

赵思文,纪瑞鹏,于文颖,等.辽宁春末霜冻年代际变化特征及其与海温的关系[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):65-73.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



辽宁春末霜冻年代际变化特征及其与海温的关系

赵思文^{1,2},纪瑞鹏^{1,2},于文颖^{1,2},赵思玉³,张玉书^{1,2*}

(1.中国气象局沈阳大气环境研究所,辽宁 沈阳 110166;2.辽宁省农业气象灾害重点实验室,辽宁 沈阳 110166;
3.沈阳市气象局,辽宁 沈阳 110166)

摘要:中国东北位于高纬度地区,春季霜冻天气频繁发生,对农业生产有严重威胁,分析东北春末霜冻的气候特征及影响因子可为中长期预测提供可靠科学依据。以辽宁省为例,利用近60年气象台站观测资料和气象再分析资料,采用诊断分析方法,结合辽宁作物生育期,统计历年4月20日—5月31日辽宁省春末发生霜冻的范围并定义为春末霜冻指数(LSFI),研究其年代际尺度变化特征及对应的大尺度环流和前期海温关键区。结果表明:LSFI存在周期为14.25 a的年代际变化。辽宁地区春末霜冻事件在年代际尺度上增强对应大气环流特征为中高纬度有明显波列,东北亚上空为深厚气旋性异常,东北冷涡偏强,与西伯利亚附近的反气旋性异常结合,伴随副热带高压偏南,有利于冷空气持续影响辽宁。此外,LSFI的年代际变化与海温显著相关,相关联的海温关键区在1997年前后出现变化,1997年以前与春季(3、4月)北大西洋“三极子”海温模态显著相关,而1997年之后则与前冬北太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)联系密切,转变原因可能为海温模态的年代际转变。

关键词:春季;霜冻;年代际;海温

中图分类号:P429

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)02-0065-09

在全球变暖背景下,极端气候事件频发^[1]。东北地区位于中高纬欧亚大陆的东岸,气候寒冷、温度年际变化大,气温异常频繁发生。研究表明,东北冷涡春末夏初活动频繁,此时中国东北地区往往气温异常偏低^[2-4]。春末夏初是农作物耕种和生长的关键时期,同时也是农业低温冷害的高发期,如果在幼苗期(包括种子萌动发芽、出苗至三叶期)遭遇数日低温

或霜冻天气,会导致作物生长迟缓、植株发黄、叶干甚至死苗,进而影响产量,对我国粮食安全有巨大威胁^[5-7],因此加强对春末霜冻的研究并找到有效预报因子,对农业气象灾害防御有重要意义。

我国霜冻的分布特征及霜冻灾害评估等方面有很多系统的研究。白磊等^[8]研究表明利用日最低气温0℃作为阈值辨识初春、春末霜冻和无霜期的空间分布更加合理。在气候变暖趋势下,不同强度的霜冻年累计发生次数在中国北方有微弱增加,区域性霜冻发生仍较频繁^[9-10],加上长生育期品种扩种等人为因素,导致霜冻仍是威胁粮食安全的主要农业气象灾害之一。霜冻的时空变化规律有区域性和季节性等差异,且霜冻日期的变化与极涡、副热带高压所处的位置及变动有直接关系。东北地区气候主要受中高纬度大尺度环流影响,大气影响系统较为复杂,

收稿日期:2021-09-14;修回日期:2022-01-30

基金项目:辽宁省气象局指导计划项目(ZD202231);辽宁省科技厅重点研发计划项目(2019JH2/10200018);中国气象局沈阳大气环境研究所区域联合项目(2018SYIAEHZ1);国家自然科学基金项目(41705094)

作者简介:赵思文(1991—),女,工程师,主要从事气候变化与农业气象灾害、陆气相互作用工作。E-mail:zhaosw@iaesy.cn

通信作者:张玉书(1963—),女,研究员,主要从事农业气象灾害、气候变化对农业影响及遥感应用工作。E-mail:zhangyushu@iaesy.cn

不同的地域以及不同的阈值定义的气候指标对应的大气环流配置也不尽相同。研究表明,阻塞高压出现在鄂霍次克海地区有利于黑龙江地区降温。东北冷涡偏南,贝加尔湖阻塞高压与鄂霍次克海阻塞高压(简称“鄂海阻高”)配合的环流则利于东三省的东部地区低温事件的发生^[4]。此外,副热带西风急流,鄂海阻高,西太平洋副热带高压,东北冷涡以及大气环流遥相关型等都会影响东北地区的春、夏季气候变化^[11-15],前期的海温强迫也是重要影响因子。同时,东北地区的气候变化也受多时间尺度气候因子影响,年际变化上,北大西洋涛动引起的大气环流气旋性异常在贝加尔湖到东北地区维持,加强东北冷涡,导致东北地区气温偏低^[16-17],大气内部较长周期的变率,如北太平洋年代际振荡、北极涛动的年代际变化等是导致东北地区年代际气候变率的可能因子^[18-19]。然而,无论是极端低温还是霜冻事件的研究都缺少在年代际尺度上海温影响机理的研究,在长期预测方面还有待加强。

虽然现有研究对东北地区霜冻事件的特点、影响进行了探讨,但对其特征分析存在不足,同时对其大尺度环流背景研究也不够深入。霜冻年代际时间尺度变化如何?如何确定霜冻指标对应的前期预报因子?这些问题的解决对霜冻事件的气象因子有进一步理解,同时可有效提高霜冻的预测水平。综合考虑辽宁地区春播作物的生育期,春末(4月20日—5月31日)是作物春播和发育的关键期,霜冻影响较大,本研究在前期工作中选取辽宁范围内气象站点气象要素资料并统计了1961—2017年以来辽宁地区初霜冻及春末霜冻情况,得到春末霜冻较为多发,因此本文重点分析了辽宁省春末霜冻事件年代际尺度变化特征及其气象背景。

1 数据和方法

1.1 数据

国家气象信息中心整编的辽宁地区50个气象站1961—2017年的逐日平均气温资料,选取春末(4月20日—5月31日)时间段进行分析。美国国家环境预测中心国家大气环境中心(NCEP/NCAR)发布的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的月平均全球再分析资料,时间范围为1961—2017年^[20](数据来源:<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>)。海表温度资料采用英国哈德莱中心(Hadley Center)1961—2017年逐月全球海温资料^[21],水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (数据来源:<https://www.metoffice.gov.uk/>

[hadobs/index.html](https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/index.html))。

1.2 方法

1.2.1 指标计算方法

根据中华人民共和国气象行业标准《作物霜冻害等级》(QX/T 88-2008)^[22],利用日最低温度作为作物的霜冻害评估指标,即苗期和乳熟期最低温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 时,即定义为发生霜冻害。因此计算春末(4月20日—5月31日)出现日最低温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 时发生霜冻的站数,计算其与总站数之比,并计算其标准化序列,定义为春末霜冻指数(Late Spring Frost Index, L_{SFI}),表征灾害出现范围大小。公式如下:

$$L_{\text{SFI}} = \frac{S_{\text{F}}}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中, S_{F} 代表发生春末霜冻的台站数, S 代表辽宁地区总站数。

1.2.2 统计分析方法

经验正交函数分析(EOF)、相关分析和回归分析以及百分位法。为了消除全球变暖的影响,所有数据都去除了线性趋势。为了研究年代际变化,本文利用11 a Lanczos低通滤波提取各物理量年代际变化分量,同时也计算了7和9 a Lanczos低通滤波,所得结果对滤波时间窗的选取不敏感,因此选取11 a可行。 t 检验用于计算相关分析和回归分析中的显著性,North检验用于检查EOF的结果^[23]。

1.2.3 集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD算法)

经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法能将原始信号不断进行分解,获取符合一定条件下的固有模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF)分量,然而在IMF分解时存在着模态混叠现象,即一个IMF中会包含不同时间尺度的特征成分。为了解决模态混叠等问题,Huang等^[24]将白噪声作为待分解信号加入,即EEMD算法,并将得到的IMF分量代表原序列不同时间尺度特征,文中利用EEMD方法分析 $LSFI$ 的多时间尺度特征。

1.2.4 波活动作用通量

Takaya and Nakamura^[25]基于Plumb的理论发展了在变化的基本气流条件下准静止波的三维传播量,即波活动作用通量,用其描述准定常罗斯贝波的能量传播特征。该通量计算公式如下:

$$W = \frac{P}{2000|U|} \begin{cases} U(v'^2 - \Psi'v'_x) + V(-u'v' + \Psi'u'_x) \\ U(-u'v' + \Psi'u'_x) + V(u'^2 + \Psi'u'_y) \\ \frac{f_0 R_0}{N^2 H_0} [U(v'T' - \Psi'T'_x) + V(-u'T' - \Psi'T'_y)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, P 代表气压, U 、 V 分别表示基本环流场的纬向和经向分量; Ψ' 表示准地转扰动流函数; u' 、 v' 表示扰动地转风的纬向和经向风, R_0 是干气体常数, N^2 表示浮力频率 (Brunt-Vaisala 频率), H_0 是大气标高, T 表示温度。公式中, 环境背景场包括了纬向非均匀基流和经向风场, 适用于中高纬环流场。

2 结果分析

2.1 辽宁地区春末霜冻事件的年代际特征

$LSFI$ 的时间序列及演变趋势如图 1 所示。图 1a 表明辽宁地区春末霜冻发生范围整体呈下降趋势, 但存在较为明显的年际及年代际变化。 $LSFI$ 在 20 世纪 70 年代较高, 而在 1980—2000 年较低, 2000 年以后又有增加趋势。因此, 为了研究其年代际尺度特点, 利用 EEMD 方法对 $LSFI$ 进行分解 (图 1b), 同时计算各 IMF 分量的方差贡献及与原序列的相关系数 (表 1), 其中 IMF3 代表的 14.25 a 的年代际周期变化与原始序列相关通过了显著性检验 ($r=0.32$)。因此选择 IMF3 序列代表春末霜冻的年代际变化。

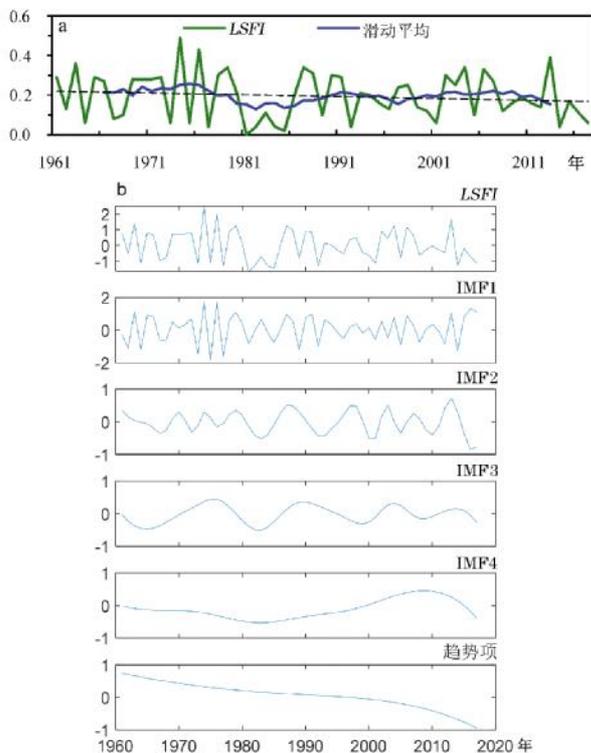


图 1 辽宁春末霜冻指数 ($LSFI$) 的时间序列及 11 a 滑动平均 (a) 及 1979—2017 年 $LSFI$ 标准化序列及其各固有模态函数 (IMF) 分量及趋势项 (b)

表 1 $LSFI$ 各 IMF 分量权重及与原序列相关系数

| IMF 分量 | 周期/a | 权重/% | 与原序列相关系数 |
|--------|-------|-------|----------|
| IMF1 | 3.26 | 73.92 | 0.78* |
| IMF2 | 6.71 | 16.39 | 0.48* |
| IMF3 | 14.25 | 4.47 | 0.32* |
| IMF4 | 57 | 5.22 | 0.08 |

注: * 表示通过 0.05 的显著性检验。

2.2 辽宁地区春末霜冻事件年代际变化对应的大气环流特征

2.2.1 年代际变化对应的大气环流特征

中国东北地区纬度较高, 受中高纬度大气环流遥相关及东亚季风控制。春季是北半球冷空气活动频繁的时期, 冷空气主要来自贝加尔湖的西北路径以及鄂霍次克海的东北路径, 影响东北地区低温的环流配置十分复杂。利用 $LSFI$ 的年代际分量 IMF3 时间序列 ($LSFI3$) 回归春末对流层中高层环流场, 得到结果如图 2 所示。北半球“丝绸之路”波列是北半球夏季环球遥相关波列的欧亚部分, 因此 $LSFI3$ 对应的波列分布即为类似“丝绸之路”型波列, 且为稳定的正压结构。当 $LSFI$ 年代际增强时, 中纬度对流层高层沿亚洲西风急流表现为欧洲、东北亚以及中北太平洋上空为气旋性异常, 中亚为反气旋性异常。贝加尔湖北部及南海为反气旋性异常, 东北亚受较强的气旋性异常控制, 形成典型的北高南低型分布, 大气的经向度加大, 从而有利于极地冷空气南下, 辽宁上空为冷平流。同时太平洋上空副热带高压增强, 位置偏南, 一方面不利于暖湿空气北上, 另一方面有利于北部气旋的维持, 导致降温持续时间长, 进一步导致降温幅度增加。从对流层中层 (500 hPa) 的温度异常 (图 2b) 可知, 冷空气主要来源于鄂霍茨克海, 同时鄂海低压系统较强, 强的槽前西南气流使得高纬度入侵的冷空气影响辽宁地区, 高压异常位于北太平洋, 有利于东北地区低压维持。中纬度的波列及副热带高压异常的配合是导致辽宁地区春末霜冻年代际变化的主要环流。

2.3 年代际尺度春末霜冻事件对应的海温异常

海温往往是影响东亚春季低温的前期因子, 很多学者都对海温的气候效应进行了深入探讨。相比年际变化, 海温的年代际影响更加复杂。太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, 简称 PDO) 是太平洋海温年代际尺度上最显著的变率模态。PDO 可影响东亚地区大气环流系统进而影响辽宁地区的天气气候^[27], 热带西太平洋是东亚最重要的热源和水

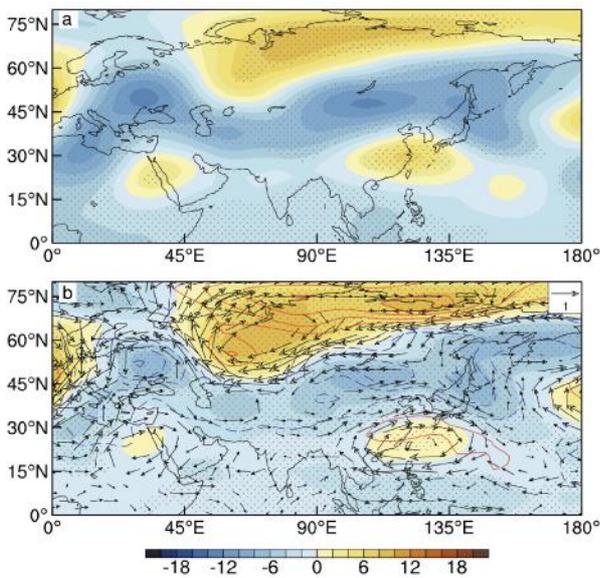


图 2 辽宁地区春末霜冻指数的 IMF3 序列($LSFI3$) 回归的 200 hPa 位势高度(阴影,单位:gpm)(a) 和 500 hPa 位势高度(阴影,单位:gpm)、温度(等值线,单位:°C)及风场(矢量,单位:m/s)(b) (黑、灰点分别表示通过 0.01、0.1 的显著性检验;图中箭头表示风矢量纬向或经向分量超过 0.1 的显著性水平)

汽源地,也对东亚气候有重要影响^[7]。因此,研究不同海域海温年代际变率与霜冻事件的关系及其可能影响机制十分必要。

通过计算 1961—2017 年 $LSFI3$ 与通过低通滤

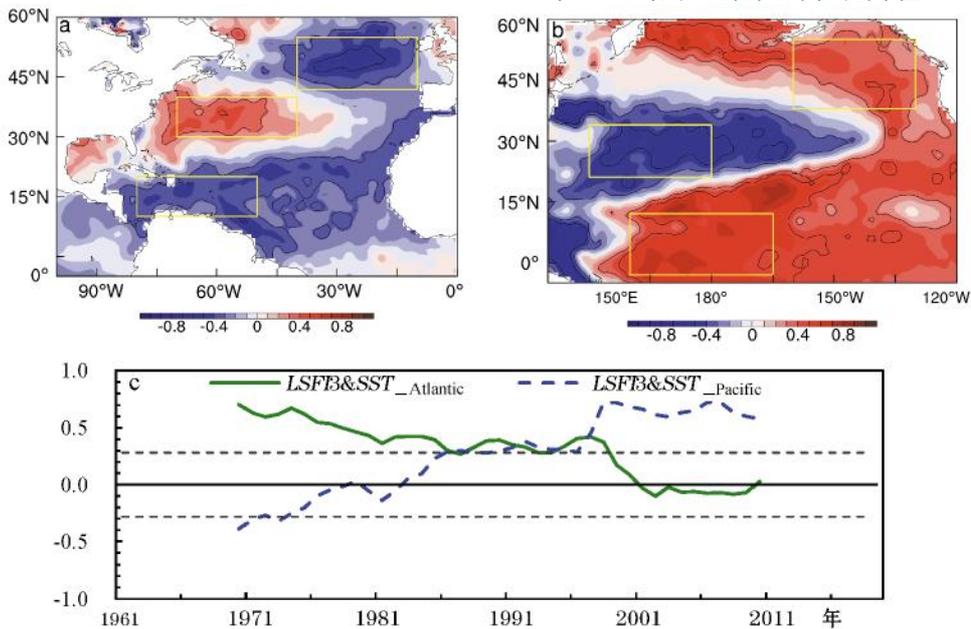


图 3 $LSFI3$ 分别回归的 1961—1997 年北大西洋 3、4 月海温(a,单位:°C)、1998—2017 年前冬(11、12 月)太平洋海温(b,单位:°C),及 2 个海温指数($SST_{Atlantic}$ 、 $SST_{Pacific}$) 分别与 $LSFI3$ 的 17 a 滑动相关(c) (黑线范围内通过 0.1 的显著性检验)

波处理的全球海温的 1—12 月 11 a 超前滑动相关,得到在 1997 年前后,与 $LSFI3$ 显著相关的海域由春季 3、4 月北大西洋海温变为前冬(11、12 月)北太平洋海温。表现为 1997 年以前受北大西洋海温为“+—+”三极子模态影响,而在 1997 年后,与大西洋的相关性显著减弱,与前期冬季北太平洋三极子相关显著,同时模态分布与 PDO 模态类似。因此根据显著相关区域(图 3 中矩形框),定义了海温指数(sea surface temperature,简称 SST,指数经过标准化及去趋势处理):

$$S_{ST_Atlantic} = (S_{ST}(30^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}, 40^{\circ}\text{E}-70^{\circ}\text{W}) - (S_{ST}(10^{\circ}\text{N}-20^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\text{E}-80^{\circ}\text{W}) + S_{ST}(42^{\circ}\text{N}-55^{\circ}\text{N}, 10^{\circ}\text{E}-40^{\circ}\text{W}))/2$$

$$S_{ST_Pacific} = (S_{ST}(3^{\circ}\text{S}-12^{\circ}\text{N}, 160^{\circ}\text{E}-165^{\circ}\text{W}) + S_{ST}(38^{\circ}\text{N}-55^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E}-160^{\circ}\text{W}))/2 - S_{ST}(21^{\circ}\text{N}-34^{\circ}\text{N}, 150^{\circ}\text{E}-180^{\circ}) \quad (3)$$

通过计算 $LSFI3$ 与各海温指数的 17 a 滑动相关得出,辽宁春末霜冻事件与海温的关系在 1997 年前后的窗口期出现了显著的年代际转折(图 3c)。 $LSFI3$ 在 1995 年前与 $SST_{Atlantic}$ 春末为显著的正相关,而在之后相关性迅速减弱。同时, $LSFI3$ 与 $SST_{Pacific}$ 的相关系数在 1981 年后逐渐显著并增强,在 1995 年后达到 0.6 以上,超过了 0.05 的显著性检验。由于本文得出海温指数与霜冻指数年代际分量的相关性由非显著变为显著,年代际突变点并不明显,因此,通过计算多个时间步长(13、15、21 a)与文中 17 a 结果一致,均表现为在 1997 年左右发生转

变。因此,这种相关性的变化是可信的。那么这两种海温分布是否会对霜冻事件年代际变化产生影响呢?

2.4 海温对辽宁地区春末霜冻事件年代际变化影响的转变

2.4.1 1997年前后不同海温指数回归的大尺度环流

温度的年代际变率与大气环流异常密切相关,为了进一步揭示不同区域海温与霜冻事件 $LSFI3$ 的关系,利用海温指数对春末大气环流进行回归。图 4a~4d 是各海温指数在 1997 年前后对应的环流场异常特征。500 hPa 位势高度场表明,大气环流异常的主要特征是极区均为负距平,1997 年前, $SST_{Atlantic}$ 回归的大气环流对应东北地区有气旋性异常,乌拉尔山地区有较强的反气旋性异常,有利于伸向极地的高压脊发展,冷空气顺着高压脊前气流以及槽后

西北气流,使得来自极地的强冷空气入侵东北。1997 年后东北地区为正距平中心,高压异常控制虽然有利于降温,但是辽宁地区位于高压底部,一方面受西南暖湿气流影响,另一方面北部没有冷空气流入,因此不利于辽宁地区的降温。 $SST_{Pacific}$ 对应的大气环流在 1997 年前表现为中高纬有明显波列,贝加尔湖附近地区为正异常,负异常中心位于北太平洋地区,相比于 $LSFI3$ 回归的位置偏东,1997 年后对应的大气环流在贝加尔湖地区以及东北亚地区与有利于霜冻事件发生的环流较为一致。同时,副热带太平洋与北太平洋地区位势高度对应反位相异常,形成类似太平洋/北美型遥相关。

1997 年前后 $SST_{Atlantic}$ 与 $SST_{Pacific}$ 分别回归的春末海平面气压场(图 4e,4f)表明,辽宁地区春末霜冻事件的年代际变化受低压影响,这是导致低温常见的天气形势。1997 年前,春季北大西洋海温异常导

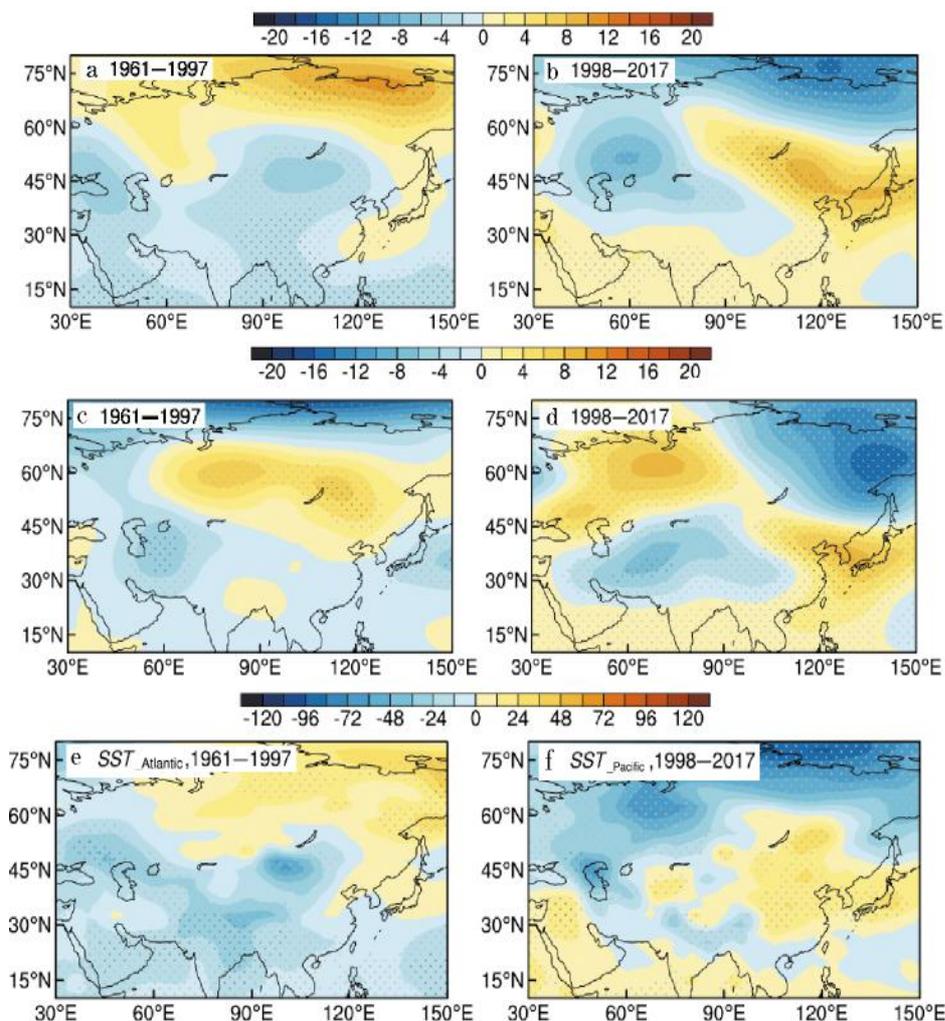


图 4 $SST_{Atlantic}$ 与 $SST_{Pacific}$ 回归的 1997 年前后春末 500 hPa 位势高度(a~d, 单位:gpm)及海平面气压(e~f, 单位:Pa)
(黑、灰点分别表示通过 0.01、0.1 的显著性检验)

致春末北半球中高纬度东北亚地区海平面气压为负距平,贝加尔湖以及欧洲西部地区为正距平区,说明乌拉尔山和西伯利亚阻塞高压偏强有利于高纬冷空气南下。在极地地区,负距平区最值中心在1997年前已经分裂,并集中在东亚的高纬地区。1997年后,在前冬太平洋海温影响下,春末位势高度负异常主要集中在西伯利亚北部,积聚的大量冷空气在西伯利亚高压的影响下入侵我国东北地区。

2.4.2 相关的波活动作用通量

LSFI3 和中纬度波列密切相关,为了得到能量来源,利用海温指数对春末波活动作用通量进行回归(图5)。1997年前的波能量源地为北大西洋,同时在格陵兰岛也有强烈的能量辐散,并继续向下游传播,导致东北亚地区的气旋性异常加强(图5a),1997年后能量则主要源于太平洋地区,经由北大西洋向东传播(图5b)。1997年前后极端低温环流异常的关键区存在较大差异,说明1997年前后低温环流异常关键强迫源位置发生改变,这是导致极端低温异常波列出现年代际转折的原因。

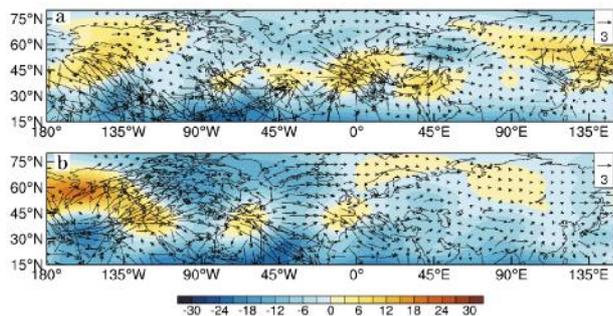


图5 SST_{Atlantic} 与 SST_{Pacific} 回归的春末准地转流函数(填色,单位:10⁶·m²/s)及200 hPa 波作用活动通量(矢量,单位:m²/s²)
(a为1961—1997,b为1998—2017)

2.4.3 可能原因

LSFI3 与海温的关系在20世纪90年代中期出现了转折,春季北大西洋的作用在减弱,前冬太平洋海温的作用在加强。以往研究得到北大西洋20世纪90年代以后从三极子型变为马蹄型,北大西洋可能通过海温模态的分布型影响西风气流,西风气流的变化能引起强烈的热量、动量和水汽输送,对天气气候变化具有重要影响^[26],在此基础上,分析了北大西洋春季及太平洋冬季的海温模态变化,得到2个关键区海温的 EOF 第一模态空间分布及其时间序列(图6),各时间序列与 LSFI3 的超前相关分别在1997年前($r=0.53$)后($r=0.60$)显著,说明海温模态对

LSFI3 有显著的影响。

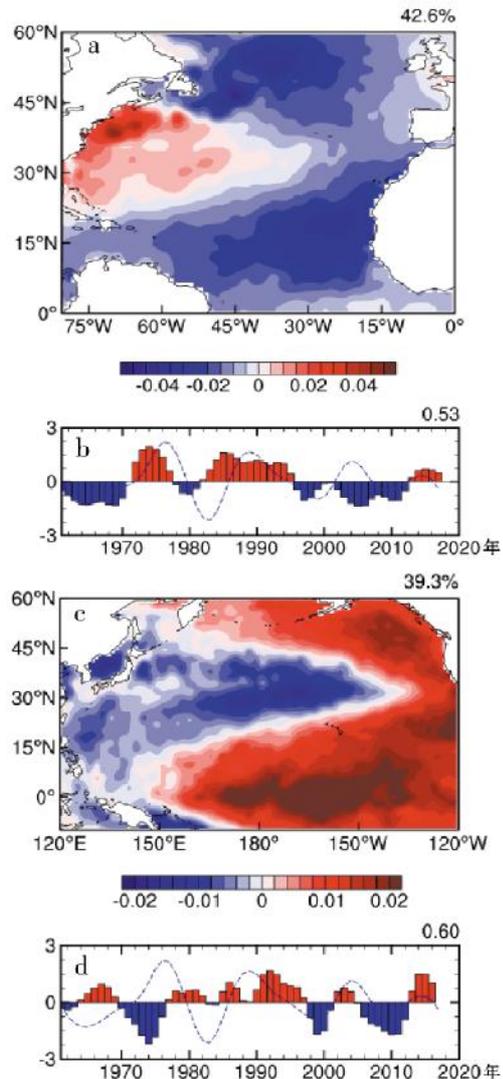


图6 1961—2017年北大西洋3、4月海温(a,b)及前冬(11、12月)太平洋海温(c,d)EOF分析的第一模态空间分布(a,c)及对应的时间序列(b,d)

3 结论与讨论

利用近60年气象台站观测资料及全球气象再分析数据,基于已有的霜冻指标定义辽宁地区春末霜冻指数,采用 EEMD、回归相关分析、低通滤波及 EOF 等诊断分析方法,研究了辽宁地区春末霜冻事件的年代际事件尺度变化特征,阐明影响其年代际变化的大尺度环流及前期关键区海温,得到以下主要结论:

(1) 辽宁地区发生春末霜冻的范围存在显著年代际变化,年代际周期为14.25 a。辽宁地区春末霜冻事件增强在年代际时间尺度上对应大尺度环流特征为春末对流层中高层,中纬度形成明显类似“丝绸

之路”型波列,贝加尔湖北部及南海为反气旋性异常,东北亚受较强的气旋性异常控制,形成典型的北高南低型分布,大气的经向度加大,有利于极地冷空气南下。西太平洋的反气旋有利于北侧气旋的维持,不利于暖湿空气北上。鄂霍次克海低压系统较强,强的槽前西南气流使得高纬度入侵的冷空气影响辽宁地区。

(2)辽宁地区春末霜冻事件的年代际变化与前期海温分布模态有关,并在1997年前后出现了显著变化。1997年前霜冻事件增强与前期春季(3、4月)北大西洋“三极子”海温模态为显著正相关,而在1997年后则与PDO显著相关。

利用海温相关分布,计算海温指数,分析其对应的大尺度环流及波活动作用通量传播,得到海温影响霜冻事件的机制(图7)。1997年前的波能量源地为北大西洋,在格陵兰岛有强烈的能量幅散,并继续向下游传播,导致东北亚地区的气旋性异常加强。而1997年后能量则主要源于太平洋地区,经由北大西洋向东传播。

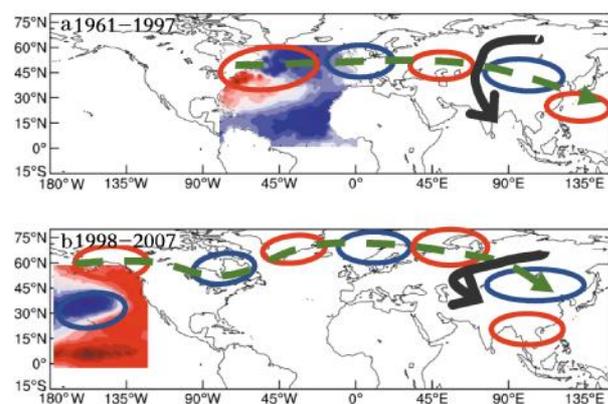


图7 春季北大西洋海温(a)及前冬太平洋海温(b)分布模态在1997年前后分别对辽宁地区春末霜冻年代际变化的影响机制

(黑色箭头表示冷空气方向,绿色箭头表示能量传播,蓝色箭头表示干冷空气异常,红色和蓝色表示反气旋和气旋异常)

上述结果可以为辽宁地区春末霜冻灾害长期预测提供一定的前兆信号,然而低温在东北地区具有明显的空间差异性,下垫面以及纬度不同导致不同区域低温事件对应的大尺度环流配置也不尽相同,由于种植制度的改变及气候变化的影响,不同作物种植区域和复种指数都发生了很大的变化^[28-29],因此,未来研究应结合东北地区的不同作物种植的空间分布进一步研究春末霜冻事件对作物的影响。此

外,由于20世纪90年代中期正是北大西洋年代际振荡(AMO)的位相转折时期,北大西洋“马鞍型”海温模态也可能与AMO有直接的关系^[30-31],而这部分内容有待于进一步的探讨,其内在机制有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] ALLEN S, CARDONA O, CUTTER S, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 2012, 18(6): 586-599.
- [2] 余会康, 郭建平. 气候变化下东北水稻冷害时空分布变化[J]. 中国生态农业学报, 2014(5): 594-601.
- [3] 张梦婷. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征[J]. 东北春玉米延迟型冷害[J]. 中国农业气象, 2016(5): 599-610.
- [4] 李尚锋, 应爽, 姚耀显, 等. 东北夏季月低温事件的定义及大气环流年代际特征分析[J]. 气象与环境学报, 2014(3): 38-45.
- [5] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [6] 王荣梅, 张晓琴, 刘姣, 等. 新疆喀什地区近50a来霜冻变化特征及其对农业的影响[J]. 干旱气象, 2013(2): 309-312.
- [7] 石延英, 郭尔静, 张镇涛, 等. 东北三省水稻生长季农业气候资源及障碍型冷害的时空特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 203-213.
- [8] 白磊, 张帆, 文元桥, 等. 基于格点资料的1961—2018年中国霜冻灾害时空变化规律[J]. 中国农业气象, 2021, 42(9): 761-774.
- [9] 叶殿秀, 张勇. 1961—2007年我国霜冻变化特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 661-665.
- [10] 钱莉, 杨鑫, 滕杰. 河西走廊东部一次霜冻天气过程成因及其对农业的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5): 114-121.
- [11] LI H, CHEN H, SUN B, et al. A detectable anthropogenic shift toward intensified summer hot drought events over northeastern China[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(1): 1-13.
- [12] HAN T, HE S, WANG H, et al. Variation in principal modes of midsummer precipitation over northeast China and its associated atmospheric circulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 36(1): 55-64.
- [13] SUN C, JIANG Z, LI W, et al. Changes in extreme temperature over China when global warming stabilized at 1.5 degrees C and 2.0 degrees C[J]. Sci. Rep, 2019, 9(1): 14982.

- [14] 李尚锋,姜大膀,廉毅,等.冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析[J].大气科学,2018,42(5):963-976.
- [15] 汪子琪,张文君,耿新.两类 ENSO 对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响[J].气象学报,2017,75(4):564-580.
- [16] 胡桂芳,邹瑾,张璇.下半年 Nino3 区海表升温对东亚春季大气环流及山东春季降水的影响[J].应用气象学报,2005,16(6):772-778.
- [17] 张霏燕.东北春夏极端低温的时空变化特征及其与全球海温异常的关系[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [18] 韩方红,陈海山,马鹤翟.冬季北大西洋涛动与中国北方极端低温相关性的年代际变化[J].大气科学,2018,42(2):239-250.
- [19] 谭桂容,陈海山,孙照渤,等.2008 年 1 月中国低温与北大西洋涛动和平流层异常活动的联系[J].大气科学,2010,34(1):175-183.
- [20] KISTLER R, KALNAY E, COLLINS W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(2): 247-268.
- [21] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth century[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D14): 4407.
- [22] 中国气象局. QX/T88-2008 作物霜冻害等级[S]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [23] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 1982, 110(7): 699-706.
- [24] HUANG N E, WU M, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2003, 459(2037): 2317-2345.
- [25] TAKAYA K, NAKAMURA H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(6): 608-627.
- [26] 刘晨,张杰,徐玮平.春季欧亚大陆积雪主模态及其与北大西洋海温的关系[J].大气科学,2020,44(4):793-807.
- [27] 丁一汇,李怡,王遵娅,等.亚非夏季风的年代际变化:大西洋多年代际振荡与太平洋年代际振荡的协同作用[J].大气科学学报,2020,43(1):13.
- [28] LIU W, DONG J, XIANG K.L, et al. A sub-pixel method for estimating planting fraction of paddy rice in Northeast China[J]. Remote Sensing of Environment, 2018(205): 305-314.
- [29] DONG J, LIU W, HAN W, et al. A phenology-based method for identifying the planting fraction of winter wheat using moderate-resolution satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(18): 6892-6913.
- [30] LI H, HE S, GAO Y, et al. North Atlantic modulation of interdecadal variations in hot drought events over northeastern China [J]. Journal of Climate, 2020, 33(10): 4315-4332.
- [31] 徐玮平,张杰,刘晨,等.20 世纪 90 年代以后华北初春低温增强和北大西洋海温关系[J].大气科学,2020,44(6):15-35.

Interdecadal Variation of Late Spring Frost and the Relationship with *SST* in Liaoning

ZHAO Siwen^{1,2},JI Ruipeng^{1,2},YU Wenyong^{1,2},ZHAO Siyu³,ZHANG Yushu^{1,2}

(1.Institute of Atmospheric Environment,China Meteorological Administration,Shenyang 110166,China;

2.Key Laboratory of Agrometeorological Disasters of Liaoning Province,Shenyang 110166,China;

3.Meteorological Bureau of Shenyang,Shenyang 110166,China)

Abstract Northeast China is located in high latitudes, spring frost weather occurs frequently, which poses a serious threat to agricultural production. To clarify the characteristics of spring frost events in northeast China and provide reliable predictor is very important. Taking Liaoning province as an example, based on the meteorological observation data and meteorological reanalysis data in recent 60 years, the late spring frost index (*LSFI*) in Liaoning province is defined, the relationship with the temporal characteristics of *LSFI* and the related large-scale circulation and the sea surface temperature (*SST*) is investigated. The results show that: *LSFI* has an interdecadal variation with a period of 14.25 a. The interdecadal enhancement is corresponding to a “Silk Road” pattern at middle latitudes, with anomalous cyclones over northeast Asia, which is beneficial to the transport of cold air. Meanwhile, there is a strong cyclonic anomaly over the Okhotsk Sea, which makes the cold air invaded at high latitudes affecting Liaoning province. And the southerly subtropical high is disadvantage to warm and humid air to north. In addition, *SST* also has important effects on late spring frost events. And there is a shift between the interdecadal variation of *LSFI* and *SST* around 1997. Before 1997, it is significant correlated with the North Atlantic “+--” triple mode of *SST* in the early spring (March and April). The wave energy originates from the North Atlantic converged in northeast Asia, which strengthens the cyclone anomaly. After 1997, it is positively correlated with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) in the previous winter. The wave activity flux mainly originates from the Pacific Ocean and spreads eastward to northeast Asia via the North Atlantic.

Key words spring; frost; interdecadal; sea surface temperature