

中国西北 5 月和 9 月地表气温的年际变率机理及其预测

姚梦莹^{1,2}, 朱志伟¹, 卢睿¹, 姚俊强²

1, 南京信息工程大学, 大气科学学院, 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2, 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

摘要 本文基于 1961~2016 年中国西北地区逐日地表气温观测资料以及全球大气再分析资料, 通过统计诊断和数值模拟的方法, 揭示了西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率规律及其机理, 并在此基础上分别构建了季节预测模型。结果表明: 1) 西北 5 月和 9 月地表气温年际变率经验正交函数分解第一模态均为全区一致型空间分布, 但具有不同的变率特征; 2) 西北 5 月地表气温正异常与拉尼娜衰减型海表温度异常所对应的热带纬向三极型对流(降水)异常强迫有关, 对流异常激发的热带外遥相关波列导致西北地区上空受反气旋(高压)异常控制, 造成局地向下太阳短波辐射增多, 从而使得西北地表气温增加; 而西北 9 月地表气温正异常与拉尼娜发展型海表温度异常所对应的热带纬向偶极型对流(降水)异常强迫有关, 偶极型对流强迫能够在西北地区东西两侧激发反气旋(高压)异常, 导致西北地表气温正异常; 3) 基于物理机制, 分别利用拉尼娜衰减和发展型的相关海表温度异常预测因子, 建立针对西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率的季节预测模型, 独立预报期间(2007~2016 年)预测技巧相关系数分别可达 0.74 和 0.62, 可为西北地表气温短期气候预测提供参考。

关键词 西北地区地表气温, 年际变率, 热带对流强迫, 季节预测

文章编号

中图分类号

文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21124

收稿日期 2021-12-09; **网络预出版日期**

作者简介 姚梦莹, 女, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事西北气候变率机理和预测研究。E-mail: yaomy@nuist.edu.cn

通讯作者 朱志伟, E-mail: zwz@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金 (42088101)

Funded by The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42088101)

Mechanism and seasonal prediction of the interannual variations of surface air temperature in May and September over

Northwest China

Yao Mengying^{1,2}, Zhu Zhiwei¹, Lu Rui¹, Yao Junqiang²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044

2 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi, 830002

Abstract Based on the daily surface air temperature (SAT) gauge data and global reanalysis datasets from 1961 to 2016, we revealed interannual variability of SAT over Northwest China (NWC) in May and September via observational diagnosis and numerical simulations, and constructed their corresponding seasonal prediction models. The results show that: 1) The first modes of SAT over NWC during May and September are characterized by a similar homogenous spatial pattern but with different interannual variations. 2) The positive anomaly of SAT over NWC in May is related to the tropical zonal tripole anomalous convection (precipitation), corresponding to tropical SST anomaly during the decaying phase of La Niña. The extratropical teleconnection wave train excited by the tropical convection anomalies lead to barotropic anticyclonic (high pressure) anomaly over NWC, which increases the downward solar shortwave radiation and causes the increased local SAT. In September, the tropical zonal dipole convection (precipitation) anomaly that associated with the tropical SST anomaly during the developing phase of La Niña can trigger barotropic anticyclonic (high pressure) anomaly on the east and west sides of NWC, leading to positive SAT anomaly over NWC. 3) Based on the SSTA predictors associated with the decaying and developing phase of La Niña, the seasonal prediction model for SAT over NWC in May and September were established respectively. The prediction skill in terms of correlation coefficient during independent prediction period (2006-2016) can reach 0.74 (0.62) in May (September), which provides a reference for seasonal prediction of SAT over NWC.

Keywords surface air temperature in Northwest China, interannual variation, tropical convection forcing, seasonal prediction

1. 引言

中国西北地区深居欧亚大陆内部，其四周高原、山地环绕。由于海洋而来的水汽难以输送至此，降水稀少、干旱和半干旱是这一地区的基本气候特点（李栋梁等，2003）。与我国其它地区相比，西北地区降水、温度变率大，是气候变化的敏感区和生态脆弱区（张强等，2000；丁一汇和王守荣，2001）。在全球变暖的大背景下，西北地区的气候特征发生了显著变化。整个西北地区呈现气温升高、降水增加的趋势（施雅风等，2002，2003；Wei and Wang, 2013；Wang et al., 2017），且西北地表气温增加幅度相较于全球其他地区更甚（Li et al., 2012）；西北地区极端气温和降水事件也呈显著增加趋势（Chen et al., 2014）。降水和地表气温都是影响西北地区干旱、半干旱气候的重要气象变量。研究表明西北地区降水量在持续增加（陈冬冬和戴永久，2009；Li et al., 2016；Wang et al., 2017），但其干旱程度却更加严重。导致西北地区干旱加重的可能原因是地表气温持续升高所带来的蒸发量增加（Wei and Wang, 2013）。因此，地表气温的变化对西北地区干旱、半干旱气候特征的影响至关重要。了解西北地区地表气温变率规律及其机理对提高应对气候变化的能力、防灾减灾有着十分重要的科学价值和现实意义（秦大河等，2002）。

国内外学者已经对西北地区地表气温的变化特征和相关环流异常进行了大量研究。西北地区年平均地表气温变化呈现全区一致的增温趋势（张强等，2010；Li et al., 2012；Chen et al., 2017），最高/低气温显著升高（马鹏里等，2002）。极端高/低温日数也呈显著增加（减少）趋势（陈少勇等，2012；Zhang et al., 2019），而新疆地区是极端高温事件的高发区（孙建奇等，2011）。有研究表明，北大西洋涛动和西伯利亚高压是影响西北地区地表气温变化的关键大气环流系统。前期冬季北大西洋涛动可以导致春季欧亚大陆地表气温年际变化的南北反相变化空间分布特征，影响西北地区地表气温经向异常分布（沈学顺和木本昌秀，2007），而冬季较弱的西伯利亚高压会导致整个西北地区气温偏高（Li et al., 2012）。此外，西北地区地表气温变化也与东亚季风环流变化有关。当东亚冬季风偏强时，西北冬季地表气温偏低；当东亚夏季风偏强时，西北夏季地表气温偏高（张存杰等，2002）。

西北地区地表气温变率也受到海表温度异常的影响。在厄尔尼诺发展年，夏季青藏高原东侧地表气温偏高，新疆以低温为主；而在厄尔尼诺衰减年，夏季青藏高原东侧及北疆地区

气温偏低（李耀辉和李栋梁，2004）。Chen et al. (2017) 对太平洋年代际振荡（Pacific Decadal Oscillation, PDO）指数、北大西洋年代际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO）指数与西北地区地表气温进行超前滞后相关分析，发现 PDO（AMO）与西北地区地表气温变率存在滞后 3 至 21 年（超前 1 至 14 年）的显著正相关，20 世纪 90 年代后西北地区地表气温受正位相 AMO 主导，呈现上升趋势。此外，前期冬季和春季的热带太平洋暖池海表温度异常也可以作为前兆信号用于短期气候预测西北地区东部夏季地表气温变率（王兰宁等，2000）。除海表温度异常影响，青藏高原的动力和热力作用对西北地区地表气温也有显著影响。夏季青藏高原地面感热通量异常偏强引起东亚地区 500hPa “东正西负”高度异常，导致夏季西北东部低温、西部高温（李栋梁等，1997）；而当青藏高原夏季对流异常偏高时，西北地区冬季地表气温偏低，次年夏季地表气温偏高（陈少勇等，2011）；青藏高原上空 500hPa 低涡的强度增大也可导致西北地区极端高温事件的增多（Chen et al., 2014）。

从西北地区平均地表气温的气候态逐月演变特征可见，该地区区域平均地表气温约为 4°C，其中 4 月至 10 月地表气温高于年平均值，7 月最高，8 月和 6 月次之（图 1a）。5 月和 9 月的西北区域平均地表气温非常相近（均约为 11°C），其空间分布（图 1b 和 c）也极其相似，但其年际变率分量却有着显著的负相关关系（相关系数为-0.28，通过 90%置信度水平），这意味着 5 月和 9 月虽然在气候态上类似，但在年际变率上却可能存在不一样的动力来源。此外，春季 3 月与 4~5 月西北地区地表气温年际变率并无显著相关（相关系数分别为 0.06 和-0.04），而秋季 9 月与 10~11 月西北地区地表气温年际变率也不存在显著相关（相关系数分别为 0.21 和 0.10），所以西北地区春季和秋季平均的地表气温并不能真实反映 5 月和 9 月的年际变率。5 月和 9 月是西北地区春到夏、夏到秋的季节转换时期，也是农作物播种和收获的农业生产关键期，这两个月地表气温年际变化对农业生产影响较大，是业务单位重点关注的月份。因此，单独揭示西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率的海气相互作用物理机制，并以此建立短期气候预测模型、提高地表气温的季节预测技巧，对服务西北地区的农业生产有重要价值。鉴于此，本研究主要解决以下三个科学问题：1）西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率规律如何？2）西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率的海气相互作用物理机制是什么？3）如何根据物理机制分别建立西北地区 5 月和 9 月地表气温的季节预测模型？

为解决上述科学问题, 本文使用统计诊断和数值模式模拟, 揭示西北地区 5 月和 9 月地表气温的年际变率的规律及其海气相互作用机理, 并分别构建了两个基于物理机制的季节预测模型, 以期为西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率的季节预测提供参考。

2. 数据、方法和模式

2.1 数据

本文采用的数据包括: 1) 国家气象信息中心提供的 CN05.1 格点化数据(基于 2416 个台站观测资料插值)的逐日平均气温数据, 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (吴佳和高学杰, 2013); (2) 美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)全球逐月再分析数据集(Kalnay et al., 1996)(包括位势高度场、水平风场), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 3) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 再分析数据集的月平均 2 米温度数据, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 4) 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的海表温度重建数据第五版(ERSST v5)的全球月平均数据, 水平分辨率为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ (Huang et al., 2017); 5) 美国大气和海洋管理局的全球重建降水(NOAA Precipitation Reconstruction/PREC)的月平均数据, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Chen et al., 2002)。本文中统计诊断分析以及预测模型建模所用数据时段为 1961~2006 年(训练期), 而 2007~2016 年间(独立预测期)的数据仅用来进行独立预测检验以及预测因子的稳定性讨论。

2.2 方法

本文中西北地区为新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西五省/自治区。西北地表气温的年际变率分量是由地表气温原始序列剔除 9 年平滑的年代际变率分量得到。采用经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF) (Lorenz, 1956) 的方法提取西北地区地表气温年际变率分量的时空分布模态。利用相关分析和回归分析等方法探讨与西北地表气温相联系的大气环流和热力场异常, 相关分析和回归分析采用 t 检验评估其显著性。本文利用多元线性回归的方法建立统计预测模型(Li and Wang, 2016; Zhu and Li, 2017), 采用均方技巧得分(MSSS)

和时间相关系数 (TCC) 评估模型的预测技巧。MSSS 表示模型预报的均方误差 (MSE) 比“气候态预报”减少的百分比, 数值越接近于 1 代表预测误差越小。而 TCC 数值越接近于 1 表示模型预测技巧越高。

2.3 模式

本研究采用中等复杂程度的异常全球大气环流谱模式来探讨热带对流异常影响西北地区 5 月和 9 月地表气温的物理机制。该模式基于美国地球物理流体实验室的干异常大气环流模式的框架研发 (Held and Suarez, 1994; Li, 2006)。模式使用 σ 为垂直坐标 ($\sigma=p/p_s$), 由 5 个均匀分布的 sigma 层组成, 大气层顶 $\sigma=0$, 底层 $\sigma=1$, 间隔为 0.2。模式分别提取 NCEP/NCAR 再分析资料 5 月和 9 月的多年平均作为模式气候态。在模式中加入理想的大气热源 (冷源) 强迫积分 35 天, 将积分第 30 至 35 天平均视为大气环流异常对热带对流异常强迫响应的稳定态。

3. 西北 5 月和 9 月地表气温年际变率的动力学溯源

图 2a、b 为西北地区 5 月和 9 月平均地表气温年际分量的第一模态空间分布。5 月和 9 月地表气温第一模态分别解释了各自 61% 和 49% 的总方差, 均为显著且独立的模态 (North et al., 1982)。5 月和 9 月平均地表气温都表现为全区一致分布特征, 其中西北地区北部为载荷大值区, 载荷值由北向南递减。图 2c 为 1961 年至 2006 年西北地区 5 月和 9 月平均地表气温年际变率第一模态的主成分时间序列。值得一提的是, 5 月和 9 月地表气温年际变率与当月极端高/低温日数 (用高/低于 95%/5% 分位来定义极端高/低温日数) (翟盘茂和潘晓华, 2003) 的年际变率存在显著的相关性。5 月和 9 月地表气温年际变率与极端高温 (低温) 日数年际变率的相关系数分别为 0.58 和 0.52 (-0.68 和 -0.53), 均通过了 99% 的显著性检验。这说明西北地区 5 月和 9 月平均地表气温和极端高/低温日数具有较为一致的年际变率特征。因此, 平均地表温度和极端高/低温日数应该受到类似的物理机制过程影响, 具有类似年际变率可预测性来源。在下文中, 我们仅对西北地区 5 月和 9 月平均地表气温的年际变率机理

及其季节预测开展研究，所得到的结果也能适用极端高/低温日数年际变率。

3.1 统计诊断

对西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率进行动力学溯源，我们分别计算了全球 5 月和 9 月高低层环流、地表气温（海表温度）、降水场对各自主成分（PC）的回归。由图 3a 可知，当西北 5 月地表气温为正异常时，热带中东太平洋北部海表温度异常偏高，而热带印度洋至海洋性大陆、中太平洋则为弱的负海表温度异常。与这种热带海表温度异常对应的是热带纬向三极型的对流分布：西太平洋的正对流（降水）异常以及赤道印度洋和中东太平洋的负对流（降水）异常（图 3b）。在这种热带海表温度和对流异常配置下，5 月西北地区上空受准正压结构的反气旋性（高压）异常环流控制。高层高压异常中心与地表气温正异常有较好的对应关系，说明在整层高压控制下，西北地区上空晴朗少云，从而增加了向下太阳短波辐射，导致西北地表气温升高（图 3a）。

与 9 月西北地表气温正异常相联系的是热带太平洋海表温度纬向偶极型异常分布：热带西太平洋为正海温异常，而中东太平洋为负海温异常。这种偶极型海表温度异常能够激发“西正东负”的热带对流（降水）偶极型异常（Lindzen and Nigam, 1987）。整个热带东印度洋和海洋性大陆地区为对流（降水）正异常，而赤道中东太平洋为对流（降水）负异常。在这种热带海温和对流配置下，9 月西北地区上空同样出现准正压的反气旋（高压）异常，在整层高压作用下，向下太阳短波辐射增加致使西北地表气温出现正异常（图 3c、d）。

为了验证热带对流异常与西北地表气温异常的关联性，我们根据图 3b、d 中热带降水异常分布定义了 5 月和 9 月的对流异常指数。如图 3b 所示，5 月对流（降水）强迫的关键区为热带印度洋至海洋性大陆（T1 区， $20^{\circ}\text{S}\sim 7^{\circ}\text{N}$ ， $60^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ），热带西太平洋（T2 区， $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ， $145^{\circ}\text{E}\sim 175^{\circ}\text{E}$ ），以及热带中太平洋（T3 区， $12^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ ， $180^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{W}$ ），我们定义 5 月热带对流三极子指数（Tripole 指数）为 T2 区域平均降水减去 T1 和 T3 区域平均降水（ $T2-T1-T3$ ）。如图 3d 所示，9 月热带对流（降水）强迫关键区位于海洋性大陆（D1 区， $10^{\circ}\text{S}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ， $70^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ）和热带中太平洋（D2 区， $10^{\circ}\text{S}\sim 7^{\circ}\text{N}$ ， $160^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{W}$ ），所以定义 9 月热带对流偶极子指数（Dipole 指数）为 D1 区域平均降水减去 D2 区域平均降水（ $D1-D2$ ）。通过计算

可以得到 5 月和 9 月西北地表气温年际变率分别与 Tripole 和 Dipole 指数相关系数分别 0.42 和 0.37, 均超过了 99% 的置信水平, 说明热带对流与西北地表气温密切相关。

3.2 数值模拟

由上述回归和相关分析可知, 西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率分别与 5 月热带纬向三极子对流异常和 9 月热带纬向偶极子对流异常分布有关。然而, 高相关性并不意味着一定存在因果关系。热带海表温度异常在 5 月和 9 月激发的对流异常能否影响中国西北地表气温? 如何影响? 由于热带海表温度异常可以通过产生热带对流异常 (Lindzen and Nigam, 1987), 激发热带外大气环流异常 (Horel and Wallace, 1981; Nitta, 1987)。考虑到直接使用海温异常作为外强迫因子时, 模式可能对其上空的对流活动不准确进而引发大气环流异常响应的偏差, 因此本文直接使用热带海温异常激发的降水/对流异常作为大气环流的外强迫因子, 在模式中给定与观测中各关键区域的大气非绝热加热曲线接近的理想大气热/冷源强迫来驱动模式, 用于探讨大气环流对热带对流异常强迫的响应。

图 4 为 5 月和 9 月对流 (降水) 关键区的大气非绝热加热/冷却 (Q_1) 垂直廓线。由图 4a 可知, 5 月的 T1 和 T3 区域为非绝热冷却区, 极大值分别位于 300hPa 和 150hPa 附近; T2 区域为非绝热加热区, 极大值位于 300hPa 附近。根据观测, 我们在模式中给定 T1 (T2) 在 $\sigma=0.3$ (约为 300hPa) 为最大加热 (冷却) 率, 在 $\sigma=0.5$ (约为 500hPa) 时降至 70%, 在 $\sigma=0.7$ (约为 700hPa) 时降至 40%, 在 $\sigma=0.9$ (约为 925hPa) 并在 $\sigma=0.1$ (约为 100hPa) 时降至 10%。给定 T3 在 $\sigma=0.1$ 时有最大冷却率, 随高度减小而递减。而由图 4b 可知, 9 月 D1 上空非绝热加热极大值位于 300-400hPa 附近, D2 上空非绝热冷却极大值也位于 300-400hPa 附近 (图 4b)。因此, 我们在模式中给定 D1 (D2) 在 $\sigma=0.3$ 时最大加热 (冷却) 率, 在 $\sigma=0.5$ 降至 90%, 在 $\sigma=0.7$ 时降至 50%, 在 $\sigma=0.1$ 降至 30%, 在 $\sigma=0.9$ 降至 10%。

图 5 是 5 月 200hPa 位势高度场和风场对热带大气非绝热加热 (冷却) 响应随时间的演变。在 5 月气候背景下, 同时给出 T1、T2、T3 区域三极子非绝热加热 (冷却), 积分 30~35 天稳定态时, 热带外有显著大气环流异常响应 (图 5a)。西北地区受反气旋环流异常控制, 而在反气旋环流的西北和东南侧分别存在气旋性环流异常, 这与观测较为近似 (图 3b)。而

三极子中非绝热加热（冷却）中到底哪一极起到更重要的作用？为定性判断到底哪一极起更重要作用，我们另外设计了三个实验，即分别在模式中单独给定 T1 区冷源、T2 区热源以及 T3 区冷源。由图 5b 可见，当单独给定 T1 区冷源时，西北地区西侧上空能够激发出反气旋性异常，反气旋异常两侧也存在气旋性环流异常，与图 5a 非常近似；当单独给定 T2 区热源时（图 5c），整个西北地区受到反气旋（高压）异常控制，但反气旋（高压）异常相比 T1 区冷源响应的反气旋异常更弱；而当单独给定 T3 区冷源时（图 5d），西北地区上空基本无异常环流响应。由此可见，5 月西北地区上反气旋性环流异常主要受热带印度洋到海洋性大陆（T1 区）的大气冷源驱动，其次是热带西太平洋（T2 区）大气热源异常强迫，而热带中太平洋（T3）区大气冷源不起实质性作用。

图 6a 是模式中同时给定 D1 区域加热和 D2 区域冷却时，200hPa 位势高度场和风场对热带大气非绝热加热（冷却）响应随时间的演变。由图可见，在 9 月气候背景下，当模式积分 30 天左右出现稳定态环流异常时，西北地区东西两侧出现与观测较为近似的异常反气旋性环流，虽然西侧的反气旋异常的位置较观测更为偏西（图 3d）。当我们单独给定 D1（热源）时，与同时给定 D1 加热和 D2 冷却时近似，西北地区东西两侧受异常反气旋（高压）控制（图 6a 和图 6b）；而当单独给定 D2 冷却时，西北地区上空无显著的环流异常响应（图 6c）。因此，热带印度洋到海洋性大陆（D1 区）的大气热源异常强迫对 9 月西北地区上空反气旋性环流异常起更为主导的作用。

综上，数值模拟试验结果表明：西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率是热带纬向海表温度异常相关的热带对流异常强迫导致的。热带印度洋到海洋性大陆关键区 5 月的负对流异常（T1）和 9 月的正对流异常（D1）分别对 5 月和 9 月影响西北地表气温正异常的上空反气旋环流异常起主导作用。

4. 西北 5 月和 9 月地表气温的季节预测

4.1 选取基于物理机制的预测因子

上文揭示了热带印度洋、太平洋海温异常及其相关热带对流（降水）异常的纬向分布影

响西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率的物理过程。5 月热带三极型的对流分布和 9 月热带偶极型对流分布有着怎样的热带海表温度演变背景？图 7 为热带（10°S~10°N）平均的海表温度和对流（降水）异常对于 5 月和 9 月西北地表气温主成分（PC）的超前滞后回归。如图 7a 所示，与西北地区 5 月地表气温正异常相关的是拉尼娜型衰减位相的热带海温异常分布。在拉尼娜衰减位相时，热带对流（降水）异常呈现印度洋至太平洋三极型分布（图 7b 和图 3b）。而与西北地区 9 月地表气温正异常对应的是拉尼娜发展期的热带海温异常分布（图 7c）。拉尼娜发展位相的海温异常对应热带太平洋偶极子对流异常分布（图 7d 和图 3d）。

基于上文提出的海气相互作用影响机制，能否根据前期海表温度异常信号来建立西北 5 月和 9 月地表气温年际变率的统计预测模型？海表温度预测因子的选取主要关注两类异常信号：一类是持续性预测因子（前期多个月的平均状态），反映持续不变的海表温度对西北地表气温的影响；另一类是趋势性预测因子（前期随时间变化的差异），反映海表温度演变趋势对西北地表气温的影响。选取预测因子时有两个重要标准（Li and Wang, 2018）：1）仅挑选具有物理意义的西北 5 月和 9 月地表气温年际变率影响因子作为预测因子，来建立基于物理机制的统计预测模型，从而保证统计预测模型具有可解释性。2）预测因子与预测对象具有高相关性且预测因子之间相互独立，以保证预测模型即具有较高的预测技巧又不会产生过度拟合的问题而使得在独立预报期预测技巧显著下降。

图 8 为海表温度场两类信号分别与 5 月与 9 月西北地表气温年际变率间相关系数的空间分布。针对 5 月西北地表气温年际变率，最终筛选了图 8a 中 X1 和图 8b 中 X3 这两个相互独立的海表温度预测因子（相关系数仅为 0.27）。预测因子 X1 为前期 3~4 月平均的印度洋海盆全区一致性（30°S~20°N，40°E~140°E）持续冷海温异常（将 X1 命名为 Indian Ocean Basin Mode Cooling, IOBM）。它反映的是拉尼娜衰减期时热带印度洋春季出现的整个洋盆海温负异常（Klein et al., 1999）。另一个预测因子 X3 为春季热带印度洋（45°S~20°N，40°E~140°E）海表温度的大范围上升趋势（将 X3 命名为 Indian Ocean Warming Tendency, IOWT），它反映的是拉尼娜衰减期春季印度洋负异常逐渐变弱（增温趋势）。而针对 9 月西北地表气温年际变率，确定了图 8d 中 Y2 和图 8f 中 Y5 这两个相互独立的预测因子（相关系数仅为 0.18）。预测因子 Y2 为 7~8 月平均的北大西洋（0°~70°N，100°W~10°W）的持续

性暖海温异常（将 Y2 命名为 North Atlantic warming, NAW）。它反映的是北大西洋海温异常偏暖对拉尼娜发展的预兆（Ham et al., 2013; Polo et al., 2015）。预测因子 Y5 代表 4~5 月至 7~8 月热带西至中太平洋（30°S~30°N, 130°E~150°W）西暖东冷的海表温度异常变化趋势（将 Y5 命名为 Pacific Dipole SST Tendency, PDT）。它反映的是热带太平洋海温西暖东冷的倾向对拉尼娜发展的影响（Bjerknes, 1969）。为验证选取的预测因子符合西北 5 月和 9 月地表气温年际变率的热带海表温度演变背景（图 7），我们绘制了热带（10°S~10°N）平均的海表温度对于 5 月和 9 月预测因子的超前滞后回归。如图 9 所示，5 月预测因子 IOBM 和 IOWT 均对应着拉尼娜型海温异常的衰减位相（图 9a、b），而 9 月预测因子 NAW 和 PDT 均对应着拉尼娜型海温异常的发展位相（图 9c、d）。因此，我们选取的海温预测因子均对应拉尼娜不同位相对西北 5 月和 9 月地表气温的影响。

4.2 建立季节预测模型

基于以上挑选的预测因子，我们利用多元线性回归分别建立西北 5 月和 9 月地表气温年际变率预测模型，预测结果如图 10 所示。西北 5 月地表气温在训练期（1961~2006 年）回报的主成分（PC）时间相关技巧评分（TCC）为 0.64，平均方差技巧评分（MSSS）为 0.41。而在独立预报期（2007~2016 年），TCC 为 0.74，MSSS 为 0.55，通过了 99% 显著性检验。西北 9 月地表气温在训练期和独立预报期的 TCC(MSSS) 分别为 0.64 和 0.62(0.41 和 0.37)，也均取得了良好的预报效果。因此，无论是训练期还是独立预报期，基于具有物理涵义的预测因子，我们建立的针对西北 5 月和 9 月地区地表气温年际变率的季节预测模型都取得了较好的效果。

值得一提的是，统计预测模型均存在独立预报期技巧迅速下降的问题，这一方面是由于统计训练期间模型“过度拟合”所导致的，另外一方面可能由于选取的预测因子存在年代际变化导致预测技巧不稳定。在本研究中，我们仅利用训练期的数据选取预测因子，同时考虑了预测因子的可解释性和独立性，因此很大程度上能够避免预测模型“过度拟合”的问题。为了检验预测因子是否存在年代际变化，我们将西北地区 5 月和 9 月地表气温年际变率与其所有潜在预测因子分别进行了 11 年滑动相关分析。如图 11 所示，5 月 IOBM 和 IOWT 基

本上一直维持与西北地表气温年际变率的高相关性，虽然 IOBM 在 80 年代之前与 PC 相关性较弱，但是 IOWT 一直存在较好相关，对 IOBM 在 80 年代之前的弱相关一定程度上给予了弥补。9 月 NAW 和 PDT 也在不同年代也都维持着与西北地表气温年际变率较高的相关性，并呈现一种反相演变的关系，表明 NAW 和 PDT 相互补充、相互独立。5 月和 9 月预测因子与地表气温年际变率近期的高相关也表明在未来一段时期内，我们建立的统计预测模型应能维持较高的预测技巧。

5. 总结与讨论

本文通过统计诊断和数值模拟方法，揭示了西北地区季节转换期 5 月和 9 月的地表气温年际变率规律及其海气相互作用过程。最后基于海气相互作用的机理，建立具有较好的预测效果的统计预测模型。主要结论如下：

(1) 西北地区 5 月和 9 月地表气温年际分量的经验正交函数分解第一模态为相似的全区一致型分布，5 月和 9 月地表气温具有不同的年际变率特征。

(2) 西北地区 5 月地表气温年际变率主要受热带纬向三极型海温异常及相关对流强迫影响，而 9 月地表气温年际变率主要是热带纬向偶极型海温异常及其相关对流强迫所驱动的。5 月热带三极子对流异常和 9 月热带偶极子对流异常均使西北地区上空受反气旋性环流异常控制，导致晴朗少云、太阳短波辐射增加，从而使得西北地表气温出现正异常。

(3) 西北地区 5 月和 9 月地表气温正异常分别对应拉尼娜衰减和发展位相的热带海表温度异常。根据 5 月和 9 月西北地表气温年际变率的前期海表温度异常相关信号，分别选取与拉尼娜衰减和发展期相关的海表温度异常预测因子，并利用多元线性回归建立基于物理机制的统计预测模型，取得了良好的独立预报效果。

本研究中我们发现西北地区 5 月和 9 月地表气温的年际变率存在显著负相关关系（图 2c），相关系数为-0.28，通过了 90%置信度水平的显著性检验。这种明显的“气候韵律”的形成与下垫面如海洋和冰雪的季节变化有着密切联系。下垫面异常可以通过影响大气环流影响区域气候变化，但下垫面的异常变化对大气环流的影响存在数月的延迟，这使得韵律现象

存在数月间隔（王绍武，1983）。林纾（2003）发现西北地区 500hPa 高度距平的 150 天左右的准韵律规律对甘肃省的天气过程有一定的预报能力。本文对西北地区 5 月和 9 月地表气温的年际变率物理机制及海气相互作用机理已有了初步认识，西北地区 5 月和 9 月地表气温正异常分别与拉尼娜衰减和发展位相的热带海表温度异常有关，但热带海表温度异常的季节变化造成 5 月和 9 月的大气环流背景差异如何导致西北地表气温在这两个月的反相变化值得进一步深入探讨。此外，本文仅讨论了西北地区地表气温的年际变化，而西北地区地表气温也存在明显的年代际变化特征。在全球变暖趋势下的西北地区地表气温又有怎样的年代际变化？其物理机制是什么？弄清这些问题可以加深对西北地区地表气温变化动力来源的科学认知，从而进一步提高西北地表气温短期气候预测水平。

参考文献(References)

- Bjerknes J, 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97:163-172. doi: 10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2.
- 陈冬冬, 戴永久. 2009. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析 [J]. *大气科学*, 33(6): 1247-1258. Chen Dongdong, Dai Yongjiu. 2009. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in Northwest China over the last 50 years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33(6): 1247-1258. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.11.
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. *J. Hydrometeorol.*, 3(3): 249-266. doi: 10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2.
- 陈少勇, 王劲松, 邢晓宾, 等. 2011. 青藏高原 OLR 异常与中国西北干旱区气温的关系 [J]. *干旱气象*, 29(03): 276-282. Chen Shaoyong, Wang Jinsong, Xing Xiaobin, et al. 2011. Relationship Between abnormal OLR over Qinghai-Tibet plateau and air temperature in arid region of Northwest China [J]. *J. Arid Meteor. (in Chinese)*, 29(03): 276-282. doi: 10.3969/j.issn.1006-7639.2011.03.002.
- 陈少勇, 王劲松, 郭俊庭, 等. 2012. 中国西北地区 1961-2009 年极端高温事件的演变特征 [J]. *自然资源学报*, (5): 832-844. Chen Shaoyong, Wang Jinsong, Guo Juntao, et al. 2012. Evolution characteristics of the extreme high temperature event in Northwest China from 1961 to 2009 [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, (5): 832-844. doi: 10.11849/zrzyxb.2012.05.012.
- Chen Y N, Deng H J, Li B F, et al. 2014. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China [J]. *Quat. Int.*, 336(26): 35-43. doi: 10.1016/j.quaint.2013.12.057.
- Chen Z S, Chen Y N, Bai L, et al. 2017. Multiscale evolution of surface air temperature in the arid region of Northwest China and its linkages to ocean oscillations [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 128: 945-958. doi: 10.1007/s00704-016-1752-7.
- 丁一汇, 王守荣. 2001. 中国西北地区气候与生态环境概论 [M]. 气象出版社. Ding Yihui, Wang Shourong. 2001. Introduction to climate and ecological environment in Northwest China [M]. China Meteorological Press.
- Ham Y G, Kug J S, Park J Y, et al. 2013. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events [J]. *Nat. Geosci.*, 6: 112-116. doi: 10.1038/ngeo1686.
- Held I M, Suarez M J. 1994. A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75(10): 1825-1830. doi: 10.1175/1520-0477(1994)075<1825:APFTIO>2.0.CO;2.

- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary scale atmospheric phenomenon associated with the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109(4): 813-829. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0813:PSAPAW>2.0.CO;2.
- Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *J. Climate*, 30(20): 8179-8205. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR reanalysis 40-year project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437-471. doi: 10.1175/15200477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Klein S A, Soden B J, Lau N. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. *J. Climate*, 12(4): 917-932. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<0917:RSSTVD>2.0.CO;2.
- Li B F, Chen Y N, Shi X. 2012. Why does the temperature rise faster in the arid region of Northwest China [J]? *J. Geophys. Res.*, 112(117): 9060-9075. doi: 10.1029/2012JD017953.
- Li B F, Chen Y N, Chen Z S, et al. 2016. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from 1960 to 2010 [J]? *Atmos. Res.*, 167: 275-284. doi: 10.1016/j.atmosres.2015.08.017.
- 李栋梁, 谢金南, 赵仲莲, 等. 1997. 中国西北夏季气温变化及其对青藏高原地面感热异常响应的诊断与数值试验 [J]. *气候与环境研究*, 2(4): 377-386. Li Dongliang, Xie Jinnan, Zhao Zhonglian, et al. 1997. A diagnosis and numerical experiment of responses about summer temperature change in Northwest China on surface Sensible heat anomaly in the Qinghai-Xizang plateau [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 2(4): 377-386.
- 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 2003. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望 [J]. *冰川冻土*, 25(2): 135-142. Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. 2003. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China [J]. *J. Glaciol. Geocryol. (in Chinese)*, 25(2): 135-142. doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2003.02.004.
- Li J, Wang B. 2018. Predictability of summer extreme precipitation days over eastern China [J]. *Clim. Dynam.*, 51(11-12): 4543-4554. doi: 10.1007/s00382-017-3848-x.
- Li J, Wang B. 2016. How predictable is the anomaly pattern of the Indian summer rainfall [J]? *Clim. Dynam.*, 46: 2847-2861. doi: 10.1007/s00382-015-2735-6.
- Li T. 2006. Origin of the summertime synoptic-scale wave train in the western North Pacific [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 1093-1102. doi: 10.1175/JAS3676.1.
- 李耀辉, 李栋梁. 2004. ENSO 循环对西北地区夏季气候异常的影响 [J]. *高原气象*, 23(6): 930-935. Li Yaohui, Li Dongliang. 2004. Effects of ENSO cycle on the summer climate anomaly over Northwest China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 23(6): 930-935. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2004.06.028.
- 林纾. 2003. 500hPa 准 150 天韵律在过程预报中的应用研究 [C]. *新世纪气象科技创新与大*

- 气科学发展. 北京: 气象出版社, 996-1000. Lin Shu. 2003. Application of 500hPa quasi-150 days rhythm in process prediction [C]. The Innovation of Meteorological Science and Technology and the Development of Atmospheric Science in the New Century (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 996-1000.
- Lindzen R S, Nigam S. 1987. On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics [J]. J. Atmos. Sci., 44: 2418-2436. doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<2418:OTROSS>2.0.CO;2.
- Lorenz E N. 1956. Statistical forecasting program: Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction [J]. Sci. Rep., 409(2): 997-999.
- 马鹏里, 王若升, 王宝灵, 等. 2002. 我国西北地区地面最高和最低气温变化及分布的特征 [J]. 高原气象, 21(5): 509-513. Ma Pengli, Wang Ruosheng, Wang Baoling, et al. 2002. The characteristics of maximum and minimum temperature change and distribution in Northwest China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 21(5): 509-513. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2002.05.011.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 65: 373-390. doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<1554:TAOPVT>2.0.CO;2.
- North G, Bell T, Cahalan R, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Weather Rev., 110: 699-706.
- Polo I, Martin-Rey M, Rodriguez-Fonseca B. et al. 2015. Processes in the Pacific La Niña onset triggered by the Atlantic Niño [J]. Climate Dyn., 44: 115-131. doi: 10.1007/s00382-014-2354-7.
- 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 2002. 中国西部生态环境变化与对策建议 [J]. 地球科学进展, 17(3): 314-319. Qin Dahe, Din Yihui, Wang Shaowu, et al. 2002. Ecological and environmental change in West China and its response strategy [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 17(3): 314-319. doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2002.03.003.
- 沈学顺, 木本昌秀. 2007. 春季欧亚大陆地表气温变化特征的气候意义 [J]. 大气科学, 31(1): 19-27. Shen Xueshun, Masahide Kimoto. 2007. Studies of the interannual variability of springtime Eurasian surface air temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(1): 19-27. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.02.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北地区气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步讨论 [J]. 冰川冻土, 24(3): 219-226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. J. Glaciol. Geocryol. (in Chinese), 24(3): 219-226. doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.001.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23(2): 152-164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J].

- Quat. Sci. (in Chinese), 23(2): 152-164. doi: 10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.005.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2011. 我国极端高温事件的年代际变化及其与大气环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 16(2): 199-208. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2011. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 16(2): 199-208. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.02.09.
- Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. 2017. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China observation and projection [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(3), 289-305. doi: 10.1007/s00376-016-6160-5.
- 王兰宁, 田武文, 黄祖英, 等. 2000. 西北地区东部夏季温度特征及与热带 SSTA 的相关分析 [J]. 气象科学, 20(1): 23-29. Wang Lanning, Tian Wuwen, Huang Zuying, et al. 2000. A diagnosis for characteristic on summer temperature in the eastern part of Northwest China and its relation with SSTA over tropical pacific [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 20(1): 23-29. doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2000.01.004.
- 王绍武. 1983. 关于长期天气预报(续)——五、韵律活动 [J]. 浙江气象科技, (04): 2-6. Wang Shaowu. 1983. On long-term weather forecast (Continued) - V. rhythmic activities [J]. Zhejiang Meteorological Science and Technology, (04): 2-6.
- Wei K, Wang L. 2013. Reexamination of the aridity conditions in arid northwestern China for the last decade [J]. J. Climate, 26(23): 9594-9602. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00605.1.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 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, 56(4): 1102-1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56(4): 1102-1111. doi: 10.6038/cjg20130406.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58(z1): 1-10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58(z1): 1-10. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001.
- 张存杰, 谢金南, 李栋梁, 等. 2002. 东亚季风对西北地区干旱气候的影响 [J]. 高原气象, 21(2): 193-198. Zhang Cunjie, Xie Jinnan, Li Dongliang, et al. 2002. Effect of East-Asian monsoon on drought climate of Northwest China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 21(2): 193-198. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2002.02.012.
- Zhang M, Yu H P, Huang J P, et al. 2019. Comparison of extreme temperature response to 0.5°C additional warming between dry and humid regions over East-Central Asia [J]. Int. J. Climatol., 39(7): 3348-3364. doi: 10.1002/joc.6025.
- 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 2000. 论西北干旱气候的若干问题 [J]. 中国沙漠, 20(4): 357-362. Zhang Qiang, Hu Yinqiao, Cao Xiaoyan, et al. 2000. On some problems of arid climate system

of Northwest China [J]. J. Desert Res. (in Chinese), 20(4): 357-362.

- 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 2010. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响 [J]. 干旱气象, 28(1): 1-7. Zhang Jiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, et al. 2010. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 28(1): 1-7. doi: 10.3969/j.issn.1006-7639.2010.01.001.
- Zhu Z W, Li T. 2017. Empirical prediction of the onset dates of South China Sea summer monsoon [J]. Clim. Dynam., 48(5): 1633-1645. doi: 10.1007/s00382-016-3164-x.

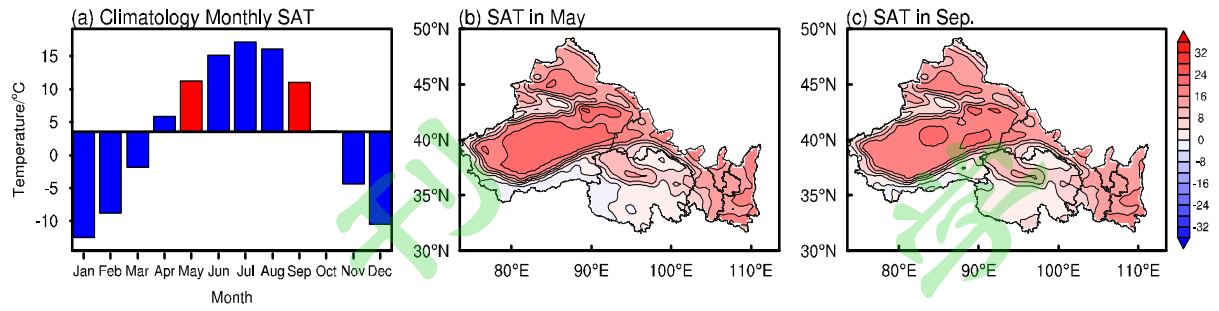


图 1 西北地区 (a) 区域平均的地表气温气候态逐月演变, 以及 (b) 5 月和 (c) 9 月平均地表气温气候态空间分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。

Fig.1 (a) The monthly evolution of climatological surface air temperature (bar, unit: $^{\circ}\text{C}$) over Northwest China, and the spatial pattern of the surface air temperature in (b) May and (c) September (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$).

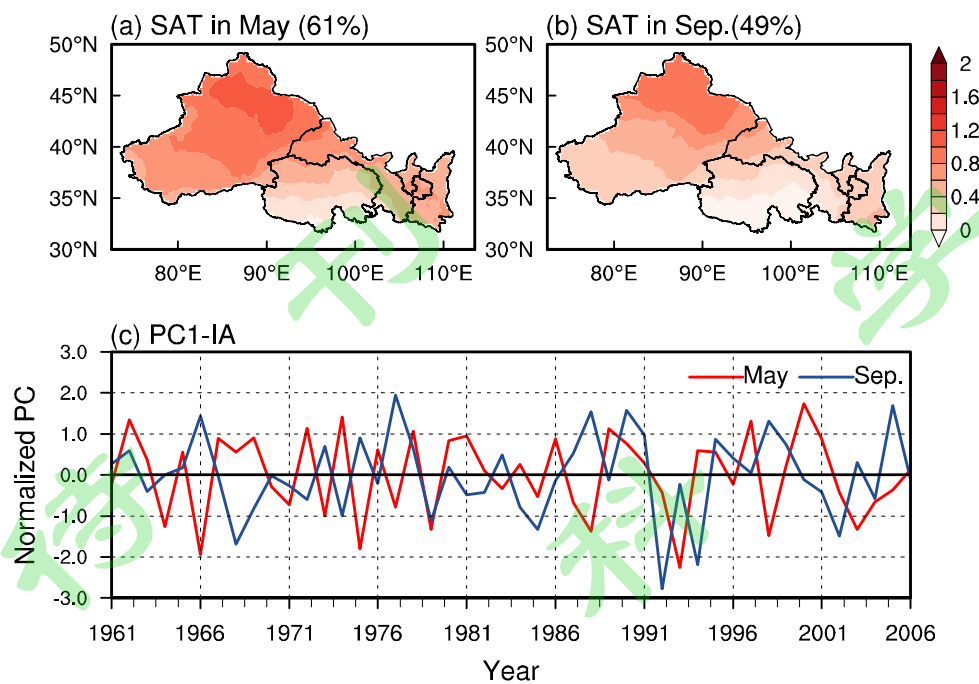


图 2 西北地区 (a) 5 月和 (b) 9 月地表气温年际分量的第一模态空间分布及其 (c) 各自主成分时间序列。

Fig.2 The first mode of the interannual surface air temperature over Northwest China in (a) May and (b) September, and (c) their principal components.

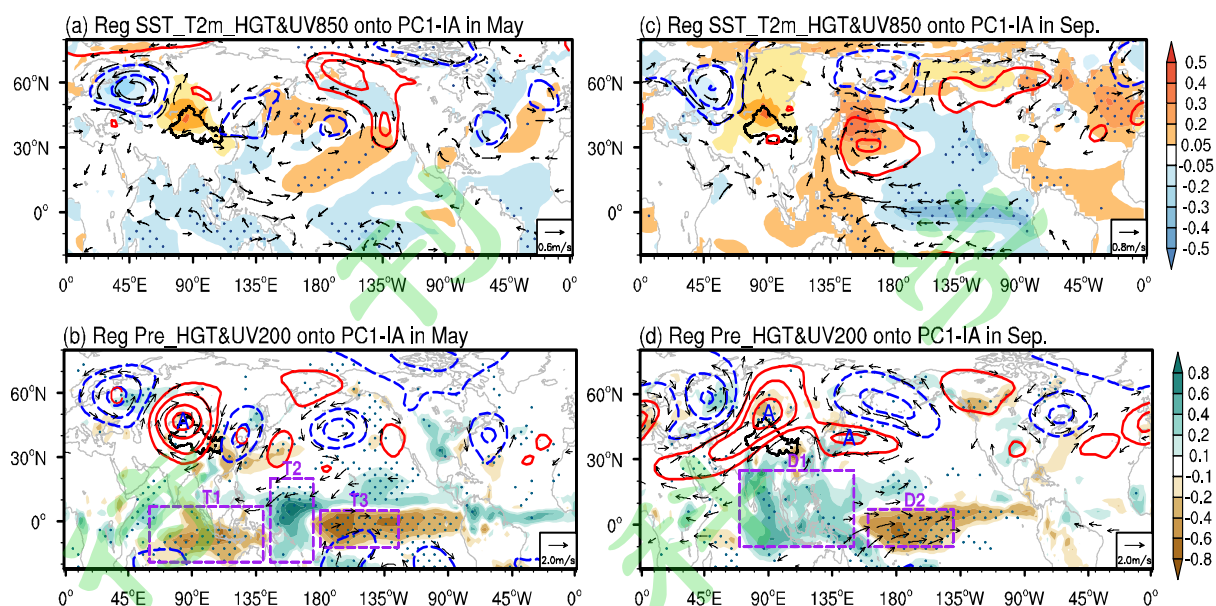


图3 (a) 同期 850hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm)、风场 (矢量, 单位: m s^{-1}) 和海表/地表气温 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$), 以及 (b) 200hPa 高度场 (等值线, 单位: gpm)、风场 (矢量, 单位: m s^{-1}) 和降水场 (填色, 单位: mm d^{-1}) 回归至 5 月西北地表气温主成分 (PC)。

(c)、(d) 同 (a)、(b) 但为 9 月。打点为海表温度以及降水场回归系数通过 90% 显著性检验的区域, 紫色虚线框为热带降水强迫关键区, 黑色实线内为西北地区。

Fig.3 (a) 850hPa geopotential height field (contour, unit: gpm), wind field (vector, unit: m s^{-1}) and sea surface/surface air temperature (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$), and (b) 200hPa geopotential height field (contour, unit: gpm), wind field (vector, unit: m s^{-1}) and precipitation (shading, unit: mm d^{-1}) onto the principal component of surface air temperature of Northwest China in May. (c), (d) are same as (a), (b) but for September. Dotted areas are regression coefficients of SST and precipitation passing the 90% confidence level. The purple boxes are the key regions of tropical diabatic forcing, and the solid black line outlines Northwest China.

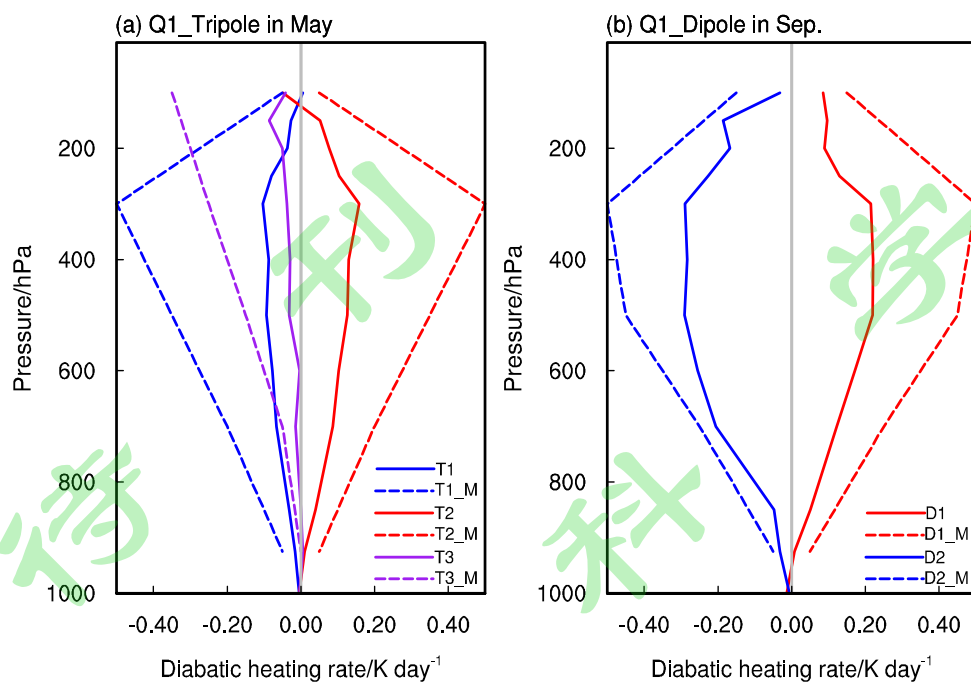


图 4 (a) 5 月 T1、T2、T3 区域和 (b) 9 月 D1、D2 区域上空与西北地区地表气温年际变率相关的大气非绝热加热垂直廓线 (彩色实线; 单位: 1K day^{-1}), 彩色虚线为数值模式中对应区域上空给定的大气非绝热加热垂直廓线 (单位: 10K day^{-1})

Fig.4 The observed vertical profile of diabatic heating related to the interannual variability of surface air temperature in Northwest China of (a) T1, T2, T3 region in May and (b) D1, D2 region in September (color solid line, unit: 1K day^{-1}). Color dotted lines represent the prescribed vertical profile of diabatic heating in the model of key region of precipitation (unit: 10K day^{-1}).

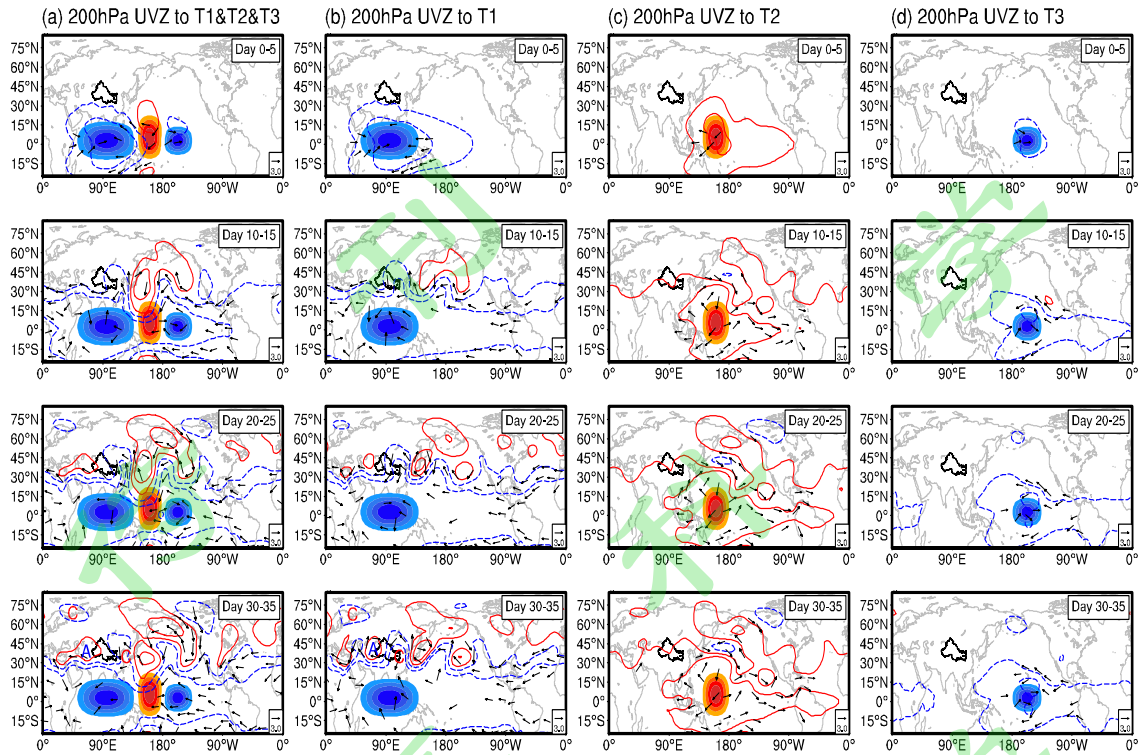


图 5 模式中 5 月 200hPa 位势高度（等值线；gpm）和风场（矢量； m s^{-1} ）对（a）T1、T2、T3 区域上空大气加热或冷却共同作用的响应，以及分别对（b）T1 上空冷却、（c）T2 上空加热和（d）T3 上空冷却作用的响应。红色（蓝色）阴影分别为模式中理想化大气加热（冷却）率的水平分布，中心加热强度为 1K d^{-1} ，黑色实线内为西北地区。

Fig.5 The 200hPa geopotential height (contours; gpm) and wind (vectors; m s^{-1}) response to (a) the combined effect of atmospheric heating and cooling over T1, T2 and T3, (b) the cooling over T1, (c) the heating over T2 and (d) the cooling over T3 in May. The red (blue) shading is the horizontal pattern of the idealized heating (cooling) with their maximum amplitude of 1K d^{-1} , solid black line outlines Northwest China.

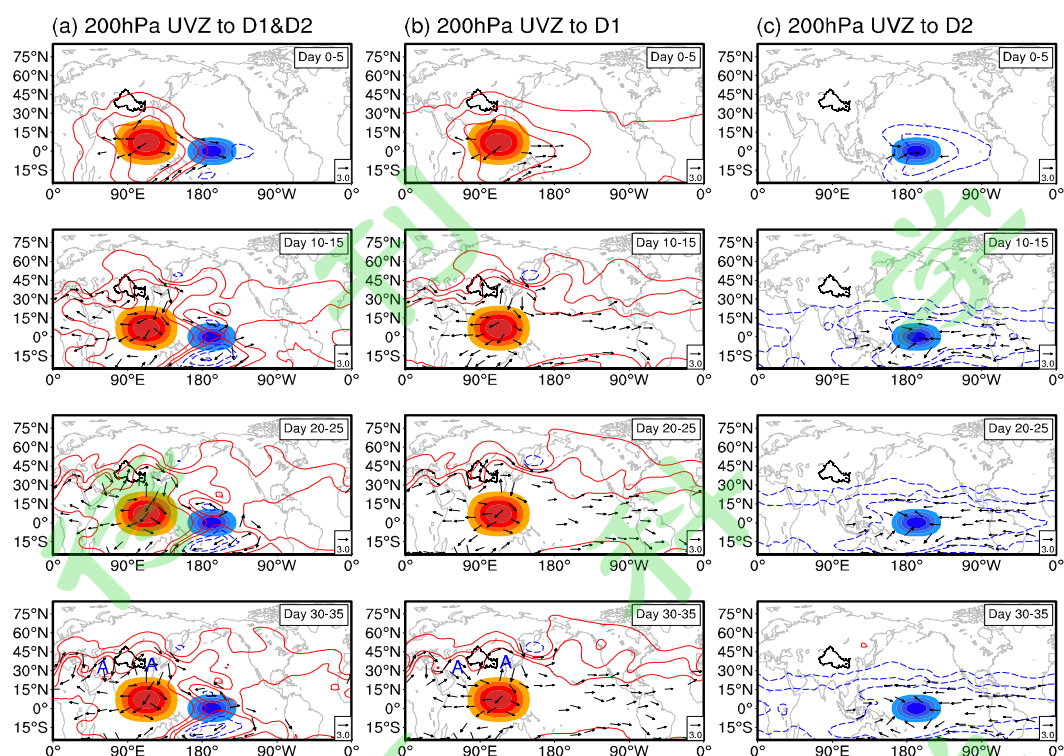


图 6 模式中 9 月 200hPa 位势高度（等值线；gpm）和风场（矢量； m s^{-1} ）对（a）D1 和 D2 区域上空大气加热和冷却共同作用的响应，以及分别对（b）D1 上空加热、（c）D2 上空冷却作用的响应。

Fig.6 The 200hPa geopotential height (contours; gpm) and wind (vectors; m s^{-1}) response to the combined action of atmospheric heating or cooling over (a) D1 and D2, and the responses to heating over (b) D1 and cooling over (c) D2 in September, respectively.

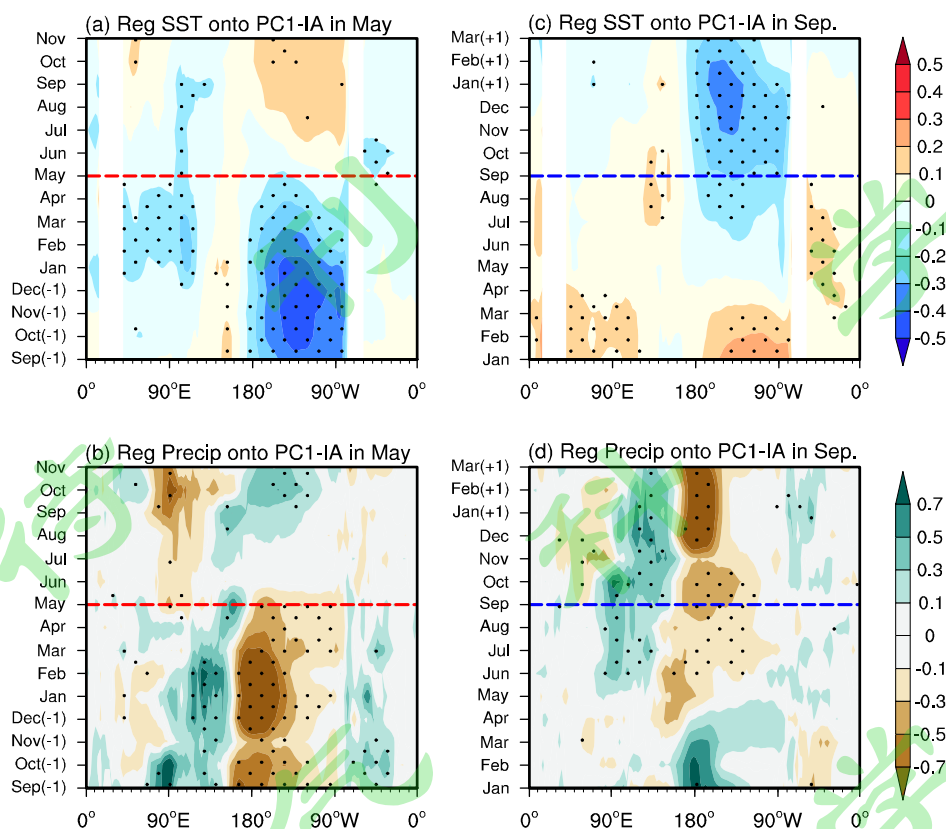


图 7 10°S~10°N 平均的 (a) 海表温度 (单位: °C) 和 (b) 降水 (单位: mm d⁻¹) 对 5 月西北地表气温主成分 (PC) 的超前滞后回归。打点区域为海表温度和降水回归系数通过 90% 的显著性检验。(c)、(d) 同 (a)、(b) 但为 9 月。(a)、(b) 和 (c)、(d) 中红色和蓝色虚线分别代表 5 月和 9 月。

Fig.7 10°S~10°N averaged lead-lag regression of (a) sea surface temperature (unit: °C) and (b) precipitation (unit: mm d⁻¹) onto the principal component of surface air temperature over Northwest China in May. Dotted areas are regression coefficients of SST and precipitation passing the 90% confidence level. (c), (d) are same as (a), (b) but for September. Red and blue dashed line in (a), (b) and (c), (d) represents May and September, respectively.

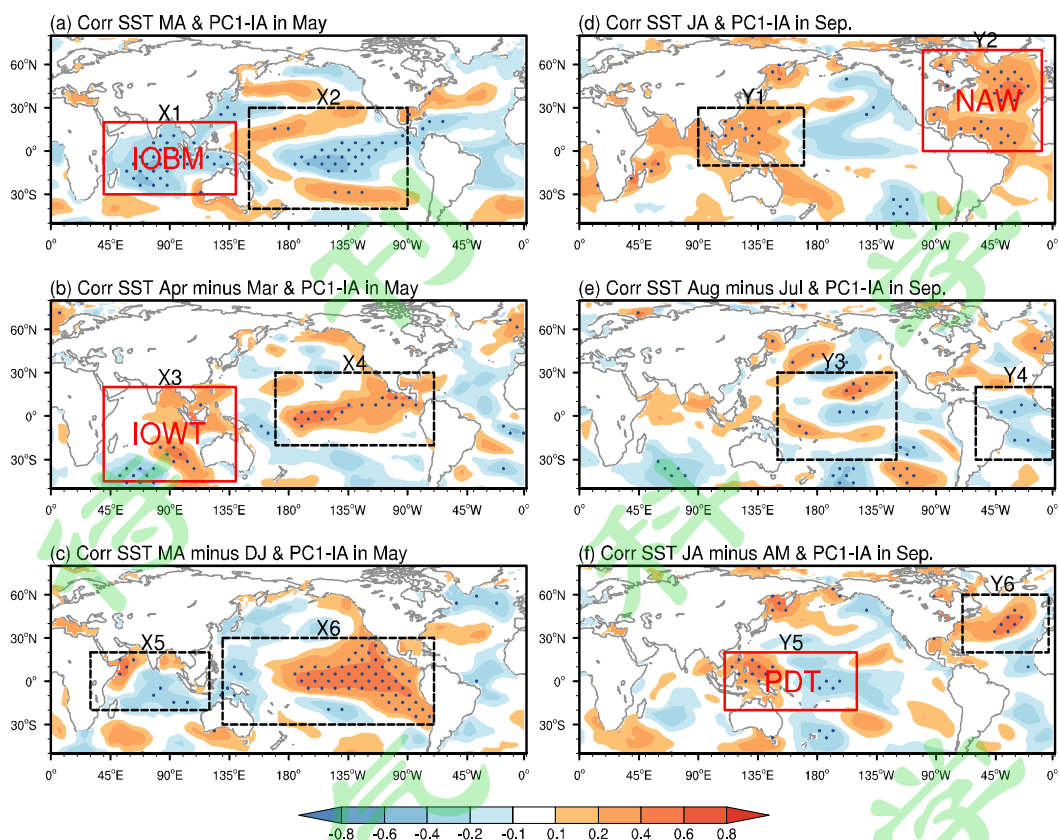


图 8 5 月和 9 月西北地表气温主成分 (PC) 与前期表温度相关系数空间分布。(a)、(b)、(c) 分别为 3~4 月平均, 4 月减 3 月, 以及 3~4 月平均减 12~1 月平均的海温场与 5 月 PC 的相关分布; (b)、(d)、(f) 分别为 7~8 月平均, 8 月减 7 月, 以及 7~8 月平均减 4~5 月平均的海温场与 9 月 PC 的相关分布。打点区域表示通过了 95% 的置信水平, 方框中为潜在预报因子区域。

Fig.8 Spatial distribution of correlation coefficient between surface air temperature (PC) in May and September in Northwest China. (a), (b) and (c) are the correlation distribution between the SST field of March and April average, April minus March, March and April average minus December and January average and PC in May. (d), (e) and (f) are the correlation distribution between the SST field of July and August average, August minus July, July and August average minus April and May average. Dotted area indicates passed the statistically significance at the 95% confidence level, boxes are the key area of predictors.

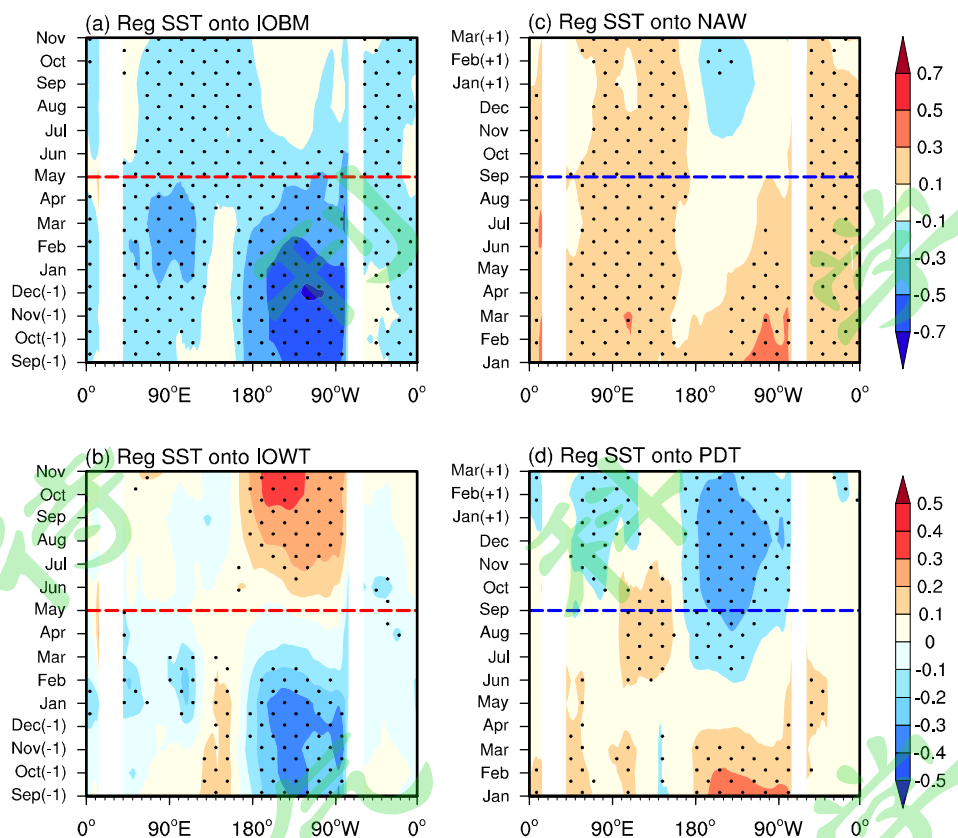


图 9 10°S~10°N 平均的 (a)、(b) 海表温度 (单位: °C) 对 5 月预测因子的超前滞后回归, 打点区域为海表温度回归系数通过 90% 的显著性检验, (c)、(d) 同 (a)、(b) 但为 9 月。(a)、(b) 和 (c)、(d) 中红色和蓝色虚线分别代表 5 月和 9 月。

Fig.9 10°S-10°N averaged lead-lag regression of (a) (b) sea surface temperature (unit: °C) onto the predictors in May. Dotted areas are regression coefficients of SST passing the 90% confidence level. (c), (d) are same as (a), (b) but for September. Red/blue dashed line in (a), (b) and (c), (d) represents May and September, respectively.

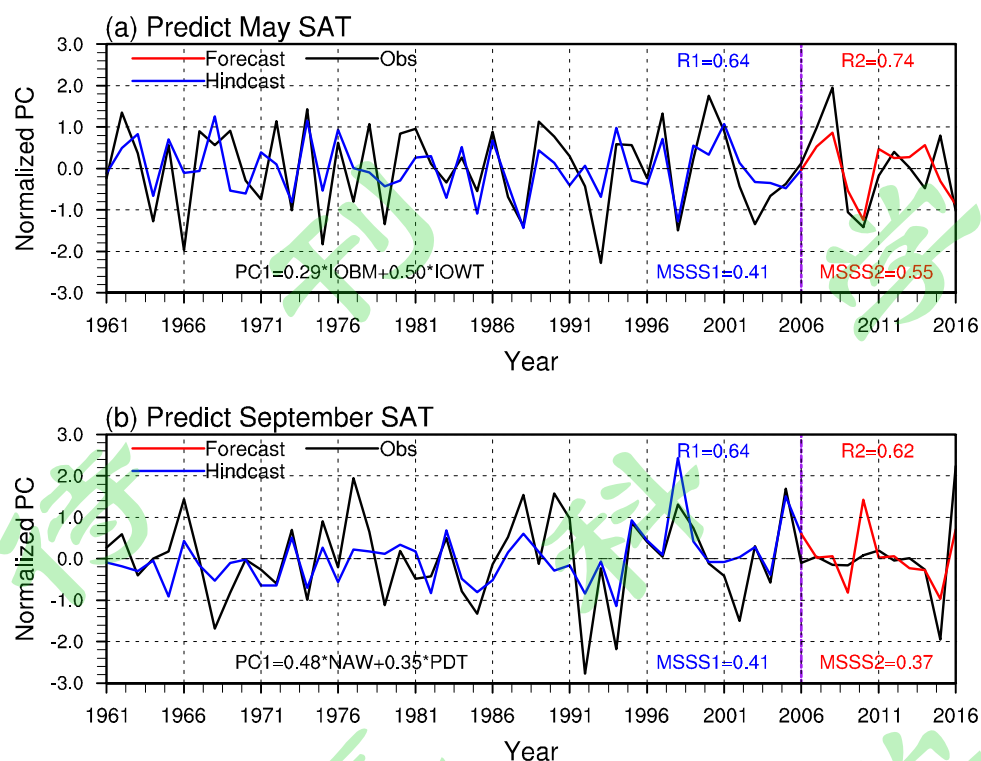


图 10 (a) 5 月和 (b) 9 月西北地表气温主成分 (PC) 的逐年变化。黑线为观测，蓝线为 1961~2006 年回报结果，红线为 2007~2016 年独立预报结果。

Fig.10 The principal component (PC) of surface air temperature in Northwest China in (a) May and (b) September. The black line is the observation, the blue line is the hindcast from 1961 to 2006, and the red line is the independent forecast from 2007 to 2016.

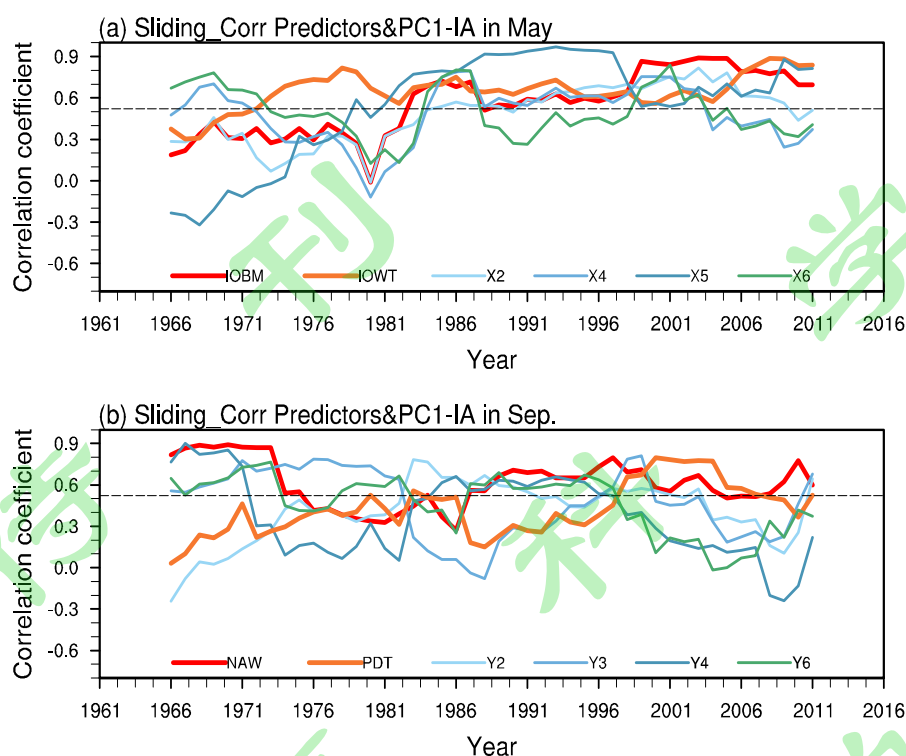


图 11 1961~2016 年间 (a) 5 月和 (b) 9 月西北地表气温主成分与各自潜在预测因子的 11 年滑动相关。虚线为 95% 的显著性检验的相关系数阈值。

Fig.11 The 11 years sliding correlation coefficient between principal components of surface air temperature in Northwest China in (a) May and (b) September and their potential predictors. The dotted line is the threshold of correlation coefficient 95% significance level.