

夏季长白山天池站降水量年际变化特征及其对应的环流异常

凌思宁^{1, 2}, 陈卫¹, 陆日宇^{1, 2}, 高枏亭^{3, 4, 5}

- 1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
- 2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
- 3 吉林省气象科学研究所, 吉林省长春市, 130062
- 4 长白山气象与气候变化吉林省重点实验室, 吉林省长春市, 130062
- 5 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 吉林省长春市, 130062

摘要 长白山地处吉林省东南部, 作为国家级重点生态功能区, 其降水变化特征对该地森林生态系统和水资源结构变化有重要影响。本文基于 1979 - 2016 年吉林省 47 个台站逐月降水资料, 探究了长白山天池站夏季降水的气候特征及其相关的环流异常, 并与吉林省降水进行对比。分析结果表明天池夏季降水量以及年际变率高出吉林省其它站点一倍左右。此外, 天池降水年际变化对应的环流异常与吉林省降水一致, 即 6 月东北亚气旋式异常和东亚高空急流的增强, 以及 7、8 月西太副高增强和东亚高空西风急流偏北, 均可引起吉林省和天池降水偏多。另一方面, 天池降水变异还表现出其独特的环流异常, 与吉林省降水对应的环流异常显著不同或者甚至近乎相反, 究其原因因为长白山地形所致。本文的结果说明山地的气候和大气环流的关系复杂、多变。

关键词 长白山天池 降水 年际变化 环流 夏季

稿件编号 2020117C

文章编号:

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20117

收稿日期 2020-8-28; **网络预出版日期**

作者简介 凌思宁, 女, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变异研究。E-mail: lingsining@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈卫, E-mail: chenwei@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41721004, 41675078, 中国科学院青年促进会项目 (No. 2018102), 国家重点研发项目 2018YFC1507300, 吉林省重点科技研发项目 20180201035SF
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41721004, 41675078); Youth Innovation Promotion Association of CAS (No. 2018102); National Key Research and Development Program of China (2018YFC1507300); Key Scientific and Technology Research and Development Program of Jilin Province (20180201035SF)

Interannual variation of summer rainfall at the Tianchi station in Changbai

Mountains and its associated circulation anomalies

Ling Sining^{1,2}, Chen Wei¹, Lu Riyu^{1,2}, Gao Zongting^{3, 4, 5}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Collage of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun, 130062, China

4 Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology & Climate Change, Changchun, 130062, China

5 Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation and East Asian Monsoon, Changchun, 130062, China

Abstract Changbai Mountains are located in the southeast of Jilin Province. Rainfall has a crucial impact on the forest ecosystem and water resource in Changbai Mountains, which is a national key ecological function area. Based on the monthly precipitation data from 47 stations in Jilin Province and ERA-Interim monthly reanalysis data from 1979 to 2016, we investigated the climate characteristics of the summer precipitation at Tianchi station in Changbai Mountains and circulation anomalies associated with the interannual variation of rainfall at this station, and compared with the other stations in Jilin Province. The results show that the summer

precipitation at Tianchi and its interannual variability are approximately two times larger than other stations in Jilin Province. On the one hand, the circulation anomalies associated with interannual variability of precipitation at Tianchi are consistent with those for Jilin Province. The circulation anomalies that favor more rainfall at Tianchi and Jilin Province are characterized by a cyclonic anomaly over Northeast Asia and enhanced East Asian jet in June, and enhanced western Pacific subtropical high and northward displaced East Asian jet in July and August. On the other hand, the precipitation in Tianchi is associated with unique circulation anomalies, which are quite different or almost opposite to those related to the precipitation in Jilin Province rainfall, and may be attributed to by the terrain of Changbai Mountains. The present results suggest that the climate variability in mountains may be related to complicated and various patterns of large-scale atmospheric circulation anomalies.

Keywords Tianchi in Changbai Mountains, Precipitation, Interannual variation, Circulation, Summer

1 引言

长白山自然保护区始建于 1960 年，是国家级自然保护区及国际 A 级自然保护区。长白山自然保护区独特的地质构造和地理位置使这里具有典型的植被垂直分布带谱，成为欧亚大陆具有代表性的自然综合体之一。许多研究表明，长白山自然保护区多类树木的径向生长对降水有显著的响应(陈列等, 2013; 王晓明等, 2013; 陈力等, 2014; 周子建等, 2018; 韩艳刚等, 2019)。因此，认识长白山地区的降水变化规律及其影响因子，将为森林资源管理、水资源涵养及物候变化等研究提供可靠的科学依据，对长白山自然保护区的建设与发展具有重要意义。

长白山位于我国东北地区的东南部，而东北地区属于温带大陆性季风气候，夏季为主要雨季，降水占全年降水量的一半以上(崔玉琴, 1995; 王学忠等, 2006; Liang et al., 2011; Sun et al., 2017)。东北地区位于东亚夏季风系统的北边缘，西太平洋副热带高压（西太副高）西北侧的西南气流有利于向东北地区输送水汽，进而有利于东北地区降水偏多(贾小龙和王谦谦, 2006; 赵俊虎等, 2012; Chen et al., 2016; 孙照渤等, 2016; 陈海山和陈健康, 2017; Sun et al., 2017)。另一方面，位于东亚北部的东北亚低压，其东侧的偏北气流也通过加强水汽输送，进而增强东北地区夏季降水（Lin and Wang, 2016; Du et al., 2017; Zhao et al., 2018）。此外，东北冷涡的发生频次及强度变化也会对降水产生显著影响(Zhao and Sun, 2007; 胡开喜等, 2011; Xie and Bueh, 2015; 孙照渤等, 2016)。除上述对流层中、低层环流系统外，对流层高层的一些环流系统，如东亚高空西风急流及沿其传播的丝绸之路遥相关波列也会影响东北地区夏季降水（Krishnan and Sugi, 2001; Lu et al., 2002; Ding and Wang, 2005; Yasui and Watanabe, 2010; Huang et al., 2011; Lan and Zhang, 2011; Shen et al., 2011; 孙照渤等, 2016; Fang et al., 2017; Sun et al., 2017）。

东北夏季降水所对应的环流异常还具有季内演变特征(Shen et al., 2011; Chen and Lu, 2014; Zhao et al., 2018)。初夏(5-6月)东北地区降水异常主要受到东北冷涡活动或者气旋式异常的影响,而盛夏(7-8月)则主要受到西太副高的影响,其中8月东北降水还受到沿着亚洲西风急流向东传播的波列的影响。

东北夏季降水特征及对应的大尺度环流系统已得到较为全面的分析,部分研究还专门针对吉林省夏季降水变化特征进行了分析(张伟等, 2007; 曾丽红等, 2010; 董伟等, 2012, 2013)。和东北降水的气候特征类似,位于东北地区中部的吉林省降水也集中在夏季,降水量呈现由东南向东北、西北递减的空间分布型(张伟等, 2007; 董伟等, 2013; 王丽伟等, 2019)。前人对吉林省夏季降水对应的环流异常进行了分析(周志才等, 2003; 杨雪艳等, 2005; 于秀晶和王凤刚, 2005; 孙妍等, 2015),但对其季内演变的研究不多,且主要是针对一些典型年份(刘实和朱其文, 1996; 裘祝香, 2001; 张丽, 2002; 张丽等, 2007; 程红军, 2012)。

在本研究中,我们将基于吉林省降水的气候特征,侧重于夏季降水的逐月演变特征,对吉林省和天池站夏季各月降水变化对应的大气环流异常特征进行分析。重点考察天池夏季降水与吉林省降水之间的异同。为此,我们在分析过程中,将天池站夏季降水分为两部分:与吉林省一致的部分及天池特有的部分,进而进行异同点比较。本文具体章节安排如下:第2部分介绍本研究所采用的数据和方法;第3部分介绍夏季天池降水的气候特征,并将天池降水时间序列分解为与吉林省降水一致的分量及天池降水特有的分量;第4部分将分别讨论这两个分量对应的大气环流特征;在第5部分我们对本文进行总结和讨论。

2 资料和方法

2.1 数据资料

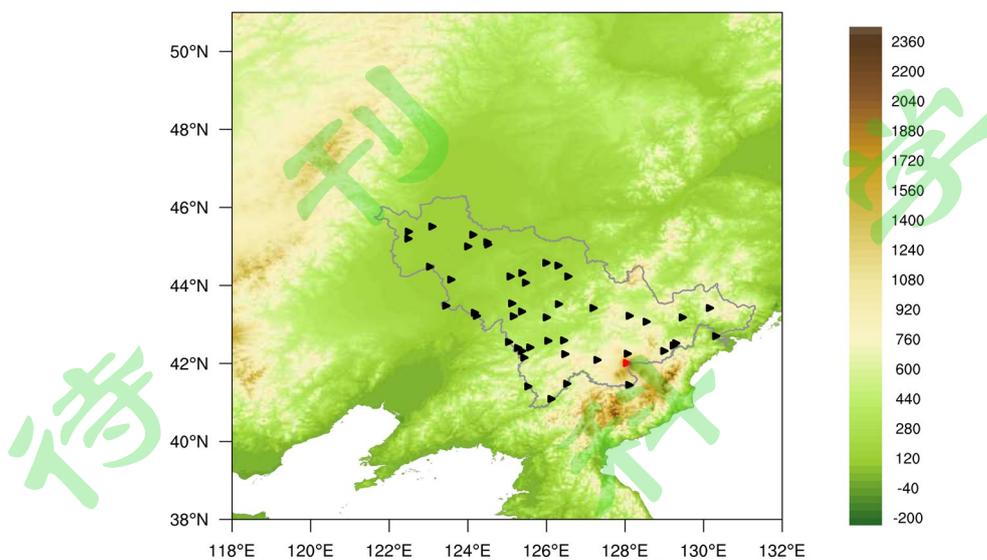


图 1 吉林省地形（单位：m）及 47 个站点分布图。红色三角形代表天池站

Fig.1 Topography (units: m) and spatial distribution of 47 stations in Jilin Province. The red triangle represents the Tianchi station

本研究使用夏季（6–8 月）吉林省 47 个台站逐月降水资料，时间为 1979–2016 年共 38 年。天池气象观测站位于长白山天文峰，海拔高度为 2623 米。作为国家一类艰苦台站，天池站自 1958 年建站以来提供了宝贵的长期连续气象观测资料，为长白山地区降水研究提供了重要的借鉴基础。图 1 给出了这 47 个台站的位置分布及东北地区地形分布。地形资料来自于美国国家海洋和大气管理局的 ETOPO1 数据 (Amante and Eakins, 2009)。吉林省除东南部外大部分地区地势较低，形成海拔高度由东南向西北递减的空间分布。天池站的位置在图 1 中用红色三角形表示，距离其最近的四个站分别为二道、和龙、东岗和长白站。二道站位于天池站的北侧，海拔高度为 721 米；长白站位于天池站的南侧，海拔高度为 775 米；东岗站位于天池站的西侧，海拔高度为 774 米；和龙站位于天池站的东北侧，海拔高度为 476 米。与天池站的 2623 米相比，这四个站的海拔高度相对较低。这四个站点中，和天池站距离最近的是位于其北侧的二道站，和天池站的

水平距离只有 27 千米左右，但二者的海拔高度落差为 1900 米左右，说明这两个站点之间存在明显的坡度。

逐月大气环流资料来自欧洲中期数值预报中心的 ERA-Interim 再分析数据 (Berrisford et al., 2009)，所使用的变量包括位势高度、纬向风、经向风和垂直速度。水平空间分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ ，时间为 1979–2016 年。

2.2 方法

为了更好地理解天池站降水变化特征，在本研究中我们将对天池站和吉林省降水变化特征进行比较，以便认识天池站降水变化和吉林省共性的部分以及天池站独有的部分。我们用除天池以外其它 46 个站的平均来代表吉林省降水，并根据线性回归的方法将天池夏季降水分为两部分：与吉林省一致的部分及天池特有的部分，分别简记为 TC_JL、TC_R。首先，将天池降水回归到吉林省降水，得到的回归场作为天池降水与吉林省一致的分量。进一步将天池降水原始场减去回归场，得到的剩余部分即为天池站特有的降水分量。虽然吉林省降水和天池降水之间的关系可能不是严格的线性关系，但为了比较两者之间的异同点，且考虑到本研究中其它分析方法也基本为线性的方法，所以我们采用了这种简单、直观的处理方法。和吉林省一致的分量与吉林省 46 个站的平均降水时间序列之间的相关系数为 1.0，而天池站独有的分量则与上述两个时间序列相关系数为 0。利用回归分析来诊断这两个分量对应的环流异常，从而得到和吉林省降水变化相关的环流以及天池独有降水的环流特征。尽管不可能严格地从物理上将天池夏季降水分为与吉林省一致的部分及其特有的部分，但通过上述简单的数学分离方法，我们可以较好地认识天池夏季降水及其对应环流的独特性。

3 夏季天池降水的气候特征及其与吉林省降水的比较

图 2 给出了吉林省 47 个站 6–8 月的多年平均降水量(图 2a–c)及标准差(图 2d–f), 站点根据经度按自西向东的标准排序, 其中黑色虚线代表除天池外吉林省其它 46 站的平均值, 红色柱代表天池, 在图中位于第 37 个站。从图 2 可以看出天池的平均降水量和标准差明显高于吉林省其余 46 个站, 基本高出吉林省平均一倍左右。并且与天池距离最近的东岗、长白、二道及和龙这 4 个站(在图 2 中的位置为别为第 36、38、40 及 42 站)也和一般站点的情况差不多, 其平均降水量和标准差也明显弱于天池站。以降水量最多的 7 月为例, 天池的平均降水量为 372.2 mm, 而吉林省为 156.7 mm; 天池的降水标准差为 142.2 mm, 而吉林省为 70.2 mm。东岗、长白、二道及和龙这四个站的平均降水量分别为 193.2、157.7、164.9、133.4 mm, 标准差分别为 68.2、56.2、59.7、63.6 mm, 均远小于天池站。

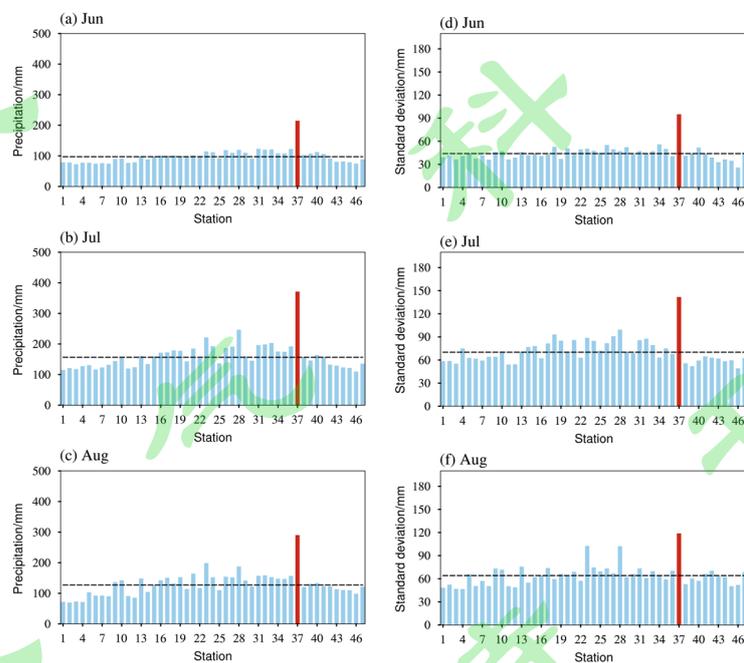


图 2 1979–2016 年吉林省 47 个站降水量的平均值 (a–c) 及年际标准差 (d–f)。黑色虚线为除天池站外吉林省 46 站平均值。红色柱代表天池站。(a)、(d) 6 月; (b)、(e) 7 月; (c)、(f) 8

月

Fig.2 (a–c) Average and (d–f) interannual standard deviation of precipitation of 47 stations in Jilin Province for the period 1979–2016. The dotted black line is the average value of 46 stations in Jilin province except Tianchi station. The red bar represents Tianchi station. (a), (d) June; (b), (e) July; (c), (f) August

将站点自西向东排序后，图 2a–c 显示出平均降水量由东南向东北、西北递减的空间特征，这与前人研究结果一致(张伟等, 2007; 董伟等, 2013; 王丽伟等, 2019)。吉林省西部和东部站点降水量的标准差也弱于中部站点(图 2d–f)，但差异没有降水量明显。天池站以东的若干站点降水量明显偏少，且在 7、8 月更加明显。这可能是由于这些站点位于长白山山脉的北部和东北部，山脉起到了阻止夏季风水汽向北输送的作用。

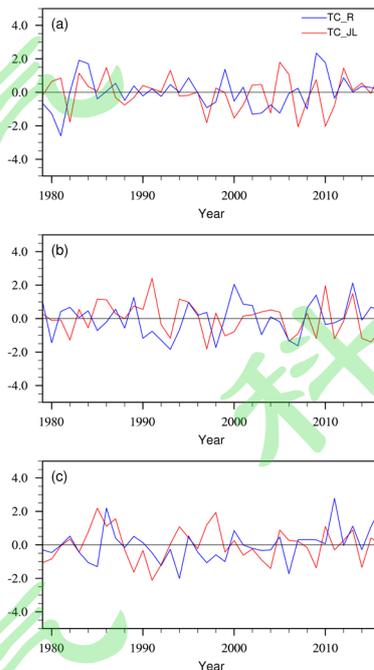


图 3 与吉林省有关的降水（红色）及天池特有的降水（蓝色）标准化时间序列。(a) 6 月；(b) 7 月；(c) 8 月

Fig.3 Standardized time series of precipitation in Tianchi station consistent (red) and inconsistent(blue) with Jilin Province. (a) June; (b) July; (c) August

上述分析结果表明天池夏季降水有着不同于吉林省其它站点的特征，其强度以及年际变率明显大得多，说明天池降水很可能具有和吉林省降水显著不同的变化特征。如 2.2 节中所示，我们根据线性回归的方法将天池降水时间序列进行分

解，用 TC_JL 来代表与吉林省一致的降水分量，TC_R 代表天池特有的降水分量。指数 TC_JL、TC_R 均有显著的年际变化特征，但没有明显的年代际或者长期变化趋势（图 3）。天池降水与 TC_JL 的相关系数在 6、7、8 月分别为 0.60、0.71、0.60，而与 TC_R 则分别为 0.80、0.71、0.80。这意味着天池夏季降水的变率中，相对于 TC_JL 而言，TC_R 解释了更多的降水方差。总体来说，天池降水与吉林省降水有密不可分的关系，但是自身独特的变化更为显著。

我们利用 6、7、8 月各月的指数 TC_JL 和 TC_R 分别回归吉林省降水，得到的结果较为一致，这里只给出 8 月的结果（图 4）。吉林省降水（或指数 TC_JL）对应着出现在整个吉林省的降水正异常（图 4a），且正异常值大于 20 mm 的站点占 94%。天池特有的降水分量（即指数 TC_R）对应的降水正异常仅出现在吉林省东南部（图 4b），最大值出现在天池，为 95.5 mm。除天池外其它站的降水异常量级较小，降水异常值小于等于 20 mm 的站点占 79%。这一结果表明我们的分解基本上是合理的。在下一节中我们将通过讨论指数 TC_JL 和 TC_R 对应的大气环流异常，来比较与吉林省降水相关和与天池特有降水相关的环流特征。

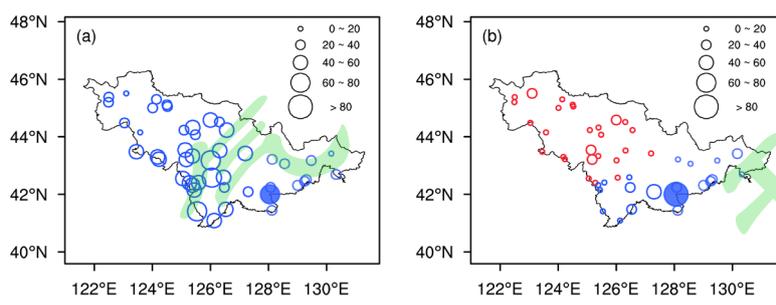


图 4 8 月 TC_JL (a)、TC_R (b) 回归得到的吉林省降水异常场（单位：mm）。蓝色（红色）代表降水量正（负）异常。实心圆代表天池站

Fig.4 Regression of precipitation anomalies in Jilin Province onto the TC_JL index (a) and TC_R index (b) in August (units: mm). The blue (red) represents positive (negative) anomaly. The solid circle represents the Tianchi station

4 吉林省和天池降水对应的大气环流异常

4.1 与吉林省一致的降水分量对应的环流特征

图 5 为 6、7、8 各月吉林省降水或指数 TC_JL 回归的 500 hPa 位势高度异常场。6 月，吉林省降水正异常对应欧亚大陆高纬地区位势高度显著正异常以及东北亚位势高度显著负异常（图 5a）。此外，在北太平洋的西部也存在达到统计信度的位势高度负异常。这些地区的位势高度正、负异常与东北冷涡活动强的夏季对应的位势高度异常（胡开喜等，2011）相似，说明 6 月吉林省降水异常可能与东北冷涡活动有关。7、8 月，吉林省降水对应的位势高度异常（图 5b、5c）和 6 月存在明显的差异。这两个月在西北太平洋均出现显著的位势高度正异常，说明增强的西太副高有助于 7、8 月吉林省降水增加。与 7 月相比，8 月西太副高强度更强且略向东北方向偏移。另外，尽管这两个月东北亚地区存在位势高度负异常，但强度明显减弱，而且没有达到统计信度（7 月）或者仅仅呈现出极小达到信度的区域（8 月）。

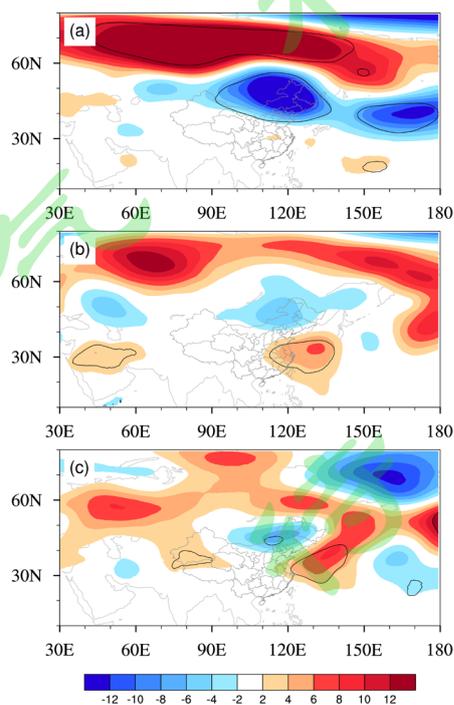


图 5 TC_JL 回归得到的 500 hPa 位势高度异常场（单位：m）。黑色实线代表达到 90% 信度水平。(a) 6 月；(b) 7 月；(c) 8 月

Fig.5 Regression of 500-hPa geopotential height anomalies onto the TC_JL index (units: m). Black solid lines represent the geopotential height anomalies above 90% confidence level. (a) June; (b) July; (c) August

指数 TC_JL 回归的 700 hPa 水平风异常场（图 6）与 500 hPa 位势高度异常场有很好的对应关系。6 月，吉林省降水正异常对应东北上空的气旋式环流异常，该气旋式异常中心位于吉林省西部和黑龙江、内蒙古接壤的地区（图 6a），说明东北冷涡活动的异常在 700 hPa 也有很好的体现。我们进一步分析了 500 hPa 垂直速度异常，结果显示整个吉林省地区呈现上升运动（图略），有利于吉林省降水的发生。7 月，对应 500 hPa 正的位势高度异常，在西北太平洋地区为显著的反气旋异常（图 6b），说明西太副高显著增强。吉林省位于该反气旋异常的北缘，其西北侧的西南风异常将更多的水汽向北输送到吉林省，使吉林省 7 月降水增多。此外，在东北亚地区还有一个气旋式异常，但相对较弱且未能达到统计信度，这也与该地区 500 hPa 位势高度异常的结果吻合。8 月，吉林省降水正异常也对应着增强的西太副高，即位于西北太平洋的反气旋异常（图 6c）。和 7 月相比，该反气旋异常的中心略向东北方向偏移，但吉林省依然处于反气旋异常的北缘。此外，东北亚地区的气旋式异常明显强于 7 月，且达到统计信度，说明 8 月吉林省降水除了受副高的影响之外，还受到东北亚气旋式异常的显著影响，两者共同加强了水汽东北向的输送，有助于吉林省降水异常偏多。

图 7 给出了 6、7、8 各月指数 TC_JL 回归的 200 hPa 纬向风异常分布。6 月与吉林省降水有关的指数 TC_JL 对应着东北亚以及更北的北极地区的三极子分布（图 7a），与对流层中层的位势高度异常（图 5a）以及对流层下层的风场异常

(图 6a) 吻合。特别地，在东亚中纬度地区为显著的西风异常，其位置和东亚高空急流一致，说明 6 月东亚高空西风急流强度偏强时吉林省降水偏多。7、8 月，东亚地区环流异常主要表现为偶极型分布，即北部的西风异常和南部的东风异常 (图 7b、图 7c)。这表明东亚高空西风急流偏北时吉林省降水显著增多，这一点和 6 月的情景不同。

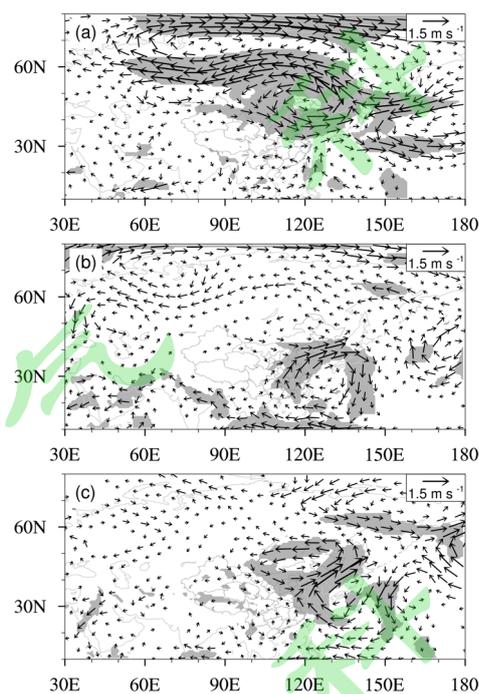


图 6 TC_JL 回归得到的 700 hPa 水平风异常场 (单位: m/s)。阴影区域代表纬向风或经向风异常达到 90% 信度水平; 图仅显示大于 0.2 m/s 的风。(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月

Fig.6 Regression of 700-hPa horizontal wind anomalies onto the TC_JL index (units: m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above 90% confidence level;

Only vectors greater than 0.2 m/s are presented. (a) June; (b) July; (c) August

图 8 为指数 TC_JL 回归的 200 hPa 经向风异常分布。首先，8 月吉林省降水对应的 200 hPa 经向风异常表现出独特的特征，即沿着欧亚大陆中纬度呈现出显著的波列，大致在 40°N 附近，即亚洲高空急流轴的位置 (图 8c)。这一沿急流的波列类似于丝绸之路遥相关波列，但存在 1/4 的位相偏移。一般意义上夏季平

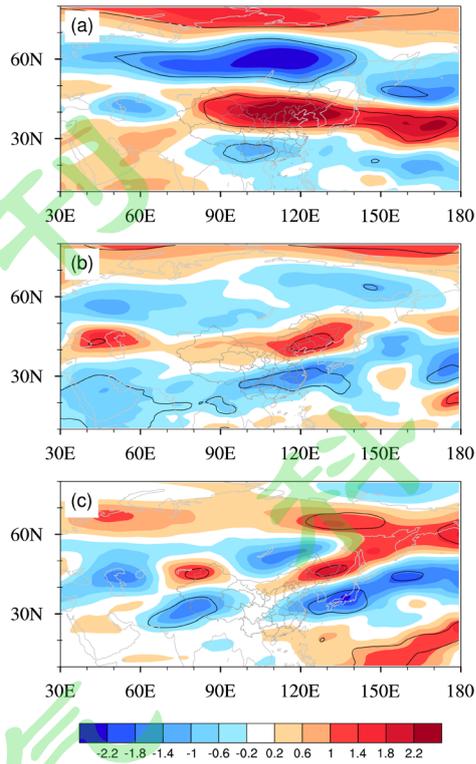


图 7 指数 TC_JL 回归得到的 200 hPa 纬向风异常场 (单位: m/s)。黑色实线代表达到 90% 信度水平。(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月

Fig.7 Regression of 200-hPa zonal wind anomalies onto the TC_JL index (units: m/s). Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level. (a) June; (b) July; (c) August

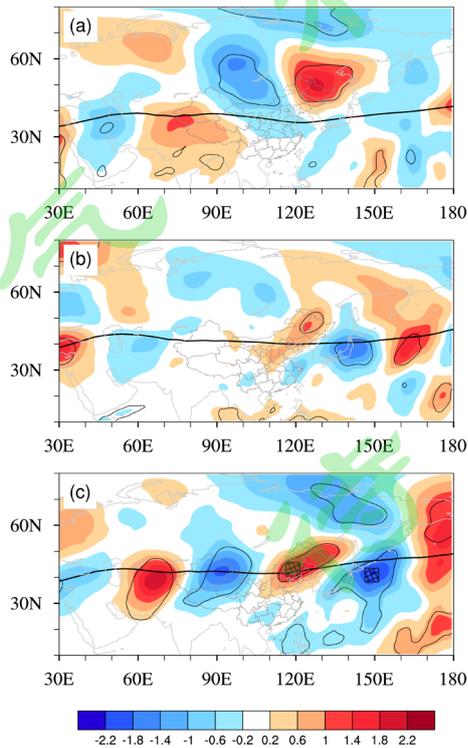


图 8 指数 TC_JL 回归得到的 200 hPa 经向风异常场 (单位: m/s)。黑色实线代表达到 90%信度水平。网格区域为指数 1 的定义范围。粗实线为气候平均的西风急流轴。(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月

Fig.8 Regression of 200-hPa meridional wind anomalies onto the TC_JL index (units: m/s). Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level. The grid areas represent the defining areas for the index 1. The thick solid line shows the axis of climatological mean westerly jet. (a) June; (b) July; (c) August

均的丝绸之路遥相关波列分别在里海、80°E、华北、日本存在异常中心, 8 月的情况也是如此 (Li et al., 2017; Hong et al., 2018), 而 8 月吉林省降水对应的沿急流波列在这些地方均近乎于零。说明 8 月吉林省降水对应的沿急流波列与以往文献报道的丝绸之路遥相关波列具有明显区别。与 8 月不同, 6、7 月则基本看不到类似的波列 (图 8a、图 8b)。此外, 如果将图 8 中经向风异常与图 7 中的纬向风异常结合起来, 可以看到 6 月东北亚地区上空为气旋式异常, 而在 7、8 月东亚地区上空则为反气旋异常。对流层高层的这些异常, 即 6 月的气旋异常以及 7、8 月的反气旋异常均与对流层中、下层环流异常有着很好的对应 (图 5、图 6), 而且呈现出随高度增加略向北偏移的特征。

上述的分析结果可以归纳为: 吉林省夏季降水在各月均对应着显著的大尺度环流异常, 但不同的月份环流异常型存在显著差异。吉林省降水在 6 月偏多时主要对应东北亚气旋式异常和东亚高空西风急流的增强, 而在 7、8 月降水偏多则主要受到西太副高增强和东亚高空急流偏北的影响。此外, 8 月吉林省降水对应的环流异常还表现出独特的性质, 即呈现出类似于东北亚低压偏强时对流层下层显著的气旋式异常以及类似于丝绸之路遥相关的沿着亚洲高空急流的波列。本文的这些结果说明影响吉林省夏季降水的环流异常存在明显的月季差异, 有必要分为不同的月份分别进行研究, 这一点在研究更小区域 (如天池附近) 的降水异常

对应的环流时应更加突出。

4.2 天池特有的降水分量对应的环流特征

图 9 为指数 TC_R 回归的 700 hPa 水平风异常场。6 月天池特有的降水分量对应的环流在天池周边表现为西风异常，但其强度非常弱，基本上都小于 0.5 m/s (图 9a)。尽管在其它地方，如西北太平洋上空，出现了一些达到统计信度的异常，但这些异常无法在物理上解释对天池降水可能产生的影响，在此不做讨论。此外，我们也分析了 500 hPa 位势高度场、200 hPa 风场，发现 6 月天池特有的降水分量对应的对流层中高层大尺度环流在天池周边也十分微弱 (图略)。7 月天池特有的降水对应着西北太平洋反气旋异常以及来自蒙古高原的西风或西北风异常 (图 9b)。这些异常在天池东南面表现为西南风异常，有利于水汽向北输送。而在其西北面为西北风异常，对应较活跃的冷空气活动，这两者都有助于天池周边降水偏多。事实上，我们的分析表明西北风和西南风异常的交汇处存在明显的上升异常 (图略)，说明对流层低层上述西南风异常和西北风异常形成了辐合上升，进而有利于降水。此外，与 7 月吉林省降水对应的对流层中低层西太副高异常相比 (图 6b)，天池特有的降水对应的西北太平洋反气旋异常的范围更大、位置更北。8 月天池特有的降水对应着西北太平洋气旋异常 (图 9c)。该异常在天池以西表现为显著的东北风异常，但在天池周边东北风异常的强度迅速减弱。我们的进一步分析表明天池周边存在上升运动 (图略)，说明天池以西的东北风异常在天池周边形成的气旋式切变环流可能激发出上升运动，并有助于天池降水偏多。这一结果显著区别于吉林省降水在 8 月对应着的西北太平洋反气旋异常，该反气旋异常在天池周边表现为西南风异常 (图 6c)。

7、8 月天池特有的降水分量对应明显的大尺度环流异常，但 6 月环流异常

十分微弱，这说明 7、8 月能够影响天池特有降水分量的天气形势比较集中，并且相互之间吻合程度比较高，但 6 月则有可能是许多类型的天气形势都可以导致天池独有降水，且这些类型相互之间差异比较大，需要将来结合降水过程和天气形势进行分析，在此不做进一步分析。

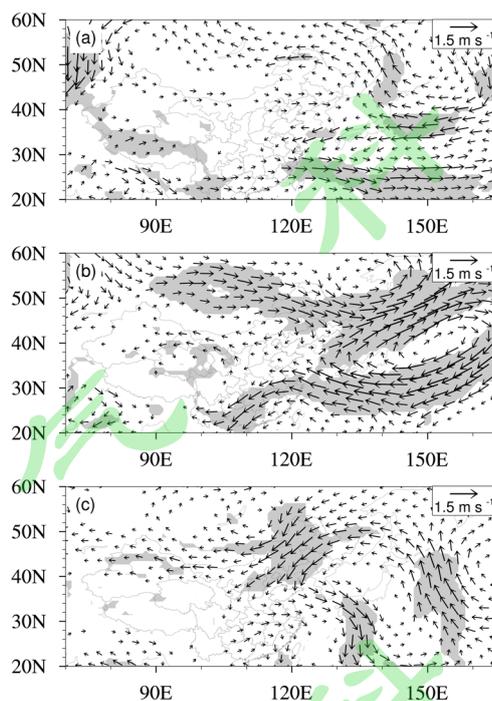


图 9 指数 TC_R 回归得到的 700 hPa 水平风异常场（单位：m/s）。阴影区域代表纬向风或经向风异常达到 90%信度水平。图仅显示大于 0.2 m/s 的风。（a）6 月；（b）7 月；（c）8 月

Fig.9 Regression of 700-hPa horizontal wind anomalies onto the TC_JL index (units: m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above 90% confidence level.

Only vectors greater than 0.2 m/s are presented. (a) June; (b) July; (c) August

图 10 为指数 TC_R 回归的 200hPa 水平风异常场。7 月，天池特有的降水对应着两个反气旋异常，分别位于西北太平洋和我国中西部（图 10a），大致与对流层下层环流异常相对应（图 9b）。位于西北太平洋上空的反气旋环流异常与吉林省降水对应的中心位于朝鲜半岛上空的反气旋异常（图略）相比，位置明显偏西偏南。8 月，天池特有的降水对应着东亚地区上空的气旋异常及其西侧显著的东

北风异常（图 10b），这与对流层下层的环流异常基本一致（图 9c）。

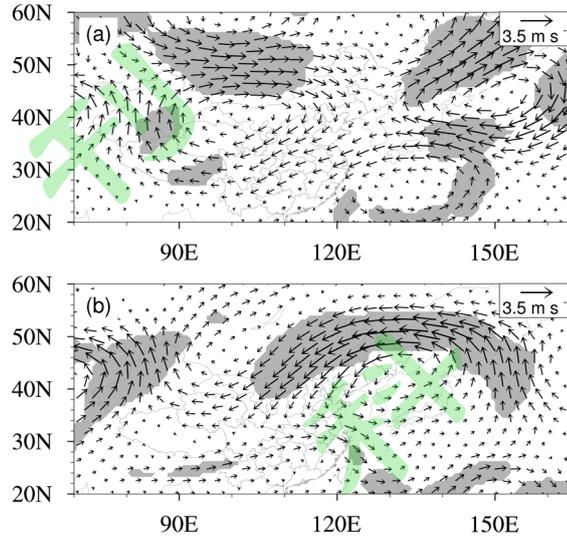


图 10 指数 TC_R 回归得到的 200 hPa 水平风异常场（单位：m/s）。阴影区域代表纬向风或经向风异常达到 90%信度水平。图仅显示大于 0.2 m/s 的风。（a）7 月；（b）8 月

Fig.10 Regression of 200-hPa horizontal wind anomalies onto the TC_R index (units: m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above 90% confidence level. Only vectors greater than 0.2 m/s are presented. (a) July; (b) August

在图 10 中显现的反气旋、气旋异常伴随的经向风异常中心大致都位于 40°N 附近，说明这些异常可能和沿着亚洲急流东传的波列有关。为了验证这一点，图 11 给出了指数 TC_R 回归的 200 hPa 经向风异常分布。7 月天池独特的降水确实对应着沿亚洲急流的波列，但强度较弱，且没有达到统计信度（图 11a）。而 8 月天池特有降水对应着沿着亚洲高空急流轴传播的波列，这一波列在东亚地区西部为北风异常、东部为南风异常，即在东亚上空为气旋式异常（图 10b）。该波列的位相与以往文献中给出的丝绸之路遥相关基本一致，如在里海上空为异常中心（Yasui and Watanabe, 2010; Li et al., 2017; Hong et al., 2018）。此外，如果比较 8 月天池特有降水和吉林省降水对应的 200 hPa 经向风异常场（图 11b 和图 8c），可以发现两个波列近乎反位相，特别是在东亚地区。为了进一步探究 8 月近乎反

位相的波列为何都能够导致天池降水增加，我们首先在图 8c 和图 11b 中分别选取东、西两个经向风异常中心区域，具体为：图 8c 中（40–46 °N, 116–122 °E）、（38–44 °N, 146–152 °E）；图 11b 中（44–48 °N, 114–122 °E）、（42–46 °N, 150–154 °E）。然后将这两个区域平均 200hPa 经向风异常之差分别定义为指数 1 和指数 2。指数 1 代表与吉林省降水有关的经向风分量，指数 2 代表与天池特有降水有关的经向风分量。这里，我们在定义指数时，采用南风异常中心区域减去北风异常中心区域，因此这两个指数均对应降水偏多。

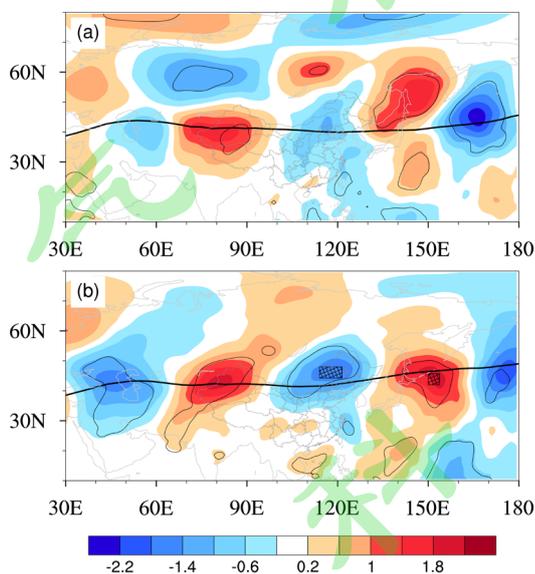


图 11 指数 TC_R 回归得到的 200 hPa 经向风异常场（单位：m/s）。黑色实线代表达到 90%信度水平；网格区域为指数 2 的定义范围。粗实线为气候平均的西风急流轴。（a）7 月；（b）8 月

Fig.11 Regression of 200-hPa meridional wind anomalies onto the TC_R index (units: m/s). Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level. The grid areas represent the defining areas for the index 2. The thick solid line shows the axis of climatological mean westerly jet. (a) July; (b) August

图 12 为指数 1 和指数 2 回归的 8 月吉林省降水异常场。与吉林省降水有关的经向风指数（指数 1）对应着吉林省大部分站点的降水正异常，包括天池站，且大值区集中在吉林省中部（图 12a）。与天池特有降水有关的经向风指数（指数 2）对应着天池等吉林省东部若干站点的降水正异常（图 12b）。其中，天池的降水正异常较强，而其周边的二道、和龙、龙井、延吉站均较小。图 12 的结果表

明东亚对流层上层近乎相反的经向风异常对应基本相反的吉林省站点降水分布，但均对应天池站以及邻近其北部、西北部、东北部站点降水偏多。

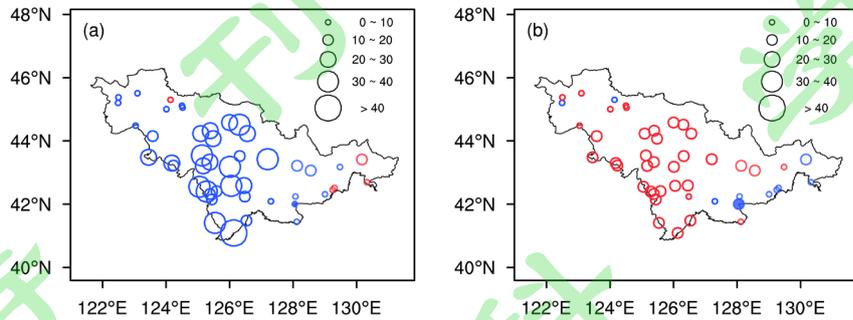


图 12 8 月 (a) 指数 1、(b) 指数 2 回归得到的吉林省降水异常场 (单位: mm)。蓝色 (红色) 代表降水量正 (负) 异常。实心圆代表天池站

Fig.12 Regression of precipitation anomalies in Jilin Province onto the (a) index 1 and (b) index 2 in August (units: mm). The blue (red) represents positive (negative) anomaly. The solid circle represents the Tianchi station

为解释产生上述降水异常水平分布的可能原因，我们给出指数 1 和指数 2 回归的 8 月 700 hPa 水平风异常场 (图 13)。与吉林省降水有关的经向风分量对应着东亚地区的反气旋异常 (图 13a)。与吉林省降水对应的对流层低层风场 (图 6c) 相比，尽管反气旋异常位置略偏北，但在吉林省均表现为西南风异常，有利于降水偏多。与天池特有降水有关的经向风指数 (指数 2) 对应着东亚地区的气旋异常 (图 13b)。与天池特有的降水分量对应的对流层低层风场 (图 9c) 相比，虽然均对应东北风异常，但此时东北风异常在天池周边没有表现出强的切变，因而不能通过气旋式切变环流解释降水偏多。事实上，我们分析了指数 2 对应的 500 hPa 垂直速度异常，发现图 13b 中北风和东北风异常很好地对应异常下沉 (图 14a)，说明确实不能解释降水偏多。

考虑到长白山的地形，我们推测对流层低层东北风异常在长白山的北坡通过爬坡作用形成降水。为此，我们分析了指数 2 对应的 850 hPa 垂直速度异常，发

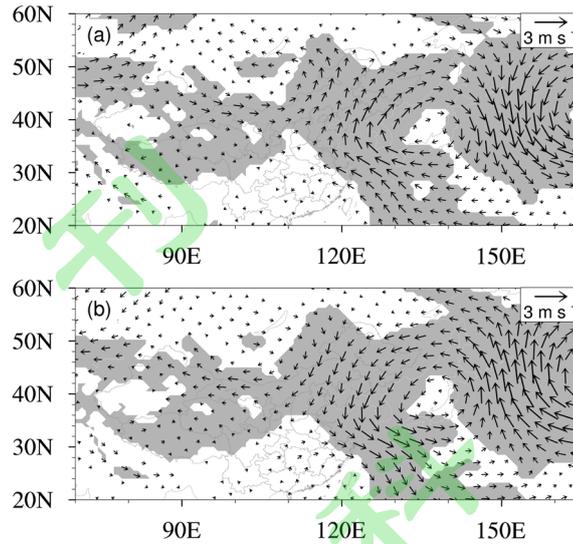


图 13 8 月 (a) 指数 1、(b) 指数 2 回归得到的 700 hPa 水平风异常场 (单位: m/s)。阴影区域代表达到 90% 信度水平。图仅显示大于 0.2 m/s 的风

Fig.13 Regression of 700-hPa horizontal wind anomalies onto the (a) index 1 and (b) index 2 in August (units: m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above 90% confidence level. Only vectors greater than 0.2 m/s are presented

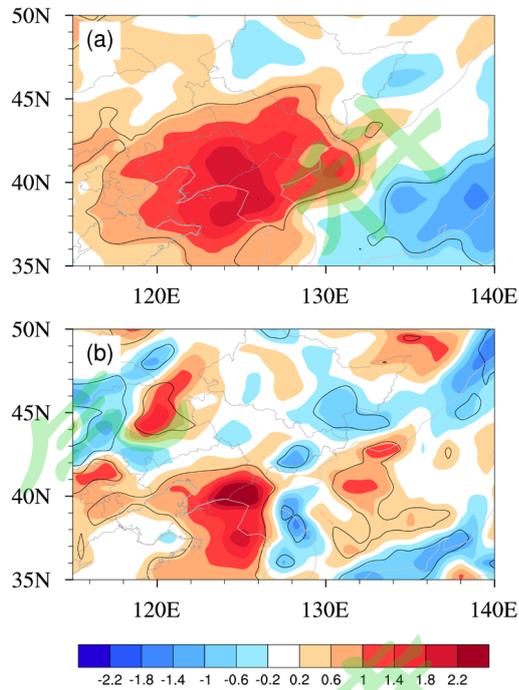


图 14 8 月指数 2 回归得到的 500 hPa (a)、850 hPa (b) 垂直速度异常场 (单位: 100 Pa/s)。黑色实线代表达到 90% 信度水平

Fig.14 Regression of 500-hPa (a) and 850-hPa (b) vertical velocity anomalies onto the index 2 in August (units: 100 Pa/s). Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level

现天池以北大约 100 千米左右的区域出现显著的异常上升（图 14b），说明爬坡抬升作用可以解释降水偏多。结合图 1 中长白山的地形和图 12b 中降水正异常的站点位置，可以发现降水偏多的站点集中在长白山北坡，也说明地形使得东北风异常形成了爬坡抬升作用。本文的结果表明，天池站特有的降水分量主要是大尺度地形对大尺度环流的改变引起的。而前人的研究也指出，天池站地形的动力作用对局地对流性降水的激发并不显著（张伶俐等，2016）。

5 结论与讨论

本文分析了长白山天池观测站 6-8 月各月降水的气候变异特征以及与其相关的环流异常，并对天池降水和吉林省降水之间的异同进行了比较。天池夏季的降水量及年际变率明显大于吉林省其它所有站点，高出吉林省平均一倍左右。我们利用线性回归方法将天池夏季降水分为两部分：与吉林省一致的部分及天池特有的部分。其中，天池独特的降水变化部分解释了超过一半的年际方差。进一步，我们分析了这两个分量对应的环流异常。前一个分量对应的环流异常实际上就是吉林省降水对应的环流异常，因此，我们可以通过比较这两个分量给出天池降水和吉林省降水变异的异同点。

首先，吉林省夏季降水与以往研究结果中揭示的东北地区降水对应的环流特征基本一致。6 月主要受到东北亚气旋式异常和东亚高空西风急流增强的影响，而 7、8 月则主要与西太副高增强和东亚高空西风急流偏北有关。此外，8 月还呈现出类似于东北亚低压偏强的对流层下层气旋式异常以及类似于丝绸之路遥相关的波列。

另一方面，6 月天池特有的降水对应的高低层环流异常均非常弱。7 月，天池降水偏多主要受到西南风异常与西北风异常局地辐合的影响；8 月则受到气旋

式切变引发的辐合的影响。这些环流异常与吉林省降水对应的环流异常显著不同。此外，8月天池特有的降水还对应着类似于丝绸之路遥相关的波列，但该波列和吉林省降水对应的波列在东亚近乎为相反的位相。

为何近乎反位相的波列却均可以引起8月天池降水的增加？我们的研究结果表明，与吉林省一致的降水分量是通过西南风异常增强水汽输送以及上升运动使降水增加。而天池特有的降水分量对应的东北风异常受到长白山地形的影响，在天池及位于长白山北坡的站点通过迎风坡降水引起降水正异常。

近乎相反的环流异常均可以引起天池降水增加，这一结果表明天池降水和环流之间具有多样、复杂的关系。可以推测，其它山地地区的降水异常可能也有类似的情况。目前，山地地区由于条件限制，观测资料远比平原地区稀少。本文的结果说明有必要对长白山等山地地区进行加密观测，以便更准确地掌握气候异常规律并进而更好地服务于山地生态环境保护。特别地，由于长白山地区处于东亚夏季风区的北端，其夏季降水变化对季风、中纬度扰动、地形等均十分敏感，作为这些因素相互作用的焦点，未来无疑值得进一步研究。此外，8月天池和吉林省降水对应的对流层高层波列尽管都类似于以往文献中的丝绸之路遥相关波列，但位相具有明显差别。是丝绸之路遥相关波列具有多样的特征，还是丝绸之路遥相关波列和东亚夏季风相互作用的结果？这些问题有待于进一步探究。

参考文献:

- Amante C, B W Eakins. 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA.
- Berrisford P, Dee D, Fielding K, et al. 2009. The ERA-Interim archive [R]. ECMWF, ERA Report Series 1, 16pp.
- Chen W, LU R Y. 2014. The interannual variation in monthly temperature over Northeast China during summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31(3): 515–524.
- Chen W, Hong X W, LU R Y, et al. 2016. Variation in summer surface air temperature over the northeast Asia and its associated circulation anomalies [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(1): 1–9.
- 陈海山, 陈健康. 2017. 东亚夏季风指数的分类及物理特征分析 [J]. *大气科学学报*, 40(03): 299–309. Chen Haishan, Chen Jiankang. 2017. Classification of East Asian summer monsoon indices and their basic physical features[J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 40(03): 299–309.
- 陈力, 尹云鹤, 赵东升, 等. 2014. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异 [J]. *生态学报*, 34(06): 1568–1574. Chen Li, Yin Yunhe, Zhao Dongsheng, et al. 2014. Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 34(06): 1568–1574.
- 陈列, 高露双, 张赟, 等. 2013. 长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系 [J]. *生态学报*, 33(04): 1285–1291. Chen L, Gao L S, Zhang Y, et al. 2013. Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 33(4) : 1285–1291.
- 程红军. 2012. 吉林省 2012 年夏季气候特点及其环流特征 [J]. *吉林气象*, (03): 34–37. Cheng Hongjun. 2012. Climate characteristics in the summer of 2012 in Jilin Province and its circulation characteristics[J]. *Jilin Meteorology (in Chinese)*,

(03): 34–37.

崔玉琴. 1995. 东北地区上空水汽平衡状况及其源地 [J]. 地理科学, 15(01): 80–87.

Cui Yuqin. 1995. Budget condition of water vapor over northeast China and its source[J]. Scientia Geographica sinica (in Chinese), 15(01): 80–87.

Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. J. Climate, 18(17): 3483–3505.

董伟, 刘海峰, 朱玉祥. 2012. 吉林省夏季极端降水事件特征分析 [J]. 自然灾害学报, 21(04): 69–75. Dong Wei, Liu Haifeng, Zhu Yuxiang. 2012. Characteristic analysis of summer extreme precipitation events in Jilin Province[J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 21(04): 69–75.

董伟, 刘玉芬, 朱丹, 等. 2013. 吉林省夏季降水时空变化特征研究 [J]. 气象科学, 33(02): 229–235. Dong Wei, Liu Yufen, Zhu Dan, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics of summer precipitation in Jilin province[J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 33(02): 229–235.

Du M X, Lin Z D, Lu R Y. 2017. Combined impact of in-phase and out-of-phase variation between the northern East Asian low and western North Pacific subtropical high on East Asian summer rainfall [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 10(4): 284–290.

Fang Y H, Chen H S, Teng F D. 2017. Changing contribution rate of heavy rainfall to the rainy season precipitation in Northeast China and its possible causes [J]. Atmos. Res., 197: 437–445.

韩艳刚, 周旺明, 齐麟, 等. 2019. 长白山树木径向生长对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报, 30(05): 1513–1520. Han Yangang, Zhou Wangming, Qi Lin, et al. 2019. Tree radial growth-climate relationship in Changbai Mountain, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 30(05): 1513–1520.

Hong X W, Lu R Y, Li S L. 2018. Differences in the Silk Road Pattern and its relationship to the North Atlantic Oscillation between early and late summers [J]. J. Climate, 31(22): 9283–9292.

胡开喜, 陆日宇, 王东海. 2011. 东北冷涡及其气候影响 [J]. 大气科学, 35(01):

- 179–191. Hu Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(01): 179–191.
- Huang G, Liu Y, Huang R. 2011. The interannual variability of summer rainfall in the arid and semiarid regions of Northern China and its association with the northern hemisphere circumglobal teleconnection [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(2): 257–268.
- 贾小龙, 王谦谦. 2006. 东北地区汛期降水异常的大气环流特征分析 [J]. *高原气象*, 25(02): 309–318. Jia Xiaolong, Wang Qianqian. 2006. Analyses on general circulation character of precipitation anomaly in Northeast China flood season[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25(02): 309–318.
- Krishnan R, Sugi M. 2001. Baiu rainfall variability and associated monsoon teleconnections [J]. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 79(3): 851–860.
- Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 25(7):1841–1848.
- 刘实, 朱其文. 1996. 1995 年夏季吉林省异常旱涝的影响因子分析 [J]. *吉林气象*, (01): 11–13. Liu Shi, Zhu Qiwen. 1996. Influence factors on flood/drought during the summer of 1995 in Jilin Province[J]. *Jilin Meteorology (in Chinese)*, (01): 11–13.
- Lan M C, Zhang Y C. 2011. Relationship between the East Asian subtropical westerly jet and summer rainfall anomaly in Northeast China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 31(3): 258–265.
- Li C F, Chen W, Hong X W, et al. 2017. Why was the strengthening of rainfall in summer over the Yangtze River valley in 2016 less pronounced than that in 1998 under similar preceding El Niño events? — Role of midlatitude circulation in August [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(11): 1290–1300.
- Liang L Q, Li L J, Liu Q. 2011. Precipitation variability in Northeast China from 1961 to 2008 [J]. *J. Hydrol.*, 404(1–2): 67–76.
- Lin Z D, Wang B. 2016. Northern East Asian low and its impact on the interannual variation of East Asian summer rainfall [J]. *Clim. Dyn.*, 46(1–2): 83–97.

- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A*, 54(1): 44–55.
- Shen B Z, Lin Z D, Lu R Y. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China [J]. *Science China Earth Sciences*, 54(7): 1095–1104.
- 孙妍, 杨紫超, 云天, 等. 2015. 吉林省短时强降雨天气特征及大尺度环境条件 [J]. *气象灾害防御*, 22(02): 9-12, 33. Sun Yan, Yang Zichao, Yun Tian, et al. 2015. Synoptic characteristics of short-time strong precipitation and large scale meteorological conditions in Jilin Province [J]. *Meteorological Disaster Prevention (in Chinese)*, 22(02): 9-12, 33.
- 孙照渤, 曹蓉, 倪东鸿. 2016. 东北夏季降水分型及其大气环流特征 [J]. *大气科学学报*, 39(01): 18–27. Sun Zhaobo, Cao Rong, Ni Donghong. 2016. A classification of summer precipitation patterns over Northeast China and their atmospheric circulation characteristics [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 39(1): 18–27.
- Sun L, Shen B Z, Sui B, et al. 2017. The influences of East Asian monsoon on summer precipitation in Northeast China [J]. *Clim. Dyn.*, 48(5): 1647–1659.
- 王丽伟, 黄晓龙, 冯晓莉, 等. 2019. 2006–2015 年吉林省夏季降水日变化特征 [J]. *中国农学通报*, 35(03): 122–130. Wang Liwei, Huang Xiaolong, Feng Xiaoli, et al. 2019. Diurnal precipitation variation of summer: Jilin 2006–2015 [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese)*, 35(03): 122–130.
- 王晓明, 赵秀海, 高露双, 等. 2013. 长白山北坡沿海拔梯度岳桦径向生长对气候的响应 [J]. *应用与环境生物学报*, 19(06): 929–934. Wang Xiaoming, Zhao Xiuhai, Gao Lushuang, et al. 2013. Climatic response of *Betula ermanii* tree-ring growth along an altitudinal gradient on the northern slope of the Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Environ Biol (in Chinese)*, 19(06): 929–934.
- 王学忠, 孙照渤, 谭言科, 等. 2006. 东北雨季的划分及其特征 [J]. *大气科学学报*, 29(02): 203–208. Wang Xuezhong, Sun Zhaobo, Tan Yanke, et al. 2006.

- Demarcation and features of Northeast China rainy season[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(02): 203–208.
- 袭祝香. 2001. 吉林省 2001 年夏季(6–8 月)的天气特点及影响 [J]. 吉林气象, (04): 19–22. Xi Zhuxiang. 2001. Synoptic characteristics and influence in the summer of 2001 in Jilin Province[J]. Jilin Meteorology (in Chinese), (04): 19–22.
- Xie Z, Bueh C. 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their weather impacts [J]. American Meteorological Society, 143(3): 845–863.
- 杨雪艳, 汪秀清, 张智勇. 2005. 吉林省夏季大暴雨的气候特征及影响系统分析 [J]. 吉林气象, (04): 2–5, 23. Yang Xueyan, Wang Xiuqing, Zhang Zhiyong. 2005. Analysis of climate characteristics and influence systems on summer rainstorm in Jilin Province[J]. Jilin Meteorology (in Chinese), (04): 2–5, 23.
- 于秀晶, 王凤刚. 2005. 吉林省极端降水的变化特征及其与环流异常的关系 [J]. 吉林气象, (04): 6–8, 19. Yu Xiujing, Wang Fenggang. 2005. Variation characteristics of extreme precipitation and its relation to circulation anomaly [J]. Jilin Meteorology (in Chinese), (04): 6–8, 19.
- Yasui S, Watanabe M. 2010. Forcing processes of the summertime circumglobal teleconnection pattern in a dry AGCM [J]. J. Climate., 23(8): 2093–2114.
- 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 2010. 1960–2008 年吉林省降水量的时空演变特征 [J]. 中国农业气象, 31(03): 344–352. Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai, et al. 2010. Spatial temporal precipitation variation over Jilin Province during 1960–2008[J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 31(03): 344–352.
- 张丽. 2002. 吉林省 2002 年夏季天气气候特点及影响 [J]. 吉林气象, (04): 26–28. Zhang Li. 2002. Weather/Climate features and influence in the summer of 2002 in Jilin Province[J]. Jilin Meteorology (in Chinese), (04): 26–28.
- 张丽, 石大明, 刘实. 2007. 吉林省 2005 年夏季降水特点及多雨成因[J]. 吉林气象, (01): 12–15. Zhang Li, Shi Daming, Liu Shi. 2007. Characteristics of precipitation and causes for heavier precipitation in summer of 2005 in Jilin Province[J]. Jilin Meteorology (in Chinese), (01): 12–15.
- 张伶俐, 成坤, 刘娜. 2016. 长白山不同海拔景点气象要素预报方法研究 [J]. 气

- 象灾害防御, 23(4): 25–28. Zhang Lingli, Cheng Kun, Liu Na. 2016. Analysis of meteorological elements prediction method along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains[J]. Meteorological Disaster Prevention (in Chinese), 23(4): 25–28.
- 张伟, 闫敏华, 陈泮勤, 等. 2007. 吉林省农作物生长季降水资源的时空分布特征 [J]. 中国农业气象, 28(04): 359–363. Zhang Wei, Yan Minhua, Chen Panqin, et al. 2007. Characteristics of temporal and spatial distribution of precipitation during crop growing season in Jilin Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 28(04): 359–363.
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布 [J]. 气象学报, 70(05): 1021–1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of the distribution of the large-scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 70(05): 1021–1031.
- Zhao J H, Zhou J, Yang L, et al. 2018. Inter-annual and inter-decadal variability of early- and late-summer precipitation over northeast China and their background circulation [J]. Int. J. Climatol., 38(6): 2880–2888.
- Zhao S X, Sun J H. 2007. Study on cut-off low-pressure systems with floods over Northeast Asia [J]. Meteor. Atmos. Phys., 96(1): 159–180.
- 周志才, 祝贵民, 郭春明, 等. 2003. 吉林省暴雨洪涝灾害的某些成因分析 [J]. 吉林气象, (01): 10–15. Zhou Zhicai, Zhu Guimin, Guo Chunming, et al. 2003. Analysis of causality of rainstorm and flood disaster in Jilin Province[J]. Jilin Meteorology (in Chinese), (01): 10–15.
- 周子建, 江源, 董满宇, 等. 2018. 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应 [J]. 生态学报, 38(13): 4668–4676. Zhou Zijian, Jiang Yuan, Dong Manyu, et al. 2018. Response of the relationship between radial growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 38(13): 4668–4676.

1

2 图 1 吉林省地形（单位：m）及 47 个站点分布图。红色三角形代表天池站

3 Fig.1 Topography (units: m) and spatial distribution of 47 stations in Jilin Province.

4 The red triangle represents the Tianchi station

5

6 图 2 1979–2016 年吉林省 47 个站降水量的平均值（a–c）及年际标准差（d–f）。

7 黑色虚线为除天池站外吉林省 46 站平均值。红色柱代表天池站。（a）、（d）6

8 月；（b）、（e）7 月；（c）、（f）8 月

9 Fig.2 (a–c) Average and (d–f) interannual standard deviation of precipitation of 47

10 stations in Jilin Province for the period 1979–2016. The dotted black line is the

11 average value of 46 stations in Jilin province except Tianchi station. The red bar

12 represents Tianchi station. (a), (d) June; (b), (e) July; (c), (f) August

13

14 图 3 与吉林省有关的降水（红色）及天池特有的降水（蓝色）标准化时间序

15 列。（a）6 月；（b）7 月；（c）8 月

16 Fig.3 Standardized time series of precipitation in Tianchi station consistent (red) and

17 inconsistent(blue) with Jilin Province. (a) June; (b) July; (c) August

18

19 图 4 8 月 TC_JL (a)、TC_R (b) 回归得到的吉林省降水异常场（单位：

20 mm）。蓝色（红色）代表降水量正（负）异常。实心圆代表天池站

21 Fig.4 Regression of precipitation anomalies in Jilin Province onto the TC_JL index (a)

22 and TC_R index (b) in August (units: mm). The blue (red) represents positive

23 (negative) anomaly. The solid circle represents the Tianchi station

24

25 图 5 TC_JL 回归得到的 500 hPa 位势高度异常场（单位：m）。黑色实线表达达

26 到 90%信度水平。（a）6 月；（b）7 月；（c）8 月

27 Fig.5 Regression of 500-hPa geopotential height anomalies onto the TC_JL index

28 (units: m). Black solid lines represent the geopotential height anomalies above 90%

29 confidence level. (a) June; (b) July; (c) August

30

31 图 6 TC_JL 回归得到的 700 hPa 水平风异常场 (单位: m/s)。阴影区域代表纬
32 向风或经向风异常达到 90%信度水平; 图仅显示大于 0.2 m/s 的风。(a) 6 月;
33 (b) 7 月; (c) 8 月

34 Fig.6 Regression of 700-hPa horizontal wind anomalies onto the TC_JL index (units:
35 m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above
36 90% confidence level; Only vectors greater than 0.2 m/s are presented. (a) June; (b)
37 July; (c) August

38
39 图 7 指数 TC_JL 回归得到的 200 hPa 纬向风异常场 (单位: m/s)。黑色实线代
40 表达到 90%信度水平。(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月

41 Fig.7 Regression of 200-hPa zonal wind anomalies onto the TC_JL index (units: m/s).
42 Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level. (a) June; (b)
43 July; (c) August

44
45 图 8 指数 TC_JL 回归得到的 200 hPa 经向风异常场 (单位: m/s)。黑色实线代
46 表达到 90%信度水平。网格区域为指数 1 的定义范围。粗实线为气候平均的西
47 风急流轴。(a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月

48 Fig.8 Regression of 200-hPa meridional wind anomalies onto the TC_JL index (units:
49 m/s). Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level. The grid
50 areas represent the defining areas for the index 1. The thick solid line shows the axis
51 of climatological mean westerly jet. (a) June; (b) July; (c) August

52
53 图 9 指数 TC_R 回归得到的 700 hPa 水平风异常场 (单位: m/s)。阴影区域代
54 表纬向风或经向风异常达到 90%信度水平。图仅显示大于 0.2 m/s 的风。(a) 6
55 月; (b) 7 月; (c) 8 月

56 Fig.9 Regression of 700-hPa horizontal wind anomalies onto the TC_JL index (units:
57 m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above
58 90% confidence level. Only vectors greater than 0.2 m/s are presented. (a) June; (b)
59 July; (c) August

60 图 10 指数 TC_R 回归得到的 200 hPa 水平风异常场（单位：m/s）。阴影区域代
61 表纬向风或经向风异常达到 90%信度水平。图仅显示大于 0.2 m/s 的风。（a）7
62 月；（b）8 月

63 Fig.10 Regression of 200-hPa horizontal wind anomalies onto the TC_R index (units:
64 m/s). The shaded areas represent either the zonal or meridional wind anomalies above
65 90% confidence level. Only vectors greater than 0.2 m/s are presented. (a) July; (b)
66 August

67
68 图 11 指数 TC_R 回归得到的 200 hPa 经向风异常场（单位：m/s）。黑色实线代
69 表达到 90%信度水平；网格区域为指数 2 的定义范围。粗实线为气候平均的西
70 风急流轴。（a）7 月；（b）8 月

71 Fig.11 Regression of 200-hPa meridional wind anomalies onto the TC_R index (units:
72 m/s). Black solid lines represent the anomalies above 90% confidence level. The grid
73 areas represent the defining areas for the index 2. The thick solid line shows the axis
74 of climatological mean westerly jet. (a) July; (b) August

75
76 图 12 8 月（a）指数 1、（b）指数 2 回归得到的吉林省降水异常场（单位：
77 mm）。蓝色（红色）代表降水量正（负）异常。实心圆代表天池站

78 Fig.12 Regression of precipitation anomalies in Jilin Province onto the (a) index 1 and
79 (b) index 2 in August (units: mm). The blue (red) represents positive (negative)
80 anomaly. The solid circle represents the Tianchi station

81
82 图 13 8 月（a）指数 1、（b）指数 2 回归得到的 700 hPa 水平风异常场（单位：
83 m/s）。阴影区域代表达到 90%信度水平。图仅显示大于 0.2 m/s 的风

84 Fig.13 Regression of 700-hPa horizontal wind anomalies onto the (a) index 1 and (b)
85 index 2 in August (units: m/s). The shaded areas represent either the zonal or
86 meridional wind anomalies above 90% confidence level. Only vectors greater than 0.2
87 m/s are presented

88
89 图 14 8 月指数 2 回归得到的 500 hPa（a）、850 hPa（b）垂直速度异常场（单
90 位：100 Pa/s）。黑色实线代表达到 90%信度水平

91 Fig.14 Regression of 500-hPa (a) and 850-hPa (b) vertical velocity anomalies onto the

92 index 2 in August (units: 100 Pa/s). Black solid lines represent the anomalies above
93 90% confidence level

