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. 气象，42(3)：271-279.

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*

徐士琦 李栋梁

南京信息工程大学 大气科学学院/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

提 要：利用 1958—2012 年 4—5 月东北地区(39°～55°N、118°～135°E)101 个站点逐日降水资料、青藏高原地区(25°～40°N、73.75°～103.75°E)JRA-55 的地面感热和潜热通量月平均再分析资料以及 NCEP/NCAR-I 大气环流场的月平均再分析资料，分析了春播期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及其可能机制。结果表明：透雨日期自 1958 年以来在东北地区的西北和东南大部分区域呈现略微偏晚的趋势；中部有略微偏早的趋势。春播期首场透雨出现时间偏早(晚)的地方，首场透雨量小(大)，春播期总降水量多(少)。同时，4 月青藏高原地面加热场强度增强(减弱)，有利于(不利于)来自北方的冷空气和南方的暖湿气流在东北上空交汇，且上升气流增强(减弱)，水汽输送充沛(减少)，导致该地区春季首场透雨出现的时间偏早(晚)。

关键词：春播期，首场透雨，青藏高原地面加热场，东北地区

中图分类号：P461 **文献标志码**：A **doi**：10.7519/j.issn.1000-0526.2016.3.002

Characteristics of the First Soaking Rain in Northeast China and Its Response to Surface Heat Source over the Tibetan Plateau

XU Shiqi LI Dongliang

College of Atmospheric Science/Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Based on the precipitation data in April and May for the period 1958－2012 from 178 meteorological stations in Northeast China, JRA-55 and NCEP/NCAR-I reanalysis, the study is performed of the first soaking rain date as well as its relation with the soaking rainfall and the total rainfall from April to May. In addition, response of the soaking rain date to the surface heat source over the Tibetan Plateau is also discussed. The results suggest that, since 1958, the soaking rain date in Northeast China, has shown a positive relation with the soaking rainfall and a negative relation with the total rainfall, suggestive of the place where the soaking rain date is early (late), the soaking rainfall is smaller (larger) and the total rainfall is larger (smaller). Besides, the correlation between the surface heat source over the Tibetan Plateau in April and the soaking rain date is negative, which means when the surface heat source in April gets enhanced, cold air from the north and warm air from the south intersect over Northeast China, updrafts, are strengthened, and water vapor transport is abundant, making the soaking rain date in Northeast China come early (late).

Key words: spring, soaking rain, surface heat source over the Tibetan Plateau, Northeast China

---

* 公益性行业(气象)科研专项(201406001)和国家自然科学基金项目(91337109)共同资助
2015 年 8 月 28 日收稿； 2015 年 12 月 23 日收修定稿

第一作者：徐士琦，主要从事东北透雨和青藏高原地面加热场研究. Email：xushiqi91@163.com
通信作者：李栋梁，主要从事气候动力学、气候变化及高原气象等方面研究. Email：lidl@nuist.edu.cn

引 言

东北是世界上拥有三大黑土地的地区之一，是中国重要的农牧业和商品粮食生产基地。以三江平原、辽河平原和松嫩平原为中心的粮食产量占全国总产量的 1/3。近些年的大部分研究多关注于东北地区夏季降水的基本特征（韩艳凤等，2005；沈柏竹等，2011；丁婷等，2015；张杰等，2010；高晶等，2015），而对东北春季降水研究较少，尤其是东北地区春播期首场透雨的研究更少。春播期间首场透雨出现时间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，因而研究春播期首场透雨的时空变化特征对于更好地服务农业生产具有十分重要的意义和价值。李辑等（2008）利用 1961—2007 年辽宁地区 14 个站点 4－5 月的逐日降水资料对春播期的首场透雨进行研究，指出辽宁省春播期透雨出现时间略有偏晚的趋势；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）则进一步分析了春播期透雨出现时间与 500 hPa 环流场及海温的关系，说明透雨偏早年，500 hPa 高度场上亚欧呈现两脊一槽型，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，辽宁处于高脊控制区。当北太平洋地区前期 9—11 月海温偏高（低）时，辽宁春季透雨出现日期偏早（迟）。从现有的工作来看，有关透雨多集中于中国西北地区（陈楠等，2002；林纾等，2005；郭江勇等，2007；纳丽等，2007）或东北某一省份的研究（刘荣青，1980；国世友，2014；李辑等，2008；沈玉敏等，2012），而对东北地区整体大范围春季透雨的研究较少；此外，对于春季首场透雨影响因子的研究主要集中于海温的变化及其与大气环流间的直接作用，而对影响透雨的其他外强迫因子研究甚少。

众所周知，青藏高原作为世界上最高、最陡峭的大地形，对东亚及全球的大气环流和气候都有重要影响（Hahn et al，1975；Duan et al，2005；张利红等，2011；陶亦为等，2011；韦晋等，2013；Wang et al，2014；周胜男等，2015；刘炜等，2014；赵勇等，2007）。目前大量关于青藏高原地面加热场对于中国降水影响的研究已有报道。段安民等（2003）指出 4—6 月高原的整体感热加热可以作为东亚地区尤其是中国江淮等地 7 月降水形势的预报因子。李栋梁等（2003）指出青藏高原热力异常对我国大范围旱涝气候异常具有重要的指示意义。赵勇等（2007）指出高原东部及其以北区域的热力差异对江淮地区夏季 6、7 月降水有明显影响，当前期 5 月这一差异增大时，6 和 7 月 500 hPa 分别在蒙古西部和我国东北部及邻近海域易出现异常的反气旋性和气旋性距平环流，我国东部长江以北地区偏北气流加强，西太平洋上易出现异常反气旋性距平环流，我国江南地区偏南气流加强，南北气流在江淮地区交汇，降水增多。那么青藏高原地面热力异常特征对于我国东北地区的春季首场透雨有无影响，它们之间又有怎样的关系。基于以上问题，本文选取 1958—2012 年 4—5 月的逐日降水资料，对东北地区 101 个站点春播期间的第一场透雨出现日期进行分析，并将首场透雨出现的时间与首场透雨量、春播期的总降水量相联系，探讨春播期的透雨特征；同时利用 JRA-55 再分析资料对青藏高原地面加热场进行研究，初步讨论了东北地区春季首场透雨出现时间对青藏高原地面加热场异常的响应及可能机制，以期进一步提高东北地区春季透雨的预测准确率。

1 资料和方法

1.1 资料

选用国家气象信息中心提供的东北地区（39°～55°N、118°～135°E）101 个站点 1958—2012 年 4—5 月逐日降水资料，研究范围包括我国东北三省及内蒙古东部、河北东部的部分地区，站点分布如图 1 所

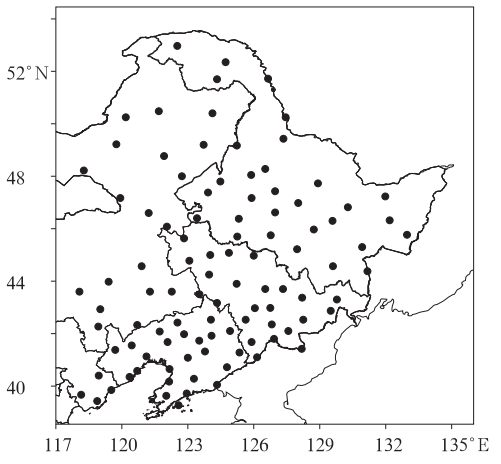


图 1 研究区域 101 个站点分布

Fig. 1 Distribution of 101 analyzed stations in the research region

示。同时选用由日本气象厅最新提供的 JRA－55 青藏高原地区(25°～40°N、73.75°～103.75°E)29×13 个格点地面感热、潜热通量月平均再分析资料,时间长度为 1958—2012 年,水平分辨率为 1.25°×1.25°。美国气象环境预报中心/国家大气研究中心提供的 NCEP/NCAR-I 月平均再分析资料(包括温度场、位势高度场、风场),资料垂直方向 17 层,水平分辨率为 2.5°×2.5°。

1.2　方法

参考李辑等(2008)的方法,将单站自 4 月 1 日起,第一次出现连续 3 天过程雨量之和大于等于 10 mm 的最后一天的日期记为该站当年春季首场透雨出现的日期(简称“透雨日期”)。以 4 月 1 日为起点,如 4 月 15 日记为 15,5 月 21 日记为 51,若透雨出现时间晚于 6 月 1 日,则视为春季无透雨,在计算平均值时不将该年计算在内。以首场透雨出现时的过程雨量之和记为首场透雨量,4 和 5 月的降水量之和代表春播期总降水量。在资料处理过程中,对降水资料中个别站点少量年份出现的缺测现象,选用与该测站降水序列相关最高的最近测站建立一元线性回归模型进行插补。定义青藏高原地面加热场强度为地面感热通量与潜热通量之和。本文采用经验正交函数(EOF)分解、奇异值(SVD)分解、趋势分析和相关分析等统计方法。

2　东北地区春季首场透雨的气候特征

根据 1958—2012 年东北地区 101 个站点透雨出现日期的时间序列,分析其多年平均分布(图 2)。透雨日期自东南开始向西北逐渐推迟,最迟出现在浑善达克沙地附近,约为 5 月 8 日,并由此经过科尔沁沙地直到黑龙江中部存在一条干舌;东南部的辽宁、吉林南部透雨出现的日期最早,约在 4 月中旬;吉林中部、辽宁西部在 4 月下旬出现首场透雨。这显然是由于东北地区的北部和西部更远离海洋,深居内陆,水汽相对稀少,雨季开始的时间偏晚,因而透雨日期也偏迟。

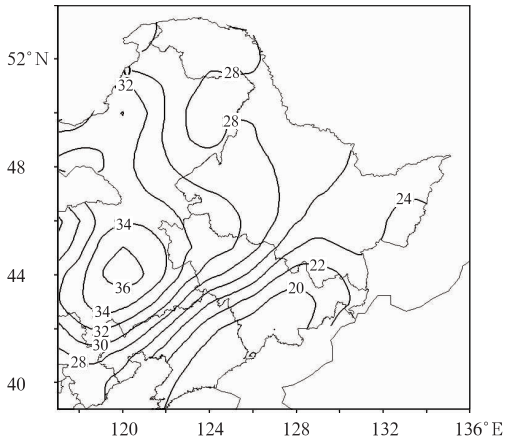


图 2　东北地区春季平均首场透雨出现日期分布(距 4 月 1 日的天数)

Fig. 2　Distribution of isolines of the first soaking rain date in Northeast China

从东北地区各站点春播期首场透雨量(图 3a)和春播期总降水量(图 3b)的多年平均分布可以看到,春播期首场透雨量自南向北逐渐减少,大值区位于辽宁南部,最大值出现在丹东站(40.05°N、124.33°E),其值为 24.6 mm;而春播期的总降水量大值区则位于吉林南部,最大值出现在永吉站

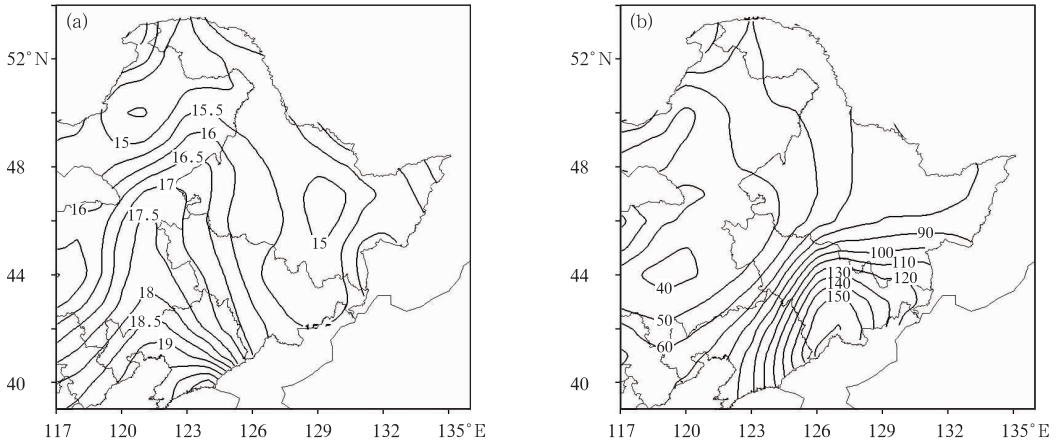


图 3　东北地区春季首场透雨量(a)及春播期总降水量(b)的多年平均分布(单位:mm)

Fig. 3　Distribution of the first soaking rainfall (a) and the total rainfall from April to May (b) in Northeast China (unit: mm)

(43.7°N、126.52°E),其值为 191.8 mm,大值区向西逐渐减少,春播期首场透雨量及总降水量的最小值均出现在浑善达克沙地附近。春季首场透雨出现的日期、雨量及春播期的总降水量的空间分布形势与侯依玲等(2005)给出的该地区年降水量的分布形势相似。

从东北地区各站点首场透雨日期与首场透雨量及春播期总降水量年际变化关系的空间分布(图 4)发现:春季首场透雨日期与首场透雨量呈现不显著的正相关(图 4a),而与春播期总降水量呈负相关(图 4b),尤其在黑龙江及吉林西部、辽宁和河北东部地区相关性显著,即春播期首场透雨出现时间偏早(晚)的地方,首场透雨量偏小(大),春播期总降水量偏多(少)。这与李辑等(2008)对辽宁地区的统计结果相似。

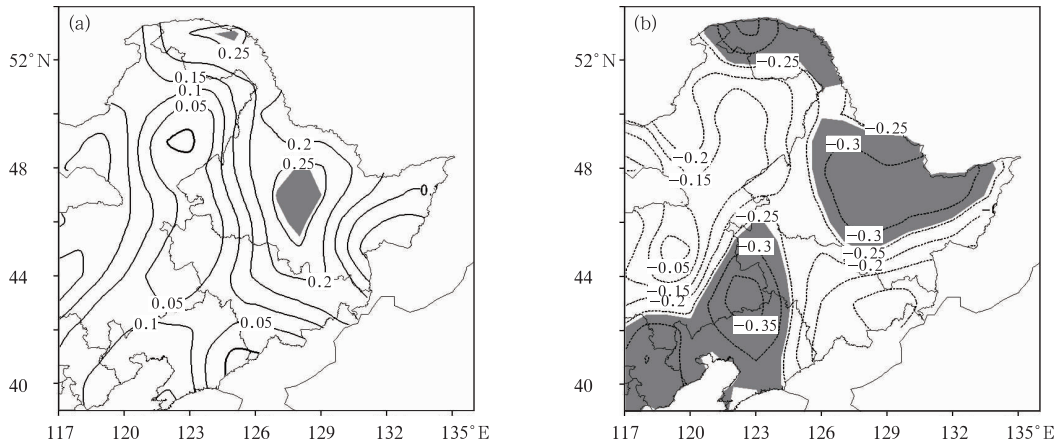


图 4 东北地区各站点春季首场透雨日期与首场透雨量(a)及春播期总降水量(b)的年际相关

(阴影区为通过 0.05 显著性水平检验区域)

Fig. 4 The correlation of each station's first soaking rain date and the first soaking rainfall (a), the total rainfall from April to May (b) in Northeast China

(The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are over the 0.05 significance level)

东北全区 101 站平均春季首场透雨出现日期(图 5a)和透雨量(图 5b)的变化序列反映出两者均具有明显的年际和年代际变化特征。对透雨日期进行小波分析(图略)发现近 55 年来具有准 12～13 年的周期特征。研究范围内,透雨日期的平均时间为 4 月 25 日,最早出现在 2002 年 4 月 8 日,最晚出现在 1971 年 5 月 7 日,最早与最晚相差一个月。东北春季平均首场透雨量约为 16.8 mm,大值集中出现在个别年份,即透雨量最大的三年分别为 1983 年(28.9 mm)、1994 年(23.9 mm)和 1972 年(20.7 mm)。

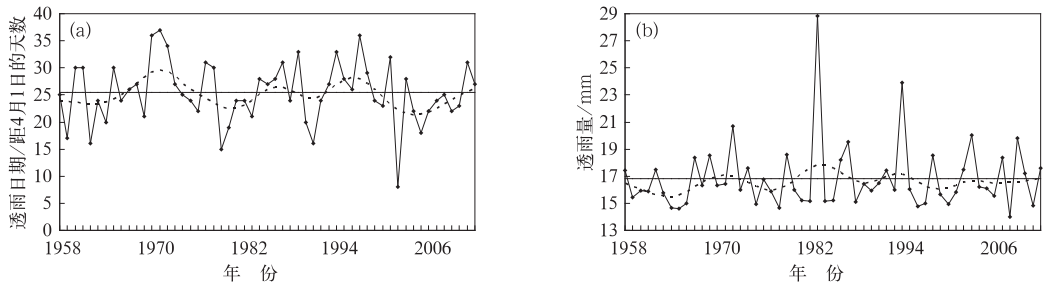


图 5 东北 101 站区域平均首场透雨日期(a)和透雨量(b)的变化序列

(实线为区域平均值,虚线为 11 年高斯滤波)

Fig. 5 Interannual change of the soaking rain date (a) and the soaking rainfall (b) in Northeast China

(Solid line is the regional average, and dashed line is the 11 year Gaussian filter)

对东北地区的春季无透雨站数(图 6a)进行统计,可以看到 55 年中有 13 年春季无透雨站数达到 15 站以上,其中 5 年无透雨站数达到 20 站以上。2003 和 1986 年均有 28 站春季未出现透雨,2001 年有 26 站未出现透雨;而在 1990、1997、2005、2010 年 101 站全部出现透雨,1958、1988、2008 年也仅有 1 站未出现透雨。近 10 年来,春季无透雨站数有明显减少的趋势。从春季无透雨站点的分布(图 6b)情况来看,巴林左旗站(43.98°N、119.4°E) 出现无透雨的次数最多,55 年中有 22 年春季没有出现透雨;其次为新巴尔虎左旗站(48.22°N、118.27°E),55 年中有 21 年春季未出现透雨。对春季无透雨出现年份最多的 8 个站点进行统计,发现主要集中在内蒙古东部;同时看到,在东北东部及南部地区大多数站点春季无透雨年份极少,基本每年春播期间都会有透雨出现。整体而言,东北地区 55 年来,各站点自东南向西北的无透雨年份逐渐增加。这种空间差异极大程度上与东北地区地理分布有关,其东部南部临海,水汽输送充沛;而北部和西部地区深居内陆,由于水汽输送不足,导致透雨无法在春播期间出现。

近 55 年来东北的西北部及东南部地区透雨出现日期呈现略微偏晚的趋势(图 7a),最大正值中心出现在黑龙江北部,平均每 10 年透雨出现日期推迟 5 d;而东北中部大部分地区以偏早趋势为主,趋势并不显著,最大负值中心出现在吉林中部,平均每 10 年透雨出现日期提前 2 d。与透雨出现日期不同的是透雨量的变化趋势(图7b)在东北的大部分地区以负值为主,最大负值中心在吉林中部和东北西北部,平均每 10 年透雨量减少 7.5 mm;东北西部以正值为主,最大正中心位于内蒙古,平均每 10 年透雨量增加8.3 mm。

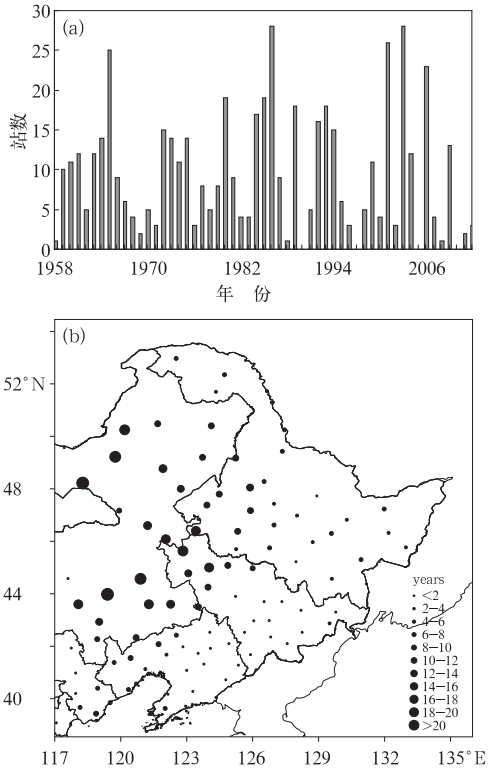


图 6　东北地区每年春季无透雨站数(a)和各站无透雨出现的年数(b)统计

Fig. 6　Numbers of stations (a) and years (b) without the soaking rain in Northeast China

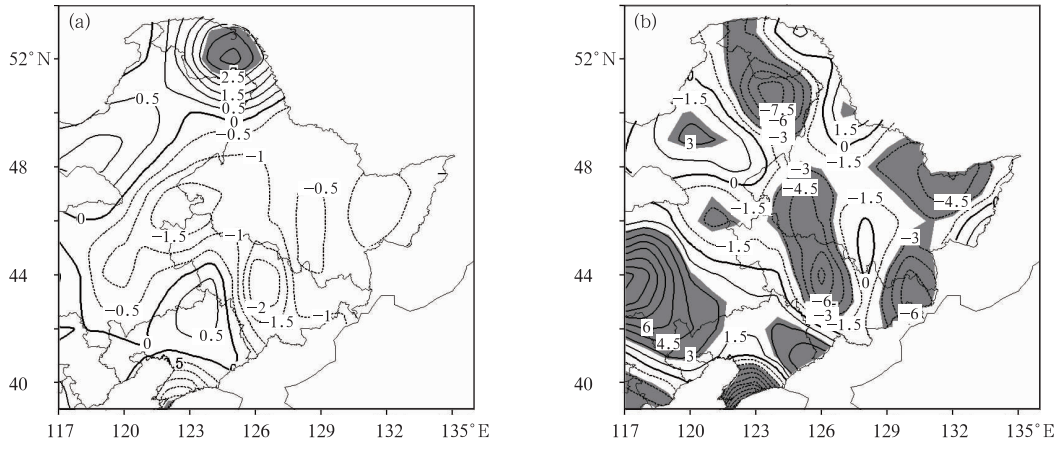


图 7　东北地区春季首场透雨日期[a,单位:d·(10 a)$^{-1}$]和透雨量[b, mm·(10 a)$^{-1}$]的线性趋势空间分布

(阴影区为通过 0.05 显著性水平检验区域)

Fig. 7　Distribution of the soaking rain date trend [a, unit: d·(10 a)$^{-1}$] and rainfall trend [b, unit: mm·(10 a)$^{-1}$]

(The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are over the 0.05 significance level)

为进一步分析透雨日期的时空分布特征，采用EOF方法对55年的透雨日期进行分解。从分解结果看，第一载荷向量场占解释总方差的56.7%，空间整个区域为一致的正值(图8a)，所有测站的载荷向量均通过0.05的显著性水平检验。这反映了东北地区首场透雨出现时间整体偏晚(早)；最大正值中心位于吉林西部与内蒙古、黑龙江和辽宁交界范围内为0.7，表明这一带是透雨日期变化最敏感的区域。时间序列(图8b)与东北区域平均首场透雨日期(图5a)有较为一致的对应关系，具有明显的年际和年代际变化。典型的透雨偏早年有：2002、1979、1962、1991、1959年；典型的透雨偏晚年有：1970、1971、1997、1972、1994年。第二模态的空间分布(图8c)显示：东北地区的北部与南部呈现反位相变化，即东北首场透雨日期除全区一致的变化外，还有7.5%的年份存在北偏早(晚)南偏晚(早)的情况。最大负值中心位于黑龙江西北部，最大正值中心位于辽宁西南部与河北交界一带。第二模态对应的时间序列(图8d)反映出东北地区首场透雨出现的时间在1976年以前以北晚南早的年份偏多，1976—1992年以北早南晚的年份偏多，近10年来又逐渐有北晚南早的趋势，这种明显的年代际变化是否与全球气候变暖有关，在后续研究中值得继续关注。首场透雨出现时间异常的北晚南早年有：1993、1967、2008、1962、2009年；异常的北早南晚年有：2001、1989、2003、2000、1981年。

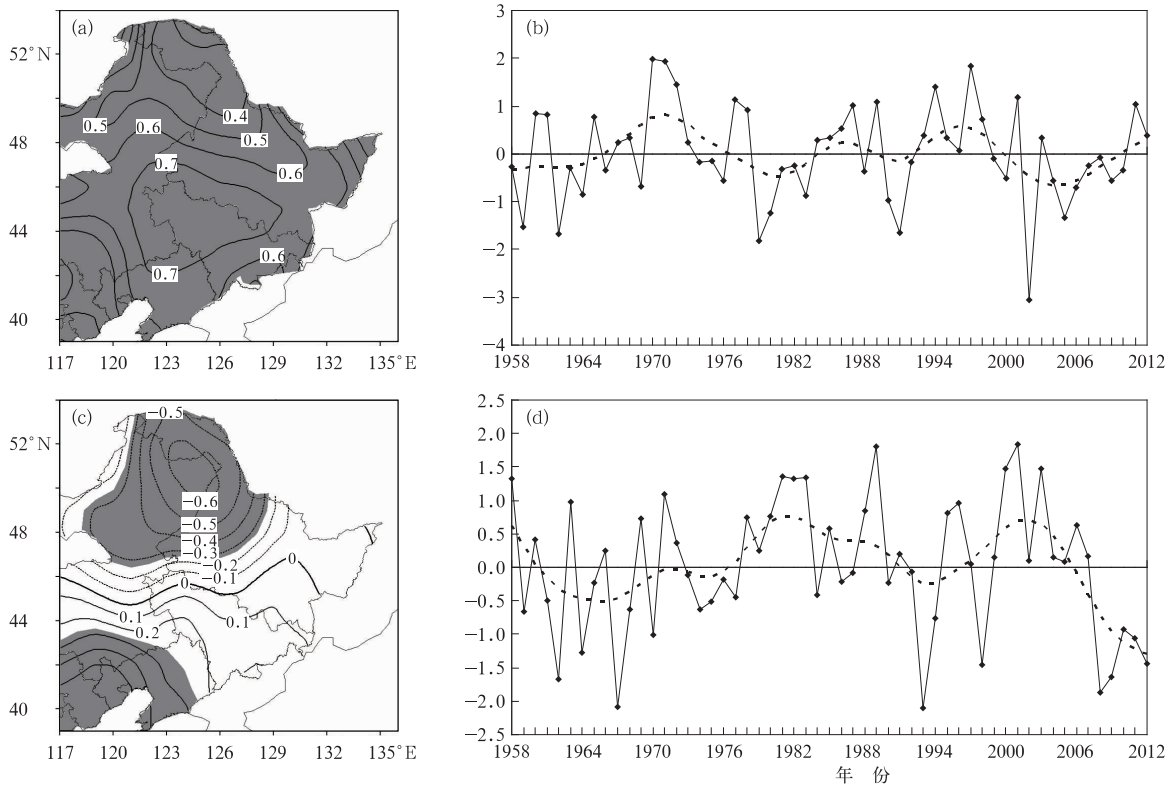


图8 东北地区透雨日期EOF第一(a，b)、第二(c，d)载荷向量空间模态及其对应的时间系数
(a，c图中阴影区为通过0.05显著性水平检验区域；b，d图中实线为时间系数，虚线为11年高斯滤波)

Fig. 8 The first (a，b)，second (c，d) loading eigenvalues and the corresponding temporal coefficients of the soaking rain date in Northeast China
(The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are over the 0.05 significance level in Figs. a，c; solid line is time coefficient，and dashed line is the 11 year Gaussian filter in Figs. b，d)

3 春季首场透雨日期与青藏高原地面加热场强度的关系

为分析东北春季首场透雨日期对青藏高原地面热力异常的响应，表1给出了区域平均的东北地区春季首场透雨日期与青藏高原各月地面加热场强度的年际和年代际相关系数。从表1可知4月青藏高原地面加热场强度与东北地区透雨日期的相关性最好，年际相关系数达到－0.26(通过了0.05的显著

性水平检验),年代际相关系数达到－0.58(通过了0.01的显著性水平检验)。这一结果表明,当春季(4月)青藏高原地面加热场强度整体异常偏强时,同年东北地区首场透雨出现时间整体偏早。

表 1　东北春季首场透雨日期与区域平均的青藏高原各月地面加热场强度的相关系数

Table 1　Correlation coefficients of the surface heat source over the first soaking rain date in Northeast China and the Tibetan Plateau

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
年际	－0.22	－0.17	－0.14	－0.26*	0.21	0.11	－0.04	－0.11	－0.01	－0.09	－0.09	－0.18
年代际	－0.31*	0.11	－0.23	－0.58**	－0.31*	－0.18	－0.16	0.02	－0.21	－0.10	－0.23	－0.30*

* 表示通过 0.05 显著性水平检验;* * 表示通过 0.01 显著性水平检验;5—12 月为当年透雨日期与前一年高原地面加热场强度的相关。

为进一步验证4月青藏高原地面加热场强度与东北春季首场透雨日期的遥相关关系,对两者做SVD分析。由于篇幅所限,本文主要讨论第一模态的异质相关,其平方协方差贡献率为63.13%,相应的模态相关系数为0.58。左右场的异质相关系数分布如图9所示,整体而言,当4月青藏高原地区地面加热场强度增强(减弱),东北地区春季首场透雨出现时间偏早(偏晚),在45°N以北的地区尤为显著。同时我们注意到,图9a中青藏高原30°N以北的地区为正值,以南的地区为负值,且大值区位于青藏高原东北部(30°～38.75°N、90°～103.75°E)地区,对应的右场奇异值(图9b)的分布型与图8a给出的东北地区春季首场透雨出现时间的EOF第一载荷向量场的空间分布型非常相似。表明东北地区春季首场透雨整体出现异常偏早偏晚与青藏高原东北部地面加热场强度的异常偏强偏弱关系密切。计算青藏高原东北部加热场强度的区域平均值与东北区域平均首场透雨日期的年际相关为－0.33(接近0.01的显著性水平检验),年代际相关为－0.59(通过0.01的显著性水平检验),比高原整体平均的年际相关系数有明显提高。因而定义这一区域(30°～38.75°N、90°～103.75°E)为青藏高原地面加热场影响东北春季首场透雨日期的关键区。

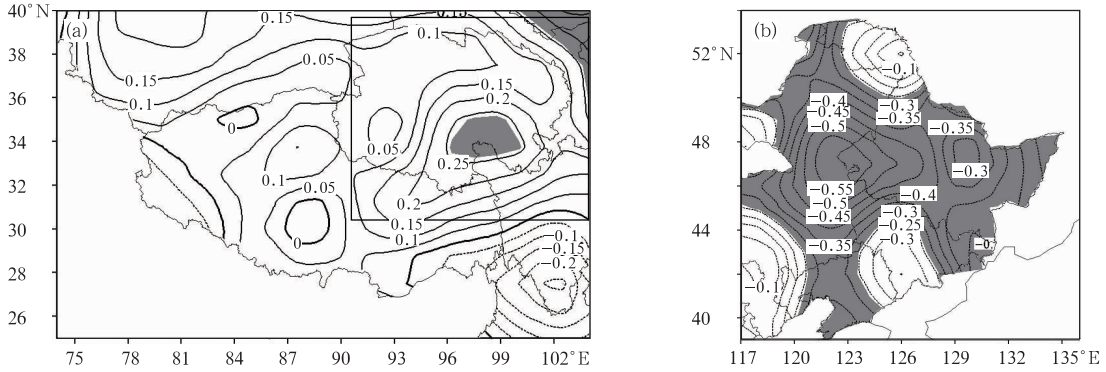


图 9　4月青藏高原地面加热场(a)与东北春季首场透雨日期(b)的SVD异质相关(第一模态)
(阴影区为通过0.05显著性水平检验区域)

Fig. 9　The first SVD mode heterogeneous correlation between surface heat source over the Tibetan Plateau in April (a) and the soaking rain date in Northeast China (b)
(The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are over the 0.05 significance level)

由于大气环流变化是导致降水发生变化的直接原因,因而本文接下来主要讨论关键区地表热力异常对大气环流的影响,以解释4月青藏高原地面加热场强度对透雨日期产生影响的可能机制。定义关键区平均地面加热场强度的标准化距平为4月青藏高原地面加热场强度指数I_{tb}。I_{tb}越大,地表加热场强度越强;反之,地表加热场强度越弱。为方便讨论,提取I_{tb}对应的5个正异常年和负异常年,I_{tb}正异常年份为:1960、2002、1963、1969、2004年;负异常年份为:1986、1997、1998、1983、1978年。

由于青藏高原海拔较高,其非绝热作用可以直接加热对流层中层大气,对大气温度场的影响最为直接。通过分析I_{tb}异常年份对应的4月500 hPa温度场合成差值图可以看到,正值区在青藏高原及其中东部、贝加尔湖南部,因此,中国东北地区北部温度场为负值,南部为正值。即4月青藏高原地面

加热场强度增强，有利于东北地区北部温度降低，冷空气活动加强，而南部温度升高，使得南北温差（温度梯度）加大，促进北方冷空气与南方暖空气在东北地区（45°N 左右）交汇，有利于降水的发生。根据梯度风原理，I_{tb} 与大气温度场之间相互作用的同时会引起整个大气环流形势的调整。通过对 I_{tb} 指数异常年份对应的 4 月 500 hPa 高度场的合成差值分析发现，高原地面加热场强度增强，东北 45°N 以北的地区上空 500 hPa 位势高度降低，有利于气旋性环流的形成；而 45°N 以南的地区位势高度有略微升高的趋势。同时垂直速度场显示，4 月青藏高原地面加热场强度增强，有利于东北 45°N 以北地区的气流上升，以南地区气流下沉。这些现象表明，青藏高原地面加热场对东北地区北部透雨出现早晚的影响较南部地区更为显著。进一步对 I_{tb} 指数正、负异常年对应的 850 hPa 水汽场进行合成差值发现，青藏高原地面加热场强年，在孟加拉湾地区有自南向北的强经向风分量将大量水汽带入东北地区。此外，在黄海及东海、渤海附近也有弱的水汽向东北地区输送。

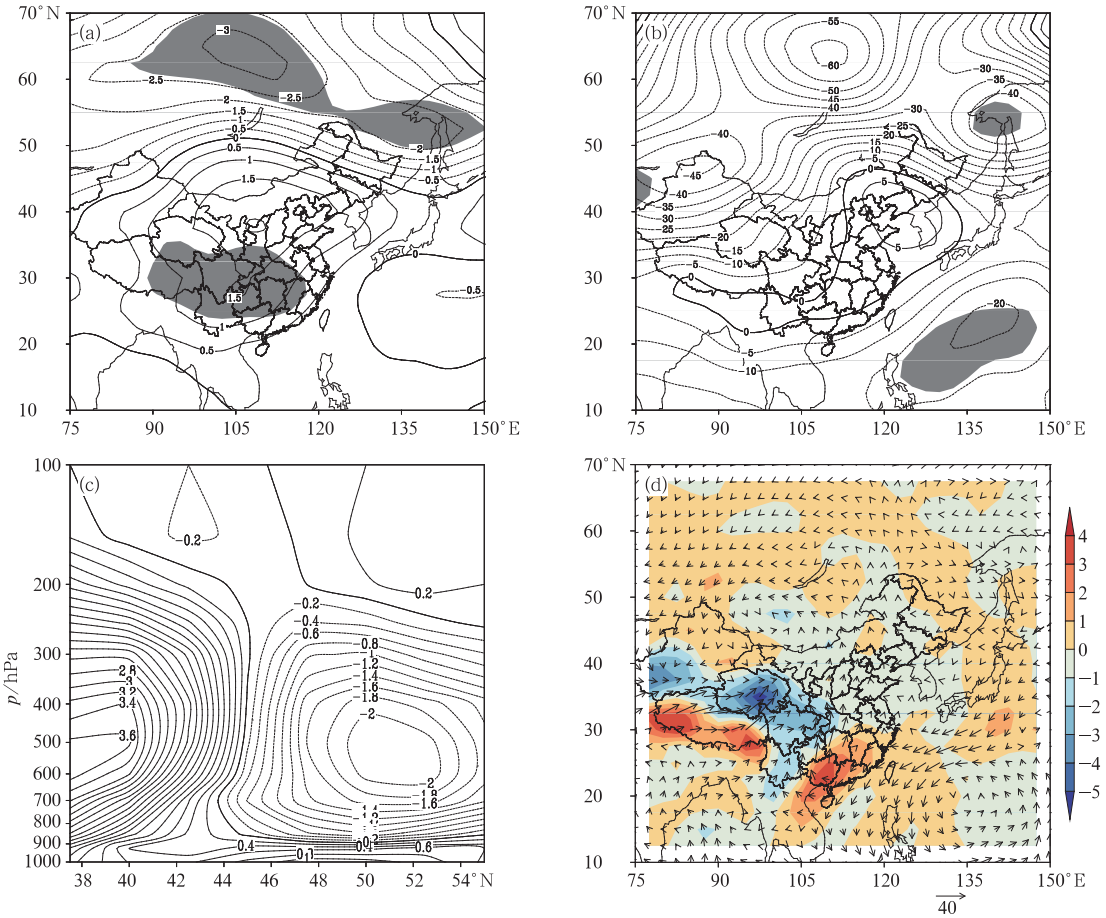


图 10 I_{tb} 正、负异常年 4 月 500 hPa 温度场（a，单位：℃）、500 hPa 高度场（b，单位：gpm）、沿 125°E 经向剖面的垂直速度场（数值扩大 100 倍；c，单位：10^{-4} Pa·s^{-1}）、850 hPa 水汽场（d，单位：g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1}）合成差值

（阴影区为通过 0.05 显著性水平检验区域）

Fig. 10 The integrated difference field of 500 hPa temperature (a, unit: ℃), 500 hPa height (b, unit: gpm), vertical velocity of meridional cross section along 125°E (c, unit: 10^{-4} Pa·s^{-1}), 850 hPa water vapour (d, unit: g·s^{-1}·hPa^{-1}·cm^{-1}) in April during the abnormal years of I_{tb}

(The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are over the 0.05 significance level)

4 结论与讨论

利用 1958—2012 年 4—5 月东北地区 101 个站点逐日降水资料、青藏高原地区 JRA-55 的地面感热、潜热通量月平均再分析资料，以及 NCEP/NCAR-I 大气环流场的月平均再分析资料，分析了春播期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，以及青藏高原地面加热场强度对透雨日期的影响及大气环流，得到以下结论：

(1)1958—2012 年东北地区平均透雨日期为 4 月 25 日，平均透雨量为 16.8 mm；透雨日期由东南向西北逐渐推进，透雨量由南向北逐渐减少。首场透雨出现时间越早的地方，透雨量越小、春播期总降水量越大。无透雨站点多集中出现在内蒙古东部，且自东南向西北站点的无透雨年数逐渐增加。

(2)自 1958 年以来，透雨日期在研究区的西北部及东南部呈现略微偏晚的趋势，而中部地区以略微偏早的趋势为主；透雨量在东北部地区以减小的趋势为主，西南部以增加的趋势为主。

(3)东北地区透雨日期的空间模态主要有两个：第一模态为全区一致的偏晚(早)型，其对应的时间序列与东北区域平均首场透雨日期有较为一致的对应关系，具有明显的年际和年代际变化；第二模态为北偏晚(早)南偏早(晚)型，且在 1976 年前以北偏晚南偏早的年份偏多，1976—1992 年以北偏早南偏晚的年份偏多，近 10 年来又逐渐有北偏晚南偏早的趋势。

(4)4 月青藏高原东部地面加热场强度与我国东北地区的透雨日期存在显著的负相关，即 4 月青藏高原东部地面加热场强度增强(减弱)，有利于东北春季透雨日期提前(推迟)，这一现象在东北地区北部尤为显著。其可能的影响机制为：青藏高原地面加热场强(弱)年，东北北部气温降低(升高)，北方冷空气强度加强(减弱)，南部气温升高(降低)，有利于(不利于)冷暖气流在东北地区交汇；同时中低层反气旋(气旋)性环流，有利于(不利于)东北地区上升气流增强；此外，来自孟加拉湾、黄海、东海和渤海的水汽输送充沛(减少)也有利于(不利于)降水的产生，透雨日期偏早(晚)。

本文主要就东北春季首场透雨日期进行分析，并选取 4 月青藏高原地面加热场强度作为外强迫因子，讨论其对透雨日期的影响及可能机制。而透雨日期早晚年还可能与哪些外强迫因子有关等问题尚待进一步深入研究。

参考文献

陈楠，陈豫英，沈跃琴. 2002. 宁夏第一场透雨中期预报方法. 气象，28(6)：39-42.

丁婷，陈丽娟，崔大海. 2015. 东北夏季降水的年代际特征及环流变化. 高原气象，34(1)：220-229.

段安民，刘屹岷，吴国雄. 2003. 4—6 月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常. 中国科学 D 辑，33(10)：997-1004.

高晶，高辉. 2015. 副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的影响及可能机制. 大气科学，39(5)：967-977.

郭江勇，李耀辉，林纾. 2007. 甘肃黄土高原春季透雨日期的气候特征. 中国沙漠，27(4)：644-648.

国世友. 2014. 2012 年黑龙江春播期两次透雨过程对比分析. 气象科技，42(2)：314-318.

韩艳凤，江志红，王冀，等. 2005. 东北地区夏季降水时空变化特征. 气象科技，33(2)：146-141.

侯依玲，李栋梁，施雅风，等. 2005. 50a 来我国东北及邻近地区年降水量的年代际异常变化. 冰川冻土，27(6)：838-845.

李栋梁，李维京，魏丽，等. 2003. 青藏高原地面感热及其异常的诊断分析. 气候与环境研究，8(1)：71-83.

李辑，胡春丽，王艳，等. 2008. 辽宁省春播期第一场透雨气候特征及其变化规律分析. 气象与环境学报，24(6)：1-6.

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. 成都信息工程学院学报，20(3)：347-353.

刘荣青. 1980. 黑河地区第一场透雨的预报. 气象，6(3)：13-13.

刘炜，周顺武，智海. 2014. 1998 年夏季青藏高原东南部降水 30～60 d 低频振荡特征. 气象，40(5)：530-540.

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. 干旱区研究，24(3)：344-348.

沈柏竹，林中达，陆日宇，等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析. 中国科学　地球科学，41(3)：402-412.

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. 辽宁气象，28(4)：28-32.

陶亦为，孙照渤，李维京，等. 2011. ENSO 与青藏高原积雪的关系及其对我国夏季降水异常的影响. 气象，37(8)：919-928.

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北春季降水的关系分析. 气象，39(2)：129-136.

张杰，钱维宏，丁婷. 2010. 东北地区 5—9 月降水特征和趋势分析. 气象，36(8)：1-7.

张利红，李跃清，秦宁生，等. 2011. 青藏高原坡面观测信息对我国夏季降水预报的作用. 气象，37(10)：1233-1240.

赵勇，钱永甫. 2007. 青藏高原地表热力异常与我国江淮地区夏季降水的关系. 大气科学，31(1)：145-154.

周胜男，罗亚丽，汪会. 2015. 青藏高原、中国东部及北美副热带地区夏季降水系统发生频次的 TRMM 资料分析. 气象，41(1)：1-16.

Duan Anmin，Wu Guoxiong. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. Climate Dyn，23(7/8)：793-807.

Hahn D G，Manabe S. 1975. The role of moutains in the South Asian monsoon circulation. J Atmos Sci，32：1515-1514.

Wang Ziqian，Duan Anmin，Wu Guoxiong. 2014. Time-laggrf impact pf spring sensible heat over the Tibetan Plateau on the summer rainfall anomaly in East China：case studies using the WRF model. Climate Dyn，42(11/12)：2885-2898.