

NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化

黄刚

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 利用中国东部的探空站资料以及 ERA40 和 NCAR/NCEP 再分析资料, 详细地比较了我国北方地区(主要指内蒙古以及华北地区)的高低层位势高度以及温度的特征。结果表明, 在 20 世纪 70 年代以前, NCEP/NCAR 再分析资料对我国北方地区对流层低层无论是位势高度或温度都描述不好, 存在着很明显的虚假年代际变化趋势。与实际探空资料相比, 相对于 NCEP/NCAR 再分析资料, ERA-40 再分析资料对东亚地区对流层低层位势高度或温度的描述明显好于 NCEP/NCAR 再分析资料, 因此, 研究东亚气候的年代际变化应用 ERA-40 再分析资料要好一些。高层的结果要比低层好。在 70 年代以后, NCEP/NCAR 再分析资料对于内蒙古和华北对流层上层的位势高度和温度的描述要好于 ERA-40 再分析资料, 更接近于实际探空值, 这说明这两份再分析资料各有优缺点。

关键词 NCEP/NCAR 再分析资料 ERA-40 再分析资料 探空资料 年代际气候变化

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0310-11 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

The Assessment and Difference of the Interdecadal Variations of Climate Change in Northern Part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 Reanalysis Data

HUANG Gang

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the sounding datasets over the eastern part of China, ERA-40 and NCAR-NCEP reanalyses, we compare the characteristics of the geopotential highs and temperatures at lower and upper troposphere over northern part of China (particularly in Nei Mongol and North China). It is found that before 1970s, the geopotential heights and temperatures at lower and upper troposphere from NCEP-NCAR reanalyses do not agree well with the observations, the existing interdecadal trend is unrealistic, but the ERA-40 datasets are much closer to those of observations in the long-term trend. However, after the 1970s, the upper troposphere geopotential heights and temperatures from NCEP-NCAR reanalyses is better than ERA-40 reanalyses, which is more closer to those of observations. In other words, these two reanalyses have their own shortcoming over the northern part of China.

Key words ERA-40 reanalyses datasets, NCAR/NCEP reanalyses datasets, sounding datasets, interdecadal climatic variability

收稿日期 2006-02-21 收到, 2006-04-02 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218 以及国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418300、2006CB400500 和国家自然科学基金委青年项目 40305012

作者简介 黄刚, 男, 1971 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化的研究。E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

1 引言

自美国 NCEP/NCAR 公布了 NCEP/NCAR 17 层大气再分析资料^[1,2]以后, 世界上许多学者利用这份再分析资料来分析各种各样大气环流和气候变化, 得出了许多有益的结论。特别是许多学者利用这份资料不仅研究了亚洲季风和东亚气候的年代际变化^[3~10], 而且研究了热带大气环流和天气耦合的年代际变化^[11,12]。这些研究结果都表明了, 在 20 世纪 70 年代后期开始到 90 年代末, 亚洲季风环流和东亚气候以及热带大气环流都发生了一次很明显的年代际变化。

然而, 最近欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 公布了 ERA-40 的 23 层大气再分析资料^[13]以后, 有些学者^[14~16]也开始应用 ERA-40 再分析资料来分析亚洲季风环流和东亚气候的年代际变化, 并与应用 NCEP/NCAR 再分析资料的分析结果作比较。他们发现了应用这两份再分析资料所分析的亚洲季风环流和东亚气候的年代际变化特

征有明显的差异, 特别是 Inoue 和 Matsumoto^[15]指出, 利用 NCEP/NCAR 再分析资料所分析的海平面气压年代际变化在某些区域存在着过分夸大的现象。他们的研究表明: 若用 NCEP/NCAR 再分析资料来研究海平面气压的年代际变化, 在 1980~1999 年期间一个很明显的反气旋距平环流会出现在蒙古高原, 而用 ERA-40 再分析资料, 这个反气旋距平环流并没有出现, ERA-40 再分析资料所得的结果似乎更合理。

这两份再分析资料无论在分析全球大气环流和气候的年际和年代际变化 (variability), 或是在分析亚洲季风环流和东亚气候的年际和年代际变化都具有十分重要的作用, 它们已成为各国气象学家在天气和气候分析研究中通用的全球大气的最重要两份再分析资料。但是, 由于这两份资料在再分析过程中融入了模式资料, 因而与模式误差有一定的关系, 并且在整编实际观测资料中由于数码互相转换也会融入误差, 正如 Yang 等^[17]指出, 在 NCEP/NCAR 再分析资料中, 1967 年以前在蒙古和華北海平面气压存在着很大

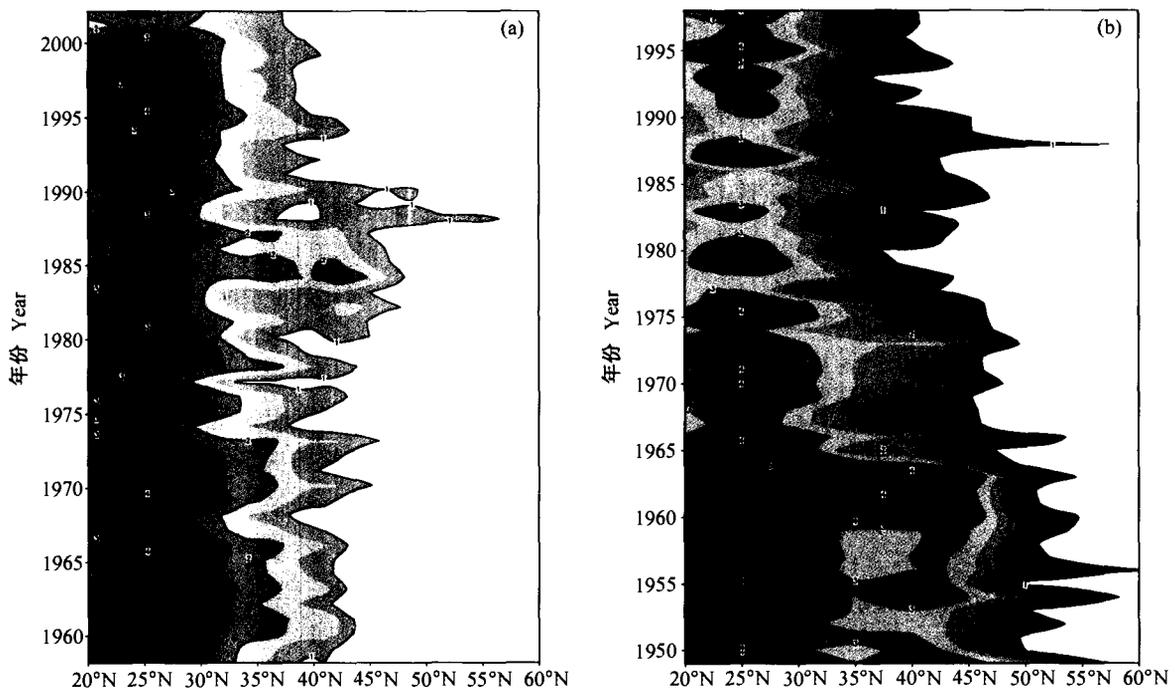


图 1 夏季 850 hPa 沿 105~140°E 纬向平均的经向风 ($v > 0$) 随纬度和时间的变化 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。 (a) 应用 ERA-40 再分析资料; (b) 应用 NCEP/NCAR 再分析资料, 阴影为 $v \geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域

Fig. 1 Variations of southerly wind at 850 hPa averaged from 105-140°E with latitude and time in summer (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (a) using ERA-40 reanalysis data; (b) using NCEP/NCAR reanalysis data. Shaded area means $v \geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

系统误差。因此,在许多研究中用这两份再分析资料来分析研究气候变化事实是否可靠,特别是在20世纪70年代后期迄今亚洲季风环流发生了明显的年代际变化,是否合理、可靠,这是一个当前值得认真分析研究的科学问题。

图1是分别利用这两份再分析资料所得的夏季沿 $105\sim 140^{\circ}\text{E}$ 平均的经向风($v>0$)随纬度和时间的分布。如图1所示,利用这两份资料所分析的东亚夏季的南风随纬度和时间的分布在70年代以前有很大的差异,NCEP/NCAR再分析资料在70年代以前南风中心很强,并且 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的南风所达到的北界最北可以接近 60°N ,而用ERA-40资料明显没有NCEP/NCAR再分析资料所得的南风强。因此,从年代际变化的观点来看,如果依据NCEP/NCAR再分析资料来分析东亚夏季的气候变化,可以看到很明显的年代际变化,得出南风减弱的趋势非常明显,而利用ERA-40再分析资料来分析东亚夏季气候的年代际变化则没有那么明显。这就给我们带来很大的疑问,究竟两者在中国东部季风区哪一份资料表现得更好?以及由此得出的许多结论是否与实际不符?等等,这是我们研究东亚季风的年代际变化时首先必须研究的问题。

鉴于上述原因,本研究有必要利用实际观测资料来比较这两份再分析资料在分析东亚地区大气环流和气候的长期变化时的可靠性和适用性;并且,鉴于Inoue和Matsumoto^[15]主要比较这两份再分析资料在海平面气压方面的差异,本研究将重点比较这两份再分析资料在描述1000 hPa以上位势高度和温度的差异;又由于我国北方地区处于东亚夏季风的边缘和敏感地带,它在两份再分析资料中特别是年代际气候变化上存在很大的不同,到底哪份资料更接近观测等问题非常重要。本文利用内蒙古、华北地区共7个站多年探空资料,评价和比较这两份再分析资料在分析上述地区气候长期变化时的差异及其准确性。

2 资料以及处理方法

本研究所用的资料如下:

(1) NCEP/NCAR再分析资料

该资料时间长度从1948年1月1日到2006

年(实时观测),水平格点为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ (144×73),垂直分层为17层,分别为1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20和10 hPa的资料,并且包括地面层的资料以及其他附属资料^[18]。

(2) ERA-40再分析资料

该资料时间长度从1957年9月~2002年8月,水平格点为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ (格点数 144×73),垂直分层为23层,分别为1000、925、850、775、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10、7、5、3、2和1 hPa的资料,并且包括地面层的资料以及其他附属资料^[19]。目前本文应用的是ERA-40高分辨率资料,水平格点为 $1.125^{\circ}\times 1.125^{\circ}$ (格点数 320×160),垂直分层同样为23层。

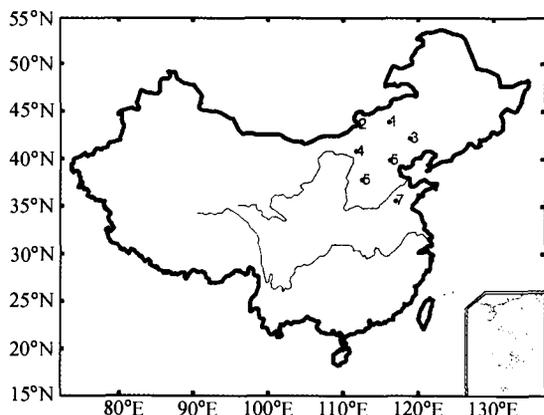
(3) 中国B01探空资料

该资料是从1951年1月~2001年12月,时间分辨率是每天00时和12时(北京时间),其空间属性为($16.83\sim 49.22^{\circ}\text{N}$, $75.98\sim 129.47^{\circ}\text{E}$);垂直范围从地面到5 hPa,层数为20层。其数据处理方法为:1980年以前,以原有的B01高空资料为基础,对其缺测部分依次用卡片格式的高空资料和CARDS资料进行插补;1980年以后,完全采用mdat和实时接收的高空资料,无论是否有缺测均不进行插补。

我们详细考察了该数据集,由于此数据集中风场全部从1980年开始,这就无法与上述两份再分析资料作详细比较,因此,本研究选取观测资料比较多的位势高度和温度,层次为850、700、500、300和200 hPa。

如图2所示,我们选取了7个站的探空资料作为内蒙古、华北地区的代表,所用测站的探空观测值是利用每个观测站每天2次观测,取平均后再计算月平均,然后计算夏季平均位势高度和温度的变化;而NCEP/NCAR和ERA-40再分析资料分别用1天4次的再分析资料取平均后计算月平均,之后再计算季平均。

利用上述两份再分析资料来分析内蒙古、华北7个测站上空在不同层次位势高度和温度的演变情况,并与上述区域的实际探空所得的位势高度和温度作比较。



- 1 锡林浩特 Xilinhot (站号 Station number: 54102)
- 2 二连浩特 Erenhot (站号 Station number: 53068)
- 3 赤峰 Chifeng (站号 Station number: 54218)
- 4 呼和浩特 Hohhot (站号 Station number: 53463)
- 5 北京 Beijing (站号 Station number: 54511)
- 6 太原 Taiyuan (站号 Station number: 53463)
- 7 济南 Jinan (站号 Station number: 54823)

图 2 所取探空站的地理位置

Fig. 2 The geographic position of observational stations chosen in this study

3 中国北方地区位势高度的年际变化的差别

3.1 内蒙古自治区

图 3a、b 和 c 分别是 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得到的内蒙锡林浩特夏季 850、300 和 200 hPa 位势高度的年际变化。从图 3a 我们可以清楚地看到，由 NCEP/NCAR 再分析资料所得锡林浩特夏季对流层低层在 20 世纪 70 年代以前不仅与实际探空观测有很大差别，而且与 ERA-40 资料存在很大的差别，特别是在 60 年代末存在很大的年代际变化趋势，这个变化是虚假的。从长期变化的角度来看，ERA-40 资料要明显好于 NCEP/NCAR 的，但是如果我们仔细看 70 年代以后的年际变化，从 NCEP/NCAR 再分析资料所得位势高度要好于从 ERA-40 再分析资料所得的结果。从图 3b 和图 3c 可以看到，到了 300 hPa 和 200 hPa 高层，虽然在 70 年代以后 NCEP/NCAR 与 ERA-40 再分析资料所得的位势高度的年际变化比较一致，但是在 70 年代以前两者仍然相差比较大，而 ERA-40 再分析资料在 70 年代之前的位势高度的变化与实际探空值比较一致。因此，从总体看，应用 ERA-40 再分析资

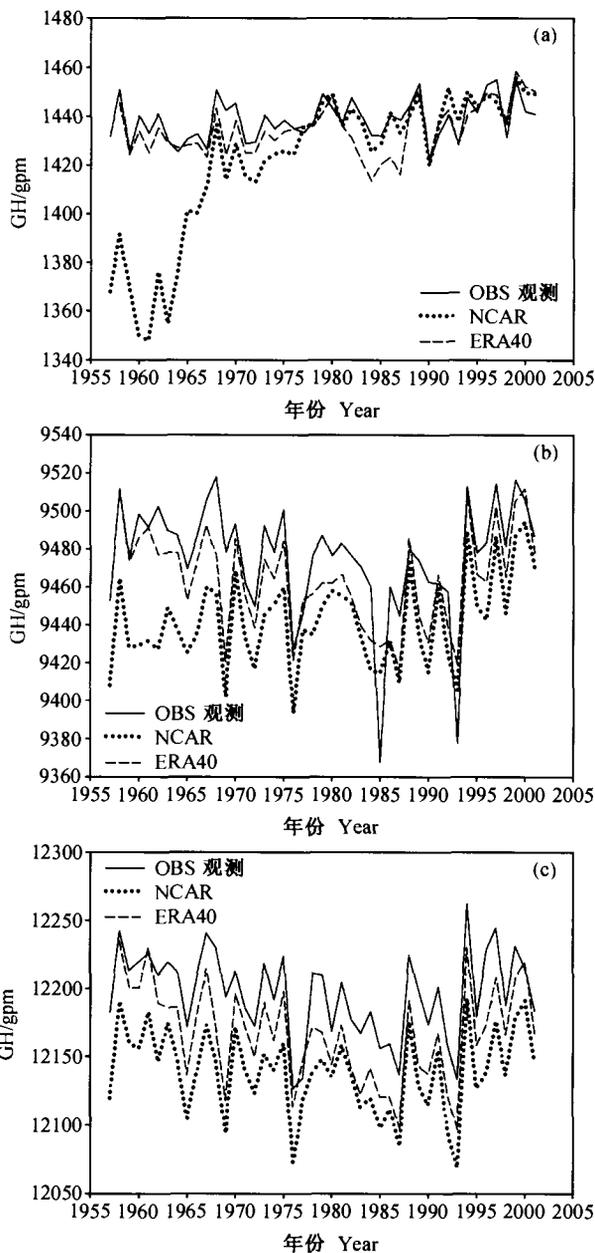


图 3 由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的内蒙锡林浩特夏季 850 hPa (a)、300 hPa (b) 和 200 hPa (c) 位势高度 (GH) 的年际变化

Fig. 3 Interannual variations of summer geopotential height (GH) at 850 hPa (a), 300 hPa (b) and 200 hPa (c) Xilinhot station of Nei Mongol analyzed by using the NCEP/NCAR reanalysis data, the ERA-40 reanalysis data and sounding observations, respectively

料来分析大气环流的年代际变化要好于应用 NCEP/NCAR 再分析资料。(注: 该站因为 700 和 500 hPa 位势高度的探空资料缺测较多故没有

进行比较,剩下的参与比较的探空站均比较5层)。

图4是由NCEP/NCAR、ERA-40再分析资料与实际探空所得的内蒙古二连浩特夏季各层次位势高度的年际变化。图4与图3相比较,同样

可以看到:与锡林浩特所得的结论一样,在20世纪70年代以前,由NCEP/NCAR再分析资料所得的二连浩特夏季对流层下层的位势高度与实际观测和ERA-40再分析资料的差别都较大,并且,从NCEP/NCAR再分析资料所得的二连浩特的位

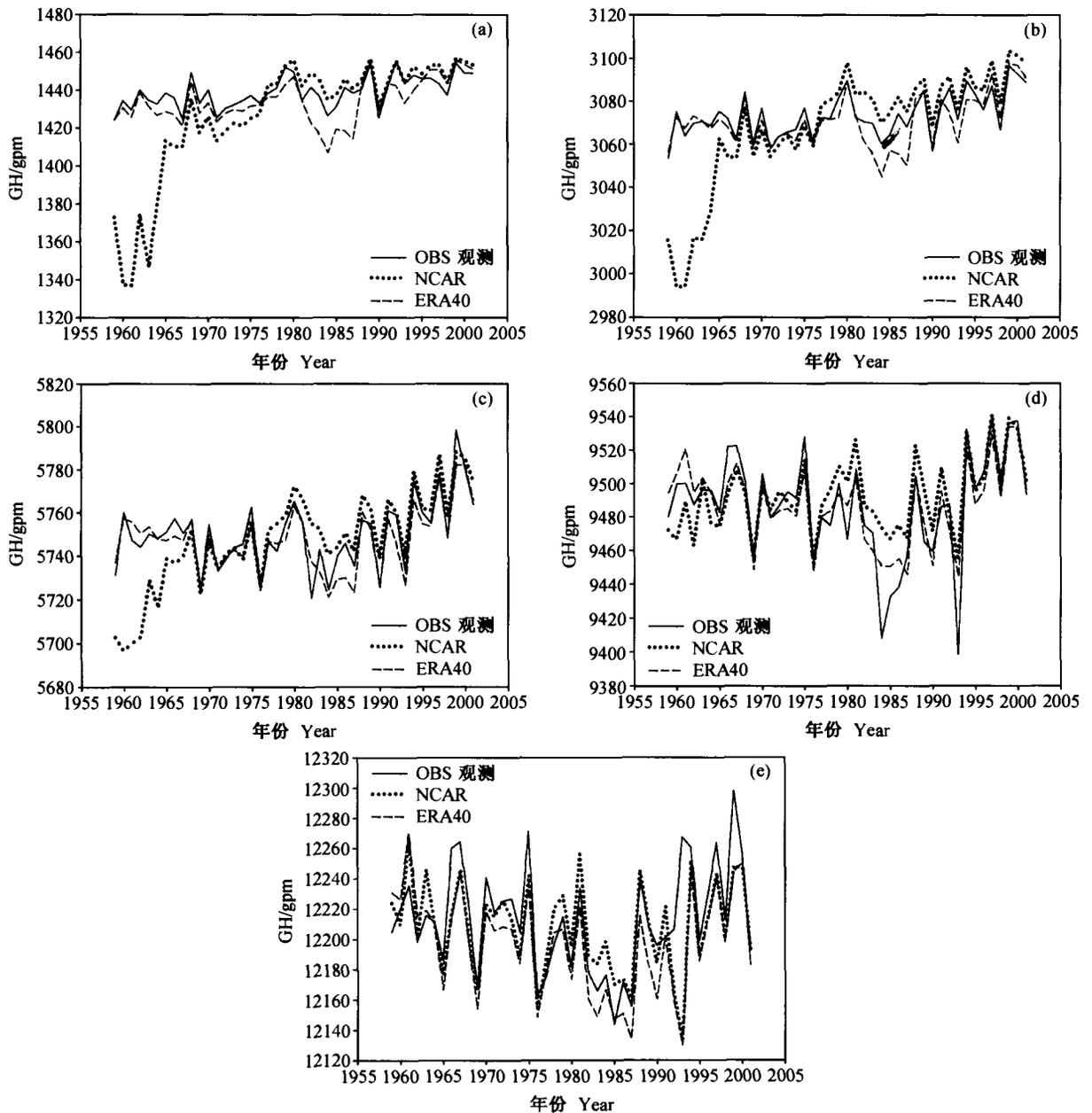


图4 由NCEP/NCAR、ERA-40再分析资料 and 实际探空所得到的内蒙古二连浩特夏季850 hPa (a)、700 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d) 和200 hPa (e) 位势高度的年际变化

Fig. 4 Interannual variations of summer geopotential height at 850 hPa (a), 700 hPa (b), 500 hPa (c), 300 hPa (d) and 200 hPa (e) Er-enhot station of Nei Mongol analyzed by using the NCEP/NCAR reanalysis data (short dashed line), the ERA-40 reanalysis data (long dashed line) and sounding observations (solid line), respectively

势高度在 1965 年前后有很明显的年代际变化, 这是虚假的, 而用 ERA-40 再分析资料在研究气候的长期变化中要好于应用 NCEP/NCAR 再分析资料, 并与实际观测较接近。但是, 两者的差别到了对流层上层逐渐变小, 趋于一致, 特别是两份

再分析资料在 90 年代以后基本一致, 和观测越来越接近。正如图 4b 和图 4c 所示, 在 70 年代以后, 从 NCEP/NCAR 再分析资料所得的二连浩特夏季位势高度要比从 ERA-40 再分析资料的结果好, 更接近于实际观测。

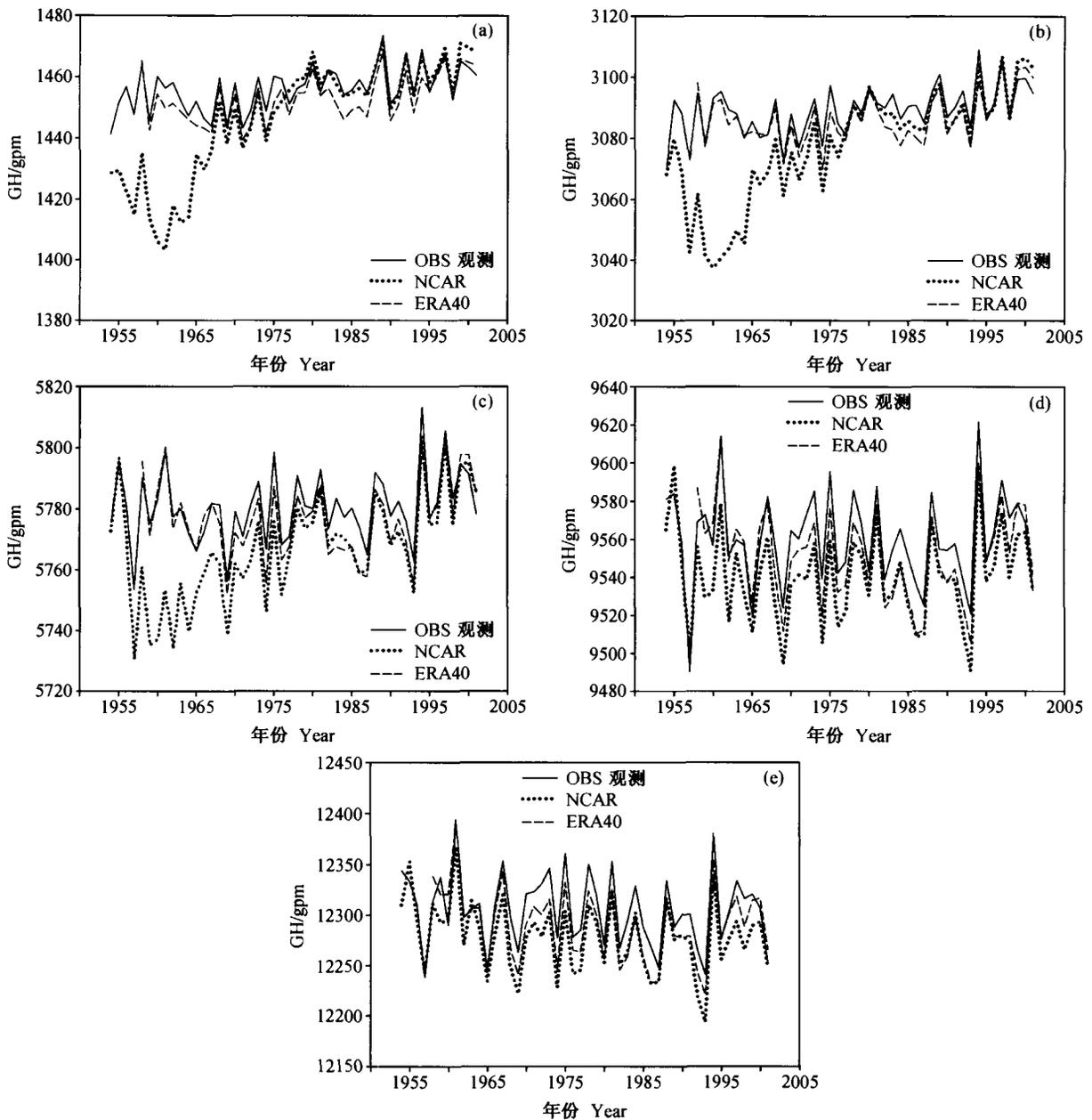


图 5 由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的北京夏季 850 hPa (a)、700 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d) 和 200 hPa (e) 的位势高度的年际变化

Fig. 5 Interannual variations of summer geopotential height at 850 hPa (a), 700 hPa (b), 500 hPa (c), 300 hPa (d) and 200 hPa (e) Beijing station of north China analyzed by using the NCEP/NCAR reanalysis data, the ERA-40 reanalysis data and sounding observations, respectively

本研究还分析比较了由 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料与实际探空的赤峰以及呼和浩特上空各层次夏季位势高度的年际变化的差别,其结论与上述锡林浩特和二连浩特的情况相同,不再赘述。

3.2 华北地区

首先我们分析比较北京测站的情况。图 5 是从 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的北京上空各层次夏季位势高度的年际变化。从图 5 a、b 和 c 可以清楚看到,与内蒙古 3

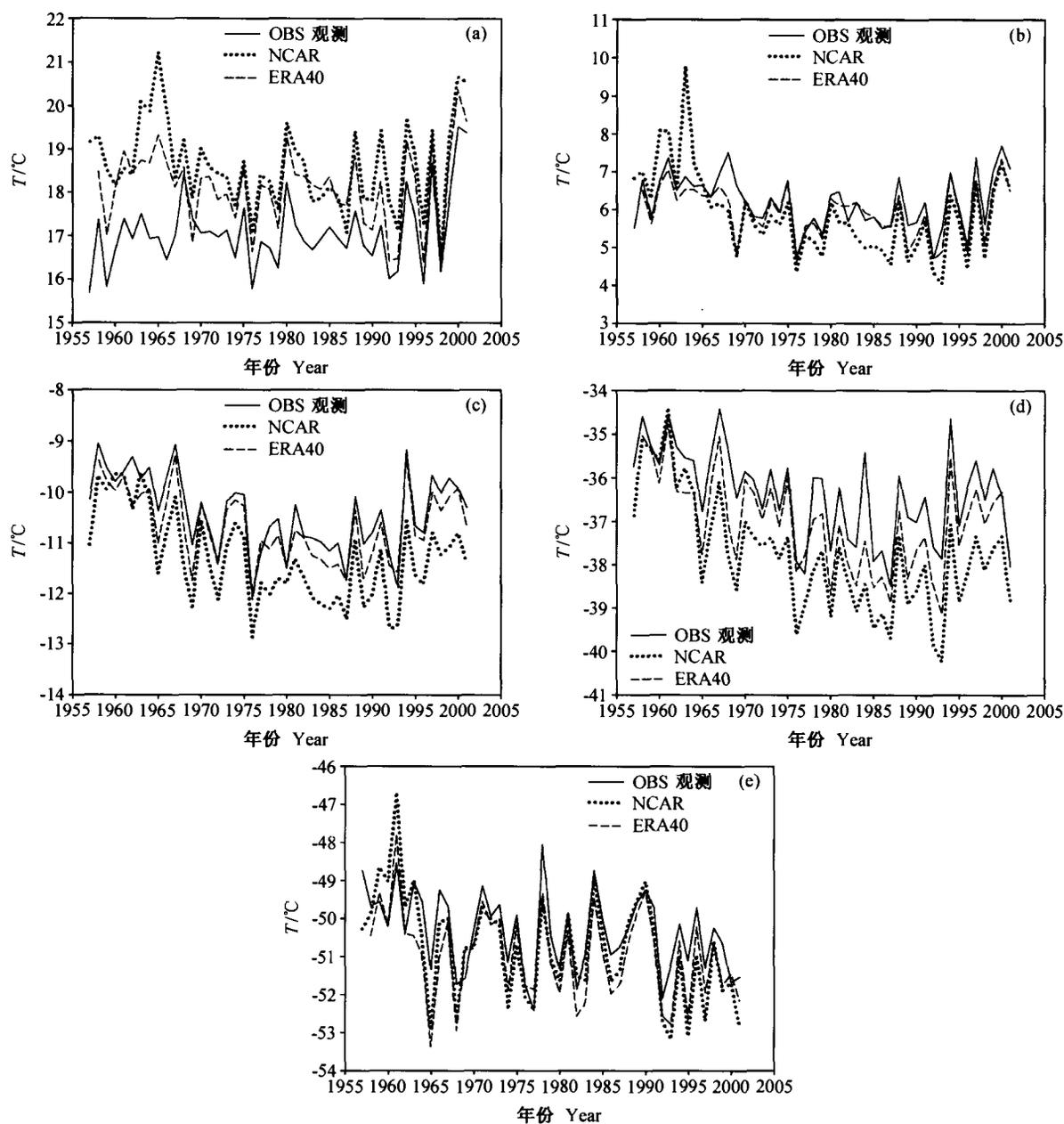


图 6 由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的内蒙古锡林浩特夏季 850 hPa (a)、700 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d) 和 200 hPa (e) 温度的年际变化

Fig. 6 Interannual variations of summer air temperature at 850 hPa (a), 700 hPa (b), 500 hPa (c), 300 hPa (d) and 200 hPa (e) Xilinhot station of Nei Mongol analyzed by using the NCEP/NCAR reanalysis data, the ERA-40 reanalysis data and sounding observations, respectively

个站的位势高度变化一样, 在 20 世纪 70 年代以前, 由 NCEP/NCAR 再分析资料所得的北京上空对流层下、中层的位势高度不仅与 ERA-40 再分析资料有很大差别, 而且与实际观测的结果也偏离较大。但在 70 年代以后, NCEP/NCAR 再分

析资料所得的对流层下层的位势高度不仅与 ERA-40 比较一致, 而且比 ERA-40 再分析资料更接近于实际探空值; 同时, 从图 5d 和图 5e 可以看到, 在 70 年代以前, 虽然由 NCEP/NCAR 再分析资料所得的北京上空对流层上层与 ERA-40 再分析

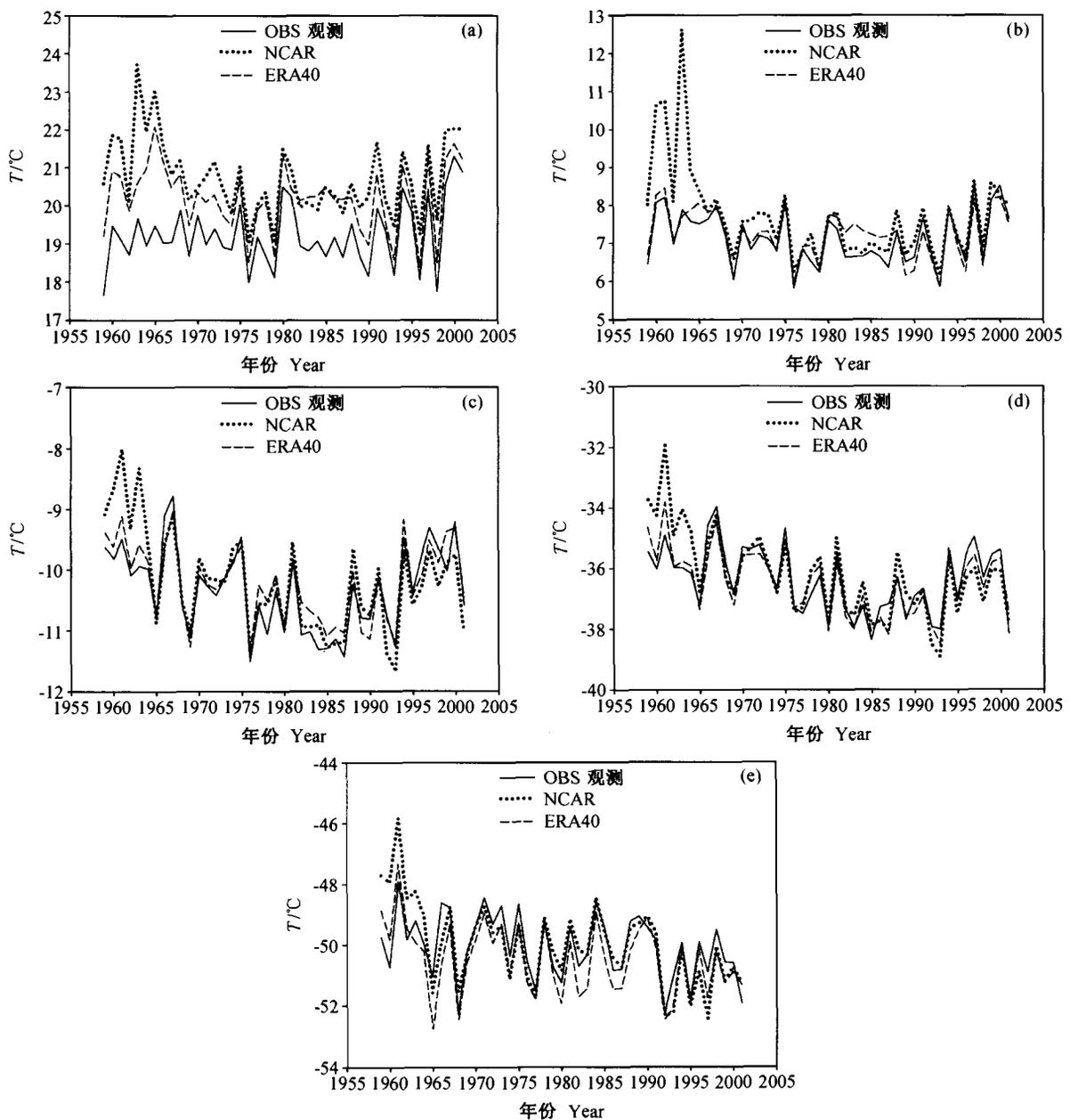


图 7 由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的内蒙古二连浩特夏季 850 hPa (a)、700 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d) 和 200 hPa (e) 温度的年际变化

Fig. 7 Interannual variations of summer air temperature at 850 hPa (a), 700 hPa (b), 500 hPa (c), 300 hPa (d) and 200 hPa (e) Er-enhot station of Nei Mongol analyzed by using the NCEP/NCAR reanalysis data, the ERA-40 reanalysis data and sounding observations, respectively

资料所得结果和实际探空值有一定差别, 但此差别要比低层小得多, 而在 70 年代以后, 由 NCEP/NCAR 再分析资料所得的位势高度的年际变化与 ERA-40 再分析资料所得的结果相近, 且与实际探空比较接近。

本研究还分析比较了由 NCEP/NCAR 与 ERA-40 再分析资料所得的太原和济南观测站上空各层次夏季位势高度的年际变化的差别, 并与这两站的实际探空作比较, 其结论与上述北京观测站的情况相同, 故本文不再重复。

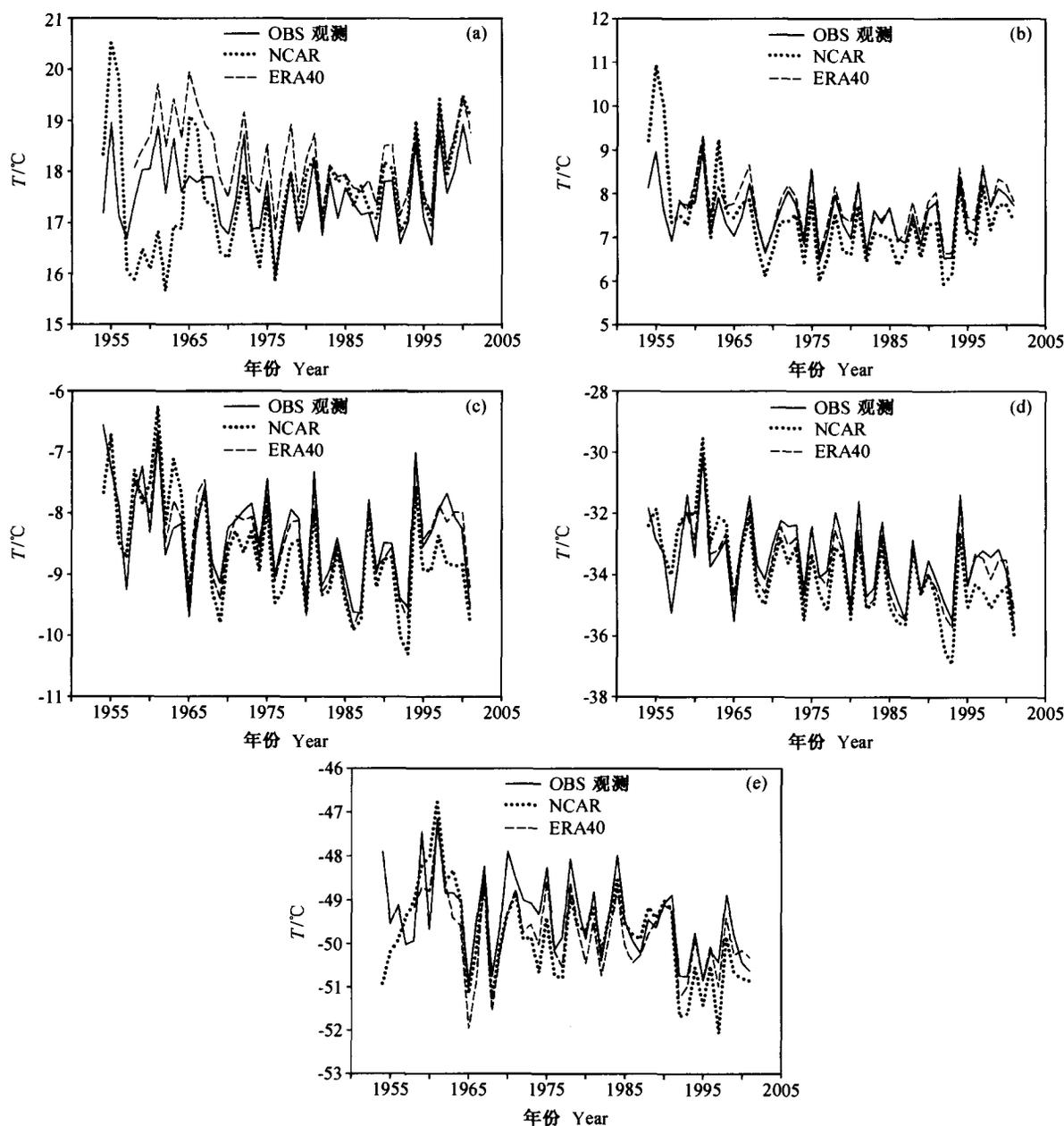


图 8 由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的北京夏季 850 hPa (a)、700 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d) 和 200 hPa (e) 温度的年际变化

Fig. 8 Interannual variations of summer air temperature at 850 hPa (a), 700 hPa (b), 500 hPa (c), 300 hPa (d) and 200 hPa (e) Beijing station of north China analyzed by using the NCEP/NCAR reanalysis data, the ERA-40 reanalysis data and sounding observations, respectively

总之,通过上述地区7个测站利用两份再分析资料所得的位势高度值与实际观测值比较,大致可以看到:在对流层低层 NCEP/NCAR 再分析资料在20世纪70年代以前不仅与 ERA-40 再分析资料差别较大,而且与实际观测值差别比较大;如果研究长期的气候变化利用 ERA-40 的资料所得的结果要好于 NCEP/NCAR 的资料,这与 Yang^[17]等及 Inoue 和 Matsumoto^[15]所得的结论一致。正是由于在70年代以前 NCEP/NCAR 再分析高度场资料在蒙古高原和华北对流层下层一带偏低,使得许多学者利用 NCEP/NCAR 再分析资料来研究70年代后期开始的气候跃变存在着过分扩大的趋势。但是,从 NCEP/NCAR 再分析资料与 ERA-40 再分析资料所得的内蒙、华北一带上空对流层上层与实测比较接近,相比之下, NCEP/NCAR 资料要比 ERA-40 资料更接近于实测。这在利用这两份再分析资料来分析东亚的气候变化时应引起注意。

4 中国北方地区温度的年际变化的差别

下面将分析比较上述地区7个测站利用 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料所得温度的年际变化情况并与实际探空所得的温度值作比较。

4.1 内蒙古地区

图6是由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的锡林浩特上空各层次夏季的温度值。从图6可以看到,总体来讲,温度情况要好于位势高度场的情况,在700 hPa 以下, NCEP/NCAR 再分析的温度与实际探空和 ERA-40 再分析资料的温度值差别比较大,特别在1965年之前,这个差别更大;到了对流层上层它们之间的差别越来越小,因此,高层的情况要好于低层的情况。

图7是由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的内蒙二连浩特各层次夏季温度的年际变化。图7与图4相比较,我们看到,与锡林浩特所得的结论一致,在20世纪70年代以前从 NCEP/NCAR 再分析资料的低层温度不仅与 ERA-40 再分析资料差别较大,而且与实际探空观测值差别也比较大,而70年代以后三者之间

的差区别较小。

同样我们也分析了赤峰和呼和浩特测站这3份资料的差别,结果大致与上述两测站相同。

4.2 华北地区

图8是由 NCEP/NCAR、ERA-40 再分析资料 and 实际探空所得的北京夏季各层次的温度值。从图8a和b可以看到,在20世纪70年代以前, NCEP/NCAR 再分析资料所得700 hPa 以下的对流层低层的温度与 ERA-40 再分析资料的温度值差别较大,它比实测偏低,特别在1965年以前,偏低很多,而从70年代以后,三者比较一致;到了高层,无论在70年代前或是在70年代后, NCEP/NCAR 再分析资料与 ERA-40 再分析资料 and 实际探空值都比较一致。但是,90年代后期高层 NCEP/NCAR 再分析资料的温度值比实测值偏低较大,而 ERA-40 再分析资料所得的北京对流层上层的温度值都偏高。

同样我们也研究了太原站和济南站,结果和北京站一致。

从 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料对上述区域7个测站上空各层次夏季温度的描述之比较可以看到,与此两份再分析资料对位势高度描述一样,在20世纪70年代之前, NCEP/NCAR 再分析资料对上述7个测站的对流层低层温度描述较差,且与 ERA-40 再分析资料的结果和实际探空值差别都较大,但到了对流层上层,它们之间的差别较小;而70年代之后,在内蒙古、华北一带三者比较一致,相对而言,从 NCEP/NCAR 再分析资料所得上述7个测站的温度值更接近于实测值。

5 结论与讨论

通过 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料对内蒙古地区和华北地区共7个测站40余年夏季各层次位势高度与温度值描述的比较,并与这些测站的实际探空值做比较,其结论如下:

(1) 在20世纪70年代以前, NCEP/NCAR 再分析资料对以上4个地区对流层低层无论是位势高度或温度都描述不好,存在着很明显的虚假年代际变化趋势,因此,利用此资料来研究东亚气候的年代际变化就可能存在很大问题,可能会

夸大了此气候的年代际变化。与实际探空资料相比, ERA-40 再分析资料对东亚地区对流层低层位势高度或温度的描述明显好于 NCEP/NCAR 再分析资料, 因此, 研究东亚气候的年代际变化应用 ERA-40 再分析资料要好一些。

(2) 与实际探空资料相比, 在 20 世纪 70 年代之后 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料对于中国北方包括内蒙古和华北地区的位势高度和温度的描述, 高层的结果要比低层好, 这在应用这两份再分析资料来分析东亚气候的年际和年代际变化时应注意此问题。

(3) 与实际探空相比, 在 20 世纪 70 年代以后, NCEP/NCAR 再分析资料对于内蒙古和华北对流层上层的位势高度和温度的描述要好于 ERA-40 再分析资料, 更接近于实际探空值, 这说明这两份再分析资料各有优缺点。

致谢 感谢德国 Max-Planck Institute for Meteorology (MPI-M) 和 ECMWF 提供 ERA-40 高分辨率资料以及 NCEP/NCAR 提供再分析资料, 同时感谢国家气象局资料中心提供中国东部台站的探空资料。

参考文献 (References)

- [1] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [2] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis, monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**: 247~267
- [3] Hu Zengzhen. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 19403~19412
- [4] Tannka M. Interannual and interdecadal variations of the western North Pacific monsoon and East Asian Baiu rainfall and their relationship to ENSO cycle. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1997, **75**: 1109~1123
- [5] Chang C P, Zhang Y, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J. Climate*, 2000, **13**: 4310~4325
- [6] Chang C P, Zhang Y, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon. *J. Climate*, 2000, **13**: 4326~4340
- [7] Wang Huijun. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **17**: 376~385
- [8] Wu R G, Wang B. A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962-77 and 1978-93. *J. Climate*, 2002, **15** (22): 3266~3279
- [9] Lu Riyu. Linear relationship between the interdecadal and interannual variabilities of North China rainfall in rainy season. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 1040~1044
- [10] Goswami B N. Interdecadal change in potential predictability of the Indian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L16208, doi: 10.1029/2004GL020337
- [11] Torrence C, Webster P. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *J. Climate*, 1999, **12**: 2679~2690
- [12] Zverev I I. Interdecadal changes in the zonal wind and the intensity of intraseasonal oscillations during boreal summer monsoon. *Tellus*, 2002, **54 A**: 288~298
- [13] Uppala S. ECMWF Reanalysis, 1957 - 2001, ERA-40. *ERA-40 Project Report Series*, 2002, **3**: 1~10
- [14] Annamalai H, Slingo J M, Sperber K R, et al. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: Comparison of ECMWF and NCEP-NCAR reanalyses. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 1157~1186
- [15] Inoue T, Matsumoto J. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP/NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960-99. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82**: 951~958
- [16] Wu R G, Kinter III J L, Kirtman B P. Discrepancy of Interdecadal Changes in the Asian Region among the NCEP-NCAR Reanalysis, Objective Analyses, and Observations. *J. Climate*, 2005, **18** (15): 3048~3067
- [17] Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J. Climate*, 2002, **15** (3): 306~325
- [18] <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis.html>
- [19] <http://www.ecmwf.int/research/era/era40survey/>