

近百年上海气候变暖过程的再认识—— 平均温度与最低、最高温度的对比*

江志红 丁裕国**

(南京气象学院, 南京 210044)

提 要

该文就近 113 年(1880~1992 年)上海逐月平均最低、最高和平均气温 3 个序列进行了深入的诊断分析. 结果发现: 最低气温和平均气温近百年虽都呈显著上升趋势, 但前者比后者更为持续稳定, 其增温率更高于后者. 这一特点表明, 最低气温对于监测温度效应加剧可能更为敏感; 最高气温自本世纪 40 年代中后期却出现了明显的趋势转折. 近百年上海气候变暖主要表现为三次突然增暖, 其中 10 年代的增暖仅限于白天, 30 年代则以白天增暖较多, 80 年代以来则主要发生于夜间. 这些事实将有助于进一步对上海及中国区域或全球变暖的再认识.
关键词: 气候变暖 气候突变 温室效应

引 言

近年来的研究表明, 过去几十年, 北半球大部分地区显著增暖主要发生在夜间, 其最低气温上升幅度大于最高气温, 平均夜间增暖 0.84°C , 而白天仅增暖 0.28°C ^[1]. 对中国 369 个站(1951~1990 年)气温资料分析表明, 年最高气温在过去 40 年中变化趋势不明显, 但最低气温却有明显上升趋势; 就地区分布而言, 最高气温仅黄河以北, 95°E 以西上升明显, 其它地区则多为下降, 而最低气温在全国各地呈现一致的上升趋势^[2]. 文献[3, 4]指出, 近百年中国平均气温场两次明显增暖期(20 至 40 年代和 80 年代以来)的时空结构有显著差异, 由此推断其成因不尽相同, 而文献[5]则认为, 温室效应加剧将更多地影响平均最低气温, 从而导致气温日较差减小.

上海是中国气象资料最完整可靠的测站. 利用该站 1880 年以来近一百多年各种温度资料(如平均最低、最高气温和平均气温)分析其各自变化特点及在不同增暖期的演变规律和相互关系, 对进一步全面认识气候变暖, 尤其是 80 年代以来的增暖及其成因将十分有益.

1 资料与方法

1.1 资料

以 1880~1992 年共 113 年上海各月平均最低、最高气温(以下简称 T_m 、 T_M)和各月

* 本文属“九五”国家攻关项目 96-908-01-01 课题论文.

** 本院 97 届毕业生王华参加计算工作.
1997-09-10 收到, 1997-12-13 收到修改稿.

平均气温(记为 T)为主要研究资料,并辅以极端最低和最高气温资料作参考.为了求得各季气温指标序列,取 3、4、5 月平均值为春季气温平均值,6、7、8 月平均值为夏季气温平均值,9、10、11 月和 12、1、2 月平均值分别代表秋季和冬季气温平均值.

1.2 方法

(1) 线性趋势的显著性及置信区间估计

从理论上说,某气象要素年际序列 $\{T_t\}, t=1, 2, \dots, n$ 的线性趋势可以用其线性变化率代表.设有

$$T_t = m_t + x_t \quad t = 1, \dots, n \quad (1)$$

式中 x_t 为含有噪声的随机平稳序列,则 m_t 即为趋势序列,一般可假定为线性趋势.

$$m_t = a + bt \quad t = 1, \dots, n \quad (2)$$

这里, b 为线性变化率.在正态假定和最小二乘估计意义下,可以证明¹⁾

线性变化率的估计方差由序列自身剩余方差和序列内的自相关(或功率谱结构)两部分构成.根据这一原理,在估计线性趋势 \hat{b} 时,应同时作区间估计和显著性检验.

(2) 突变检验

气候突变是指由一种稳定气候状态经短时间跳跃式地转变成另一种稳定气候状态的现象.观测研究表明,大致可分为四种类型的突变,即均值、变率、趋势和翘翘板突变.而其检测方法可有多种.文献[6]详细讨论过各种方法,但它们主要考察均值突变.文献[7]提出了双位相回归模式检测趋势的转折突变,收到较好效果.本文综合应用 t 检验、累积距平曲线法、Mann-Kendall 方法和双位相二次曲线回归模式,考察上海 3 个气温序列长期变化中的突变现象.

2 诊断分析结果

2.1 气温长期趋势及其突变

根据式(2)及其研究方法,分别求得近百年(1880~1992年)上海各季和年平均最低(\bar{T}_m)、最高(\bar{T}_M)气温以及年、季的平均气温(\bar{T})的线性变化率估计值(\hat{b})及其置信区间(表略).结果表明,各季和年的 \bar{T}_m 、 \bar{T} 都呈显著上升趋势,且 \bar{T}_m 增温率明显高于 \bar{T} , 显著性达 $\alpha=0.05$, 尤以冬季和年平均更为突出.例如,年的 \bar{T}_m 增温率为 $1.36^\circ\text{C}/100\text{a}$, 95% 置信区间在 $1.01\sim 1.71^\circ\text{C}$, 而年的 \bar{T} 增温率仅为 $0.86^\circ\text{C}/100\text{a}$, 明显高于全球气温的平均增长率($0.3\sim 0.6^\circ\text{C}/100\text{a}$), 这就表明上海乃是全球增温显著的地区^[8].图 1 给出了上海平均气温的长期趋势.从图 1 可以看到,上海年平均 \bar{T}_m 和 \bar{T} 都有显著上升趋势,尤其最低气温 \bar{T}_m 更为明显,年平均 \bar{T}_m 的近百年长期趋势基本上维持在零距平附近,升降趋势不明显(其它各季均类似,如春季 $\hat{b} = -0.0004^\circ\text{C}/100\text{a}$, 夏季 $\hat{b} = -0.0073^\circ\text{C}/100\text{a}$, 秋冬季则分别为 $-0.0028^\circ\text{C}/100\text{a}$ 和 $0.0038^\circ\text{C}/100\text{a}$, 平均全年则为 $-0.0018^\circ\text{C}/100\text{a}$).显然,这与最高气温在近百年中变化趋势的急剧转折及其不确定性有关.

1) 丁裕国, 江志红等. 长期气候趋势估计中的不确定性(待发表).

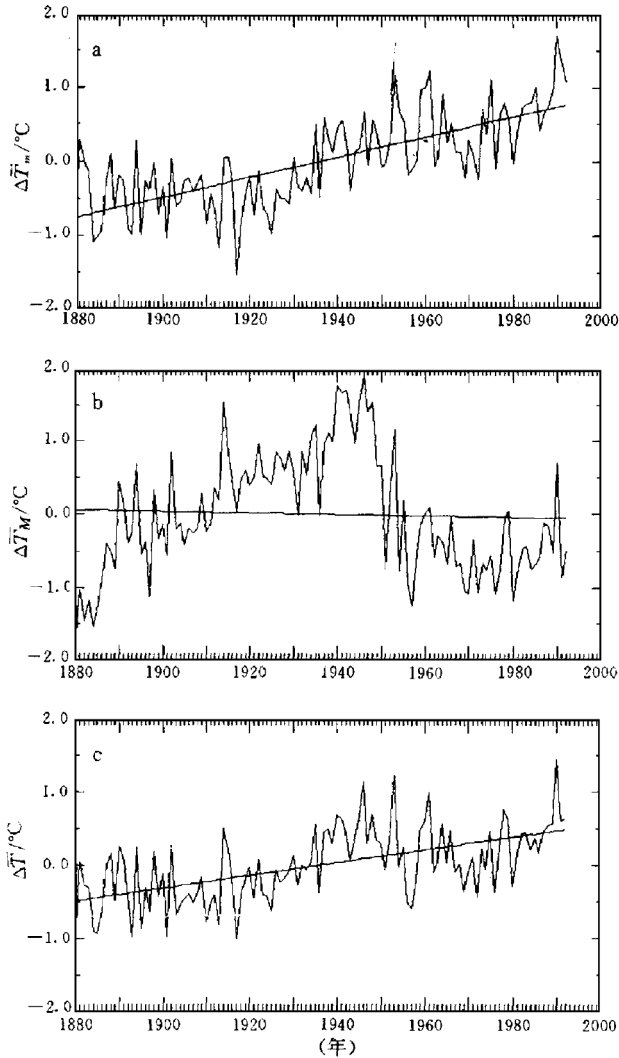


图1 上海年平均 \bar{T}_m 、 \bar{T}_M 及 \bar{T} 距平年际变化曲线及其线性趋势

(a) ΔT_m (b) ΔT_M (c) ΔT

图2分别绘出年的 \bar{T}_m 、 \bar{T}_M 及 \bar{T} 的累积距平曲线和M-K方法检测突变图.表1列出各种检测突变的结果.综合图2和表1得到如下事实:

(1)年和各季的 \bar{T}_m

近百年来,各季及年的平均最低气温(\bar{T}_m),大多有两次明显的突然增温,第1次出现在本世纪30年代中后期,第2次则发生在70年代末至80年代初,但夏季不明显.各种方法检测的结果,在时间上略有先后,如M-K方法检测到第1次突然增温在40年代;而t检验显示春夏季 \bar{T}_m 第1次突然增温在50年代;双位相回归模式显示,近百年中各季和年的 \bar{T}_m 长期变化并无显著的趋势转折.这就意味着,平均最低气温近百年来一直处于上升

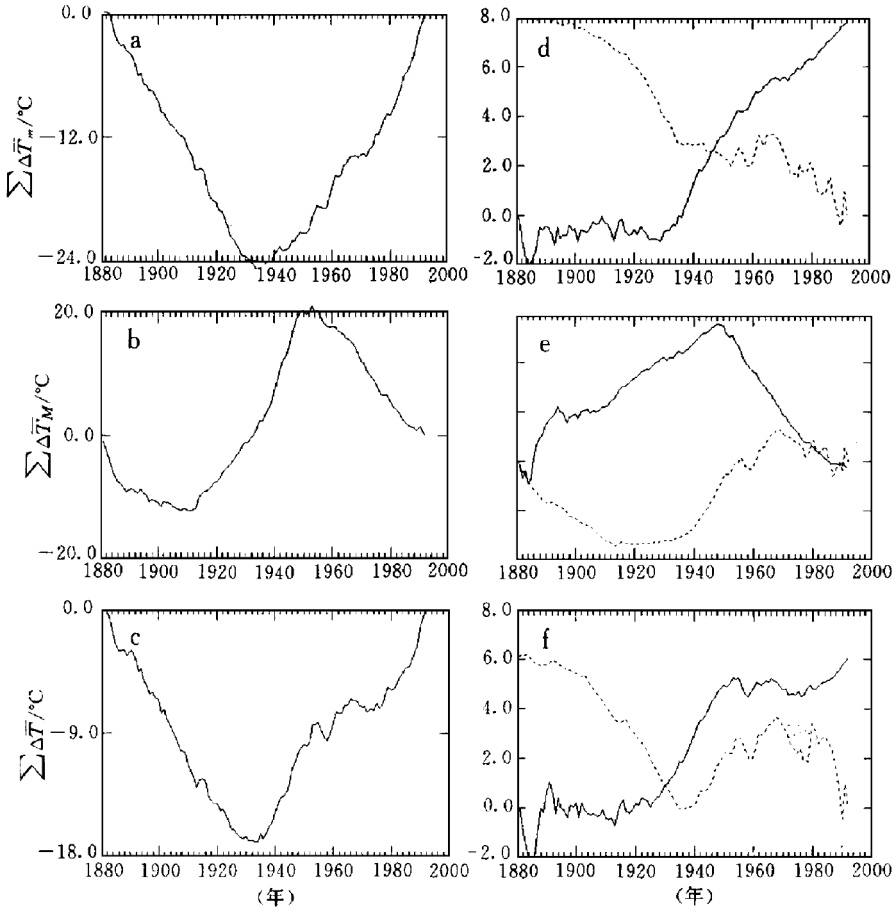


图2 上海年平均的 \bar{T}_m 、 \bar{T}_M 和 \bar{T} 的累积距平曲线(图a、b、c)和相对应的M-K检验(图d、e、f,其中实线为 $\mu(d_k)$,虚线为 $\bar{\mu}(d_k)$)

的趋势.

(2)年和各季的 \bar{T}_M

近百年平均最高气温(\bar{T}_M)变化趋势较最低气温(\bar{T}_m)复杂.各季及年平均 \bar{T}_M 除在10年代和30年代两次突变增暖以外,还在50年代后突然降温,这样,在近百年中 \bar{T}_M 实际上经历了两次升温和一次降温.尤其是双位相回归检测到本世纪40年代中后期存在着一次显著的趋势突变,由升温变为降温,直至80年代 \bar{T}_M 仍维持在较低水平.

(3)年和各季的 \bar{T}

几种检测方法都表明,近百年各季和年的 \bar{T} 出现过3次突然升温,分别对应于10年代、30年代中后期和70年代末至80年代初,且以30年代的那次增暖为最强,这是大多数方法检测到的一致结果,而t检验与累积距平曲线法还显示50年代后有一次突然降温,双位相回归模式则显示40年代中后期存在趋势转折.这些结果与文献[3,4,7]的分析都较吻合.

表 1 平均最低(\bar{T}_m)、平均最高(\bar{T}_M)及平均气温(\bar{T})的突变年份检测(1880~1992 年)

温度指标	t-检验($n=10$)	累积距平法	M-K 方法	双位相回归模式	
春季	平均最低	1937(2.55),1958(2.39), 1981(2.20)	1936	1949	
	平均最高	1914(3.17),1937(2.52) 1950(-6.50)	1911 1950		1943(8.53)
	平均气温	1914(2.72),1937(2.52), 1950(-3.74),1981(2.10)	1936,1950, 1976	1926	1942(3.41)
夏季	平均最低	1929(3.69),1953(3.93)	1933	1944	
	平均最高	1912(2.72), 1954(-3.36)	1900,1912 1953		1945(4.34)
	平均气温	1899(-3.30),1912(2.17), 1929(2.61),1968(-2.27)	1899 1928	1931	
秋季	平均最低	1935(4.96)	1936,1982	1940	
	平均最高	1913(2.31),1935(4.61), 1955(-4.78)	1908, 1955		1947(8.51)
	平均气温	1935(7.36),1954(-2.17), 1982(2.28)	1934,1955, 1982	1934	1947(3.57)
冬季	平均最低		1934,1982	1939,1976	
	平均最高		1901,1954		1943(3.45)
	平均气温	1935(2.19)	1936,1966, 1978	1929, 1974	
年	平均最低	1935(4.31),1977(2.59)	1934	1946	
	平均最高	1914(4.66),1938(4.61), 1950(-6.15),1978(2.15)	1911, 1950		1946(16.05)
	平均气温	1937(4.64),1949(-2.23), 1977(2.97)	1936,1952, 1976	1930	1947(5.79)

表中括号内数字分别为 t 统计量, u 统计量(双位相回归)的取值。

2.2 三次增暖期的差异

综上所述,上海近百年大致经历了 3 次增暖时期,它们分别对应于本世纪 10~20 年代,30~40 年代和 80~90 年代.表 2 为不同增暖期气温突变的检测结果.由表 2 可见,第一段增暖期相对最弱,仅 \bar{T}_M 高于第三段增暖期,而低于第二段增暖期,可见增暖只发生于白天;第二段增暖期的特点是各季和年的 \bar{T}_M 都高于第一、三段增暖期,且日较差明显偏大,但所有各季及年的 \bar{T}_m 都比第三段增暖期低,这意味着,第二段增暖期(即 40 年代)是以 \bar{T}_M 较高即白天温度平均偏高为主要特征.

表 2 不同增暖期温度指标对比(°C)*

		平均最低气温	平均最高气温	平均气温	平均日较差
春 季	1915~1924	9.46	19.36	13.57	9.90
	1938~1947	10.14	20.67	14.43	10.53
	1983~1992	10.83	18.38	14.16	7.54
	d_1	1.37	-0.98	0.59	-2.36
	d_2	0.69	-2.29	-0.27	-2.99
夏 季	1915~1924	22.24	31.21	25.77	8.97
	1938~1947	22.75	31.98	26.29	9.22
	1983~1992	23.53	30.07	26.38	6.54
	d_1	1.29	-1.14	0.61	-2.43
	d_2	0.78	-1.91	0.09	-2.68
秋 季	1915~1924	13.37	23.35	17.30	9.98
	1938~1947	14.54	24.38	18.41	9.81
	1983~1992	15.03	22.20	18.39	7.16
	d_1	1.66	-1.15	1.09	-2.82
	d_2	0.49	-2.18	-0.02	-2.67
冬 季	1915~1924	0.62	9.66	4.37	9.03
	1938~1947	1.21	10.28	5.00	9.07
	1983~1992	2.08	9.23	5.27	7.15
	d_1	1.46	-0.43	0.90	-1.88
	d_2	0.87	-1.05	0.27	-1.92
年 平 均	1915~1924	11.40	20.90	15.25	9.49
	1938~1947	12.16	21.81	16.03	9.64
	1983~1992	12.89	19.98	16.07	7.08
	d_1	1.49	-0.92	0.82	-2.41
	d_2	0.73	-1.83	0.04	-2.56

* d_1 为 1983~1992 年的平均值与 1915~1924 年平均值之差, d_2 为 1983~1992 年的平均值与 1938~1947 年平均值之差.

进一步考察这三段增温期的增温率(表 3)也可发现,若以三段增暖期的突变点为中心(这里选取表 1 中综合分析所得大致年份 1911 年、1935 年和 1980 年),分别以其前后 12 年为跨度,计算相应的各温度指标的线性变化率.对于 T_M ,除冬季外,第一段(1899~1923 年)和第二段(1923~1947 年)增温率均高于第三段(1968~1992 年),其中夏季最为显著. \bar{T}_m 值除秋季外,都是第三段增温率高于前两段时期,并以冬季最为明显,这进一步证明,上海本世纪初的增暖仅限于白天,而 40 年代的增暖明显是白天高于夜间.但 80 年代以来的这一次增暖主要是夜间即最低气温增温明显.这一结果与文献[5]的研究结果基本一致.上述论点还可间接地反映在年代际的变化趋势中.

表 3 不同增暖期温度线性变率对比(°C/a)

		平均最低气温	平均最高气温	平均气温
春 季	1899~1923	-0.0030	0.0527	0.0176
	1923~1947	0.0257	0.0539	0.0344
	1968~1992	0.0423	0.0318	0.0361
夏 季	1899~1923	0.0096	0.0481	0.0247
	1923~1947	0.0284	0.0328	0.0279
	1968~1992	0.0396	0.0098	0.0233
秋 季	1899~1923	0.0202	0.0563	0.0214
	1923~1947	0.1030	0.0627	0.0839
	1968~1992	0.0451	0.0144	0.0349
冬 季	1899~1923	-0.0321	0.0102	-0.0248
	1923~1947	0.0068	0.0136	0.0118
	1968~1992	0.0732	0.0582	0.0703
年平均	1899~1923	-0.0024	0.0428	0.0092
	1923~1947	0.0384	0.0415	0.0409
	1968~1992	0.0477	0.0251	0.0385

2.3 年代际变率与趋势特点

表 4 中列出近百年上海各年代 \bar{T}_m 、 \bar{T}_M 、 \bar{T} 3 种温度指标及其距平和极值. 由表 4 可见: ①各季和年的 \bar{T}_m 年代距平上升趋势最为显著, 40 年代后几乎全部为正距平, 尤其近 20 年呈线性上升趋势; 80 年代是 \bar{T}_m 最高的 10 年, 而 90 年代初更显著. ②各季和年的 \bar{T}_M 年代距平呈明显升降交替变化, 即由 19 世纪末起持续上升至 40 年代, 后又显著下降至 70 年代, 只到近期才略有回升, 但 80 年代均值远低于近百年平均 \bar{T}_M . ③各季和年的平均气温 \bar{T} 与上述 \bar{T}_m 、 \bar{T}_M 不同之处在于, 它呈阶段性上升趋势. 例如, 本世纪初至 40 年代为上升, 后略降至 70 年代, 随后又出现明显升温, 但总的看来, \bar{T} 在 80 年代尚未超过 40 年代, 最近的迹象显示 1990~1992 年 \bar{T} 都已高于或接近 40 年代. ④日较差与年极差均从 19 世纪末持续增大至 40 年代, 随后呈显著下降至 80 年代, 降幅已超过 2°C, 这又一次表明 \bar{T}_m 陡升, 而 \bar{T}_M 略降的明显态势. ⑤极端日最低气温已由 19 世纪末的 -12.1°C, 上升到 80 年代的 -7.6°C, 相反, 极端最高气温则由 30 年代的 40.2°C 下降到 90 年代初的 37.5°C, 这似乎意味着上海有向热带气候变化的趋势.

分析 3 种气温 (\bar{T}_m 、 \bar{T}_M 和 \bar{T}) 时还发现^[9], 年平均的 \bar{T}_m 与年平均 \bar{T} 的相关系数显著高于 \bar{T}_M 与 \bar{T} 的相关 ($\alpha=0.05$), 尤以秋冬季明显. \bar{T}_m 与 \bar{T} 的近百年稳定相关关系在各季都很明显, 其中冬季相关的显著性最高. 这个特点, 对于进一步深入研究“温室效应”加剧增暖, 将是十分有益的.

表4 各温度指标的年代际距平及极值(°C)

	1880~ 1889	1890~ 1899	1900~ 1909	1910~ 1919	1920~ 1929	1930~ 1939	1940~ 1949	1950~ 1959	1960~ 1969	1970~ 1979	1980~ 1989	1990~ 1992	
春季	平均最低	-0.41	-0.57	-0.33	-0.64	-0.43	-0.04	0.18	0.09	0.54	0.41	0.78	1.31
	平均最高	-0.74	-0.57	-0.37	0.37	0.87	0.88	1.82	-0.63	-0.46	-0.74	-0.42	-0.03
	平均气温	-0.18	-0.57	-0.45	-0.34	-0.04	0.25	0.63	-0.21	0.24	0.04	0.36	0.84
	平均日较差	-0.34	0.00	-0.04	1.02	1.29	0.92	1.64	-0.72	-1.01	-1.15	-1.20	-1.35
夏季	平均最低	-0.33	-0.26	-0.70	-0.43	-0.51	0.05	-0.04	0.36	0.52	0.43	0.55	1.12
	平均最高	-1.03	0.71	-0.38	0.41	0.59	0.99	1.21	-0.08	-0.49	-0.81	-0.93	-0.59
	平均气温	-0.28	0.09	-0.72	-0.27	-0.25	0.27	0.21	0.21	0.30	0.14	0.12	0.64
	平均日较差	-0.70	0.97	0.32	0.83	1.09	0.94	1.24	-0.44	-1.02	-1.25	-1.48	-1.71
秋季	平均最低	-0.33	-0.78	-0.50	-0.76	-0.84	-0.16	0.68	0.40	0.72	0.33	0.90	1.14
	平均最高	-1.15	-0.39	0.12	0.54	0.73	0.80	1.65	-0.18	-0.34	-0.92	-0.67	-0.66
	平均气温	-0.39	-0.58	-0.41	-0.48	-0.47	0.00	0.77	0.16	0.56	0.10	0.52	0.73
	平均日较差	-0.82	0.39	0.62	1.30	1.57	0.97	0.97	-0.58	-1.06	-1.25	-1.57	-1.80
冬季	平均最低	-0.71	-0.31	0.11	-0.54	-0.46	0.11	0.12	0.46	0.06	0.34	0.48	1.77
	平均最高	-1.36	-0.40	0.28	0.38	0.36	0.11	1.21	0.03	-0.40	-0.14	-0.22	0.44
	平均气温	-0.78	-0.26	0.13	-0.31	-0.25	0.00	0.46	0.31	-0.15	0.18	0.26	1.28
	平均日较差	-0.64	-0.10	0.17	0.92	0.82	0.01	1.10	-0.43	-0.46	-0.49	-0.70	-1.33
年 值	平均最低	-0.45	-0.45	-0.39	-0.60	-0.54	-0.04	0.27	0.32	0.39	0.42	0.66	1.37
	平均最高	-1.07	-0.14	-0.10	0.41	0.63	0.73	1.45	-0.22	-0.43	-0.63	-0.56	-0.22
	平均气温	-0.41	-0.30	-0.39	-0.36	-0.24	0.13	0.53	0.12	0.22	0.14	0.30	0.90
	平均年极差	-0.32	1.02	-0.49	0.95	1.05	0.88	1.09	-0.54	-0.55	-1.14	-1.41	-2.36
	极端最低	-9.1	-12.1	-7.9	-10.9	-9.3	-11.6	-10.0	-9.4	-9.1	-10.1	-7.6	-7.7
极端最高	38.0	39.4	37.8	38.7	38.4	40.2	39.8	38.9	38.2	38.1	38.4	37.5	

3 小 结

对上海近百年各类指标温度序列的联合诊断分析,获得以下一些新的认识:

(1)近百年上海 \bar{T}_m 和 \bar{T} 呈显著上升趋势, \bar{T}_m 的增温率明显高于 \bar{T} ,而 \bar{T}_M 的线性趋势不明显,在40年代中后期出现显著的升降趋势转折。

(2)近百年上海有3次突然变暖期,其中10~20年代增暖仅出现在白天,30~40年代则是白天增温明显大于夜间,而近10多年来的增暖主要是夜间。因此,平均气温上升趋势,在各段增暖期则是不尽相同的。鉴于昼夜增温(白天以平均最高气温 \bar{T}_M 为代表,夜间以平均最低气温 \bar{T}_m 为代表)的影响因子有所不同,这一观测事实将有助于对全球变暖成因的进一步研究。

(3)近百年上海 \bar{T}_m ,尤其冬季 \bar{T}_m 呈持续稳定上升趋势,并与冬季平均气温 \bar{T} 有显著而稳定的高相关,这一事实若能为其它的地区气温变化所证实,则冬季平均最低气温有可能成为监测温室效应加剧更恰当的气候指标。

参 考 文 献

- 1 Karl T R, et al. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **76**(6):1007~1023.
- 2 翟盘茂,任福民.我国最高最低温度变化规律研究.见:丁一汇主编.中国的气候变化与气候影响研究文集.北京:气象出版社,1997.199~206.
- 3 江志红,丁裕国.近百年中国气温场两次增暖期的对比分析.见:曹鸿兴等主编.我国短期气候变化及成因研究论文集.北京:气象出版社,1996.18~24.
- 4 江志红,丁裕国,金莲姬.中国近百年气温场变化成因的统计诊断分析.应用气象学报,1997,**8**(2):175~185.
- 5 谢庄,曹鸿兴.北京最高和最低气温的非对称变化.气象学报,1996,**54**(4):501~507.
- 6 符淙斌,王强.气候突变的定义及检测方法.大气科学,1992,**16**(4):482~493.
- 7 Ding Yuguo, Tu Qipu and Wen Min. A statistic model for investigating climatic trend turning points. *A. A. S.*, 1995, **12**(1):47~56.
- 8 Cao H X, Mitchell J B F and Lavery J R. Simulated diurnal range and variability of surface temperature in a global climate model for present and doubled CO₂ climates. *J. Climate*, 1992, **5**:920~943.
- 9 Bell G T. Change in the sign of the relationship between sunspots and pressure, rainfall and monsoon. *Weather*, 1977, **32**(1):26~32.

RENEWED STUDY ON THE WARMING PROCESS OF SHANGHAI DURING THE PAST 100 YEARS

Jiang Zhihong Ding Yuguo

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract

The detailed investigation is carried out in terms of mean monthly, maximum and minimum temperature series of Shanghai from 1880 to 1992. The results indicate that minimum and mean temperatures have obvious increasing trend, especially for the former. From these results, it is known that minimum temperature would be more sensitive to monitor the intensity of greenhouse effect; and maximum temperature exhibited remarkable inflexion trend in the middle and late of 1940s. There were three abrupt warmings, i. e. 1910s, 1930s and the early of 1980s, of the which the first two occurred in daytime, only the last mainly in nighttime. These facts would contribute to renewed study on the warming process of Shanghai, China or the globe.

Key words: Climatic warming Abrupt warming of climate Greenhouse effect