ERA 与 NCEP2 大气热源的对比分析以及 全球大气热源性质变化规律的研究

蓝光东 温之平 贺海晏

中山大学季风与环境研究中心/大气科学系,广州 510275

摘 要 首先,对比分析了 ECMWF 再分析资料(简称 ERA)和 NCEP/NCAR 第 2 版再分析资料(简称 NCEP2)计算的大气热源,并在此基础上研究了全球大气热源性质(符号)变化的规律。分析两套资料计算的大气热源差别较大的某些地区,发现 ERA 资料在这些地区估算的大气热源要优于 NCEP2,因此,在接下来的研究中主要采用了 ERA 资料。对全球大气热源性质(符号)变化规律的研究主要揭示了全球永久大气热源和永久大气热汇的地理分布特征。永久大气热源中心主要分布在赤道附近地区,在赤道非洲的西部、苏门答腊岛西边的海域和赤道中西太平洋地区各有一个较强的永久热源中心,另外,在日本南部及其东边的太平洋上也有一永久热源中心。永久热汇地区的分布比较有规律,除了南北半球 60 度到两极之间为永久热汇地区外,南半球 5° S ~ 40° S 各大陆西边的大洋上都有一个永久热汇中心,另外,在阿拉伯海的北端,北半球 15° N ~ 40° N 之间太平洋和大西洋的东部也分别有一热汇中心。

关键词 大气热源 ERA 与 NCEP 的对比分析 永久大气热源(汇)

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0154-10

中图分类号 P433

文献标识码 A

Comparison of the Atmospheric Heat Sources Obtained from ERA and Those from NCEP2 and Study of the Variations in the Nature of Heating over the Global Atomosphere

LAN Guang-Dong, Wen Zhi-Ping, and HE Hai-Yan

Center of Monsoon and Environment Research , Zhongshan University , Guangzhou 510275

Abstract The global atmospheric heat sources are calculated by using the ECMWF reanalyzed data (hereafter referred to as ERA) and the NCEP/NCAR reanalyzed data (version 2, hereafter referred to as NCEP2) independently. Based on the comparisons of the atmospheric heat sources from ERA and those from NCEP 2, the annual oscillations of the sign of the vertically integrated heat source field Q_1 are studied in this paper. It is showed that the variation of Q_1 revealed by the ERA data in some regions where great differences between the two data sets are observed seems to be more realistic than that revealed by the NCEP 2 data set. So we carry on our next analysis in this paper based on the results from the ERA data set. By analyzing the annual oscillation of the sign in the vertically integrated heat source field Q_1 , geographical distributions of the permanent atmospheric heat sources (sinks) are presented. The permanent heat sources are located over i) the western part of the equatorial Africa; ii) the ocean region on the west side of the Sumatra; iii) the equatorial Western Pacific and the equatorial Central Pacific. In addition, there is also a permanent heating center over the ocean region to the east of Japan. The permanent heat sinks are mainly located over the high latitude regions, and over the tropical ocean regions to the west of the continents.

Key words atmospheric heat source , comparison analysis between ERA and NCEP2 , permanent atmospheric heat source (sink)

1 引言

研究大气加热的物理机制以及了解大气热源的时 空分布,是我们理解天气和气候变化的一个基础性工 作。全球大气热源的时空分布特征,因此也受到许多 学者的关注和研究[1~7]。这项工作主要揭示了各个季 节全球大气热源和大气热汇的地理分布特征,还发现 主要的加热中心经向地或纬向地随着最大太阳入射的 纬度以及行星尺度的海陆热力差异对比的迁移而迁移 等规律。在区域大气热源方面,青藏高原上空的大气 热源特征[8,9]和季风区内大气热源的变化规律[10~12]也 有大量的研究。

值得注意的是,前面提到的关于全球和区域大气 热源的研究多数使用 ECMWF 再分析资料(简称 ERA), 正如 Yanai 等^{7]}指出的那样, ECMWF 资料的连 续性可能存在问题,因为 1985~1992 年期间 ECMWF 的预报—分析格式几经变更,另外用于计算大气热源 的资料时间长度也相对比较短。最近,Yanai 等7]利用 NCEP 第 1 版的再分析资料研究了 1980~1994 总共 15 年大气热源和水汽汇的时空分布特征。但现在已经发 现该资料集有不少的错误,特别是南半球的虚假资料 问题¹³]。在 ECMWE 的再分析资料和 NCEP 的再分析资 料的对比方面, Annamalai 等 14 1 指出 ECMWF 的再分析 资料在季节平均的某些气候特征方面要优于 NCEP/ NCAR 的再分析资料, Newman 等 15] 也指出 ECMWF 的 再分析资料在热带西太平洋暖池地区与观测到的降水 和 OLR 场比较接近,从而能够较好地估计出大气的加 热场。因此,有必要使用 ECMWF (1979~1993年)的 再分析资料对全球大气热源的时空分布特征作进一步 的研究。目前,NCEP/NCAR 第2版的再分析资料(简 称 NCEP2) 也已经释放,对于南半球的虚假资料等问 题有了一定程度的改善13]。使用较长时间的这两套资 料计算的全球大气热源的时空分布特征方面究竟有多 大差别,对于这样一个问题的研究目前还是一个空白, 而对这问题的研究恰恰有助于我们了解真实大气热源 的分布和演变情况。本工作主要是对比分析 ECMWF 再分析资料和 NCEP/NCAR 第 2 版再分析资料计算的大 气热源,并在此基础上研究全球大气热源性质(符号) 变化的规律。

大气热源的计算和研究方法

分别利用 ERA 和 NCEP2 的 0000UTC 和 1200UTC 各标准等压面的温度、湿度和风场等资料,求得 1979~1993年一天两时次13层或12层(ERA为13 层, NCEP2 为 12 层)的大气热源 Q_1 和水汽汇 Q_2 值,及其整层的垂直积分值 O_1 和 O_2 。 ERA 的 13 层分别指 962.5, 887.5, 812.5, 737.5, 650, 550, 450, 350, 275, 225, 175, 125和85hPa。NCEP2的 12 层分别指 962.5,887.5,775,650,550,450, 350, 275, 225, 175, 125和85 hPa。大气热源 Q, 由 以下公式计算[16]:

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] , \quad (1)$$

其中,T为温度;q为比湿; ω 为p坐标的垂直速 度; $p_0 = 1000 \text{ hPa}$; $k = R/c_p$; V 为水平风矢量。需 要说明的是,计算两套资料所用的垂直速度 ω 均直 接引用 ERA 和 NCEP2 的垂直速度资料。大气热源整 层的垂直积分值 O_1 由下式计算^[16]:

$$Q_1 = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_s} Q_1 dp , \qquad (2)$$

式中, p_s 指 1000 hPa, p_t 指的是 70 hPa。据 Yanai 等 的研究[16], O_1 还可以用下式表达:

$$Q_1 = Q_r + LP + S, \qquad (3)$$

式中,L为凝结潜热系数,P和S分别为地表面每单 位面积的降水率和地表感热通量。可见 $, O_{i}$ 由大气辐射的垂直积分、地面降水释放的潜热和地表 的感热通量来决定。水汽汇0,及其垂直积分的计算 可参阅文献[16]。需要补充说明的是, NCEP2的 1979 年 11 月和 12 月以及 1980 年 12 月某些时次的全 球格点资料由于损坏不能正常解压,导致大气热源无 法正常计算,因此使用了 ERA 计算 Q_1 和 Q_2 对缺算的时次进行了替换。这样替换的目的主要是为 了不影响下面两套资料的对比。

为了比较两套资料计算的大气热源,我们主要进 行了相似性统计量(欧氏距离)的计算,假设有两个 变量 x 和 y , 分别有样本长度为 n 的观测值: x_1 , x_2 , x_3 , ..., x_n 和 y_1 , y_2 , y_3 , ..., y_n ,则两个变 量之间的欧氏距离[17]为

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}.$$
 (4)

欧氏距离的大小与变量的量纲有关,为消去量纲的影 响,应对数据进行标准化。欧氏距离 d 越大,表明 两者之间差别越大。

3 ERA 与 NCEP2 大气热源的对比分析

3.1 大气热源 15 年平均(1979~1993)的对比 图 1 为 ERA 和 NCEP2 年平均 Q_1 的分布。可

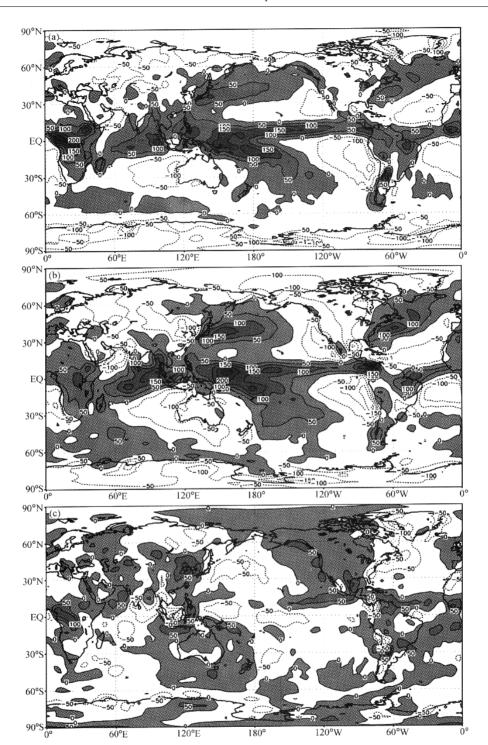


图 1 (a) ERA 年平均 Q_1 的分布 ;(b) NCEP2 年平均 Q_1 的分布 ;(c) ERA 年平均 Q_1 减去 NCEP2 年平均 Q_1 的分布。 单位: W·m-2

Fig. 1 (a) Climatic annual mean Q_1 field from ERA; (b) climatic annual mean Q_1 field from NCEP2; (c) annual mean Q_1 difference between ERA and NCEP2. Units : $W\!\cdot\!m^{-2}$

 Q_1 的分布情况与年 数值上有一定的差别。各月

以发现,热源和热汇位置的分布是极其相似的,但在 平均的情况相同,在热源和热汇位置的地理分布上是 相似的,但数值上有些差别(图略)。ERA全年平均

最强的热源中心出现在赤道非洲的西部,而 NCEP2 可以发现,陆地上 Q_1 逐月变的最强热源中心出现在赤道西太平洋地区。图 1c 为 的,差别较大的地方大多都在海洋

最强的热源中心出现在赤道非洲的西部,而 NCEP2 的最强热源中心出现在赤道西太平洋地区。图 1c 为 ERA 年平均 Q_1 减去 NCEP2 的情况,数值上差别较大(绝对值大于 $100~W\cdot m^{-2}$)的地方出现在赤道非洲西部地区,中国的华北、东北以及朝鲜半岛附近的一个地区,赤道 115° E 附近地区,赤道 $80^{\circ}W$ 附近地区,以及秘鲁与智利附近地区等。分析文献 [18] $1979 \sim 1993$ 年的年平均降水场(图略),赤道非洲西部地区的最大降水大概为西太平洋地区的一半左右,但 ERA 资料计算的全年平均最强热源和最强水汽汇(图 2) 却出现在赤道非洲的西部,赤道地区热源的主要解释是降水释放的凝结潜热,说明 ERA 资料在该地区大气热源的估算可能没有 NCEP2 优越的。

为了比较 15 年平均两套资料 Q_1 的逐月变化之间的差别,首先对各个格点上 12 个月的资料序列进行标准化,而后计算两套资料每个对应格点上 Q_1 逐月变化之间的欧氏距离,得到图 3。从图 3

逐月变化的差别是比较小 的,差别较大的地方大多都在海洋上,南半球逐月变 化差别较大的地方要比北半球多,全球差别较大的地 方主要集中在南半球的中高纬地区,赤道印度洋地 区,赤道西、中太平洋地区,南北半球15~30°之间 太平洋的东部地区,靠近地中海南边的地区,伊朗附 近也有小块差别较大的地区。为了更好地看清两者之 间的对比,依据图3,我们选取了3个区域,分别为 $A \times B$ 和 $C \times Z$,各个区域平均 Q_1 的逐月变化见图 4。从图 4 可以发现, A 区两者之间无论是数值还是 走势差别都甚微;而在 B 区,差别比 A 区要大,只 在 6 月到 10 月间的走势相同; C 区对应图 2 中欧氏 距离较大的区域,差别就更明显了,两套资料在这一 区域计算的 Q_{\perp} 全年虽然都是负值为热汇区,但 是 ERA 的 Q_1 最大值出现在 3 月,最小值出现在 6月,而 NCEP2 的 Q_1 最大值出现在 9月,最小值 出现在 2 月,两者的走势形状几乎是相反的。

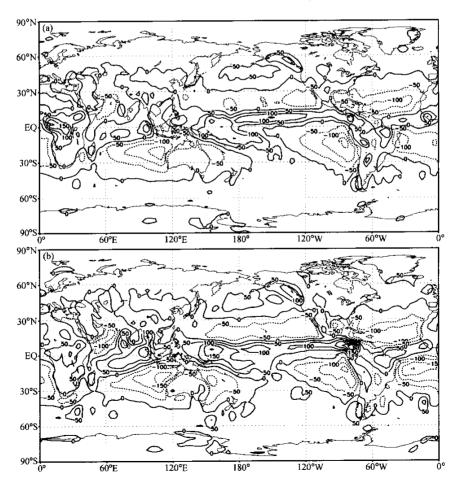


图 2 (a) ERA 年平均 Q_2 的分布; (b) NCEP2 年平均 Q_2 的分布。单位:W·m⁻²

Fig. 2 (a) Climatic annual mean Q_2 field from ERA; (b) climatic annual mean Q_2 field from NCEP2. Units: W·m⁻²

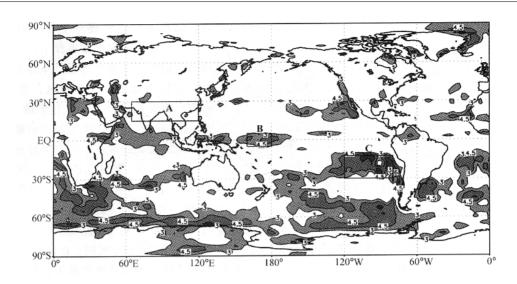


图 3 ERA 与 NCEP2 Q_1 逐月变化之间的欧氏距离(仅标明大于 3 的分布), 在图中选取三个区域:A 区(15°N~30°N,65°E~120°E); B 区 (5°S~5°N,160°E~180°W); C 区 (30°S~12.5°S,120°W~80°W)

Fig. 3 Distribution of the Eulerian Distance between the monthly variations of Q_1 in ERA and those in NCEP2 (only values $\geqslant 3$ indicated). Three regions are selected in this figure , i.e. , region A ($15^{\circ}N \sim 30^{\circ}N$, $65^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$), region B ($5^{\circ}S \sim 5^{\circ}N$, $160^{\circ}E \sim 180^{\circ}W$) and region C ($30^{\circ}S \sim 12.5^{\circ}S$, $120^{\circ}W \sim 80^{\circ}W$)

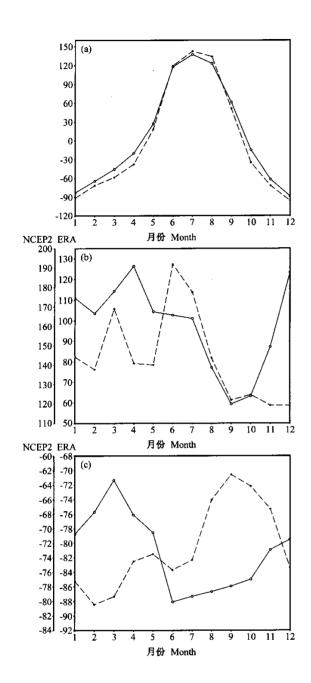
我们知道, C 区主要位于热带太平洋的冷水带 内,这里是 ENSO 关键区域之一,两套资料计算的大 气热源在这里究竟谁比较合理呢? 我们考察了这一区 域 1979~1993 年平均海表面温度(SST)的逐月变化 (图 5a)和降水的逐月变化(图 5b)。这一区域的降 水全年都比较小,降水率不超过 1.6 mm·d-1。海温 的变化则与太阳辐射的季节性位移息息相关,高温值 出现在2,3月,低温值出现在8,9和10月。由式 (3) 可以推断,大气热源 Q_1 的变化应该也与太 阳辐射的季节性位移有着密切联系,在夏季 Q_1 的值达到最大,在冬季 Q_1 的值较小,参照图 4c的结果,我们认为 ERA 对 C 区域大气热源 O 的 估算要比 NCEP2 的好。为了更好地支持以上的结论, 将 ERA 和 NCEP2 计算得到的 Q_1 同时减去各自计 算的 Q_2 ,就可看出辐射和下垫面感热的作用(图 5c)。从图 5 可以看出, C 区 ERA 的辐射和下垫面感 热的作用在冬季(8月左右)达到最小,而从 NCEP2 的曲线来看,在冬季辐射和下垫面感热的作用反而是 较强的,这也说明了 NCEP2 在该地区的 O_1 $o_{,}$ 的估算是不太合理的。

3.2 大气热源年际变化的对比

为了比较两套资料计算的大气热源年际变化之间的差别,求得 $1979 \sim 1993$ 年每年的年平均 Q_1 场,对各个格点上 15 年的资料序列进行标准化,而后计算两套资料每个对应格点上 Q_1 逐年变化之间的

欧氏距离,得到图6。

与图 2 相比较 Q_1 年际变化的对比出现了与 逐月变化对比不同的一些情况。大陆上差别较大的有 非洲和南美洲的部分地区,俄罗斯中部,巴芬岛到格 陵兰地区,中国的西部以及中国的西南部到中南半岛 这一地区。海洋上差别较大的地方有阿拉伯海的北 端,赤道印度洋,南北半球 15~30 度之间太平洋的 东部地区,克罗泽群岛附近海域,以及北半球的热带 大西洋和 30°S 附近的大西洋地区。南半球 60°S 以南 也有广阔差别较大的地方。值得注意的是,除了南北 半球 15~30 度之间太平洋东部的小块区域外,整个 热带太平洋差别都不是特别大。类似上一小节的做 法,根据图 6,我们也选取了 3 个区域,分别为 A, B和 C 区,分别考察各个区域平均 Q_1 的逐年变 化(图7)。A 区是赤道中太平洋地区,虽然 O_1 数值上存在差别,但两者的变化趋势是非常相似的; B区为赤道印度洋地区,差别就比较明显了;而在 C 区,差别更大,15年中有6年是反相变化的,锋值 出现的位置也明显不同, ERA 在 1984 年之前为较大 的 Q_1 值, 1985 年以后则维持较小的 Q_1 值; 而 NCEP2 的 Q_1 锋值出现在 1987 和 1988 年,其他 年份 O_1 数值则比较接近。图 7d 为来自 Xie 和 Arkin^[18]分析的 C 区年平均降水率的逐年变化,发现 降水率的逐年变化与 ERA 在 C 区大气热源的变化形 势很相似,变化趋势除了开始的一年是反向的外,其 他都相同,由此,我们推断由ERA资料估算的大气



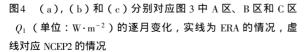


Fig. 4 Monthly variations of Q_1 ($W \cdot m^{-2}$) from ERA (solid) and those from NCEP (dashed) over the regions A(a), B(b) and C(c) shown in Fig. 3

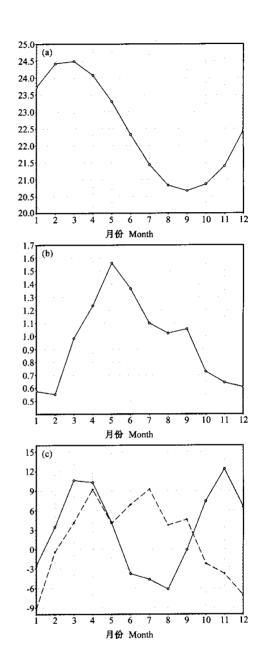


图 5 (a),(b)和(c)图 3 中 C 区 1979~1993 年平均海表面温度(SST)、降水率的逐月变化和 Q_1 减去 Q_2 的逐月变化。(c)中实线为 ERA 的情况,虚线对应 NCEP2 的情况。(a),(b)和(c)的纵坐标单位分别为 $\mathbb C$, mm·d⁻¹和 W·m⁻² Fig. 5 Climatic monthly variations of the sea surface temperature ($\mathbb C$) (a), the climatic monthly variations of the precipitation rate (mm·d⁻¹) b) and the climatic monthly variations of the differences between Q_1 and Q_2 (W·m⁻²)(c) in the region C shown in Fig. 3

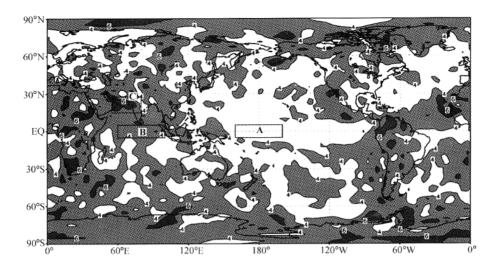


图 6 ERA 与 NCEP2 Q_1 逐年变化之间的欧氏距离(仅标明大于 4 的分布),在图中选取三个区域:A 区(5°S~5°N,160°E~160°W); B 区 (5°S~5°N,60°E~100°E); C 区 (15°N~27.5°N,55°E~80°E)

Fig. 6 Distribution of the Eulerian Distance between the interannual variations of Q_1 in ERA and those in NCEP2 (only values $\geqslant 4$ indicated). Three regions are selected in this figure, i. e. region A (5° S $\sim 5^{\circ}$ N, 160° E $\sim 160^{\circ}$ W), region B (5° S $\sim 5^{\circ}$ N, 60° E $\sim 100^{\circ}$ E) and region C (15° N $\sim 27.5^{\circ}$ N, 55° E $\sim 80^{\circ}$ E)

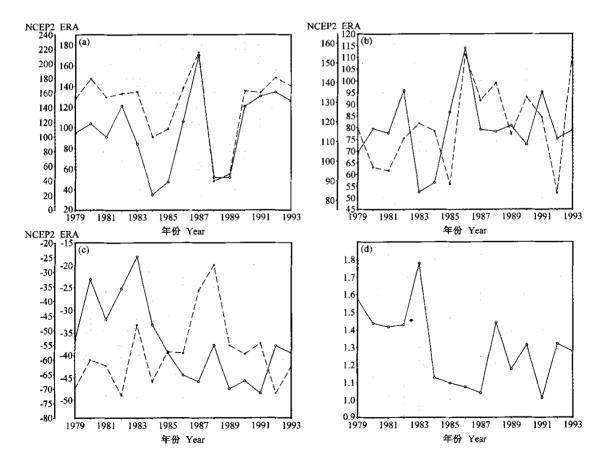


图 7 (a),(b)和(c)分别对应图 6 中 A 区、B 区和 C 区 Q_1 (单位: $W \cdot m^{-2}$)的逐年变化,实线为 ERA 的情况,虚线对应 NCEP2 的情况,(d) C 区年均降水率(单位: $mm \cdot d^{-1}$)的逐年变化

Fig. 7 The interannual variations of Q_1 ($W \cdot m^{-2}$) from ERA (solid) and those from NCEP2 (dashed) over the regions A(a), B(b) and C(c) in Fig. 6 and the interannual variations of the precipitation rate (mm·d⁻¹) over the region C shown in Fig. 6

热源在 C 区可能要优于 NCEP2。

4 全球大气热源性质变化的规律

在前一节介绍了 ERA 资料和 NCEP2 资料计算的 大气热源之间的比较,对于大气热源资料的可靠性和 不确定性有了比较客观的了解。通过上节的讨论,并 综合 Annamalai 等^[14]和 Newman 等^[15]的研究成果,我 们决定主要采用 ERA 资料计算的大气热源资料 (1979~1993 年平均)来做全球大气热源性质(符号) 变化规律的研究。

全球各个地区大气热源的性质(Q_1 的符号)在一年当中会发生怎样的变化呢?图 8 为(30° N, 90° E)大气热源垂直积分 Q_1 逐月的变化,可以看到 3 月到 4 月的时候热源性质发生了一次改变,8 月到 9 月热源性质又发生了一次改变,因此,我们说该地区热源性质在一年中发生了两次改变。类似计算

全球格点 Q_1 逐月变化热源性质发生变化的次数,得到图 9。

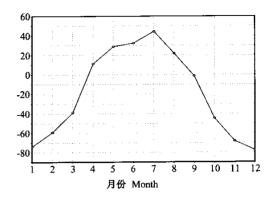


图 8 $(30^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\text{E})$ 大气热源垂直积分 Q_1 逐月的变化 (单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig. 8 The monthly variations of the vertically integrated Q_1 ($W \cdot m^{-2}$)at the point ($30^{\circ}N$, $90^{\circ}E$)

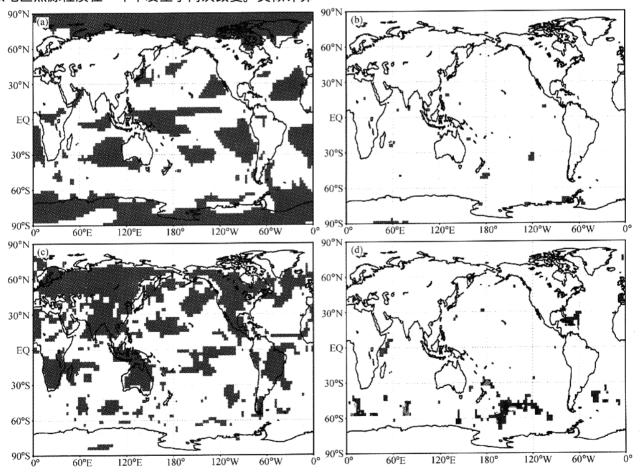


图 9 全球大气热源性质的年变化:(a) 和 (b) 中的阴影分别代表 Q_1 热源性质一年内发生零次改变和 1 次改变的区域;(c) 和 (d) 中的阴影分别代表 Q_1 热源性质一年内发生 2 次改变和 3 次或 3 次以上改变的区域

Fig. 9 Types of the annual oscillations in the Q_1 field. Shadow areas represent regions of the oscillation without changing the sign of Q_1 all year around (a), changing the sign of Q_1 once a year (b), changing the sign of Q_1 twice a year (c), and changing the sign of Q_1 more than thrice a year (d)

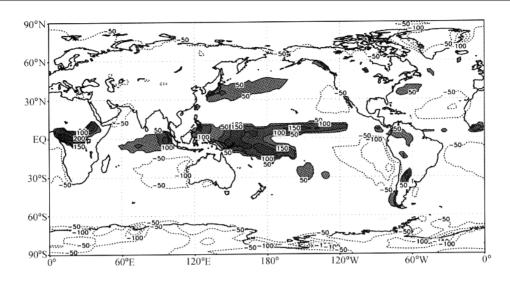


图 10 永久热源地区或热汇地区年平均 Q_1 的分布(单位: $\mathbb{W}\cdot \mathbf{m}^{-2}$)

Fig. 10 Climatic annual mean Q_1 (W·m⁻²) field in the regions of permanent heat source/sink

很明显,热源性质发生一次改变,以及 3 次和 3 次以上改变的地区相当少(图 9b 和 d),全球大气热源 Q_1 一年内的性质变化主要有两种形式,一种是发生零次改变,我们称之为永久大气热源地区或永久热汇地区。另一种就是发生 2 次改变,类似图 8 所举的例子。

图 10 为永久大气热源地区或热汇地区全年平均的 Q_1 场,可以发现永久热源中心主要分布在赤道附近地区,在赤道非洲的西部、苏门答腊岛西边的海域和赤道中西太平洋地区各有一个较强的热源中心,另外在日本南部及其东边的太平洋上也有一永久热源中心。永久热汇地区的分布比较有规律,除了南北半球 60 度到两极之间的地区外,南半球 5° N ~ 40° N 之间太平洋和大西洋的东部也分别有一热汇中心,另外在阿拉伯海北端也有一永久热汇中心。

5 结论

本文对比分析了 ERA 资料和 NCEP2 资料计算的 大气热源资料,并利用 ERA 资料研究全球大气热源 性质(符号)变化的规律。主要结论可概括如下:

(1)对于 ERA 和 NCEP2 再分析资料分别计算的大气热源而言,两者各月及整年平均热源、热汇位置的分布是极其相似的,但在数值上有一定的差别。大气热源的垂直积分 Q_1 逐月变化的差别在大陆上是比较小的,差别较大的地方大多在海洋上。 Q_1 年际变化的对比则出现了与逐月变化对比不同的一些

情况,在大陆上也有一些差别较大的地方。另外,值得注意的是除了南北半球 15~30 度之间太平洋东部的小块地区以外,整个热带太平洋年际变化的差别都不是特别大。对两套资料差别较大的区域,如热带太平洋冷水带内 Q_1 逐月变化和阿拉伯海北端 Q_1 逐年变化的分析,则表明 ERA 对该区大气热源 Q_1 的估算比 NCEP2 的要好,综合 Annamalai 等 14 和 Newman 等 15 的研究和本文的对比分析结果,我们在接下来的研究中主要采用了 ERA 资料计算的大气热源。

(2)全球大气热源 Q_1 一年内的性质(符号)变化主要有两种形式,一种是发生零次改变,我们称之为永久热源地区或永久热汇地区。另一种为发生两次改变。永久热源中心主要分布在赤道附近地区,在赤道非洲的西部、苏门答腊岛西边的海域和赤道中西太平洋地区各有一个较强的永久热源中心,另外在日本南部及其东边的太平洋上也有一永久热源中心。永久热汇地区的分布比较有规律,除了南北半球 60 度到两极之间为永久热汇地区外,南半球 5° S ~ 40° S 各大陆西边的大洋上都有一个永久热汇中心,另外在阿拉伯海的北端,北半球 15° N ~ 40° N 之间太平洋和大西洋的东部也分别有一热汇中心。大部分经典季风区 Q_1 的性质在一年之内发生了两次或两次以上的改变,即热源性质有显著的季节性变化。

参考文献

[1] Wei M Y , Johnson D R , Townsend R D. Seasonal distributions of diabatic heating during the First GARP Global Experiment. Tellus . 1983 , $35A:241\sim255$

LAN Guang-Dong, et al. Comparison of the atmospheric heat sources obtained from ERA and those from ...

- [2] Johnson D R, Yanai M, Schaack T K. Global and regional distributions of atmospheric heat sources and sinks during the GWE. *Monsoon Meteorology*, C. P. Chang and T. N. Krishnamuti, Eds. Oxford Univercity Press, 1987, 271 ~ 297
- [3] Hoskins B J, Hsu H H, James I N, et al. Diagnostics of the global atmospheric circulation based on ECMWF analyses 1979 – 1989. World Climate Research Programme-27, WMO/TD-326, 1989, 217pp
- [4] Schaack T K, Wei M Y. The three-dimensional distribution of atmospheric heating during the GWE. Tellus, 1990, 42A: 305 ~ 327
- [5] Christy J R. Diabatic heating rate estimates from European Centre for Medium-Range Weather Forcasts analyses. J. Geophys. Res., 1991, 96:5123 ~ 5135
- [6] Schaack T K , Johnson D R. January and July global distributions of atmospheric heating for 1986 , 1987 , and 1988. J. Climate , 1994 , 7: 1270 ~ 1285
- [7] Yanai M, Tomita T. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis. J. Climate, 1998, 11:463 ~ 482
- [8] 陈隆勋,李维亮.亚洲季风区夏季大气热量收支.全国热带夏季风学术会议文集(1981).昆明:云南人民出版社,1982,86~101
 Chen Longxun, Li Weiliang. The heating balance in the Asian summer monsoon area. Proceedings of National Seminar on Tropical Summer Monsoon (1981) (in Chinese). Kunming: Yunnan People's Press, 1982,86~101
- [9] Luo H B , Yanai M. The Large-scale circulation and heat sources over the Tibetain Palteau. Mon. Wea. Rev., 1984, 112:966~989
- [10] 琚建华,罗会邦. 东亚夏季风建立过程中大气热源结构及其与热带环流的关系. 气象科学技术集刊 (10). 北京:气象出版社,1987,103~114

 Ju Jianhua, Luo Huibang. The structure of atmospheric heat sources during the establishment of East Asian summer monsoon and their relationships with tropical circulation. Collection of Meteorological

- Science and Technology (10) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press , 1987 , $103\sim114$
- [11] 智协飞. 北半球夏季风区大气视热源和视水汽汇的低频振荡. 南京气象学院学报,1994,17(1):44~50 Zhi Xiefei. Low-frequency oscillations of the apparent heat source and moisture sink over Northern Summer Monsoon areas. *Journal of Nanjing Institue of Meterology* (in Chinese),1994,17(1):44~50
- [12] 简茂球,罗会邦.长江中下游热源和水汽汇的季节变化特征.中山大学学报(自然科学版),1996,35 (增刊):176~181

 Jian Maoqiu, Luo Huibang. Seasonal variations of atmospheric heat sources and moisture sinks over the middle and down reaches of Yangtze River. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese),1996,35 (Suppl):176~181
- [13] Kanamitsu M , Ebisuzaki W , Woollen J , et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull . Amer . Meteor . Soc .* , 2002 , **83** : 1631 ~ 1645
- [14] Annamalai H , Slingo J M. The mean evolution and variability of the Aisan summer monsoon: comparison of ECMWF and NCEP-NCAR reanalyses. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, 127:1157 ~ 1186
- [15] Newman M , Sardeshmukh P D , Bergman J W. An assessment of the NCEP , NASA , and ECMWF reanalyses over the tropical west Pacific warm pool. *Bull . Amer . Meteor . Soc.* , 2000 , **81** (1):41 ~ 48
- [16] 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 , $\bf 30$: $\bf 611 \sim 627$
- [17] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法. 北京: 气象出版 社,1995,312~314 Shi Neng. Multiplex analysis method in the meterology research and prediction (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press,1995, 312~314
- [18] Xie P , Arkin P A. Global Precipitation : A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations , Satellite Estimates and Numerical Model Outputs. BAMS. 1997 , 78: 2539 ~ 2558