

东北近 60 年盛夏降水特征及其与 不同类型厄尔尼诺的联系

孟鑫¹, 张瑜², 高松影¹, 徐璐璐¹, 单璐璐¹, 樊希彬¹

(1.辽宁省丹东市气象局, 辽宁 丹东 118000; 2.地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

摘要:为了探讨东北地区盛夏降水的特征及其与不同 ENSO 的联系,利用 1961—2019 年国家气象信息中心整编的东北地区 204 个站日降水资料、NCEP/NCAR 逐月再分析资料和国家气候中心 ENSO 监测结果进行研究分析。结果表明:(1) 盛夏降水 20 世纪 90 年代到 21 世纪初进入枯水期,21 世纪 10 年代降水有所增加。1961—2019 年降水以 5.386 mm/10 a 的速率减少,其主要原因是小雨和中雨减少,且近年来降水减少速率变缓;(2) 空间上,降水整体呈减少趋势。小雨呈减少趋势,辽宁降水减少最显著,50 个站均呈下降趋势,37 个站通过显著性检验。中雨和大雨均呈减少趋势,但不显著。暴雨有超过 60% 的站呈上升趋势,黑龙江以上升趋势为主;(3) 厄尔尼诺次年盛夏,中部型(CP 型)降水量整体多于东部型(EP 型)。EP 型辽宁降水偏多,吉林呈西北—东南降水反相分布,内蒙古降水整体偏多,黑龙江整体偏少,且局部地区显著偏少。CP 型辽宁降水亦偏多,且多于 EP 型,吉林为南北反相分布,黑龙江整体偏多,内蒙古整体偏少,且局部显著偏少。由此可以得出,厄尔尼诺可以作为次年东北地区盛夏降水的一个预测因子。

关键词:东北; 盛夏降水; 东部型 ENSO; 中部型 ENSO

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0170-09

Characteristics of Midsummer Precipitation in Northeast China During the Last 60 Years and Its Relationship with Different Types El Niño Events

MENG Xin¹, ZHANG Yu², GAO Songying¹, XU Lulu¹, SHAN Lulu¹, FAN Xibin¹

(1.Dandong Meteorological Bureau of Liaoning, Dandong, Liaoning 118000, China;

2.State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China)

Abstract:Based on the daily precipitation data at 204 meteorological stations within northeast China from National Meteorological Information Centre, ENSO data from National Climate Centre, and monthly reanalysis data provided by the National Centers for Environmental Prediction and the National Center for Atmospheric Research during 1961—2019, characteristics of midsummer precipitation in northeast China during the last 60 years and its relationship with different types El Niño Events were analyzed. The main results are as follows. (1) The midsummer precipitation was more from 1990s to the beginning of the 21st century, after 2010, an ascending precipitation had been seen. The annual precipitation of midsummer decreased at a rate of 5.386 mm/decade from 1961 to 2019, which was mainly due to the decrease of light rain and moderate rain, but the rate of precipitation reduction had slowed in recent years. (2) The spatial distribution of precipitation trend presented decreasing trend. The spatial distribution of light rain trend experienced decreasing trend, while the decreasing precipitation in Liaoning Province was most significant, all stations (50 stations) showed a certain decreasing trend, among which 37 stations showed a significant decreasing trend. Moreover, a certain decreasing trend of moderate rain and heavy rain were showed, however, they were insignificant. The number of stations that showed an increasing trend about storm rain was comparable to the number of

收稿日期:2021-02-24

修回日期:2021-03-25

资助项目:地理信息工程国家重点实验室自主研究资助课题项目“不同季节条件下大气风场的参数和研究”(SKLGIE2021-ZZ-8)

第一作者:孟鑫(1987—),女,辽宁丹东人,硕士,工程师,主要从事短期气候预测研究。E-mail:mengxin0810@126.com

those that showed a decreasing trend, a certain increasing trend was showed in Heilongjiang Province. (3) In the following midsummer years of two types El Niño events, the regional precipitation in northeast China was both more than that in the normal years, the CP type was more. In the following midsummer of EP El Niño events, there was anomalously more precipitation in Liaoning Province, the precipitation in Jilin Province presented a dipole-type of ‘+ -’ inverse distribution from northwest to southeast, the precipitation in Inner Mongolia Autonomous Region was anomalously more, the precipitation in Heilongjiang Province was anomalously less, there was significantly less precipitation in partial areas of Heilongjiang Province. To CP El Niño events, there was anomalously more precipitation in Liaoning Province, the precipitation in Jilin Province presented a dipole-type of ‘- +’ inverse distribution from north to south, the precipitation in Inner Mongolia Autonomous Region was anomalously less, there was significantly less precipitation in partial areas of Inner Mongolia Autonomous Region, the precipitation in Heilongjiang Province was more than that in the normal years. Therefore, El Niño events can be used as one of predictors for the precipitation of the following midsummer in northeast China.

Keywords: northeast China; midsummer precipitation; Eastern-Pacific ENSO; Central-Pacific ENSO

东北地区地处中高纬,既是我国重要的商品粮和农牧业基地,也是全球气候变化的敏感区。由于地形复杂多样,降水变化特征不尽相同。夏季是东北地区主要的降水季节^[1-2],也是作物主要的生长季节,夏季降水的多少和分布是影响粮食产量的最重要因素之一。围绕东北地区夏季降水及其机理的有关研究已有很多,并取得有益的成果^[3-4]。例如丁婷等^[5]指出东北夏季降水,尤其是盛夏,自 20 世纪 90 年代末发生了显著的年代际减少。王学忠等^[6]指出东北地区雨季降水主要受东亚季风影响。沈柏竹等^[2]分析了东北地区初夏和盛夏降水年际变化的影响因子,指出初夏降水异常主要受冷涡影响,盛夏则以东亚季风影响为主。

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是热带太平洋海-气耦合相互作用的最强年际信号之一,它发生在热带太平洋地区,不仅直接造成热带太平洋地区的天气气候异常,还以遥相关的方式间接影响全球近 3/4 地区^[7-8]。ENSO 对不同地区的影响方式、强度以及稳定性,表现出显著的地区差异^[9],尤其中高纬地区,大气环流对 ENSO 的响应更为复杂^[10]。近 20 a,随着全球气候变化,一种新型厄尔尼诺事件(称为中部型,CP 型)频繁发生^[11-12],这类新型厄尔尼诺事件的海温异常向西移到赤道中太平洋区,与传统厄尔尼诺事件(称为东部型,EP 型)相比,二者在发生、发展机制和对气候影响方面均存在显著差异^[13-14]。研究表明,不同分布型厄尔尼诺对我国各区域降水产生差异^[15-16],例如长江流域夏季降水与 EP 型 ENSO 事件表现出正相关关系,华南夏季降水则与 EP 型 ENSO 事件呈负相关,同时又与 CP 型 ENSO 事件呈负相关关系^[17]。此外,ENSO 对气候的影响还具有一定滞后性^[18-20]。

鉴于目前针对东北地区降水特征研究较少,且专门研究不同类型厄尔尼诺对次年夏季东北地区降水的影响研究甚少,因此亟待利用最新的资料探讨东北地区降水特征及两类厄尔尼诺事件对次年夏季东北地区降水的影响。

1 研究区概况

东北地区(38°—55°N, 117°—135°E)包括辽宁、吉林、黑龙江省和内蒙古自治区东北部。东北地区自北向南跨越寒温带和温带,南北温度差异大。季风气候明显,四季分明,降水主要集中在夏季,冬季寒冷干燥,春、秋两季以大风天气为主,并伴有少量降水。自东南向西北,从湿润区、半湿润区过渡到半干旱区。

2 数据与方法

2.1 数据来源

数据来源于国家气象信息中心整编的 2 400 多个中国国家级地面气象站日降水量数据集,数据时间跨度是 1961—2019 年,共计 59 a,国家气象信息中心对该数据集进行了较为严格的质量控制,在此基础上,本文对现有数据再进行筛选,筛选原则包括:(1) 1961—2019 年都存在的站点;(2) 排除资料不全或缺测日数大于 1% 的站点。根据上面提到的标准进行台站筛选,最后挑出符合条件的 204 个站(图 1)。

美国环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)逐月再分析资料,水平分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直方向 17 个气压层。ENSO 两种类型事件资料来源于国家气候中心 ENSO 检测、分析和预测系统结果(http://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_ensoi_index.php),所选厄尔尼诺两种类型事件次年的年份(表 1)。



图 1 东北地区 204 个站点空间分布

表 1 1961 年以来厄尔尼诺事件次年统计

类型	ENSO 事件	事件次年年份
东部型 (EP)	El Niño	1964, 1966, 1973, 1977, 1980,
		1983, 1988, 1992, 1998, 2007, 2016
中部型 (CP)	El Niño	1970, 1978, 1995, 2003, 2005, 2010, 2019

2.2 研究方法

本文夏季的季节内划分,6 月为初夏,7 月和 8 月为盛夏。气候态采用新一轮的 1981—2010 年的平均值为气候值。逐日降水为 20 时—次日 20 时。根据国家气象局业务标准 (GB/T28592—2012),将降水分为小雨、中雨、大雨和暴雨。降水量级分类如下:小雨 (24 h 内降水量达 0.1~9.9 mm)、中雨 (24 h 内降水量达 10~24.9 mm)、大雨 (24 h 内降水量达 25~49.9 mm)、暴雨 (24 h 内降水量超过 50 mm)。

本文采用线性倾向估计的方法研究降水在时间变化中升降程度,并用 T 检验进行统计检验 (单样本检验);标准差被应用于研究降水的变化波动情况;利用合成分析方法和差值分析方法研究降水距平和大气环流特征,显著性检验采用 T 检验,其中风场采用 F 检验。

3 结果与分析

3.1 东北地区盛夏降水特征

东北地区降水主要集中在夏季^[2],除了存在显著的季节演变特征,还具有明显的次季节变化特征。研究指出^[4,21],东北地区初夏和盛夏的降水相关性较小,即可能对应截然不同的形成机制,沈柏竹等^[2]通过对初夏和盛夏东北地区环流特征的研究已经很好的佐证了这一观点。因此对东北地区夏季降水的研究应该分为初夏和盛夏具有科学意义。据统计,东北地区 7 月和 8 月区域平均降水量分别为 148.11, 123.42 mm,均大于 6 月 (85.46 mm),盛夏降水占夏季总降水的 76% 以上,考虑到东北夏季降水主要集中在盛

夏,因此深入研究盛夏降水的特征,对应对气候变化、防灾减灾具有重要意义。综上所述,本文接下来将对东北地区盛夏降水特征进行研究讨论。

东北地区盛夏多年平均降水量空间分布 (图 2A) 不均匀,呈阶梯状,由东南沿海向西北内陆逐渐减少,极大值中心位于辽宁东南部鸭绿江口附近,总降水量超过 578 mm,水资源丰富,该多雨区的形成有两个原因:一是辽宁的地理位置,南邻渤海和黄海北部,以至于辽宁南部有丰富的水汽;二是盛夏副热带高压北抬,西南暖湿水汽沿副热带高压边缘到达辽宁南部,易形成降水。低值中心在内蒙古,降水量不足 200 mm。东南部的降水量约为西北部的 3 倍,这与廉毅等^[3]研究的结果一致。在不考虑气候变化情况下,降水的分布与东北地区的地理分布有关,长白山山脉的东北—西南走向是引起东南部降水较多原因之一。可见,东北地区盛夏降水分布受到地形和大气环流的共同影响。

由图 2B 可以看出,盛夏降水具有显著的年际波动和年代际振荡,其中降水量最多的年份是 1985 年,达到 405.58 mm,2014 年最少,为 187.81 mm。东北地区盛夏降水受季风影响^[5],夏季季风不稳定,年际差异较大,这可能是盛夏降水年际波动大的原因之一。观察不同年代区域平均降水变化情况 (表 2),近 59 a 降水量出现了两个峰值,分别出现在 20 世纪 60 年代和 80 年代,相比较而言,70 年代和 21 世纪初较少,而近 10 a 降水又略有增多。说明东北地区 20 世纪 90 年代开始到 21 世纪 00 年代初进入枯水期,21 世纪 10 年代降水又表现略微的增加。已有研究指出 70 年代末东亚季风发生跃变而减弱,并一直维持到 21 世纪 00 年代初,此外,西太平洋副热带高压的减弱,及其在北方地区停留时间过短,这可能是引起东北地区盛夏降水在 90 年代之后减少的原因之一。近 59 a 东北地区盛夏降水量呈递减趋势,以 5.386 mm/10 a 的速率减少,通过置信度 95% 的显著性检验。1961—2010 年的变化速率为 -8.81 mm/10 a,通过置信度 90% 的显著性检验,相比较而言,盛夏降水减少速率变缓。为了更深入探讨东北地区盛夏降水量变化情况,对盛夏降水量级分类讨论。由表 3 可见,中雨量最多,小雨量最少,说明中雨对盛夏降水的贡献最大,小雨贡献最少。暴雨的年际变化波动最大,小雨的年际变化波动最小。说明小雨随时间变化更稳定,暴雨则波动剧烈。各等级降水的时间变化 (图 3) 可见,近 59 a 除暴雨外,其他等级降水均呈减少趋势,小雨、中雨和大雨减少速率分别为 1.88, 2.45, 1.88 mm/10 a。其中小雨减少趋势通过置信度 99% 显著性检验,中雨通过置信度 95% 显著性检验。暴雨则

呈弱增加趋势,增加速率为 0.76 mm/10 a,没有通过显著性检验。相比较于 1961—2010 年各等级雨量的变化趋势(小雨—3.93 mm/10 a、中雨—2.69 mm/10 a、大雨—1.68 mm/10 a 和暴雨—0.33 mm/10 a),中雨和大雨变化均不大,但中雨减少速率略降低,大雨则减少速率略加快,暴雨则由下降趋势变成增加趋势,小雨则呈减少速率降低。可见,东北地区盛夏降水减少主要由小雨和中雨显著减少引起,研究指出^[22-24]强度较

小的降水更多地与云的微物理过程有关,主要受气溶胶、大气中水汽含量等影响,改变云的物理特征,可以影响降水。陈东辉等^[25]的研究发现东北地区夏季小雨减少主要是由于东北地区气温增加和气溶胶浓度增加引起,对气溶胶抑制小雨的观点进行了有力的论证。暴雨呈增加趋势,意味着极端降水过程可能强化,对城市防洪排涝设施的考验和挑战加大。降水变缓的主要原因是小雨和中雨降水减少趋势减弱造成。

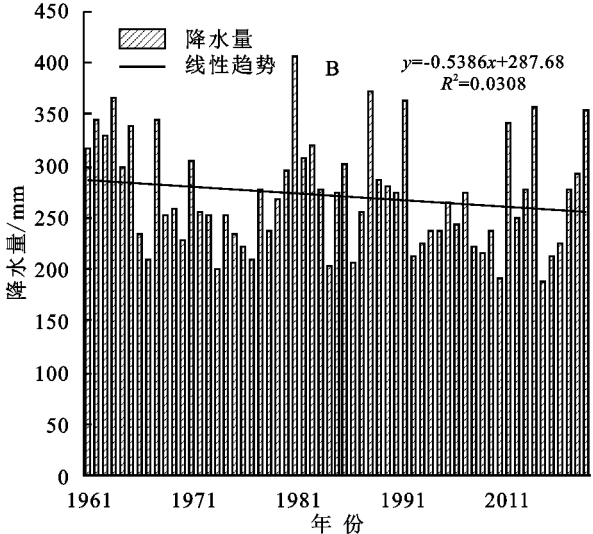
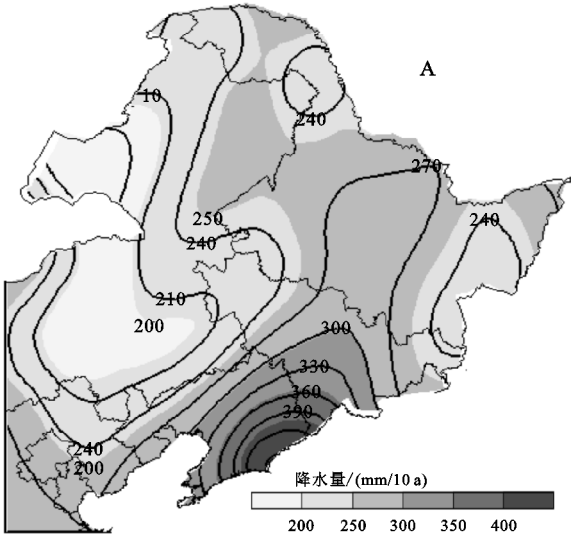


图 2 1961—2019 年东北地区盛夏降水量的空间分布和降水量的时间序列

表 2 东北地区盛夏降水年代际平均值

时间段	1961—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2019 年
降水量/mm	304.15	242.02	287.38	278.20	247.15	270.10

表 3 1961—2019 年东北地区盛夏各等级雨量标准差和平均值

降水等级分类	小雨	中雨	大雨	暴雨
降水标准差	7.177	12.849	17.023	23.751
平均降水量/mm	52.486	82.161	78.232	58.737

从空间尺度可见,1961—2019 年盛夏降水整体呈减少趋势(图 4A),78.43%的站处于下降趋势,其中 32 个站通过置信度 90%及以上显著性检验,降水减少速率大的站集中在内蒙古西部和辽宁,其中,内蒙古西部地区降水减少显著。内蒙古北部、黑龙江北部和东南部部分地区降水有微弱的增加趋势,均不显著。各等级降水变化趋势空间上具有区域差异。观察小雨趋势空间分布(图 4B)发现,204 个站有 191 个站降水呈下降趋势,占比高达 93.63%,其中通过置信度 90%及以上显著性检验的站有 88 个,占下降趋势站总数的比例近 50.00%,即东北地区整体呈显著减少趋势。下降大值中心位于辽宁南部和内蒙古中部,其中辽宁降水减少最显著,50 个站均呈下降趋势,其中 37 个站通过显著性检验,占比达 74.00%。内蒙古紧随其后,46 个站中有 18 个站通过显著性检验,减少

亦显著。中雨则趋势上升的站数略有增多(图 4C),但远少于趋势下降的站数,上升趋势的站主要集中在黑龙江,通过显著性检验的下降趋势站主要分布在辽宁和吉林,但数量略有减少,表明吉林和辽宁降水显著减少。大雨下降趋势的站数和上升趋势的站数差距进一步缩小,上升趋势的站数达 64 个,其中 29 个在黑龙江。黑龙江分别有 47.54%,52.46%的站呈上升趋势和下降趋势。上升趋势显著的站主要集中在黑龙江和内蒙古北部的交界处。下降趋势显著的站主要分布在黑龙江中部和内蒙古中部。辽宁、吉林和内蒙古下降的站仍比上升趋势的站多,但通过置信度 90%及以上显著性检验的站分别为 6,4,11 个,占下降趋势站总数的比例进一步降低,因此降水减少趋势不显著。暴雨下降趋势的站和下降趋势显著的站数在减少,只有不到 40%的站是下降趋势,且下降的站通过 90%及以上显著性检验的仅 8 个。说明下降趋势不显著。暴雨有超过 60%的站是上升趋势,但通过显著性的站仅 11 个,说明东北大部分地区降水呈增加趋势,但不显著。其中黑龙江上升的站比下降的站多一倍,说明黑龙江以上升趋势为主。

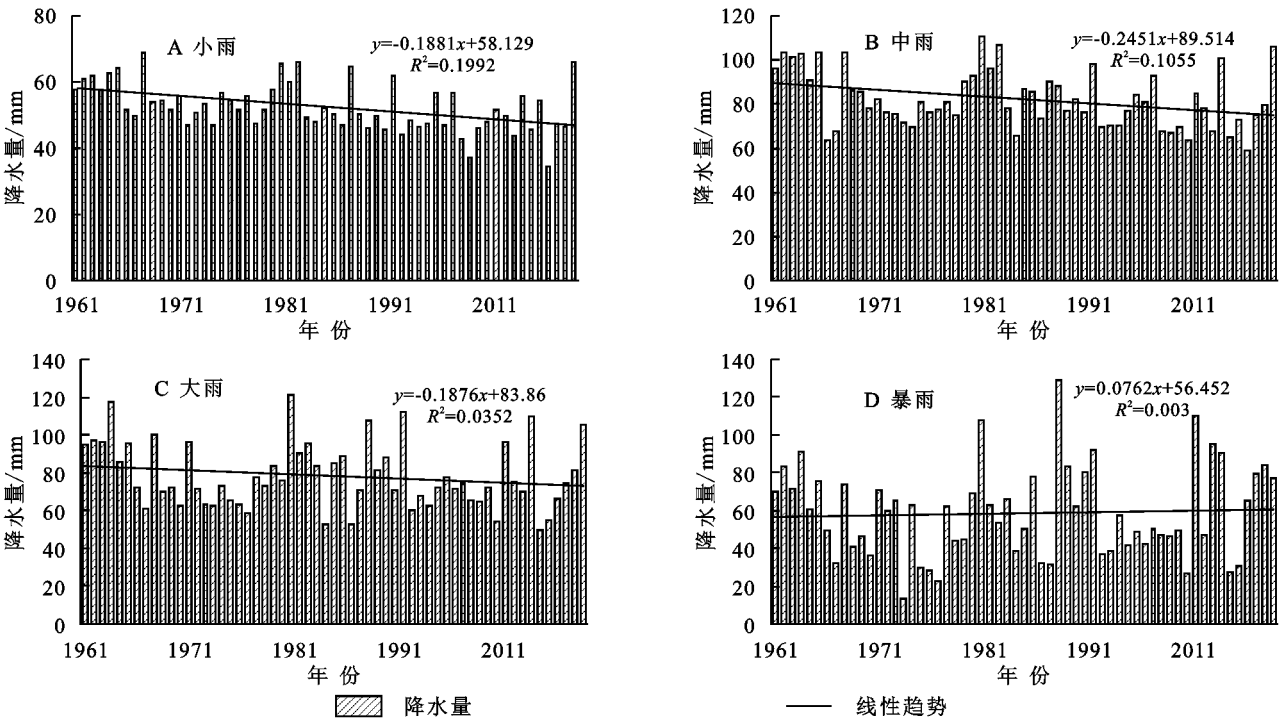


图 3 1961—2019 年东北地区盛夏各等级降水的时间序列

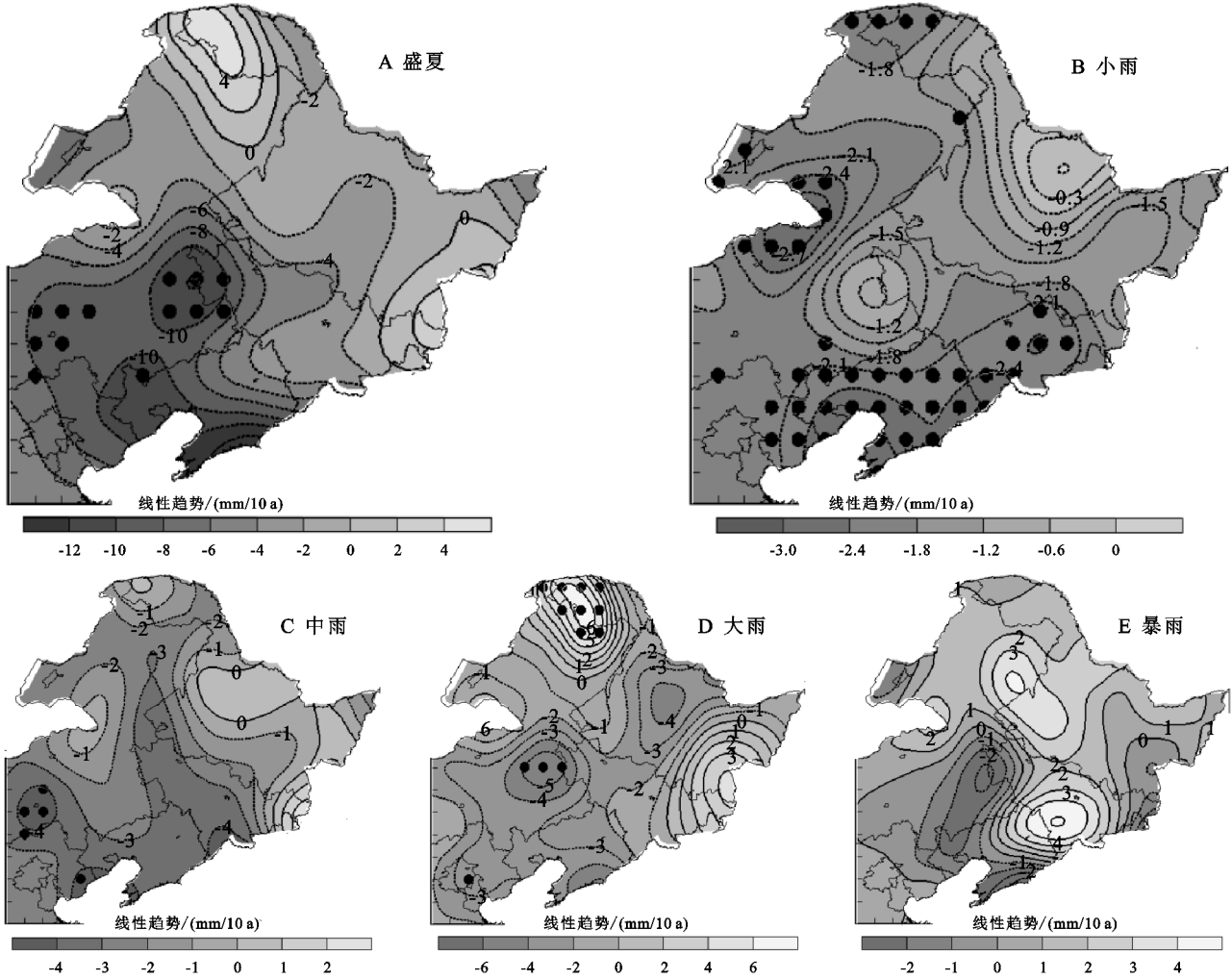


图 4 1961—2019 年东北地区盛夏各等级降水趋势变化系数空间分布

综上所述,东北地区盛夏降水整体呈减少趋势,其中减少最大的区域位于辽宁南部。各等级降水变化趋势空间上具有区域差异。小雨 204 个站有 191 个站降水呈下降趋势,其中通过显著性检验的站有 88 个,即东北地区整体呈显著减少趋势。辽宁降水减少最显著,50 个站均呈下降趋势,其中 37 个站通过 90%及以上显著性检验。内蒙古紧随其后,46 个站中有 18 个站通过 90%及以上显著性检验,减少亦显著。中雨则吉林和辽宁降水显著减少。大雨上升趋势的站数达 64 个,其中 29 个在黑龙江。辽宁、吉林和内蒙古降水减少趋势不显著。暴雨则有超过 60%的站是上升趋势,但不显著。其中黑龙江上升的站比下降的站多一倍,说明黑龙江以上升趋势为主。

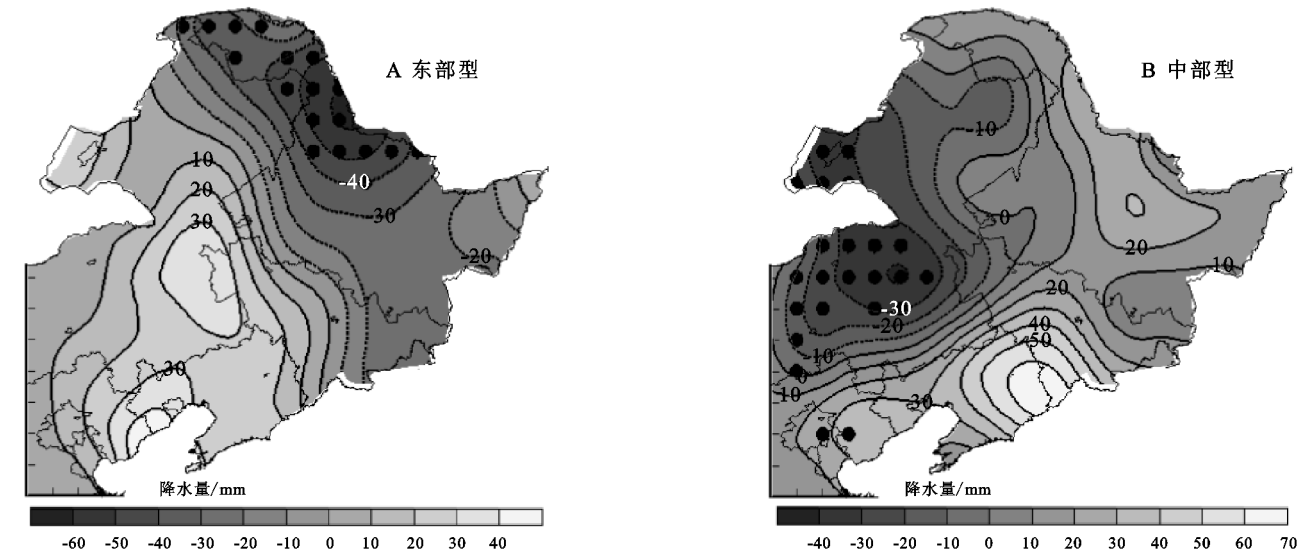
3.2 不同类型 ENSO 事件对次年盛夏东北地区降水的影响

3.2.1 降水量 根据表 1 中的年份,对两种类型厄尔尼诺事件次年盛夏东北地区降水距平场(平均值为气候态平均值)进行合成(图 5)。据统计两类厄尔尼诺次年盛夏东北区域平均降水(270.72 mm)均增加,CP 型区域平均降水量为 287.48 mm,略大于 EP 型(275.61 mm)。EP 型降水距平场呈东西反位相分布(图 5A),从北面大兴安岭一直向南到长白山区域为负距平区,包括黑龙江绝大多数地区,吉林东南部以及内蒙古东北部局部地区。负距平区降水减少呈向东逐渐递增,负距平中心最大值超过 -60 mm,通过置信度 90%及以上显著性检验的站主要集中在黑龙江。正距平主要分布在东北地区的西部,大值中心有两个,两个中心最大值均超过 40 mm,但通过显著性检验的站比较少。据统计,黑龙江 61 个站有 57 个为

负距平,占比超过 93%,其中 15 个站通过置信度 90%及以上显著性检验,说明黑龙江地区整体降水较气候态偏少,局部地区显著偏少。内蒙古和辽宁降水为负距平的站分别是 9,8 个,占内蒙古和辽宁站数的比例均不超过 20%,表明内蒙古和辽宁降水整体偏多。吉林正距平和负距平站数分别为 26,21 个,比较接近。空间尺度上,吉林地区呈西北—东南反相分布,西北部为正距平,东南部为负距平。

CP 型降水距平场大部分地区呈现与 EP 型截然相反的情况(图 5B)。黑龙江大部分地区变为正距平,距平正值中心位于辽宁东南部鸭绿江口附近,中心超过 60 mm,较 EP 型多近一倍。内蒙古变为负距平区,其中内蒙古西部部分地区通过置信度 90%及以上显著性检验。据统计,辽宁仅 6 个站为负距平,占辽宁站总数的比例较低,说明辽宁降水增多,但不显著,偏多值大于 EP 型。吉林则从西北—东南反位相变为南北反位相分布,南部为正距平,北部为负距平,正距平站数多于负距平站数。黑龙江正距平站数为负距平站数的 2 倍还多,说明整体黑龙江降水偏多。内蒙古负距平站数为 33 个,占内蒙古总站数的比为 71.34%,其中通过置信度 90%及以上显著性检验的站数为 11 个,占负距平站比为 33%,说明内蒙古整体降水偏少,且局部地区降水显著偏少。

可见 EP 型厄尔尼诺次年盛夏,辽宁降水偏多,吉林呈西北—东南降水反相分布,西北偏多,东南偏少,内蒙古降水整体偏多,黑龙江整体偏少,且局部地区显著偏少。CP 型则辽宁降水亦偏多,且多于 EP 型,吉林则变为南北反相分布型,南部偏多,北部偏少。黑龙江整体偏多,内蒙古整体偏少,且局部显著偏少。



注:实心点代表通过 90%置信度检验。

图 5 厄尔尼诺事件次年东北地区盛夏降水距平合成分布

3.2.2 大气环流特征 降水变化与大气环流息息相关,大气环流异常为降水事件提供了一个大尺度背景。为了了解不同类型厄尔尼诺事件次年盛夏大气环流特征,采用 NECP/NECR 数据对两类厄尔尼诺事件次年盛夏大气环流做距平(平均值为气候态平均值)合成分析。

由图 6A 可见,EP 型 500 hPa 位势高度场以高纬度鄂霍次克海,中纬度日本岛附近,低纬度台湾和菲律宾附近形成了一个经向“—+—”分布的环流特征,这是负的“P-J”波列,然而正负数值都较小,均不超过 5 gpm,仅日本海附近的负距平区通过置信度 90%及以上显著性检验,说明 P-J 遥相关较弱。此外,我国除东北地区以外,整体为负距平,表明副热带高压偏西,不利于黄海和东海的暖湿气流沿副热带高压边缘到达东北地区产生降水(图略),日本海到日本岛有一个弱的气旋,而在西北太平洋菲律宾附近有一个反气旋,反气旋在北纬 20°以南,这与上面分析的菲律宾附近有一个异常反气旋一

致(图略)。那么 ENSO 是如何与 P-J 关联且影响副热带高压的位置呢? 目前已有研究认为,ENSO 与 P-J 遥相关有密切关系,ENSO 通过电容器充电效应将 ENSO 信号存储,衰减阶段产生“放电”效应,使次年夏天印度洋海温异常增暖,增暖的印度洋能激发出 Kelvin 波传播到西太平洋地区,在菲律宾附近形成异常反气旋,并沿东亚沿岸激发产生 P-J 遥相关,导致副热带高压偏西^[22-24]。对于 CP 型 500 hPa 位势高度场(图 6B)从日本海、朝鲜半岛和东北南部地区以及我国西部地区均为正距平区,日本岛东部海面正距平局部超过 10 gpm,这样的配置说明副热带高压位置偏北偏东。东北北部是一个负距平,有利于东北地区槽加深,促使极地冷空气南下进入东北地区。副热带高压的东退北抬有利于黄海海域和东海海域暖湿气流输送到东北南部地区。此外,东北北部地区有一支偏北气流(图略),到达东北地区的偏北气流和偏南的暖湿水汽在东北南部地区汇合,产生降水。

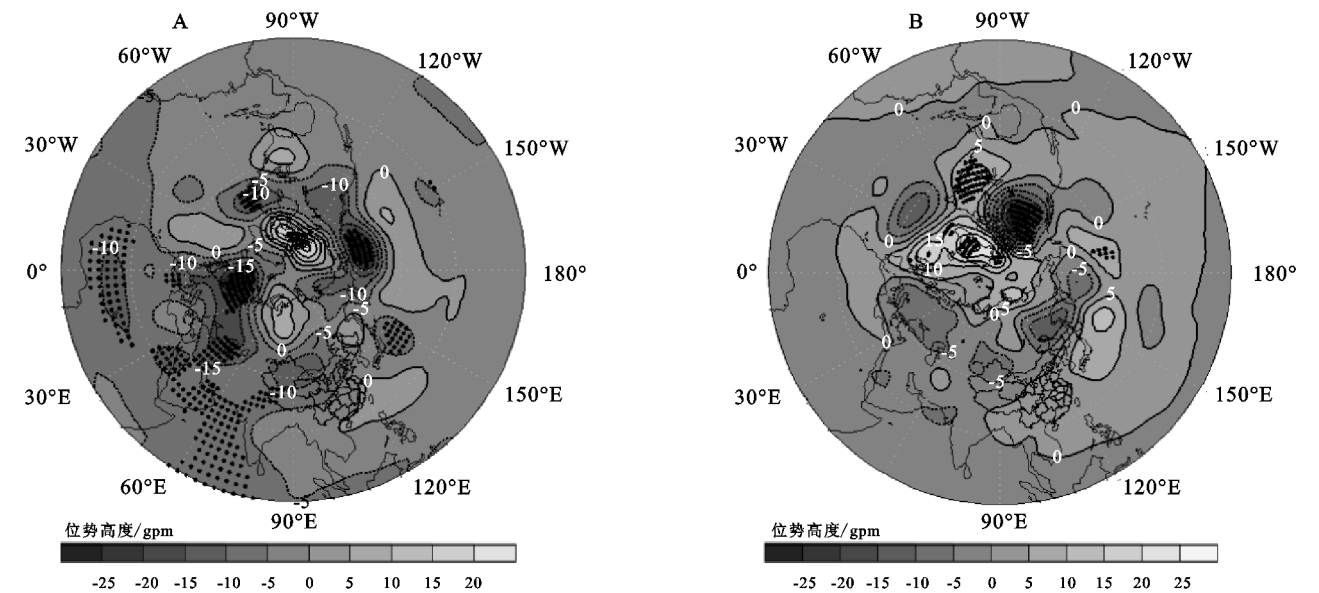


图 6 ENSO 事件次年 500 hPa 高度场距平合成分布

高低层环流辐合辐散对降水产生影响。EP 型厄尔尼诺事件次年盛夏(图 7A)东北地区上空低层西部为负距平,为辐合区,东部为正距平,且大部分地区通过置信度 90%及以上显著性检验,表现为强烈的辐散。高层(图 7C)则表现正好相反,西部为正距平,且部分地区通过显著性检验,说明有强烈的辐散,西部为负距平,说明有辐合。在这样的高低层配置下,东北西部地区为强烈的上升运动,东部地区则为下沉运动(图 7B)。这与图 5A 降水距平分布相对应。很好地解释了为什么西太平洋副热带高压偏西,但东北地区降水增多的区域大,且区域平均降水大于气候态。CP 型低层辐合和辐散(图 7D)与图 5B 的降水距平分

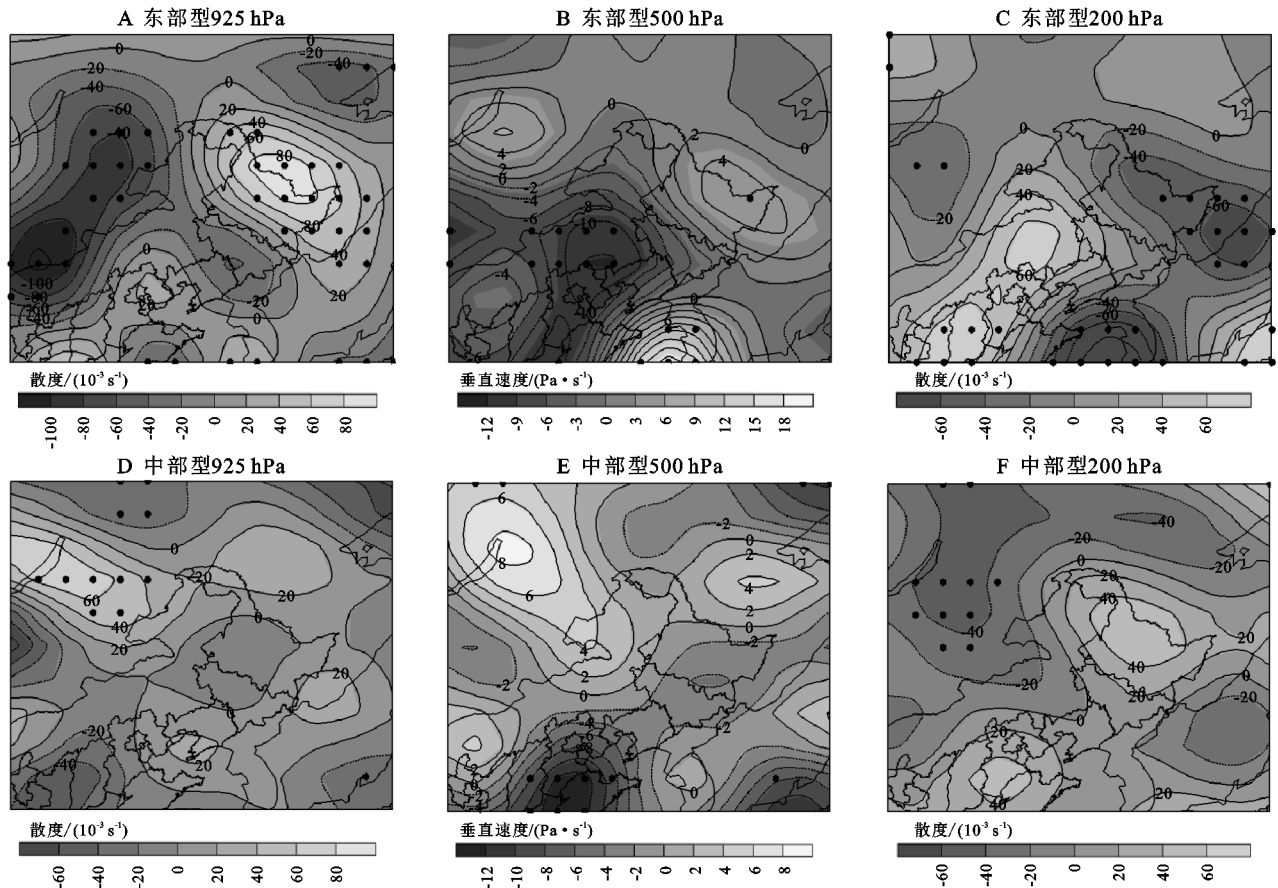
布略有不同,但是高层(图 7F)则呈现除内蒙古西部外,其余地区均为正距平,为辐散区,内蒙古西部为辐合区,这与图 5B 的降水距平分布一致,但是辐合和辐散的程度较 EP 型均弱。另外,除内蒙古局部地区,东北其余地区均为上升运动,内蒙古西部的局部地区为下沉运动(图 7E),且上升和下沉运动强度也均比 EP 型弱。这很好地说明了为什么 CP 型厄尔尼诺次年盛夏虽然副热带高压位置偏北偏东,但是区域平均降水仅比 EP 型略多。

4 结论

(1) 东北地区盛夏降水具有明显的阶段性特征,

20 世纪 90 年代到 21 世纪 00 年代初进入枯水期,21 世纪 10 年代降水又有所增加。1961—2019 年东北地区盛夏降水以 5.386 mm/10 a 的速率减少,小雨、中雨和大雨均呈减少趋势,其中小雨和中雨均通过显著性检验,减少显著,暴雨则呈略微增加趋势。相

比于 1961—2010 年东北地区降水趋势变化,盛夏平均降水量、小雨、中雨和暴雨的气候倾向率值均增大,大雨则呈略微下降。暴雨年际波动剧烈,小雨随时间变化最稳定。中雨对盛夏降水的贡献最大,小雨的贡献最少。



注:实心点代表通过 90%置信度检验。

图 7 不同类型 ENSO 事件次年盛夏 925 hPa 散度,500 hPa 垂直速度和 200 hPa 散度距平合成分布

(2) 空间上,东北地区降水整体呈减少趋势,78.43% 的站处于下降趋势,其中减少最大的区域位于辽宁南部,内蒙古西部降水减少显著。各等级降水的变化趋势在空间上具有区域差异:小雨东北地区 204 个站有 191 个站降水呈下降趋势,其中通过置信度 90%及以上显著性检验的站有 88 个,即东北地区整体呈显著减少趋势。辽宁降水减少最显著,50 个站均呈下降趋势,其中 37 个站通过置信度 90%及以上显著性检验。内蒙古紧随其后,减少亦显著。中雨则吉林和辽宁降水显著减少。大雨上升趋势的站点数达 64 个,其中 29 个在黑龙江地区。辽宁、吉林和内蒙古降水减少趋势均不显著。暴雨则有超过 60% 的站是上升趋势,但不显著,其中黑龙江上升的站比下降的站多一倍,黑龙江以上升趋势为主。

(3) 两类厄尔尼诺事件次年盛夏东北地区降水距平分布大部分地区截然相反。EP 型厄尔尼诺次年

盛夏,降水距平呈东西反相分布。辽宁降水偏多,吉林呈西北—东南降水反相分布,西北偏多,东南偏少,内蒙古降水整体偏多,黑龙江整体偏少,且局部地区显著偏少。CP 型则为南北反相分布,辽宁降水亦偏多,且多于 EP 型,吉林则变为南北反相分布,南部偏多,北部偏少。黑龙江整体偏多,内蒙古整体偏少,且局部显著偏少。考虑到两类厄尔尼诺次年盛夏东北地区降水距平分布大部分截然相反的情况,因此可以利用 ENSO 作为一种预测因子,提前预测东北地区次年盛夏降水情况。EP 型厄尔尼诺事件次年盛夏出现了弱的负 P-J 遥相关,导致西太平洋副高位置偏西,来自西太平洋的暖湿气流输送到东北地区的途径偏西,但强度较强,东北地区西部有强烈的上升运动,高低空有与之相应的强烈的抽吸作,有利于水汽垂直向上输送产生降水,东部则正相反,有强烈的下沉运动,且高低空配置不利于水汽垂直输送,降水减少。

因此形成降水距平东西反相分布。尽管 CP 型厄尔尼诺次年盛夏副热带高压位置偏北偏东,有利于黄淮海域暖湿气流沿副热带高压边缘进入东北地区南部,但东北地区局地上升或下沉运动均不强烈。

参考文献:

- [1] Liang L Q, Li L J, Liu Q. Precipitation variability in North-east China from 1961 to 2008 [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404: 67-76.
- [2] 沈柏竹,林中达,陆日宇,等.影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析[J].*中国科学:地球科学*, 2011, 41(3): 402-412.
- [3] 廉毅,沈柏竹,高枫亭,等.东亚夏季风在中国东北区建立的标准、日期及其主要特征分析[J].*气象学报*, 2003, 61(5): 548-559.
- [4] 孙照渤,曹蓉,倪东鸿.东北夏季水分型及其大气环流特征[J].*大气科学学报*, 2016, 39(1): 18-27.
- [5] 丁婷,陈丽娟,崔大海.东北夏季降水的年代际特征及环流变化[J].*高原气象*, 2015, 34(1): 220-229.
- [6] 王学忠,孙照渤,谭言科,等.东北雨季的划分及其特征[J].*南京气象学院学报*, 2006, 29(2): 203-208.
- [7] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(3): 163-172.
- [8] Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(16): 2205-2231.
- [9] 韩文韬,卫捷,沈新勇.近 50 年中国冬季气温对 ENSO 响应的空间稳定性研究[J].*气候与环境研究*, 2014, 19(1): 97-106.
- [10] 何溪澄,丁一汇,何金海.东亚季风对 ENSO 事件的响应特征[J].*大气科学*, 2008, 32(2): 335-344.
- [11] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 615-632.
- [12] 王磊,张文君,祁莉,等.两类 La Niña 季节演变过程的海气耦合特征对比[J].*海洋学报*, 2014, 36(1): 72-85.
- [13] Zhang W J, Wang Y L, Jin F F, et al. Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(20): 8570-8576.
- [14] 汪子琪,张文君,耿新.两类 ENSO 对中国北方冬季平均气温和极端低温的不同影响[J].*气象学报*, 2017, 75(4): 564-580.
- [15] 王钦,李双林,付建建.两类 ENSO 背景下黑潮及其延伸区海温异常对东北夏季降水的影响:个例对比[J].*热带气象学报*, 2016, 32(1): 73-84.
- [16] 吴萍,丁一汇,柳艳菊.厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究[J].*气象学报*, 2017, 75(3): 371-383.
- [17] Karori M A, Li J P, Jin F F. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over Southeast China [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(13): 4567-4582.
- [18] 李丽平,宋哲,吴楠.3 类厄尔尼诺事件对东亚大气环流及中国东部次年夏季降水的影响[J].*大气科学学报*, 2015, 38(6): 753-765.
- [19] 李欣,王素艳,郑广芬,等.不同分布型 El Niño 事件次年宁夏春季降水的差异[J].*干旱气象*, 2016, 34(2): 290-296.
- [20] 贾艳青,张勃.1960—2017 年中国北方气候干湿变化及其与 ENSO 的关系[J].*地理科学*, 2020, 40(12): 2115-2124.
- [21] 胡泊,申红艳,王晓娟,等.东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水特征及环流型的异同性研究[J].*大气科学*, 2018, 42(1): 109-123.
- [22] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2119-2124.
- [23] Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation [J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1309-1313.
- [24] Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D7). DOI: 10.1029/2008JD011575.
- [25] 陈东辉,佟晓辉,郭刚,等.东北地区夏季不同等级降水变化特征及小雨雨量减少成因分析[J].*气候与环境研究*, 2020, 25(5): 531-542.