

NCEP/NCAR(I、II)和 ERA40 再分析加热资料比较*

王同美^{1,2}, 吴国雄², 应明³

- (1. 中山大学大气科学系, 广东广州 510275;
2. 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京 100029;
3. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要: 气候统计和诊断分析常用到 NCEP-1、NCEP-2 和 ERA-40 再分析资料。其中的加热资料为 C 类资料, 对其使用常常存疑。对上述 3 类资料中的垂直积分的总加热率和地表感热通量进行比较, 以分析其在亚洲地区特别是在高原和亚洲热带地区的适用性。结果表明: 垂直积分的总非绝热加热在空间分布上三套资料基本一致, NCEP 两套资料在大值中心的分布上相似, 但量值上 NCEP-2 和 ERA-40 比较接近, 此外 ERA-40 在青藏高原南缘的加热估算比 NCEP 大; 对于青藏高原区域平均的非绝热加热, 无论是季节变化还是年际变率, 三套资料在量级以及变化趋势上都有较好的一致性, 特别是平均感热通量的年际变化, 三者相关系数超过 99% 甚至 99.9% 置信度检验, 因此对亚洲包括青藏高原地区使用再分析加热率资料, 在一定程度上是合理可行的。

关键词: 非绝热加热; 再分析资料; 青藏高原

中图分类号: p468 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 05-0128-07

Comparison of Diabatic Heating Data from NCEP/NCAR(I,II) and ERA40

WANG Tongmei^{1,2}, WU Guoxiong², YING Ming³

- (1. Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China)

Abstract: Diabatic heating data from NCEP (1 and 2) and ERA-40 are compared to analyze the applicability of these data in the Asian region, particularly in the Tibet Plateau (TP) and tropical Asia. In spite of slight difference in vertical integration of total diabatic heating rates from three data sets, the spatial distribution shows good agreement. Seasonal and interannual variability of the mean diabatic heating over TP shows agreement in the magnitude and trend. Particularly, the correlation coefficients of interannual variability of the mean sensible heat flux over TP among three data sets exceed 99% or even 99.9% confidence level. Therefore, the reanalysis diabatic heating data over Asia, even over TP area, are feasible to a certain extent.

Key words: diabatic heating; data comparison; the Tibet Plateau

大气中的非绝热加热是推动大气环流系统、使天气系统发展的主要热力强迫因子, 其计算对于诊断分析以及数值预报等都非常重要。对大气非绝热加热率的计算一般有两种方法, 一种是顺算法, 即

直接计算非绝热加热三个组成部分, 潜热加热、感热加热和辐射加热后求和, 这种方法能得到总加热和各加热分量的贡献, 以及各量随高度的分布, 计算结果的精确度在很大程度上与所选取的计算方案

* 收稿日期: 2010-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41075054, 41075071, 40925015); 广东省自然科学基金资助项目 (8451027501001444); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目

作者简介: 王同美 (1973 年生), 女, 博士, 副教授; E-mail: eeswtm@mail.sysu.edu.cn

有关;另一种常用的方法是倒算法^[1],即根据热力学方程和运动方程,利用风场和温压场的资料来倒算加热率的分布。再分析资料中的非绝热加热资料基于第一种方法计算,与一套同化资料的其它物理量场之间具有动力一致性和协调性,对机制分析而言十分有利。但模式的加热资料属于 C 类资料,即无直接观测数据,完全依赖于同化模式而得到,因而使用中需额外谨慎^[2],对其进行比较和适用性的分析也是十分必要的。

目前被认为质量较好、可信度较高并在世界范围广泛使用的再分析资料,包括美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析数据集,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析资料 ERA40,日本 JRA-25 再分析数据集等。其中,NCEP/NCAR 和 ECMWF 的资料年代是最长的。

NCEP/NCAR Reanalysis 资料^[3](以下简称 NCEP-1),是现在气候研究中广泛使用的时间序列最长的再分析资料,在气候诊断、模拟的各个方面有广泛应用,但 Kistler 等^[4]指出,NCEP-1 存在 3 处人为错误,包括 1974-1994 年期间误用了 1973 年的地面积雪数据,由澳大利亚整编的南半球海平面气压数据在经度上 180° 错位,水汽扩散计算问题导致冬季某些高纬度地区出现虚假降雪,以及当地面风速为 0 时感热通量为 0 而造成地面温度不真实,这些问题在不同程度上影响了地面通量场的可信度。

鉴于此,NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis^[5](NCEP-2)对 1979 年 1 月以后的资料重新进行同化再分析,修正了 NCEP-1 中的人为误差,在土壤湿度(尤其是年际变化)、短波辐射通量、雪盖和地表温度、海洋的校正反照率和辐射通量方面对 NCEP-1 有较大的改进;对热带地区降水、高纬度降水和地表温度以及地表通量方面的改进也较明显。但是对热带暖池区的长波辐射和对流层顶的大气湿度,NCEP-2 的结果没有 NCEP-1 好。

ECMWF 的 40 年再分析资料^[6](ERA-40)是另一套广泛使用的再分析资料,它同化了 TOVS 晴空辐射的所有资料,这对于加热场的改进是非常有利的。

再分析资料的质量主要受预报模式系统、同化系统和观测系统误差等方面的影响,因而对其质量进行评估是十分必要的,很多学者从不同角度对此进行了分析和比较^[7-10],也有不少工作针对这几种再分析资料在我国区域气候中的适用性进行了研

究^[11-15]。总的来说,再分析资料各有其优缺点,我们应该针对不同的研究目的和研究对象来选择适用的资料。

本文对 NCEP-1、NCEP-2 和 ERA-40 三套资料中垂直积分的总加热率和地表感热通量进行初步的比较,从多年平均的水平分布和季节变化,以及高原地区平均加热的年际变化等方面做对比,以分析其在亚洲地区特别是在高原和亚洲热带地区的适用性。

1 资料简介及其处理

1.1 加热率

本文所用 NCEP-1 和 NCEP-2 月平均加热率资料,水平分辨率为高斯网格约 1.875 × 1.875 经纬度,垂直分辨率为 σ 面 28 层,包括深对流、浅对流、大尺度凝结、长波辐射、短波辐射和垂直扩散加热率,资料时段 NCEP-1 为 1958-1999 年,NCEP-2 为 1979-2004 年。EC 的非绝热加热资料为水平分辨率约 1.125 × 1.125,包括垂直 4 层(0~250,250~500,500~750 和 750 hPa-表面)的分层加热和垂直积分的总加热,时间分辨率为逐月,时段为 1958-2001 年。

为了便于比较,本文选取各类资料相同的时段 1979-1999 共 21 a 资料,并对 NCEP/NCAR 的各类天气非绝热加热率的总和按下式做垂直积分:

$$hr = \frac{C_p \cdot P_s}{g} \int_{0.995}^{0.0027} Q_\sigma d\sigma$$

其中 C_p 是定压比热, P_s 是地面气压, g 为地球重力加速度。

1.2 地表感热通量

三套再分析资料的地表感热通量,时间分辨率均为逐日 4 次,本文将之处理为逐候平均。NCEP-1 和 NCEP-2 的水平分辨率为高斯网格约 1.875 × 1.875 经纬度,时间段分别为 1951-2006 年和 1979-2006 年。ERA-40 地表感热通量水平分辨率为 2.5 × 2.5,时间段为 1958-2001 年。在做比较时均取其中的 1979-2001 年共 23 a 资料。

2 垂直积分总加热率的比较

2.1 多年平均加热场的水平分布及比较

图 1 从左至右依次为 NCEP-1、NCEP-2 和 ERA-40 资料 1979-1999 年平均 1、4、7、10 月(从上至下)总加热的水平分布,可以看到,从总体上来说,各月加热场的分布态、中心和量级相似。1 月亚洲陆地上基本为负值;东亚沿岸,从台

湾岛以东至日本海以及日本岛以东洋面上有正的加热；此外，ERA40 在高原南侧边缘有正的加热。4 月陆地上的加热转为正值，并在中南半岛至华南地区有超过 100 W/m^2 的带状加热区，高原地区也有明显的正加热。NCEP-2 和 ERA-40 对高原地区加热的估算，大部地区超过 50 W/m^2 ，比 NCEP-1 要大。ERA-40 在高原南侧的加热尤其大，对中南半岛加热中心的估算也比 NCEP 资料大，中心可达 300 W/m^2 ，但它在华南地区（江南春雨雨带位置）的加热估算比 NCEP 资料小。7 月亚洲季风区均为

明显的加热，比较起来，在中高纬 NCEP-2 资料最大，且 NCEP-1/2 沿亚洲东部都有一条带状的大值加热区，而 ERA-40 的大值带是在日本岛附近。低纬的加热从量级上看 NCEP-2 和 ERA-40 更接近，特别是 BOB 东部至中南半岛、阿拉伯海东部，都比 NCEP-1 大；但 ERA-40 在低纬半岛上的加热比 NCEP-1/2 偏小。10 月正的加热回到 BOB 以东热带地区和西太平洋面，高原东南部仍为正的加热，且对于这些区域正的加热，以 ERA-40 量值最大，NCEP-2 次之，NCEP-1 最小。

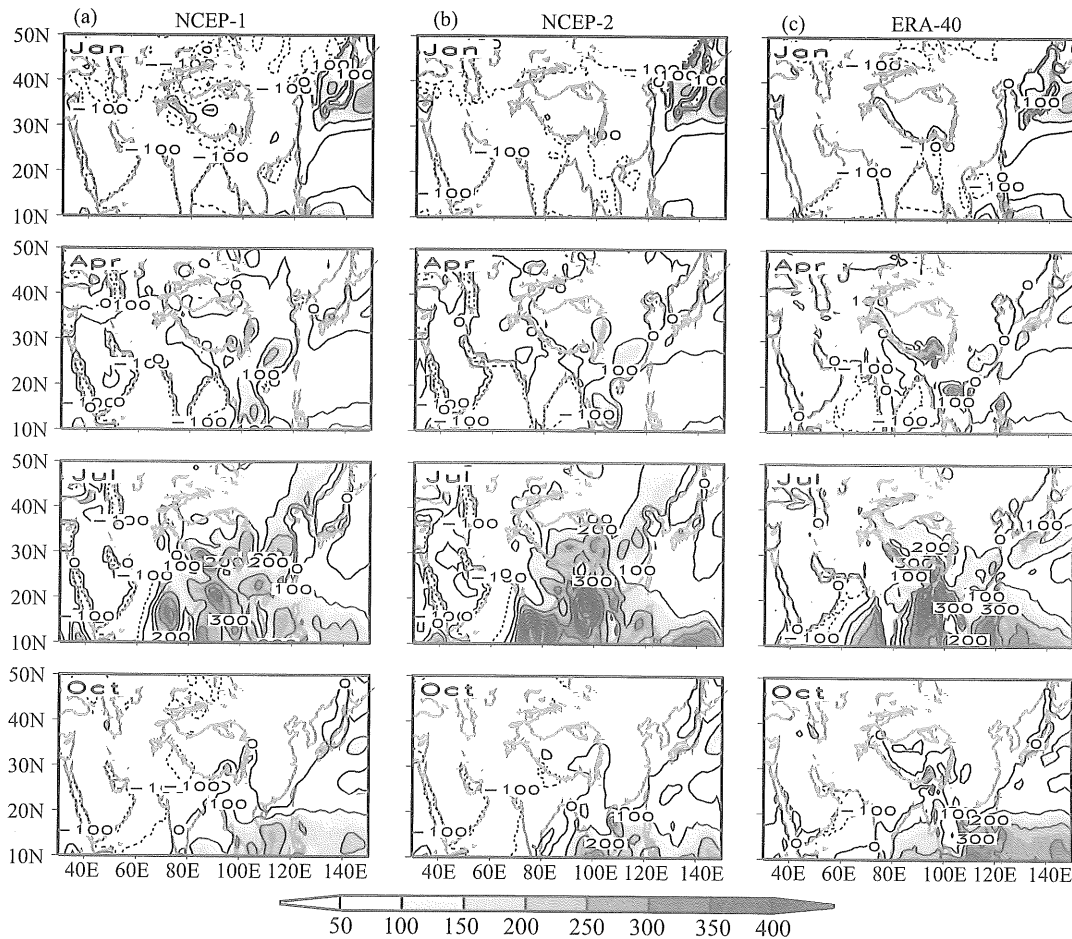


图 1 1979 - 1999 年平均 1、4、7、10 月垂直积分总加热的水平分布 (W/m^2)

Fig. 1 Annual mean vertical integration of total diabatic heating in Jan, Apr, Jul and Oct during 1979 - 1999

从标准差的平面场（图略）来看，年际变率的分布与加热场相似，总体上，从中心以及大值区的分布形势上看，NCEP-1 和 NCEP-2 一致，从量值来看，则 NCEP-2 与 ERA-40 更接近。

2.2 多年平均青藏高原区域总加热的季节变化

三套资料在高原地区 ($80 - 100^\circ \text{ E}$, $27.5 - 37.5^\circ \text{ N}$) 月平均的非绝热加热季节变化如图 2 所示，其中 NCEP-1 (图 a) 和 NCEP-2 (图 b) 包括

感热、潜热、辐射和总加热，可见两套资料各量的季节变化基本一致，冬季较小的潜热加热和负的感热量值相当，总加热表现为与辐射加热相近的负值。春季感热加热加强明显，致使总加热明显增强，初春辐射和潜热加热的变化很小，总加热的增长斜率与感热加热几乎相同，4 月后潜热加热也明显增强，感热加热在 5 月达到最大；之后的总加热变化趋势和潜热加热变化一致，在 7 月达到最大，

秋季减小, 总加热在 10 月转为负, 11 月又与辐射加热值相当。两套 NCEP 资料最明显的区别在于 NCEP-2 对全年辐射加热的估算较小, 而对冬、春季感热加热的估算较大, 因此高原总的加热在 3 月即转为正值较早, 而 NCEP-1 到 4 月才有正的总加热。

图 2 (c) 显示的 ERA-40 高原加热, 除 11、12 和 1 月为负外, 其余月份均有正的加热, 峰值出现在 6 月, 与 NCEP 资料的总加热相比, 除峰值出现月份不同外, 全年的加热都比 NCEP 资料的要高。

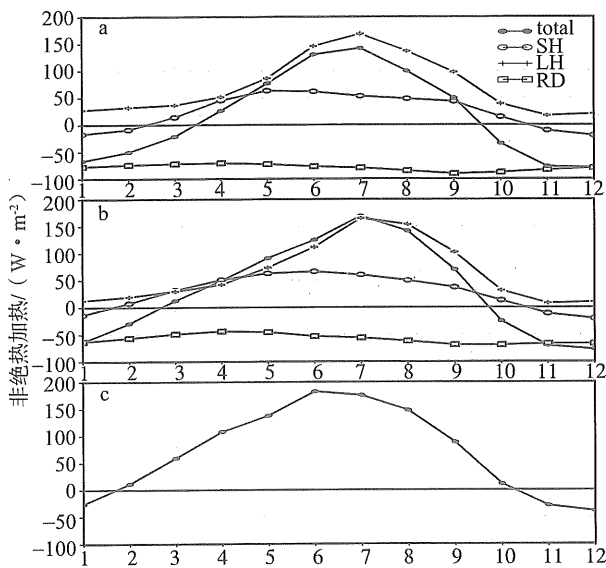


图 2 多年平均高原区域 (80 - 100°E, 27.5 - 37.5°N) 非绝热加热的年变化

a/b: NCEP-1/2 感热 (SH)、潜热 (LH)、辐射 (RD) 以及总的非绝热加热 (total); c: ERA-40 总非绝热加热

Fig. 2 Annual variations of climate mean diabatic heating over TP

a/b: NCEP-1/2 Sensible Heat (SH), Latent Heat (LH), Radiation (RD) and total, c: ERA-40 total

高原地区为季风气候, 从气候平均的角度来说, 盛夏季节降水最大, 对应比较强的降水和潜热释放, 由于潜热加热比感热加热量级要大, 因此可以认为, 与季风降水相对应, 加热的峰值出现在 7 月是比较合理的。

图 3 是高原区域三套资料总加热标准差的季节变化, 可见, 几乎全年各月, NCEP-2 的年际变率都是最大的, 而 ERA-40 较小, NCEP-1 介于二者之间。从年变化来看, NCEP-1/2 在春季, 季风爆发前的 4、5 月和夏季 7、8 月的年际变率较大, 而

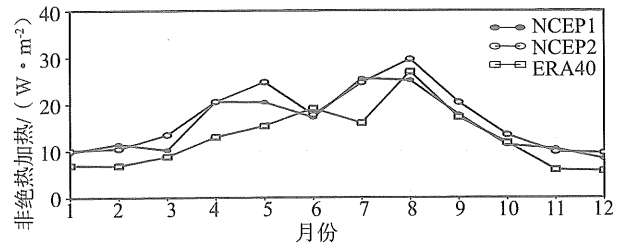


图 3 高原区域总加热标准差的年变化

Fig. 3 Annual variations of standard deviation of climate mean diabatic heating over TP

ERA-40 的峰值出现在 6 月和 8 月。

2.3 高原区域平均总加热的年际变化

将 1979 年 1 月 - 1999 年 12 月共 252 个月的高原区域平均总加热, 减去各月气候平均值所得的偏差做标准化处理, 得到标准偏差序列如图 4, 从 NCEP-1 来看, 在 1995 年前偏差分布都比较均匀, 1995 年后波动较大。比较大的偏差多发生在冬季, NCEP-2 在 1984 年前加热明显偏低, 1985 - 1997 年, 除冬季的月份多见偏低外, 其它季节加热普遍偏高。ERA-40 与 NCEP 资料偏差序列相比, 明显的区别在 1986 - 1990 年之间 ERA-40 标准偏差较小, 而在 1995 - 1999 年间则偏大。从总体上来说, 3 条曲线走向基本一致, 序列之间的关系分别为, NCEP-1 与 NCEP-2 相关系数为 0.56, NCEP-1 与 ERA-40 相关系数为 0.48, NCEP-2 与 ERA-40 相关系数为 0.45, 均超过 99.9% 置信度检验 (252 个样本 99.9% 置信度检验, 相关系数为 0.206), 有显著相关。

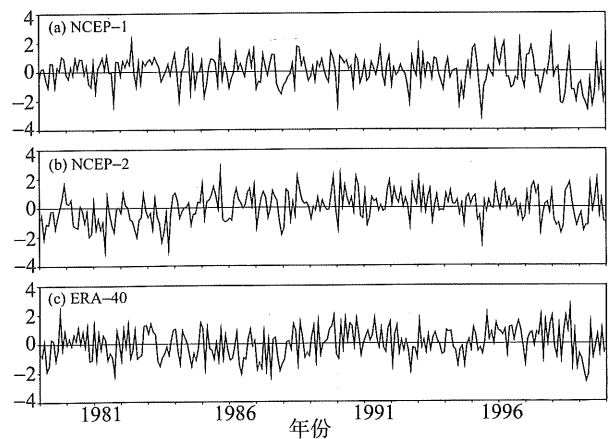


图 4 高原区域平均总加热逐月标准化距平序列

Fig. 4 Time series of normalized deviation of total diabatic heating over TP

3 地面热通量资料的比较

3.1 春季地面感热通量的水平分布

图 2a、2b 表明高原上空春季的非绝热加热加强主要是因为感热加热的加强引起。感热加热的垂直积分与地表感热通量基本一致。由于再分析资料提供的表面通量资料时间分辨率更高,在研究春季过渡季节的气候现象,如季风爆发进程等时,可以用感热通量场的分析来代替加热场状况。

图 5 是春季地面感热通量的水平分布及其变化,从上至下依次为春季 3 个月平均的感热通量场

和 4 月减 3 月、5 月减 4 月以及 6 月减 5 月的感热通量变化的水平分布。春季平均的感热通量零线基本上沿海岸线分布,除中南半岛和华南地区外,基本表现为陆地正,海洋面负的分形势,与图 1 之 APR 相对应,陆地上的负感热区正好是总加热的大值区,说明该大值区加热主要是因为潜热加热引起。印度半岛、非洲东部有感热通量大值,高原地区也普遍超过 50 W/m^2 。从资料的比较来看,低纬陆地 NCEP-1 最大,高原及其以北地区 NCEP-2 较大,ERA-40 量值相对较小。

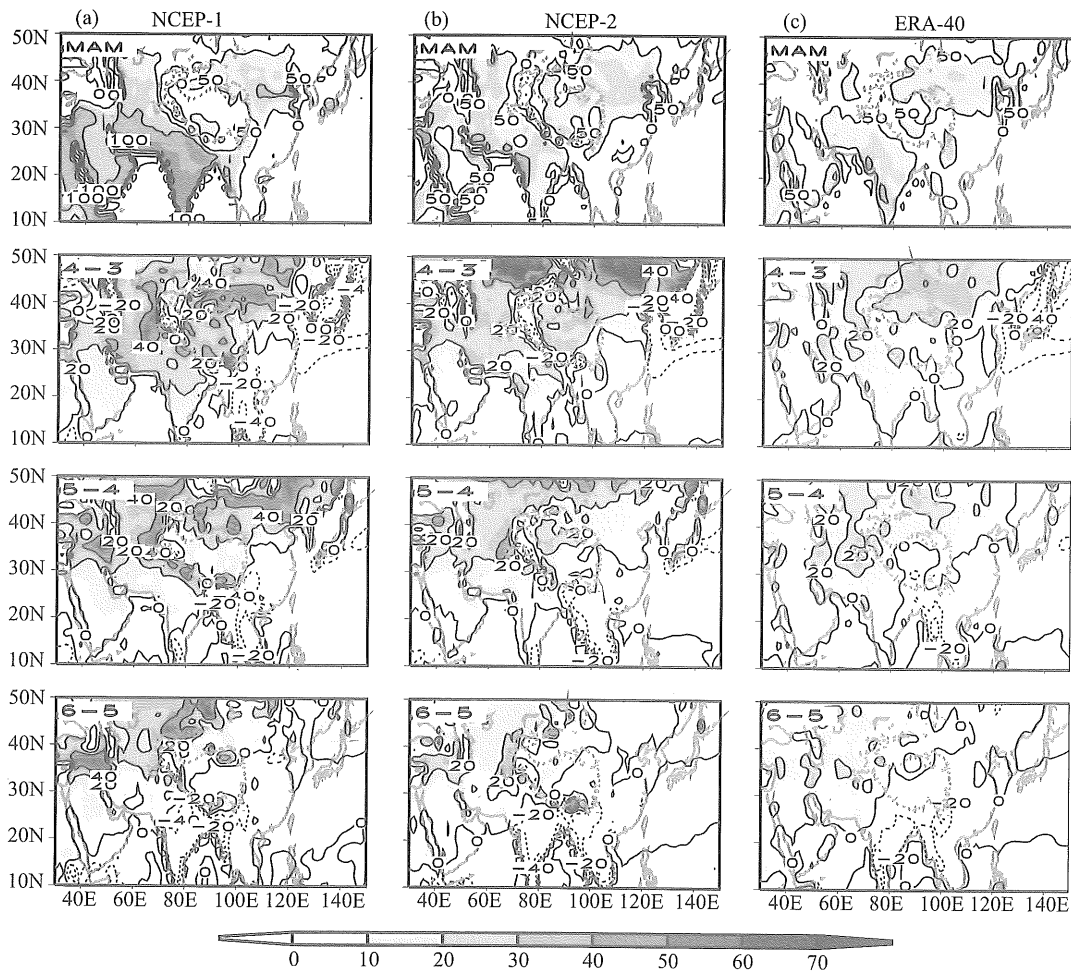


图 5 春季地面感热通量 (MAM) 和感热通量变化的水平分布 (W/m^2)
MAM: 春季平均; 4-3: 4 月减 3 月; 5-4: 5 月减 4 月; 6-5: 6 月减 5 月

Fig. 5 Horizontal distribution of surface sensible heat flux and surface sensible heat flux variations in spring

从各月减前月差值场的比较可以看到各资料反映的各地感热通量的季节变化,4 月减 3 月,中南半岛和华南地区为负值,说明该地区最大感热通量出现在 3 月,其它地区则表现为陆地上感热增强而海洋面上的感热减小;5 月印度半岛东部感热也开

始减小,6 月东亚季风区感热普遍减小,这是因为季风爆发后的降水引起的。三套资料在季节变化上的区别除量值的大小外,最明显的是 5 月减 4 月的差值场,与 NCEP 资料在高原及其西北地区均为正不同,ERA-40 在高原大部分地区为负,即,ERA-40

的高原感热加热5月小于4月。

3.2 多年平均青藏高原区域地表感热通量的年变化

图6是高原区域平均的地表感热通量的季节变化, NCEP两套资料除1-3月NCEP-2略高于NCEP-1外, 其余月份比较一致, 冬季为负, 其余月份为正, 峰值出现在5-6月。ERA-40感热通量的季节变化幅度比NCEP小; 10月至4月初较NCEP资料大, 4月中至9月底比NCEP资料小, 峰值区出现在4月, 这和图5中5月减4月的差值图一致。

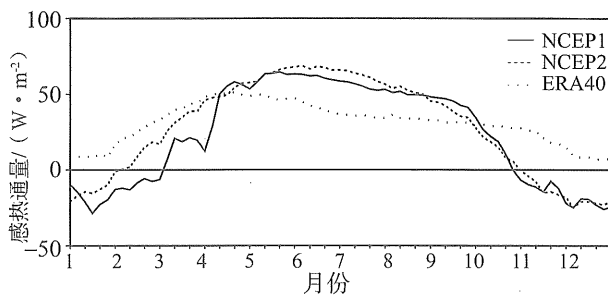


图6 高原区域平均地表感热通量的年变化

Fig.6 Annual variations of surface sensible heat flux of climate mean diabatic heating over TP

3.3 春季月平均青藏高原区域感热通量的年际变化

以4月为例(其余月份类似), 图7是1979-2001年4月平均高原区域地表感热通量标准差的年际变化曲线, 从图可以看出, 除个别年份(1981、1988)外, 三条曲线的趋势非常一致, 其相关系数NCEP-1与NCEP-2为0.67, NCEP-2与ERA-40为0.72, 超过99.9%置信度检验, NCEP-1与ERA-40相关系数达0.63, 超过99%置信度检验(23个样本99.9%和99%置信度检验, 相关系数分别为0.640, 0.526)。

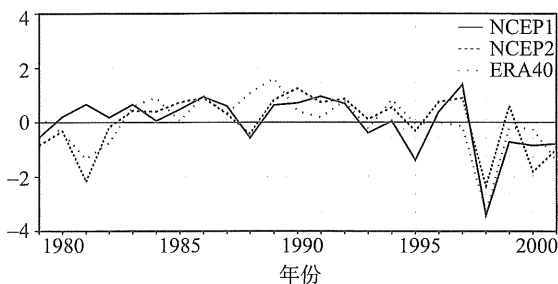


图7 4月高原区域平均地表感热通量的逐年标准化距平序列

Fig.7 Interannual normalized deviation of surface sensible heat flux in April over TP

4 结论

本文着重比较分析了再分析资料NCEP-1、NCEP-2和ERA-40垂直积分总非绝热加热和地表感热通量资料, 结果表明:

1) 垂直积分的总非绝热加热在空间分布上三套资料基本一致。NCEP两套资料在大值中心的分布上相似, 量值上则NCEP-2和ERA-40比较接近, ERA-40在高原南缘的加热估算比NCEP大; 年际变率的分布与加热场类似;

2) 高原区域平均的非绝热加热, NCEP两套资料对辐射加热的估算差异较大, 感热、潜热和总非绝热加热的季节变化趋势基本相同, 峰值出现在7月, 季节变化较ERA-40合理;

3) 三套资料在高原区域平均的总非绝热加热的标准差序列相关均达99.9%以上, 说明三套资料在年际变化上有较好的一致性;

4) 对春季地表感热通量场及其随时间变化的分析表明, 无论从形势分布还是时间变化上, 三套资料都有较好的一致性。在感热通量的量值上, NCEP要比ERA-40大;

5) 高原区域平均感热通量的季节变化, NCEP两套资料相对一致, 最大值出现在5月, ERA-40与之相比, 季节变化幅度偏小, 且在4月达到峰值; 年际变化则三者趋势比较一致, 相关系数超过99%甚至99.9%置信度检验。

从上述的比较不难发现, 尽管若干作者认为ERA-40在一些方面优于NCEP/NCAR, 但NCEP/NCAR的加热率资料还是比较可靠的, 有些方面比ERA-40更合理。Duan and Wu^[16]还发现, NCEP/NCAR和基于AMS观测的地面热通量资料也是比较接近的。如果从季节变化和年际变化的尺度进行分析研究, 再分析加热资料的结果从一定程度上来说是可信的。此外, 由于同化资料的动力一致性, 以及再分析资料(如NCEP/NCAR资料)对非绝热加热的描述具有种类及空间分层较细的优势, 在进行机制分析时更能够得到合理的分析结果。

参考文献:

- [1] YANAI M, ESBENSEN S, CHU J H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets[J]. Atmos Sci, 1973, 30:611-627.
- [2] KISTLER R, KALNAY E, COLLINS W, et al. The NCEP/NCAR50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-

- ROM and Documentation [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2001, 82: 247 - 268.
- [3] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J], Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77(3): 433 - 471.
- [4] KISTLER R, KALNAYE, COLLINS W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull Amer Meteor, 2001, 82(2): 247 - 267.
- [5] KANAMITSU M, EBISUZAKI W, WOOLEN J, et al. Overview of NCEP/DOE reanalysis-2 [C] // Proceedings of the second WCRP international conference on reanalysis. Reading, UK, August 1999, WMO/TD-No. 985, 2000: 1 - 4.
- [6] UPPALA S, KALLBERG P, ANGELES H, et al. ERA-40: ECM-WF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957 - 2002 [J]. ECMWF Newsletter Meteorology, 2004, 101: 2 - 21.
- [7] BASIST A N. Comparison of tropospheric temperatures derived from the NCEP/NCAR reanalysis, NCEP operational analysis, and the microwave sounding unit [J]. Bull Amer Meteor, 1997, 78 (7): 1431 - 1447.
- [8] SHEN S P, DZIKOWSKI P, LI G, et al. Interpolation of 1961 - 97 daily temperature and precipitation data onto Alberta polygons of eco district and soil landscapes of data [J]. Appl Meteor, 2001, 40 (12): 2162 - 2177.
- [9] REID P A, JONES P D, BROWN O, et al. Assessments of the reliability of NCEP circulation data and relationship with surface by direct comparison with station based data [J]. Climate Research, 2001, 17 (3): 247 - 261.
- [10] JOSEY S A. A comparison of ECMWF, NCEP/NCAR, and SOC surface heat fluxes with moored buoy measurements in the sub-duction region of the Northeast Atlantic [J]. J Climate, 2001, 14 (8): 1780 - 1789.
- [11] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 337 - 347.
- [12] 施晓晖, 徐祥德, 谢立安, NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析 [J]. 气象学报, 2006, 64(6): 710 - 722.
- [13] ZHAO T, FU C. Comparison of Products from ERA-40, NCEP-2, and CRU with Station Data for Summer Precipitation over China [J]. Adv Atmos Sci, 2006, 23 (4): 593 - 604.
- [14] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA - 40、NCEP - 2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析 [J]. 气象与环境研究, 2006, 11 (1): 14 - 32.
- [15] 郑彬, 谷德军, 李春晖. NCEP 和 ECMWF 资料表征南海夏季风的差异 [J]. 热带气象学报, 2006, 22 (3): 217 - 222.
- [16] DUAN A M, WU G X. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia [J]. Climate Dynamics, 2005, 24: 793 - 807.