

杨明珠,陈丽娟,宋文玲. 2013. 黑潮区海温对中国北方初霜冻日期的影响研究. 气象, 39(9):1125-1132.

黑潮区海温对中国北方初霜冻日期的影响研究^{*}

杨明珠 陈丽娟 宋文玲

国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 利用站点观测和再分析资料研究了黑潮海温(SST)与中国北方初霜冻日期的关系。结果表明,前期夏季各月及初秋黑潮区 SST 异常变化和中国北方秋季初霜冻日期的关系十分显著。当黑潮区 SST 偏高(低)时,华北大部、黄淮北部、河套北部、内蒙古中部和东北部、环渤海区域初霜冻日期偏晚(早)。进一步分析显示,夏末和初秋黑潮区 SST 异常主要通过影响其上空初秋及秋季局地大气环流系统,对华北、黄淮北部等地区初霜冻造成影响。当黑潮区 SST 偏高(低)时,我国华北至日本以东区域上空 500 hPa 高度场偏高(低),低层风场则出现东南(西北)风,从而导致东亚大槽偏弱(强),来自北方的冷空气活动势力被削弱(增强),从而导致上述区域初霜冻发生较常年偏晚(早)。

关键词: 黑潮区 SST 指数, 初霜冻日期, 环流系统

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 09. 006

Impact of Kuroshio SST on First Frost Dates in Northern China

YANG Mingzhu CHEN Lijuan SONG Wenling

Laboratory for Climate Studies of CMA, National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: The relationship between Kuroshio sea surface temperature index (KuSSTI) and the first frost dates (FFDs) in northern China are analyzed on the basis of observation data and reanalysis data. The results show that the monthly KuSSTIs of respective months of summer and early autumn have significant impacts on FFDs in northern China. The warmer (cooler) the Kuroshio SSTs are, the later (earlier) FFDs in North China, Huang-Huai Region, northern Hetao Region, middle and northeastern Inner Mongolia and the region around the Bohai Sea are. Further analysis indicates that the warm (cold) Kuroshio SST anomalies significantly influence the general circulation from northern China, Japan Sea to north Pacific, increasing (decreasing) the 500 hPa geopotential height and weakening (strengthening) the East Asia trough. The lower level wind anomaly shows southeast (northwest) direction over North China and Huang-Huai Region, weakening (strengthening) the cold wave from the north, so that the FFDs in North China and Huang-Huai Region come later (earlier) than normal.

Key words: Kuroshio SST index, the first frost date, general circulation

引 言

霜冻是一种严重的农业气象灾害,发生地区几

乎遍及全国,严重影响粮食产量。尤其是在中国北方地区,当初霜出现偏早时,常常会影响农作物籽粒成熟度,导致农业减产,因此提供准确及时的初霜冻预测信息,有利于帮助用户尤其是农业生产部门采

^{*} 国家科技支撑项目(2009BAC51B05)、国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB955902)、公益性行业(气象)科研专项(GY-HY201306018 和 GYHY201306070)、国家自然科学基金面上项目(41275073)及中国气象局短期气候预测创新团队共同资助
2012 年 12 月 17 日收稿; 2013 年 5 月 3 日收修定稿
第一作者:杨明珠,主要从事气候异常诊断和预测方法研究. Email: yangmz@cma. gov. cn
通信作者:陈丽娟,主要从事气候异常诊断和预测方法研究. Email: chenlj@cma. gov. cn

取适当的措施减轻灾害损失。

已经有大量的研究分析了初霜、霜期和霜冻的气候特征(杨克明等,1999;李想等,2005;林纾等,2007;叶殿秀等,2008;王国复等,2009;韩荣青等,2010;李辑等,2010;温晶等,2010;钱锦霞等,2010;王业宏等,2011),时间尺度包括年际变化、年代际变化和气候变化趋势,空间尺度包括全国或者区域/省级,还有部分研究从天气角度分析了温度对结霜的影响(温显罡等,2012),然而从气候学角度探讨造成初霜冻日期早晚变化的气候趋势预测工作较少,尤其是预测用的前期信号十分匮乏,也缺少有效的预测方法。即使是尝试在业务中应用的一些可能影响初霜冻出现时间的预测因子,也需要审视在气候变化背景下预测对象和预测因子的关系是否依然稳定或显著。

对于月-季节尺度的短期气候预测而言,海表温度(SST)异常是一个重要的外强迫信号,尤其是热带太平洋海温异常导致的海气相互作用可能对东亚季风和我国天气气候造成不同程度的影响。近期一些研究表明,我国近海的海温异常也对我国区域天气气候异常有影响。例如东海及附近海域 SST 的变化与东亚冬季风年代际减弱具有明显的关系(蔡榕硕等,2011),也有研究认为中国近海的海温更多是被动地随气温改变(康丽华等,2009),但海温与中国秋、冬季气温确实具有密切的关系。那么在气候变暖的背景下,中国近海海温对秋季气候,包括秋季初霜冻时间的早晚究竟起到什么作用值得进一步研究。

本文首先对比了气候值改变对中国北方地区初霜冻日期气候特征的影响,简要分析了其整体趋势,比较了气候平均值改变后,ENSO 循环对初霜冻日期早晚影响的变化。通过分析发现黑潮区 SST 对北方部分地区初霜冻出现早晚有显著的关系,从而进一步分析了黑潮区 SST 异常影响北方初霜冻时间早晚的可能途径。

1 资料

本文采用的初霜日期为国家气候中心常规业务秋冬季初霜冻日期标准(韩荣青等,2010):以地面 0 cm 最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的第一天定义为初霜日,初霜日期资料为中国北方 30°N 以北的台站资料,其中 1961—2011 年有 188 个站无缺测,本文选取该 188

个站(图 1)进行分析。

所使用的环流和海温资料为:(1) NCEP/NCAR 从 1948 年 1 月至 2011 年 12 月的再分析格点资料(Kalney 等,1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;(2)黑潮区海温指数为国家气候中心整编的业务用特征量指数,取($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $125^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)范围内海温空间平均值。

主要采用的方法有:Pearson 相关分析方法、合成方法以及经验正交函数分解方法 EOF。

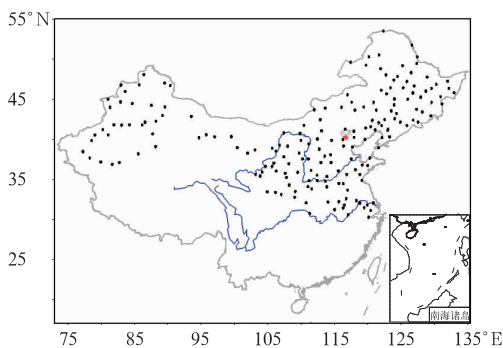


图 1 中国北方地区初霜冻日期分析
代表站分布

Fig. 1 Distribution of representative observation stations for the analysis of the first frost dates in northern China

2 中国北方初霜冻日期的气候特征

1981—2010 年气候平均初霜冻日期(图 2a)显示,中国北方初霜冻出现日期由北往南顺次出现,东北大部、内蒙古中部和东部、新疆北部局部、西北部于 9 月中旬或之前出现初霜冻,其中黑龙江西北部局部、内蒙古东北部、新疆北部的东北部和西北部局部地区在 9 月上旬或之前出现初霜冻;东北中部大部、内蒙古西部局部、新疆中部、西北东部、华北北部在 9 月下旬出现初霜冻;东北南部、华北大部、西北东南部、黄淮北部等地区在 10 月中旬至下旬出现初霜冻,黄淮南部在 11 月上旬出现初霜冻,黄淮以南的地区在 11 月中旬之后发生初霜冻。即北方大部出现霜冻的气候值处于 9—11 月期间,当然每年的年际变化也比较大。

将 1981—2010 年初霜冻日期气候值与 1971—2000 年气候值比较(图 2b),中国北方初霜冻除新疆东北部局部和黑龙江北部局部区域外,发生日期整体偏晚,新疆北部、西北中部和东南部、内蒙古西部、

华北大部平均推后 3~5 d,其中内蒙古西部、甘肃中部、新疆东北部推后 5~10 d。

对 1961—2010 年初霜冻日期进行经验正交函数分解 (EOF), EOF 第一模态的方差贡献为 58.6%,其特征值一致为负值的空间分布,时间系数 (图 3)在 20 世纪 90 年代之前为正值,之后为负值,表明中国北方初霜冻日期在 90 年代之后具有整体

趋于偏晚的特征。由于处于偏晚的气候背景下,采用 1981—2010 年平均作为气候值是否会影响对初霜日期影响系统的诊断结果? 由于海洋异常 (如 ENSO 事件)对大气环流及我国年际气候异常具有重要的影响 (贾小龙等,2011),下面首先分析短期气候预测重要的外强迫因子,即 ENSO 循环对初霜日期早晚的可能影响。

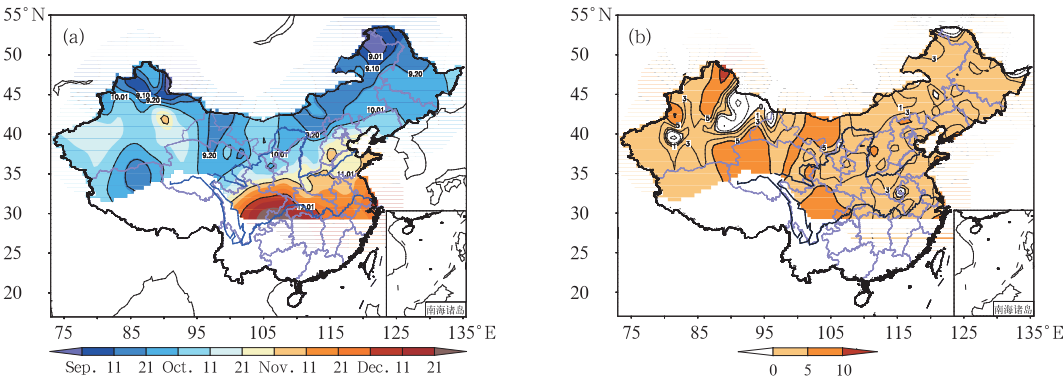


图 2 我国北方初霜冻日(a)1981—2010 年平均气候值,(b)1981—2010 年平均与 1971—2000 年平均值之差 (单位: d)

Fig. 2 The first frost dates averaged from 1981 to 2010 (a), and the differences of average values from 1981 to 2010 and from 1971 to 2000 (unit: d)

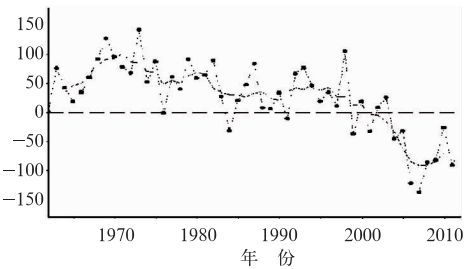


图 3 中国北方初霜冻日期 EOF 分析第一模态时间系数

Fig. 3 The time coefficients of EOF one for the first frost dates of northern China

3 ENSO 对初霜冻日期的可能影响

从前期各季和各月 Nino3.4 指数与中国北方初霜冻日期的相关分析来看,中东太平洋 SST 与中国北方初霜冻的日期关系并不显著。根据国家气候中心对 ENSO 的定义 (李晓燕等,2000),采用 1981—2010 年平均值,1961—2011 年厄尔尼诺、拉尼娜事件分别有 13 个,拉尼娜事件到秋季结束或仍

然持续的年份有 18 年:1962、1963、1964、1967、1970、1973、1974、1975、1984、1985、1988、1989、1995、1998、1999、2000、2007 和 2010 年;秋季处于厄尔尼诺暖事件的年份有 11 年:1963、1965、1969、1972、1982、1987、1991、1997、2002、2006 和 2009 年。拉尼娜年初霜冻日期正距平频次合成分析表明 (图略),中国北方大部初霜冻日期偏早,其中东北大部、华北大部、西北大部初霜冻日期偏早年份居多,而偏晚年份偏多的区域主要在黑龙江西北部局部、内蒙古东北部和中部局部、新疆东部等地。厄尔尼诺年初霜冻日期正距平频次合成分析显示 (图略),除东北西部北部、内蒙古东北部和中部局部以及新疆东北部偏晚外,中国北方其余大部偏早的年份居多。分析 20 世纪 80 年代前后拉尼娜/厄尔尼诺年的初霜冻日期,结果显示,20 世纪 80 年代之前,无论是拉尼娜年还是厄尔尼诺年,我国北方大部初霜冻日期均偏早 (图略);而 80 年代之后的拉尼娜年 (图 4a),除了东北中部、内蒙古中西部、华北东部、新疆西部和西北东部局部等地偏早外,中国北方大部地区初霜冻偏晚的可能性较大,而厄尔尼诺年 (图 4b)中国北方大部初霜冻偏早的可能性较大,偏

晚的区域仅在东北南部和东部局部、新疆中南部等地。因此,采用 1981—2010 年平均值之后,ENSO 循环对于初霜冻的影响在 1980 年之前没有参考意

义,而 20 世纪 80 年代之后发生的 ENSO 事件对初霜冻日期出现早晚的区域在华北大部、东北中部和南部、内蒙古中东部区域的影响差异不明显。

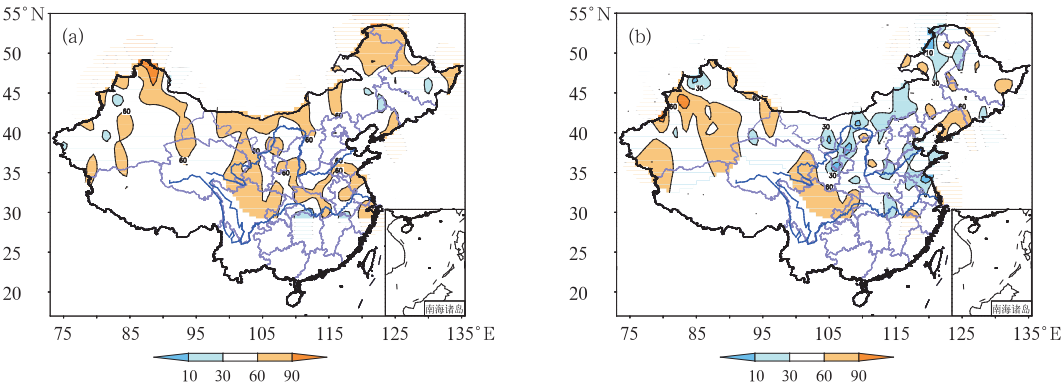


图 4 1980 年代之后拉尼娜年(a)和厄尔尼诺年(b)中国北方初霜冻日期距平频次合成分布(采用 1981—2010 年气候值)

Fig. 4 The positive anomalies frequency composite distributions of La Nina years (a) and El Nino years (b) for first frost dates in northern China (climate: 1981—2010)

4 黑潮区 SST 异常与中国北方初霜冻日期的可能联系

上面的相关和合成分析表明,即使是 20 世纪 80 年代之后 ENSO 循环对初霜冻影响显著的阶段,其对中国北方初霜冻的指示意义也是十分有限,尤其对于华北、内蒙古中部、东北、黄淮北部等中国北方的东部区域,在拉尼娜年和厄尔尼诺年对初霜日期的早晚影响差别不明显。有研究表明,中国近海的 SST 变化与东亚冬季风的关系密切(蔡榕硕等, 2011),东亚季风的强弱明显受到纬向海陆热力差异的影响(郭其蕴,1983;赵汉光等,1996;祝从文等, 2000;孙秀荣等,2002),作为东亚季风系统的直接下垫面,西北太平洋及我国近海 SST 对东亚局地环流的影响可能更加直接。监测表明,2012 年夏季中东太平洋 SST 为近中性状态,作为大气的外强迫信号相对较弱,而黑潮区 SST 在春、夏季持续为显著的负异常,同时亲潮区 SST 为显著正异常分布,这些区域 SST 异常是否会影响局地环流并对我国秋季气候产生影响,值得进一步分析。初步计算显示黑潮区 SST 与中国北方初霜冻日期具有很好的相关,本文将探讨黑潮区 SST 对中国初霜冻的影响途径。以下分析采用 1981—2010 年平均作为气候值。

4.1 黑潮区 SST 指数与中国北方初霜冻日期的关系

黑潮区 SST 指数于 20 世纪 90 年代后期进入偏暖阶段(图 5),对应着中国北方初霜冻日期也进入偏晚的阶段(图 3)。图 6 为 8 和 9 月黑潮区 SST 与中国北方初霜冻日期的相关,在华北大部、黄淮北部、河套北部、内蒙古中部和东北部、环渤海区域均稳定超过显著性检验水平,实际上在前期 6 和 7 月也有类似的相关分布(图略)。因此,相关分析显示前期及同期黑潮区 SST 与初霜冻日期具有很好的相关,并且相关区域稳定通过显著性检验水平。

黑潮区 SST 在 5—12 月的自相关系数(表 1)均

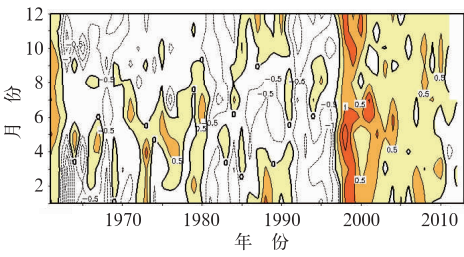


图 5 1961 年 1 月至 2011 年 7 月黑潮区 SST 指数时间演变图(阴影区为 KuSSTI>0 的区域)

Fig. 5 Variation of Kuroshio SST index (KuSSTI) during January 1961 to July 2011 (KuSSTI>0 are shaded)

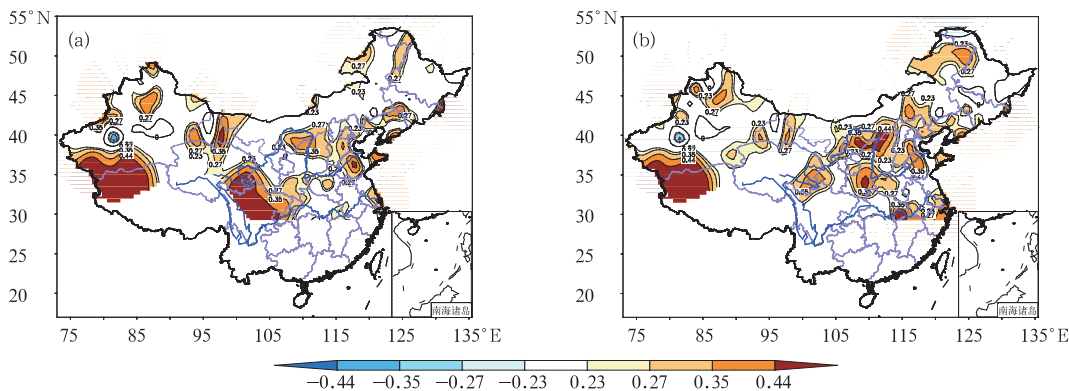


图 6 1961—2011 年 8 月(a)及 9 月(b)黑潮区 SST 指数与中国北方初霜冻日期的相关分布
(阴影区由浅至深依次为相关性通过 0.10、0.05、0.01、0.001 显著性检验的区域)

Fig. 6 Correlations of Kuroshio SST index (KuSSTI) in August (a) and September (b)
with first frost dates in northern China

(The shaded areas from light to dark denote significant level exceeding 0.1, 0.05, 0.01 and 0.001 respectively)

表 1 1961—2011 年 5—12 月黑潮区 SST 自相关系数

Table 1 Self correlations of monthly KuSSTI from May to December during 1961—2011

月份	5	6	7	8	9	10	11	12
5	1	0.632	0.450	0.449	0.470	0.458	0.437	0.443
6		1	0.758	0.545	0.419	0.459	0.471	0.523
7			1	0.677	0.499	0.432	0.327	0.370
8				1	0.642	0.476	0.376	0.293
9					1	0.712	0.548	0.376

注:加粗字体为相关通过 0.001 显著性水平检验的值
Bold numbers denote correlations exceeding 0.001 significant level test

达到或超过 0.05 显著性水平检验,表明黑潮区 SST 异常在月际变化上具有很好的持续性。因此黑潮区 SST 异常可以作为一个先兆信号来尝试预测中国北方初霜冻日期,这其中的可能机制值得进一步分析。

4.2 黑潮区 SST 指数对 500 hPa 环流的影响

8 和 9 月黑潮区 SST 指数与 9 月及秋季 500 hPa 高度场的相关显示(图 7),无论是 8 月还是 9 月,高相关区从华北、黄淮向东伸展到北太平洋呈带状分布,达到 0.05 的显著性检验水平,表明当黑潮区 SST 偏暖(冷)时,有利于从中国华北区域至北太平洋位势高度场偏高(低)。其中在我国华北至日本群岛附近的相关区更加显著,9 月黑潮区 SST 指数与同期 500 hPa 高度场相关在上述区域达到 0.001 的显著性检验水平,而该区域是东亚大槽活动的区域,即黑潮区 SST 暖(冷)时,东亚大槽偏弱(强),从而有利于造成北方南下的冷空气活动偏弱

(强),进而造成华北、黄淮、内蒙古中部、环渤海区域初霜冻日期偏晚(早)。

黑潮区上空(30°~45°N、120°~160°E)范围内 500 hPa 高度场与黑潮区 SST 具有很好的相关。对该区域的空间平均值进行逐月自相关分析(表 2),结果显示,6 月和秋季各月、8 月和 9、10 月,9 月与 10 月的高度场具有较好相关,但其他月相关性不显著,因此可见黑潮区上空大气环流的月季变化持续性较差。从黑潮区 SST 的自相关分析来看,黑潮区上空大气环流的变化更多受到 SST 异常的影响。

4.3 黑潮区 SST 对低层风场的影响

初霜发生早晚的区域与冷空气活动范围、风场变化密切相关。图 8a 为 9 月 850 hPa 风场与前期 8 月黑潮 SST 指数的相关分布,中国江南、江淮、黄淮、华北至内蒙古中部区域为显著相关分布,矢量风为东南方向;中国东部和北方大部为正的经向风相关分布。9 月黑潮区 SST 指数与秋季 850 风场的相

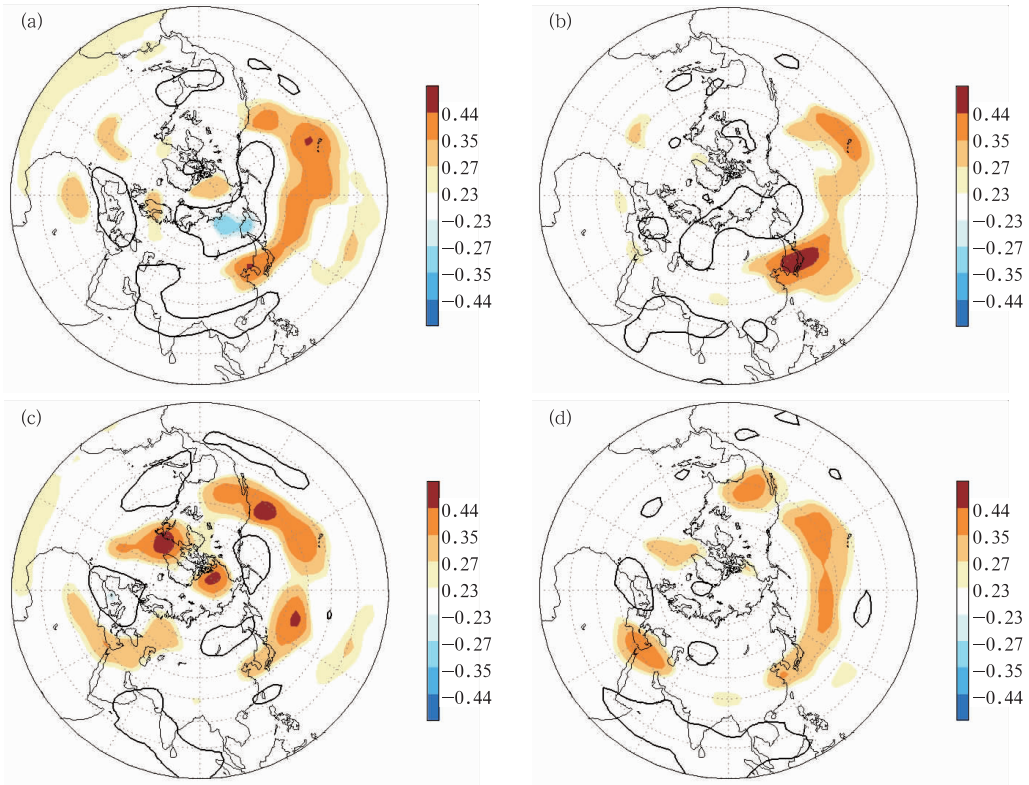


图 7 黑潮区 SST 指数与 500 hPa 位势高度场相关分布

(a) 8 月黑潮区 SST 与 9 月 500 hPa 位势高度场, (b) 9 月黑潮区 SST 与 9 月 500 hPa 位势高度场, (c) 8 月黑潮区 SST 与秋季 500 hPa 位势高度场, (d) 9 月黑潮区 SST 与秋季 500 hPa 位势高度场
(阴影区由浅到深依次为相关性通过 0.10、0.05、0.01、0.001 显著性检验的区域)

Fig. 7 Correlation of KuSSTI and H_{500} during 1961–2011

(a) KuSSTI in August and H_{500} in September, (b) KuSSTI and H_{500} in September, (c) KuSSTI in August and H_{500} in SON, (d) KuSSTI in September and H_{500} in SON
(The shaded areas from light to dark denote significant level exceeding 0.10, 0.05, 0.01 and 0.001 respectively)

表 2 1961—2011 年 5—12 月 H_{500} ($30^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim160^{\circ}\text{E}$) 自相关系数

Table 2 Self correlations of monthly H_{500} ($30^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim160^{\circ}\text{E}$) from May to December during 1961–2011

月份	5	6	7	8	9	10	11	12
5	1	0.186	−0.004	0.012	0.094	0.301	−0.003	0.077
6		1	0.380	0.143	0.400	0.411	0.304	0.239
7			1	0.240	0.222	0.207	−0.076	−0.035
8				1	0.410	0.357	−0.051	−0.212
9					1	0.641	0.213	0.012

加粗字体为相关通过 0.05 显著性检验的值
Same as Table 1, but for 0.05

关分布(图 8b)与对 9 月的分布相似,同样对我国东部和北方区域具有显著的影响。实际上,前期 6、7 月的相关场与此类似(图略)。相关分析表明,邻近及同期黑潮区 SST 偏暖(冷)时,初秋和秋季我国东

部和北部区域易受东南(西北)异常环流的影响,这种作用使得北方冷空气势力得以削弱(增强),从而有利于华北及黄淮地区的初霜冻发生较常年偏晚(早)。

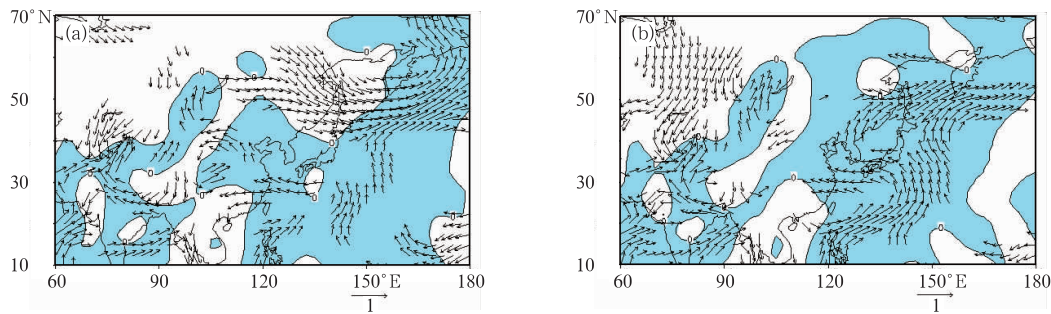


图 8 8 月黑潮区 SST 指数与 9 月(a)及秋季(b)850 hPa 风场的矢量相关图，
仅显示出通过 0.05 显著性检验的相关矢量分布
(阴影区为经向相关>0 的区域)

Fig. 8 Correlation vectors between KuSSTI in August and winds at 850 hPa
in September (a) and SON (b)
(Shaded area denotes longitudinal correlations pointing to north)

5 小 结

本文对中国 30°N 以北的 188 站初霜冻日期采用 1981—2010 年平均值的气候分布状况进行了分析,并与 1971—2000 年平均值进行了对比,进一步分析了初霜冻日期在采用 1981—2010 年气候值后与 ENSO 事件关系的变化,最后从外强迫异常影响的角度,发现黑潮海温异常对我国北方初霜冻日期有一定的影响,探讨了其中的可能机制。主要结论如下:

- (1) 1981—2010 年初霜冻日期气候值显示,我国北方初霜冻日期由北往南次第出现,东北中北部、内蒙古、西北新疆中北部在 9 月发生初霜冻,东北南部、华北大部、西北东南部、黄淮北部在 10 月发生,而黄淮以南区域在 11 月之后发生初霜冻,主要分布在秋季时节。与 1971—2000 年的气候平均值相比,中国北方初霜冻日期除新疆东北部局部和黑龙江北部局部外整体偏晚,该趋势在 20 世纪 90 年代之后显著。
- (2) 采用 1981—2010 年平均值之后,ENSO 循环对于初霜冻日期的影响在 1980 年之前没有参考意义;而 20 世纪 80 年代之后发生的 ENSO 事件,对初霜冻日期出现早晚的区域在华北大部、东北中部和南部、内蒙古中东部区域的影响差异不显著,缺少较好的指示意义。
- (3) 夏季各月及初秋黑潮区 SST 指数与华北

大部、黄淮北部、河套北部、内蒙古中部和东北部以及环渤海区等区域具有稳定的显著正相关关系。进一步的分析表明,夏末和初秋黑潮区 SST 主要通过影响其上空初秋及秋季局地大气环流系统,对中国北方东部初霜冻造成影响,当黑潮区 SST 偏高(低),我国东部及北方区域至日本以东区域上空 500 hPa 高度场偏高(低),低层风场易出现东南(西北)风,从而导致东亚大槽偏弱(强),来自北方的冷空气活动势力得以削弱(增强),从而导致上述区域初霜冻发生较常年偏晚(早)。

(4) 黑潮区 SST 异常在月际变化上具有很好的持续性,而黑潮区上空大气环流的月际变化显示持续性较低,因此黑潮区 SST 异常可以作为一个先兆信号来尝试预测中国北方初霜冻日期。

上述分析是在未去趋势情况下得到的结果。那么这种关系是否由于气候变暖背景下初霜冻日期、海温及环流的线性趋势变化造成的虚假信息?我们对初霜冻日期、黑潮区海温指数和环流等均去趋势后,再进行相关分析,结果表明:黑潮区海温与我国北方东部初霜冻日期的显著相关区范围稍有缩小,但中心位置与未去趋势前一致;环流场上,黑潮区与华北、黄淮向东伸展到北太平洋的相关仍然通过显著性检验(图略)。分析表明,尽管在气候变暖背景下,我国北方初霜冻日期具有推后趋势、黑潮区海温有升温趋势、环流场有增高趋势,但黑潮区海温异常与环流的相关关系并不是各自线性趋势变化造成的虚假关系。

本文是探寻影响我国北方初霜冻日期先兆信号的初步工作,在机理和预测模型建立方面有待做深入研究。

参考文献

蔡榕硕,陈际龙,谭红建. 2011. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系. 气候与环境研究, 16(1):94-104.

郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析. 地理学报, 38(3):207-217.

韩荣青,李维京,艾婉秀,等. 2010. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业的影响. 地理学报, 65(5), 525-532.

贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等. 2011. 2010 年海洋和大气环流异常对中国气候的影响. 气象, 37(4):446-453.

康丽华,陈文,王林,等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系. 气候与环境研究, 14(1):45-53.

李辑,严晓瑜,王颖. 2010. 辽宁省近 50 年霜的气候变化特征. 气象, 36(11):38-45.

李想,陈丽娟,张培群. 2005. 1954—2005 年长江以北地区初霜期变化趋势. 气候变化研究进展, 4(1):21-25.

李晓燕,翟盘茂. 2000. ENSO 事件指数与指标研究. 气象学报, 58(1):102-109.

林纾,陈丽娟,王润元,等. 2007. 西北地区初终霜冻的气候特征分析. 地球科学进展, 22(特刊):133-139.

钱锦霞,张霞,张建新,等. 2010. 近 40 年山西省初终霜日的变化特征. 地理学报, 65(7):801-808.

孙秀荣,陈隆勋,何金海. 2002. 东亚海陆热力差指数及其与环流和降水的年际变化关系. 气象学报, 60(2), 164-172.

温晶,胡丽甜,李霞,等. 2010. 近 55 年广州霜冻的年际和年代际变化特征. 广东气象, 32(2):1-3.

温显罡,马舒庆,杜波,等. 2012. 草温与露点温度对结露和结霜指示性分析. 气象, 38(6):745-750.

王国复,许艳,朱燕君,等. 2009. 近 50 年我国霜期的时空分布及变化趋势分析. 气象, 35(7):61-67.

王业宏,高惠君,张璇. 2011. 山东省霜冻的气候变化特征分析. 安徽农业科学, 39(15):9062-9076.

杨克明,陈秀凤,王东升,等. 1999. 东北地区初霜冻的天气气候特征. 气象, 25(6):13-18.

叶殿秀,张勇. 2008. 1961—2007 年我国霜冻变化特征. 应用气象学报, 19(6):661-665.

赵汉光,张先恭. 1996. 东亚季风和我国夏季雨带的关系. 气象, 22(4):8-12.

祝从文,何金海,吴国雄. 2000. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系. 气象学报, 58(4):391-402.

Kalney E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471.