

# 中国近四十年最高最低温度变化\*

翟盘茂 任福民

(国家气候中心, 北京, 100081)

## 摘 要

利用中国 1951-1990 年的实测资料, 在剔除测站迁移和城市化热岛效应对气候变化趋势的可能影响之后, 研究了中国最高温度、最低温度的时空变化趋势特点。结果表明, 最高温度在 95°E 以西及黄河以北地区普遍呈增温趋势, 而在东部黄河以南却呈降温趋势; 最低温度在全国普遍呈增温趋势, 在高纬度地区增暖最明显。这种变化使得日较差表现出明显的减少趋势。

虽然最高、最低温度变化的准周期性规律是一致的, 但它们的线性变化趋势却呈现出明显的不对称性。最低温度的显著升高反映了近 40a 中温室效应持续加强的迹象。进一步的分析表明, 最高最低温度变化是与日照条件及大气水分条件相关联的。

关键词: 最高温度, 最低温度, 变化。

## 1 引 言

全球气候在过去 100a 中变暖了 0.3-0.6℃, 在近 40a 中变暖了 0.2-0.3℃<sup>[1]</sup>。中国的一些研究也表明, 在 1951-1990 年期间年平均温度升高了 0.3℃<sup>[2]</sup>。国外一些深入的研究结果指出, 全球陆面温度的升高过程中多数地区的最低温度升高明显高于最高温度的升高, 因而表现出一种日夜增暖的不对称性, 使得日较差变小<sup>[3-4]</sup>。在全球气候变化研究中, 虽然中国的情况也一直受到国际上的关注<sup>[3-5]</sup>, 但对中国最高和最低温度的变化规律的研究仍然非常粗略, 对于温度变化规律形成原因讨论方面的工作更加少见。IPCC 第一工作组首席科学家特别号召各国开展最高最低温度变化研究<sup>[6]</sup>, 因为这项研究对于深入了解气候变化规律及探讨气候变化原因具有十分重要的意义。

气候资料质量会影响气候变化观测研究结果。气候资料中的过失误差可以通过质量控制(QC)技术进行。另一类误差属于系统误差, 通常由于观测仪器、场地变化以及观测和处理过程中采用的方法变化等因素引起。Karl 等<sup>[7]</sup>研究发现台站迁移和仪器变更可以使气候资料产生 1℃ 以上的系统偏差; Johns<sup>[8]</sup>利用中国东部部分资料发现城市测站的年平均温度增暖比农村测站明显偏高; Portman<sup>[9]</sup>指出, 在中国北部平原人口密度大的城市热岛效应偏差也大, 这种偏差对气候变化的影响在春夏季比秋冬季更大一些; 中国陈隆勋<sup>[10]</sup>和赵宗慈<sup>[11]</sup>也关注到了这一问题。

\* 初稿时间: 1996 年 4 月 26 日; 修改稿时间: 1996 年 8 月 5 日。

在比较完整的资料基础上(中国仅缺台湾),比较严格地对资料进行了质量检查,并剔除了序列不完整、台站有较大迁移以及城市化影响较大的测站,然后深入研究了 1951-1990 年期间最高、最低气温及气温日较差变化规律,并探讨了其可能影响的原因。

## 2 资料处理

文中使用的最高最低温度资料为国家气象中心整理的 369 个测站资料。因台站迁移或城市化效应比较明显的测站资料有可能给气候序列产生不均一性,从而影响气候变化研究结果,在分析中没有使用。测站迁移的判别方法通过其经纬度及高度变化进行。其具体方法为:

若  $\lambda$  为测站经度,  $\varphi$  为纬度,  $h$  为高度,  $R$  为地球半径,在序列的第  $i$  年和第  $j$  年之间测站距离变化  $d_{ij}$  与高度变化  $h_{ij}$  满足以下条件之一时,即:

$$d_{ij} > 20\text{km} \quad (1)$$

其中

$$h_{ij} > 50\text{m} \quad (2)$$

$$d_{ij} = R \sqrt{(\varphi_i - \varphi_j)^2 + (\lambda_i \cos \varphi_i - \lambda_j \cos \varphi_j)^2} \quad (3)$$

情况下,该测站被剔除。

根据 Karl 等<sup>[4]</sup>的研究结果,在中国 50 万人口以下的城市所产生的热岛效应在气候变化中的影响可以忽略,为了尽量排除大城市带来的城市热岛效应,原始资料中还剔除了 50 万人口以上的大城市测站资料。

虽然文中使用的原始资料已经过资料业务部门初步的质量检查,但仍然有一些错误资料,因此,设计了以下方法实行资料的质量检查。

首先计算各测站逐月均方差及距平,如果  $i$  站均方差为  $\sigma_i$ ,第  $m$  年的距平为  $\Delta T_{im}$ ,当距平明显偏大,达到

$$\left| \frac{\Delta T_{im}}{\sigma_i} \right| > 2 \quad (4)$$

与  $i$  站周围 250km 范围内测站  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ,  $n$  为邻站数) 相比较,要求至少有 2/3 的测站满足:

$$\frac{\Delta T_{im}}{\sigma_i} \cdot \frac{\Delta T_{jm}}{\sigma_j} > 0 \quad (5)$$

$$\left| \frac{\Delta T_{im}}{\sigma_i} \right| - 1 \quad \left| \frac{\Delta T_{jm}}{\sigma_j} \right| \quad \left| \frac{\Delta T_{im}}{\sigma_i} \right| + 1 \quad (6)$$

第  $i$  站的第  $m$  年的资料才能被认为正确,否则,该资料视为错误。

通过以上 3 步处理,资料中基本上消除了城市热岛效应、台站迁移和错误资料的影响。表 1 给出了关于这些处理的统计情况。可以看到,过去 40 多年中,中国有约 1/4 的测站发生了比较明显的台站迁移,有约 9% 的资料来源于大城市测站。

表 1 城市热岛效应、台站迁移和资料质量控制处理的统计

剔除原因	剔除量	原总量	剔除百分率
城市热岛(人口> 50 万)	32 站	369 站	8.67%
台站迁移	90 站	369 站	24.39%
QC	385 个	247 × 480 × 4 个	0.08%

在上述过程进行之后,把月距平资料按 12-2 月为冬季,3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月秋季生成逐季序列,全国序列的生成采取面积加权方法进行,当某省面积为  $A_k$ ,某年温度距平为  $\Delta T_{mk}$ ,具体计算为

$$\Delta T_m = \frac{\sum_{k=1}^M A_k \Delta T_{mk}}{\sum_{k=1}^M A_k} \quad (7)$$

获得序列之后,以线性化

$$T(t) = a + bt \quad (8)$$

来拟合原序列  $T$ ,按最小二乘法可求得变化趋势:

$$a = \frac{t^2 T - t tT}{n t^2 - (t)^2} \quad (9)$$

$$b = \frac{n t tT - t T}{n t^2 - (t)^2} \quad (10)$$

为了反映其变动情况,还对序列进行了二项式 9 点滑动平均处理,方法为

$$\Delta T_m = \frac{1}{4} \omega \times \Delta T_{m-i} \quad (11)$$

### 3 结果分析

#### 3.1 最高温度的气候变化趋势的空间分布

在年平均情况下(图 1a),最高温度在黄河以北及 95°E 以西地区普遍增暖,在东北和内蒙最北部表现出 0.3-0.5 / 10a 的明显增温趋势;在 95°E 以东 35°N 以南地区主要表现为降温趋势,大部分测站降温趋势幅度为 0.1-0.3 / 10a,其中最集中的降温区域在江淮、江南、四川等地区。

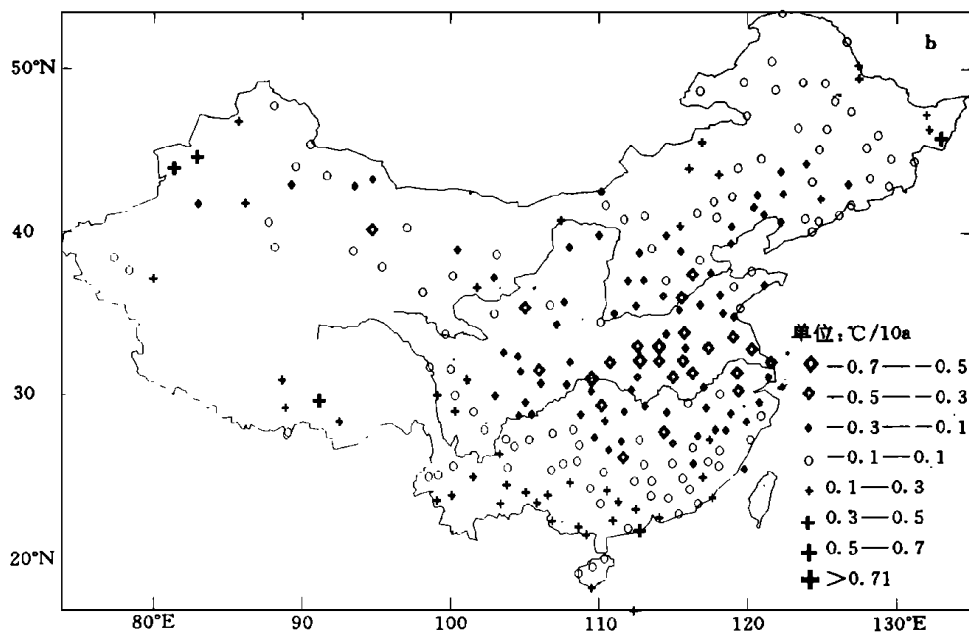
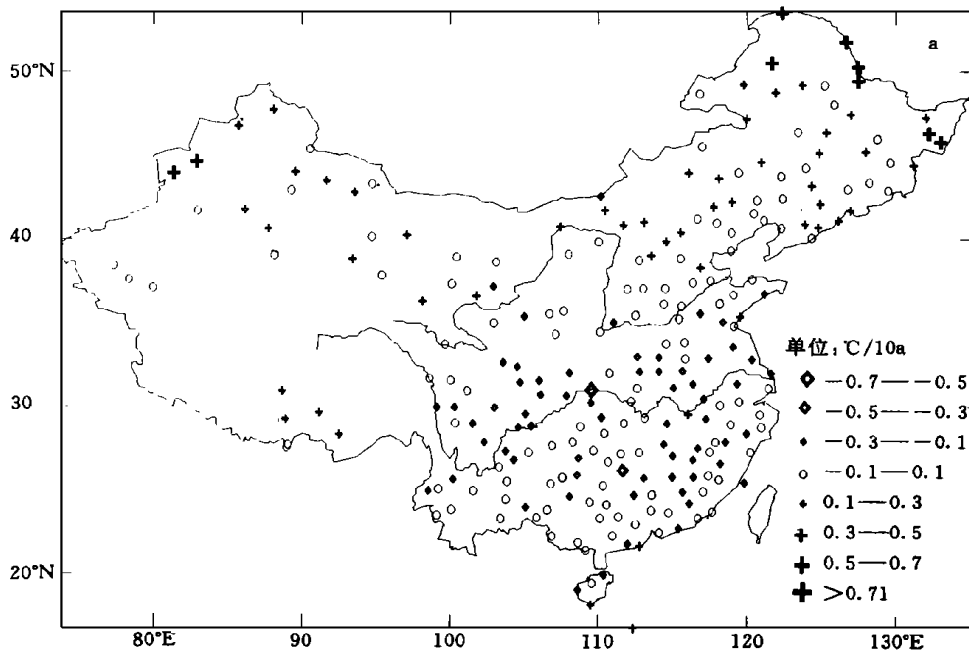
最高温度的变化趋势在不同季节不同地区的分布也不一致。

春季时增温区主要位于东北和内蒙东部地区,增温幅度在高纬度地区可达 0.3-0.5 / 10a;降温区域则主要集中在河西走廊、西南地区 and 东南沿海地区,一些地区降温明显,达 0.3-0.5 / 10a;在青藏高原、新疆、长江中下游平原及华北等地春季平均最高温度变化趋势不明显。

夏季(图 1b)时最高温度增温区域主要位于南部沿海地区及青藏高原东南部地区,长江至黄河流域一带主要以降温趋势为主,在江淮地区降温趋势达 0.3-0.7 / 10a。

秋季与冬季(图 1c)在黄河以北及中国西部地区最高温度表现出增温趋势,黄河以南

地区以降温为主,但秋冬季在温度变化趋势的幅度却有比较明显的不同。秋季降温趋势基本上为  $0.1-0.3 / 10a$ ,局部地区降温达  $0.5 / 10a$  以上。冬季北方最高温度增加普遍可达  $0.3-0.5 / 10a$ ,一些地区高达  $0.7 / 10a$ 。



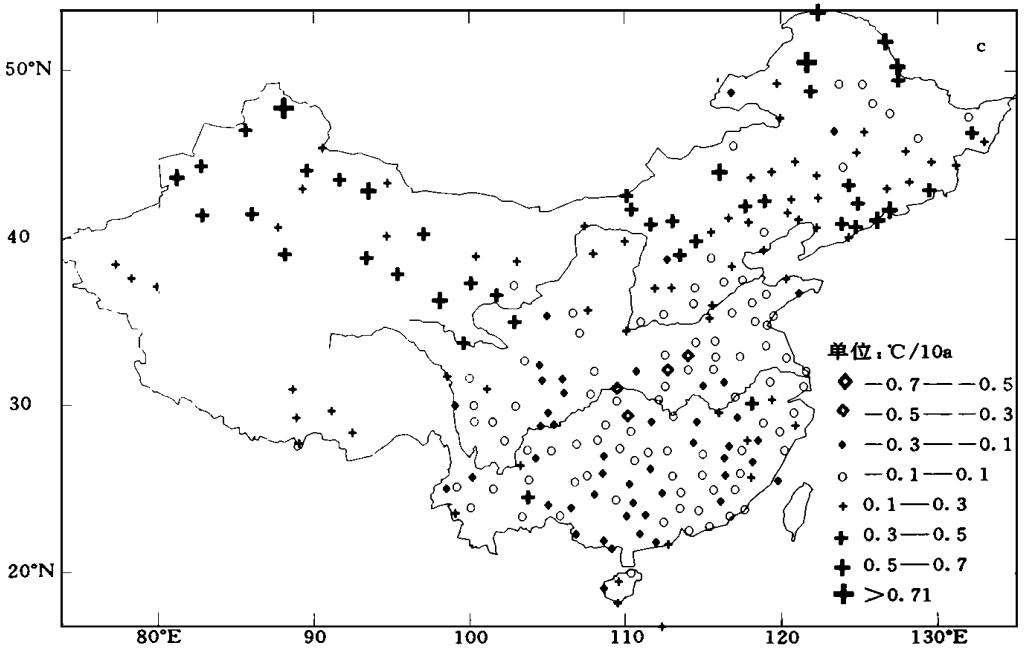
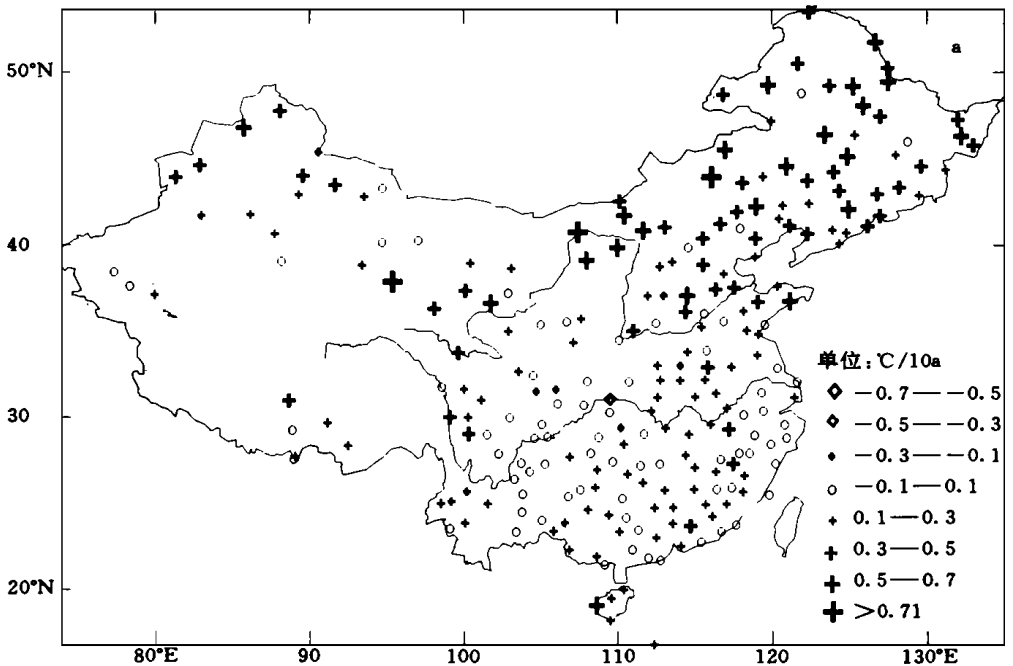


图1 中国最高温度变化趋势的空间分布  
(a. 年平均; b. 夏季; c. 冬季)

### 3.2 最低温度的气候变化趋势的空间分布

在年平均情况下(图 2a),最低温度在全国普遍呈增温趋势,在增温幅度上北方较大,



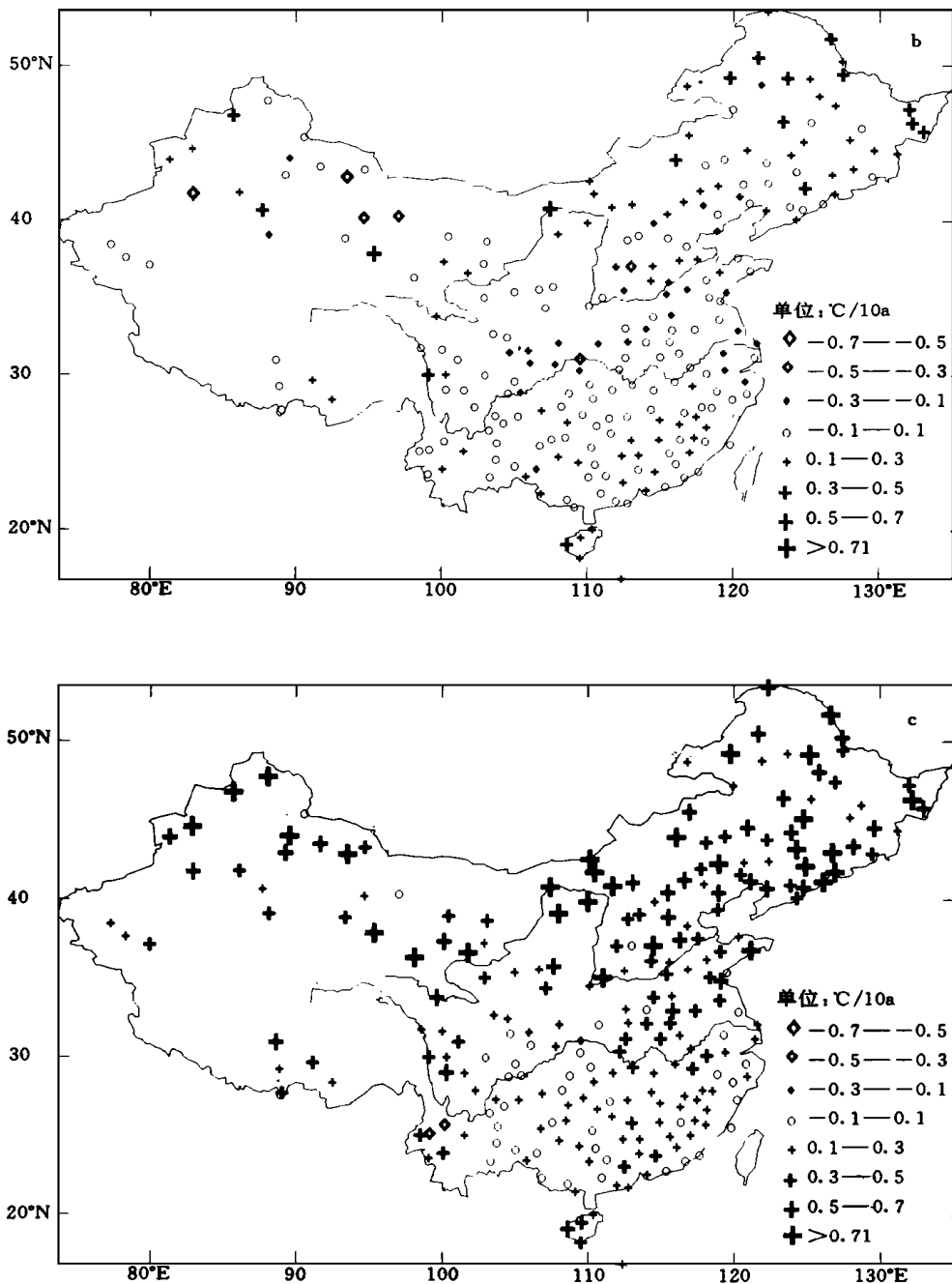


图2 中国最低温度变化趋势的空间分布

(a. 年平均; b. 夏季; c. 冬季)

南方较小。东北、华北和新疆北部、黄河以及长江上游明显增温达  $0.3\text{--}0.5 / 10\text{a}$ ; 黄河以南除江南东部地区、四川盆地及西南部分地区变化不大以外, 其余大部地区表现出  $0.1$

- 0.3 / 10a 的增温趋势。

在春季, 华北、东北、内蒙东部以及新疆北部最低温度呈 0.3- 0.7 / 10a 明显增暖趋势, 东北高纬度一些地区高达 1.0 / 10a; 在中国西部及黄河至长江之间地区主要呈较弱的增温趋势; 在长江以南地区春季最低温度变化趋势不明显。

夏季时(图 2b), 东北、华北以及中国东南部地区呈较弱的增温趋势; 在四川东部、黄河下游以及长江下游一些地区表现为较弱的降温趋势。

在秋季与冬季, 全国表现出一致的增温趋势, 但冬季的增温明显高于秋季。冬季时(图 2c), 新疆、西北、华北、内蒙、东北等纬度较高的地区最低温度以 0.5- 0.9 / 10a 的趋势明显增暖; 在黄河以南最低温度增暖趋势随纬度降低有所减缓。

### 3.3 日较差的气候变化趋势的空间分布

从图 3 中可以看出, 年平均情况下全国普遍表现出比较一致的日较差变小的趋势, 其中东北、内蒙东部、黄河下游、河套北部、西北东部、江淮、川西、江南中部等地日较差以 0.3- 0.7 / 10a 的趋势明显减小; 在西部地区、长江三角洲、四川盆地一带日较差变化不大。

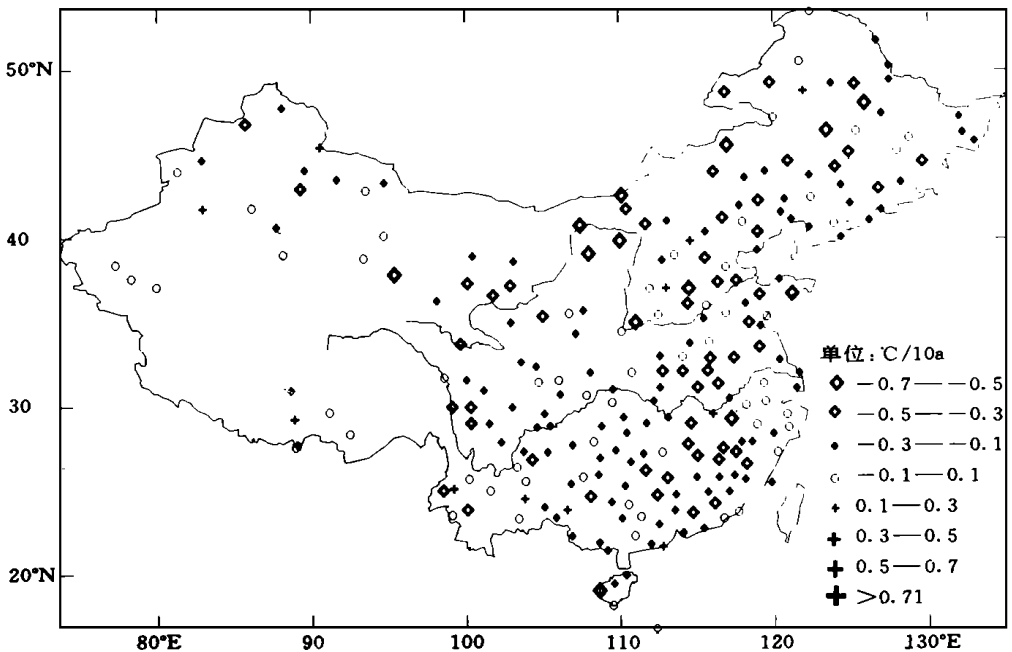


图 3 中国年平均温度日较差变化趋势的空间分布

对比最高最低温度变化趋势的空间分布可发现, 35°N 以北具有日较差变小趋势是以最低温度变暖高于最高温度变暖为特点, 但在 35°N 以南日较差变小是以最高温度降低的同时最低温度升高为主要特点。这与全球的结果<sup>[4]</sup>有差异。

### 3.4 全国平均最高最低温度及日较差变化

#### 3.4.1 线性变化趋势

表 2 中国平均最高、最低温度及日较差变化趋势(0.1 / 10a)

	最高 趋势	$R^2$	最低 趋势	$R^2$	日较差 趋势	$R^2$
春季	0.27	-	<u>1.79</u>	24	<u>-1.51</u>	33
夏季	-0.06	-	0.01	-	<u>-0.07</u>	11
秋季	0.00	-	<u>1.53</u>	18	<u>-1.53</u>	44
冬季	1.44	-	<u>4.17</u>	34	<u>-2.73</u>	45
年	0.30	-	<u>1.75</u>	45	<u>-1.31</u>	52

注:  $R^2$  为趋势在 95% 显著性水平下所反映的方差百分比, 划线部分通过 95% 信度检验

表 2 是中国平均最高、最低温度及日较差变化趋势。表中反映出整个中国在过去 40a 中, 最低温度在春季、秋季、冬季 3 个季节中明显增加, 其中以冬季最为明显, 每 10a 增加 0.4 左右。最高温度在年平均情况下略有增加, 主要增暖发生在冬季, 但在统计上不具有显著意义。日较差在过去 40a 中减少了 0.5, 趋势所反映的方差百分比已超过 50%。在

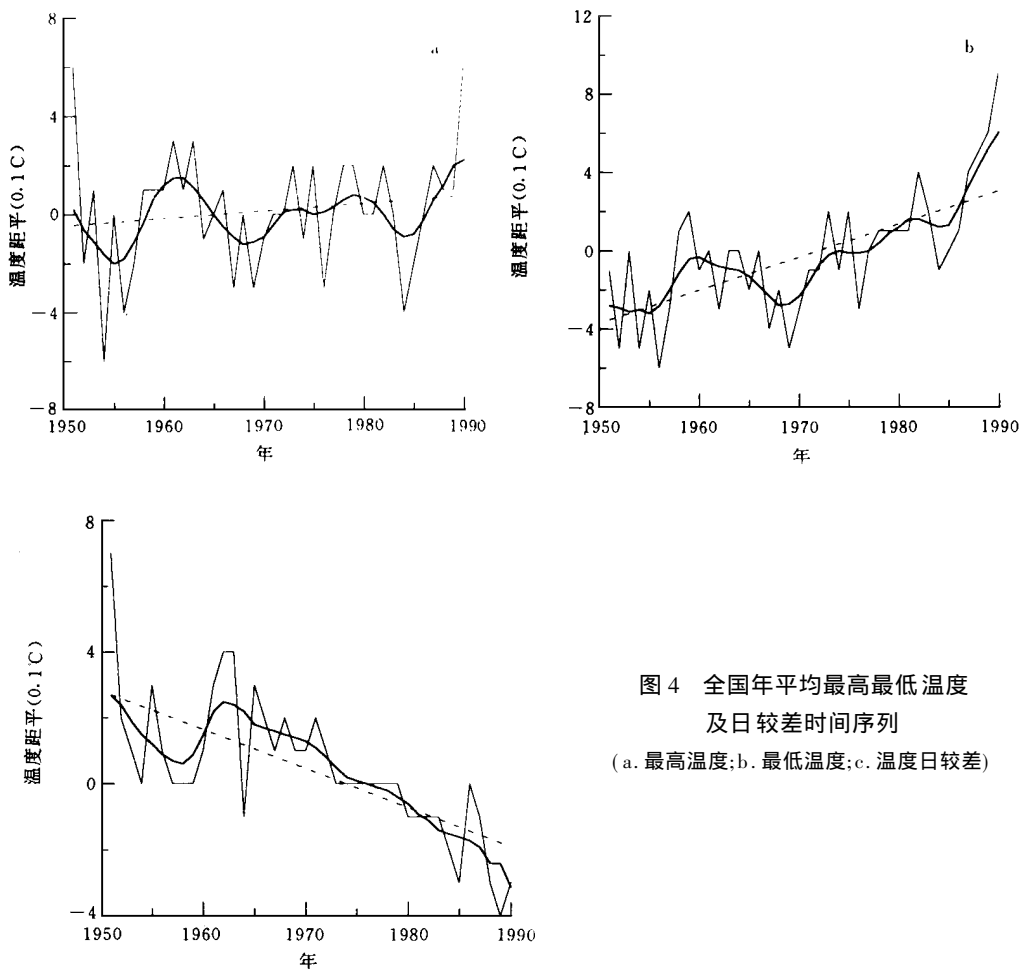


图 4 全国年平均最高最低温度及日较差时间序列  
(a. 最高温度; b. 最低温度; c. 温度日较差)



4 个不同的季节里日较差都有显著的变小趋势,其中以冬季最为明显,春季和秋季次之,夏季最小。中国年平均日较差在 1960 年代以后(见图 4)具有明显的变小趋势。就全国平均而言,年平均日较差的显著变小主要是由于最低温度的明显增暖引起。

### 3.4.2 周期性变化特点

图 4 为年平均最高、最低温度和日较差在过去 40a 中的变化曲线,其中粗实线为 9 点二项式距平滑滑动平均值,这种滑动平均比较好地去掉高频变化部分,并能较好地反映较长周期的气候变化情况及增温和降温趋势。

图 4 中可以看出,在 1950 年代最高温度偏低,1960 年代末到 1970 年代初以及 1980 年代中期最高温度偏低。最低温度虽然以持续增暖为最主要特点,但仍然表现出波动性变化特点,在 1950 年代初中期、1960 年代后期到 1970 年代初最低温度偏低,在 1970 年代之后最低温度有明显的增加。在滤去线性变化趋势以后,参考文献[12]的隐含周期提取方法,在 95% 信度水平下,分析显著的变化周期。从年平均最高、最低温度序列中都发现温度变化具有比较明显的 15a 左右周期。最高、最低温度在过去 40a 中其线性变化趋势是不一致的,但两者周期性的变化特点却是协调的。这也显示出温室效应的作用在夜间已表现得相当明显。

## 4 关于最高最低温度变化规律原因的一些讨论

### 4.1 日较差变小的可能原因

引起中国最高最低温度变化从而导致中国日较差的普遍变小的可能原因是值得深入讨论的,这对于平均温度变化趋势的解释也很有意义。由于中国过去 40a 中日较差变小与最低温度变化明显升高有关,这是温室效应加强的结果。人为释放的温室气体(如  $\text{CO}_2$ )浓度的增长当然可能是其中的一个原因,但是应该认识到大气水分的增长也可以产生明显的温室效应。单考虑人为释放的温室气体的增长无法解释最高最低温度变化的不对称性以及最高最低温度变化的地域性差异。国外的研究发现云量的增加对全球陆面部分的日较差有较大影响,但在中国云量变化与日较差变小的关系不明显,认为可能与中国的云观测资料质量有关<sup>[4]</sup>。考虑到常规云资料主要依赖目测取得,为了比较客观地反映情况,文中根据实际资料状况选择了东北、华北、西北、西南、华南和长江中下游地区代表测站 1970–1990 年的日照百分率、大气水汽含量与最高最低温度之间的相关关系进行讨论。

表 3 日照百分率与最高温度  $T_M$  的相关关系

测 站	1 月	4 月	7 月	10 月
嫩 江	- 0.05	<u>0.43</u>	<u>0.75</u>	<u>0.52</u>
呼和浩特	0.28	<u>0.63</u>	<u>0.57</u>	0.18
伊 宁	0.39	<u>0.47</u>	0.30	<u>0.75</u>
甘 孜	0.21	<u>0.72</u>	0.22	<u>0.69</u>
桂 林	<u>0.57</u>	<u>0.43</u>	<u>0.66</u>	<u>0.61</u>
衢 州	0.48	0.39	0.94	0.52

注: 划线部分通过 95% 的信度检验, 以下同。

表 3 中比较清楚地显示出日照百分率与最高温度具有较好的正相关关系, 绝大部分测站在冬季以外的季节中具有显著的相关关系(95% 显著性水平), 表现出日照的变化在最高温度变化中的作用。冬季时, 两者之间相关关系不显著原因可能与冬季最高温度变化更加依赖于其它因素, 如冷空气活动有关。可以推断, 夏季一些地方最高温度的变小趋势可能与日照的变少趋势相关联的。如果测站周围环境不发生变化, 影响日照百分率变化的因素主要为大气透明度状况, 云、气溶胶、大气水分含量的变化都可能影响大气透明度状况。

表 4 中显示出整层大气水汽(地面-200hPa)与最低温度的关系较明显, 尤其在夏季以外的其它季节。这暗示了温度较低情况下的夜间大气水汽温室效应在气候变暖过程中起到了重要的作用。

表 4 整层大气水汽含量与最低温度  $T_N$  的相关关系

测 站	1 月	2 月	7 月	10 月
嫩 江	<u>0.63</u>	<u>0.92</u>	<u>0.93</u>	<u>0.83</u>
呼和浩特	0.14	0.32	0.31	<u>0.87</u>
伊 宁	<u>0.74</u>	<u>0.68</u>	<u>0.61</u>	<u>0.72</u>
甘 孜	0.37	<u>0.74</u>	<u>0.91</u>	<u>0.87</u>
桂 林	<u>0.62</u>	<u>0.75</u>	0.18	<u>0.74</u>
衢 州	<u>0.65</u>	<u>0.72</u>	- 0.03	<u>0.85</u>

从表 5 中, 可看出大气水分和日照百分率之间存在着比较显著的反相关关系。这也可以推断大气水分的增加, 可以影响日照条件, 在短波辐射起主要作用情况下影响白天温度, 日照变少使得最高温度降低。另外, 大气水分的增加可以使温室效应在长波辐射起关键作用的情况下(冬季和夜间)明显地显示出来。

表 5 整层大气水汽含量与日照百分率 的相关关系

测 站	1 月	4 月	7 月	10 月
嫩 江	- 0.37	<u>- 0.43</u>	<u>- 0.49</u>	<u>- 0.45</u>
呼和浩特	<u>- 0.61</u>	- 0.35	<u>- 0.62</u>	<u>- 0.42</u>
伊 宁	- 0.23	<u>- 0.79</u>	- 0.38	<u>- 0.42</u>
甘 孜	- 0.25	<u>- 0.61</u>	<u>- 0.79</u>	- 0.03
桂 林	<u>- 0.65</u>	<u>- 0.69</u>	<u>- 0.60</u>	<u>- 0.77</u>
衢 州	<u>- 0.76</u>	<u>- 0.70</u>	- 0.38	<u>- 0.82</u>

## 4.2 与平均温度变化的一些联系

中国近 40a 地面平均气温变化规律表明, 35°N 以北增温, 35°N 以南、南岭以北、青藏高原以东地区变冷, 尤其在四川盆地, 1950 年代以来一直在降温<sup>[10]</sup>。通过最高、最低温度的变化趋势分析, 可以发现, 35°N 以北平均温度的增温在夜间明显高于白天, 而在 35°N 以南的降温则主要由于白天的明显变冷引起。四川盆地虽然与其下游的江淮地区一样, 夏季最高温度在变冷, 但与江淮地区不一样的是, 四川盆地最低温度也略有降低。因此, 四川盆地夏季平均温度的降低比其它地区更为明显。有人认为, 四川的降温是人类活动引起的

硫化物气溶胶浓度的迅速增加造成的,这是值得讨论的。气溶胶的增加虽然能使白天温度降低,但却不易解释晚间温度的下降。再之,四川盆地大气气溶胶( $\text{SO}_2$ )浓度比江淮流域大得多,但江淮流域夏季白天降温比四川盆地更明显,这也难以用气溶胶浓度的增加来解释温度降低的趋势。

## 5 小 结

(1) 全国平均的年最高温度在过去 40a 中虽略有增暖,但在统计上不具有显著性意义。最低温度具有显著增暖趋势,因而表现出显著的日较差变小趋势。

(2) 从地域分布上看,最高温度在黄河以北、95°E 以西以增温为主,其它地方以降温为主。最低温度则在全国表现出一致的增温,但在不同地区不同季节里变化趋势有较大差异。

(3) 在过去 40a 中虽然中国最低、最高温度变化线性趋势表现出非常明显的不对称性,但两者所显示的多年变化周期仍然是一致的。中国近 40a 的增暖主要由于夜间温度升高引起,这反映了温室效应的持续加强作用,但温室效应并不一定完全是人类活动引起,大气水分产生的温室效应也同时具有一部分作用。

(4) 进一步的相关分析表明,最高温度的变化与日照条件的变化具有较好的一致性,而最低温度的变化与大气水汽含量具有较好的关系。大气水汽含量与日照百分率间具有较好的反相关关系。因此,中国明显日较差变小趋势可能与大气水汽的增加有关。

## 参考文献

- [ 1 ] Houghton J T, et al. The science of climate change. Climate change 1995, IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995. 142pp.
- [ 2 ] 丁一汇,戴晓苏. 中国百年来的温度变化. 气象, 1994, 12: 19- 26.
- [ 3 ] Karl T R, Kukla G et al. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change. Geophys Res Lett, 1991, 18: 2253- 2256.
- [ 4 ] Karl T R, Jones P D, Knight R W et al. A new perspective on recent global warming: asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. Bull Amer Meteor Soc, 1993, 74(6): 1007- 1023.
- [ 5 ] Horton B. Geographical distribution of changes in maximum and minimum temperatures. Atmos Res, 1995, 37: 101- 117.
- [ 6 ] 赵宗慈. 温度日较差的不对称性研究动态. 气象科技动态, 1994, 38- 43.
- [ 7 ] Karl T R, Williams C N, Jr. An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities, J Clim Appl Meteor, 1987, 26, 1744- 1763.
- [ 8 ] Johns P D et al. Assessment for urbanization effect in time series of surface air temperature over land, Nature, 1990, 374, 109- 172.
- [ 9 ] Portman D A. Identifying and correcting urban bias in time series surface temperature in China's northern plains, Journal of Climate, 1993, 6: 2298- 2308.
- [ 10 ] 陈隆勋等. 近四十年中国气候变化的初步分析. 应用气象学报, 1991, 2: 164- 173.
- [ 11 ] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响. 气象, 1991, 4: 14- 17.
- [ 12 ] 项静恬, 史久恩等. 动态和静态数据处理. 北京: 气象出版社, 1991. 619- 634.

# ON CHANGES OF CHINA'S MAXIMUM AND MINIMUM TEMPERATURES IN THE RECENT 40 YEARS

Zhai Panmao Ren Fumin

(*National Climate Center, Beijing, 100081*)

## Abstract

Based on China's observational data from 1951–1990, after minimizing the possible biases caused by station relocation and urban heat island, the spatial and temporal distributions of trends for maximum and minimum temperatures are studied. The results show that increasing trends of maximum temperature are in the areas west to 95°E, and north to the Yellow River, however, decreasing trends were observed in eastern China south to the Yellow river. Minimum temperatures are generally increasing throughout China, with dominant warming trends at the higher latitudes. This resulted in very obvious decreasing trend for temperature daily range.

The quasi-oscillation cycles were consistent between the maximum and minimum temperatures, but asymmetric trends were obvious. The significant increase of minimum (night-time) temperatures reflects the evidence of enhancement of green house effect. Further analysis showed that the changes of maximum and minimum temperatures are mainly related to sun-shine duration and atmospheric water vapor content.

**Key words:** Maximum temperature, Minimum temperature, Change.