

# 中国北方农牧交错带春季风速的年际变化 与冬季海温的关系

胡毅鸿<sup>1,2,3</sup>, 龚道溢<sup>1,2,3\*</sup>, 毛睿<sup>1,2,3</sup>, 石晓雪<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 利用中国北方农牧交错带 1979—2016 年 64 个气象台站的逐日风速资料、ERSST 海温数据以及 ERA-Interim 再分析资料, 探讨了前期冬季海温与北方农牧交错带春季风速年际变化的关系。研究表明, 北方农牧交错带春季的风速存在强烈的逐年波动, 年际方差占总方差的比例为 36%。影响农牧交错带春季风速年际变化的前期冬季海温在北大西洋 20°N~65°N 区域呈现“负、正、负”的异常分布, 在北太平洋 10°N~55°N、130°W~180°区域呈现“负、正”的异常分布。冬季的海温异常与研究区春季风速年际变化联系的桥梁是北半球大尺度大气环流的异常。当北大西洋海温从高纬至低纬呈现“负、正、负”的异常分布时, 从北大西洋至东亚位势高度呈明显的“正、负、正、负”的波列特征; 当北太平洋海温从高纬至低纬呈现“负、正”的异常分布时, 从北太平洋至东亚位势高度呈“负、正、负、正、负、正”的三波型分布。二者均能影响东亚地区春季大气环流的变化, 导致东亚地区上空产生一个异常的气旋性环流, 该气旋性环流在对流层中层与低层均存在, 是造成研究区风速变化的直接原因。冬季海温与研究区春季风速的显著相关, 说明冬季海温对农牧交错带春季风速的年际变化具有超前指示意义。利用北大西洋和北太平洋海温异常中心区的冬季海温作为预报因子, 建立春季风速预报模型, 可以解释风速年际变化的 32%, 回报交叉验证结果表明, 海温与风速的时间滞后关系是显著和稳健的。

**关键词:** 风速; 海温; 年际变化; 北方农牧交错带

台站观测数据表明, 在过去几十年里中国近地面风速呈现多尺度的变化, 除有长期的下降趋势之外, 还存在强烈的年代际和年际波动(Jiang et al, 2010; Guo et al, 2011; Lin et al, 2013)。不同时间尺度的变化与不同的影响因子有关。影响风速变化的因子主要涉及 2 个方面: 一是大气环流的变化, 二是人类活动的影响(赵宗慈等, 2016; Wu et al, 2018)。其他的气候因子, 特别是海温, 也对中国区域气候变化有显著影响。以往的研究表明, 在厄尔尼诺期间, 由于赤道西太平洋海温持续偏低以及沃克环流减弱导致对流减弱, 冷却异常激发出大气罗

斯贝波, 在其西北侧形成反气旋性异常环流, 西北太平洋异常反气旋是连接 ENSO 和东亚气候的重要桥梁, 在风—蒸发—海温正反馈机制的作用下, 该异常反气旋可以从冬季持续到次年的夏季, 引起东亚季风的改变(Chang et al, 2000; Wang et al, 2000; Chou et al, 2003; 张人禾等, 2017)。印度洋增暖通过激发大气开尔文波, 导致西北太平洋低层产生异常的反气旋, 造成西太平洋副热带高压位置偏南, 强度增强, 使中国东亚季风偏强(Li et al, 2008; Xie et al, 2009; Yang et al, 2010; Hu et al, 2011)。北大西洋海温三极子可在大西洋—欧亚大陆地区激发

收稿日期: 2019-03-04; 修订日期: 2019-03-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41621061); 国家重点研发计划项目(2016YFA0602401)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41621061; National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFA0602401.]

第一作者简介: 胡毅鸿(1994—), 女, 湖南益阳人, 硕士生, 主要从事气候变化研究。E-mail: hyh@mail.bnu.edu.cn

\*通信作者简介: 龚道溢(1969—), 男, 湖南石门人, 博士, 教授, 主要从事气候变化及影响研究。

E-mail: gdy@bnu.edu.cn

引用格式: 胡毅鸿, 龚道溢, 毛睿, 等. 2019. 中国北方农牧交错带春季风速的年际变化与冬季海温的关系 [J]. 地理科学进展, 38(5): 709-717. [Hu Y H, Gong D Y, Mao R, et al. 2019. Relationships between interannual variations of spring winds in the agro-pastoral transitional zone of Northern China and winter sea surface temperature. Progress in Geography, 38(5): 709-717.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.05.008

出一支纬向遥相关波列,从而影响东亚地区的气候,研究表明,东亚夏季风与春-夏北大西洋海温三极子显著相关(Wu et al, 2009; 武炳义等, 2011; Zuo et al, 2013)。

作为对全球气候变化响应十分敏感的半干旱区,中国北方农牧交错带的生态环境十分脆弱。春季是该地区风速最大、也是沙尘活动最频繁的一个季节,风速的变化对该地区风能资源、土壤风蚀、沙尘活动以及空气质量等具有重要影响。以往对风速变化的研究,多关注其长期下降趋势及可能的影响因子,包括全球变暖、土地利用变化、城市化和人为气溶胶排放等(Jacobson et al, 2006; Xu et al, 2006; 陶寅等, 2016; Wu et al, 2017)。值得强调的是中国北方地区风速的逐年变化是非常突出的,而风速年际尺度变率的影响因子关注较少。本文基于台站观测、海温以及大气环流资料,针对北方农牧交错带春季风速的年际变化,分析其与前期冬季海温的联系以及相应的大气环流变化。

## 1 资料与方法

对于中国北方农牧交错带的界定,由于不同的研究目的和划分指标,其范围在空间分布上存在一定的差别,但主体部分基本一致,为黄土高原北部和内蒙古高原东南缘(赵哈林等, 2002; 肖鲁湘等, 2008)。本文主要考虑土地利用的空间分布等来划定北方农牧交错带的范围(史培军, 2009),见图1a,总面积约为72.6万km<sup>2</sup>。气象台站的观测资料来源于中国气象局国家气象科学数据共享服务

平台(<http://data.cma.cn/site/index.html>),取自其中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。为保证数据质量,综合考虑站点迁移的情况,在北方农牧交错带范围内选取了时间连续性好、数据缺测少(总缺测天数少于10 d)的64个气象站点1979—2016年春季10 m高度的逐日平均风速资料。海温资料取自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的扩展重建海温ERSSTv5,空间分辨率为2°×2°(Huang et al, 2017)。500 hPa位势高度、850 hPa风场来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA-Interim资料,空间分辨率为2°×2°(Dee et al, 2011)。

本文采用Butterworth数字滤波器对相关气象要素进行高通滤波来提取其年际变化,截断周期取10 a,只保留周期为10 a以下的部分。统计分析方法包括回归分析与相关分析,显著性检验采用 $t$ 检验,考虑到气候要素均进行了高通滤波,因此有效自由度简单估计为样本数减去2。利用leave- $k$ -out交叉验证对建立的多元线性回归方程模型进行评估(Arlot et al, 2010)。从 $n$ 个样本中留 $k$ 个样本作为验证数据,利用剩余的 $n-k$ 个样本进行拟合,建立回归方程,利用该回归方程计算 $k$ 个样本的回报值,如此重复 $n/k$ 次,直到每个样本都得到回报值,再比较回报值与观测值之间的相关系数和均方根误差以评价模型的回报能力。为了防止过拟合以及数据的浪费,一般 $k$ 值取 $n/10 \sim n/5$ (Wilks, 2011)。均方根误差(RMSE)的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{obs,i} - u_{mod,i})^2} \quad (1)$$

式中: $u_{obs,i}$ 表示风速的观测值; $u_{mod,i}$ 表示根据回归方

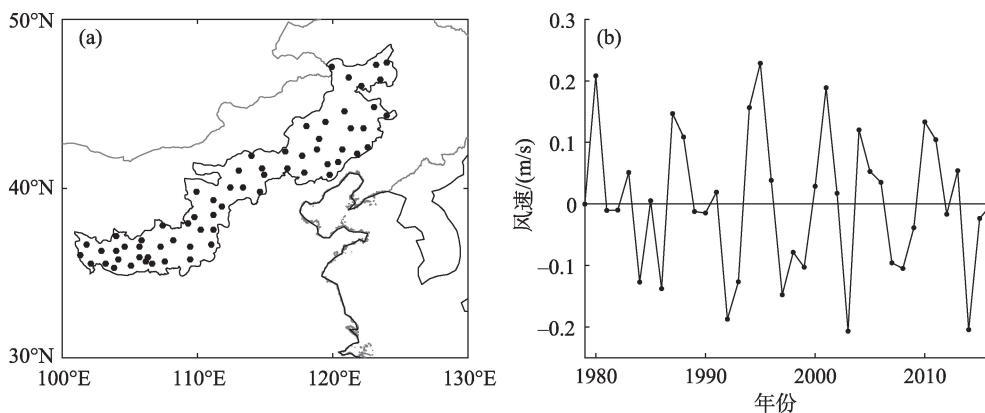


图1 (a)北方农牧交错带的覆盖范围与站点选择及(b)研究区春季平均风速的年际变化(1979—2016年)

Fig.1 (a) Extent of the agro-pastoral transitional zone of northern China and meteorological stations, and (b) interannual variations of spring mean wind speed for the 64 stations in the agro-pastoral transitional zone, 1979–2016

程模型计算的回报值。均方根误差越小,表示该模型更精确。

## 2 结果与分析

### 2.1 农牧交错带风速的年际变化与北半球海温的关系

#### 2.1.1 风速的年际变化与海温的关系

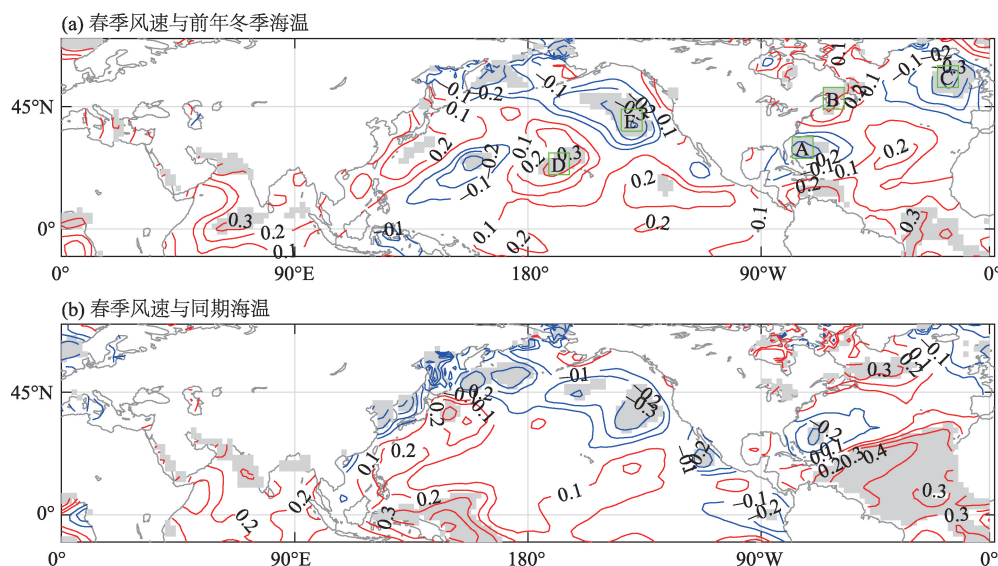
计算 1979—2016 年春季北方农牧交错带范围内 64 个气象站点近地面风速的平均值,得到研究区 1979—2016 年逐年春季的区域平均风速,将该时间序列进行高通滤波得到风速的年际变化(图 1b),风速的年际变化占风速变化总方差的比例为 36%。同样地,对海温数据也进行高通滤波,只分析其年际变率。利用研究区春季风速与海温的年际分量,计算研究区春季近地面风速与前年冬季以及同期海温的相关系数。从图 2a 中可以发现,在北大西洋 20°N~65°N 区域,冬季海温呈现“负、正、负”的异常分布,在北美洲 30°N 东部海域附近(图中 A 区域)海温与农牧交错带春季风速的年际变化呈现显著的负相关( $P<0.1$ ),在北美洲 48°N 东部海域附近(图中 B 区域)为显著的正相关( $P<0.1$ ),在欧洲 55°N 西部海域附近(图中 C 区域)为显著的负相关( $P<0.1$ ),3 个区域中心区的相关系数均超过 0.3,其中 C 区域的相关系数超过 0.4。在北太平洋 10°N~55°N、130°W~

180°区域,冬季海温呈“负、正”的异常分布,在大约 150°W~180°、10°N~40°N 范围内(图中 D 区域)海温与农牧交错带的风速呈显著的正相关( $P<0.1$ ),在北美洲 40°N 西部海域附近(图中 E 区域)呈显著的负相关( $P<0.1$ ),两个中心区的相关系数均超过 0.3。

从图 2b 中可以发现,在北大西洋,海温“负、正、负”的异常分布仍然存在,从冬季一直持续到春季,但中心区的位置有所偏移,主要向东偏移,A 区域和 C 区域通过显著性检验的面积较冬季有所减小,且 C 区域的相关系数较冬季也有所减小。在北太平洋,E 区域海温与农牧交错带春季风速的年际变化仍呈现显著的负相关( $P<0.1$ ),中心区的相关系数超过 0.3,但 D 区域的海温与研究区风速变化的相关系数不显著。由于海洋的“记忆性”,北大西洋和北太平洋的海温异常从冬季一直持续到翌年春季,但春季海温与农牧交错带风速的相关性减弱。以往关于气候年际变化的影响因子分析多强调 ENSO,但从图 2 中可以看出,ENSO 与农牧交错带春季风速年际变化的关系不大。

#### 2.1.2 海温指数的定义以及与风速年际变化的关系

为定量表征北大西洋和北太平洋海温异常与农牧交错带风速年际变化的关系,本文定义了 2 个海温异常指数,北大西洋海温指数( $SST_A$ )和北太平洋海温指数( $SST_P$ )。计算海温异常中心区(图 2a 中绿色框)的平均海温, $SST_A$ 是将 B 区域中心区(44°N~



注:所有时间序列均为高通滤波后的年际尺度分量,阴影部分表示显著区( $P<0.1$ )。

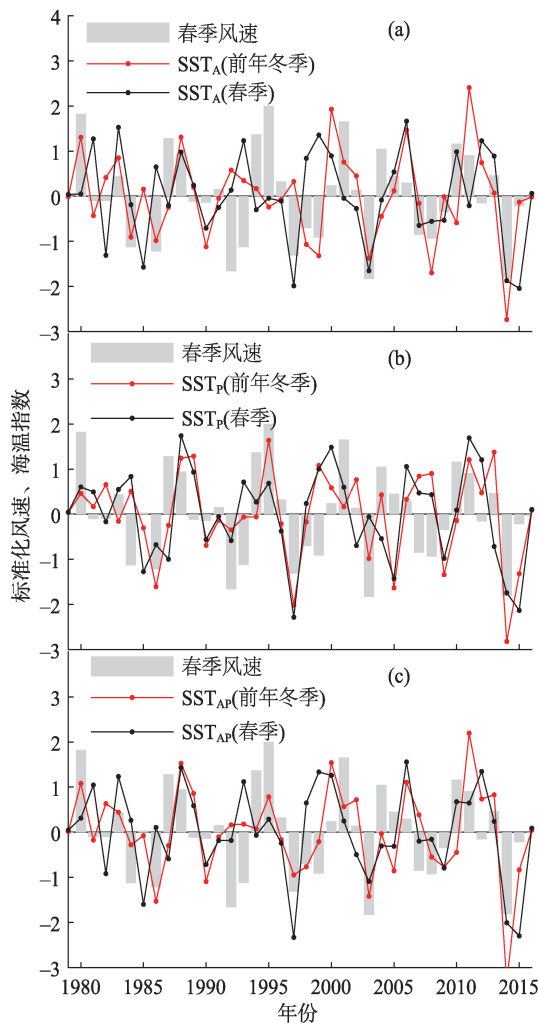
图2 农牧交错带春季风速与(a)前年冬季以及(b)同期海温的相关系数

Fig.2 Correlation coefficients between regional mean spring wind in the agro-pastoral transitional zone and sea surface temperature (SST) in (a) the winter of the previous year and (b) the spring



52°N, 58°W~66°W)的平均海温减去A区域中心区(26°N~34°N, 70°W~78°W)和C区域中心区(52°N~60°N, 14°W~22°W)的平均海温,  $SST_P$ 是将D区域中心区(20°N~28°N, 164°W~172°W)的平均海温减去E区域中心区(36°N~44°N, 136°W~144°W)的平均海温。同时,将  $SST_A$ 和  $SST_P$ 求平均,得到北大西洋和北太平洋海温指数( $SST_{AP}$ )。

图3是农牧交错带春季近地面风速与前年冬季和同期  $SST_A$ 、 $SST_P$ 以及  $SST_{AP}$ 年际变化的时间序列,为了方便比较,将所有时间序列均进行了标准化处



注:为了方便比较,风速和海温指数均已标准化。

图3 农牧交错带春季风速与前年冬季以及同期(a)北大西洋海温指数( $SST_A$ )和(b)北太平洋海温指数( $SST_P$ )以及(c)二者平均得到的海温指数( $SST_{AP}$ )年际变化的时间序列

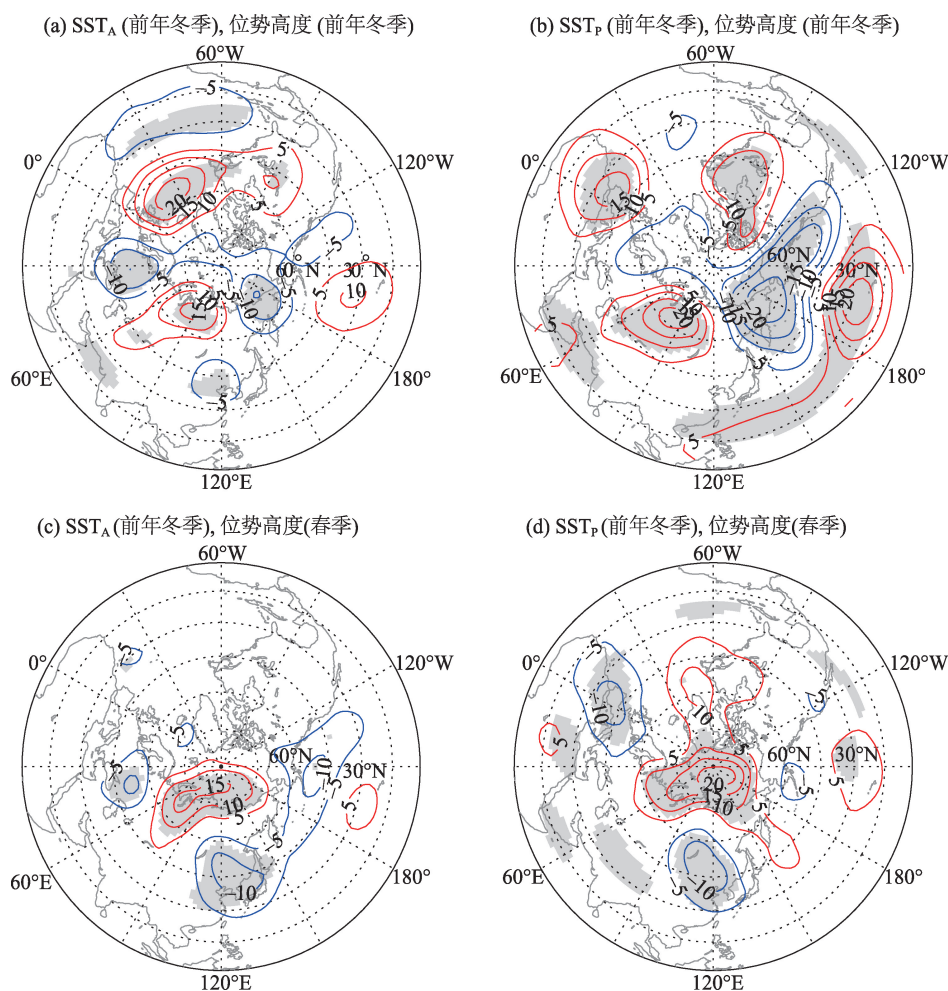
Fig.3 Interannual variations of regional mean surface wind in the agro-pastoral transitional zone and (a) regional mean sea surface temperature (SSTs) over the North Atlantic ( $SST_A$ ), (b) regional mean SSTs over the North Pacific ( $SST_P$ ), and (c) the means of  $SST_A$  and  $SST_P$  ( $SST_{AP}$ )

理。结果表明:农牧交错带春季的风速与前年冬季的  $SST_A$ 、 $SST_P$ 以及  $SST_{AP}$ 均存在显著的正相关,相关系数分别为0.50、0.44和0.56,均通过0.01的显著性检验。在18个春季风速为正异常的年份中,分别有12、10和11年前年冬季的  $SST_A$ 、 $SST_P$ 和  $SST_{AP}$ 为正异常,在20个春季风速为负异常的年份中,分别有14、10和13年前年冬季的  $SST_A$ 、 $SST_P$ 和  $SST_{AP}$ 为负异常。农牧交错带春季的风速与同期的  $SST_A$ 、 $SST_P$ 和  $SST_{AP}$ 也存在正相关关系,相关系数分别为0.26、0.27和0.29,但相关系数不显著。这表明北大西洋和北太平洋冬季海温的异常对农牧交错带春季的风速具有显著的影响,也就是说当前年冬季北大西洋海温从高纬到低纬呈现“负、正、负”的异常分布、北太平洋海温从高纬到低纬呈现“负、正”的异常分布时,中国北方农牧交错带风速偏大;反之,当前年冬季北大西洋海温从高纬到低纬呈现“正、负、正”的异常分布、北太平洋海温从高纬到低纬呈现“正、负”的异常分布时,北方农牧交错带风速偏小。

## 2.2 冬季海温异常对农牧交错带春季风速年际变化的可能影响机制

为了进一步探讨北大西洋和北太平洋的海温异常对中国北方农牧交错带风速年际变化的可能影响机制,本文分析了北半球对流层中层大气环流相应的变化。为了方便比较,将  $SST_A$ ( $SST_P$ )进行高通滤波之后再标准化,以该时间序列为自变量,以500 hPa高度场的年际分量为因变量,计算二者的回归系数,该系数表示的是  $SST_A$ ( $SST_P$ )偏大1倍标准差情况下500 hPa高度场的变化(图4)。图4a是冬季  $SST_A$ 偏大1倍标准差情况下同期500 hPa位势高度相应的变化。可以发现当  $SST_A$ 偏大1倍标准差时,北大西洋30°N~60°N的位势高度显著偏高15~20 m,欧洲45°N~60°N、20°E~45°E地区位势高度显著偏低10 m以上,北亚60°N~70°N、75°E~115°E地区位势高度显著偏高10~15 m,在中国北方农牧交错带及其附近地区位势高度显著偏低5 m以上。从北大西洋到东亚,位势高度正负高值中心相间分布,呈“正、负、正、负”的波列特征。这说明北大西洋海温异常可以在北半球中高纬度激发出一支从北大西洋到东亚的纬向遥相关波列,使中国北方农牧交错带上空位势高度显著偏低,产生一个异常的气旋性环流,从而影响研究区的风速。

为了探讨冬季的海温异常为何会影响农牧交错带春季的风速,本文分析了冬季海温的异常与次年春季对流层中高层大气环流相应的变化。图4c



注: 阴影部分表示显著区( $P < 0.1$ ), 单位为 gpm。

图4 SST<sub>A</sub>和SST<sub>P</sub>偏大1倍标准差情况下北半球500 hPa位势高度的变化

Fig.4 Anomalous changes of 500 hPa geopotential heights corresponding to  $+1\sigma$  SST<sub>A</sub> and SST<sub>P</sub>

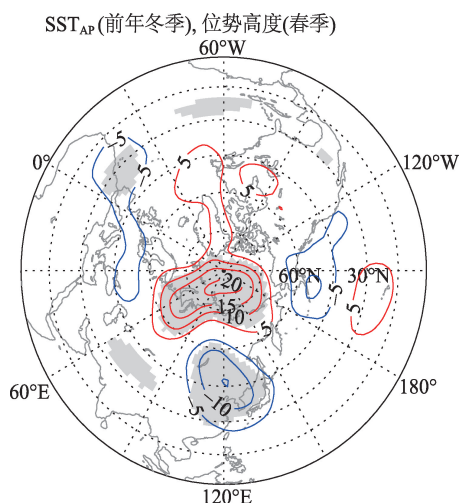
是冬季 SST<sub>A</sub> 偏大 1 倍标准差情况下次年春季 500 hPa 位势高度的变化。可以发现冬季北大西洋海温异常会影响次年春季亚洲地区的大气环流, 当 SST<sub>A</sub> 偏大 1 倍标准差时, 在北亚地区位势高度偏高 10~15 m, 在东亚地区位势高度偏低 5~10 m。北大西洋海温异常通过海气相互作用引起大气环流相应的变化, 通过北半球中高纬度的一支纬向遥相关波列, 使农牧交错带上空产生异常的气旋环流, 并且该气旋性环流异常能从冬季持续到春季。

图 4b 是冬季 SST<sub>P</sub> 偏大 1 倍标准差情况下同期 500 hPa 位势高度相应的变化, 位势高度在北半球中高纬度呈“负、正、负、正、负、正”的三波型分布。在 45°N~60°N、60°W~90°W 地区位势高度显著偏高 5~10 m, 在 30°N~45°N、20°W~10°E 地区位势高度显著偏高 10~15 m, 在 45°N~70°N、60°E~120°E 地区位势高度显著偏高 10~20 m。负值中心分布在 45°N~75°

N、150°E~120°E 地区, 位势高度显著偏低 5~20 m, 另外 2 个负值中心不显著。图 4d 是冬季 SST<sub>P</sub> 偏大 1 倍标准差情况下次年春季 500 hPa 位势高度的变化, 可以发现北极与北亚部分地区位势高度显著偏高 10~20 m, 在东亚地区显著偏低 5~10 m, 这与 SST<sub>A</sub> 偏大 1 倍标准差情况下次年春季 500 hPa 位势高度的变化十分相似, 在农牧交错带上空会有一个异常的气旋性环流。以往的研究指出, 北太平洋地区的海表热力变化通过影响亚洲与北太平洋之间的大气遥相关(Zhao et al, 2010)以及北半球中高纬度行星尺度的大气环流(Kim et al, 2012), 进而影响东亚地区的大气环流和气候。另外, Zhao 等(2004)在研究北太平洋海冰异常对夏季东亚副热带季风降水影响的机制中指出, 欧洲陆面过程是连接春季海冰与东亚夏季季风之间的桥梁。北太平洋特定区域的海温异常对研究区大气环流的具体影响途径有待进一步深入

研究。

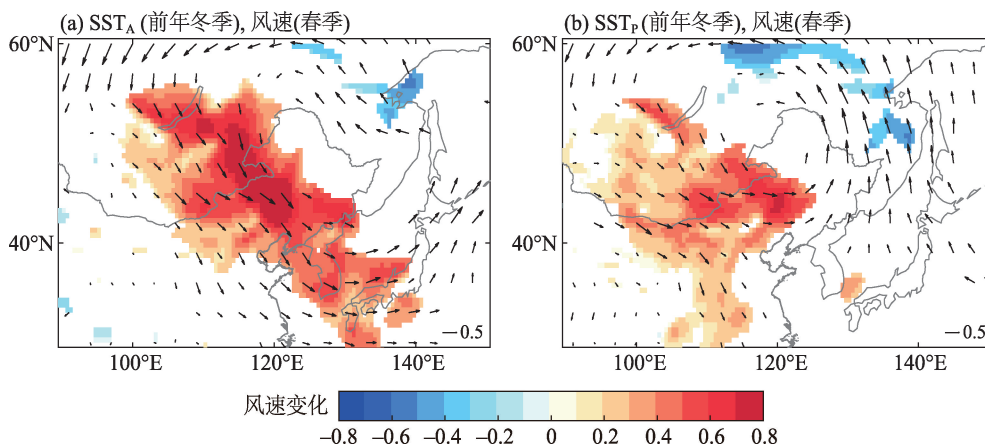
前面的分析表明,研究区春季风速与北大西洋和北太平洋冬季海温都存在显著的相关关系,为了综合这2个地区冬季海温异常对中国北方农牧交错带上空大气环流的影响,本文将  $SST_A$  和  $SST_P$  简单平均,构建一个综合海温指数  $SST_{AP}$ , 然后计算在冬季  $SST_{AP}$  偏大1倍标准差情况下,随后春季北半球500 hPa 位势高度的变化(图5)。可以发现当  $SST_{AP}$  偏大1倍标准差时,北极和北亚部分地区的位势高度显著偏高10~20 m,而东亚30°N~60°N、100°E~140°E地区位势高度显著偏低5~10 m。北大西洋和北太平洋冬季的海温异常会影响北方农牧交错



注:阴影部分表示显著区( $P < 0.1$ ),单位为gpm。

图5  $SST_{AP}$  偏大1倍标准差情况下北半球500 hPa 位势高度的变化

Fig.5 Anomalous changes of 500 hPa geopotential heights corresponding to  $+1\sigma$   $SST_{AP}$



注:向量风用风矢表示,标量风用填色表示,均只画出显著( $P < 0.1$ )的值,单位为m/s。

图6  $SST_A$  和  $SST_P$  偏大1倍标准差情况下850 hPa 风场的变化

Fig.6 Anomalous changes of winds at 850 hPa corresponding to  $+1\sigma$   $SST_A$  and  $SST_P$

带春季大气环流的变化,进而影响该地区的风速。当  $SST_{AP}$  指数为正异常时,会在农牧交错带上空产生异常的气旋性环流;当  $SST_{AP}$  指数为负异常时,会在农牧交错带上空产生异常的反气旋性环流。

上述异常变化在低层区域风场中非常明显。图6是冬季的海温指数与春季850 hPa 风场的回归系数。同上文一样,分析前将所有的时间序列统一进行了高通滤波,只分析其年际分量部分。显然,当冬季的  $SST_A$  偏大时,春季在东北亚地区存在一个异常的气旋性环流,这个异常的气旋性环流不仅在对流层中高层存在,而且在对流层低层也存在,大体呈准正压型的结构;且在研究区,与标量风的回归系数均为正值,说明这个异常的气旋性环流能使研究区的风速增加。这是因为该异常的气旋性环流能带来异常的偏西北风,与该地春季盛行的风向一致,这意味着绝对风速的增强。当冬季的  $SST_P$  偏大时,春季在东北亚地区也存在一个异常的气旋性环流,能加强农牧交错带的风速,但增加的量值比  $SST_A$  偏小。

### 2.3 用冬季海温指数预测春季农牧交错带的风速

冬季的  $SST_A$  和  $SST_P$  与农牧交错带春季风速的年际变化均具有显著的相关性,说明冬季的  $SST_A$  和  $SST_P$  对中国农牧交错带春季风速具有一定的超前指示意义。因此本文建立了一个多元线性回归方程来预报农牧交错带春季区域的平均风速。农牧交错带春季区域的平均风速( $u$ )是预报量,冬季的  $SST_A$  和  $SST_P$  是预报因子,通过对近38 a期间所有数据样本的分析,得到下列预报模型:

$$u = 0.0502SST_A + 0.0417SST_P + 0.0026 \quad (2)$$



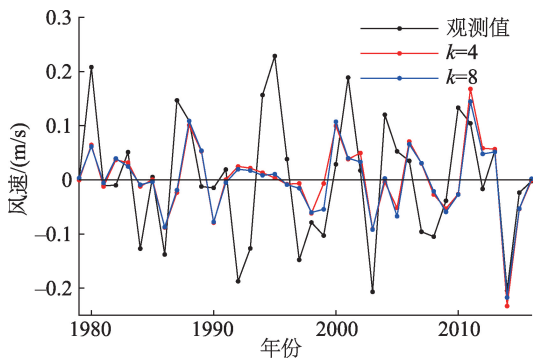
式中所有时间序列均为年际分量。农牧交错带春季风速的预报量与观测数据具有显著的正相关,相关系数为0.56,通过0.01的显著性检验,该模型可以解释风速年际变化的32%。根据所有数据样本建立的多元线性回归方程往往会遇到过拟合的问题,这里利用 leave- $k$ -out 交叉验证进行评估。计算了  $k$  为1~8时的回报值,并与观测值进行了对比(表1)。当  $k$  取1~8中的不同值时,得到的回报值与观测值的相关系数在0.45~0.50间,均通过0.01的显著性检验,均方根误差稳定在0.10 m/s左右。当  $k$  取不同值时,回报值和观测值的相关系数和均方根误差变化较小,这表明该模型具有较强的稳定性。图7为北方农牧交错带春季近地面风速年际变化的观测值及留4和留8的回报量,在18个风速为正的年份里,留4和留8的回报量均有13 a为正,在20个风速为负的年份里,留4和留8的回报量均有14 a为负。可见,北大西洋和北太平洋冬季的海温异常与中国北方农牧交错带春季近地面风速的年际变化具有较好的指示意义,且海温与风速的时间滞后关系是显著和稳健的。

3 结论

(1) 北方农牧交错带春季的风速存在强烈的逐年波动,年际变化在风速变化中的方差解释量

表1 leave- $k$ -out 交叉验证结果评估

Tab.1 Statistics for leave- $k$ -out cross-validations								
$k$	1	2	3	4	5	6	7	8
$r$	0.47	0.48	0.47	0.48	0.45	0.49	0.50	0.50
RMSE/(m/s)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10



注:k=4和k=8分别表示k取4和8时的回报量。  
图7 北方农牧交错带春季近地面风速年际变化的观测值及其回报量

Fig.7 Observations and predictions of regional mean surface wind in the agro-pastoral transitional zone

为36%。  
(2) 研究区春季风速的年际变化与前期冬季北大西洋和北太平洋海温存在显著的相关性。从高纬至低纬,相关系数在北大西洋20°N~65°N区域呈显著的“负、正、负”分布,在北太平洋10°N~55°N、130°W~180°区域呈显著的“负、正”分布。  
(3) 利用北大西洋和北太平洋前期冬季的海温,统计预报研究区春季风速的年际波动,具有较高的技巧,预报量可以解释风速年际变化的32%。回报交叉验证结果表明,海温与风速的时间滞后关系是显著和稳健的。  
(4) 前期冬季的海温与研究区春季风速年际变化联系的桥梁是北半球大尺度大气环流的异常。当海温从高纬至低纬,在北大西洋呈“负、正、负”、北太平洋呈“负、正”的异常分布时,能引起北半球中高纬度大气环流的变化,导致在东亚地区上空产生一个异常的气旋性环流。该气旋性环流在对流层中层与低层均存在,是导致研究区风速变化的直接原因。

参考文献(References)

史培军. 2009. 中国北方农牧交错带土地利用时空格局与优化模拟 [M]. 北京: 科学出版社. [Shi P J. 2009. Spatiotemporal pattern and optimization simulation of land use in the agro-pastoral transitional zone in northern China. Beijing, China: Science Press. ]  
陶寅, 黄勇, 杨元建, 等. 2016. 城市化进程对安徽省风速的影响 [J]. 气候变化研究进展, 12(6): 519-526. [Tao Y, Huang Y, Yang Y J, et al. 2016. Impact of urbanization on wind speed in Anhui Province. Climate Change Research, 12(6): 519-526. ]  
肖鲁湘, 张增祥. 2008. 农牧交错带边界判定方法的研究进展 [J]. 地理科学进展, 27(2): 104-111. [Xiao L X, Zhang Z X. 2008. Processes on the boundary definition of agro-pastoral zone in China. Progress in Geography, 27(2): 104-111. ]  
武炳义, 张人禾. 2011. 东亚夏季风年际变率及其与中、高纬度大气环流以及外强迫异常的联系 [J]. 气象学报, 69(2): 219-233. [Wu B Y, Zhang R H. 2011. Interannual variability of the East Asian summer monsoon and its association with the anomalous atmospheric circulation over the mid-high latitudes and external forcing. Acta Meteorologica Sinica, 69(2): 219-233. ]  
张人禾, 闵庆烨, 苏京志. 2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用 [J]. 中国科学: 地球科学, 47(5): 544-553. [Zhang R H,

- Min Q Y, Su J Z. 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone. *Science China: Earth Sciences*, 47(5): 544-553. ]
- 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 2002. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题 [J]. *地球科学进展*, 17(5): 739-747. [Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, et al. 2002. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in North China and its problems on eco-environment. *Advance in Earth Sciences*, 17(5): 739-747. ]
- 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 2016. 近50年中国风速减小的可能原因 [J]. *气象科技进展*, 6(3): 106-109. [Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y, et al. 2016. Possible reasons of wind speed decline in China for the last 50 years. *Advance in Meteorological Science and Technology*, 6(3): 106-109. ]
- Arlot S, Celisse A. 2010. A survey of cross-validation procedures for model selection [J]. *Statistics Surveys*, 4: 40-79.
- Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon [J]. *Journal of Climate*, 13(24): 4326-4340.
- Chou C, Tu J Y, Yu J Y. 2003. Interannual variability of the Western North Pacific summer monsoon: Differences between ENSO and non-ENSO years [J]. *Journal of Climate*, 16(13): 2275-2287.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Geophysical Research Letters*, 137: 553-597.
- Guo H, Xu M, Hu Q. 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005 [J]. *International Journal of Climatology*, 31(3): 349-358.
- Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *Journal of Climate*, 30(20): 8179-8205.
- Hu K, Huang G, Huang R. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. *Journal of Climate*, 24(24): 5365-5377.
- Jacobson M Z, Kaufman Y J. 2006. Wind reduction by aerosol particles [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(24): 194-199.
- Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956–2004 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(3-4): 421-430.
- Kim H J, Ahn J B. 2012. Possible impact of the autumnal North Pacific SST and November AO on the East Asian winter temperature [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117, D12104, doi: 10.1029/2012JD017527.
- Lin C, Yang K, Qin J, et al. 2013. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960 [J]. *Journal of Climate*, 26(9): 2891-2903.
- Li S, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM study [J]. *Journal of Climate*, 21(22): 6080-6088.
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 13(9): 1517-1536.
- Wilks D S. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences* [M]. London, UK: Academic Press.
- Wu J, Zha J, Zhao D. 2017. Evaluating the effects of land use and cover change on the decrease of surface wind speed over China in recent 30 years using a statistical downscaling method [J]. *Climate Dynamics*, 48(1-2): 131-149.
- Wu J, Zha J, Zhao D, et al. 2018. Changes in terrestrial near-surface wind speed and their possible causes: An overview [J]. *Climate Dynamics*, 51(5-6): 2039-2078.
- Wu Z, Wang B, Li J, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114, D18120, doi: 10.1029/2009JD011733.
- Xie S, Hu K, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *Journal of Climate*, 22(3): 730-747.
- Xu M, Chang C P, Fu C, et al. 2006. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, D24111, doi: 10.1029/2006JD007337.
- Yang J, Liu Q, Liu Z. 2010. Linking observations of the Asian monsoon to the Indian Ocean SST: Possible roles of Indian Ocean basin mode and dipole mode [J]. *Journal of Climate*, 23(21): 5889-5902.
- Zhao P, Cao Z, Chen J. 2010. A summer teleconnection pattern over the extratropical Northern Hemisphere and associated mechanisms [J]. *Climate Dynamics*, 35(2-3): 523-534.
- Zhao P, Zhang X, Zhou X, et al. 2004. The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall [J]. *Journal of Climate*, 17(17): 3434-3447.
- Zuo J, Li W, Sun C, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(4): 1173-1186.



## Relationships between interannual variations of spring winds in the agro-pastoral transitional zone of Northern China and winter sea surface temperature

HU Yihong<sup>1,2,3</sup>, GONG Daoyi<sup>1,2,3\*</sup>, MAO Rui<sup>1,2,3</sup>, SHI Xiaoxue<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** This study investigated possible relationships between winter sea surface temperature (SST) and the interannual variation of spring wind speed in the agro-pastoral transitional zone of Northern China by employing daily wind speed observations of 64 meteorological stations, the extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSST v5) dataset, and the ERA-Interim reanalysis data. The results show that spring wind exhibited strong year-to-year variations. During the period of 1979–2016, the interannual components accounted for 36% of the total variance. Winter SST, which affects the interannual variation of wind speed in the study area in spring, presented a negative-positive-negative distribution between 20°N–65°N in the North Atlantic, and a negative-positive distribution in the domain of 10°N–55°N and 130°W–180° in the North Pacific Ocean. Interannual variations of surface spring wind in the study area were significantly related to the North Atlantic SST index ( $r = 0.50$ ) and the North Pacific SST index ( $r = 0.44$ ). The large-scale atmospheric circulation in the northern hemisphere is the bridge that links winter SSTs and the spring wind. In association with the North Atlantic SST anomalies of negative-positive-negative distribution from high to low latitudes, a wave pattern of pressure height anomalies appeared over the North Atlantic and Eurasia. Accompanying a negative-positive distribution in North Pacific SST anomalies, the pressure height anomalies from the North Pacific to East Asia presented a three-wave pattern. Both of them can lead to an anomalous cyclonic circulation over East Asia in spring. The anomalous cyclonic circulation existed in both the middle and the lower troposphere, which was the factor directly resulting in higher wind speed over the study area. The significant correlation between winter SST and spring wind speed implies that winter SST can be used as a skillful predictor for spring wind in practice. A statistical forecast model with winter SSTs in the North Atlantic and North Pacific as predictors can explain 32% of the interannual variance of the spring wind speed. Cross-validation shows that the time lag relationship between SST and wind speed is significant and robust.

**Keywords:** wind speed; sea surface temperature; interannual variation; agro-pastoral transitional zone in Northern China