

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0031
GAO Yuzhong, WANG Chengwei, WANG Ji, et al. An analysis of air temperature evolution and its future trend in Heilongjiang Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 270–278. [高玉中, 王承伟, 王冀, 等. 黑龙江省气温演变及未来趋势分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 270–278.]

黑龙江省气温演变及未来趋势分析

高玉中¹, 王承伟², 王冀³, 胡文东⁴

(1. 黑龙江省气象局, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江省气象台, 黑龙江 哈尔滨 150030;
3. 北京市气候中心, 北京 100089; 4. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

摘要: 利用 1961–2015 年的年平均及月平均气象资料, 对黑龙江省全年、暖季与冷季平均气温进行分析, 发现冷期和暖期持续时间相近, 周期内的冷期和暖期平均气温相差较大。全年和冷季气温冷、暖期转换年份分别为 1964 年(暖转冷)、1988 年(冷转暖)、2009 年(暖转冷); 暖季气温转换年份分别为 1969 年(暖转冷)、1996 年(冷转暖)、2015 年前后(暖转冷)。利用模式方法和统计方法分别对 2016–2030 年黑龙江省气温变化趋势进行探讨, 发现未来暖季和冷季气温上升幅度均变缓或者停滞, 可能进入相对冷期。

关键词: 气温变化; 暖(冷)期; 暖(冷)季; 气温预估; 黑龙江省
中图分类号: P466 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)02-0270-09

0 引言

气候变化对人类社会和自然界造成的重大而深远的影响日益受到普遍关注, 气温作为气候变化的关键因子受到了特别的重视^[1], 部分学者研究了千年气温的年代际特征^[2–3], 重建、插补了气温序列^[4–5]并进行了很有意义的研究。由于观测手段与资料的连续性逐渐改善, 对 20 世纪 50 年代以后的气温研究更加细致。韩翠华等^[6]、贺伟等^[7]对我国 1951–2010 年不同时段的气温进行了研究, 发现东北地区气温呈上升趋势, 不同季节增温的时间不同。

黑龙江省与东北地区气温变化特征一致, 呈现明显增暖的趋势^[8–9], 冬季增温明显, 夏季稍弱。周秀杰等^[10]将黑龙江省 1951–2010 年的气温变化以 1969、1987 年为界分成三个阶段, 分别为低、正常、暖。朱红蕊等^[11]对黑龙江省的极端气温指数进行了分析, 发现 1961–2009 年与低温相关的指数均呈下降趋势, 而与高温相关的指数呈上升趋势。

从王绍武等^[12]、施能等^[13]的研究结果来看, 我国气温具有 20~30 a 的年代际变化特征, 1920 年以后黑龙江省呈增暖趋势。因此, 1961–2015 年在气候变暖趋势下, 黑龙江省仍应存在着冷暖变化周期, 并且未来这种周期变化仍然可能存在。

气候变化对很多领域, 包括冻土面积和冻融循环^[14–20]、湿地^[21]、隧道施工^[22]都有重要影响。近几十年来, 气温升高不仅在生长季节导致积温升高对农业产生影响^[23–25], 而且可以通过非生长季节地温、冻融循环期土壤温度和湿度等来影响农业生产^[26–28]。黑龙江省是农业大省, 气温、冻土的变化对农业影响较大, 本文对 1961–2015 年黑龙江省的平均气温进行分析讨论, 重点讨论农业生长相关季节的气温变化情况, 并在此基础上探讨 2016–2030 年气温的可能变化, 为未来的农业生产及其他行业提供参考信息。

1 冷、暖季与冷、暖期的定义

1.1 冷、暖季

本文使用的资料为 1961–2015 年黑龙江省 75

收稿日期: 2017-01-12; 修订日期: 2017-06-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(31671576; 31671575); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-20)资助
作者简介: 高玉中(1965–), 男, 黑龙江海伦人, 高级工程师, 1986 年在北京大学获学士学位, 从事天气气候预报预测研究。
E-mail: yuzhonggao@126.com
通信作者: 王承伟, E-mail: byuan3123@sina.com.

个国家气象观测站月平均气温资料。考虑到黑龙江省农业生产的实际情况，将一年中作物生长季节定义为暖季(5-9月)，其余为冷季(前一年10月至当年4月)。

1.2 冷、暖期

文中冷期与暖期的标准如下：在一个冷暖周期内，冷期指的是平均距平 < 0℃ 的连续年份，暖期指的是平均距平 > 0℃ 的连续年份。如果在冷暖期内出现距平相反的情况，每次出现持续时间应 ≤ 2 a。需要注意的是，如果 ≥ 4 a 低于(高于)气候趋势线，即使距平为正(负)，仍视为冷(暖)期。

对于冷暖起止年份的界定，以低于或高于气候趋势线为基础，距平正负稳定转换年份(> 3 a)的起始年，视为转换年。本文平均值取 1961-2015 年 55 a 的平均气温。

2 冷、暖期的确定

从 1961-2015 年的气温变化(图 1)来看，黑龙江省暖季、冷季以及全年气温呈一致上升趋势，均通过了 95% 的显著性检验。其中冷季平均气温上升趋势较明显[图 1(b)]，倾向率为 0.34℃·(10a)⁻¹；暖季上升趋势较弱[图 1(a)]，倾向率为 0.24℃·(10a)⁻¹；全年气温上升趋势[图 1(c)]略低于冷季。从年际气温变化来看，冷季标准差为 1.21℃，暖季和全年分别为 0.64℃ 和 0.81℃，说明冷季的平均气温年际变化较大，暖季的年际变化较小。冷季偏态系数为正(0.063)，暖季和全年偏态系数为负(-0.014、-0.113)，但偏差不大，说明气温变化基本符合正态分布。从变化幅度来看，冷季升温较为明显，暖季变化较弱。虽然暖季、冷季与全年变化略有不同，但由于夏季在暖季中占了主导作用，暖季与冷季的变化与贺伟等^[7]、于梅等^[8]的研究结果基本一致。

图 2 为黑龙江省全年、冷季、暖季气温距平的 5 年滑动平均曲线，三者呈显著上升趋势，趋势系数分别达 0.86、0.79、0.89，通过了 95% 的显著性检验。同时，全年、暖季、冷季平均气温均呈现年代际变化特征：全年和冷季气温变化基本同步，二者由负距平转为正距平均出现在 1985 年[图 3(a)]，1990 年之后除个别年份外大部分年份为正距平；从暖季来看，由负距平转为正距平的时间明显滞后，出现在 1996 年[图 3(b)]；2010 年以后，全年平均气温与冷季平均气温明显下降，这可能与冷时段气温收敛较快有关^[13]，但暖季气温仍维持

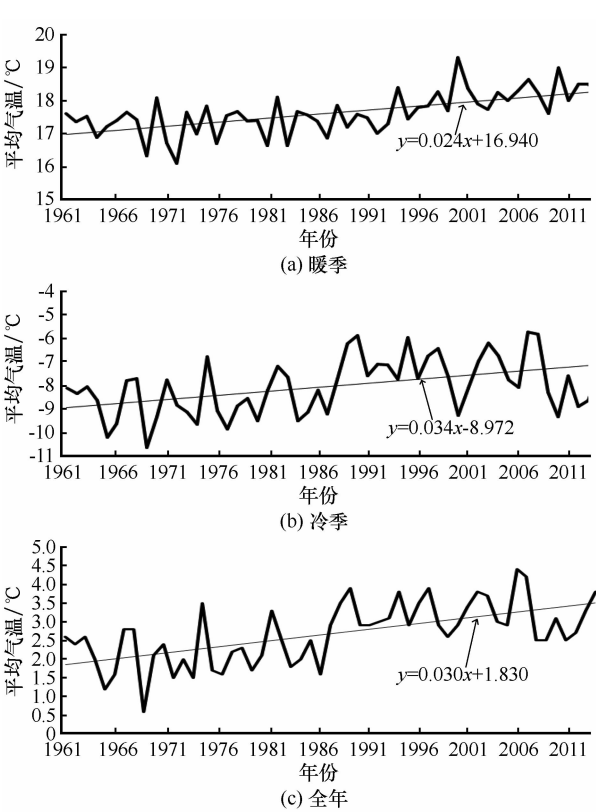


图 1 1961-2015 年黑龙江省暖季(a)、冷季(b)、全年(c)平均气温曲线及趋势线
Fig. 1 Variations of air temperature in warm season (a), cold season (b) and the whole year (c), along with the trend line from 1961 to 2015 in Heilongjiang Province

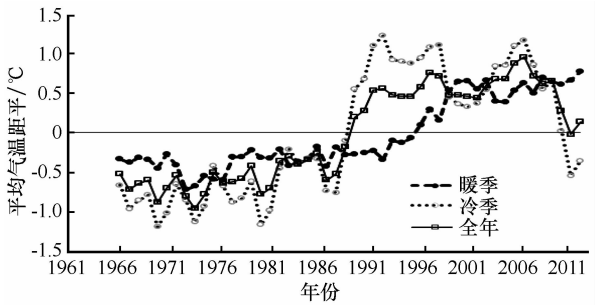


图 2 1961-2015 年黑龙江省平均气温距平 5 年滑动平均曲线
Fig. 2 The 5-year moving average of the mean air temperature anomaly from 1961 to 2015 in Heilongjiang Province

正距平，2013 年以后呈下降趋势。

按 1.2 节冷暖期划分标准分析黑龙江省的气温变化，对于全年和冷季来说，气温冷暖周期性转换有三个年份：1964 年(暖转冷)、1988 年(冷转暖)、2009 年(暖转冷)。暖季的情况则相对而复杂，虽然 1969 年以前暖季多为负距平，但平均气温高于气候趋势线，因此可知直到 1969 年均属于上一周期(暖期)。由气温趋势及周期性变化判断，对于暖

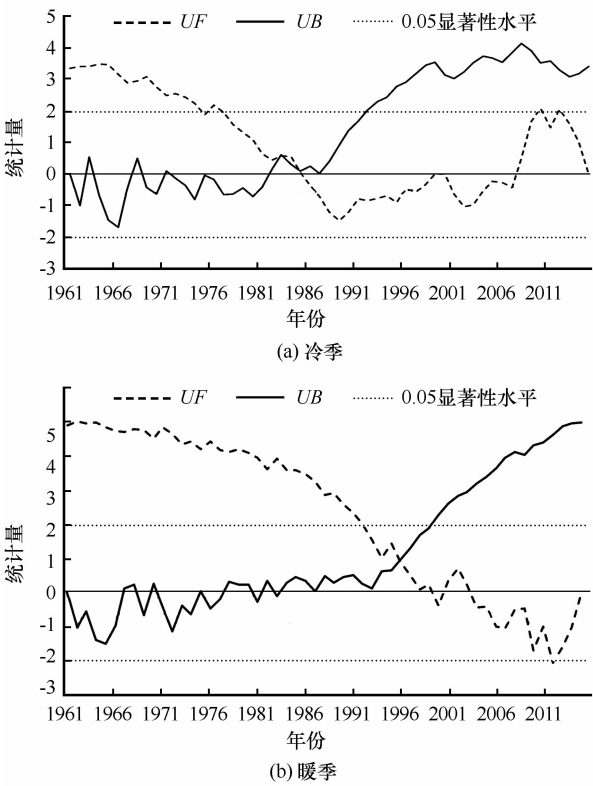


图3 1961–2015年黑龙江省平均气温(冷季、暖季)Mann-Kendall 突变检验

Fig.3 The Mann-Kendall test of mean air temperature in cold season (a) and warm season (b) from 1961 to 2015 in Heilongjiang Province

季来说,2015 年前后应该是由暖转冷的年份,但目前由于尚无后续资料,具体年份难于确定。所以,目前判断暖季的冷暖转换年份分别为1969 年(暖转冷)、1996 年(冷转暖)、2015 年前后(暖转冷)。

将本文确定的暖、冷季的冷暖转换年份与文献[6–7]对冬、夏季气温研究结果作对比,发现结论相似。

3 冷、暖期的气温特征

3.1 气温统计特征

按照上文中对全年、暖季、冷季气温冷暖周期的划分,发现在过去的 55 a 中,无论是对于全年而言,还是对于冷、暖季而言,正负距平次数总体接近。而对于单独冷期和暖期,正负距平数有明显差异。按时间顺序,分别定义为暖期 I、冷期 II、暖期 II、冷期 III(表 1)。其中,冷期 II 和暖期 II 是一个完整的变化周期。

对于周期 II,阶段性气温持续时间基本在 20 ~ 30 a,暖季与冷季、全年气温的冷暖阶段虽然不同步,但持续时间基本一致。全年与冷季平均气温变化均超过 1.0 ℃,分别为 1.2 ℃、1.6 ℃;与东北其他地区类似^[7],暖季的气温变化略小,也达到了 0.9 ℃。冷暖期间的平均温差非常明显。2009 年以后,虽然 2015 年的年平均气温异常高达 3.8 ℃,这

表 1 1961–2015 年黑龙江省平均气温冷、暖期的划分

Table 1 The colder periods and warmer periods of the mean air temperature from 1961 to 2015 in Heilongjiang Province							
季节	年份	总年数	正距平年数	负距平年数	最大正距平/℃	最大负距平/℃	平均气温/℃
全年	1961–2015	55	28	27	1.7	–2.1	2.68
	1961–1963(暖期 I)	3	0	3	–	–0.3	2.51
	1964–1987(冷期 II)	24	4	20	0.8	–2.1	2.10
	1988–2008(暖期 II)	21	20	1	1.7	–0.1	3.34
	2009–2015(冷期 III)	7	4	3	1.2	–0.2	2.91
暖季	1961–2015	55	27	28	1.7	–1.0	17.64
	1961–1968(暖期 I)	8	0	8	–	–0.8	17.37
	1969–1995(冷期 II)	26	6	20	0.4	–1.6	17.30
	1996–2015(暖期 II)	21	20	1	1.7	–0.1	18.19
冷季	1961–2015	55	27	28	2.3	–2.6	–8.01
	1961–1963(暖期 I)	3	0	3	–	–0.6	–8.17
	1964–1987(冷期 II)	24	6	18	0.8	–2.6	–8.73
	1988–2008(暖期 II)	21	18	3	2.3	–1.3	–7.07
	2009–2015(冷期 III)	7	3	4	1.8	–1.3	–8.05

一阶段的平均气温仍仅为 2.9℃，比前 20 a(暖期Ⅱ)低了 0.4℃；冷季也出现了类似的变化。考虑到气候趋势仍为一致增加，那么冷期降温幅度更大。

在冷、暖期内，虽然有相反的距平年份出现，但远少于冷、暖期一致的年份，其中暖季的暖期Ⅱ中，仅 1 a 为负距平(−0.05℃)，其余全部为正距平。总体来说，在暖期Ⅱ，无论暖季还是冷季出现负距平年份均≤3 a；而在冷期Ⅱ，主要以负距平为主，但与暖期Ⅱ的负距平相比，此阶段正距平的次数相对较多，这应该与后期气温总体处于一个偏高的状态有关。

从各阶段内的最大距平来看，无论是冷期还是暖期，都可能在其内部出现极端冷或极端暖的年份。以 1975、2000 年为例，1975 年处于冷期Ⅱ中

期，但全年、暖季和冷季平均气温均为正距平，其中冷季距平为 1.24℃；2000 年处于暖期Ⅱ中期，冷季负距平达到 −1.26℃，说明在暖(冷)期内还存在异常偏冷(暖)的年份。但总体来看，暖季的距平和标准差相对较小，说明暖季气温的年际变化比冷季、全年气温的年际变化弱。

3.2 气温的气候倾向率

通过计算，可以求得不同时期暖季和冷季平均气温的气候倾向率^[29-30]。对Ⅱ期，在暖期气候倾向率明显小于冷期，但二者均小于 1961–2015 年 55 a 平均气候倾向率，这也说明冷(暖)期内暖季与冷季的平均气温相对稳定。Ⅰ期和Ⅲ期样本数均太少，因此可信度相对较差；Ⅱ期为完整周期，气候倾向率参考价值较大(表 2)。

表 2 黑龙江省平均气温在各时期冷、暖季的气候倾向率
Table 2 Climate tendency rates of the mean air temperature in cold and warm seasons of some periods in Heilongjiang Province

暖季		冷季	
年份	气候倾向率/[℃·(10a) ^{−1}]	年份	气候倾向率/[℃·(10a) ^{−1}]
1961–2015	0.246	1961–2015	0.344
1961–1968(暖期Ⅰ)	0.023	1961–1963(暖期Ⅰ)	0.250
1969–1995(冷期Ⅱ)	0.219*	1964–1988(冷期Ⅱ)	0.226*
1996–2015(暖期Ⅱ)	0.109	1989–2008(暖期Ⅱ)	0.052
		2009–2015(冷期Ⅲ)	−3.239

注：* 表示通过了 95% 的显著性检验。

4 2016–2030 年气温趋势探讨

20 世纪近百年间黑龙江省持续升温^[30]，对于东北地区，很多学者也认为气温将继续升高^[31-32]，2015 年是哈尔滨连续第 27 个偏暖年份^[33]，在 IPCC 的报告中也指出 1983–2012 年可能是过去 1 400 a 中最暖的 30 a^[34-35]。但是，IPCC 报告同时指出 1998–2012 年的增温速率较 1951 年以来有所下降，且未来中纬度地区的升温速率可能低于热带亚热带。近年来，根据观测事实认为气候变暖减缓或者停滞的研究也逐渐增多^[36-37]。而黑龙江省从 2009 年开始，全年与冷季平均气温也多次明显偏低，尤其是 2009、2010、2013 年，年平均气温只有 2.5℃，较以前的 20 a 左右平均气温低了 0.8℃，暖季平均气温也开始呈现下降趋势，说明黑龙江省气温变暖也可能出现减缓或停滞。本文将通过模式和统计两种方法，对 2016–2030 年黑龙江省气温做初步预报和估算，为黑龙江省的气候变化研究和相关行业提供参考信息。

4.1 LMDZ4 模式预报

LMDZ 是基于动力降尺度的变网格全球气候模式，对区域气候的模拟能力有所提高^[38]。王冀^[39]、Zou 等^[40]、杨浩等^[41]在不断改进过程中发现，LMDZ4 对各要素场的模拟精确度较高。本文具体试验方案见文献[39]，考虑到 CMIP5 模式在几种排放情景下 RCP8.5 情景升温幅度最大^[35]，因此本文选取 RCP8.5 情景进行模拟，模拟时段为 2006–2030 年。

4.1.1 暖季

首先将 2006–2015 模拟结果与实际资料作对比，发现模拟结果全部高于实际情况，误差在 3.31~5.42℃，平均误差为 4.24℃。

从模式预报未来温度变化的趋势看，与前 55 a 和冷期Ⅱ的总体上升趋势(0.0246℃·a^{−1}、0.0219℃·a^{−1})不同，气温呈弱下降趋势(−0.007℃·a^{−1})，年际变化幅度在 4℃以内[图 4(a)中 a1]，大体有 3~5 a 的周期。如果将模拟结果的最小误差和平均误差分别代入模式中，作为系统误差来消

除,那么暖季平均气温主要出现在16~19℃,平均气温分别为18.12℃和17.19℃。将这一结果与前55 a的气候趋势预估的结果进行对比,发现如果消除平均误差的影响,除1 a(2028年)外,2016–2030年暖季气温均低于气候趋势变化[图4(a)中a3];如果将最小误差作为系统误差,2016–2030年有9 a低于气候趋势预估值[图4(a)中a2]。

4.1.2 冷季

将2006–2015年模拟结果与实际资料作对比,冷季模拟结果中有3 a误差为负,其余为正,均方差为1.23℃。其中,误差大于±2℃的有2 a,大于±1℃的1 a,没有明显的系统偏差,有5 a左右的周期变化。

与前55 a和冷期Ⅱ变化趋势(0.0344℃·a⁻¹、0.0226℃·a⁻¹)一致,气温呈上升趋势(0.114℃·a⁻¹),年际变化幅度在4℃以内。冷季平均气温主要出现在-6~-9℃,平均气温为-7.08℃。将这一结果与前55 a的气候趋势预估结果进行对比,在2025年以前,按1.2节的标准均可以认为冷

季是处在冷期以内[图4(b)]。

4.2 周期性气温统计预估

气温有明显的代际和年际变化^[12,35],且温度的变化主要应该是自然因素决定的,温度有其自身的变化规律,而外强迫因素(温室气体等)在短时间尺度内应该有线性增加的趋势,可以通过过去气温反映出的线性趋势叠加来表示^[32]。以此为基础,假定在未来黑龙江省冷、暖季气温周期性变化仍然维持在20~30 a^[12],且假定在下一个冷期(冷期Ⅲ)内,冷、暖季的气温变率(气候倾向率)均为线性变化,与它们各自在冷期Ⅱ中排除气候变暖带来的增温率相同,那么在2016–2030年冷季平均气温在-8.52~-8.68℃,暖季平均气温在18.09~18.12℃。

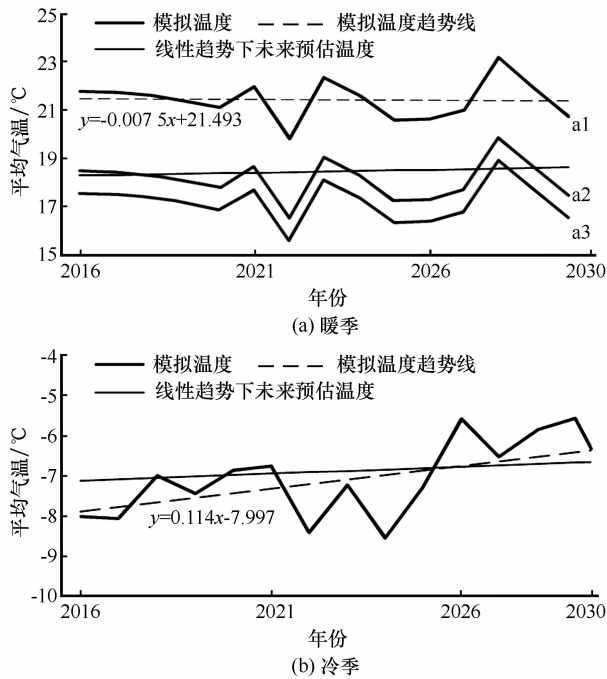
需要注意的是,这里冷期Ⅲ在冷季开始年份取2009年,初值以进入冷期Ⅲ后的前5 a平均值代替;对于暖季,冷期Ⅲ开始年份取2016年,由于目前暖季进入冷期的时间尚未超过5 a,因此是以暖季在冷期Ⅱ前5 a的年平均气温按照1961–2015年的气候倾向率排除1969–2015年增温的平均温度作为暖季在冷期Ⅲ的初值。

4.3 结果与分析

从模式来看,RCP8.5情景下未来暖季气温较高,这与MIP5^[35,42]模式研究成果是基本一致的。但从气温变化趋势来看,与MIP5不同,LMDZ4模式预报为下降趋势。如果考虑到存在系统误差,暖季气温可能比模式预报低3~4℃,那么2016–2030年,多数年份都接近甚至低于气候趋势预估值,因此暖季有处于相对冷期的可能。对于冷季,虽然气温变化趋势为上升,但2025年以前基本低于气候趋势变化,符合1.2节中的冷期定义,即冷季将处于冷期。所以从模式结果来看,至少到2025年,冷季和暖季处于冷期的可能性较大。

从周期性气温统计预估来看,至2030年,对于冷季,冷期Ⅲ较冷期Ⅱ气温略高(>0.2℃),但远低于暖期Ⅱ(<1.4℃);对于暖季,冷期Ⅲ较冷期Ⅱ(17.30℃)气温明显升高(>0.5℃),但与暖期Ⅱ(18.19℃)相比变化不大(<0.2℃)。因此从周期性考虑未来的温度变化,冷季平均气温下降明显,基本接近冷期Ⅱ,同时平均气温波动较大,这与冷期的气候倾向率较大有关;而暖季气温虽然略有下降,但仍远高于冷期Ⅱ。

从以上的分析可以看到,两种方法对未来冷、暖季得出的平均气温虽然有差异,但考虑到系统误



注:(a)中a1、a2、a3分别为模式气温、模式气温-模式最小误差(3.31℃)、模式气温-模式平均误差(4.23℃)。

图4 LMDZ4模式RCP8.5情景下模拟2016–2030年黑龙江省暖季(a)、冷季(b)平均气温
Fig.4 The mean air temperature in warm season (a) and cold season (b) from 2016 to 2030 in Heilongjiang Province under the scene of RCP8.5 simulated by LMDZ4 (thick solid line: simulated temperature; thin broken line: simulated temperature trend line; thin solid line: future estimated temperature under linear trend)

差和方法、算法的不同,笔者认为黑龙江省的冷季和暖季未来气温上升趋势也有变缓趋势,可能有一段相对冷期出现。在模式预报中可以看到细节,即冷季比暖季的冷期结束得早一些,这与前面冷季较早进入冷期是一致的。

5 结论

本文利用 1961–2015 年的年平均及月平均气温资料,按黑龙江省作物生长规律将全年分为暖季和冷季,对全年、冷季和暖季的平均气温进行分析,并通过 LMDZ4 模式和周期性统计预估方法对 2016–2030 年冷、暖季的平均气温进行估测,结论如下:

(1) 从气温年际变化来看,冷季平均气温年际变化较大,而暖季较小;在过去的 55 a 中,冷季升温较为明显,全年次之,暖季升温幅度较小。

(2) 黑龙江省冷暖周期转换年份,对于冷季来说分别是 1964 年(暖转冷)、1988 年(冷转暖)、2009 年(暖转冷);对于暖季来说,则为 1969 年(暖转冷)、1996 年(冷转暖)、2015 年前后(暖转冷)。

(3) 在冷期和暖期内,气温的年际变化相对较小,冷期的气候倾向率大于暖期;冷季和暖季的冷暖期起止略有不同,暖季较冷季滞后 6 a 左右。在冷期和暖期内,冷季气温的年际变化较暖季大。

(4) 2016–2030 年,黑龙江省气温继续升高的现象可能出现减缓甚至是停滞,进入相对冷期的可能性较大。

致谢: 图 1 和图 2 的制作得到了黑龙江省气象台齐铎的帮助,在此表示感谢!

参考文献 (References):

- [1] Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701–716. [任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701–716.]
- [2] Zhu Kezhen. A preliminary study on the climate change for last five thousand years in China[J]. *Science in China*, 1973(2): 168–189. [竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. *中国科学*, 1973(2): 168–189.]
- [3] Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The climatic fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China[J]. *Science in China: Series B*, 1994, 37(3): 353–365. [施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. *中国科学: B 辑*, 1992(12): 1300–1308.]
- [4] Wang Shaowu, Gong Daoyi. The temperature in different stages of characteristic periods in Holocene over China[J]. *Progress in Nature Science*, 2000, 10(4): 325–332. [王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温[J]. *自然科学进展*, 2000, 10(4): 325–332.]
- [5] Ge Quansheng, Wang Shunbing, Zheng Jingyun. Reconstruction of temperature change series over the past 5 000 years in China [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(6): 689–696. [葛全胜, 王顺兵, 郑景云. 过去 5000 年中国气温变化序列重建[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(6): 689–696.]
- [6] Han Cuihua, Hao Zhixin, Zheng Jingyun. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951–2010 [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(6): 887–896. [韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951–2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(6): 887–896.]
- [7] He Wei, Bu Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeast China from 1961 to 2005 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 519–531. [贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961–2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 519–531.]
- [8] Yu Mei, Xing Junjiang, Yu Hongmin. Air temperature change in Heilongjiang Province in recent 46 years [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(3): 158–164. [于梅, 邢俊江, 于洪敏. 黑龙江省近 46 年的气温变化[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(3): 158–164.]
- [9] Chen Jing. Analysis on temporal and spatial variations of air temperature during 1961–2012 in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. [陈晶. 黑龙江省气温时空变化特征分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.]
- [10] Zhou Xiujie, Wang Fengling, Wu Yuying, et al. Analysis of temperature change in Heilongjiang Province, Northeast China and whole country in recent 60 years [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2): 124–129. [周秀杰, 王凤玲, 吴玉影, 等. 近 60 年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(2): 124–129.]
- [11] Zhu Hongrui, Liu Henan. Characteristics of extreme temperature events during 1961–2009 in Heilongjiang Province [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(2): 110–115. [朱红蕊, 刘赫男. 黑龙江省 1961–2009 年极端气温事件变化特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(2): 110–115.]
- [12] Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1998, 9(4): 392–400. [王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 392–400.]
- [13] Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(4): 431–439. [施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. *气象学报*, 1995, 53(4): 431–439.]
- [14] Wu Shaohong, Luo Yong, Wang Hao, et al. Climate change impacts and adaptation in China: current situation and future prospect [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(10): 1042–1054. [吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望[J]. *科学通报*, 2016, 61(10): 1042–1054.]
- [15] Feng Ziliang, Sheng Yu, Chen Ji, et al. Analyzing the temperature regime within the block stone embankment of the newly constructed Gonghe-Yushu Expressway in Qinghai Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4):

- 969–975. [冯子亮, 盛煜, 陈继, 等. 青海省共和-玉树高速公路新建块石路基下的温度状况分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 969–975.]
- [16] Yang Jianping, Yang Suqiao, Li Man, et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1436–1445. [杨建平, 杨岁桥, 李曼, 等. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1436–1445.]
- [17] Wang Chenghai, Jin Shuanglong, Shi Hongxia. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 1–8. [王澄海, 靳双龙, 施红霞. 未来 50 a 中国地区冻土面积分布变化[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 1–8.]
- [18] Chang Xiaoli, Jin Huijun, He Ruixia, et al. Review of permafrost monitoring in the northern Dahinggan Mountains, Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 93–100. [常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 大兴安岭北部多年冻土监测进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 93–100.]
- [19] Zhou Youwu, Wang Yinxue, Gao Xingwang, et al. Ground temperature, permafrost distribution and climate warming in Northeastern China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl 1): 139–147. [周幼吾, 王银学, 高兴旺, 等. 我国东北部冻土温度和分布与气候变暖[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 139–147.]
- [20] Fu Chuanbo, Dan Li, Wu Jian, et al. Variation and abrupt change of maximum depth of frozen soil over Xinjiang under the background of global warming, 1961–2005[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1410–1418. [符传博, 丹利, 吴涧, 等. 全球变暖背景下新疆地区近 45 a 来最大冻土深度变化及其突变分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1410–1418.]
- [21] Zhou Xiaohan, Zeng Yanhua, Yang Zongxian, et al. Discussion of anti-freeze and frost resistance of shallow buried tunnels in high latitude cold region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 121–128. [周小涵, 曾艳华, 杨宗贤, 等. 高纬度寒区浅埋隧道的温度场及防寒抗冻探讨[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 121–128.]
- [22] Gao Yonggang, Zhao Huiying, Gao Feng, et al. Climate change trend in future and its influence on wetlands in the Greater Khingan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 47–56. [高永刚, 赵慧颖, 高峰, 等. 大兴安岭区域未来气候变化趋势及其对湿地的影响[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 47–56.]
- [23] Wang Yanqiu, Gao Yuzhong, Pan Huasheng, et al. Effect of climate warming on major crops in Heilongjiang Province[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(6): 373–378. [王艳秋, 高煜中, 潘华盛, 等. 气候变暖对黑龙江省主要农作物的影响[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 373–378.]
- [24] Zhang Guihua, Wang Yanqiu, Zheng Hong, et al. Effect of climate warming on crop production in Heilongjiang Province and its countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(4): 95–100. [张桂华, 王艳秋, 郑红, 等. 气候变暖对黑龙江省作物生产的影响及其对策[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 95–100.]
- [25] Liu Xiaofei, Zhang Zhao, Shuai Jiabing, et al. Effect of chilling injury on rice yield in Heilongjiang Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1223–1232. [刘晓菲, 张朝, 帅嘉冰, 等. 黑龙江省冷害对水稻产量的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1223–1232.]
- [26] Zhao Xianbo, Liu Zhenping, Xu Shiguo, et al. Study of the black soil plow layer moisture changing with temperature in freeze-thaw cycle period in the seasonal frozen soil regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 931–939. [赵显波, 刘振平, 许士国, 等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融循环期湿度与温度变化研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 931–939.]
- [27] Cai Peng, Li Fang, Wang Zhengquan, et al. Correlation analysis between air and ground temperatures in Jining Prefecture of Shandong Province from 1961 through 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1538–1543. [蔡鹏, 李芳, 王政权, 等. 1961–2015 年山东省济宁市地温与气温变化的相关分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1538–1543.]
- [28] Feng Yingying, Li Zhuolun. Spatial and temporal evolution of the negative accumulated temperature in Northeast China from 1957 through 2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1529–1537. [冯滢滢, 李卓仑. 1957–2007 年东北地区负积温时空演变[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1529–1537.]
- [29] Huang Jiayou. Statistical analysis and forecast method of meteorology[M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 28–36. [黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 2004: 28–36.]
- [30] Wang Shaowu. The trend over China and global temperature in the last hundred years[J]. Meteorological Monthly, 1990, 16(2): 11–15. [王绍武. 近百年我国及全球气温变化趋势[J]. 气象, 1990, 16(2): 11–15.]
- [31] Cui Yan, Li Qian, Zhou Xiaoyu, et al. Simulation and projection of the surface temperature based on five global climate models over the Northeast China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 29(4): 37–46. [崔妍, 李倩, 周晓宇, 等. 5 个全球气候模式对中国东北地区地面温度的模拟与预估[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(4): 37–46.]
- [32] Wang Chenghai, Li Jian, Xu Xiaoguang. Universality of quasi-3-year period of temperature in last 50 years and change in next 20 years in China[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(1): 126–136. [王澄海, 李建, 许晓光. 中国近 50 年气温变化的准 3 年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 126–136.]
- [33] China Meteorological Administration. National Climate Change Center. The monitoring bulletin of climate change in China: 2015[M]. Beijing: Science Press, 2016: 17. [中国气象局气候变化中心. 中国气候变化监测公报: 2015 年[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 17.]
- [34] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068–1076. [沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076.]
- [35] IPCC Working Group I. Working Group I contribution to the IPCC fifth assessment report; climate change 2013; summary for policymakers[R/OL]. [2016-11-29]. http://www.climate-change2013.org/images/report/WGIAR5_SPM_FINAL.pdf.
- [36] Song Bin, Zhi Xiefei, Hu Yaoxing. A review of recent studies on global warming hiatus[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(2): 145–154. [宋斌, 智协飞, 胡耀兴. 全球变暖停滞的形成机制研究进展[J]. 大气科学学报, 2015, 38(2): 145–154.]

[37] Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. Pause for thought[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10(4): 303 – 306. [王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 对变暖停滞的思考[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 303 – 306.]

[38] Déqué M, Dreveton C, Braun A, et al. The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modeling[J]. *Climate Dynamics*, 1994, 10(3): 249 – 266.

[39] Wang Ji. Projection and evaluation of the extreme temperature events simulation over China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008: 82 – 88. [王冀. 中国地区极端气温变化的模拟评估及其未来情景预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008: 82 – 88.]

[40] Zou L W, Zhou T J, Li L, et al. East China summer rainfall variability of 1958 – 2000: dynamical down scaling with a variable-resolution AGCM[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 6394 – 6408.

[41] Yang Hao, Jiang Zhihong, Li Zhaoxin. Simulation of the East Asian summer climate with LMDZ4: a variable resolution model[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(4): 433 – 444. [杨浩, 江志红, 李肇新. 变网格模式 LMDZ4 对东亚夏季气候的模拟检验[J]. *大气科学学报*, 2016, 39(4): 433 – 444.]

[42] Yao Yao, Luo Yong, Huang Jianbin. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2012, 8(4): 250 – 256. [姚遥, 罗勇, 黄建斌. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(4): 250 – 256.]

An analysis of air temperature evolution and its future trend
in Heilongjiang Province

GAO Yuzhong¹, WANG Chengwei², WANG Ji³, HU Wendong⁴

(1. Heilongjiang Meteorological Bureau, Harbin 150001, China; 2. Heilongjiang Meteorological Observatory, Harbin 150030, China;
3. Beijing Climate Center, Beijing 100089, China; 4. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Using the annual mean and monthly mean air temperature data from 1961 to 2015 in Heilongjiang Province, a study was conducted on mean air temperature of the whole year, cold and warm seasons. The results showed that the interannual variation of air temperature in cold season had changed more and that in warm season had changed less. It is consistent with most other parts of China, that is, a relative colder period and a warmer period that lasted approximately 20 – 30 years in Heilongjiang Province under the background of unanimous warming trend in last century, while the criteria of colder and warmer periods were defined as follows: in a cycle of cold-warm, a warmer (colder) period is the continuous year that the average anomaly $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$). If there is a reverse anomaly in a colder or warmer period, the lasting time should be ≤ 2 years. It is notable that if there is a climate trend of positive (negative) anomaly ≥ 4 years, even anomaly is negative (positive), it must be defined as a warmer (colder) period. As for the beginning and ending years of the warmer and colder period, they must depend on the climate trend, or it is a stable turning year that anomaly > 3 years. In the light of the criteria here above, the mutation years of periods was: 1964 from warmer to colder, 1988 from colder to warmer, 2009 from warmer to colder for cold season and the whole year. While 1969 from warmer to colder, 1996 from colder to warmer and around 2015 from warmer to colder. In the periods of warmer and colder, the interannual variations are relatively small and the climate trends in colder periods are higher than those in warmer periods. There are slight differences between the beginning and ending times for warmer and colder periods, and those of warmer period lag behind of those of colder period about 6 years. Interannual variation of air temperature is more in cold season than that in warm season. It is showed that a cold season entered colder period in 2009 and a warm season entered (or turning into) colder period around 2015. By using the LMDZ4 model and periodic statistics, the warm (cold) season air temperature was projected and discussed during 2016 – 2030 in Heilongjiang Province. Though the results of the two methods are not completely consistent, it is shown that the phenomenon of warming may be slowed down or even stagnated, a relatively colder period more likely be found in Heilongjiang Province.

Key words: air temperature change; warmer (colder) period; warm (cold) season; air temperature forecast; Heilongjiang Province

(本文编辑: 武俊杰)