时间尺度上的周期性振荡特征。

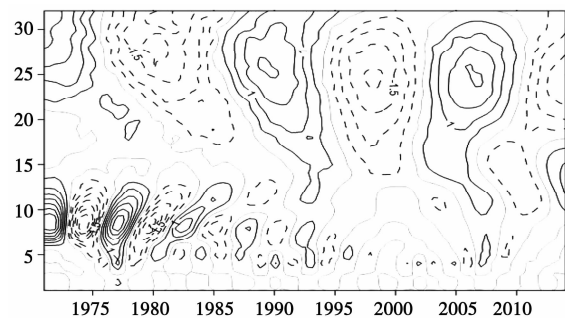


图3 黑龙江省夏季低温指数小波系数实部图

Fig. 3 Real part of wavelet coefficient of lowest temperature index in summer of Heilongjiang Province

由图3可见,实线表示小波系数实部 ≥ 0 ;虚线表示小波系数实部 < 0 ,反映夏季低温指数小波系数实部及其多时间尺度变化特征。夏季低温指数变化存在18~32 a,6~14 a和4~8 a的周期变化。其中,18~32 a尺度出现高-低交替的准3次震荡,这个尺度周期变化在整个分析时段非常稳定且具有全域性;6~14 a尺度存在高-低交替的准4次震荡,这个尺度的周期变化在1980s中期以前表现较为稳定;而4~8 a尺度在1980s中期以后表现较为稳定。

Morlet 函数变换后得出模方图(图4),时间尺度信号的强弱可用模方值的高低表示。7~12 a时间尺度模值最大,说明该尺度能量最强、周期变化最显著,但它的周期变化具有局域性(1980s中期以前);24~31 a尺度模值次之,但周期变化贯穿整个时域;4~6 a时间尺度在1980s中期以后出现过两次。

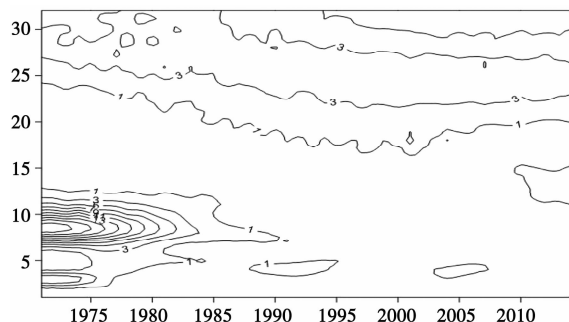


图4 黑龙江省夏季低温指数小波系数模方图

Fig. 4 Modulus square of wavelet coefficient of lowest temperature index in summer of Heilongjiang Province

2.2.2 夏季低温指数的主要周期分析 由图5可见,小波方差图中夏季低温指数有3个峰值,依次为26、8和5 a的时间尺度。8、26和5 a时间尺度分别对应着第一、第二和第三主周期,其中8 a时间尺度的周期震荡最强,为第一主周期。可见以上3个尺度的周期变化掌控夏季低温指数在全部时间序列的变化情况。

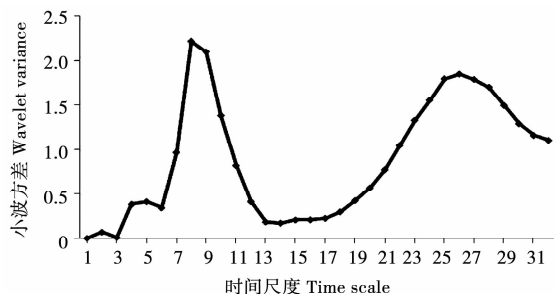


图5 黑龙江省夏季低温指数小波方差图

Fig. 5 Wavelet variance of lowest temperature index in summer of Heilongjiang Province

根据小波方差结果,制作夏季低温指数变化的主周期小波系数图,主周期图可见夏季低温指数周期变化和高-低变化。如图6A所示,在8 a时间尺度上,大约经历了8个周期的高-低变化,夏季低温指数平均周期为5.5 a;如图6B所示,在26 a时间尺度上,大约3个周期的高-低变化,夏季低温指数平均变化周期为14.5 a。

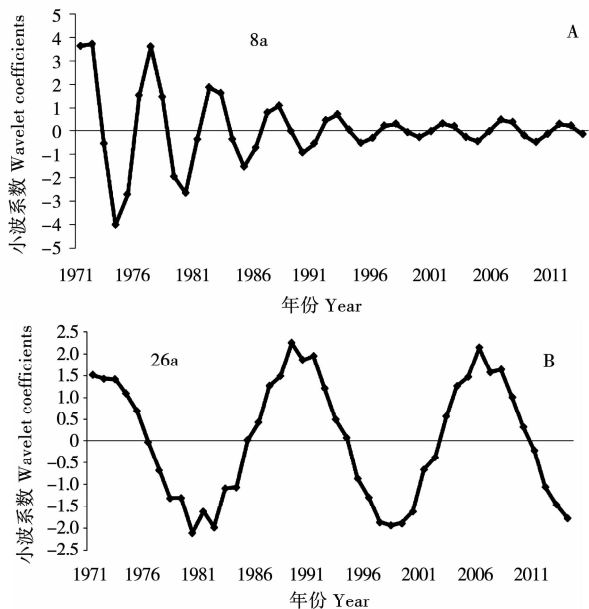


图6 黑龙江省夏季低温指数的8和26a时间尺度小波实部过程线

Fig. 6 Wavelet real part of 8 and 26a characteristic time scale of lowest temperature index in summer of Heilongjiang province

3 结论与讨论

黑龙江省夏季平均低温指数呈现减少趋势,夏季低温指数在20世纪80、90年代和21世纪初变化不明显,而2010s年代以来明显减少,夏季平均低温指数较春季小。夏季低温指数自1970s中期以来有一明显的减少趋势,气温从1980s升温以来,低温指数明显减少,低温指数序列突变开始于1983年前后,夏季低温指数变化与气温呈负相关。

黑龙江省夏季低温指数存在18~32 a, 6~14 a和4~8 a周期变化,18~32 a时间尺度非常稳定且有全域性,在1980s中期以前6~14 a尺度较为稳定,在1980s中期以后4~8 a尺度较为稳定,7~12 a尺度模值最大能量最强周期变化最显著但有局域性(1980s中期以前),24~31 a尺度模值次之且具有全域性。夏季低温指数序列有26、8及5 a的主周期,8和26 a尺度周期振荡较强,分别为第一、二主周期,平均周期分别为5.5和14.5 a。

低温指数考虑了作物不同生育阶段对温度耐受力的不同和低温持续时间对生长发育的影响,较好地反映极端低温事件对作物的综合影响^[31],且与作物产量的波动密切相关^[32]。近年低温指数虽有所下降,但作物遭受低温冷害的频率时有

发生,影响作物产量,这可能与栽种晚熟品种有关。但确切的研究表明,东北地区粮食产量与低温指数呈负相关^[32]。因此,在全球变暖背景下,规划作物品种布局时应考虑低温指数可能造成的负面影响,为黑龙江省低温冷害监测和评估提供科学依据。

根据小波分析的时频特性分析不同尺度时间序列的低温指数变化特征,揭示潜在周期振荡,及多时间尺度下低温指数的波动变化。Mann-Kendall法不仅监测到低温指数序列统计显著的趋势变化以及突变特性,同时明确指出突变的时刻。虽然两种方法都存在一定的不足,但两种方法都各有优势,最终两种方法的研究结果相互验证,互为补充,得出比较精准的结果。

参考文献:

- [1] PCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis, Contribution of Working Group. I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. London: Cambridge University Press, 2007: 5.
- [2] 胡春丽, 李辑, 焦敏, 等. 东北地区水稻障碍型低温冷害变化对区域气候变暖的响应[J]. 气象科技, 2015, 43(4): 744-749.
- [3] 李帅, 陈莉, 王瞭瞭, 等. 黑龙江省延迟型低温冷害气候指标研究[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(4): 79-83.
- [4] 张志国, 高峰, 高永刚, 等. 播期对大豆生长状况及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 22-26.
- [5] 胡惠杰, 王猛, 尹小刚, 等. 气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 21-31.
- [6] 李尚锋, 孙钦宏, 姚耀显, 等. 东北夏季极端低温天气事件的定义及其冷空气路径分析[J]. 地理科学, 2014, 34(2): 249-256.
- [7] 宋文玲, 顾薇, 柳艳菊, 等. 黄河中游夏季降水异常的先兆特征和预测方法[J]. 气象, 2013, 39(9): 1204-1209.
- [8] 王遵娅, 任福民, 王东阡, 等. 2012年海洋和气候环流异常及其对中国气候的影响[J]. 气象, 2013, 39(4): 508-515.
- [9] 赵连为, 李辑, 房一禾, 等. 影响东北夏季低温的主要因子及其相互关系[J]. 中国农学通报, 2013, 29(29): 201-207.
- [10] 孙然好, 潘保田, 牛最荣, 等. 河西走廊近50年来地表水资源时间序列的小波分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 455-459.
- [11] 鲁凤, 钱鹏, 胡秀芳, 等. 基于小波分析与Mann-Kendall法的上海市近12年空气质量变化[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12): 1614-1620.
- [12] 李珠, 耿丹, 马恒俊. 基于小波分析的江阴气温变化规律研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(28): 157-158.
- [13] 邹春霞, 申向东, 丁峰. 内蒙古武川县45年气温变化的小波分析[J]. 内蒙古农业大学学报, 2014, 35(3): 97-100.
- [14] 春风, 李春兰, 包玉海. 近57年锡林浩特市气温与降水量变化的小波分析[J]. 内蒙古师范大学学报, 2013, 42(1):

- 47-52.
- [15] 陈伟,汤静,卜思阳,等.基于 Mann-kendall 法和小波分析的沈阳站 1951-2010 年降水变化特征研究[J].农业灾害研究,2015,5(11):37-38,52.
- [16] 刘剑刚,李永化,张威,等.辽宁省洪涝灾害规律的初步研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):114-119.
- [17] 赵景波,邢闪,周旗.关小平原明代霜雪灾害特征及小波分析研究[J].地理科学,2012,32(1):81-86.
- [18] 曹永强,曹阳,徐丹.1961-2010 年黄淮海流域旱涝时空变化特征[J].资源科学,2015,37(10):2068-2077.
- [19] 朱玲玲,张竟竟,李治国,等.基于 SPI 的河南省冬小麦生育期干旱时空变化特征分析[J].灌溉排水学报,2018,37(5):51-58.
- [20] 王园香,唐世浩,郑照军.1982-2006 年中国 5-9 月的 NDVI 变化与人类活动影响分析[J].地球信息科学学报,2015,17(1):1333-1340.
- [21] 朱海霞,李秀芳,王萍,等.黑龙江水稻生长季积温计算方法[J].应用气象学报,2017,28(2):247-256.
- [22] 于成龙,刘丹,马秋斯,等.1961-2013 年黑龙江省气温变化特征[J].环境科学与技术,2016,39(5):169-175.
- [23] 王艳华,任传友,黄瑞冬,等.中国近 45 年低温指数时空持续变化分析[J].自然灾害学报,2013,22(2):116-123.
- [24] 傅丽昕.1957-2010 年新疆克拉玛依市降水量的持续性和趋势性统计特征分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):232-236.
- [25] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:37.
- [26] 李森,夏军,陈社明,等.北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J].自然资源学报,2011,26(6):1001-1011.
- [27] 胡永宁,王林和,张国盛,等.毛乌素沙地 1969-2009 年主要气候因子时间序列小波分析[J].中国沙漠,2013,33(2):390-395.
- [28] 曾波,闫彩霞,余莲.我国南方地区 1960-2009 年冬季气温分析[J].高原山地气象研究,2016,36(2):46-52.
- [29] 杨义,舒和平,马金珠,等.基于 Mann-Kendall 法和小波分析中小尺度多年气候变化特征研究-以甘肃省白银市近 50 年气候变化为例[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):126-131.
- [30] 田宝星,宫丽娟,杨帆,等.黑龙江省春季低温指数小波分析[J].水土保持研究,2017,24(1):342-345,350.
- [31] 王艳华,任传友,刘刚,等.东北地区不同季节持续低温指数时空变化特征及其对区域变暖的相应[J].资源科学,2013,35(5):1016-1023.
- [32] 王艳华,任传友,韩亚东,等.东北地区活动积温和极端持续低温的时空分布特征及其对粮食产量的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1742-1748.

Characteristic of the Lowest Temperature Index Changes in Summer of Heilongjiang Province

TIAN Bao-xing^{1,2,3}, WU Shuang^{1,2,3}, YANG Fan⁴, CHEN Jing⁵, ZHAO Fang⁶, GONG Li-juan^{1,2,3}

(1. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science, Harbin 150030, China; 2. Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast of China Meteorological Administration, Harbin 150030, China; 3. Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 4. Heilongjiang Meteorological Bureau In-house Service Centre, Harbin 150030, china; 5. Bayan Meteorological Bureau, Harbin, 151800, china; 6. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, china)

Abstract: The paper aims to understand the distribution rule and trend of the lowest temperature index in summer of Heilongjiang Province over the past 44 years. The authors used the lowest temperature index model, trend of change, the wavelet analysis and Mann-Kendall test to analyze the variation characteristics of the lowest temperature index in summer, based on the daily data of the lowest temperature, average temperature from 80 meteorological stations in Heilongjiang from 1971 to 2014. The results showed that, it was a downtrend to the lowest temperature index in summer in Heilongjiang Province, the lowest temperature index changed little in 1980s, 1990s and 2000s, and had decreased significantly since 2010s. In summer, the mean value of the lowest temperature index was smaller than that in spring. The lowest temperature index had obviously decreased as the temperature rose from 1980s, and the lowest temperature index in summer had decreased significantly since the mid-1970s, the sequence mutation of the lowest temperature index in summer began from 1983, the change of lowest temperature index in summer was negatively correlated with temperature. There were 3 periodic changes of scales in the lowest temperature of summer, which were 18-32 years, 6-14 years and 4-8 years. The scales of 18-32 years was very stable in the whole duration. The scale of 6-14 years was more stable in the former of 1980s. The scale of 4-8 years was more stable in the later of 1980s. The scale of 7-12 years was the most obvious but locality before the middle of 1980s. The scale of 24-31 years was less energy and full domain. The main cycle of the lowest temperature index of summer had 26 years, 8 years and 5 years, the scales of 8 years was the first main cycle, and the average cycle was about 5.5 years, the scales of 26 years was the second main cycle and the average cycle was about 14.5 years.

Keywords: Heilongjiang Province; summer; wavelet analysis; low temperature; abrupt change test