大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

中国东北地区春季透雨早晚与2～3月热带印度洋海温异常的联系

徐士琦 刘刚 杨雪艳 廉毅 刘柏鑫 房一禾 胥珈珈

Relationship between February–March Tropical Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomaly and Onset Date of Spring Soaking Rain in Northeast China

XU Shiqi LIU Gang YANG Xueyan LIAN Yi LIU Baixin FANG Yihe XU Jiajia

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.2109.21003

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

春季赤道印度洋纬向–垂直环流的变化特征及其与Walker环流的关系
Variations of the Spring Equatorial Indian Ocean Zonal–Vertical Circulation and Its Correlation with the Walker Circulation
大气科学. 2017, 41(1): 213 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.1601.15259

华北雨季开始早晚与大气环流和海表温度异常的关系
The Relationship between the Onset Date of the Rainy Season in North China and the Atmospheric Circulation and SST
大气科学. 2019, 43(1): 107 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.1801.17242

我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系
Major Modes of Midsummer Air Temperature in Southern China and Their Relationship with Sea Surface Temperature Anomalies
大气科学. 2018, 42(6): 1245 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.1801.17186

冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析
Circulation Characteristics of Extreme Cold Events in Northeast China during Wintertime
大气科学. 2018, 42(5): 963 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.1710.17119

影响江南春雨年际变化的前期海洋信号及可能机理
Preceding Oceanic Influences on the Inter–annual Variation of Spring Persistent Rain in Jiangnan of China and the Possible Mechanism
大气科学. 2017, 41(2): 395 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.1605.16133

热带印度洋–西太平洋水汽输送异常对中国东部夏季降水的影响
Effects of Anomalous Water Vapor Transport from Tropical Indian Ocean–Western Pacific on Summer Rainfall in Eastern China
大气科学. 2017, 41(5): 988 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006–9895.1702.16232

关注微信公众号，获得更多资讯信息

第 46 卷第 4 期 大 气 科 学 Vol. 46 No. 4
2022 年 7 月 Chinese Journal of Atmospheric Sciences Jul. 2022

徐士琦, 刘刚, 杨雪艳, 等. 2022. 中国东北地区春季透雨早晚与 2～3 月热带印度洋海温异常的联系 [J]. 大气科学, 46(4): 873−885. XU Shiqi, LIU Gang, YANG Xueyan, et al. 2022. Relationship between February–March Tropical Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomaly and Onset Date of Spring Soaking Rain in Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(4): 873−885. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21003

中国东北地区春季透雨早晚与 2～3 月热带印度洋海温异常的联系

徐士琦[1,4,5] 刘刚[2,5] 杨雪艳[1] 廉毅[5] 刘柏鑫[1] 房一禾[3,4] 胥珈珈[6]

1 吉林省气候中心, 长春 130062
2 吉林省突发事件预警信息发布中心, 长春 130062
3 沈阳区域气候中心, 沈阳 110016
4 东北冷涡研究重点开放实验室, 沈阳 110016
5 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062
6 吉林省白山市气象局, 白山 134300

摘 要 利用 1961～2019 年中国东北地区测站逐日降水资料、美国国家环境预报中心/大气研究中心的月平均再分析资料、NOAA 重构的月平均海温和向外长波辐射资料，采用统计诊断方法，从年际时间尺度上分析了东北春季透雨早晚环流特征和前期海温，尤其是热带印度洋海温强迫的联系。结果表明：春季透雨日期与 4 月降水量的变化具有显著的一致性，典型透雨偏早年的开始时间集中在 4 月中下旬，偏晚年的开始时间集中在 5 月中下旬；4 月东北亚上空 500 hPa 位势高度场上，若呈自西向东的“−+”异常环流分布，东北地区以偏南风和气旋性环流为主，有利于水汽输送，春季透雨开始偏早，反之，春季透雨开始偏晚；2～3 月热带印度洋暖海温异常是中国东北地区春季透雨偏早的重要稳定影响源之一，其可能机制是，若热带印度洋全区一致海温模态呈正位相，有利于 4 月西北太平洋地区呈异常反气旋，东北亚地区 500 hPa 环流异常类似春季透雨偏早年形势，东北地区位于 200 hPa 西风急流出口区右侧，垂直上升运动增强，呈现出多雨形势。

关键词 中国东北 春季透雨 年际变化 大气环流 热带印度洋一致增暖
文章编号 1006-9895(2022)04-0873-13 **中图分类号** P461 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21003

Relationship between February–March Tropical Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomaly and Onset Date of Spring Soaking Rain in Northeast China

XU Shiqi[1,4,5], LIU Gang[2,5], YANG Xueyan[1], LIAN Yi[5], LIU Baixin[1], FANG Yihe[3,4], and XU Jiajia[6]

1 *Climate Center of Jilin Province*, *Changchun* 130062

收稿日期 2021-05-04；**网络预出版日期** 2021-12-09
作者简介 徐士琦，女，1991 年出生，工程师，主要从事短期气候预测和气候变化研究。E-mail: xushiqi91@163.com
通讯作者 刘刚，正研级高工，E-mail: loverdream1999lg@126.com
资助项目 国家自然科学基金项目 41975101、41630424、41875119、42005037，中国气象局创新与发展专项 CXFZ2021J022，辽宁省自然科学基金项目博士启动研究基金 2019-BS-214，吉林省气象局科研课题项目 201711
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41975101, 41630424, 41875119, 42005037), Special Project for Innovation and Development of China Meteorological Administration (Grant CXFZ2021J022), Liaoning Provincial Natural Science Foundation Project (Grant PhD Start-up Research Fund 2019-BS-214), Scientific Research Project of Jilin Meteorological Bureau (Grant 201711)

2 *Emergency Warning Information Distribution Center of Jilin Province*, *Changchun* 130062
3 *Regional Climate Center of Shenyang*, *Shenyang* 110016
4 *Key Open Laboratory of Northeast Cold Vortex Research*, *Shenyang* 110016
5 *Laboratory of Research for Middle–High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon*, *Changchun* 130062
6 *Baishan Meteorological Bureau of Jilin Province*, *Baishan* 134300

Abstract We analyzed the climatic characteristics of early and late years of spring soaking rain (SSR) in Northeast China (NEC) and the relationship with sea surface temperature (SST) especially the tropical Indian Ocean SST forcing from the interannual time scale on the basis of the daily precipitation data from 1961 to 2019 at stations in NEC, monthly mean data of the National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis, sea surface temperature (SST) data reconstructed using NOAA, and outgoing longwave radiation (OLR) data using statistical diagnostic methods such as causal analysis, correlation analysis and regression analysis. Results showed that the onset date of SSR and April precipitation were considerably consistent. The onset date of typical SSR was concentrated in mid–late April during the early years (1964, 1968, 1969, 1979, 1983, 1988, 1990, 1991, 1999, 2002, 2005, 2010, 2013, 2015, 2016) and in mid–late May during late years (1965, 1970, 1971, 1972, 1985, 1986, 1989, 1993, 1994, 1997, 2001, 2003, 2006, 2014, 2017, 2019). If 500-hPa geopotential height fields over Northeast Asia in April showed a "− +" anomalous circulation distribution from west to east with southerly winds and cyclonic circulation dominating in Northeast Asia, which were conducive to water vapor transport, SSR started early, and vice versa. The warm sea surface temperature anomaly (SSTA) in the tropical Indian Ocean during February–March was one of the important sources of stable influence in the early years of the SSR in NEC. The possible impact mechanism was that the Indian Ocean Basin warming (IOBW) in a positive phase was favorable to the anomalous anticyclone in Northwest Pacific during April and the 500-hPa atmospheric circulation anomaly over Northeast Asia was similar to that of the early years of SSR. The NEC was situated in the right of the 200-hPa westerly jet stream exit area with an enhanced vertical upward motion, resulting in increased precipitation.

Keywords Northeast China, Spring soaking rain, Interannual, Circulation, Indian Ocean basin warming

1 引言

中国东北地区是全国最大的商品粮食和农业生产基地，粮食产量直接影响到国民经济的发展。过去几十年，气象学者对于东北地区的天气和气候开展了大量研究，但这些研究多数是针对东北地区冬季、夏季的气温和降水（武炳义等, 2008; 沈柏竹等, 2011; 王会军和贺圣平, 2013; 李尚锋等, 2018），而对东北春季降水的研究较少。春季 4～5 月正值东北地区作物播种和出苗的关键期，自然降水是土壤水分的重要来源，也是作物增产的必要条件，这期间降水的强度及出现时间的早晚决定了土壤墒情（张脉惠等, 2012; 韦晋等, 2013;吴香华等, 2014）。春季透雨开始的早晚是决定春季旱涝的关键，它直接影响着春耕生产是否顺利、苗情长势以及全年农业生产的年景。因此，研究春季透雨早晚对农业生产具有十分重要的意义和价值。

"透雨"主要指在天气比较干旱的条件下，可以使当地主要农作物在一个较长的时期内，得到维持正常生长所需水分的一次降水过程（陶祖文和裴步祥, 1983）。中国北方旱作地区通常以浸透地表干土层并与底部湿土层相接的降水过程为"透雨"；而南方水作地区通常以基本能满足作物正常生长发育需要时的降水过程为"透雨"。透雨的降水量界限因不同地区、不同干旱程度而异，尚无统一标准。陶祖文和裴步祥（1983）从作物对土壤水分要求、土壤水分运动、作物对土壤水分吸收、土壤深层的"接墒"和蒸发（散）的水分消耗等因素，认为华北地区春季 10 mm 的降水量仅湿润 10～20 cm 的耕作层，10～15 mm 的降水量能满足春播出苗的需要，在土壤湿度很低时，则需要 25 mm 以上的大雨降水过程。张强等（2003）综合考虑了降水、底墒和蒸发的作用，在春旱指数的基础上定义了中国三北地区春季第一场透雨的标准。西北地区将 3～5 月首次日降水量超过 10 mm 的日期定义为首场透雨日期（林纾等, 2005; 纳丽等, 2007）。东北地区黑龙江省和吉林省将第一场透雨日期定义为从 4 月 1 日起，第一场日降水量超过 10 mm 的日期（程红军和蒲晓明, 2007），而辽宁省则定义首场透雨日期为 4 月 1 日起，第一场连续 3 d 过程雨

量之和≥10 mm 的最后一日（李辑等, 2008; 沈玉敏等, 2012）。

目前，已有很多气象工作者对我国不同地区春季首场透雨进行了研究。纳丽等（2007）选用 1961～2005 年宁夏 20 个站降水量，分析春季首场透雨出现日期的气候特征及早晚年的环流背景发现：透雨偏早年前期赤道太平洋海温以暖水位相为主，且 3～4 月宁夏处在 500 hPa 高度场正负距平交汇处，冷空气可以源源不断地进入，孟加拉湾洋面上水汽向北输送；透雨偏晚年前期海温维持以冷水位相，受脊前西北气流控制，不利于冷空气出现，从贝加尔湖伴随冷空气带来的向南输送的水汽影响宁夏，不利于明显降水。林纾等（2005）将甘肃省河东地区分成中部和陇东南两个区域，分别讨论了春季首场区域性透雨日期的年际和年代际变化特征。李辑等（2008）利用 1961～2007 年中国辽宁 14 个站点 4～5 月的逐日降水资料进行研究，指出春播期透雨出现时间偏晚（早）年，透雨量偏大（小），春播期总降水量偏少（多）。沈玉敏等（2012）进一步指出辽宁省透雨偏早年，500 hPa 高度场上亚欧呈现“两脊一槽”型，其中两脊分别为“乌拉尔山高压”和“鄂霍次克海高压”，乌拉尔山高压推动极地和贝加尔湖冷空气南下，而鄂霍次克海高压阻挡冷空气侵入，辽宁大范围被槽区所覆盖；偏晚年，500 hPa 高度场上亚欧呈“两槽一脊”型，辽宁处于高压脊控制区。徐士琦和李栋梁（2016）曾研究分析了东北地区春季首场透雨出现日期的时空变化特征及其与透雨量和播种期降水量间的关系，以及对青藏高原地面加热场强度异常的响应和可能机制。

此前的许多研究工作大多通过计算皮尔逊相关系数或者时间滞后相关分析的方法寻找透雨日期的影响因子。然而，皮尔逊相关系数只反映了两变量间的相关性，无法判断两者间的因果联系，而且由于相关分析不区分方向性，在应用上无法处理许多问题，例如重复性出现的过程。近年来 Liang-Kleeman 的信息流方法（Liang, 2014, 2016），利用给定时间序列间单位时间内传递的信息来表征两者间的因果关系。这一方法将为本文研究影响透雨早晚的因子提供新思路。本文在前期已有工作的基础上，进一步收集整理了东北地区 1961～2019 年的逐日降水资料，从年际时间尺度上分析了该地区透雨早晚与环流系统和前期海温的联系，以期对东北地区春季透雨的预测提供某些前期信号。

2　资料与方法

2.1　资料

选用中国气象局提供的东北地区（39°～55°N，118°～135°E）109 个站点逐日降水数据，研究范围包括黑龙江、吉林、辽宁及内蒙古东部、河北东部的部分地区（图 1）。环流资料选用美国国家环境预报中心和国家大气研究中心（NCEP/NCAR）发布的逐月位势高度、风、垂直速度、比湿等再分析资料（Kalnay et al., 1996），水平分辨率为 2.5°×2.5°。海温资料取美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的全球月平均海表温度重建资料（Smith et al., 2008），水平分辨率为 2°×2°。上述资料的研究时段均为 1961～2019 年。向外长波辐射（OLR）资料来自 NOAA（Liebmann and Smith, 1996），水平分辨率为 2.5°×2.5°，时段为 1975～2019 年。

2.2　方法

本文将单站自 4 月 1 日起，日降水量首次超过 10 mm（≥10 mm）的日期记为该站当年春季透雨开始日期，并记录下透雨开始日期与 4 月 1 日之间的日数差，如 4 月 15 日记为 15，5 月 21 日记为 51。若透雨晚于 6 月 1 日出现，该年春季无透雨。从统计结果（图 2a）看，1961～2019 年东北

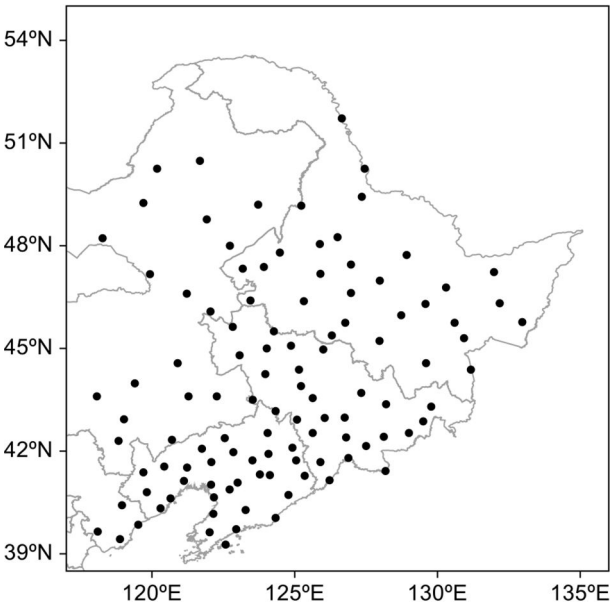

图 1　中国东北地区 109 个站点地理分布示意图

Fig. 1　Spatial distribution of 109 meteorological stations in Northeast China (NEC)

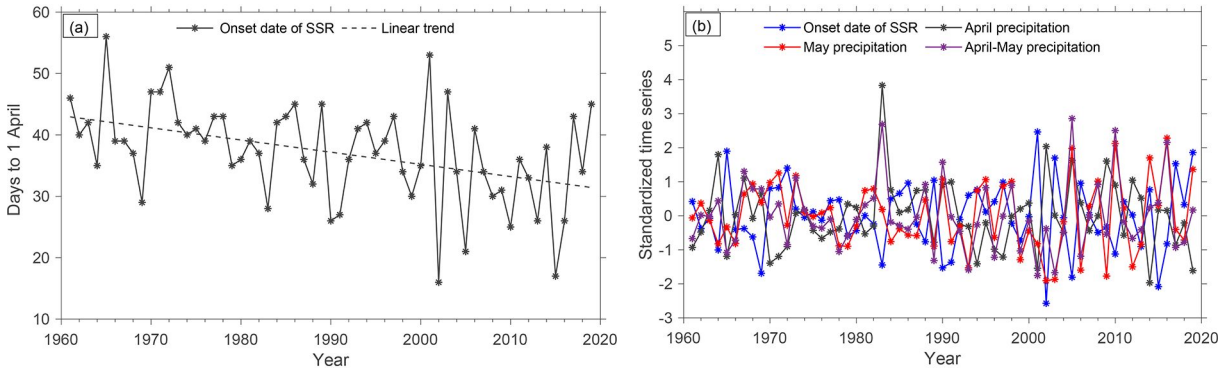

图 2 （a）东北春季透雨开始日期的时间序列；（b）东北春季透雨开始日期与 4 月、5 月及春播期降水量的标准化时间序列（去除线性趋势）

Fig. 2 (a) Time series of the onset date of spring soaking rain (SSR) in NEC; (b) standardized time series (with linear trend removed) of the onset date of SSR as well as precipitation during April, May, and April–May in NEC

春季透雨平均开始时间为 5 月 7 日，最早开始时间为 4 月 16 日（2002 年），最晚开始时间为 5 月 26 日（1965 年）。由于透雨日期具有显著的年代际趋势，为方便分析透雨开始日期的年际变率，下文所有数据均去除线性趋势。

由于东北春季透雨开始日期有很强的年际变化，年与年之间的差异很大，给环流分析带来诸多不便。为此，我们首先检验了东北春季透雨开始日期与东北春季降水量的关系。从图 2b 可以看出，1961～2019 年东北春季首场透雨日期与 4 月降水量的相关系数为−0.71，与 5 月降水量的相关系数为−0.13，与春播期（4～5 月）降水量的相关系数为−0.59。上述结果表明，春季透雨开始日期与 4 月降水量的变化具有显著的一致性，二者的相关系数超过了 99%的信度水平检验；同时，1961～2019 年春季首场透雨日期与 4 月降水量的距平反号率达到 85%，即东北春季透雨开始时间越早，4 月降水量越大。东北春季透雨开始日期与 4 月降水量较好的一致性为后面做诊断分析和机理解释提供了方便。

文中涉及两类海温指数。Niño4 区海表温度距平指数（Niño4 SSTA Index，简称“NINO4-I”）定义为赤道太平洋区（5°S～5°N，160°E～150°W）海温距平的区域平均；热带印度洋全区一致海温模态指数（Indian Ocean Basin-Wide Index，简称“IOBW-I”）定义为印度洋区域（20°S～20°N，40～110°E）海温距平的区域平均。

使用基于 Liang（2014, 2016）信息流理论的因果分析法验证前期关键区海温与东北春季透雨开始日期之间的因果关系。具体框架如下，用两个事件信息的传递来度量两个事件的因果关系。设有两个时间序列 X_1 和 X_2，则信息从 X_2 流向 X_1 的速率表示为

$$T_{2\to1}=\frac{C_{11}C_{12}C_{2,d1}-C_{12}^2C_{1,d1}}{C_{11}^2C_{22}-C_{11}C_{12}^2},\qquad(1)$$

其中，C_{ij} 为 X_i 和 X_j 的样本协方差，$C_{i,dj}$ 为 X_i 和 $\dot{X}_j$ 的样本协方差。$T_{2\to1}$的单位为 nats y^{-1}，nats 为信息单位。实际计算中，$\dot{X}_j$使用欧拉前差近似给出

$$\dot{X}_{j,n}=\frac{X_{j,n+k}-X_{j,n}}{k\Delta t},\qquad(2)$$

其中，k 通常取 1 即可，Δt 为时间步长。根据以上公式计算出$T_{2\to1}$，若结果为 0，则表示 X_2 与 X_1 没有因果关系；若结果不为 0，则表示二者有因果关系，此时，若$T_{2\to1}>0$ 则表示 X_2 作用于 X_1 并使 X_1 更加不稳定；若$T_{2\to1}<0$ 则表示 X_2 作用于 X_1 并使 X_1 更加稳定。

本文涉及的统计方法还包括线性相关和回归分析。此外，我们对关键区海温指数和东北透雨日期建立回归方程，计算回归结果与实际透雨日期间的方差比，作为前期海温影响透雨早晚的贡献率（施能, 2002）。全文采用 student-t 检验对统计结果进行显著性检验。

3 中国东北春季透雨早晚年的环流特征

基于东北春季透雨开始日期的标准化时间序列（图 2b），选取小于−0.5 的年份作为异常偏早年，大于 0.5 的年份作为异常偏晚年，得到透雨偏早（开始时间集中在 4 月中下旬）的年份有 1964、1968、1969、1979、1983、1988、1990、1991、1999、2002、2005、2010、2013、2015、2016，透

雨偏晚（开始时间集中在 5 月中下旬）的年份有 1965、1970、1971、1972、1985、1986、1989、1993、1994、1997、2001、2003、2006、2014、2017、2019。透雨偏早年和偏晚年对应的 4 月总降水量合成差值（图 3）显示降水量显著偏多，再次证明了东北春季透雨开始时间越早，4 月降水量越大。下面以对流层上层 200 hPa 纬向风场、中层 500 hPa 位势高度场和低层 850 hPa 环流场为代表，进行透雨偏早年和偏晚年 4 月环流场的合成分析。

图 4 为透雨偏早年和偏晚年对应的 4 月环流合成差值场。较透雨偏晚年而言，透雨偏早年 200 hPa 高层大气（图 4a）中，东亚地区 40°～60°N 范围内西风气流增强，而 20°～40°N 范围内东风气流增强，这会在急流垂直方向上激发相应的次级环流，使得急流出口区右侧上升运动增强（丁一汇，2005），为东北降水提供了有利的动力抬升条件。500 hPa 位势高度场（图 4b）上，中高纬欧亚大陆的乌拉尔山地区、巴尔喀什湖到贝加尔湖区域、渤海到日本列岛区域，自西向东呈“+－+”的波列结构，卫捷等（2003）和 Wang and He（2015）将这种波列称为 EU 遥相关型。东北亚自西向东呈“－+”的异常环流分布，东亚大槽位置偏西，我国东北和华北地区为负距平高度场控制，极地高纬地区为显著的正距平，乌拉尔山高压脊有利于推动极地和贝加尔湖冷空气南移，而日本海附近高压的存在又阻挡了冷空气东移，使得冷空气在我国北方地区堆积。850 hPa 环流场（图 4c）与中高层环流场对应较好，蒙古和西北太平洋上空分别出现异常气旋和反气旋环流，东北地区为显著的偏南风控制，有利于来自北印度洋、途径孟加拉湾的暖湿气流和来自西北太平洋的暖湿气流向我国东北地区输送。此外，降水产生的必要条件之一就是水汽条件，东北透雨的产生必然受到水汽影响。图 4d 可以清楚地看出，东北地区为显著的水汽辐合区，水汽条件良好，有利于明显降水产生。

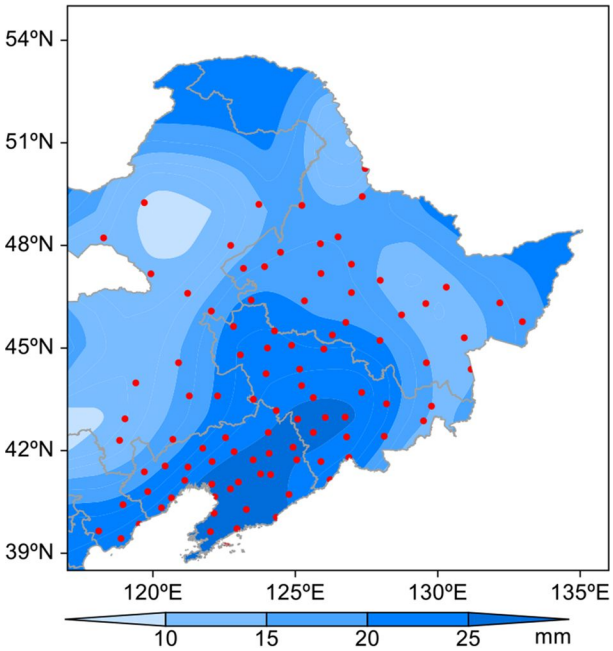

图 3　中国东北春季透雨偏早年和偏晚年对应的 4 月总降水量（单位：mm）合成差值场。红点表示通过 90% 信度检验的站点

Fig. 3　Composite difference field of the total precipitation (units: mm) during April in early and late SSR years. Red dots denote statistical significance at the 90% confidence level

4　中国东北春季透雨早晚与海温的关系

4.1　海温对东北透雨早晚的影响

为寻找东北春季透雨早晚与海温之间可能存在的联系，图 5 给出了 1961～2019 年东北春季透雨开始日期与前秋、前冬、春季海温之间的相关系数。在前秋（9～11 月）海温场中，热带印度洋和赤道太平洋存在显著的负相关区，而西太平洋暖池有显著正相关区（图 5a）。春季透雨开始日期与前冬（12～2 月）海温之间也有同样的相关特征，但也存在一些不同。与前秋海温相关分布相比，赤道太平洋的显著负相关空间范围缩小，而热带印度洋的显著负相关区域增大，西太平洋暖池显著正相关区减弱，亲潮附近出现显著负相关区（图 5b）。春季（3～5 月）赤道太平洋的显著负相关空间范围继续缩小，热带印度洋的显著负相关区继续增大且相关性更加显著，亲潮区的显著负相关范围明显增大（图 5c）。不难发现，从前期秋季到同期春季，热带印度洋和赤道太平洋出现了明显且持续的海温异常信号。因此，我们着重讨论热带印度洋和赤道太平洋海温对东北透雨早晚的影响。

图 6 为 1961～2019 年东北春季透雨开始日期与前期 9 月至当年 5 月 NINO4-I 和 IOBW-I 的反相关系数（相关系数原始值的相反数）。可见，透雨日期与 NINO4-I 间的反相关系数在前期 9 月至当年 1 月持续增大，而后减小；但与 IOBW-I 间的反相关系数在前期 9～12 月持续增大，而后呈较为稳定的波动变化。整体而言，IOBW 对东北透雨早晚的影响较 NINO4 更加明显且持久。已有研究表明，El Niño（La Niña）事件通常在夏季或秋季发展，

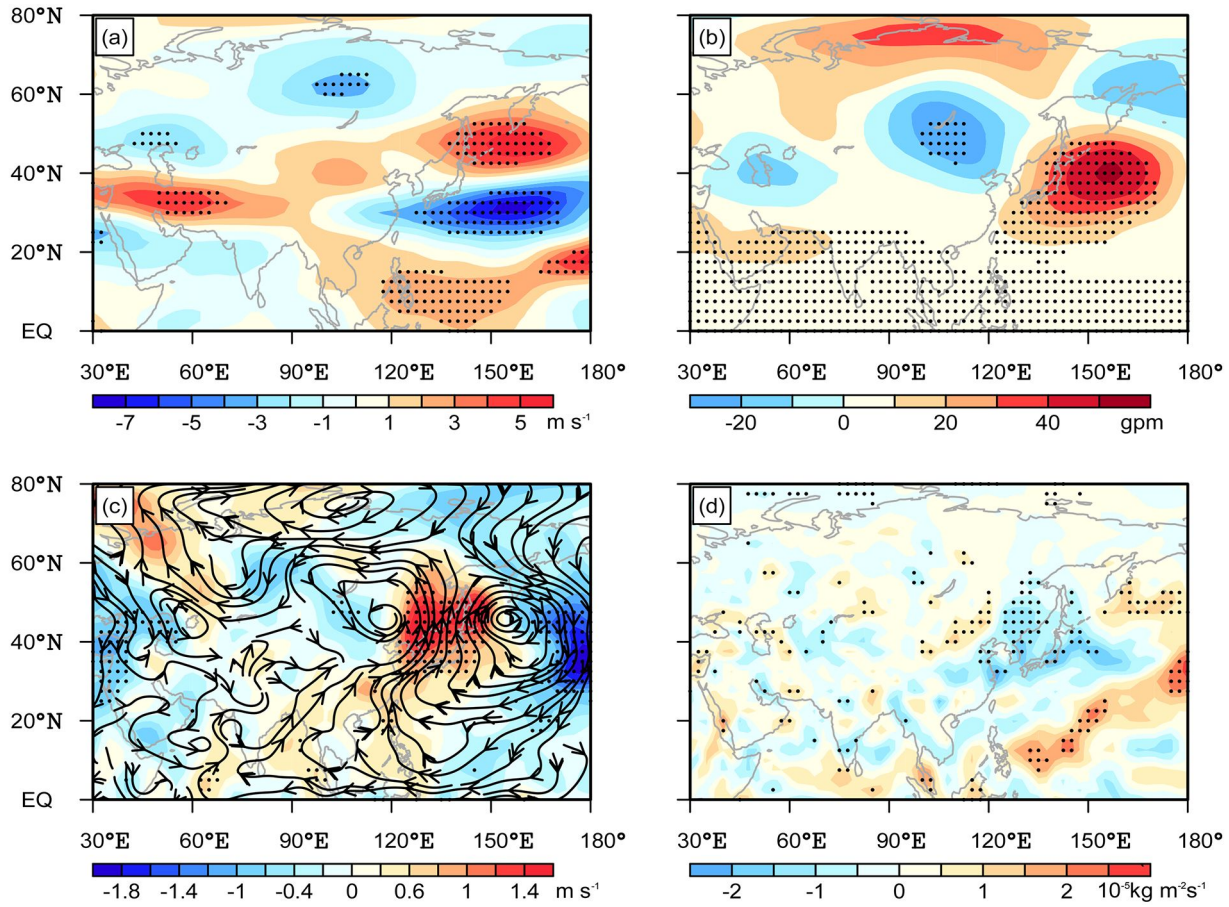

图 4 中国东北春季透雨偏早年和偏晚年对应的 4 月（a）200 hPa 纬向风（单位：m s^{-1}）、（b）500 hPa 位势高度（单位：gpm）、（c）850 hPa 流场（单位：m s^{-1}，填色区域代表经向风）、（d）整层水汽通量散度（单位：10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}）合成差值场。黑点表示通过 90%的信度检验

Fig. 4 Composite difference field of zonal wind at (a) 200 hPa (units: m s^{-1}), (b) geopotential height at 500h Pa (units: gpm), (c) flow field at 850 hPa (units: m s^{-1}, color-filled indicates meridional wind) and (d) whole layer moisture flux dispersion (units: 10^{-5}kg m^{-2} s^{-1}) during April in the early and late SSR years. Dark dots denote statistical significance at the 90% confidence level

在冬季达到最强，次年春季或夏季减弱（Yuan and Yang, 2012）。在 El Niño（La Niña）事件发展的秋冬季，东亚副热带上空的罗斯贝波通过遥相关作用激发菲律宾附近的异常反气旋（气旋），进而影响东亚气候（Wang and Wu, 2012; Li et al., 2017）。IOBW 是热带印度洋变化的主要模态，IOBW 通常在冬季开始发展，在次年春季达到最强。根据“大气桥”（Klein et al., 1999）或印度洋尼西亚贯穿流（Meyers, 1996）等机制， 当赤道中东太平洋有 El Niño（La Niña）事件发展时，热带印度洋海温在冬季至次年春季往往表现为全区一致增暖（偏冷）。以往研究认为，IOBW 是对 El Niño 事件的延迟响应（Xie et al., 2009; 黄刚等, 2016）。因此，IOBW 对东北春季降水的影响持续时间要长于 El Niño 事件（图 5、6）。IOBW-I 与透雨日期的反相关系数最大出现在前期 12 月（0.37）、2 月（0.34）和 3 月（0.41），通过了 99%的信度检验。从海温持续性角度，下文主要分析 2～3 月 IOBW-I 对东北春季透雨早晚的影响。

图 7a 显示了 1961～2019 年 2～3 月 IOBW-I 与东北春季透雨开始日期的标准化时间序列。59 年来，二者之间的反号比为 66%，相关系数达 −0.39（通过了 99%的信度检验），IOBW-I 对透雨日期的贡献率为 15%。同时计算了二者间 11 年的滑动反相关（图 7b），相关系数在在研究时段内始终同号且在 20 世纪 80～90 年代通过了 90%的信度检验，这意味着 1961～2019 年 2～3 月 IOBW-I 对东北春季透雨日期的关系较为稳定，且在 20 世纪 80～90 年代间的相关最好。

为验证透雨早晚与海温之间的相关性，对透雨

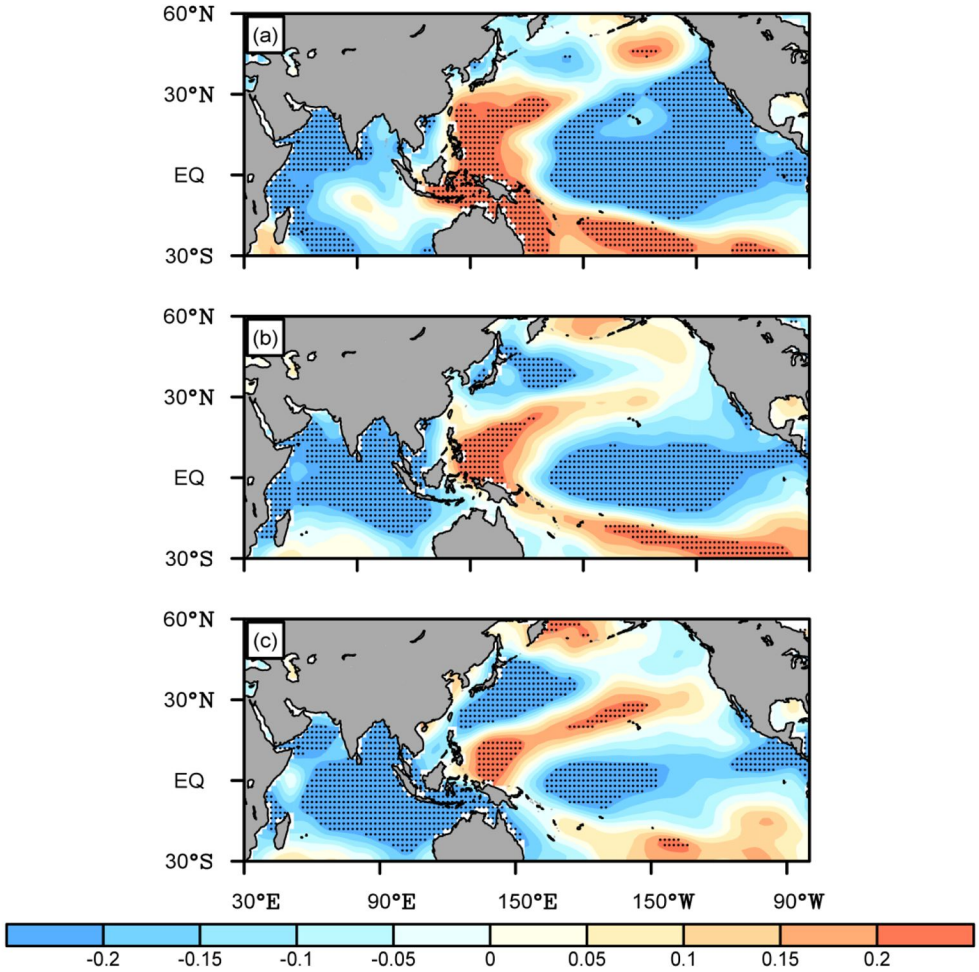

图 5　东北春季透雨开始日期与（a）前秋、（b）前冬、（c）春季海温场的相关分布。黑点表示通过 90%的信度检验

Fig. 5　Correlation distributions of the onset date of SSR in NEC with SST field during (a) autumn, (b) winter, (c) spring. Dark dots denote statistical significance at the 90% confidence level

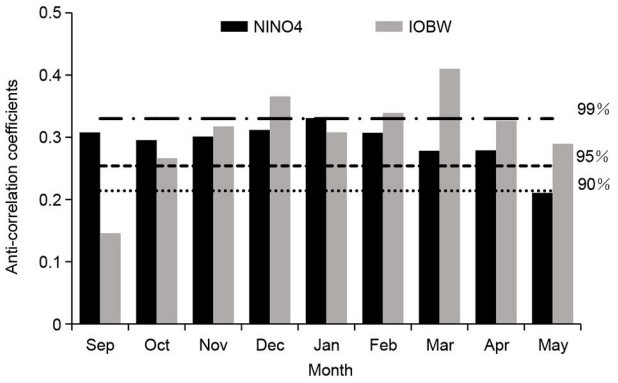

图 6　中国东北春季透雨开始日期与月际 NINO4-I 和 IOBW-I 间的反相关系数。虚线表示通过 90%、95%、99%的信度检验

Fig. 6　Anticorrelation coefficients between the onset date of SSR in NEC and monthly NINO4-I (Niño4 SSTA Index) and IOBW-I (Indian Ocean Basin-Wide Index). Dashed lines denote statistical significance at the 90%, 95%, and 99% confidence level

异常偏早年和偏晚年的海温场进行合成（图 8）。可以看到，透雨偏早年，热带印度洋、西太平洋副热带地区和中太平洋海温表现为显著的正异常（图 8a）；透雨偏晚的年份对应的海温场空间分布几乎相反，热带印度洋海温表现为负异常（图 8b），这一结论与之前的分析相一致（图 5 至图 7）。同时注意到，相较透雨偏晚年对热带印度洋冷海温的响应而言，透雨偏早年对热带印度洋暖海温的响应更为明显。

进一步采用空间相关分析和因果关系理论验证 2～3 月 IOBW-I 对东北春季透雨早晚的影响。从图 9a 可见，2～3 月 IOBW-I 与东北地区众多站点的春季透雨开始日期呈显著负相关，即 2～3 月 IOBW-I 正（负）位相，有利于透雨开始偏早（晚）。图 9b 显示，2～3 月 IOBW-I 与东北地区大部春季透雨开始日期的信息流结果小于 0，按照

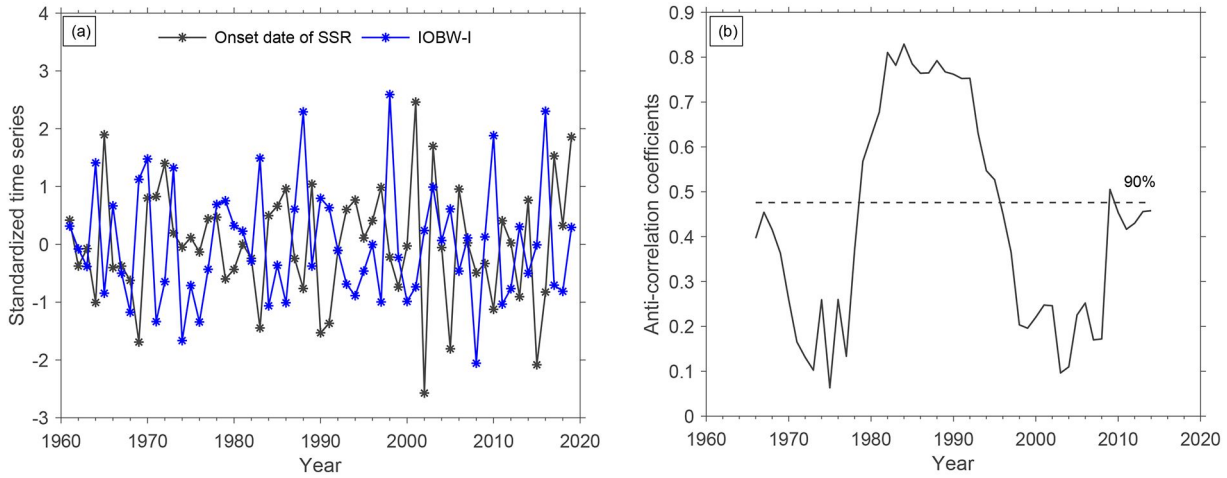

图 7 1961～2019 年（a）2～3 月 IOBW-I 和东北春季透雨开始日期的标准化时间序列；（b）2～3 月 IOBW-I 与东北透雨日期的 11 年滑动反相关系数。虚线：相关系数的 90%信度检验

Fig. 7 (a) Standardized time series of February–March IOBW-I and the onset date of SSR in NEC; (b) 11-year slipping anticorrelation coefficients between February–March IOBW-I and the onset date of SSR (dashed line denote statistical significance at the 90% confidence level) during 1961–2019

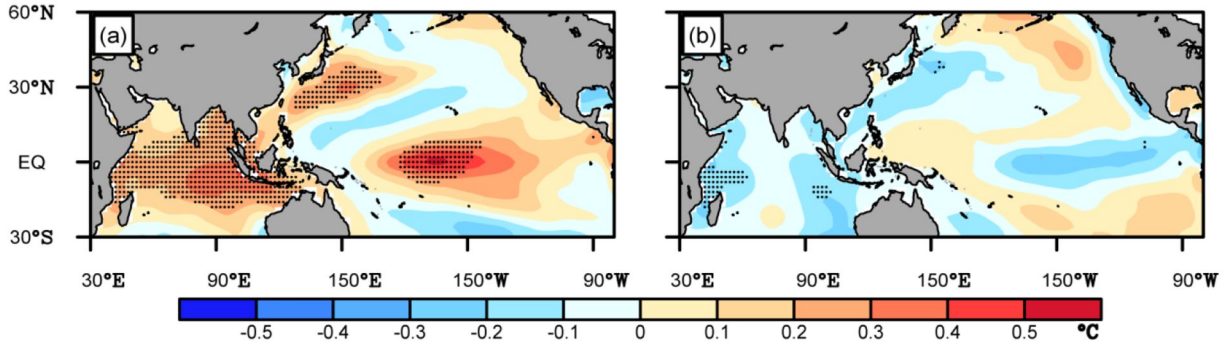

图 8 1961～2019 年 2～3 月海表温度异常（单位：°C）的合成：（a）透雨偏早年；（b）透雨偏晚年。打点区表示通过 90%的信度检验

Fig. 8 Composite maps of February–March SSTAs (units: °C) for the (a) early and (b) late years of SSR in NEC during 1961–2019. Dark dots denote statistical significance at the 90% confidence level

信息流的定义及其解释（Liang, 2014, 2016），表明 IOBW-I 对东北春季透雨早晚的影响稳定，即 2～3 月 IOBW 变化是东北春季透雨早晚的重要影响源之一。

4.2 2～3 月 IOBW 影响东北透雨早晚的可能机制

由于海洋的“记忆”作用，海温的变化往往表现出季节持续性，对气候的影响也具有滞后性（陈丽娟等, 2013），也就是说，大气对海温的响应具有延迟性（赵振国, 1999）。热带海洋中海温显著的年际变化可以通过改变海洋和大陆间的热力对比，通过热带地区强烈的海气作用影响低纬乃至中高纬地区的大气环流（Han et al., 2018; Zhao et al., 2019）。因而，2～3 月 IOBW 异常可能通过影响 4 月大气环流进而影响东北地区降水。

为进一步说明 2～3 月 IOBW 影响东北春季首场透雨早晚的可能机制，我们分析了与 2～3 月 IOBW-I 相关的 4 月大气环流异常。图 10 显示了 1961～2019 年 2～3 月 IOBW-I 与 4 月 200 hPa 纬向风、500 hPa 位势高度场、850 hPa 环流场和整层水汽通量散度的回归系数分布。可以清楚地看到，当 IOBW-I 正位相时，200 hPa 纬向风场（图 10a）东亚地区 40°～60°N 范围内西风气流增强，而 20°～30°N 范围内东风气流增强，我国东北地区位于西风急流出口区左侧，为降水提供了有利的动力抬升条件。500 hPa 中高纬巴尔喀什湖到贝加尔湖区域和鄂霍次克海地区为显著的负位势高度异常，而显著的正高度异常出现在渤海到日本列岛区域，有利于东北亚地区自西向东呈“－＋”的环流形势

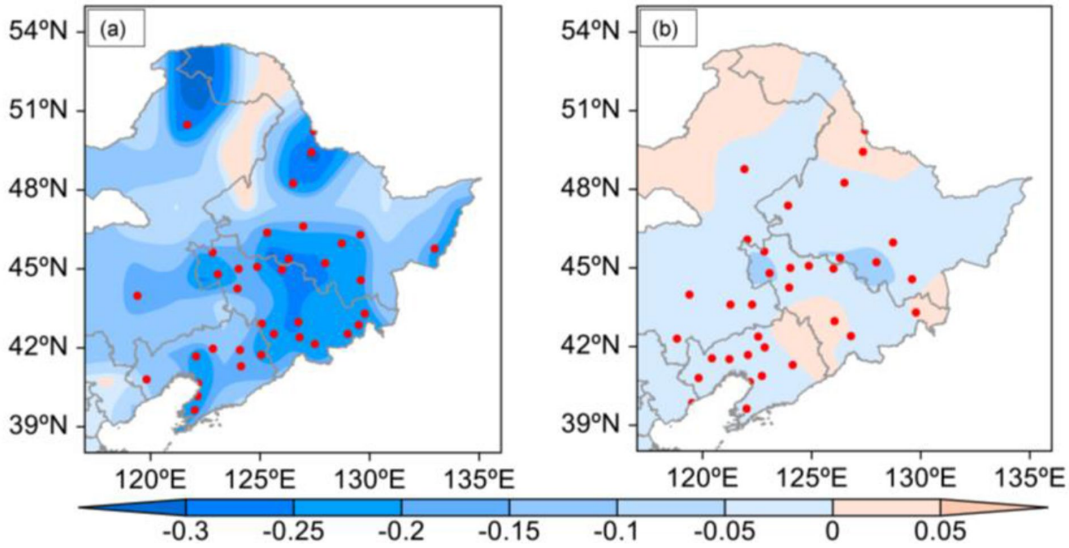

图 9　1961～2019 年 2～3 月 IOBW-I 和东北春季透雨开始日期的（a）相关关系和（b）因果关系（从 IOBW-I 到透雨日期的信息流结果）。红点表示通过 90%信度检验的站点

Fig. 9　(a) Correlations and (b) causalities (information flowing from IOBW-I to SSR) between February and March IOBW-I and the onset date of SSR in NEC during 1961–2019. Red dots denote statistical significance at the 90% confidence level

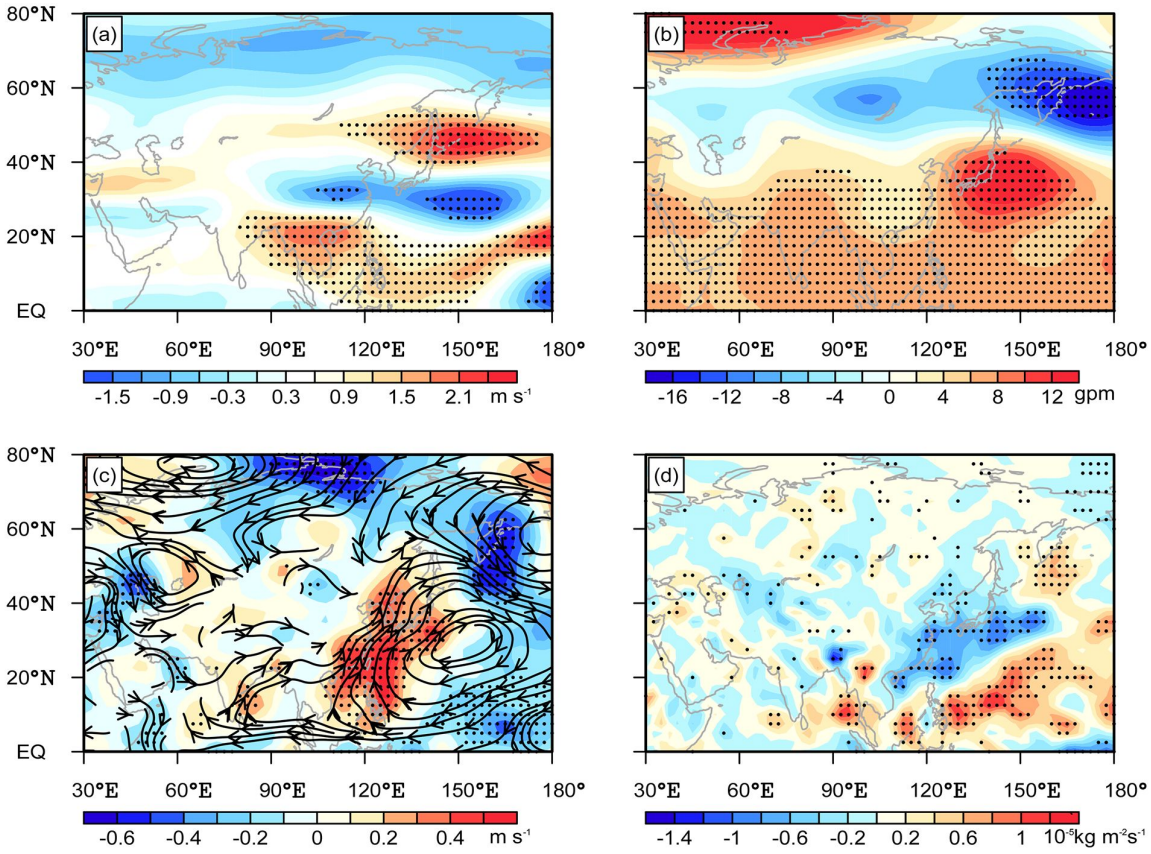

图 10　1961～2019 年 2～3 月 IOBW-I 与 4 月（a）200 hPa 纬向风（单位：m s^{-1}）、（b）500 hPa 位势高度（单位：gpm）、（c）850 hPa 流场（单位：m s^{-1}，填色区域代表经向风）、（d）整层水汽通量散度（单位：10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}）的回归分析。黑点表示通过 90%的信度检验

Fig. 10　Linear regression of April (a) 200 hPa latitudinal wind (units: m s^{-1}), (b) 500 hPa potential height (units: gpm), (c) 850 hPa flow field (units: m s^{-1}, color-filled indicates meridional wind), and (d) whole layer moisture flux dispersion (units: 10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}) against the February–March IOBW-I during 1961–2019. Dark dots denote statistical significance at the 90% confidence level

（图 10b）。因此，在与 2～3 月 IOBW-I 有关的 850 hPa 环流场（图 10c）上，蒙古和西北太平洋上空分别出现一个气旋和反气旋，异常西南气流向东亚延伸，在东北地区上空盛行，有利于热带海洋上的水汽输送到东北地区，该地区水汽通量辐合（图 10d），偏强的水汽条件有利于明显降水产生。对比上文图 3 的分析不难发现，与 2～3 月 IOBW-I 有关的环流异常和与东北春季首场透雨日期有关的环流异常基本相同。

图 11 显示了与 2～3 月 IOBW-I 有关的 4 月向外长波辐射（OLR）和 500 hPa 垂直速度（ω）的回归分析结果。2～3 月 IOBW-I 偏强，4 月 OLR 显著负异常位于热带印度洋（20°～5°S），而 OLR 显著正异常位于热带西太平洋（5°～25°N）地区（图 11a）。这表明，2～3 月热带印度洋海温偏暖可能增强了热带印度洋同时削弱了热带西太平洋上的对流运动，从而导致热带印度洋的上升运动和热带西太平洋上的下沉运动增强。同样，2～3 月 IOBW 对对流层中层（图 11b）的影响也很显著。4 月热带西太平洋（5°～20°N）上空有异常的下沉运动，显著上升区位于热带印度洋和东亚副热带（20°～50°N）地区。因此，2～3 月 IOBW 异常对 4 月热带和副热带地区的大气垂直运动有着至关重要的影响。

进一步计算了与 2～3 月 IOBW-I 有关的从低层到高层的 4 月垂直环流场。可见，沿 47.5°N 剖面场上 120°～135°E 垂直速度呈显著负异常（图 12a）；沿 127.5°E 剖面场上 40°～50°N 垂直速度呈显著负异常（图 12b）。也就是说，2～3 月 IOBW-I 异常偏强，4 月东北地区有强烈的上升运动，对流活动明显增强，有利于降水产生。

5 结论与讨论

本文主要从年际时间尺度上分析了 1961～2019 年东北地区春季透雨早晚年的环流特征和前期海温，尤其是热带印度洋海温异常的联系。研究揭示了 2～3 月 IOBW 暖位相有利于春季透雨开始偏早，IOBW 年际变化是东北透雨开始时间发生年际变化的主要外强迫因子之一。

典型透雨偏早年的开始时间集中在 4 月中下旬，偏晚年的开始时间集中在 5 月中下旬。东北地区春季透雨异常偏早、偏晚年环流场合成分析表明，若 4 月东北亚上空 500 hPa 位势高度场呈自西向东的“－＋”异常环流分布，东北地区以偏南风和气旋性环流为主，有利于水汽输送，春季透雨开始偏早，反之，春季透雨开始偏晚。

海温是东北春季透雨早晚的重要影响源之一，较赤道太平洋海温而言，热带印度洋海温对东北春季透雨的影响更为明显和持久。2～3 月 IOBW-I 呈正位相，4 月东北地区位于西风急流出口区右侧，西北太平洋地区为异常反气旋，东北地区上空出现明显的偏南风，有利于来自北印度洋、途径孟加拉

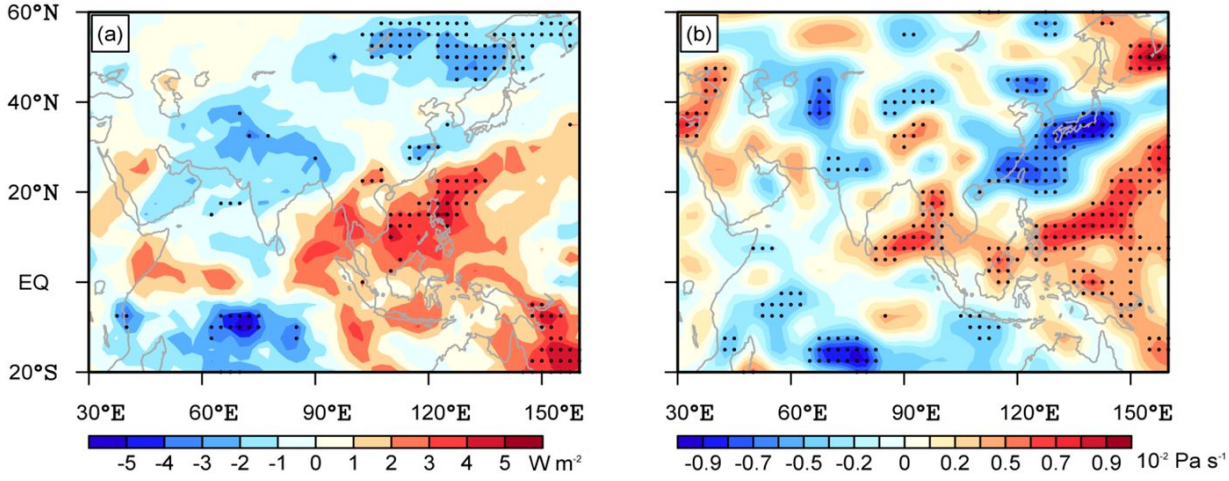

图 11 1961～2019 年 2—3 月 IOBW-I 与（a）4 月向外长波辐射（OLR，单位：W m^{-2}）和（b）500 hPa 垂直速度（ω，单位：10^{-2} Pa s^{-1}）的回归分析。黑点表示通过 90%的信度检验

Fig. 11 Linear regression of (a) the outgoing longwave radiation (OLR, units: W m^{-2}) in April and (b) the vertical velocity at 500 hPa (ω, units: 10^{-2} Pa s^{-1}) against the February–March IOBW-I during 1961–2019. Dark dots denote statistical significance at the 90% confidence level

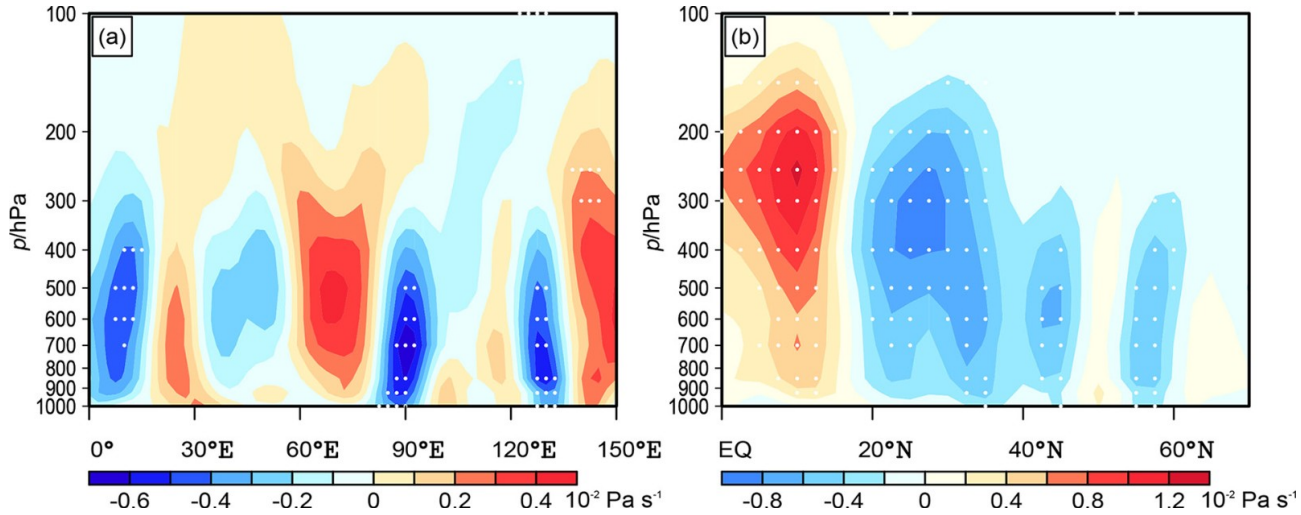

图 12　1961～2019 年 2～3 月 IOBW-I 与 4 月（a）沿 47.5°N 剖面和（b）沿 127.5°E 剖面垂直速度（单位：10^{-2} Pa s^{-1}）的回归分析。白点表示通过 90%的信度检验

Fig. 12　Linear regression of the vertical velocity（10^{-2} Pa s^{-1}）in April along (a) the 47.5°N profile and (b) the 127.5°E profile against the February–March IOBW-I during 1961–2019. (White dots denote statistical significance at the 90% confidence level

湾的暖湿气流和来自西北太平洋的暖湿气流向我国东北地区输送，为该地区带来更多的水汽。同时，2～3 月 IOBW-I 异常对 4 月热带和副热带地区的大气垂直运动（如 OLR 和垂直速度）有着至关重要的影响，IOBW-I 偏强使得热带印度洋和中国东北地区的上升运动增强，导致 4 月强降水产生，春季透雨偏早。我们尝试给出 2～3 月 IOBW 暖异常影响东北透雨偏早的可能机制示意图（图 13）。

值得注意的是，IOBW 除具有一定的年际变化外，还具有明显的年代际变化。从原始 IOBW-I 序列（http://cmdp.ncc-cma.net/download/precipitation/diagnosis/IOBW/IOBW-yr.Gif [2021-06-26]）上看，20 世纪 80 年代前以负位相为主，20 世纪 80～90 年代呈位相波动变化，21 世纪后转为正位相。图 7b 的结果显示 IOBW-I 对东北地区春季透雨开始日期在 20 世纪 80～90 年代的影响最为显著，这进一步证明了年际变化也要受到年代际尺度的影响。因此，在考虑 IOBW-I 年际分量对透雨早晚的影响时，仍不可忽略年代际背景的作用。

本文揭示了 2～3 月 IOBW-I 对中国东北地区春季透雨日期影响的贡献率虽为 15%，但仍不失为其重要且稳定的影响源之一，并尝试分析了影响的可能机制，今后还需要通过数值试验进行模拟验证。此外，东北地区受到热带、副热带及中高纬多个系统的综合作用，影响东北春季透雨早晚的因素较为复杂，将继续开展东北春季透雨的影响系统的研究，进一步提供东北透雨早晚的预测依据。

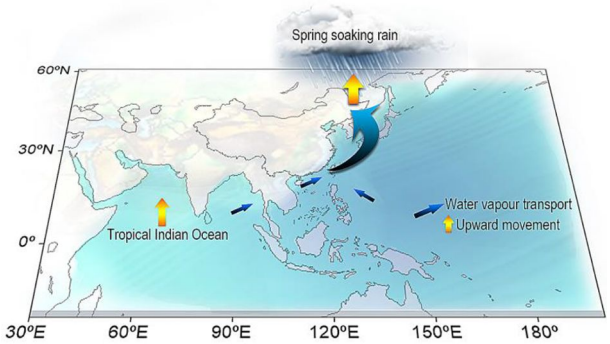

图 13　年际时间尺度上 1961～2019 年 2～3 月热带印度洋一致增暖（IOBW）影响东北春季透雨早晚的示意图

Fig. 13　Schematic diagram showing the relationship between February–March IOBW (Indian Ocean Basin warming) and the onset date of SSR in NEC during 1961–2019 on an interannual timescale

参考文献（References）

陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. 应用气象学报, 24(5): 521−532.　Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24(5): 521−532. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.002

程红军, 蒲晓明. 2007. 吉林省中西部地区春季第一场透雨气候预测方法初探 [J]. 吉林气象 (1): 16−18.　Cheng Hongjun, Pu Xiaoming. 2007. A preliminary study on climate prediction methods for the first spring rainfall in the mid-west region of Jilin Province

[J]. Jilin Qixiang (in Chinese)(1): 16−18.

丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 138–149 Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 138–149.

Han T T, He S P, Wang H J, et al. 2018. Enhanced influence of early-spring tropical Indian Ocean SST on the following early-summer precipitation over Northeast China [J]. Climate Dyn., 51(11): 4065−4076. doi:10.1007/s00382-017-3669-y

黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. 大气科学, 40(1): 121−130. Huang Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, et al. 2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 121−130. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Klein S A, Soden B J, Lau N C. 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

李辑, 胡春丽, 王艳, 等. 2008. 辽宁春播期第一场透雨的气候特征及其变化规律 [J]. 气象与环境学报, 24(6): 1−6. Li Ji, Hu Chunli, Wang Yan, et al. 2008. Climatic characteristics of the first soaking rain in spring sowing season of Liaoning Province and its variation [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 24(6): 1−6. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2008.06.001

Li T M, Wang B, Wu B, et al. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: A review [J]. J. Meteor. Res., 31(6): 987−1006. doi:10.1007/s13351-017-7147-6

李尚锋, 姜大膀, 廉毅, 等. 2018. 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, 42(5): 963−976. Li Shangfeng, Jiang Dabang, Lian Yi, et al. 2018. Circulation characteristics of extreme cold events in Northeast China during wintertime [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(5): 963−976. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17119

Liang X S. 2014. Unraveling the cause–effect relation between time series [J]. Phys. Rev. E, 90(5): 052150. doi:10.1103/PhysRevE.90.052150

Liang X S. 2016. Information flow and causality as rigorous notions *ab initio* [J]. Phys. Rev. E, 94(5): 052201. doi:10.1103/PhysRevE.94.052201

Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(6): 1275−1277.

林纾, 倪荣环, 郭江勇. 2005. 甘肃河东春季第一场区域性透雨日期的气候特征 [J]. 成都信息工程学院学报, 20(3): 347−353. Lin Shu, Ni Ronghuan, Guo Jiangyong. 2005. Climate feature of first soaking spring rain to the east of Yellow River over Gansu Province [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 20(3): 347−353. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2005.03.026

Meyers G. 1996. Variation of Indonesian throughflow and the El Niño–Southern Oscillation [J]. J. Geophys. Res. :Oceans, 101(C5): 12255−12263. doi:10.1029/95JC03729

纳丽, 沈跃琴, 丁永红, 等. 2007. 宁夏春季首场透雨出现日期及环流背景分析 [J]. 干旱区研究, 24(3): 344−348. Na Li, Shen Yueqin, Ding Yonghong, et al. 2007. Analysis on the occurrence of first soaking rainfall and its circulation background in the typical years in Ningxia [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 24(3): 344−348.

沈柏竹, 刘实, 廉毅, 等. 2011. 2009 年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系 [J]. 气象学报, 69(2): 320−333. Shen Baizhu, Liu Shi, Lian Yi, et al. 2011. An investigation into 2009 summer low temperature in Northeast China and its association with prophase changes of the air–sea system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69(2): 320−333. doi:10.11676/qxxb2011.027

沈玉敏, 胡春丽, 李菲, 等. 2012. 辽宁春季透雨的环流背景及与海温相关分析 [J]. 气象与环境学报, 28(4): 28−32. Shen Yumin, Hu Chunli, Li Fei, et al. 2012. Circulation background of spring soaking rain and its correlation with sea surface temperature in Liaoning Province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28(4): 28−32. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2012.04.005

施能. 2002. 气象科研与预报中的多元分析方法 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 31–36 Shi Neng. 2002. Multivariate Analysis Methods in Meteorological Research and Forecasting (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 31–36.

Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. J. Climate, 21(10): 2283−2296. doi:10.1175/2007JCLI2100.1

陶祖文, 裴步祥. 1983. 华北平原地区春季降水渗透深度和“透雨”的农业气象估算方法 [J]. 气象学报, 41(1): 97−105. Tao Zuwen, Pei Buxiang. 1983. An agrometeorological method for estimating the infiltration depth and soaking rain in spring for North China plain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41(1): 97−105. doi:10.11676/qxxb1983.011

Wang L, Wu R G. 2012. In-phase transition from the winter monsoon to the summer monsoon over East Asia: Role of the Indian Ocean [J]. J. Geophys. Res. :Atmos., 117(D11): D11112. doi:10.1029/2012JD017509

王会军, 贺圣平. 2013. 我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系 [J]. 科学通报, 58(8): 629–633. Wang Huijun, He Shengping. 2013. The increase of snowfall in Northeast China after the mid-1980s [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1350–1354. doi:10.1360/csb2013-58-8-629

Wang H J, He S P. 2015. The North China/northeastern Asia severe summer drought in 2014 [J]. J. Climate, 28(17): 6667−6681. doi:10.1175/JCLI-D-15-0202.1

卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2003. 近 20 年华北地区干旱期大气环流异常特征 [J]. 应用气象学报, 14(2): 140−151. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. Characteristics of atmospheric circulation anomalies during persistent droughts in North China for last two decades [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14(2): 140−151. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.02.002

韦晋, 何金海, 苏志重, 等. 2013. 青藏高原东南侧南风演变特征及其与中国东部春季降水的关系分析 [J]. 气象, 39(2): 129−136. Wei Jin, He Jinhai, Su Zhizhong, et al. 2013. Characteristics of south wind in east southern Tibetan Plateau and its relationship with eastern China spring rain [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39(2): 129−136. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.02.001

武炳义, 张人禾, Rosanne D. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. 科学通报, 53(12): 1422–1428. Wu Bingyi, Zhang Renhe, Rosanne D. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in northeast China [J]. Chinese Science Bulletin, 53(14): 2222–2229. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2008.12.011

吴香华, 牛生杰, 金德镇, 等. 2014. 吉林春旱期降水潜在影响因子的分离时间尺度分析 [J]. 大气科学学报, 37(5): 548−557. Wu Xianghua, Niu Shengjie, Jin Dezhen, et al. 2014. Application of time-scale decomposition model in influence factors selection during spring drought period in Jilin Province [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 548−557. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130420006

Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22(3): 730−747. doi:10.1175/2008JCLI2544.1

徐士琦, 李栋梁. 2016. 东北地区春季首场透雨的变化特征及与青藏高原地面加热场强度的关系 [J]. 气象, 42(3): 271−279. Xu Shiqi, Li Dongliang. 2016. Characteristics of the first soaking rain in northeast China and its response to surface heat source over the Tibetan Plateau [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(3): 271−279. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.002

Yuan Y, Yang S. 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles [J]. J. Climate, 25(21): 7702−7722. doi:10.1175/JCLI-D-11-00576.1

张强, 王有民, 姚佩珍. 2003. 我国三北地区春季第一场透雨指标的确定 [J]. 中国农业气象, 24(2): 28−30,54. Zhang Qiang, Wang Youmin, Yao Peizhen. 2003. Determination of indices for the first soaking rain in spring in north of China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 24(2): 28−30,54. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2003.02.009

张脉惠, 王传辉, 江春, 等. 2012. 中国东北地区春雨开始期变化特征研究 [J]. 中国农学通报, 28(35): 269−274. Zhang Maihui, Wang Chuanhui, Jiang Chun, et al. 2012. Characteristics of variation of beginning period of the spring rainy season in northeast area of China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 28(35): 269−274. doi:10.3969/j.issn.1000-6850.2012.35.050

赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 297pp. Zhao Zhenguo. 1999. Drought/Flood and Environment Field of Summer in China. Beijing: China Meteorological Press, 297pp. Zhao J H, Zhou J, Xiong K G, et al. 2019. Relationship between tropical Indian Ocean SSTA in spring and precipitation of northeast China in late summer [J]. J. Meteor. Res., 33(6): 1060−1074.