

何冬燕,田红,邓伟涛. 2013. 三种再分析地表温度资料在青藏高原区域的适用性分析[J]. 大气科学学报,36(4):458-465.

He Dong-yan, Tian Hong, Deng Wei-tao. 2013. Applicability analysis of three reanalysis surface temperature data over the Tibetan Plateau[J]. Trans Atmos Sci,36(4):458-465. (in Chinese)

三种再分析地表温度资料在青藏高原区域的适用性分析

何冬燕¹, 田红¹, 邓伟涛²

(1. 安徽省气候中心, 安徽 合肥 230031; 2. 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学), 江苏 南京 210044)

摘要:利用气象台站观测地表温度, 比较和分析了 ERA-Interim、NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 再分析地表温度资料在青藏高原的适用性。结果表明: 三种再分析资料都揭示了青藏高原地表温度的基本特征, 并较好地描述了高原地表温度的季节变化和年际变化特征; 但三种再分析资料都比观测地表温度明显偏低, 且对地表温度的长期变化趋势估计不足。比较而言, ERA-Interim 再分析地表温度产品在青藏高原的适用性最好, 与观测地表温度的相关最显著, 且能较好地反映高原地表温度的异常变化强度, 可作为研究高原地表温度年际变化的代用资料; 而 NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 再分析地表温度产品在青藏高原的适用性不佳, 其适用时段和适用区域需要进一步考察。

关键词: 青藏高原; 地表温度; 再分析资料; 适用性分析

中图分类号: P413.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7097(2013)04-0458-08

Applicability analysis of three reanalysis surface temperature data over the Tibetan Plateau

HE Dong-yan¹, TIAN Hong¹, DENG Wei-tao²

(1. Anhui Climate Center, Hefei 230031, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the surface temperature observed by meteorological stations, this paper compares and analyzes the applicability of surface temperature from the ERA-Interim, NCEP/NCAR and NCEP/DOE reanalysis data over the Tibetan Plateau. Results show that the three reanalysis products reveal the basic characteristics, the seasonal and interannual variations of surface temperature over the Tibetan Plateau, but they are all much colder than the observations and underestimate the long-term trend of surface temperature. Comparatively, the applicability of surface temperature from the ERA-Interim is the best, the correlation in surface temperature between the ERA-Interim and the observations is the most remarkable, and the surface temperature from ERA-Interim can better represent the abnormal variation of surface temperature, which can be used as the substitution data in studying interannual variation of surface temperature over the Tibetan Plateau. But the applicability of surface temperature from NCEP/NCAR and NCEP/DOE reanalysis data are both low, and the applicable period and area should be investigated further.

Key words: Tibetan Plateau; surface temperature; reanalysis data; applicability analysis

收稿日期: 2011-03-16; 改回日期: 2012-12-04

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(090415216); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201003); 国家自然科学基金资助项目(41205035)

通信作者: 何冬燕, 硕士, 工程师, 研究方向为气候变化研究与气候应用服务, hedongyan80@sina.com.

0 引言

青藏高原是世界上面积最大、海拔最高的高原,它以其独特的方式直接加热于对流层中部成为一个强大的热源(Flohn,1957,1960;叶笃正等,1979),影响着高原地—气系统间的热量交换(章基嘉等,1988),其能量储放对天气变化产生重要影响(汤懋苍等,1982,1988;冯松等,1998),因而青藏高原的热力作用一直是气象学研究的热点。然而青藏高原上常规气象观测台站分布不均、高原大气科学试验设点少且时效短,加之高原地势复杂、气候特殊,观测资料的不足为研究高原热状况、热性质及其气候变化特征等带来一定难度。再分析资料由于具有空间分布广、连续性好和时间序列长的优势,为弥补青藏高原实际观测资料的不足提供了可能,其中 NCEP 及 ECWMF 再分析中心的产品被广泛使用。不过再分析模式的数值物理方法、水平和垂直分辨率以及其他随时间变化的量都会给再分析过程带来不均一的问题(Shea et al.,1994),再分析资料的准确性难以保证,其在青藏高原地区的可信程度、适用范围以及资料质量等需要验证。为此我国气象工作者开展了大量工作,指出:NCEP/NCAR 再分析资料中的温、压、湿、风和降水等要素与气候分析基本相似(苏志侠等,1999),其地面热通量再分析资料能较好地代表高原地区热源强度的年及年际变化(宋敏红等,2000),并能在一定程度反映大气环流的基本特征(段安民,2003),利用 NCEP/NCAR 及 NCEP/DOE 再分析资料计算得到的高原中东部视热源变化趋势也与台站观测基本一致(王美蓉等,2012),但 NCEP/NCAR 再分析资料气温值较实际偏低(魏丽和李栋梁,2003a,2003b),而潜热(苏志侠等,1999)、感热(苏志侠等,1999)、地表反照率(张琼和钱永甫,1999)、降水值(魏丽和李栋梁,2003a,2003b)等偏大。ERA-40 再分析温度产品与台站观测气温的年际变化型式非常一致(Li et al.,2004),但对高原的气温预报具有冷偏差,其冷偏差主要是由于再分析系统格点与台站之间的海拔高度差异引起的(赵天保等,2004;赵天保和符淙斌,2006);而 ECMWF 的降水产品在描述高原实际降水时具有较大的不确定性(李川等,2004)。对比来看,NCEP/NCAR 及 ERA-40 的再分析位势高度产品各具优势(荀学义等,2011a,2011b,2011c),ERA-40 及 ERA-Interim 温度产品要优于 NCEP/NCAR 及 NCEP-DOE 产品(赵天保等,2004;赵天保和符淙斌,

2006),而在反映地面气温和降水的气候趋势方面,ECMWF 和 NCEP/NCAR 再分析产品都相对迟钝(李川等,2004)。

以上研究表明,尽管再分析资料在青藏高原地区存在系统性偏差,但在青藏高原气候变化中仍然具有一定的可信度。地表温度是是定量化描述地表与大气之间物质交换和能量平衡的重要参数,其值准确与否直接关系到地—气相互作用过程有关问题研究结果的正确性(王可丽和钟强,1995;江灏等,1997;Jiang and Wang,2001;程国栋等,2003)。青藏高原近地表层地温既受区域性因素(高度、经度、纬度)控制,同时又受特定地理条件及地层本身性质(如植被、雪盖、坡向、坡度、岩性及含水量等因素影响),变化错综复杂(王绍令等,2002)。开展不同再分析地表温度的适用性分析十分必要,目前国内这方面的研究还较少。本文利用青藏高原区域气象台站观测地表温度资料对 ERA-Interim、NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 三套再分析地表气温产品进行分析和比较,检验它们在高原区域的可靠性。

1 资料及处理

本文所用台站观测资料(简称观测)是由中国气象局国家信息中心提供的 740 站月平均地表温度观测数据及其所对应的台站海拔高度数据。所用再分析资料包括 ERA-Interim(简称 ERA)、NCEP/NCAR(简称 NCEP-1)和 NCEP/DOE(简称 NCEP-2)三种月平均地表气温产品,其中 ERA 的空间分辨率是 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$,NCEP-1 和 NCEP-2 空间分辨率约为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。各资料研究时段取为 1989—2004 年。

研究范围取($70 \sim 105^{\circ}\text{E}$, $26 \sim 42^{\circ}\text{N}$),海拔高度在 3 000 m 以上的青藏高原区域。首先对观测数据进行质量控制,剔除缺测数据较多的观测台站,最后保留 61 个台站为研究对象(图 1)。这些台站主要集中在高原东部,高原西部台站较少且分布稀疏。然后采用双线性插值将再分析资料内插到观测台站所在位置,以保证不同资料之间的比较是在同一地点进行的。

2 资料对比

2.1 空间分布

2.1.1 气候态分布

首先比较青藏高原区域三种再分析地表温度与观测地表温度气候态的异同。图2分别给出了

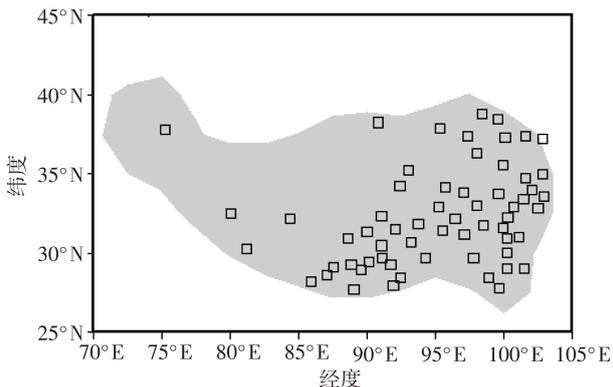


图 1 气象台站的分布(阴影区表示海拔高度超过 3 000 m)

Fig. 1 Distribution of the meteorological stations (the shaded area denotes altitude above 3 000 m)

1989—2004 年共 16 a 观测、ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 的年平均地表温度的空间分布及各再分析资料与观测资料的偏差值。

观测年平均地表温度主要受海拔高度的控制,

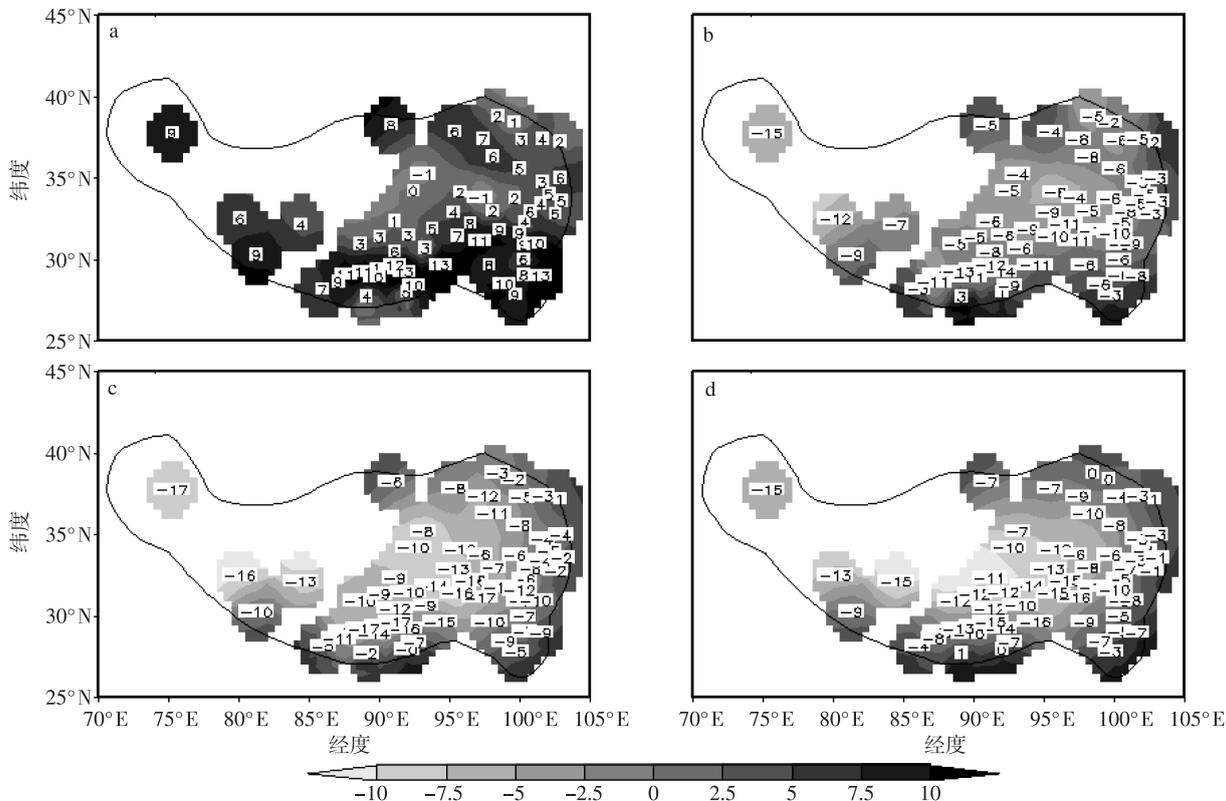


图 2 观测(a)、ERA(b)、NCEP-1(c)和 NCEP-2(d)年平均地表温度的空间分布(单位:℃;阴影表示地表温度的空间分布;图 a 中填值表示相应站点的观测年平均地表温度,图 b、c、d 中填值表示相应站点的再分析资料与观测年平均地表温度的差值;实线区域表示海拔高度超过 3 000 m)

Fig. 2 Spatial distribution of annual mean surface temperature from (a) the observations, (b) ERA, (c) NCEP-1 and (d) NCEP-2 (units:℃; the shaded area denotes the spatial distribution of surface temperature; the values in (a) denote the observed surface temperature, and those in (b), (c) and (d) the differences between the reanalysis data and the observations; the area with solid line denotes altitude above 3 000 m)

同时服从纬度和经度的地带性规律,呈现边缘高中部低的分布特征。高原东南部—雅鲁藏布江流域—高原西部一线地表温度较高,年平均地表温度基本在 6℃以上;暖中心位于高原东南部和雅鲁藏布江河谷,最高值达到 13℃。此外,高原北部也存在一个暖区,温度在 6~8℃。冷中心则分布在高原中部及中东部,年平均地表温度在 0℃以下,最低值为 -1℃。

三种再分析年平均地表温度也具有边缘高中部低的特征,但暖中心和冷中心的位置则与实测资料存在一定差异。三种再分析年平均地表温度的暖区均位于高原北部—东部—南部边缘;它们的暖中心均位于高原东南角和南部边缘,较观测地表温度的暖中心位置偏南。三种再分析年平均地表温度的冷区位于在高原中部—西部。ERA 年平均地表温度有两个冷中心:一个位于高原中东部,较观测中东部的冷中心偏西;另一个位于高原西部,该中心在观测年平均地表温度分布(图 2a)中并不存在,是虚假的

冷中心。NCEP-1 年平均地表温度的冷中心位于高原中西部,较观测中部的冷中心偏西偏南。NCEP-2 年平均地表温度的冷中心位于高原中南部,较观测中部的冷中心偏南。此外,ERA 再分析地表温度对高原中部的冷中心没有表达,而 NCEP-1 和 NCEP-2 再分析资料都没有显示出高原中东部的冷中心。从地表温度的数值来看,三种再分析地表温度均较观测地表温度明显偏低,这可能归因于再分析系统格点与台站之间的海拔高度差异(李瑞青等,2012),它们的暖中心温度分别为:7 °C (ERA)、4 °C (NCEP-1)、6 °C (NCEP-2),冷中心温度分别为:-6 °C (ERA)、-10 °C (NCEP-1)、-11 °C (NCEP-2)。

三种再分析资料与观测地表温度的偏差值更直观地显示了三种再分析地表温度的冷偏差。三种再分析年平均地表温在高原东部及南部边缘的小范围区域与观测差异较小、拟合较好,在高原其他大部地区均存在对实际地表温度过冷估计的问题。ERA 年平均地表温度与观测地表温度的偏差较大的区域位于高原中南部及西部,而 NCEP-1 和 NCEP-2 年

平均地表温度则是在高原中部及西部,上述区域偏差值基本都在 10 °C 以上;其中,三种再分析年平均地表温度与观测年平均地表温度的最大差值均集中在高原西部和雅鲁藏布江流域,超过 15 °C。

综上所述,三种再分析地表温度的气候态分布与观测地表温度基本一致,表现为高原边缘暖中部冷的特征。但三种再分析地表温度普遍较观测偏冷,且暖区和冷区的位置也与观测资料存在一定差异,尤其在高原西部和雅鲁藏布江流域与观测差异最大。

2.1.2 均方差分布

进一步比较 1989—2004 年青藏高原观测、ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 年平均地表温度的均方差分布情况(图 3),以考察三种再分析资料反映高原地表温度异常变化的能力。

从观测地表温度来看,高原大部地区年平均地表温度的均方差基本接近,为 2~4°C,表明高原地区年平均地表温度变化的空间分布较均匀;高原西部地表温度均方差稍大,大值中心位于高原西南部,

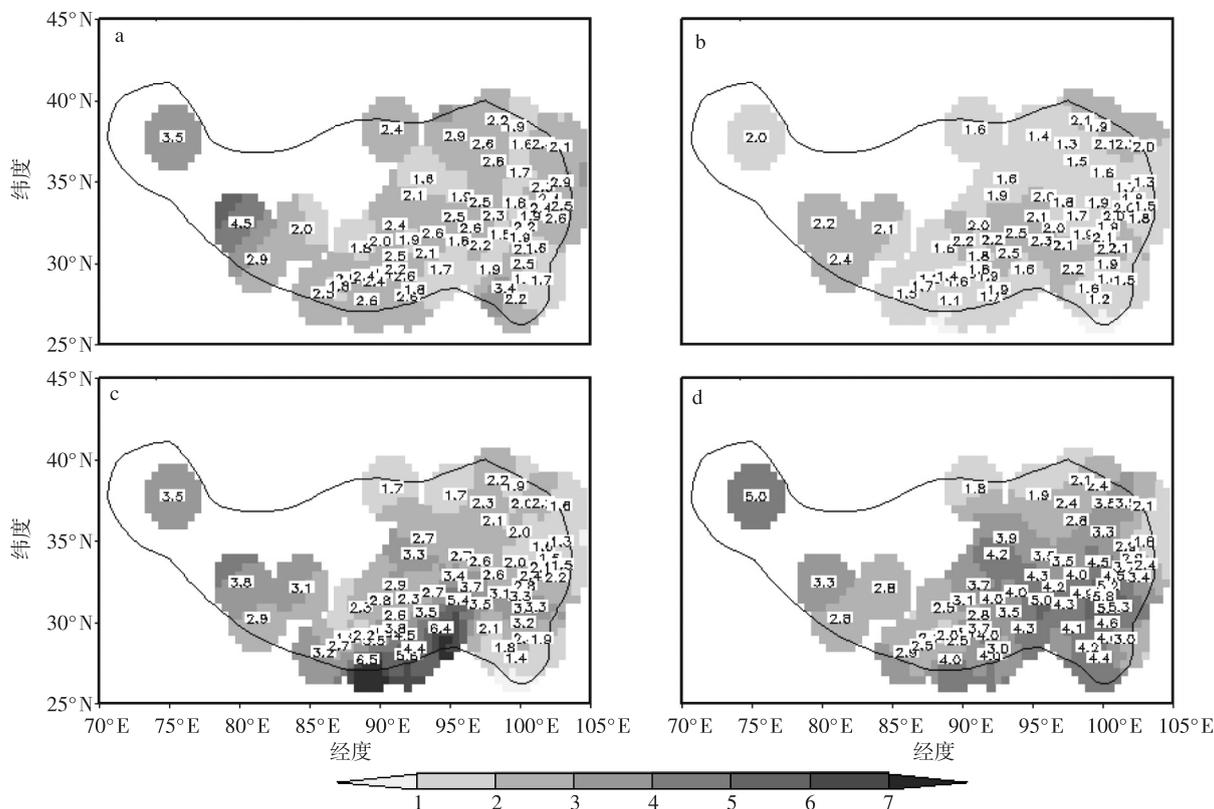


图 3 观测(a)、ERA(b)、NCEP-1(c)和 NCEP-2(d)年平均地表温度均方差的空间分布(单位:°C;阴影表示均方差的空间分布;填值表示相应站点的均方差,实线区域表示海拔高度超过 3 000 m)

Fig. 3 Spatial distribution of mean square error of annual mean surface temperature from (a) the observations, (b) ERA, (c) NCEP-1 and (d) NCEP-2 (units: °C; the shaded area shows the spatial distribution of mean square error; the values denote the mean square errors of stations and the area with solid line denotes altitude above 3 000 m)

达到 $5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从 ERA 再分析资料看,高原大部年平均地表温度均方差为 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,分布均匀;高原东北边缘、中部及西部的均方差稍大,但没有明显的高值中心,并且对实际存在的高原西南部均方差大值中心没有体现。NCEP-1 再分析年平均地表温度均方差在高原大部地区在 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$;均方差最大值区位于高原南部,中心值达到 $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;高原西部是均方差次大值区,中心在高原西南部,但其值较实际稍小。NCEP-2 年平均地表温度在高原大部的均方差也在 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$;均方差大值区有两个,一个位于高原东南部,一个位于西北部,均方差均在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;但 NCEP-2 再分析资料对实际存在的高原西南部地表温度均方差大值中心也没有体现。

总的来说,三种再分析年平均地表温度在高原大部地区的均方差分布较均匀,这与观测资料基本一致;而对于高原西南部地表温度的显著变化,三种再分析资料均估计不足,ERA 及 NCEP-1 再分析地表温度的均方差较观测偏小,而 NCEP-2 再分析地表温度均方差的大值中心则较观测偏西偏北;此外,由于 NCEP-1 对高原南部、NCEP-2 对高原东南部地

表温度变化还存在过高估计的情况。

2.1.3 与实测地表温度的相关分布

最后考察青藏高原区域 ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 再分析年平均地表温度与观测年平均地表温度的相关情况(图 4)。ERA 地表温度与观测地表温度基本呈现正相关;二者在高原大部的相关系数均在 0.5 以上,最高相关系数甚至达到 0.9,通过了 95% 的显著性检验。相关不显著的地区集中在高原东北部、中东和南部的局部区域(图 4a)。NCEP-1(图 4b)和 NCEP-2(图 4c)与观测地表温度的相关分布较相似,它们与高原大部地区的观测地表温度的相关性均较差;相关系数在 0.5 以上的区域仅分布在高原北部、西部及东南的局部地区,高原东部及南部甚至出现负相关的情况。

对比而言,ERA 地表温度与观测地表温度的相关性最好,二者在高原大部显著相关;而 NCEP-1 和 NCEP-2 与观测地表温度的相关性均较差,仅高原北部、西部及东南的局部地区相关显著。

2.2 时间变化

计算青藏高原 61 个台站观测、ERA、NCEP-1 和

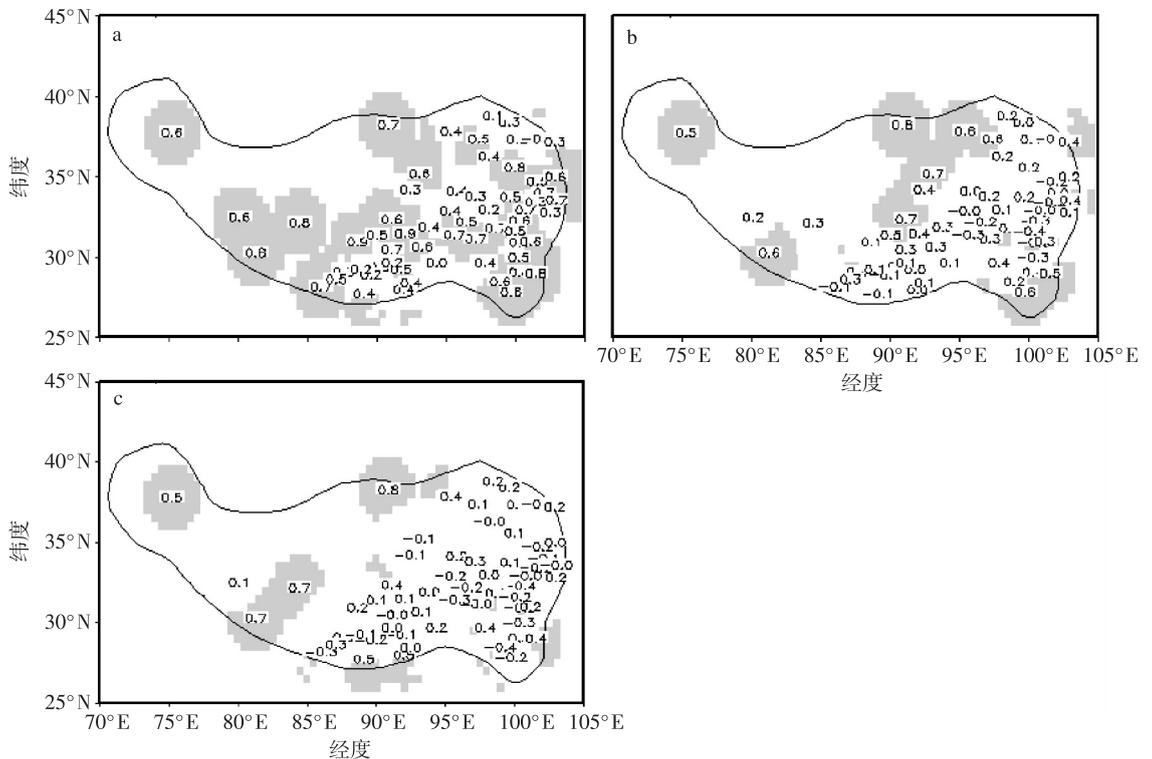


图 4 ERA(a)、NCEP-1(b)和 NCEP-2(c)与观测的年平均地表温度的相关分布(数值表示相关系数;阴影表示通过 0.05 信度的显著性检验;实线区域海拔高度超过 3 000 m)

Fig. 4 Correlation distribution of annual mean surface temperature between the observations and (a) ERA, (b) NCEP-1 and (c) NCEP-2 (the values denote correlation coefficients; regions with correlation exceeding 0.05 significance level are shaded; the area with solid line denotes altitude above 3 000 m)

NCEP-2 再分析地表温度的平均值,并且考察它们的时间变化特征。

2.2.1 月际变化

图5是观测、ERA、NCEP-1和NCEP-2再分析月平均地表温度的变化。由图5可见,观测、ERA、NCEP-1和NCEP-2地表温度月际变化基本一致:1月平均地表温度最低,2月以后开始升高,到7月达到峰值,8月之后地表温度开始下降;均表现为冬季月份低,夏季月份高,春秋季节月份居中的单峰型特征。

为考察观测、ERA、NCEP-1和NCEP-2地表温度在各个月份异常变化的强弱,逐月计算了它们的均方差(图6)。从观测月平均地表温度来看,1、2、4以及12月均方差稍大,其他月份的均方差基本接近。说明青藏高原地表温度在冬春季节尤其是冬季变化幅度较大,不同年份冬春季平均地表温度差异较明显;而高原地表温度在夏秋季节变化幅度较小,不同年份夏秋月季节的平均地表温度更为接近。从三种再分析资料来看,ERA 2月平均地表温度均方差最大、8月最小,其他月份均方差基本接近。对比来看,ERA平均地表温度均方差与观测基本接近;ERA资料基本能反映出高原月平均地表温度的异

常变化的强度。不过,ERA平均地表温度均方差在2月较观测稍大,4、8及12月稍小,这些月份ERA资料在反映地表温度的实际变化的能力还稍显不足。NCEP-1月平均地表温度均方差以2、3、5、10月较大,并以5月最大;NCEP-2月平均地表温度均方差以2、3月最大,其次为4、5月;而7、8、9月NCEP-1和NCEP-2平均地表温度均方差均较小。与观测对比来看,NCEP-1在2、3、5、6、10、11月,NCEP-2在2、3、4、5、6、10、11月都较观测明显偏大,这两种再分析资料3月的均方差甚至为观测的2倍;而8月这两种再分析平均地表温度均方差均较观测稍小,表明它们在8月的变化较实际平缓。整体来看,三种月平均地表温度的均方差具有冬春月份大,夏秋月份小的特征,这与观测是一致的;其中,ERA各月平均地表温度的均方差与观测最接近,反映高原实际地表温度变化强度的能力最强;而NCEP-1和NCEP-2对地表温度的变化存在过高估计的趋势。

逐月计算三种再分析与观测月平均地表温度的相关系数(图7)。由图7可见,各月三种再分析平均地表温度与观测平均地表温度均为正相关。ERA与观测月平均地表温度的相关性最好,各月的相关系数均通过95%的显著性检验;其中2月的相关系

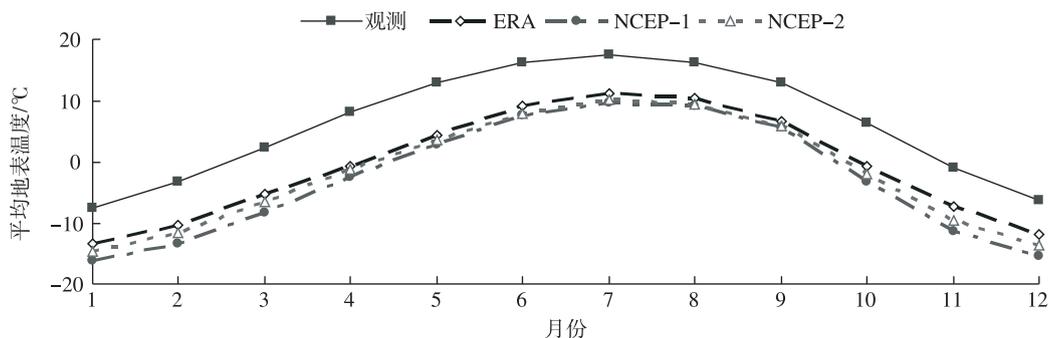


图5 观测、ERA、NCEP-1和NCEP-2的平均地表温度的逐月变化(单位:°C)

Fig.5 Monthly variations of mean surface temperature from the observations, ERA, NCEP-1 and NCEP-2 data (units: °C)

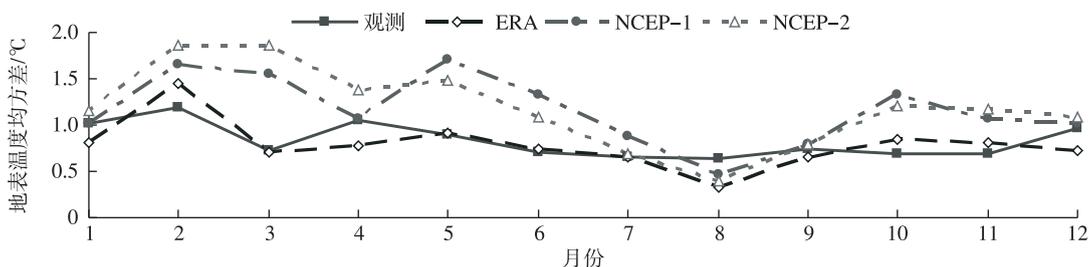


图6 观测、ERA、NCEP-1和NCEP-2的平均地表温度均方差的逐月变化(单位:°C)

Fig.6 Monthly variations of mean square error of surface temperature from the observations, ERA, NCEP-1 and NCEP-2 data (units: °C)

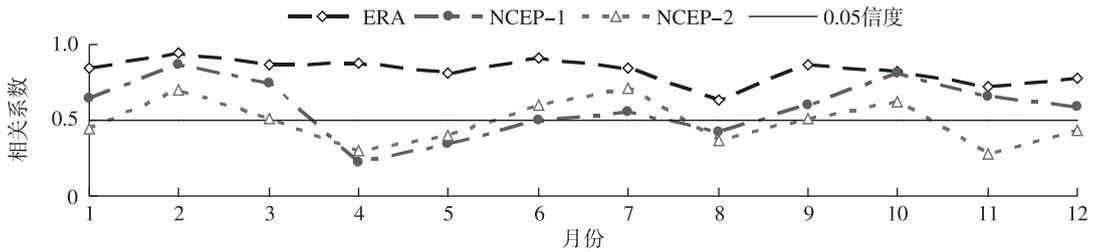


图 7 ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 与观测的平均地表温度的相关系数的逐月变化

Fig. 7 Monthly variations of correlation coefficients in mean surface temperature between the observations and ERA, NCEP-1 and NCEP-2 data

数最高,达到了 0.94,此外 6 月的相关系数也超过了 0.9;相关系数最低的月份是 8 月,但也达到了 0.64。NCEP-1 和 NCEP-2 各月平均地表温度与观测平均地表温度的相关系数均低于相应月份 ERA 与观测平均地表温度的相关系数。NCEP-1 在平均地表温度在 1、2、3、7、9、10、11、12 月与观测平均地表温度的相关系数通过了 95% 的显著性检验,其中 2 和 10 月的相关系数均超过了 0.8;而 4、5、8 月的相关系数则没有通过 95% 的显著性检验。NCEP-2 则有一半月份的平均地表温度与观测平均地表温度的相关系数未通过 95% 的显著性检验;相关性最好的月份是 7 月,但也只达到了 0.72。

综上所述,ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 平均地表温度的月际变化与观测基本一致,均表现为冬季月份低,夏季月份高,春秋季节居中的单峰型特征。在反映高原地表温度异常变化方面,ERA 各月平均地表温度的均方差与观测最接近,而 NCEP-1 和 NCEP-2 产品对地表温度变化过高估计的趋势则较为明显。从相关性来看,也以 ERA 再分析月平均地表温度与观测最好,各月的相关均最显著;其次为 NCEP-1 再分析产品;而 NCEP-2 再分析产品最差,有一半月份相关系数没有通过显著性检验。

2.2.2 年际变化

图 8 给出了 1989—2004 年青藏高原观测、ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 再分析平均地表温度距平

的年际变化。由图 8 可见,观测平均地表温度年际变化明显,1989—2004 年观测年平均地表温度显著增暖,且具有一定的阶段性特征:1989—1997 年(除 1994 年外)偏低,而 1998—2004 年(除 2000 年外)偏高;进一步利用滑动 t 检验发现,1998 年观测年平均地表温度确实存在一个由冷转暖的突变。

ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 的年平均地表温度也显示出明显的年际变化特征,当某一年观测年平均地表温度较前一年升高(或降低)时(即年际增量为正(或负)值时),ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 年平均地表温度基本表现与与观测一样的变化特征,ERA 有 1 a、NCEP-1 有 3 a 和 NCEP-2 有 2 a 与观测平均地表温度相异。不过由于变化幅度的不同,ERA 平均地表温度距平有 5 a,NCEP-1 平均地表温度距平有 7 a,NCEP-2 平均地表温度距平有 9 a 与观测平均地表温度距平的符号相反。此外,1989—2004 年间 ERA 和 NCEP-1 地表温度没有发生突变,且没有显著的变化趋势;而 NCEP-2 平均地表温度则明显降低,并在 1997 年发生突变;1989—1996 年相对较暖,1997 年后则振荡下降。

计算各再分析平均地表温度与观测平均地表温度的相关系数,ERA 为 0.68,NCEP-1 为 0.60,均通过了 95% 的显著性检验;而 NCEP-2 与观测平均地表温度的相关系数仅为 0.19,未通过 95% 的显著性检验。

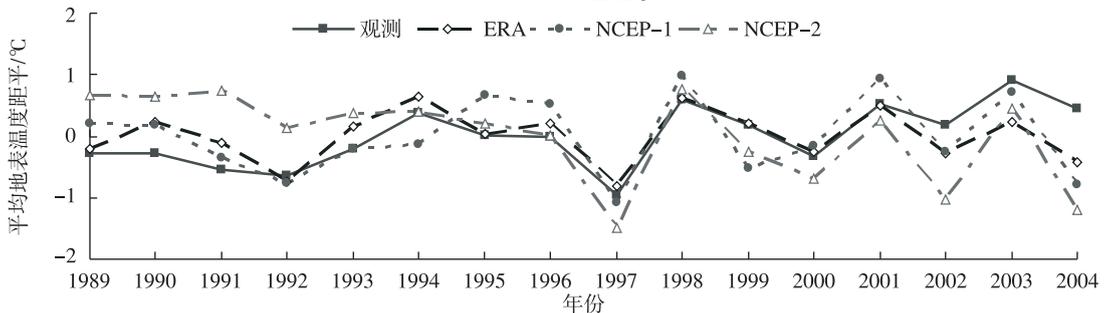


图 8 观测、ERA、NCEP-1 和 NCEP-2 的平均地表温度距平的年际变化(单位:°C)

Fig. 8 Intetannual variations of mean surface temperature anomalies from the observations, ERA, NCEP-1 and NCEP-2 data (units: °C)

综上所述,三种再分析平均地表温度与观测平均地表温度的年际变化基本一致,但长期趋势与观测差异较大。ERA 和 NCEP-1 平均地表温度变化趋势不显著且没有发生突变;而 NCEP-2 平均地表温度则明显降低,与观测正好相反,并且在 1997 年发生由暖转冷的突变,这个突变点也是虚假的。从年平均温度的相关上看,ERA 平均地表温度与观测平均地表温度的相关性最好,其次为 NCEP-1,二者都通过了显著性检验;而 NCEP-2 平均地表温度与观测平均地表温度的相关性较差,二者没有显著的相关。

3 结论与讨论

三种再分析资料都揭示了青藏高原地表温度的基本分布,并且较好地描述了高原地表温度的季节变化和年际变化。但三种再分析资料都存在对高原地表温度过冷估计的问题,在高原西部和雅鲁藏布江流域尤其突出。此外,三种再分析资料对地表温度的长期变化趋势均估计不足,NCEP-2 再分析地表温度甚至出现与观测相反的变化趋势;三种再分析资料对实际存在的突变年也没有很好的体现。

相比较而言,ERA 再分析地表温度产品在青藏高原的适用性最好,与观测地表温度的相关最显著,且空间分布和年际尺度上都能较好地反映高原地表温度的异常变化强度,可作为研究高原地表温度年际变化的代用资料;而 NCEP-1 和 NCEP-2 再分析地表温度产品在青藏高原的适用性不佳,与观测地表温度的相关性相对较差,对高原异常变化存在过高估计的趋势,其适用时段和适用区域需要进一步考察。

但是,本文进行资料比较时没有考虑地形和下垫面的影响,寻找一种更优秀的考虑下垫面影响的插值方法,对于再分析资料的使用更有实际意义。

参考文献:

- 程国栋,江灏,王可丽,等. 2003. 冻土路基表面的融化指数与冻结指数[J]. 冰川冻土,25(6):603-607.
- 段安民. 2003. 青藏高原热力和机械强迫对东亚气候格局的影响[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所:29-33.
- 冯松,汤懋苍,王冬梅. 1998. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报,43(6):633-636.
- 江灏,王可丽,吴国雄. 1997. 青藏高原地区地表温度及其取值对大气长波辐射冷却的影响[J]. 高原气象,16(3):250-257.
- 李川,张廷军,陈静. 2004. 近 40 年青藏高原地区的气候变化——NCEP 和 ECMWF 地面气温及降水再分析和实测资料对比分析[J]. 高原气象,23(增刊):97-102.
- 李瑞青,吕世华,韩博,等. 2012. 青藏高原东部三种再分析资料与地

- 面气温观测资料的对比分析[J]. 高原气象,31(6):1488-1502.
- 苏敏红,吴统文,钱正安. 2000. 高原地区 NCEP 热通量再分析资料的检验及在夏季降水预测中的应用[J]. 高原气象,19(4):467-475.
- 苏志侠,吕世华,罗四维. 1999. 美国 NCEP/NCAR 全球再分析资料及其初步分析[J]. 高原气象,18(2):209-218.
- 汤懋苍,孙淑华,钟强,等. 1982. 下垫面能量储放与天气变化[J]. 高原气象,1(1):24-34.
- 汤懋苍,李存强,张建. 1988. 青藏高原及其四周的近代气候变化[J]. 高原气象,7(1):39-48.
- 王可丽,钟强. 1995. 青藏高原地区大气顶与地表净辐射的关系[J]. 气象学报,53(1):101-107.
- 王美蓉,周顺武,段安民. 2012. 近 30 年青藏高原中东部大气热源变化趋势:观测与再分析资料对比[J]. 科学通报,57(2/3):178-188.
- 王绍令,永健,赵林,等. 2002. 青藏高原局地因素对近地表层地温的影响[J]. 高原气象,21(1):85-89.
- 魏丽,李栋梁. 2003a. 青藏高原地区 NCEP 新再分析地面通量资料的检验[J]. 高原气象,22(5):478-487.
- 魏丽,李栋梁. 2003b. NCEP/NCAR 再分析资料在青藏铁路沿线气候变化研究中的适用性[J]. 高原气象,22(5):488-494.
- 荀学义,胡泽勇,吴学宏,等. 2011a. 三套位势高度再分析资料在青藏高原地区的对比分析[J]. 高原气象,30(6):1444-1152.
- 荀学义,胡泽勇,孙俊,等. 2011b. 高原地区 ERA40 与 NCEP I 再分析资料对比分析[J]. 气象科技,39(4):392-399.
- 荀学义,胡泽勇,孙俊,等. 2011c. ECMWF 和 NCEP 再分析资料在青藏高原高度场变化中的对比分析[J]. 冰川冻土,33(2):80-87.
- 叶笃正,高由禧,周明煜,等. 1979. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社.
- 章基嘉,朱抱真,朱福康,等. 1988. 青藏高原气象学进展[M]. 北京:科学出版社.
- 张琼,钱永甫. 1999. 用 NCEP/NCAR 再分析辐射资料估算月平均地表反照率[J]. 地理学报,54(4):309-317.
- 赵天保,符淙斌. 2006. 中国区域 ERA40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J]. 气候与环境研究,11(1):14-32.
- 赵天保,艾丽坤,冯锦明. 2004. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较[J]. 气候与环境研究,9(2):278-294.
- Flohn H. 1957. Large-scale aspects of the summer monsoon in South and East Asia[J]. J Meteor Soc Japan,35:180-186.
- Flohn H. 1960. Recent investigations on the mechanism of the "summer monsoon" of southern and eastern Asia [C]//Monsoons of the world. New Delhi:Hindu Union Press:75-88.
- Jiang H, Wang K. 2001. Analysis of the surface temperature on the Tibetan Plateau from satellite [J]. Adv Atmos Sci, 18(6):1215-1223.
- Li Q, Liu X, Zhang H, et al. 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. Adv Atmos Sci,21(2):260-268.
- Shea J D, Worley S J, Stern I R, et al. 1994. An introduction to atmospheric and oceanographic data[R]//NCAR/TN-404+IA NCAR TECHNICAL NOTE. Boulder: National Center for Atmospheric Research.