

董李丽,李清泉,丁一汇. 2015. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征. 气象, 41(10):1177-1189.

# 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征<sup>\*1</sup>

董李丽<sup>1,2,3</sup> 李清泉<sup>1,2,3</sup> 丁一汇<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

**提 要:** 利用我国台站观测逐日气温资料和美国 NCEP/NCAR 再分析大气环流资料, 通过分析比较我国 1951—1980 和 1981—2010 年两个时段春季气温的季节、月、候时间尺度的气候平均特征, 研究 20 世纪 80 年代以后的春季气温和季节进程的变化特征, 并初步探讨了春季气温变化的可能原因。结果表明: 20 世纪 80 年代以后, 除了西南等地, 全国大部分地区春季增温, 由东北到西南呈现气温“升高—降低”的形势。在春季 3—5 月, 除西南局部地区气温下降外, 全国其余大部分地区气温升高 0~1℃。3—5 月季节进程在江南和西南东部地区加快, 内蒙古和华南南部地区则经历了由快到慢的变化, 东北地区、西南地区南部、西北地区北部春季进程速度减慢。总体来说, 在全球变暖背景下, 我国东部地区春季开始早、结束早, 西部地区春季开始和结束时间变化不明显。与 1951—1980 年相比, 20 世纪 80 年代以后, 春季乌拉尔山地区高压减弱, 东亚大槽减弱, 亚洲中高纬地区纬向环流加强, 西太平洋副热带高压加强, 东亚副热带西风急流明显增强, 因此不利于来自北半球极地和 high 纬地区的冷空气影响我国, 我国大部(特别是东北)地区春季气温偏高。但是, 中东急流偏强, 东亚副热带急流偏南, 有利于欧洲中东部冷空气影响我国西南地区, 导致西南地区气温偏低; 同时, 南支槽偏弱, 不利于印度洋和孟加拉湾的暖湿气流向北影响我国西南地区, 也使得西南地区气温易于偏低。

**关键词:** 全球变暖, 春季气温, 季节进程, 年代际变化

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.001

## Spatial and Temporal Characteristics of Air Temperature over China in Spring Under the Background of Global Warming

DONG Lili<sup>1,2,3</sup> LI Qingquan<sup>1,2,3</sup> DING Yihui<sup>2</sup>

1 Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Centre, Beijing 100081

3 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** The climatological characteristics of seasonal, monthly and pentad mean air temperatures in the springs of 1981—2010 are analyzed and compared with those in the springs of 1951—1980 by using the daily air temperatures from observing stations of China and the monthly NCEP/NCAR atmospheric reanalysis data of the United States. The variation characteristics of air temperature and seasonal process in spring after 1980s are also investigated. The possible causes for temperature change in spring are preliminarily discussed. The results show that except the Southwest China, most regions of China experience warming temperature in spring and the situation of temperature “increase-decrease” is presented from Northeast to

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430202)、国家重大科学研究计划(2012CB955203)、公益性行业(气象)科研专项(GY-HY201306021、GYHY 201406018)、国家自然科学基金项目(41175065)和气象行业标准项目(2200513)共同资助

2015 年 2 月 15 日收稿; 2015 年 5 月 11 日收修定稿

第一作者: 董李丽, 主要从事气候和气候变化研究. Email: ddbdsg@foxmail.com

通信作者: 李清泉, 从事气候诊断与数值模拟研究工作. Email: liqq@cma.gov.cn

Southwest after 1980s. The air temperature rises by  $0-1^{\circ}\text{C}$  in most regions of China except some parts of Southwest China in March, April and May. The seasonal process from March to May speeds up in the region to the south of Yangtze River and the eastern part of Southwest China, while it slows down in north-east China, the southern part of Southwest China and the northern part of Northwest China. The seasonal process in Inner Mongolia and the southern part of South China goes from fast to slow. On the whole, under the background of global warming, the onset and end dates of spring become earlier in East China, while the change is indistinct in West China. Compared with the condition in 1951—1980, the Ural blocking high and East Asian trough have weakened, while the zonal circulation over Asia in the middle and high latitudes, the subtropical high in western Pacific Ocean, and the subtropical westerly jet over East Asia have strengthened since 1980s. Those are disadvantageous to the influence of cold air from polar region and high latitude areas in the Northern Hemisphere on the climate of China. Therefore, temperatures are high over most of China, especially Northeast China in spring. However, the strengthen of the middle east jet and the southward of the East Asian jet are in favor of the cold air from the central-eastern part of Europe influencing Southwest China and resulting in low air temperature there. In the meantime, the weakened southern branch trough goes against the warm and wet flows from the Indian Ocean and Bay of Bengal influencing the Southwest China, which easily results in low temperature in these areas.

**Key words:** global warming, air temperature in spring, seasonal process, interdecadal variation

## 引 言

春季是冬季向夏季的过渡季节,万物复苏、作物开始生长,具有升温快,冷暖空气活动频繁的特点,春季气温的高低直接关系到春耕春播、作物生长发育、作物积温、冰雪消融及病虫害繁殖等,对农业生产及经济发展有着直接的影响(黄斌等,2010),所以研究春季气温变化特征具有十分重要的现实意义(IPCC Working Group I,1992;袁媛等,2014;王遵娅等,2013)。我国东部季风区是指受季风影响显著的大兴安岭以东、内蒙古高原以南、青藏高原东部边缘以东的广大地区,地域跨度大,背靠内陆高原,面向海洋,冬夏季气候差异显著。我国西南地区是世界上地形最为复杂的区域之一,世界上海拔最高、地形最复杂的青藏高原、云贵高原、横断山区和四川盆地构成了该区域大陆地貌的主要特征,使得本区的气候类型,从北热带到高山永冻带,从干旱到湿润,从干暖至冷湿,各型皆备。西北干旱区处于青藏高原北侧的大陆腹地,主要受西风带影响,地处中高纬度,东西跨度长,区域内降水少,气候干旱(黄斌等,2010;孙秀博等,2012;吴贤云等,2015)。我国东部季风气候区、西北干旱和半干旱气候区及西南部青藏高原的不同气候背景,形成了我国区域气候特征及对全球气候变暖区域响应的复杂性和特殊性。

20 世纪 80 年代以后,全球变暖逐渐成为全球性的热门话题(陈隆勋等,1998;王绍武等,1998;龚道溢等,2002;符淙斌等,2003;曾凯等,2011;翟盘茂,2011;李维京等,2015),世界各国的专家学者都对其展开了大量的研究,也引起了各国政府的高度重视。在全球变暖的背景下,我国气温变化与全球气温变化有较好的一致性,也趋于变暖(左洪超等,2004;唐国利等,2005;丁一汇等,2006;2014)。有许多关于地面气温变化的研究,使用不同方法揭露了气候变暖的事实(宋连春,1999;屠其璞等,2000;邓莲堂等,2001;陈文海等,2002;吴志权等,2005;黄嘉佑等,2006;秦大河等,2007),但大多研究主要分析了年平均气温和冬季气温的变化特征。事实上,各个季节之间的气温变化具有不同的特点。刘传凤等(2001)利用我国南方 6 省 45 个站 1951—1995 年 2—4 月的月平均气温资料分析该地区春季低温冷害气候特征,结果表明严重低温冷害最为频繁的地区是江南南部,南方春季低温冷害年际变化有着明显的时段性和群发性。张定全等(2005)利用黄土高原 40 年的气温资料分析了该区域的春季气温变化特征,结果表明黄土高原春季气温变化存在 3 个特征区域,在 1991/1992 年发生突变,突变后气温突然转暖,突变之前气温以负距平为主,突变后以正距平为主,20 世纪 80 年代中期最冷,90 年代后期最暖。沈爱华等(2009)利用 1951—2006 年西南地区春季

4—5 月气温资料研究表明,西南地区春季气温具有明显的年代际气候变化特征。20 世纪 80 年代我国南方春季低温冷害频繁,50 年代次之,60、70 年代较少。陈少勇等(2010)利用我国东部 375 个测站 1961—2006 年地面气温资料研究表明,季风区春季增温显著,近 46 年增温率为  $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;以  $38^{\circ}\text{N}$  为界,气温变化的稳定性是南部高于北部;增温率从南向北增大,增温不显著的区域主要在长江以南。黄斌等(2010)利用 1962—2006 年对我国西北地区和东部季风区春季平均气温资料研究表明,近 45 年来,西北干旱地区和东部季风区春季平均气温以升高趋势为主,西北干旱区春季气温变化年际间振幅大于东部季风区。

对于全球变暖背景下大气环流变化的研究,也有许多研究成果。李崇银等(1999)通过 20 世纪 50 年代和 80 年代大气环流形势异常的对比分析表明,在中国气候年代际变化的不同气候阶段,北半球大气环流也存在明显的差异。据建华等(2003)利用地表气温和 NCEP 资料得出,20 世纪 70 年代以后东亚北部地区冬季气温增暖明显,发生了显著的年代际变化,北极涛动的持续增强可能是重要原因之一。李春晖等(2008)利用 NCEP/NCAR 再分析资料和 743 个台站温度、降水资料研究得出,1976 年前后中国降水异常和温度的年代际变化的原因与四季哈得来环流上升支和下沉支的南北推移、西风急流的增强和位置的南北移动密切相关。申红艳等(2010)利用 NCEP/NCAR 再分析资料和华北地区冬季气温资料研究得出,北半球冬季环流场的年代际变化是造成华北冬季气温年代际异常的根本原因,北极涛动的年代际变化与华北冬季气温异常也有很好的相关性。

上述研究表明,我国春季气温具有明显的年代际变化特征,但是以往的这些研究,大多针对 20 世纪 70 年代初或 90 年代初的冬季和夏季气温以及降水的年代际变化,针对春季的季节平均、月平均、候平均气温的空间分布和时间变化特征及 80 年代前后年代际变化研究很少。本文利用我国 588 个站 1951—2010 年 60 年逐日气温资料,重点研究我国春季气温的季、月、候时间尺度的空间变化和时间推进等特征及 20 世纪 80 年代前后的年代际变化,探讨我国东部季风区、西南地区、西北干旱区春季气温的基本特征及全球变暖背景下气温变化特征,并初步分析其大气环流的背景。

## 1 资料

本文采用了中国气象局国家气象信息中心 1951—2010 年我国 723 站逐日气温资料和美国 NCEP/NCAR 再分析资料,包括位势高度、海平面气压、高低层风、海表面气温场等物理量。

由于 723 站逐日气温资料存在建站时间不同资料长度不统一和缺测等问题,本文在数据分析之前先对资料进行了处理。首先对单个缺测值进行了插值;然后将全年缺测日数大于 30 天的资料算作缺测,将缺测年数大于 8 年的资料算作缺测。由此,全国共选取了 588 个资料质量较高的站点,将各站逐日气温处理成候平均(共包括 73 个日历候)、月平均、季节平均气温资料。

## 2 我国春季气温的时空变化特征

### 2.1 春季全国平均气温的时间变化趋势

我国春季平均气温距平(相对于 1951—2010 年的多年平均值)随时间的变化如图 1 所示,可以看到我国春季平均气温不仅具有明显的年际变化,还存在长期变化趋势。在 60 年(1951—2010 年)时间尺度上,中国春季气温具有显著的上升趋势(显著性水平超过 0.001),大约每 10 年增加  $0.21^{\circ}\text{C}$ (图 1a)。分别计算 1951—1980 和 1981—2010 年两个时段我国春季平均气温的变化趋势,发现 1951—1980 年春季气温的线性趋势非常小,大约每 10 年增加  $0.02^{\circ}\text{C}$ ,不满足显著性检验;而 1981—2010 年具有显著的上升趋势(显著性水平超过 0.001),大约每 10 年增加  $0.46^{\circ}\text{C}$ (图 1b)。由此可见,我国春季平均气温的变化趋势在 20 世纪 80 年代前、后明显不同。

### 2.2 春季平均气温的空间分布特征

从 1981—2010 年春季平均气温分布图(图 2a)可见,东部季风区等温线大致呈纬向分布,略向北凸,气温梯度自南往北,南北方向气温差在  $20^{\circ}\text{C}$  左右。华南南部气温较高,可达  $20^{\circ}\text{C}$  以上;东北北部气温在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,大部分地区平均气温都在  $0^{\circ}\text{C}$  以上;长江流域大部分区域气温为  $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ ;黄河流域大部分区域气温为  $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ ,山西北部、河北北

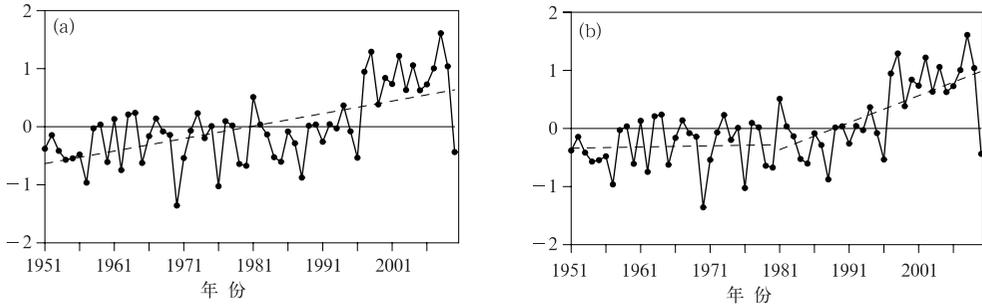


图 1 中国春季平均气温距平时间序列和不同时期的线性趋势(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

(带点曲线表示 1951—2010 年中国春季平均气温距平;图 a 中虚线为

1951—2010 年线性趋势;图 b 中虚线分别为 1951—1980 年和 1981—2010 年线性趋势)

Fig. 1 Time series of air temperature anomalies (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) averaged over China for the spring of 1951–2010 and the linear tendencies of different time periods

(The curves with dots denote the spring mean air temperature anomalies from 1951 to 2010 in Figs. 1a and 1b; the dashed line in Fig. 1a denotes linear tendency of 1951–2010; the dashed lines in Fig. 1b respectively denote linear tendency of 1951–1980 and 1981–2010)

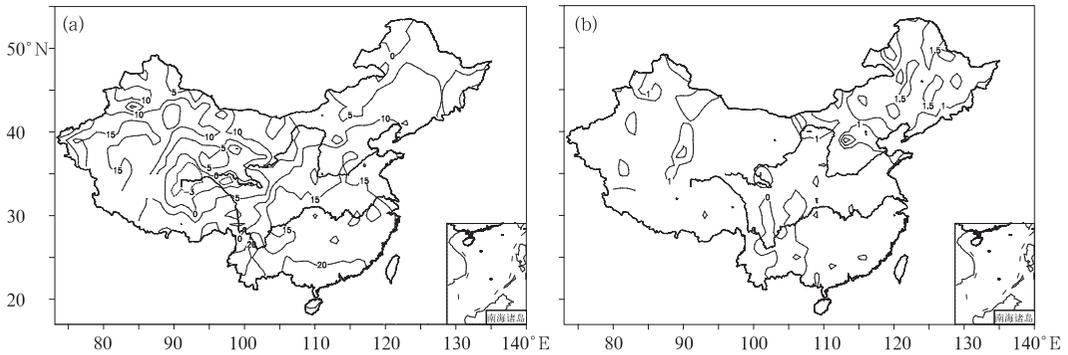


图 2 1981—2010 年春季(3—5 月)平均气温(a)及其与 1951—1980 年春季平均气温的差值(b)的空间分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 Mean air temperatures over China for the springs of 1981–2010 (a) and differences between the spring mean temperatures of 1981–2010 and those of 1951–1980 (b) (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

部以及东北三省和内蒙古东部都在  $10^{\circ}\text{C}$  以下。在西南地区,云南省的南部和中部地区春季气温在  $20^{\circ}\text{C}$  以上,川东、云贵高原大部分区域气温为  $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。西北地区有一个暖中心和一个冷中心,暖中心位于塔里木盆地、吐鲁番盆地附近,最高气温为  $15^{\circ}\text{C}$  以上;冷中心位于青海西部、青藏北部附近,最低气温在  $-3^{\circ}\text{C}$  以下。

为了研究全球变暖背景下春季气温的年代际变化特征,本文比较了 1981 年前、后 30 年的春季平均气温。由春季气温 1981—2010 年与 1951—1980 年平均的差值图(图 2b)可见,20 世纪 80 年代以后,除了西南等地,全国大部分地区春季普遍增温,由东北到西南呈现气温“升高—降低”的形势。东部季风区气温总体上升,其中东北地区大部、华北北部、内蒙古东部和中部部分地区升温  $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ ,局地增温在

$1.5^{\circ}\text{C}$  以上;西北地区北部和中部部分地区增温  $1^{\circ}\text{C}$  以上;而四川中部、重庆、贵州西部、云南东南部、广西西部等地区气温下降  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。这与已有的我国短期气候变化研究结果相吻合(张先恭等,1982; IPCC,1990; Jones et al,1992),即我国气温总体变化趋势和全球变暖同步,南北气温变化趋势有所差异、北部普遍增暖,被认为是北半球增温型的一部分,而在西南某些地区出现变冷趋势。

### 2.3 月平均气温的空间分布特征

为了分析我国春季 3—5 月逐月气温分布特征及年代际变化,图 3 中利用 588 个站的逐月气温资料分别给出了 1981—2010 年我国春季 3—5 月逐月的平均气温分布及其与 1951—1980 年平均气温的差值分布。由图 3a 可见,3 月,我国东部地区气温

呈现南高北低的纬向分布形势,广东、广西以及云南南部气温为  $15\sim 20^{\circ}\text{C}$  左右,内蒙古东部和东北大部地区气温在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,最低气温在  $-6^{\circ}\text{C}$  以下。在我国西部,除新疆北部、青海大部和西藏东北部气温低于  $0^{\circ}\text{C}$  (最低气温在  $-6^{\circ}\text{C}$  以下),其余地区气温均在  $0^{\circ}\text{C}$  以上。4 月(图 3b),全国气温分布形势与春季平均气温分布大体相似,除青海西部和内蒙古东北部局地气温在  $-6\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,其余地区气温在  $0^{\circ}\text{C}$  以上,两个暖中心分别位于新疆南部、华北中部—黄淮及其以南地区,气温为  $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ ,其中华南大部和云南中南部气温达  $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。5 月(图 3c),全国气温普遍在  $0^{\circ}\text{C}$  以上,除内蒙古东北部、东北北部和东部、新疆北部和西部部分地区气温在  $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ ,青海、西藏、西南地区西北部气温在  $0\sim 15^{\circ}\text{C}$  以外,其余大部分地区气温在  $15^{\circ}\text{C}$  以上,其中华南中部和西部、新

疆吐鲁番的气温在  $25^{\circ}\text{C}$  以上。总的来说,3 月气温低于春季平均气温  $5^{\circ}\text{C}$  左右,4 月气温与春季平均气温相当,5 月气温高于春季平均气温  $5^{\circ}\text{C}$  左右。

从 1981—2010 和 1951—1980 年两个时段月平均气温的差值图上可以看出,3 月(图 3d),除四川东部、重庆、贵州、云南东部、广西西部等地区为  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的降温趋势以外,全国大部分地区气温升高  $0\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,其中东北中北部地区、内蒙古东部和中部地区、华北中北部地区、新疆北部、青海西部及青藏中部地区有  $1^{\circ}\text{C}$  以上的显著增温。4 月(图 3e),全国大部分地区气温仍然是偏高,东北、华北、内蒙古东部、新疆局部地区为  $1^{\circ}\text{C}$  以上的显著增温,东北北部、内蒙古北部高值中心达  $1.5^{\circ}\text{C}$  以上;在西南地区,除云南省的西南部升温  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  以外,其余大部分地区气温下降  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。与 3 月相比,4 月东北、内

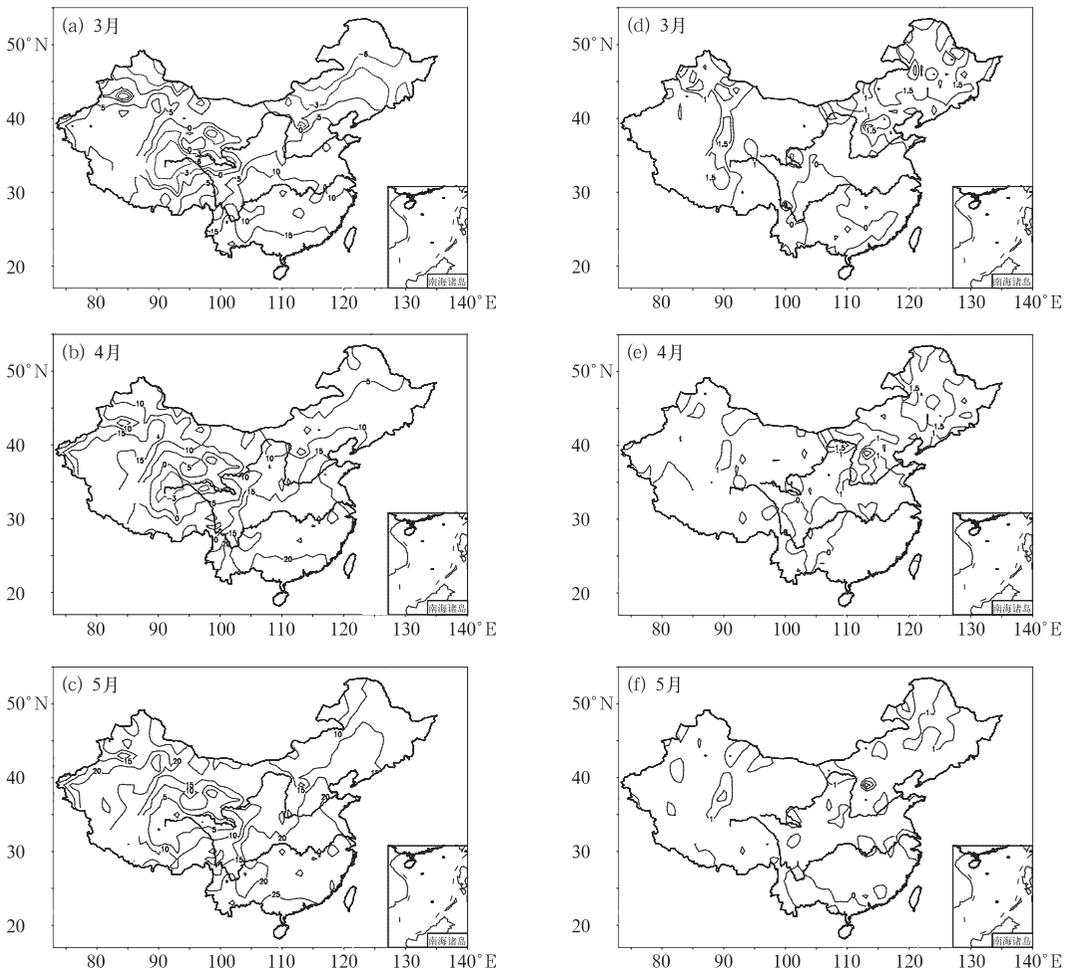


图 3 1981—2010 年 3—5 月月平均气温(a, b, c)及其与 1951—1980 年的差值(d, e, f)(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 3 Monthly average temperatures in March (a), April (b), and May (c) of 1981—2010 and the differences of mean temperatures in March (d), April (e), and May (f) between 1981—2010 and 1951—1980 (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

蒙古东部、西北地区升温的范围减小、强度减弱,西南地区的降温范围减小,华南地区由降温趋势转变为升温趋势。5月(图3f),全国大部分地区都为 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 的升温趋势,没有较强的升温和降温的中心。与3、4月相比,5月东北、华北地区 $1^{\circ}\text{C}$ 以上的升温范围显著减小,并且长江中下游地区出现 $1^{\circ}\text{C}$ 以上的升温趋势,西南地区降温区域减小并南移,西北地区准格尔盆地地区升温的强度减弱。总的来说,3、4、5月除西南局部地区,全国大部分地区都有 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 的升温趋势;3月东北地区、内蒙古东部地区、华北地区和西北地区北部升温程度最为显著,西南地区的降温范围最广;4、5月这些区域的升温程度逐渐减弱,降温地区的范围也逐渐减小南退。

## 2.4 候平均气温的时空变化特征

从前面对我国春季气温季节平均和月平均特征的分析可以看到,我国春季气温的空间分布和时间变化很不均匀,东部和西部、南方和北方特征都有所

不同,下面按不同的区域作进一步分析。

### 2.4.1 东部和西部气温特征比较

为了分析我国春季气温的逐候特征及年代际变化,利用1981—2010年我国588个站逐候平均气温资料,分别计算了我国西部( $75^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )和东部( $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ )地区平均气温的时间-纬度的剖面图及两个时段的差值图(图4)。由图可见,从冬到夏, $21^{\circ}\text{N}$ 以北气温变化比较剧烈,从3候的 $-15^{\circ}\text{C}$ 上升到36候的 $20^{\circ}\text{C}$ ;  $21^{\circ}\text{N}$ 以南气温变化比较平缓,1—36候基本上维持在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 左右。 $27^{\circ}\text{N}$ 以北的大部分地区在15候以前维持在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下。 $23^{\circ}\text{N}$ 以北在24候以前基本上维持在 $10^{\circ}\text{C}$ 以下,30候上升到 $15^{\circ}\text{C}$ ,33候上升到 $20^{\circ}\text{C}$ 以上。 $30^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 附近升温较慢,且在这一区域5月平均温度最低( $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 左右)。

由图4a可见,在我国西部地区,1—2月(1—12候)气温变化较小, $0^{\circ}\text{C}$ 线在 $27^{\circ}\text{N}$ 附近, $23^{\circ}\text{N}$ 以南气温在 $10^{\circ}\text{C}$ 以上, $41^{\circ}\text{N}$ 以北气温在 $-10^{\circ}\text{C}$ 以下。3—

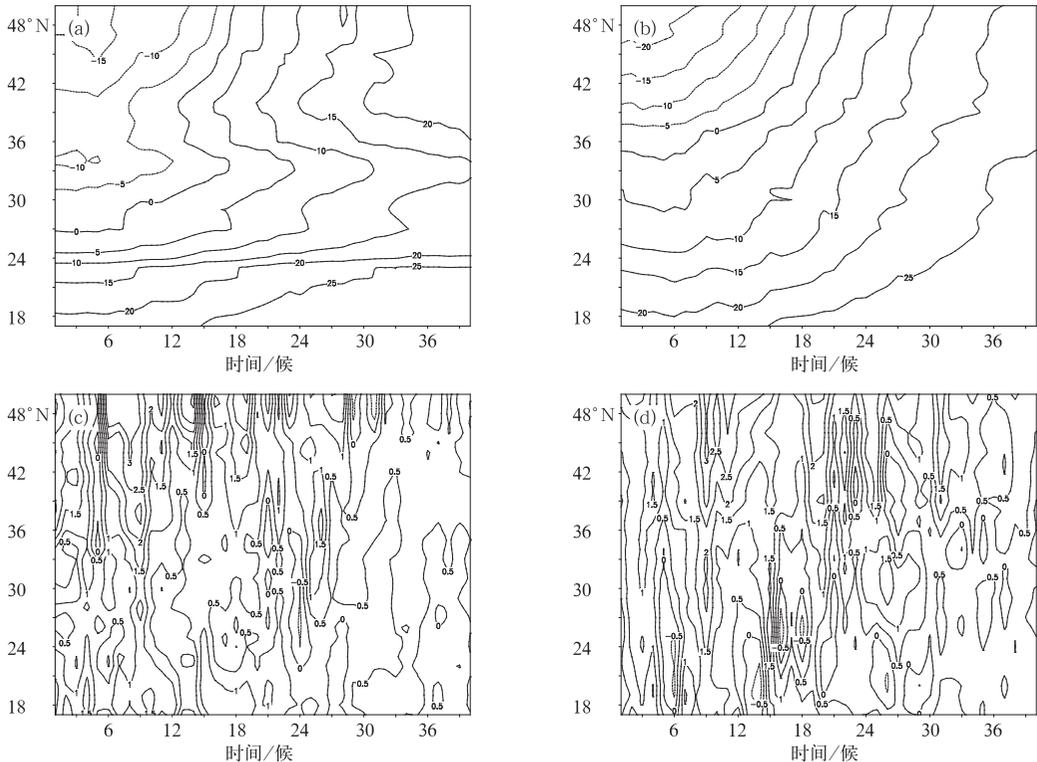


图4 我国西部(a, c,  $75^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )、东部(b, d,  $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ )地区1981—2010年1—40候平均气温时间-纬度剖面(a, b)及其与1951—1980年候平均气温的差值(c, d)(单位: $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 4 Time-latitude sections of pentad mean temperatures (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) over the west (a, c,  $75^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ) and east (b, d,  $110^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ ) parts of China during 1981—2010 and differences between the pentad mean temperatures of 1981—2010 and those of 1951—1980 (c, d)

5 月(13—30 候),气温逐渐上升。23°N 以南升温速度较慢,升温速度是 0.3℃/候左右;23°N 以北升温速度较快,特别是 34°N 以北地区,升温速度为 1.4℃/候左右;相比之下,23°~34°N 升温较慢,速度为 0.8℃/候。

东部地区(图 4b)与西部地区相似,1—2 月变化不大,维持在 -20~20℃,0℃线在 34°~36°N 附近,46°N 以北最低气温在 -20℃ 以下,19°N 以南气温在 20℃ 以上。3—5 月,气温明显上升。23°N 以南,速度为 0.6℃/候,从 15℃ 上升到 25℃ 以上;23°~36°N 的速度为 0.8~1.1℃/候,从 0~10℃ 上升到 20℃ 左右;36°N 以北的速度为 1.4~1.7℃/候,从 0℃ 以下上升到 15℃ 左右。由此可见,纬度越高,升温越快。

1951—1980 年我国东、西部纬向平均气温逐候变化特征(图略)与 1981—2010 年基本相同,但与 1951—1980 年相比较,1981—2010 年整体以气温上升为主,而且北方增温比南方增温明显(图 4c, 4d)。在西部地区(图 4c),3 月至 5 月中旬(13—28 候),36°N 以北气温增加 1.0~2.5℃ 左右;4 月下旬 31°N 以南、5 月下旬 47°N 以北出现 -0.5℃ 左右的降温。在东部地区(图 4d),3—5 月(13—30 候),30°N 以

北气温增加 1.0~2.5℃ 左右,30°N 以南出现 -0.5℃ 左右的降温。

### 2.4.2 南方和北方气温特征比较

利用 1981—2010 年我国 588 个站逐候平均气温资料,分别计算了我国北方(35°~50°N)和南方(17°~35°N)地区平均气温的时间-经度剖面图及两个时段的差值图(图 5)。北方地区(图 5a)在进入第 13 候(3 月第 1 候)以后等温线基本呈纬向分布,90°~97°E、110°~115°E 和 125°~130°E 附近为三个低值区。3—5 月,北方地区气温从 -5℃ 增加到 15℃,平均升温速率为 1.1℃/候。13 候(3 月第 1 候)北方地区气温基本在 -5~0℃;19 候(4 月第 1 候)以后,北方地区气温基本都在 0℃ 以上;30 候(5 月第 6 候)除 90°~97°E 的冷舌区其余地区的气温都在 15~20℃。南方地区(图 5b),95°E 以西气温比 95°E 以东低 10~15℃。在 95°E 以东地区,105°~115°E 有一暖舌区,气温比周边气温高 5~10℃;第 13 候,95°E 以东地区气温已达到 10℃ 以上,而 95°E 以西气温仍然在 0℃ 以下。第 18 候(3 月第 6 候)以后,95°E 以西地区气温都已经达到 0℃ 以上;30 候气温升到 10℃ 左右。在南方地区无论是 95°E 以西、还是以东,3—5 月的升温速率大约都是 0.8℃/候左右。

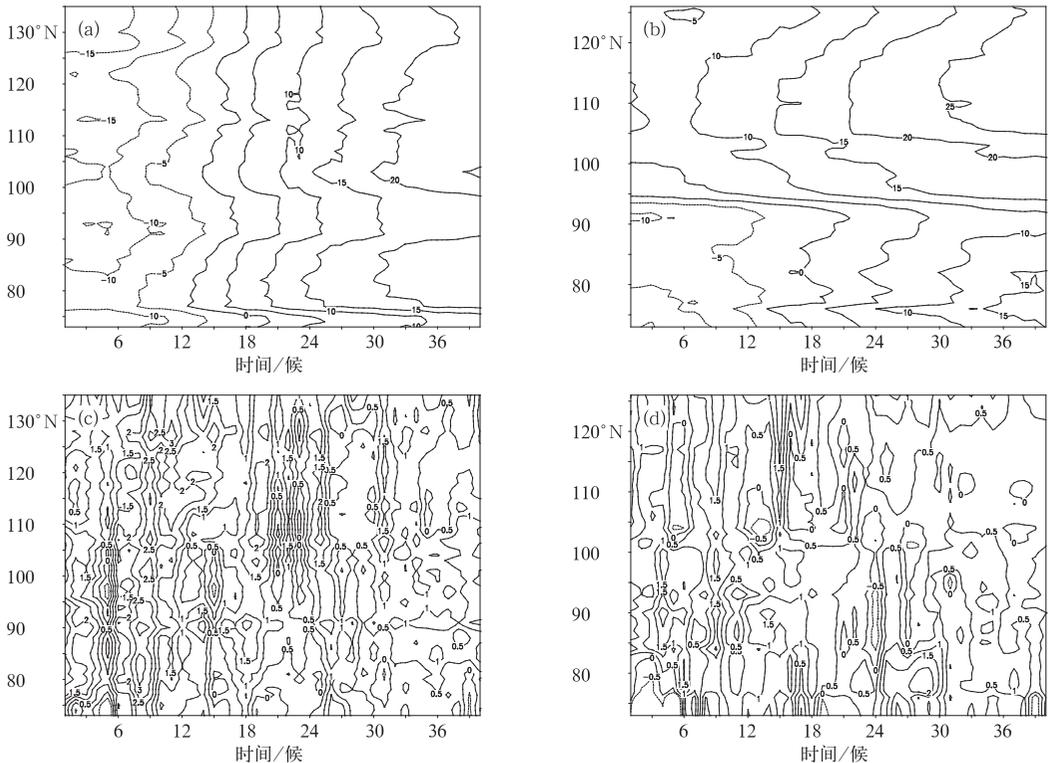


图 5 同图 4, 但为我国北方(a, c, 35°~50°N)和南方(b, d, 17°~35°N)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but over the north (a, c, 35°-50°N) and south (b, d, 17°-35°N) parts of China

从两个时段的差值图中可以看出(图 5c, 5d), 自 20 世纪 80 年代以来, 北方地区(图 5c)春季大都为  $1\sim 2\text{C}$  左右的升温, 其中 13—15 候、18—20 候、25 候在  $105^{\circ}\text{E}$  以东地区为  $2\text{C}$  以上的升温。但是, 第 15 候(3 月第 3 候)  $95^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$  附近地区出现  $-0.5\text{C}$  左右的降温。与北方地区相似, 南方地区春季以升温为主(图 5d); 但是与北方相比, 南方增温强度弱、降温区域大。第 13—21 候(3 月第 1 候至 4 月第 3 候)  $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  出现降温, 其中 3 月上旬  $105^{\circ}\text{E}$  附近降温达到  $-0.5\text{C}$  左右; 第 23—24 候(4 月第 5—6 候)  $85^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$  出现  $-0.5\text{C}$  左右的降温。第 24—30 候(4 月第 6 候至 5 月第 6 候),  $70^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{E}$  附近地区有明显增温, 最大增温达  $2\text{C}$  以上。

综上所述, 与 1951—1980 年相比, 20 世纪 80 年代以后, 在我国西部地区( $110^{\circ}\text{E}$  以西), 春季  $36^{\circ}\text{N}$

以北出现  $1\sim 3\text{C}$  明显升温,  $36^{\circ}\text{N}$  以南出现  $1\text{C}$  左右的降温; 在我国东部地区( $110^{\circ}\text{E}$  以东),  $30^{\circ}\text{N}$  以南气温降低,  $30^{\circ}\text{N}$  以北气温升高。我国北方地区( $35^{\circ}\text{N}$  以北), 春季气温普遍上升  $1\sim 2\text{C}$  左右, 南方地区( $35^{\circ}\text{N}$  以南)春季以升温为主, 但是与北方相比, 南方总体增温强度弱、而且降温区域大。

## 2.5 春季进程

为了进一步分析我国春季气温的逐月推进过程及其年代际变化, 利用我国 588 个站 1981—2010 年逐月平均气温资料计算了 3—5 月气温的月际差以及该月际差在两个时段的差异场(图 6)。从 1981—2010 年的平均情况来看, 3 月与 2 月的气温分布相比(图 6a), 差值等值线呈纬向分布, 全国增温  $2\text{C}$  以上, 黄河流域以及以北地区增温显著, 达到  $5\text{C}$  以上,

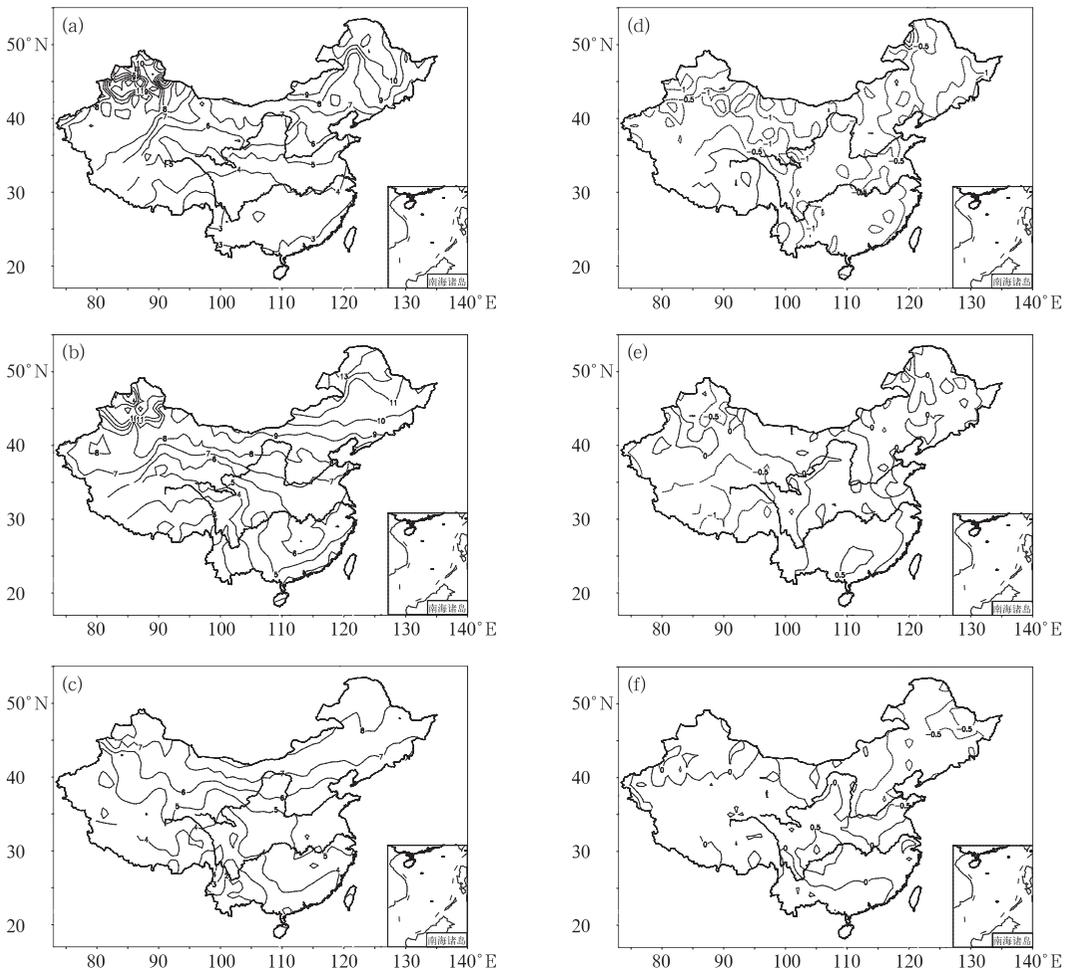


图 6 1981—2010 年我国 3—5 月月平均气温月际差(a, b, c)及其与 1951—1980 年差值(d, e, f)(单位:  $\text{C}$ )  
(a, d) 3—2 月, (b, e) 4—3 月, (c, f) 5—4 月

Fig. 6 Inter-monthly temperature variations from March to May of 1981—2010 (a, b, c) and differences between 1981—2010 and 1951—1980 (d, e, f) (unit:  $\text{C}$ )

(a, d) March minus February, (b, e) April minus March, (c, f) May minus April

其中东北北部、内蒙古东北部、新疆北部地区为大值中心,达到  $10^{\circ}\text{C}$  以上,东南沿海地区和西南局部地区增温  $3^{\circ}\text{C}$  左右。4 月与 3 月相比(图 6b),全国大部分地区增温  $5^{\circ}\text{C}$  以上,黄河流域以及以北地区增温  $7^{\circ}\text{C}$  以上,其中东北北部、内蒙古东北部、新疆北部地区为大值中心,达到  $12^{\circ}\text{C}$  以上。东部季风区等值线向南凸,说明在北方大幅增温的同时,长江流域和华南部分地区也开始小幅增温,南方地区增温  $3\sim 6^{\circ}\text{C}$  左右。5 月与 4 月相比(图 6c),增温变缓,全国大部分地区增温  $3^{\circ}\text{C}$  以上,东部地区等值线仍向南凸,南方地区增温  $3^{\circ}\text{C}$  以上,北方地区普遍增温  $6^{\circ}\text{C}$  以上,其中东北北部、内蒙古东北部、新疆北部地区的增温的大值中心强度减弱,为  $8^{\circ}\text{C}$  以上。从 3—5 月的逐月变化趋势可以看出,3、4 月北方地区增温最为显著,但南北温差仍然较大,4 月以后,南方地区逐渐增温,5 月南北温差显著减小。

从 2—3 月气温季节增量在 1981—2010 年与 1951—1980 年的差异场中可以看出(图 6d),除内蒙古北部的局部地区、云南西部地区 and 青藏局部地区初春 2—3 月气温增量有  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的正偏差以外,其余大部分地区为  $0\sim 2^{\circ}\text{C}$  的负偏差,显著负偏差中心在东北地区东部、内蒙古地区西部和新疆地区北部,达到  $1^{\circ}\text{C}$  以上,说明 20 世纪 80 年代以后,内蒙古北部的局部地区、云南西部地区 and 青藏局部地区在 2—3 月的季节进程加快,而我国大部分地区尤其是东北地区东部、内蒙古地区西部和新疆地区北部 2—3 月的季节进程变慢。从 3—4 月的气温的季节增量在 1981—2010 年与 1951—1980 年的差值场中可以看出(图 6e),华南地区、江南大部地区、江汉地区、内蒙古西部地区和江淮北部有  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的正偏差,我国东部沿海地区、东北大部、西北地区、西南大部地区,3—4 月气温增量在 1980 年后有  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的负偏差,说明在 20 世纪 80 年代以后,华南地区、江南大部地区、江汉地区、内蒙古西部和江淮北部地区 3—4 月的季节进程加快,东部沿海地区、东北地区、西北地区、西南大部地区 3—4 月的季节进程减慢。3—4 月的月平均气温形势与 2—3 月相反,华南、江南、江汉、内蒙古西部和江淮北部等地区的负偏差形势转变为正偏差,说明在 20 世纪 80 年代以后,这些地区 2—4 月的季节进程经历了由减慢到加快的过程,而东北地区、西北地区、西南地区的正偏差形势转变为负偏差形势,说明这些区域经历了由加快到减慢的过程。从 4—5 月的气温的季节增量在

1981—2010 年与 1951—1980 年的差值场中可以看出(图 6f),正偏差区大致呈纬向带状分布,从江南地区到西南地区东部和北部及青藏地区、西北地区西南部有  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的正偏差,而在东北地区、内蒙古东部地区、华北地区、西北地区北部、华南地区、西南地区南部有  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的负偏差,说明在 20 世纪 80 年代以后,从江南地区到西南地区东部和北部及青藏地区、西北地区西南部 4—5 月的季节进程加快,东北地区、内蒙古东部地区、华北地区、西北地区北部、华南地区、西南地区南部 4—5 月的季节进程减慢。与 3—4 月相比,4—5 月我国  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$  的正偏差加强且范围扩大,尤其是西南地区东北部,而内蒙古地区、华南南部地区的正偏差转变为  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$  的负偏差,东北地区的负偏差更加明显,说明在 20 世纪 80 年代以后,3—5 月的季节进程在江南地区、西南地区东部加快,而在内蒙古地区、华南南部地区经历了由加快到减慢的过程,在东北地区、西南地区南部、西北地区北部减慢。图 6 中月际变化在 1981—2010 年与 1951—1980 年的差值场可以很好地反映我国气温月际变化和季节进程的年代际变化。

为了进一步分析我国春季气温的逐候推进过程的年代际变化,图 7 给出了利用我国 588 个站的逐候气温资料计算的 1951—1980 年平均和 1981—2010 年平均  $10^{\circ}\text{C}$  和  $22^{\circ}\text{C}$  等温线的逐候推进图。参考陈峪等(2012)的季节划分标准,即春季为日平均气温或滑动平均气温大于或等于  $10^{\circ}\text{C}$  且小于  $22^{\circ}\text{C}$ , 本文通过考察  $10^{\circ}\text{C}$  和  $22^{\circ}\text{C}$  候平均气温等值线的进退,分析春季的季节进程,即从 3—5 月,把  $10^{\circ}\text{C}$  作为春季开始(冬季结束), $22^{\circ}\text{C}$  作为春季结束(夏季开始)。

由图 7 可见,总体来讲,在我国东部地区( $110^{\circ}\text{E}$  以东), $10^{\circ}\text{C}$  等温线由南往北推进。20 世纪 80 年代以后,13 候(3 月第 1 候) $10^{\circ}\text{C}$  等温线在长江以南地区,16 候(3 月第 4 候)在江淮地区,22 候(4 月第 4 候)在  $40^{\circ}\text{N}$  附近,25 候(5 月第 1 候)已经到黑龙江北部和内蒙古东南部地区;但 80 年代以前,13 候(3 月第 1 候)和 16 候(3 月第 4 候)以前的  $10^{\circ}\text{C}$  等温线位置与 80 年代以后相同,22 候(4 月第 4 候) $10^{\circ}\text{C}$  等温线在  $35^{\circ}\text{N}$  附近,25 候(5 月第 1 候)到黑龙江南部和内蒙古中东部和东南部地区。在我国西部地区( $110^{\circ}\text{E}$  以东),80 年代前、后  $10^{\circ}\text{C}$  等温线的位置变化不大。在西北地区, $10^{\circ}\text{C}$  线最早于 16 候(3 月第 4 候)左右出现在新疆南部( $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$  附近)地区,之

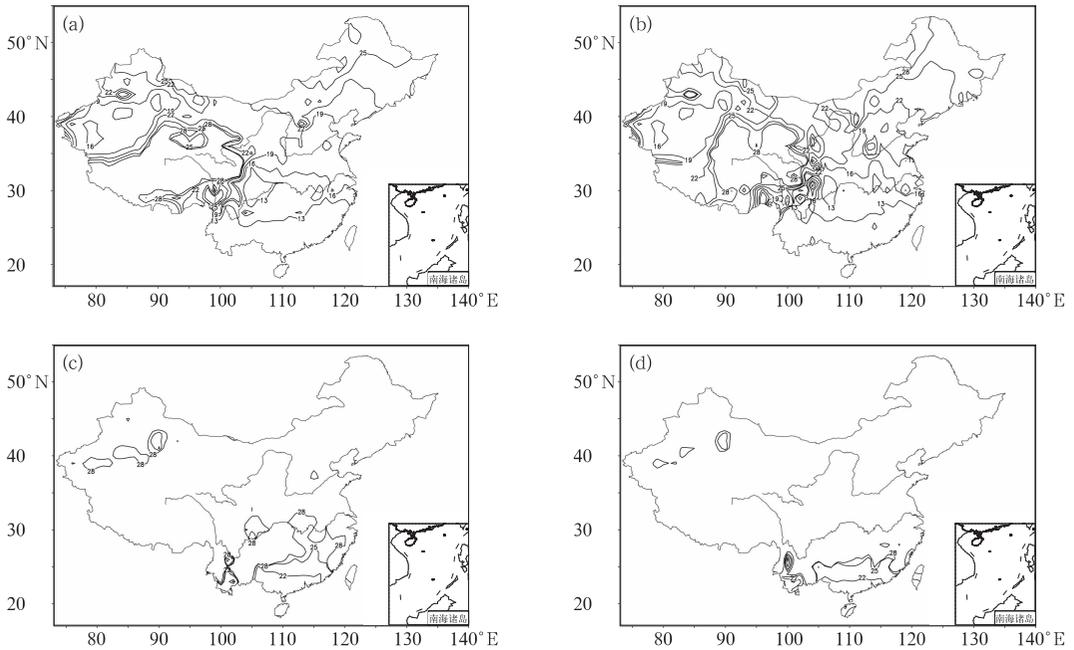


图 7 1981—2010 年(a, c)和 1951—1980 年(b, d)我国春季(13—30 候)候平均气温 10°C(a, b)、22°C(c, d)等温线分布(单位:候)

Fig. 7 Distribution of pentad average 10°C (a, b) and 22°C isotherm (c, d) in the spring of 1981—2010 (a, c) and 1951—1980 (b, d) (unit: pentad)

后向四周扩展,25 候(5 月第 1 候)左右,除了青海南部,西北地区大部分地区气温都达到 10°C;在西南地区,13 候(3 月第 1 候)10°C 等温线主要位于云南、贵州南部、四川东部和重庆,这些地区的春季最先开始。

20 世纪 80 年代以后,在我国东部地区,22 候(4 月第 4 候)以后才出现 22°C 等温线,位于华南北部,以后往北推进,25 候(5 月第 1 候)到达江南北部,28 候(5 月第 4 候)达到江汉地区;在我国西部,25 候(5 月第 1 候)出现在新疆中部和云南,28 候(5 月第 4 候)出现在新疆中部和西南部、云南、四川中北部。而 80 年代以前,在我国东部地区,22°C 等温线 22 候(4 月第 4 候)在华南南部,25 候(5 月第 1 候)到达江南南部,28 候(5 月第 4 候)维持在江南南部;在我国西部,22°C 等温线 25 候(5 月第 1 候)出现在新疆中部和云南,28 候(5 月第 4 候)出现在新疆中部和西南部、云南。

上述分析表明,在全球变暖背景下,我国东部地区春季开始早、结束早,西部地区春季开始和结束时间变化不明显。我国东部地区春季开始早、结束早可能与东亚冬季风的变化有关。丁一汇等(2014)的研究表明东亚冬季风明显受到全球气候变化的影响,东亚冬季风从 1950 年到 1986/1987 年明显偏

强,从 1986/1987 年冬季开始东亚冬季风减弱,大约 2005 年之后东亚冬季风开始由弱转强。

### 3 我国春季气温年代际变化大气环流背景的分析

从 1981—2010 年春季平均 500 hPa 位势高度场(图 8a)可以看出,在亚洲中高纬度地区,巴尔喀什湖以东(40°N、80°E 附近)有一个高压脊,东亚大槽位于鄂霍次克海附近(40°N 以北、140°~160°E),20°~30°N、80°E 附近为南支槽,西太平洋副热带高压位于 10°~20°N 的大范围地区,脊线位置在 15°N 附近,副热带高压中心值为 5880 gpm,位于菲律宾岛以东。在 1951—1980 年春季平均 500 hPa 位势高度场(图略),亚洲中高纬的主要大气环流系统(如槽、脊位置等)与 1981—2010 年的情况相似。但是从 1981—2010 年与 1951—1980 年 500 hPa 位势高度差值场(图 8b)可以看到,亚洲中高纬度高度场呈西低—东高、北低—南高型分布,70°N 以北的高纬度地区为负值区;50°N、40°~70°E 附近为负值区,说明乌拉尔山地区高压减弱;鄂霍次克海附近(50°N、140°~180°E)为正高度值,表明鄂霍次克海地区位势高度偏高,东亚大槽减弱,亚洲中高纬地区

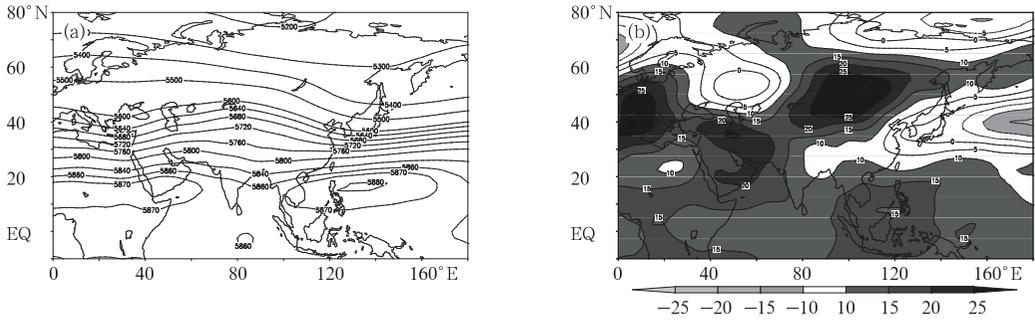


图 8 1981—2010 年春季平均 500 hPa 位势高度(a)及其与 1951—1980 年春季平均 500 hPa 位势高度差值(b)(单位: gpm)

Fig. 8 500 hPa mean geopotential heights in the spring of 1981—2010 (a) and the difference from the 500 hPa mean geopotential heights in 1951—1980 (b) (unit: gpm)

纬向型环流加强,冷空气活动偏弱。同时,东亚大部为正值区,中心位于巴尔喀什湖至贝加尔湖附近(40°~60°N、80°~120°E),最大值在 25 gpm 以上。我国主要为正位势高度差值控制,特别是北方地区,位势高度明显增加,这有利于春季增暖。从超长波槽脊的位置来看,主要异常槽脊为二波型,即在乌拉尔山附近的较大范围内为负距平区,盛行超长波槽;而我国北部地区为正距平所控制,中心在贝加尔湖地区,盛行超长波脊;异常槽、脊为北低南高、西低东高的分布,东亚大槽变浅,东亚西风带纬向环流占优势,不利于冷空气顺槽后的西北气流南下,冷空气不易向南扩散,且这种环流形势不利于引导极地冷空气向西入侵西西伯利亚地区,有利于我国北方(特别是东北)地区气温偏高。此外,20°N 以南为明显的正值区,最大值(15 gpm 以上)位于副热带西太平洋上,这一方面使得西太平洋副热带高压面积偏大、强度偏强,有利于我国江南、华南等地春季气温偏暖。

从 1981—2010 年春季 200 hPa 纬向风平均场(图 9a)可见,北半球 10°N 以北地区均为西风控制,西风急流(风速大于 30 m · s<sup>-1</sup>)位于 20°~35°N 的中纬度地区,两个急流中心分别位于北非和东亚中

东部;10°N 以南的热带地区主要为东风控制。从 1981—2010 年与 1951—1980 年两个时段的春季 200 hPa 纬向风差值场(图 9b)上可以看到,东亚地区低纬度地区均为纬向风正值区,最大值为 3 m · s<sup>-1</sup> 以上,位于 25°~30°N、105°~140°E 附近地区;东亚中纬度地区为纬向风负值区,最大东风异常为 2 m · s<sup>-1</sup> 以上,位于 45°N、110°E 附近;另一个正值中心位于 30°~40°N、50°~70°E 附近,最大值为 3 m · s<sup>-1</sup> 以上。这表明 1981—2010 年春季北非以东的急流出口处西风偏强,东亚副热带西风急流位置偏南、强度明显增强。姚慧茹等(2013)认为当中东地区高空风场为正距平,东亚地区北部为负距平,南部为正距平,即中东急流偏强,东亚副热带急流偏南时,西南气温偏低,东北气温偏高。曲巧娜等(2012)研究指出,中东急流出口区南侧的下沉气流与对流层中层的中亚低槽关系密切,中东急流偏强时中亚低槽较为活跃,有利于欧洲中东部冷空气影响中国西南地区,导致我国西南地区气温偏低。另一方面,东亚副热带西风急流加强,不利于北方冷空气入侵我国,因此我国大部(特别是东北)地区春季气温偏暖。

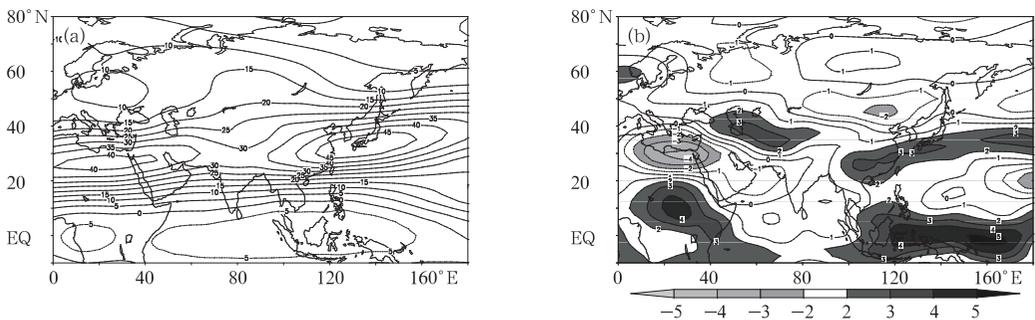


图 9 同图 8, 但为 200 hPa 纬向风(单位: m · s<sup>-1</sup>)

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for 200 hPa zonal wind (unit: m · s<sup>-1</sup>)

图 10 是 1981—2010 年春季平均 700 hPa 位势高度场(图 10a)以及 1981—2010 年与 1951—1980 年 700 hPa 位势高度差值场(图 10b)。由图 10a 可见,孟加拉湾北部至青藏高原南侧地区有一个低压槽,即南支槽。南支槽是春季影响南亚和东亚的重要天气系统(索渺清等,2008;2009;2014)。由图 10b 可见,20 世纪 80 年代以后,孟加拉湾北部至青藏高原南侧地区位势高度明显增加,说明南支槽减弱,不利于来自印度洋和孟加拉湾的暖湿气流向北输送影响我国西南地区,导致这些地区气温偏低。

综上所述,与 1951—1980 年相比,1981—2010

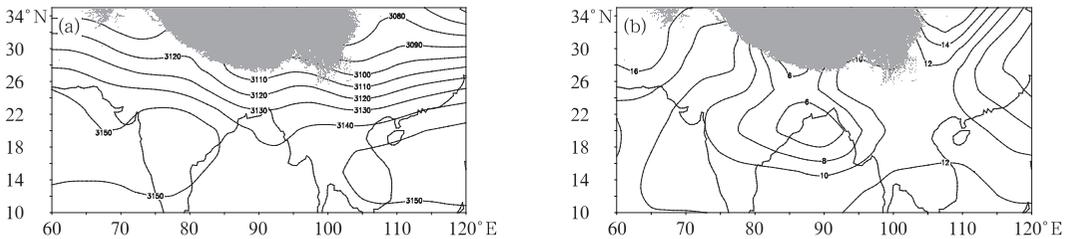


图 10 同图 8, 但为 700 hPa 位势高度(单位: gpm)

(图中阴影部分为 700 hPa 地形高度截断)

Fig. 10 Same as Fig. 8, but for 700 hPa geopotential heights (unit: gpm)

(The shadow denotes 700 hPa terrain height truncation)

## 4 结论和讨论

本文通过比较分析我国 1981—2010 和 1951—1980 年两个时段春季气候的季节、月、候的气候平均特征,研究了在全球变暖背景下我国春季气温和季节进程的变化,并讨论了我国春季气温年代际变化可能原因。主要结论如下:

与 1951—1980 年相比,20 世纪 80 年代以后,除了西南等地,全国大部分地区春季增温,由东北到西南呈现气温“升高—降低”的形势。春季,东部季风区气温总体上升,其中东北地区大部、华北北部、内蒙古东部和中部部分地区升温  $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ ,局地增温在  $1.5^{\circ}\text{C}$  以上;西北地区北部和中部部分地区增温  $1^{\circ}\text{C}$  以上;而四川中部、重庆、贵州西部、云南东南部、广西西部等地区气温下降  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。

与 1951—1980 年相比,20 世纪 80 年代以后,3—5 月除西南局部地区气温下降外,全国其余大部分地区气温升高  $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。3 月东北地区、内蒙古东部地区、华北地区和西北地区北部升温程度最为明显,西南地区的降温范围最广,4、5 月这些地区的升

年春季,乌拉尔山地区高压减弱,东亚大槽减弱,亚洲中高纬地区纬向环流加强,西太平洋副热带高压加强,东亚副热带西风急流加强,不利于来自北半球极地和高纬度地区的冷空气影响我国,致使我国大部地区,尤其是东北地区,春季气温偏高。此外,1981—2010 年春季,中东急流偏强,东亚副热带急流偏南,中亚低槽较为活跃,有利于欧洲中东部冷空气影响中国西南地区,导致该地区气温偏低。同时南支槽偏弱,不利于印度洋和孟加拉湾的暖湿气流向北影响我国西南地区,这些地区气温易于偏低。

温程度逐渐减弱,降温区域的范围逐渐减小并且南退。我国北方地区( $35^{\circ}\text{N}$  以北),春季气温普遍上升  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$  左右,南方地区( $35^{\circ}\text{N}$  以南)春季以升温为主,但是与北方相比,南方总体增温强度弱、而且降温区域大。

与 1951—1980 年相比,20 世纪 80 年代以后,3—5 月的季节进程在江南和西南东部地区加快,内蒙古和华南南部地区则经历了由快到慢的变化,东北地区、西南地区南部、西北地区北部春季进程速度减慢。总体来说,在全球气候变暖背景下,我国东部地区春季开始早、结束早,西部地区春季开始和结束时间变化不明显。

与 1951—1980 年相比,20 世纪 80 年代以后,春季乌拉尔山地区高压减弱,东亚大槽减弱,亚洲中高纬地区纬向环流加强,西太平洋副热带高压加强,东亚副热带西风急流偏南,不利于来自北半球极地和高纬度地区的冷空气影响我国,致使我国大部地区,尤其是北方地区春季气温偏高。此外,1981—2010 年春季,中东急流偏强,东亚副热带急流偏南,有利于欧洲中东部冷空气影响中国西南地区,导致我国西南地区气温偏低。同时南支槽偏弱,不利于

印度洋和孟加拉湾的暖湿气流向北影响我国西南地区,导致这些地区气温偏低。

本文所分析的年代际尺度上我国春季气温变化的特征及其与大气环流的联系,主要是基于对观测资料的分析和诊断,其具体的过程和因果关系还需要进一步研究才能确定。海温、积雪、海冰等其他一些外强迫因子对大气环流的影响,也需要进行进一步研究。还有其他一些相关问题,例如,近 30 年我国春季气温和大气环流的变化是全球变暖造成的吗?还是自然变率?西南地区气温变冷与人为排放有关吗?这些问题都有待于今后进一步深入研究。

## 参考文献

- 陈隆勋,朱文琴,王文. 1998. 我国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 56(3): 257-271.
- 陈少勇,郭忠祥,白登元,等. 2010. 我国东部季风区春季气候的变暖特征. 热带气象学报, 26(5): 606-613.
- 陈文海,柳艳香,马柱国. 2002. 我国 1951—1997 年气候变化趋势的季节特征. 高原气象, 21(3): 251-257.
- 陈峪,姜允迪,陈鲜艳,等. 2012. 气候季节划分. 中华人民共和国气象行业标准. QX/T 152-2012.
- 邓莲堂,束炯,李朝颀. 2001. 上海城市热岛的变化特征分析. 热带气象学报, 17(3): 273-280.
- 丁一汇,柳艳菊,梁苏洁,等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系. 气象学报, 72(5): 835-852.
- 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 2006. 气候变化国家评估报告(I)我国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2(1): 3-8.
- 符滨斌,董文杰,温刚,等. 2003. 全球变化的区域响应和适应. 气象学报, 61(2): 245-249.
- 龚道溢,王绍武. 2002. 全球气候变暖研究中的不确定性. 地学前沿, 9(2): 371-376.
- 黄斌,王劲松,张洪芬. 2010. 1962 年至 2006 年我国西北区与季风区春季气温变化特征对比. 资源科学, 32(6): 1082-1087.
- 黄嘉佑,胡永云. 2006. 我国冬季气温变化的趋向性研究. 气象学报, 64(5): 614-621.
- 琚建华,任菊章. 2003. 大气环流年代际变化对东亚北部冬季气温异常的影响. 云南大学学报(自然科学版), 25(6): 518-524.
- 李崇银,李桂龙,龙振夏. 1999. 中国气候年代际变化的大气环流形势对比分析. 应用气象学报, 10(Z1): 1-8.
- 李春晖,万齐林,等. 2008. 1976 年大气环流突变前后中国四季降水量异常和温度的年代际变化及其影响因子. 气象学报, 68(4): 529-538.
- 李维京,左金清,宋艳玲,等. 2015. 气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化. 气象, 41(3): 261-271.
- 刘传凤,高波. 2001. 我国南方春季低温冷害气候及其大气环流特征. 热带气象学报, 17(2): 179-187.
- 秦大河,陈振林,罗勇,等. 2007. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 3(2): 63-73.
- 曲巧娜,李栋梁,熊海星,等. 2012. 冬季中东急流对中国西南地区覆冰形成的影响. 大气科学, 36(1): 195-203.
- 沈爱华,任广成,徐明,等. 2009. 我国西南地区春季异常冷暖气候的相关分析及统计预测. 高原气象, 28(2): 425-432.
- 申红艳,丁裕国,张捷. 2010. 华北冬季气温年代际变化及大气环流分析. 气象科学, 30(3): 338-343.
- 孙秀博,李清泉,魏敏. 2012. 1960—2009 年中国年降水量的年际及年代际变化特征. 气象, 38(12): 1464-1472.
- 索渺清,丁一汇. 2009. 冬半年副热带南支槽西风结构的演变特征研究. 大气科学, 33(3): 425-442.
- 索渺清,丁一汇. 2014. 南支槽与孟加拉湾风暴结合对一次高原暴雪过程的影响. 气象, 40(9): 1033-1047.
- 索渺清,丁一汇,王遵娅. 2008. 冬半年南支西风中 Rossby 波传播及其与南支槽形成的关系. 应用气象学报, 19(6): 731-740.
- 宋连春. 1999. 近 40 年我国气温时空变化特征. 应用气象学报, 5(1): 119-124.
- 唐国利,任国玉. 2005. 近百年来我国地表气温变化的再分析. 气候与环境研究, 10(4): 791-798.
- 屠其璞,邓自旺,周晓兰. 2000. 我国气温异常的区域特征研究. 气象学报, 58(3): 288-296.
- 王绍武,叶瑾林,龚道溢. 1998. 近百年我国年气温序列的建立. 应用气象学报, 9(4): 392-401.
- 王遵娅,周兵,王艳姣,等. 2013. 2013 年春季我国气候异常特征及其可能原因. 气象, 39(10): 1374-1378.
- 吴贤云,丁一汇,叶成志,等. 2015. 江南西部雨季降水区域特征及其受热带海洋表温度异常的影响分析. 气象, 41(3): 286-295.
- 吴志权,陈明先,陈创买. 2005. 近 50 年来东莞气温年际变化的长期特征分析. 热带气象学报, 21(1): 107-112.
- 姚慧茹,李栋梁. 2013. 亚洲急流与冬季风的关系及其对中国气候的影响. 气象学报, 71(3): 429-439.
- 袁媛,柳艳菊,王艳姣,等. 2014. 2014 年春季我国主要气候特征及成因简析. 气象, 40(10): 1279-1285.
- 曾凯,周玉,宋忠华. 2011. 气候变暖对江南双季稻灌浆期的影响及其观测规范讨论. 气象, 37(4): 468-473.
- 翟盘茂. 2011. 全球变暖背景下的气候服务. 气象, 37(3): 257-262.
- 张定全,王毅荣. 2005. 我国黄土高原地区春季气温时空特征分析. 高原气象, 24(6): 898-904.
- 张先恭,李小泉. 1982. 本世纪我国气温变化的某些特征. 气象学报, 40(2): 198-208.
- 左洪超,吕世华,胡隐樵. 2004. 我国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析. 高原气象, 23(2): 233-237.
- IPCC Working Group I. 1992. Scientific Assessment of Climate Change. Cambridge: IPCC Supplement, 58-125.
- IPCC. 1990. Climate Change: The IPCC scientific assessment. // Houg J Tuton, Jenkins G J, Ephraums J, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 365.
- Jones P D, Briffa K R. 1992. Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 1, Spatial, temporal and seasonal details. Holocene, 2(2): 165-179.