

文章编号: 2096-1618(2025)03-0346-06

# 北大西洋春季海温对中国东北地区夏季气温的影响

李昀晓<sup>1</sup>, 华维<sup>1,2,3</sup>, 杨亦典<sup>4</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 四川省气象灾害预测预警工程实验室, 四川 成都 610225; 4. 西安市气象局, 陕西 西安 710016)

**摘要:**为探究北大西洋春季海温对东亚地区夏季气候的影响,基于CN05.1高分辨格点气温资料、ERA5再分析资料和NOAA重建海表温度资料,采用经验正交分解、回归分析和相关分析等统计诊断方法对1979–2016年北大西洋春季海温对中国东北地区夏季气温的影响及可能机理进行分析,结果表明:(1)北大西洋春季海温主要呈三极型模态,具体表现为由南至北呈显著的“负—正—负”分布,负中心分别位于北大西洋北部和低纬地区,正中心位于北大西洋中纬度西部。该模态存在明显的年际和年代际变化特征,其年代际变化表现出“负—正—负—正”的变化特点。(2)中国东北地区夏季气温整体上呈较一致的增暖趋势,其年代际趋势从20世纪80年代至今表现为“负—正—负”的变化特征。(3)中国内蒙古北部、黑龙江西部、以及吉林东部部分地区夏季气温与前期春季北大西洋海温呈显著负相关关系。同时,春季北大西洋海温对上述地区夏季气温极端高低年也存在明显影响。(4)北大西洋春季海温通过激发罗斯贝波的东传影响对流层中高层大气环流,并使东北上空整体受正涡度平流控制,导致该地区以上升运动为主,高层东亚大槽加深,中低层呈现气旋性环流,利于维持阴雨天气,造成东北地区夏季气温降低。

**关键词:**气候变化;北大西洋海温;夏季气温;时空特征;影响机理

**中图分类号:**P425

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.015

## 0 引言

中国东北地处欧亚大陆中高纬地区,是全球气候变化响应的敏感区域之一。东北地区作为中国最重要的粮食生产基地,其气温变化尤其夏季低温会导致粮食产量减少,对农业生产造成严重危害,一直受到科学界的高度关注<sup>[1-3]</sup>。东北地区夏季低温的生成因素较为复杂,许多学者对其影响因子和机制进行深入研究,得到诸多有意义的研究成果。在低纬度地区,厄尔厄诺现象造成的海温异常可导致上空的大气环流改变,并向北传递至中国东北地区,造成气温下降<sup>[4-5]</sup>。在中纬度地区,副热带高压的强度和位置也会对东北地区夏季低温形成影响,当其副热带高压强度偏弱,位置偏东或偏南,以及处于长周期振动的极弱阶段时,东北地区易出现低温现象<sup>[6-8]</sup>。高纬度极涡系统也是东北夏季气温的重要影响因素,主要表现在极涡面积、中心高度值、最大中心频数,以及和南亚高压的相互作用对夏季气温的影响<sup>[9-10]</sup>。另一方面,东北冷涡与东北夏季气温也存在联系密切,二者总体呈负相关关系,即冷涡活跃时,夏季气温偏低<sup>[11-13]</sup>。相关研究结果均表明,大气环流异常是造成东北地区夏季低温的重要因素,然而其上游的大气环流能否同样对夏季低温造成

影响,仍值得深入研究。

在影响中国夏季气温的各类因子中,北大西洋海温的作用不可忽视。大西洋是全球气候变化的敏感区域之一,北大西洋海温可以通过蒸发和大气加热过程驱动大气环流变化,从而对周边区域与下游的气候和天气特征存在显著影响。如北大西洋海温异常导致大西洋欧洲区域气候、东亚季风、印度夏季风的变化<sup>[14-19]</sup>;此外,在天气尺度上还可造成欧洲热浪和中国东北干旱事件<sup>[20-22]</sup>。因此,北大西洋海温导致的大气环流变化是联系北大西洋地区气候和东亚地区气候的重要因素。

由此可见,北大西洋海温变化可导致对下游地区气候发生异常,但有关北大西洋春季海温与中国东北地区夏季气候联系的研究有待开展,二者之间的联系及可能机制尚不十分清楚。基于以上分析,本文采用多种统计诊断方法对北大西洋春季海温与中国东北地区夏季气温的联系进行分析,并探讨可能的物理过程。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

气温资料采用基于中国境内2416个气象站气温观测数据插值得到的CN05.1月平均格点气温数据<sup>[23]</sup>,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。大气环流场资料采用欧洲中期天气预报中心提供的逐月再分析资

收稿日期:2023-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42275022);第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK010203)

通信作者:华维. E-mail: huawei@cuit.edu.cn

料<sup>[24]</sup>(ECMWF reanalysis version 5, ERA5),所用变量包括位势高度、经(纬)向风、垂直速度和相对涡度,其水平分辨率为2°×2°。海温资料采用美国国家海洋和气象局(NOAA)的重建海温数据<sup>[25]</sup>,水平分辨率为2°×2°。本文研究时段和资料长度为1979–2016年,春季定义为3–5月,夏季定义为6–8月。

1.2 方法

使用经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)方法对1979–2016年北大西洋海温春季异常和中国东北地区夏季气温时空变化特征进行分析。采用相关分析和线性回归分析方法研究二者的联系,采用双尾学生氏*t*检验方法进行显著性检验。为突出年际变化的影响,文中所有物理量均进行去趋势处理以虑除年代际信号。采用Takaya等<sup>[26]</sup>的方法计算波通量和流函数,公式如下:

$$W = \frac{P}{2|U|} \left( \frac{\bar{u}(\psi_x'^2 - \psi'_x\psi'_{xx}) + \bar{v}(\psi'_x\psi'_y - \psi'_y\psi'_{xy})}{\bar{u}(\psi'_x\psi'_y - \psi'_y\psi'_{xy}) + \bar{v}(\psi_y'^2 - \psi'_y\psi'_{yy})} \right)$$

2 北大西洋春季海温和中国东北地区夏季气温的时空变化特征

2.1 北大西洋春季海温的时空变化特征

为了解春季北大西洋海温的时空变化特征,使用EOF方法对北大西洋地区(10°N~70°N, 80°W~0°W)海温进行分析。表1为EOF分解前三个模态方差贡献和累计方差贡献结果,其贡献率分别为30.76%、15.78%、11.35%,累计方差贡献达到57.89%,说明该结果可以代表北大西洋春季海温的主要空间变化特征。图1(a)为北大西洋春季海温EOF分解第一模态空间分布。可以看出与前人研究结果一致<sup>[27]</sup>,北大西洋春季海温异常呈现出经向“负—正—负”三极子型,即北大西洋三极型海温模态,其负异常分别位于北大西洋北部和低纬地区,正异常则位于北大西洋中纬度西部地区。图1(b)为EOF第一模态时间系数,总体上存在明显的年际变化和年代际变化,其中年代际变化表现出“负—正—负—正”的分布特征,20世纪80年代前期主要为负相位,20世纪80年代中期至21世纪初期以正相位为主,21世纪初期至21世纪10年代初期主要为负相位,之后又转变为正相位为主导。

表1 春季北大西洋海温 EOF 分解前三个模态方差贡献率和累计方差贡献率

模态数	第一模态	第二模态	第三模态
方差贡献率	30.76	15.78	11.35
累计方差贡献率	30.76	46.54	57.89

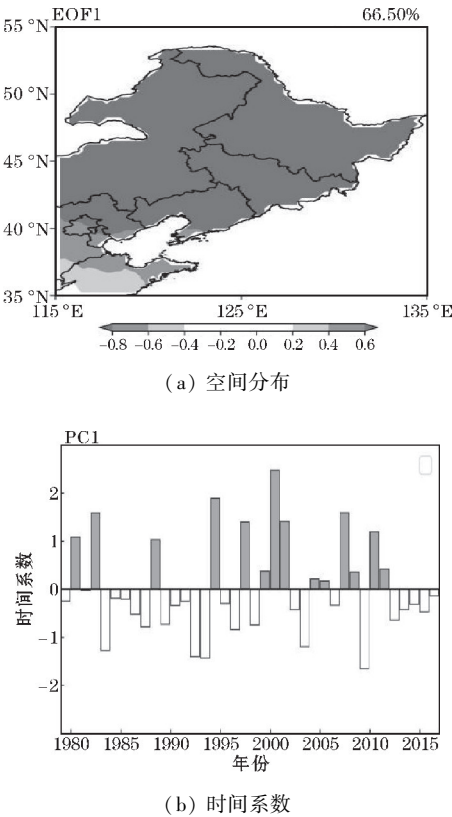


图1 春季北大西洋海温 EOF 分解第一模态

2.2 中国东北地区夏季气温的时空变化特征

表2为中国东北地区夏季平均气温 EOF 分解的前三个模态方差贡献率和累计方差贡献结果,其方差贡献分别为66.49%、15.08%和6.87%,累计方差贡献达到88.44%。

表2 中国东北地区夏季平均气温 EOF 分解前三个模态方差贡献率和累计方差贡献率

模态数	第一模态	第二模态	第三模态
方差贡献率	66.49	15.08	6.87
累计方差贡献率	66.49	81.57	88.44

图2(a)为中国东北地区夏季气温第一模态空间分布,从南到北总体上呈正值分布,说明东北地区夏季气温空间分布具有一致性,呈现一致的升高趋势。进一步从夏季气温第一模态时间系数(图2b)上可以看出,20世纪80年代至今中国夏季气温随时间呈现出“负—正—负”的年代际趋势,具体为20世纪80年代初至90年代中期以负值为主,而20世纪90年代末至21世纪10年代初期以正值为主导,之后又以负值为主。由此可知,中国东北地区夏季气温在1979–2016年经历了先上升后下降的趋势。

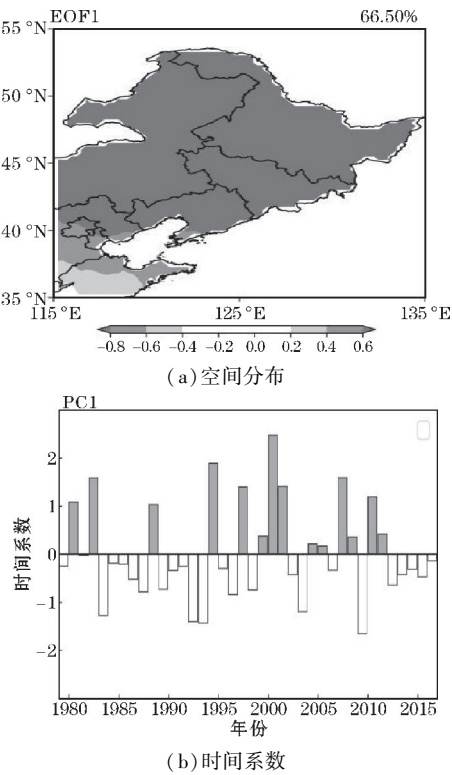


图2 中国东北地区夏季气温 EOF 分解第一模态

3 春季北大西洋海温对中国东北地区夏季气温的影响

3.1 春季北大西洋海温与中国东北地区夏季气温的相关关系

为衡量前期春季北大西洋海温对中国东北地区夏季气温的影响,根据图 1(a)中的三极型海温异常模态关键区定义了北大西洋海温异常指数 NASSTI (North Atlantic sea surface temperature index),  $NASSTI = SST_{(25^{\circ}N \sim 41^{\circ}N, 70^{\circ}W \sim 38^{\circ}W)} - (SST_{(48^{\circ}N \sim 60^{\circ}N, 56^{\circ}W \sim 20^{\circ}W)} + SST_{(12^{\circ}N \sim 22^{\circ}N, 56^{\circ}W \sim 22^{\circ}W)})/2$ 。图 3 为 NASSTI 与东北地区夏季气温的相关系数分布。由图 3 可知,东北地区以负相关为主,显著负相关区主要分布在内蒙古北部、黑龙江西部、以及吉林东部部分地区,最大值达到 0.38,通过 95% 的显著性水平检验,表明春季北大西三极型海温越强,中国东北地区夏季气温越低,反之亦然。

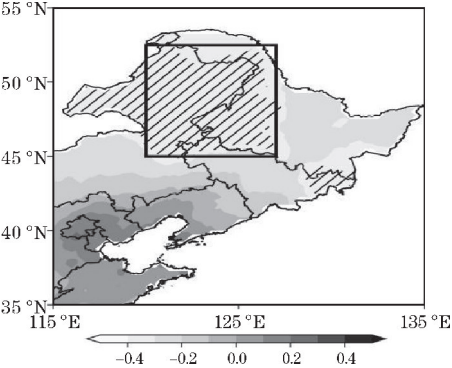


图3 1979-2016 年中国东北地区夏季气温与春季 NASSTI 的相关系数分布 (斜线区代表通过 95% 的显著性水平检验,方框代表关键区域)

为分析春季北大西洋海温与中国东北夏季气温在年际时间尺度上关系,根据中国东北夏季气温与春季 NASSTI 相关系数的显著区域,将夏季气温指数 (summer temperature index, STI) 定义为关键区域 ( $45^{\circ}N \sim 53^{\circ}N, 120^{\circ}E \sim 127^{\circ}E$ ) 气温平均值标准化后时间序列。图 4 为夏季 NASSTI 与 STI 标准化后的时间序列,二者相关系数达到 -0.38,通过 95% 的显著性水平检验,表明二者存在显著负相关变化关系。

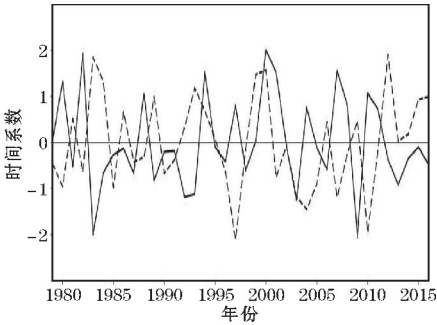


图4 1979-2016 年春季 NASSTI 与 STI 标准化时间序列

进一步将 STI 超过 1 个±标准差的年份定义为夏季平均气温极端高低年以研究中国东北地区夏季极端气温与春季北大西洋海温之间的联系。由表 4 可知,共有 13 年中国东北夏季出现极端气温,其中 8 年为极端高温年,5 年为极端低温年。13 年中共 10 年 NASSTI 与 STI 为异号,比例达到 73%,表明春季 NASSTI 对中国东北地区夏季平均气温和极端气温均存在影响。

表4 中国东北地区夏季平均气温极端高低年

	极端高温	极端低温
STI	1980、1982、1988、1994、2000、2001、2007 和 2010 年	1983、1992、1993、2003 和 2009 年

3.2 春季北大西洋海温影响中国东北夏季气温的可能过程

综上所述,春季北大西洋海温能对中国东北地区夏季气温产生显著影响,为了解其物理过程,对北大西洋海温造成的大气环流异常进行分析。图 5 为 200 hPa 波通量和流函数,500 hPa 位势高度和 850 hPa 水平风场分别回归在春季 NATSSTI 和 STI 上的结果。从图 5(a)可知,与 NASSTI 相关的水平波活动通量表现出明显的准静止波列,当三极型模态为正相位时,存在一支自北大西洋上空向东,经过欧洲至亚欧大陆东部上空传播的波列。同时,流函数交替显示出正负异常中心,北大西洋中纬度地区 and 俄罗斯北部出现流函数正中心,欧洲北部和中国东北地区呈现流函数负中心,表明北大西洋三极型模态通过激发出的准静止波列对影响下游大气环流。500 hPa 位势高度场也存在类似遥相关波列 (图 5c),位势高度在北大西洋中纬度地区和俄罗斯北部表现为正异常,而欧洲北部和中国东北地区为负异常。北大西洋上空表现为 NAO 型大气环流异常,乌拉尔山附近位势高度降低,其东侧高

压脊加深,伴随东亚大槽加深,有利于冷空气向中国东北地区输送,导致气温降低。在东北地区对流层低层,850 hPa风场与高层环流形势相对应,表现为气旋性环流,偏东南风有利水汽输送,利于维持阴雨天气,造成夏季东北地区气温降低。进一步对比春季 NASSTI(图 5a、c、e)

和夏季 STI(图 5b、d、f)分别与对流层中高层环流的回归结果可知,高层200 hPa和中层500 hPa均存在类似的遥相关波列,表明春季北大西洋海温可以通过大气环流异常对中国东北地区夏季气温产生影响,即当春季北大西洋海温偏强时,中国东北地区夏季气温偏低,反之亦然。

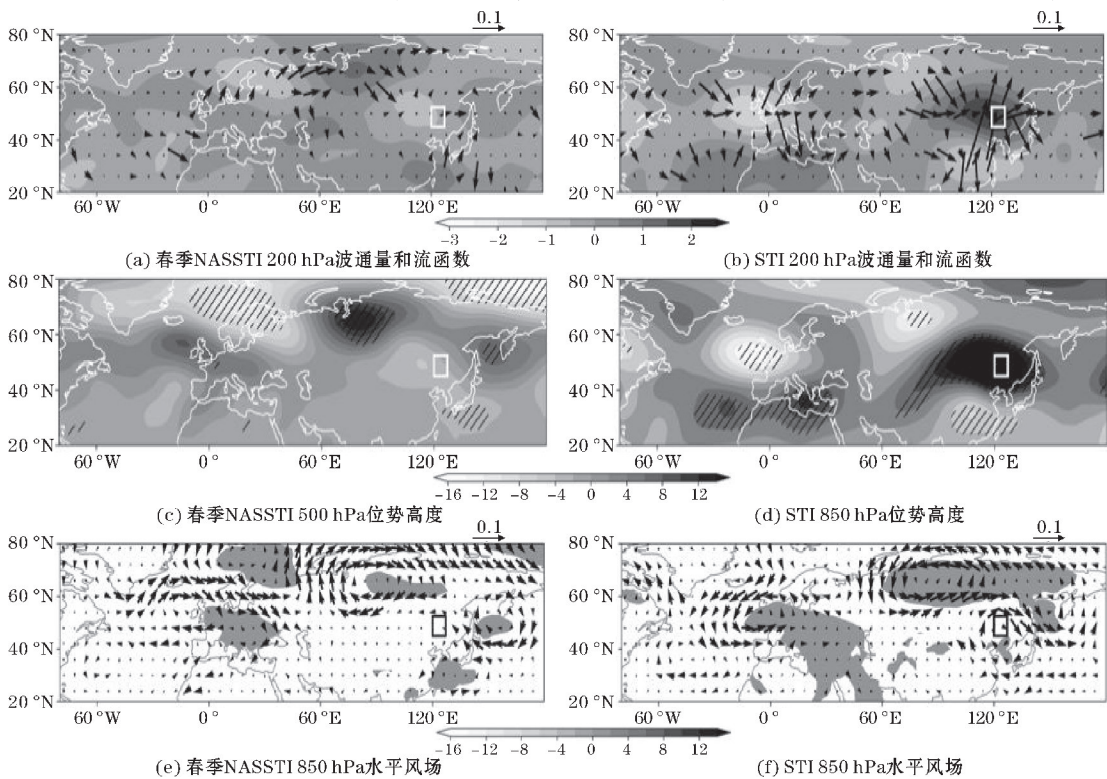


图 5 1979~2016 年春季 NASSTI 和 STI 在 200 hPa 波通量和流函数、500 hPa 位势高度、850 hPa 水平风场的回归结果 (斜线和阴影区代表通过 95% 的显著性水平检验,方框代表中国东北气温关键区域)

为分析春季北大西洋海温导致的大气环流异常如何造成局地气温发生变化,进一步研究垂直运动对地面气温变化的影响。图 6 为春季 NASSTI 和 STI 与对流层中高层 500~200 hPa 平均的垂直速度和涡度平流回归结果。由图 6(a)可以发现,受 NASSTI 影响,中国东北地区关键区域上空对流层中高层以上升运动正异常为主,这与显著降温区相对应。此外,通过 Omega 方程对异常涡度平流进行诊

断发现,中国东北地区上空出现显著正涡度平流(图 6c),表明为保证位势守恒,该地区热成风形成正涡度平流,且伴随大气冷却,而在绝热假设下,垂直上升运动是造成大气冷却的原因。同时,由 STI 与垂直速度、相对涡度的回归结果(图 6b、d)也可发现,其回归模态与 NASSTI 的回归模态相反,再次验证两指数之间的显著负相关关系,即春季 NASSTI 偏强可造成东北夏季气温降低。

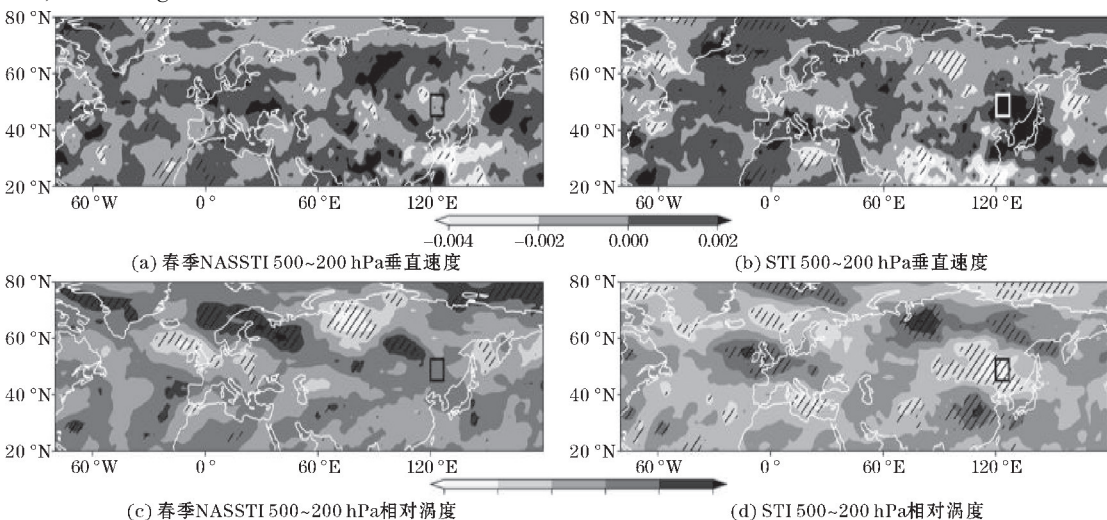


图 6 1979~2016 年春季 NASSTI 和 STI 在 500~200 hPa 平均垂直速度和相对涡度场的回归结果 (斜线区代表通过 95% 的显著性水平检验)

## 4 结论

基于 CN05.1 高分辨率格点气温资料、ERA5 再分析资料和 NOAA 海表温度资料,采用 EOF、相关分析和回归分析等统计诊断方法分析 1979–2016 年前期北大西洋春季海温对中国东北夏季气温的影响及可能的机制,结论如下:

(1)北大西洋春季海温在空间上主要表现为三极型模态,由南至北呈显著的“负—正—负”分布,负中心分别位于北大西洋北部和低纬地区,正中心位于北大西洋中纬度西部地区。时间尺度上存在明显的年际和年代际变化,年代际变化表现出“负—正—负—正”的变化特征。中国东北地区夏季气温整体上呈现一致的增暖趋势,其年代际趋势从 20 世纪 80 年代至今呈“负—正—负”的变化特征。

(2)春季北大西洋海温与中国东北地区夏季气温表现出显著负相关,其中内蒙古北部、黑龙江西部、以及吉林东部部分地区是东北夏季气温变化的敏感区域,当春季三极型海温偏弱时,敏感区域气温偏高,当海温偏强时,敏感区域气温偏低。此外,北大西洋春季海温对东北地区夏季气温极端高低年也存在明显影响。

(3)春季北大西洋三极型海温通过异常加热和冷却作用激发遥相关波列向东传递,造成下游对流层中高层大气环流异常,导致中国东北地区上空位势高度和垂直速度等异常。具体表现为受春季北大西洋三极型海温偏强影响,东亚大槽加深,有利于对流层高层冷空气向中国东北地区输送,导致气温降低;同时,中低层呈现气旋性环流,偏东南风有利水汽向东北地区输送造成夏季东北地区气温降低。此外,东北地区上空受正涡度平流控制,以上升运动为主,伴随着地面气温降低。

## 参考文献:

- [1] 王绍武,赵宗慈. 中国夏季低温冷害[J]. 资源科学,1985 (1):54–59.
- [2] 王敬方,吴国雄. 持续性东北冷夏的变化规律及相关特征[J]. 大气科学,1997,21(5):523–532.
- [3] 郝天依,王式功,尚可政,等. 中国东北地区低温冷害研究进展与展望[J]. 安徽农业科学,2010, (34):19626–19629.
- [4] 王绍武,朱宏. 东亚的夏季低温与厄尔尼诺[J]. 科学通报,1985,30(17):1323–1325.
- [5] 曾昭美,章名立. 热带东太平洋关键区海温与中国东北地区气温的关系[J]. 大气科学,1987,11(4):382–389.
- [6] 崔锦,李辑,张爱忠,等. 东北夏季低温的研究进展[J]. 气象,2007,33(4):3–9.
- [7] 汪秀清,马树庆,袁祝香,等. 东北区夏季低温冷害的长期预报[J]. 自然灾害学报,2006,15(3):42–45.
- [8] 徐瑞珍,张先恭. 我国东部地区夏季气温场与 500 毫巴高度场的关系[J]. 东北夏季低温长期预报文集. 北京:气象出版社,1983:127–134.
- [9] 章少卿,于通江,李方友,等. 北半球极涡面积、强度的季节变化及其与中国东北地区气温的关系[J]. 大气科学,1985,9(2):178–185.
- [10] 章少卿. 100 毫巴极涡和南亚高压的活动与东北夏季低温的关系[J]. 气象学报,1981,39(4):483–494.
- [11] 孙力,安刚,廉毅,等. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析[J]. 气象学报,2000,58(6):704–714.
- [12] 孙力,郑秀雅,王琪. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系[J]. 应用气象学报,1994,5(3):297–303.
- [13] 房一禾,李辑,周放. 东北夏季低温冷害影响因子研究进展及展望[J]. 中国农学通报,2013,29(23):194–200.
- [14] Keeley S P E, Sutton R T, Shaffrey L C. The impact of North Atlantic sea surface temperature errors on the simulation of North Atlantic European region climate[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2012, 138(668):1774–1783.
- [15] Chen Z, Wu R, Wang Z. Impacts of summer North Atlantic sea surface temperature anomalies on the East Asian winter monsoon variability[J]. Journal of Climate, 2019, 32(19):6513–6532.
- [16] Zuo J, Li W, Sun C, et al. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013, 30(4):1173–1186.
- [17] Chen S, Wu R, Chen W. Modulation of spring northern tropical Atlantic sea surface temperature on the El Niño–Southern Oscillation–East Asian summer monsoon connection[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(13):5020–5029.
- [18] Rong X Y, Zhang R H, Li T. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon–ENSO relationship[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(22):2458–2468.
- [19] Rajeevan M, Sridhar L. Inter-annual relationship between Atlantic sea surface temperature anomaly

- lies and Indian summer monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(21): L21704.
- [20] Deng K, Yang S, Ting M, et al. Dominant modes of China summer heat waves driven by global sea surface temperature and atmospheric internal variability[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(12): 3761–3775.
- [21] 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.
- [22] Krüger J, Pilch Kedzierski R, Bumke K, et al. Impact of North Atlantic SST and jet stream anomalies on European heat waves[J]. *Weather and Climate Dynamics Discussions*, 2020(2020): 1–21.
- [23] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [24] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [25] Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and inter-comparisons[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(20): 8179–8205.
- [26] 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.
- [27] Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans; Driving the sea surface temperature[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22(8): 859–881.

## Influence of Spring North Atlantic Sea Surface Temperature on Summer Temperature Variability in Northeast China

LI Yunxiao<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>1,2,3</sup>, YANG Yidian<sup>4</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610225, China; 3. Meteorological Disaster Prediction and Warning Engineering Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610225, China; 4. Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an, 710016, China)

**Abstract:** To investigate the influence of the North Atlantic Ocean in spring on the summer temperature in Northeast China and the possible mechanisms involved, an analysis was conducted based on the 1961–2020 CN05.1 high-resolution grid temperature data, ERA5 atmospheric reanalysis data, and NOAA reconstructed sea surface temperature data. Statistical diagnostic methods including empirical orthogonal decomposition, regression analysis, and correlation analysis were used to examine their relationship. The results indicate: (1) Spring North Atlantic sea surface temperature exhibits a tripolar pattern, with a significant “negative-positive-negative” distribution from south to north. The negative centers are located in the northern North Atlantic and low-latitude areas, while the positive center is in the western mid-latitude North Atlantic. This pattern exhibits interannual and decadal variability, characterized by a “negative-positive-negative-positive” variation. (2) Summer temperature in Northeast China show an overall warming trend, with decadal variability characterized by a “negative-positive-negative” pattern from the 1980s to the present. (3) In northern Inner Mongolia, western Heilongjiang, and parts of western Jilin, there is a significant negative correlation between spring North Atlantic sea surface temperature and summer temperatures. Additionally, spring North Atlantic sea surface temperatures have a noticeable impact on extremely high and low summer temperatures in these regions. (4) Spring North Atlantic sea surface temperature influences the atmospheric circulation in the mid to upper troposphere by exciting Rossby waves downstream. This leads to overall positive vorticity advection in the upper troposphere over Northeast China, upward motion predominating, deepening of the East Asian upper-level trough, and cyclonic circulation in the mid to lower troposphere. This is conducive to maintaining cloudy and rainy weather, resulting in lower summer temperatures in Northeast China.

**Keywords:** climate change; North Atlantic sea surface temperature; summer temperature; temporal and spatial variation; influence mechanism