

中国高空温度变化初步分析

王颖¹ 任国玉²

1 国家气象信息中心, 气象资料室, 北京 100081

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘要 利用全国1961~2004年134个台站的探空温度资料, 对我国各高度层温度变化趋势进行了初步分析, 并对比讨论了与地面气温变化的关系。结果表明, 自从20世纪60年代初以来, 我国对流层温度变化呈微弱减少趋势, 整体温度下降速率为 $-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 对流层中下层温度表现出微弱增加, 增温速率为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 比同期地面气温增暖趋势弱得多。1961年以来, 我国对流层上层和平流层底层年平均温度均呈现明显下降趋势, 变化速率分别为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。近25年来中国对流层中下层的温度呈现明显上升, 增温速率达到 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 与地面气温变化趋势更为接近。我国高空和地面温度变化结构的这一特点与全球或北半球平均情况大体相似。但是, 20世纪60年代初以来对流层中下层与地面气温变化趋势的明显差别, 以及最近20多年对流层中下层与地面的同步增温, 仍然需要给出合理的解释。

关键词 对流层 平流层 温度 气候变化

文章编号 1006-9585 (2005) 04-0780-11 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Change in Free Atmospheric Temperature over China During 1961—2004

WANG Ying¹ and REN Guo-Yu²

1 *Climatic Data Center, National Meteorological Information Center, Beijing 100081*

2 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract China owns a dense and relatively reliable observation network of free atmospheric temperature, which consists of 134 stations across the country. Using this set of data, we analyzed variation of temperature of the period 1961—2004 for mid-to lower layer of troposphere (850—400 hPa), upper layer of troposphere (300—150 hPa), and lower layer of stratosphere (100—50 hPa), and compared them with the observed change of surface air temperature during the same period. The result shows that no significant change in tropospheric temperature had occurred since 1961, but the temperature at lower stratosphere had decreased obviously. Rates of change of temperature at mid-to lower troposphere, upper troposphere and lower stratosphere are $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ and $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ respectively. The change in tropospheric temperature is much smaller than those reported for the other regions of the world. For period of 1979—2004, however, the trend of mid-to lower tropospheric temperature is $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, much larger than that for the longer time period, and also larger than those generally reported for global and northern hemispheric average. Problems with data have been discussed, but they could not be too serious. It is therefore concluded that the difference of changes between tropospheric and surface air temperature for period of 1961—2004 is in deed true, and this obviously further complicates the detection and attribution of the regional climate change.

Key words troposphere, stratosphere, temperature, climate change

收稿日期 2005-07-26 收到, 2005 11-25 收到修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目课题“全球与中国气候变化的检测和预测”(2001BA611B-01)

作者简介 王颖, 女, 1972 年出生, 高级工程师, 从事气候资料处理和气候变化分析。mail: odcjsjk@cma.gov.cn

1 引言

对于高空温度变化趋势的研究由来已久。当全球地面增暖现象得到广泛证实后, 人们将温度变化趋势的研究延伸到整个大气层, 对比分析高空各高度层和地表温度变化的趋势特征, 试图找到它们之间的联系, 并识别变化的原因。但是, 高空观测开展得比较晚, 探测资料比较缺乏。从 20 世纪 50 年代起, 才开始使用无线电探空仪进行高空温度观测; 自 1979 年以来, 又拥有了卫星微波探测仪 (MSU) 资料序列。

最近十几年, 利用无线电探空仪观测资料、卫星 MSU 资料和再分析资料, 研究者对高空温度变化趋势开展了大量分析工作, 取得了许多结果。Angell 基于全球 63 个测站的无线电探空仪观测资料, 对 1958~1998 年间高空温度变化进行了分析。结果表明, 全球 850~300 hPa 高度层 (对流层中层) 增暖趋势为 0.10 ± 0.09 K/10 a, 北半球为 0.07 ± 0.09 K/10 a, 南半球为 0.13 ± 0.12 K/10 a; 对流层上层 (300~100 hPa) 在热带地区有轻微的变暖趋势, 但在热带外地区则变冷; 平流层底层 (100~50 hPa) 的温度变化趋势是 -0.4 °C/10 a^[1,2]。英国气象局哈得莱中心对全球对流层温度变化的估计是 0.16 °C/10 a (1961~1990 年资料)^[3]。Ross 等^[4]研究了北半球 45~75°N 之间不同区域 1973~1993 年地面和高空温度变化趋势, 发现地面温度变化趋势大的区域其地面至 500 hPa 高空各等压面层温度变化趋势也大, 并且温度变化趋势随着高度的增加而减小。IPCC 第三次评估报告指出, 1958 年以来对流层温度变化趋势与地面相似, 为 0.10 °C/10 a, 1958~1980 年对流层底层温度为下降趋势, 1980 年以后为上升趋势。由于平流层下层变冷趋势的影响, 1960 年以来对流层上层温度变化很小^[5]。周宁芳等^[6]利用 NCEP/NCAR 高空温度再分析资料, 对北半球和青藏高原对流层中上层温度的年代际变化特征进行了分析, 并讨论了它们与地面气温变化的关系。

由于卫星资料的覆盖面非常广, 除极地和高山 (如喜马拉雅山) 外, 几乎覆盖了全球所有地区, 包括沙漠、海洋、热带雨林等难以实施常规

观测的地区。但是, 在全球增暖最明显的近 20 多年里, 卫星微波探测技术获取的全球对流层中下层温度数据给出了相互矛盾的结论。长期以来, 卫星遥感资料分析一般表明, 对流层中下层平均温度没有显著趋势变化, 或者变化趋势比地面小得多^[7~11]。最近, 有研究者发现, 从具有完整卫星观测数据的 1978 年底开始, 卫星资料的分析表明对流层中低层大气温度也在明显升高。例如, Vinnikov 等^[12]给出的 1978~2002 年间对流层温度变化速率为 $+0.22 \sim 0.26$ °C/10 a, 和地面记录的同期增温速率相近。Fu 等^[13]最近也给出了 $+0.2$ °C/10 a 的数值。但是, 来自阿拉巴马大学的研究小组是利用卫星资料分析高空温度变化趋势最早的, 他们给出了比较低的估计值, 认为在 1979~2002 年期间, 对流层中低层大气平均温度上升了 0.19 °C, 其中北半球平均上升了 0.37 °C, 而南半球的升温还不到 0.02 °C。根据这个小组的分析, 过去 25 年间全球对流层中下层平均增暖速率约为 0.07 °C/10 a^[9], 明显弱于同期地球表层温度增暖速率。这个小组给出的全球整个对流层温度变化速率更小一些, 只有 0.03 °C/10 a 左右^[14]。

此外, Pielke 等利用 NCEP/NCAR 的再分析资料, 计算了对流层下层温度变化趋势, 认为从 1979 年到 2001 年增温速率是 0.05 °C/10 a^①, 与 Christy 等^[9]的估计比较接近。

可见, 不同作者采用不同资料所做的高空温度趋势分析结果存在很大差异, 这是迄今有关观测的气候变化及其可能原因研究中最具争议性的问题之一, 受到气候变化科学界的广泛重视。卫星遥感技术反演的对流层中下层温度增加不明显, 但最近也有认为增温速率比较大的; 探空资料与地表气温的差异同样比较显著, 多数研究结果表明对流层温度变化趋势没有地表明显。

我国的无线电探空观测资料开始于 1951 年, 20 世纪 50 年代末以来全国高空探测台站网已经形成, 其密度和观测质量在世界上堪称一流。在详细分析高空资料质量并进行均一性检验和订正的基础上, 获得经过质量控制的高空温度序列, 对于各高度层上温度趋势变化进行分析, 并与地面

① Pielke, 个人通讯

资料和卫星观测资料分析及国外的相关研究结果进行对比,对于了解区域尺度上地球表面与高空温度的差异、检测人为原因引起的区域气候变化信号、改进气候系统模式和规划未来的气候监测网络均具有重要意义。

本文利用我国 1961 年以来 134 个台站的探空资料,对全国各高度层温度变化进行了初步分析,对比讨论了它们与地面气温变化的关系。我们的分析表明,自从 20 世纪 60 年代初以来,中国对流层温度变化趋势不明显,没有显示出地面观测资料分析所表明的显著增暖;自 1979 年以来,中国对流层中下层温度表现出一定程度的增加,但仍然比地面气温增暖趋势弱。

2 资料和方法

本文所用的高空温度资料为中国大陆地区 134 个测站的 1961~2004 年无线电探空仪观测的高空温度,地面气温资料为这 134 个测站的同期月平均气温。这些探空站的分布是相对均匀的,能够有效保证高空区域平均温度序列的建立以及温度变化趋势的空间特征分析。

对于对流层上层(300、250、200 和 150 hPa 的 4 个标准等压面层),1961 和 1962 年间全国各台站的观测资料中,普遍缺少 250 和 150 hPa 两个等压面层记录,因此这两年对流层上层没有做统计,也没有参与温度变化趋势计算。

2.1 资料质量控制

在对高空资料进行统计之前,先对高空温度数据进行了初步的质量检查,包括气候极值检查和统计方法检查。

气候极值检查:设定各层大气允许的最大、最小温度阈值(表 1)^①,如果数据超出允许范围,就认为该数据错误,不参加月、年平均温度统计。对流层中下层、对流层上层和平流层底层的各等压面层 0000 UTC 和 1200 UTC 的温度记录中,各有 0.1%的记录被检验出错误,没有参加统计分析。

统计方法检查:如果某定时观测温度与该月累年平均温度差值的绝对值大于 3 倍标准差,则认为该数据错误,不再参加月、年平均温度统计。对流层中下层、对流层上层和平流层底层的各等

表 1 各层大气允许的最大、最小温度值
Table 1 Upper and lower bound temperature values for identifying error records for layers of free atmosphere

P/hPa	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$
$p<300$	-100	0
$300\leq p<400$	-100	0
$400\leq p<500$	-90	5
$500\leq p<600$	-90	13
$600\leq p<700$	-90	20
$700\leq p<800$	-90	27
$800\leq p<900$	-90	34
$900\leq p<1000$	-90	60
$1000\leq p<1100$	-90	60

压面层 0000 UTC 和 1200 UTC 的温度记录中,均有 0.4%~0.5%的记录与累年平均温度差值的绝对值大于 3 倍标准差,这些记录被删除,没有参加统计分析。

由于更换仪器和改变操作方法等可能在资料序列中引入部分不连续性,本文对此没有进行系统检验和订正。

2.2 资料统计方法

对于高空各规定等压面层,划归为 3 个层次进行统计。对流层中下层:包括 850、700、500、400 hPa 等压面;对流层上层:包括 300、250、200、150 hPa 等压面;平流层底层:包括 100、70、50 hPa 等压面。对于这 3 层分别进行温度及距平值计算,并进行线性趋势估计和分析。

对于某一层,首先计算 134 个测站的 1961~2004 年各月、年平均温度及距平,距平值计算的参考气候期取 1971~2000 年;然后将站点资料转化为网格点资料,网格距为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 经纬度,每个网格的各月、年平均温度和距平值为各网格内所有台站温度和距平的算术平均;参考 Jones 等^[15]的网格面积加权平均法,利用各网格中心点纬度的余弦作为权重系数,计算历年全国平均的温度和距平值,并得到 1961~2004 年和 1979~2004 年全国平均的月、年平均气温及距平时间序列;最后对各月、年平均气温进行一次线性趋势拟合,得到温度变化趋势和变化速率。个别站个

^① 国家气象中心,气象观测资料的质量控制客观分析和四维同化,1993

别月值存在缺测现象，缺测月和年就不参与统计，但在统计 30 年平均温度时没有采用缺测资料序列。

此外，还分别统计了中国各纬度地带的高空各层次平均温度变化趋势。纬度带的划分界限分别是 30°N 和 40°N。30°N 以南代表热带和南亚热带地区，30~40°N 之间代表北亚热带和暖温带地区，而 40°N 以北代表温带地区。

3 结果分析

3.1 高空各层次温度变化时间序列

图 1 给出对流层中下层、对流层上层和平流层底层年平均温度变化情况及趋势。在 1961~2004 年间，全国对流层中下层年平均温度呈现比较明显的年际和年代变化。20 世纪 60 年代早期和 80 年代后期以来一般年份为正距平，其中最暖年份是 1998 年，温度距平值高达 0.98 °C；而 60 年代后期到 80 年代中一般为负距平，其中最冷年份是 1976 年，温度距平达到 -0.71 °C。在整个时

期，对流层中下层呈微弱增温趋势，增温速率仅为 0.05 °C/10 a。从各个季节看（图 2），除了冬季（1 月）外，对流层中下层其他季节温度均为降低趋势，但趋势并不明显。冬季温度增加速率为 0.11 °C/10 a。

在对流层上层，平均温度的年际和年代变化特征与中下层相似，但近几年温度转变为负距平。最暖年份与对流层中下层和地面也不同，不是出现在 1998 年，而是在 1963 年，温度距平为 0.89 °C；最冷年份出现在 2001 年，温度距平为 -0.72 °C。对流层上层整体温度呈降低趋势，变化速率为 -0.17 °C/10 a（图 1）。各个季节平均温度变化趋势均为负，其中夏季温度变冷最明显，达到 -0.23 °C/10 a（图 2）。

平流层底层温度的年际和年代变化与对流层相去甚远，60 年代早期和 80 年代后期以来一般年份为负距平，从 80 年代中后期到 2004 年温度降低趋势非常明显。整个时期变化趋势与对流层上层一致，年平均温度均为下降，但下降速率更加显著，达到 -0.22 °C/10 a（图 1）。平流层底层各

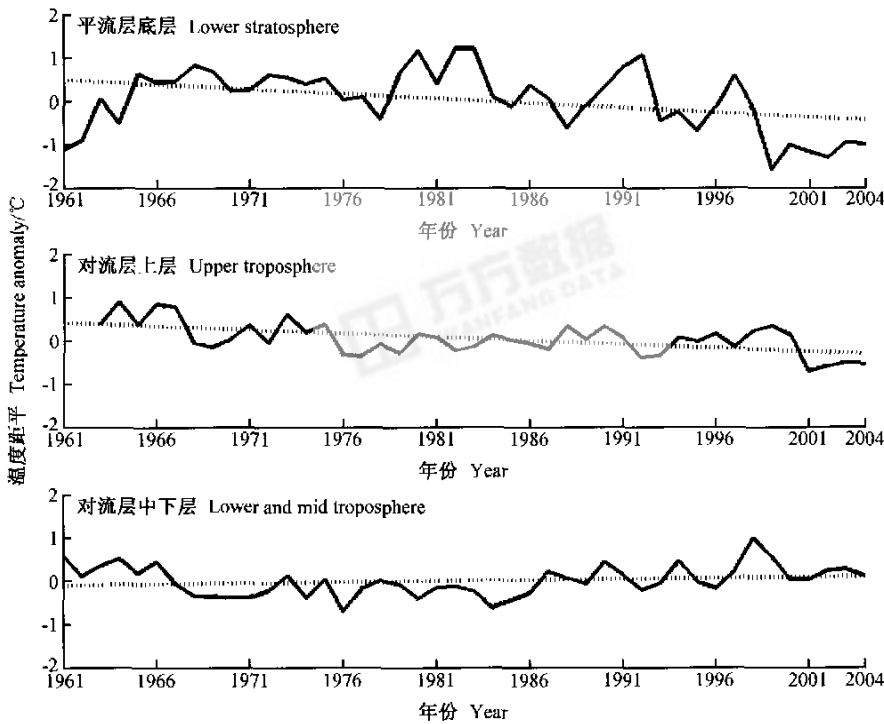


图 1 各高度层年平均温度距平及变化趋势
Fig. 1 Changes in annual mean temperature at lower to mid troposphere (lower), upper troposphere (middle) and lower stratosphere (upper) over China from 1961 to 2004

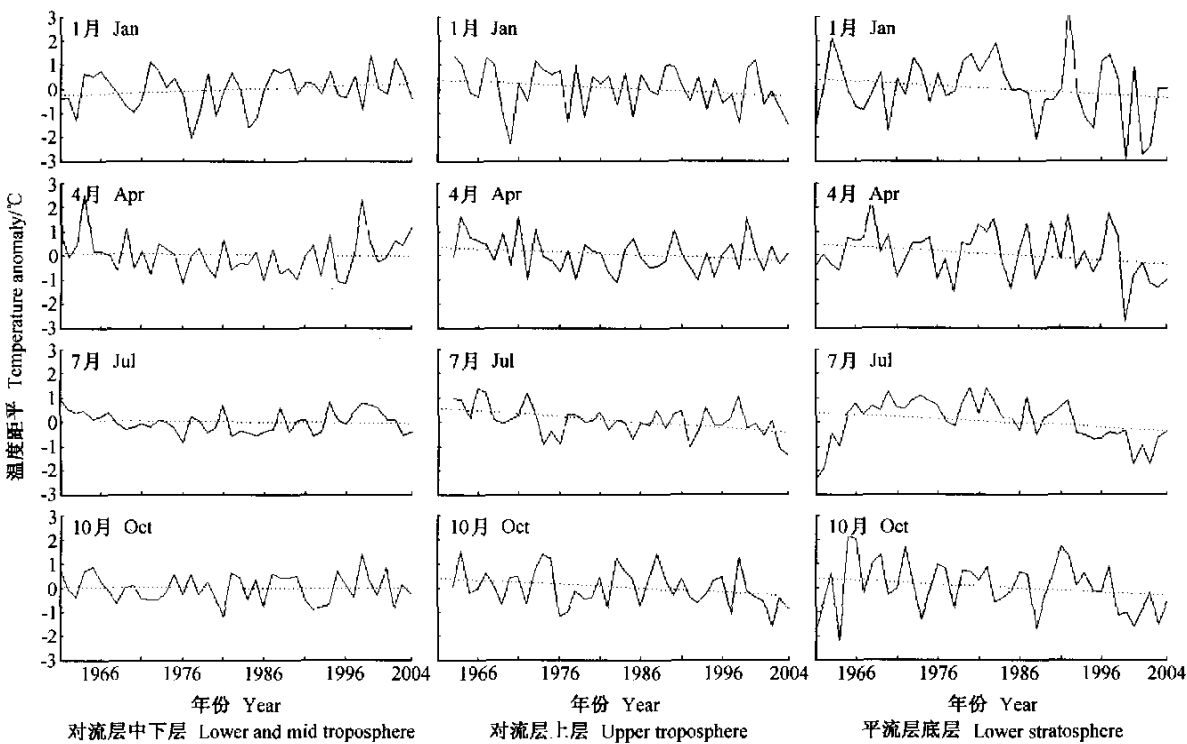


图2 各高度层1、4、7、10月平均温度距平及变化趋势
Fig.2 Changes in seasonal temperature (January, April, July, and October) at lower and mid troposphere (left), upper troposphere (middle) and lower stratosphere (right) over China from 1961 to 2004

季节温度变化均为负，其中冬季降温最明显，降温速率达到 $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ （图2），降温最明显的月份为2月，降温速率为 $-0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

对流层中下层与平流层底层年平均温度变化具有较明显的反向关系。例如，在1983年前，前者一般呈降温趋势，而后者则趋于变暖；此后，二者分别趋向转暖和变冷；60年代早期的对比以及极端冷、暖年份的对比也是明显的，1998年是对流层中下层最暖的一年，但当年平流层底层平均温度却是有记录以来最低的。

3.2 高空各层次温度变化趋势分布特征

图3和表2给出各高度层不同纬度带的年平均温度变化情况。就对流层中下层来看，各纬度带年平均温度均为增加趋势，年际和年代变化也较相似，都是70年代以前温度呈下降趋势，70年代以后温度呈上升趋势。只是 40°N 以北地区年际变化更为剧烈，年平均温度增加最明显，增加速率为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，而 30°N 以南地区温度增加非常微弱。因此，对流层中下层纬度越高，增温趋

势越明显。

对流层上层年平均温度在所有纬度带均呈下降趋势，且纬度越高，温度降低趋势越明显。年平均温度降低最明显的地带是 40°N 以北地区，平均降温速率为 $-0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。各纬度带年平均温度的年际变化相似，但也存在一定差异。相同点是各纬度带都是60年代中期以前和2000年以后温度降低最明显；不同点是 40°N 以北地区60年代初到现在温度一直呈降低趋势， 30°N 以南地区60年代中后期到90年代末温度变化并不明显。

在平流层底层，各纬度带的年平均温度变化与对流层上层一致，也都呈下降趋势，但与对流层上层相反的是，在平流层底层纬度越低，温度降低越明显，年平均温度降低最明显的地带是 30°N 以南地区，平均降温速率为 $-0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。各纬度带年平均温度的年际变化相似，都是60年代中期以前和70年代中后期温度上升，其他时期温度降低，80年代至今温度降低非常明显。

从我国各高度层年平均温度变化速率的分布

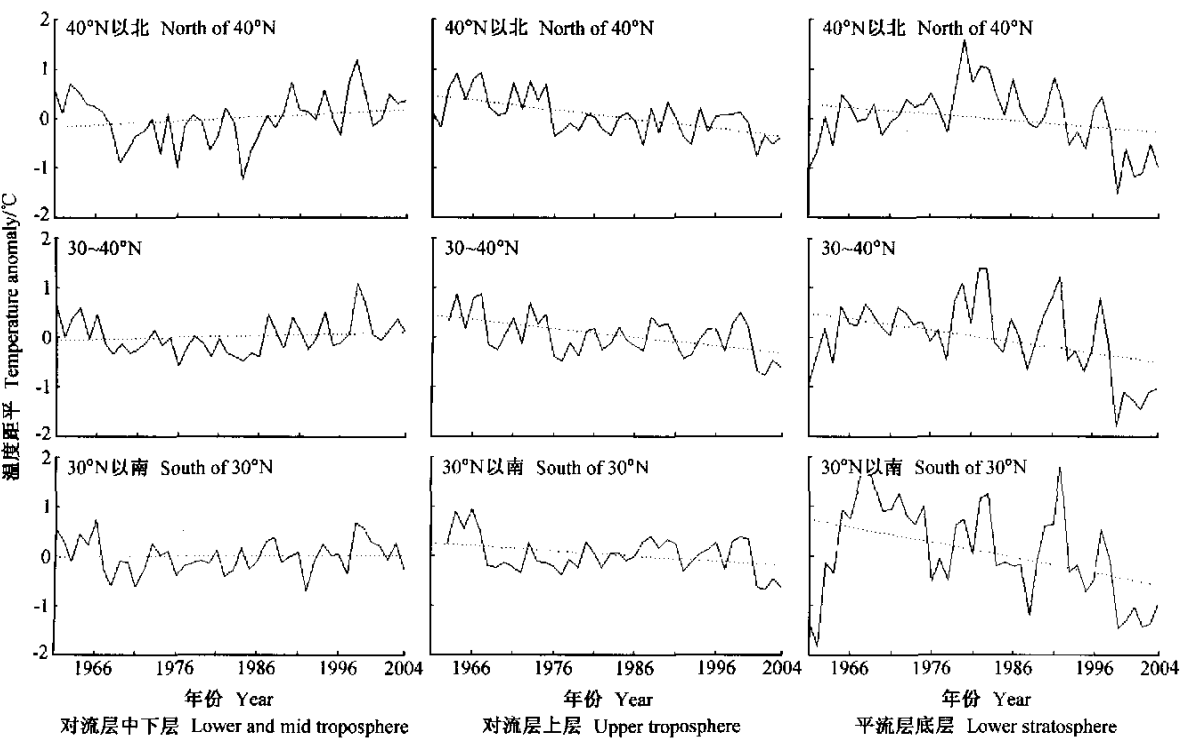


图3 中国各高度层不同纬度带的年平均温度变化
Fig. 3 Changes in annual mean temperature for varied latitude belts at lower and mid troposphere (left), upper troposphere (middle) and lower stratosphere (right) over China from 1961 to 2004

表 2 高空各高度层不同纬度带年平均温度变化趋势
Table 2 Rates of change of annual mean temperature for varied latitude belts at lower and mid troposphere, upper troposphere and lower stratosphere over China from 1961 to 2004 °C/10 a

	40°N 以北 North of 40°N	30~40°N	30°N 以南 South of 30°N
对流层中下层 Lower and mid troposphere	0.08	0.04	0.01
对流层上层 Upper troposphere	-0.19	-0.18	-0.10
平流层底层 Lower stratosphere	-0.13	-0.23	-0.30

看(图4),对流层中下层我国增温区域与降温区域范围相当,降温区域主要分布在青藏高原、西南地区及华北东部等局部地区,增温区域包括新疆北部、内蒙古中部、华北北部、东北北部和南部地区。我国其他地区温度变化趋势均不明显;对流层上层降温区域范围超过了增温区域范围,降温区域主要分布在我国中、高纬度地区,只有低纬度的小部分地区为增温地区;在平流层底层,所有地区均表现为降温趋势,其中青藏高原中南部地区、华南的部分地区降温最明显,总体表现为纬度低,降温明显,纬度高,降温微弱。

青藏高原对流层中下层的降温区域非常广泛,

也十分引人注目。这个降温区域几乎包含整个高原,也包括云贵高原地区,但最大降温发生在青藏高原中部,降温速率达到0.15 °C/10 a以上。

3.3 高空与地面温度变化的比较

在高空温度变化分析中,目前关注的焦点在于对流层中下层温度变化趋势及其与地面气温趋势的差别。图5给出全国平均的对流层中下层与地面年平均气温距平曲线。地面气温资料取自134个探空测站,因此增加了与高空温度序列的可比性。可见,二者在年际和年代变化上存在很高的相似性,相关系数达到0.64,通过了99%的信度检验(表3)。这也说明,尽管仍存在一定问题,

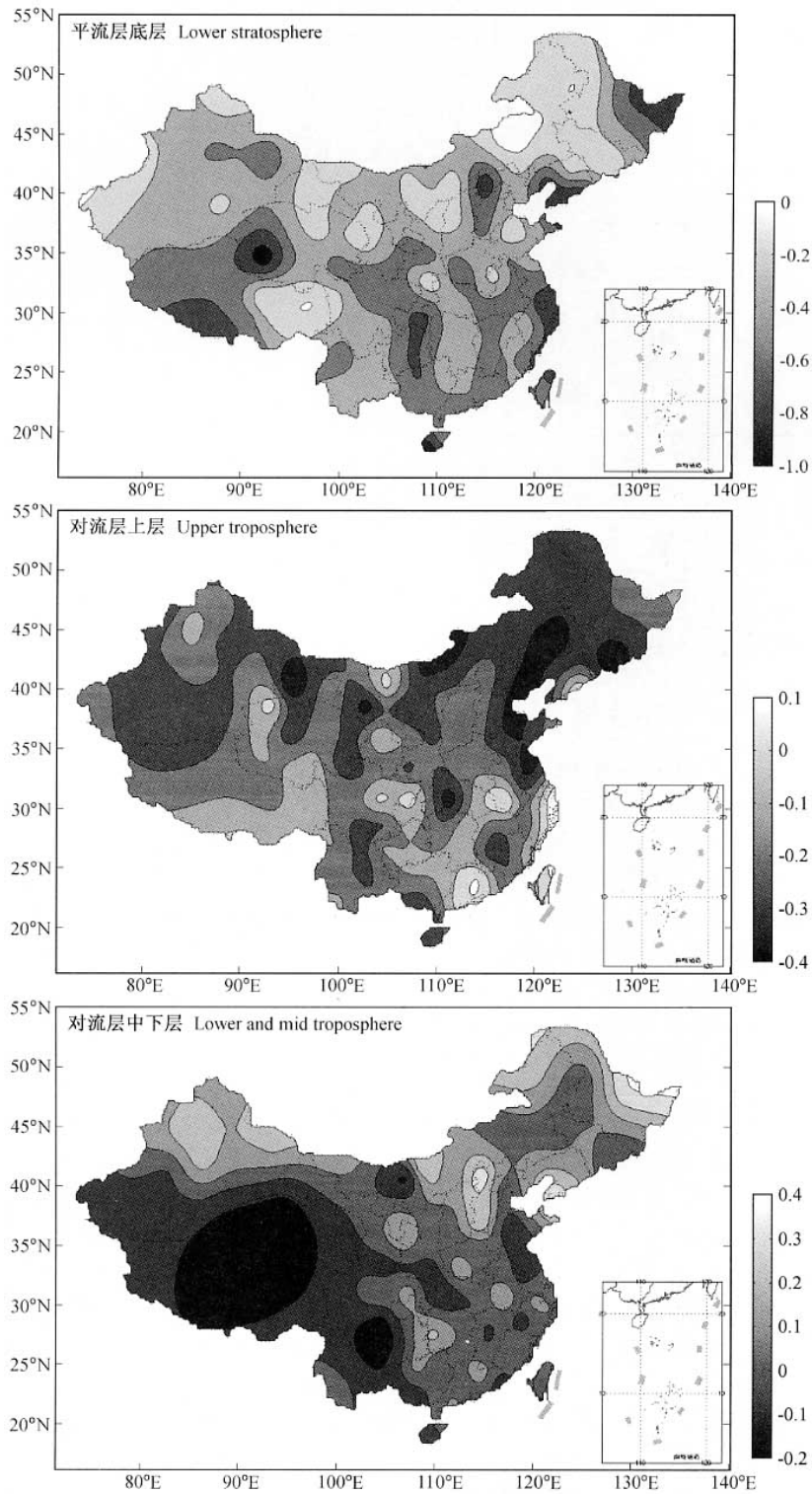


图 4 中国各高度层年平均温度变化速率分布
Fig. 4 Rates of change of annual mean temperature for lower and mid troposphere (lower), upper troposphere (middle) and lower stratosphere (upper) over China

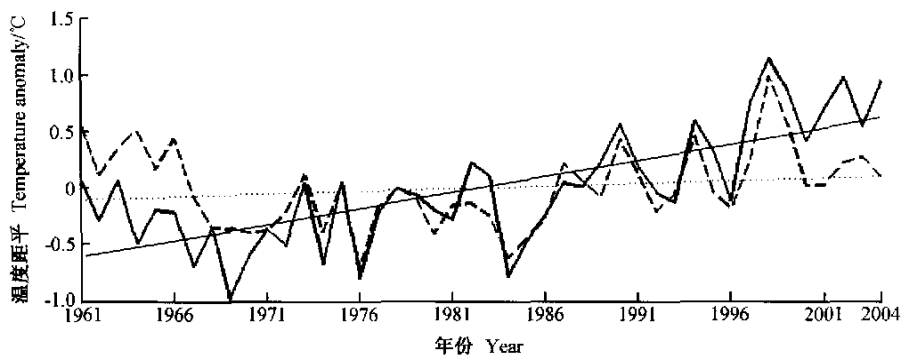


图 5 中国对流层中下层与地面年平均气温距平比较
Fig. 5 Comparison of annual mean temperature anomalies between lower and mid troposphere and surface over China for 1961—2004

表 3 地面、对流层中下层、上层和平流层底层年平均温度相关系数矩阵
Table 3 Correlation coefficients of annual mean temperature among different layers of free atmosphere over China

	地面 Surface	对流层中下层 Lower and mid troposphere	对流层上层 Upper troposphere	平流层底层 Lower stratosphere
地面 Surface	1			
对流层中下层 Lower and mid troposphere	0.64	1		
对流层上层 Upper troposphere	−0.32	0.27	1	
平流层底层 Lower stratosphere	−0.49	−0.42	0.19	1

我国高空温度资料的质量总体上还是可信的。20 世纪 60 年代后期和 70 年代的相对低温以及 80 年代以后的明显变暖特征在对流层中下层和地面都表现得很清楚。1998 年不仅是地面气温，而且也是对流层中下层最暖的一年。

但是，从趋势上看，对流层中下层与地面温度变化的差别却十分明显。尽管在研究时期内地面年平均气温增暖幅度达到 1.32℃，增温速率高达 0.30℃/10 a，但对流层中下层温度同期变化却十分微弱，变化速率仅有 0.05℃/10 a，比地面低 1 个数量级。在各个季节，地面的增温主要发生在冬季和春季；对流层中下层的增温也主要出现于冬季，春季和夏季温度呈微弱的降低趋势，秋季则几乎保持稳定。如果考虑整个对流层情况，则其年平均温度趋势为−0.06℃/10 a，即对流层年平均温度呈现下降趋势，与地面气温变化方向是相反的。

对流层上层、平流层底层的温度变化与地面呈负相关。平流层底层温度与地面气温的负相关更为明显。

对流层上层与对流层中下层年平均温度相关不明显，相关系数仅为 0.27；同样，对流层上层

和平流层底层年平均温度相关也不明显，相关系数仅为 0.19。由此可见，随着高度的升高，各层之间的相关越来越不明显。

3.4 1979~2004 年高空温度变化趋势

卫星遥感资料反演的对流层温度始于 1979 年，大量有关高空温度变化趋势的分析都把关注时段放在 1979 年以后。图 6 表示我国 1979~2004 年不同高度层的年平均温度距平及变化趋势。可见，各个层次温度的变化符号没有变化。20 世纪 70 年代末以来对流层中下层的温度呈现明显增加趋势，增温速率达 0.25℃/10 a，比 1961~2004 年期间的增温（0.05℃/10 a）大得多，但仍只有同期地面气温上升速率（0.48℃/10 a）的一半左右。随着高度上升，对流层上层逐渐变为降温趋势，但对于整个对流层，还是表现为增温趋势，增温速率为 0.07℃/10 a。可见，近 25 年对流层中下层温度变化与地面气温更为相似，趋势也更加接近。这说明，近 25 年我国的气候增暖不仅在地面，而且在大气底层也有明显反映。

另一方面，近 25 年来我国对流层上层和平流层底层温度变化趋势仍为负向，而且随高度增加，温度降低趋势愈加明显。对流层上层温度降低速

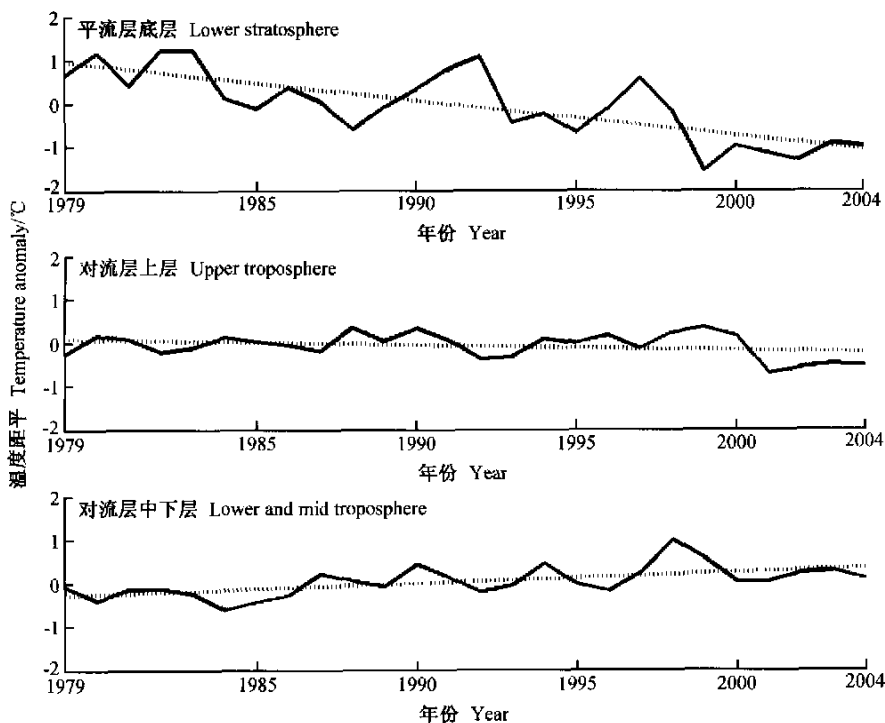


图6 中国1979~2004年不同高度层的年平均温度距平及变化趋势

Fig. 6 Changes in annual mean temperature at lower and mid troposphere (lower), upper troposphere (middle) and lower stratosphere (upper) over China from 1979 to 2004

率为 $-0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 平流层底层达到 $-0.81\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

4 讨论与结论

自1961年以来,我国对流层温度变化趋势不明显,整体年平均温度变化速率仅有一 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。对流层中下层温度表现出一定程度的增加,增温速率仅为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,没有通过显著性检验,也比地面年平均气温增暖趋势弱得多。地面增温速率达 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,但对流层中下层却仅有 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,相差十分悬殊。我国对流层中下层变冷区域主要分布在青藏高原、华北东部、内蒙古中部等部分地区,全国其他地区均为变暖趋势,尤其以东北北部、新疆北部、华北北部的部分地区变暖趋势最明显。我国对流层上层年平均温度变化呈现明显负趋势,变化速率为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;平流层底层年平均温度的下降趋势非常显著,变化速率达到 $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

我国高空温度变化结构的这一特点与全球或北半球平均情况大体相似,其中科学界十分关注的对流层中下层平均温度变化趋势在我国比全球或北半球平均情况更小,与地面气温变化之间的差异则更大。本文的结果表明,至少在中国地区,地面气温和对流层自由大气温度之间的明显差别是真实的。我国对流层温度变化的这一特点对区域人为气候变化信号的检测提出了严峻的挑战,因为根据气候模式分析,在人为原因造成的大气中温室气体浓度增加的情况下,在全球以及像中国这样的较大区域尺度上,地面和对流层中下层平均温度都是显著增加的^[16, 11]。

但是,20世纪70年代末以来中国对流层中下层的温度确实呈现明显上升,增温速率达到 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,比整个研究时期的变化趋势明显得多。这一变暖趋势与地面气温变化更为相似,说明近20多年我国的气候增暖不仅仅是近地面现象。Vinnikov等^[12]认为,1978~2002年间对流层温度变化速率为 $0.22\sim 0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;Fu等^[13]认为同

期对流层温度变化速率为 $+0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。本文的结果表明, 中国整个对流层增温速率为 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 比这些最近卫星遥感资料反演的对流层温度变化趋势低得多, 但对流层中下层增温速率确实比早期根据探空资料和卫星资料获得的全球分析结果要显著。

对于引起我国高空温度变化的原因还需要开展进一步研究。但是, 一些空间变化特征与我国大尺度云量和降水变化分布型似乎有一定联系。例如, 1961 年以来, 我国对流层上层东北南部、华北东部和西北东部等地区趋于变冷, 这些地区观测的年降水量和总云量一般也是下降的; 而长江流域及其以南地区对流层上层温度有变暖趋势, 年降水量及云量则趋向增多^[17]。这表明, 华北等地区上空大气可降水减少, 实际降水也减少, 对流层中上层的潜热释放量减少, 引起温度降低; 而长江中下游和东南沿海等地区大气可降水和实际降水增多, 对流层中上层的潜热释放量也增加, 导致温度升高。因此, 中国高空温度变化在一定程度上与水汽含量、云量及大气降水量存在联系。

青藏高原对流层中下层的降温现象目前还难以解释。本文分析表明, 最大降温区域出现在高原内部。这个地区平均海拔高度接近 4 000 m, 因此实际上反映的是 500 hPa 和 400 hPa 两个层次的大气温度平均状况, 500 hPa 已接近地面。地面站资料分析一般表明这些地区的年平均气温是明显上升的^[18], 与探空资料分析结果截然相反。不论是地面还是探空站, 这个地区都比较稀少, 这使得分析结果的可靠性不如其他地区, 但没有证据表明本文的结果是由于资料稀缺和质量问题引起的。从降水变化来看, 近 50 年青藏高原地区多数台站记录的降水也是增加的^[17], 对流层温度似乎也不应该呈降低趋势。

值得提出的是, 从全国范围来看, 高空温度资料仍存在一些问题, 特别是由于更换仪器和改变操作方法等引起的时间不连续性, 还没有给予适当处理^[11, 17, 19]。本文对资料进行了初步质量检验和控制, 剔除了一些存在严重奇异数据的台站。但是, 20 世纪 60 年代我国探空仪器换型和从 1966 年初开始统一对新仪器进行辐射订正所造成的温度序列的不均匀性可能是存在的^[20]。其中 1966 年 1 月开始的对新仪器进行辐射订正在对流

层中下层温度变化上似乎有所反映, 而在对流层高层及以上层次平均温度序列上并没有明显断点。在今后的研究中, 需要对这些问题的进一步重视, 对高空资料进行更严格的非均匀性检验和订正。

作者认为, 可能仍然存在的部分资料非均匀性问题不会严重到明显影响本文基本结论的程度。华北地区地面气温资料的非均匀性订正效果分析表明, 采用订正后与订正前资料获得的温度趋势存在一定差别, 但差别不甚明显^[21]。当然, 地面资料和高空资料造成非均匀性的原因是不同的, 不能简单地进行类比。如果本文分析时段起始于 1966 年, 对流层中下层平均温度的增暖趋势将略有增加, 但仍不很显著。此外, 对流层中下层温度与地面温度序列的高度相关也在一定程度上说明, 我国高空温度记录尽管存在一定问题, 但基本上还是可靠的, 可以用来进行长期温度变化趋势分析。

致 谢 感谢两位审稿专家的建设性意见。

参考文献

- [1] Angell J K. Comparison of surface and tropospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26** (17): 2761~2764
- [2] Angell J K. Global, hemispheric, and zonal temperature deviations derived from radiosonde records. In Trends Online: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1999
- [3] Parker D E, Gordon M, Cullum D P N, et al. A new global gridded radiosonde temperature data base and recent temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 1499~1502
- [4] Ross R J, Otterman J, Starr D, et al. Regional trends of surface and tropospheric temperature and evening-morning temperature difference in northern latitudes: 1973-93. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23** (22): 3179~3182
- [5] IPCC. *Climate Change: Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [6] 周宁芳, 屠其璞, 贾小龙. 近 50 a 北半球和青藏高原地面及其高空温度变化的初步分析. *南京气象学院学报*, 2003, **26** (2): 219~227
Zhou Ningfang, Tu Qipu, Jia Xiaolong. A Preliminary

- Analysis of Surface and Middle-Upper Level Temperature over the Northern Hemisphere and the Tibetan Plateau in Recent 50 Years. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (2): 219~227
- [7] Angell J K. Tropospheric temperature variations adjusted for El Niño, 1958—1998. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 11841~11849
- [8] Hurrell J W, Brown S J, Trenberth K E, et al. Comparison of tropospheric temperatures from radiosondes and satellites: 1979—1998. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 2165~2177
- [9] Christy J R, Spencer R W, Norris W B, et al. Error estimates of version 5.0 of MSU/AMSU bulk atmospheric temperature time series. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2003, **20**: 613~629
- [10] Wentz F J, Schabel M. Effects of satellite orbital decay on MSU lower tropospheric temperature trends. *Nature*, 1998, **394**: 661~664
- [11] National Research Council (NRC). *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. Washington, DC: National Academy Press, 2000. 50~57
- [12] Vinnikov K Y, Grody N C. Global warming trend of mean tropospheric temperature observed by satellites. *Science*, 2003, **302**: 269~272
- [13] Fu Q, Johanson C M, Warren S G, et al. Contribution of Stratospheric Cooling to Satellite-Inferred Tropospheric Temperature Trends. *Nature*, 2004, **429**: 55~58
- [14] Christy J R, Norris W B. What may we conclude about tropospheric temperature trends? *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L06211, doi:10.1029/2003GL019361
- [15] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *Int. J. Climatol.*, 1996, **16**: 361~377
- [16] Parker D E. Temperatures high and low. *Science*, 2000, **287**: 1216~1217
- [17] Zhai P M, Eskridge R E. Analyses of inhomogeneities in radiosonde temperature and humidity time series. *J. Climate*, 1996, **9** (4): 884~894
- [18] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 五十年来中国大陆近地面气候变化的基本特征. *气象学报*, 2005, **63** (6): 942~956
- Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of Mainland China over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6): 942~956
- [19] Hurrell J W, Brown S J, Trenberth K E, et al. Comparison of tropospheric temperatures from radiosondes and satellites: 1979—1998. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 2165~2177
- [20] 翟盘茂. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题. *气象学报*, 1997, **55** (5): 563~572
- Zhai Panmao. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (5): 563~572
- [21] 周雅清. 华北地区热岛效应对区域平均气温序列的影响. 兰州大学硕士学位论文, 2005
- Zhou Yaqing. Effect of urbanization on regional average temperature series in North China. M.S. thesis (in Chinese), Lanzhou University, 2005