

赵滨, 钟青, 何金海, 等. 亚洲和南半球大气冷(热)源对亚洲冬季风影响的数值试验 [J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 610-617.

亚洲和南半球大气冷(热)源对亚洲冬季风影响的数值试验

赵滨^{1,2}, 钟青², 何金海³, 张博⁴

(1. 中国气象局 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029;
3. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 4. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 利用 NCAR CAM3.1 模式及 NCEP/NCAR (version 1) 再分析资料计算了几种现实大气热源分布情况, 讨论了亚洲各地区和南半球上空冬季 1 月大气冷(热)源对东亚冬季风环流系统和印度冬季风环流系统形成的影响。结果表明: (1) 冬季 1 月东亚地区和澳大利亚上空大气冷(热)源与东亚冬季风环流关系密切, 南半球澳大利亚附近的非绝热加热可以激发出澳大利亚北部的热低压系统, 东亚大陆东部的大气冷源可以使东亚大陆低空出现冷高压, 基本上模拟出东亚季风系统冬季主要环流成员; (2) 亚洲地区西部及其对应的南半球印度洋非绝热加热与印度冬季风环流关系密切, 同样对东亚冬季风也有一定的影响, 特别是亚洲大陆西部副热带地区的非绝热加热可以加强冬季南海的越赤道气流并能调整阿留申低压的位置。

关键词: 大气冷(热)源分布; 印度冬季风; 东亚冬季风; 数值试验

中图分类号: P434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)05-0610-08

Numerical Analysis for Impacts of Atmospheric Heat Source Distribution over Asia and Southern Hemisphere on Asian Winter Monsoon

ZHAO Bin^{1,2}, ZHONG Qing², HE Jin-hai³, ZHANG Bo⁴

(1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China;
4. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The impact of atmospheric cold (heat) source distribution over Asia and the Southern Hemisphere in January on the East Asian winter monsoon and Indian winter monsoon is simulated with the NCAR CAM3.1 model based on the distribution of heat source calculated from NCEP/NCAR (version 1) reanalysis datasets. The following conclusions are arrived at: Firstly, in January, the cold (heat) sources over East Asia and Australia are close related with the East Asian winter monsoon, the diabatic heating over Australia and its peripheral areas can induce the heat low system over the north of Australia; the atmospheric cold source over the east of the East Asian continent leads to the occurrence of cold high in the low troposphere over the region, the major circulation members of the East Asian winter monsoon system are fairly well simulated. Secondly, the diabatic heating over the west part of Asian region and the Indian Ocean south of the equator is associated with the Indian winter monsoon very well; likewise, there is also a relationship between this heating and the East Asian winter monsoon, in particular, the diabatic heating over the subtropical regions of western Asia can strengthen the winter cross-equatorial flow over the South China Sea and alter the position of the Aleutian low.

Key words: atmospheric heat source distribution; Indian winter monsoon; East Asian winter monsoon; nu-

收稿日期: 2008-05-12; 改回日期: 2008-09-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (40475029); 国家自然科学基金面上项目 (40505014); 国家自然科学基金青年基金项目 (40705036); 国家自然科学基金重点资助项目 (40633018)

作者简介: 赵滨 (1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 研究方向为全球谱模式的构建, zhaob@cma.gov.cn

merical experiment

0 引言

东亚的东北季风是北半球冬季最活跃的环流系统,冬季风的活动不仅会造成中高纬地区的强烈降温、降雪、大风、霜冻等灾害性天气,而且对全球大气环流的变化也起到重要作用^[1-5]。很多学者已经对东亚冬季风环流特征及其演变特征做了许多研究,并得出大量结论^[6-12]。陈海山等^[13]利用 NCAR CCM2 模式证实东亚冬季风对秋季 SSTa 的显著响应区位于中纬度太平洋地区,秋季中纬度太平洋 SST 持续异常偏冷(暖)能够引起强(弱)东亚冬季风的环流异常。张庆云等^[14]指出冬季赤道东太平洋海温变化是冬、夏东亚环流季节以及年际变化的一个重要外强迫因子。金啟华等^[15]利用 NCAR CCM3 模式研究了亚洲南部地区海陆分布对亚洲冬季风影响,试验结果表明亚洲南部地区的阿拉伯海、孟加拉湾和南海冬季风及其越赤道气流的存在与非洲大陆—阿拉伯海—印度半岛—孟加拉湾—中南海—南海的海陆热力差异有关。

大气热源是推动大气运动的主要动力之一,许多学者都计算了全球大气热源的时空分布特征^[16-21]。黄荣辉等^[22]用准地转球坐标模式讨论了地形与热源强迫对亚洲夏季风形成与维持的物理作用,得出青藏高原东南部上空夏季的非绝热加热对亚洲夏季风形成与维持起到重要作用,其影响远远大于地形的动力作用。骆美霞等^[23]用数值模拟证实夏季孟加拉湾地区的大气热源对印度夏季风系统

表 1 试验设计方案

Table 1 Design schemes of control and sensitive experiments

试验名称	试验设计
CT	在全球范围内采用 Yanai 倒算法计算的逐候强迫热源替换模式自身产生热源的试验
A diabatic	去除模式自身产生热源的模拟
WAQ	只加入(40°S~50°N, 10°E~90°E)内的大气冷(热)源作强迫,研究 90°E 以西副热带、热带地区及南半球大气冷(热)源对亚洲季风环流的影响
EAAUSQ	只加入(40°S~50°N, 90°E~180°)内的大气冷(热)源作强迫,讨论东亚大陆、南海地区及澳大利亚大气冷(热)源对亚洲冬季风环流的影响
AAUSQ	在(22°~50°N, 30°~90°E)及(40°S~50°N, 90°E~180°)内加入大气冷(热)源作强迫,讨论亚洲大陆副热带西部地区、东亚大陆、南海地区及澳大利亚大气冷(热)源对亚洲冬季风环流的影响
AQ	在 AAUSQ 的基础上加入增加了印度洋的大气冷(热)源,以讨论亚洲地区及对应南半球大气冷(热)源分布对亚洲冬季风的影响

注:各试验简称含义如下:EA(东亚),WA(西亚),A(亚洲),AUS(澳大利亚)。

起到重要作用,但对东亚季风系统的形成作用较小,而中国南海的加热中心及澳大利亚冷源对东亚季风槽及北半球 ITCZ 的形成极其重要。徐海明等^[24]用 5 层原始方程模式研究了澳洲夏季风热源低频变化对北半球冬季风的影响,结果表明澳洲夏季风低频热源可引起北半球副热带高低层环流、东西向 Walker 环流、经向环流、越赤道气流的低频振荡,其振荡周期、强度与热源的低频振荡周期、强度有关。大气热源对亚洲夏季风影响已有一些学者进行了研究,然而冬季大气冷热源分布对亚洲冬季风究竟有何影响则研究很少。本文采用一个全球模式在实际的冷热源强迫下进行模拟,来探讨北半球亚洲地区冬季及对应的南半球夏季大气冷热源对东亚冬季风和印度冬季风系统的影响。

1 数值模式及方案设计

采用 NCAR CAM3.1 模式,垂直方向采用混合坐标,垂直分层为 26 层,积分步长为 1 200 s,水平分辨率为 T42。设计了如下 6 个试验(表 1)。

首先给出了 NCEP/NCAR (version 1) 资料及 Yanai 倒算法程序计算了亚洲及南半球 1971—2000 年 30 a 冬季 1 月全球大气冷(热)源分布(图 1)。由图 1 可见,主要的大气热源分布在北太平洋、非洲南部、南美洲和从南印度洋经印度尼西亚到南太平洋辐合带。而主要的大气冷源分布在北半球大陆地区、副热带太平洋东部地区。本文各种数值试验都采用逐候强迫的方式将指定范围内模式每步物理过

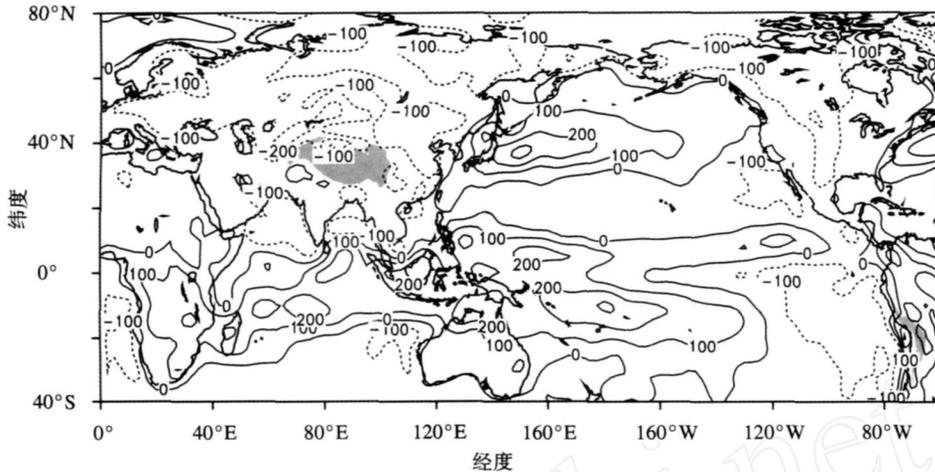


图 1 30 a(1971—2000年)亚洲地区和南半球冬季 1月大气冷热源 (W/m^2) 水平分布 (阴影区为高度大于 3 000 m 的区域)

Fig 1 Distribution of the 30-yr(1971—2000) mean vertically integrated heat source (W/m^2) over Asia and the Southern Hemisphere in January (Gray shadings denote the topography above 3 000 m asl)

程生成的各层非绝热加热率替换为所对应的倒算法计算出来的候平均加热率,而剩余部分各层的非绝热加热率都为零。模式从 5 月 1 日启动,取次年 1 月平均结果作比较。

2 大气(冷)热源对冬季风场的影响

2.1 CT试验的流场分析

CT实验中,在全球范围内采用 NCEP/NCAR (version 1)资料及 Yanai倒算法程序计算的大气非绝热加热率替换模式自身产生的非绝热加热率(热源),即模式采用实况热源而不是模式自身的模拟热源激发环流形势。由 925 hPa低空流场模拟结果(图 2a)可以看到,北太平洋阿留申低压被成功的模拟出来,东亚大陆处于强大冷高压控制下,高压东北部的西北风穿过我国华北、江淮流域在 30°N 附近转向为东北冬季风,经过我国华南地区、南海、中南半岛、孟加拉湾和阿拉伯海,最后在赤道印度洋转向为偏西风与来自南半球的东南信风之间出现明显的辐合带。200 hPa高空流场上(图 3a)成功模拟出北半球中纬度西风带、西太平洋副热带高压系统,日本东南洋面上空的西风急流中心与实况保持一致。

在进一步分析不同区域热源对季风影响之前,需要探讨热源在季风模拟中的重要性,为此设计了 Adiabatic试验,即去掉模式非绝热加热(热源),使模式在无热源作用的绝热条件下积分 1 a,文中给出了 Adiabatic试验 1月模拟的 925 hPa和 200 hPa流场分布。由图 2b可以看到,925 hPa中除东亚大陆

出现一个反气旋外,澳大利亚热低压、南海越赤道气流以及赤道印度洋低空越赤道气流都未出现。200 hPa(图 3b)冬季西太平洋副热带高压、北半球西风带及急流中心等亚洲冬季风高空环流系统都未能模拟出来,而其高低层模拟的气旋、反气旋结构也是由于地面摩擦作用引起的,由此可见,无热源条件下无法模拟出实际的季风形势,热源强迫是成功模拟出实际季风分布的关键因素。因此,在之后的试验中采用在特定区域内加入 Yanai倒算法热源,而其他区域保持绝热零热源强迫的方法,从而讨论各区域实况热源强迫对东亚冬季风环流系统和印度冬季风系统形成的影响。

2.2 WAQ试验的流场分析

WAQ试验是在 50°N 以南和阿拉伯海、孟加拉湾东部及南半球印度洋地区(10°~90°E, 40°S~50°N)范围内加入大气冷(热)源。模拟的冬季 1月低空 925 hPa流场(图 2c)中,我国的华北、江淮流域到台湾岛以东洋面盛行西北风,而我国南海、菲律宾以东洋面到中南半岛、赤道东印度洋为东北风所控制。印度半岛及阿拉伯海、孟加拉湾一带盛行的冬季风虽然来源于亚洲南部印度、阿拉伯海及孟加拉湾,但并不是来源于印度半岛及其北部局地环流系统配置造成的,与 CT试验 925 hPa流场相比,赤道印度洋上空的由北向南越赤道气流到南半球副热带地区并不转向,而是汇入到南印度洋反气旋中。当只加入了亚洲地区西部及相应的南半球上空的大气冷(热)源时,北太平洋阿留申低压位置偏西偏

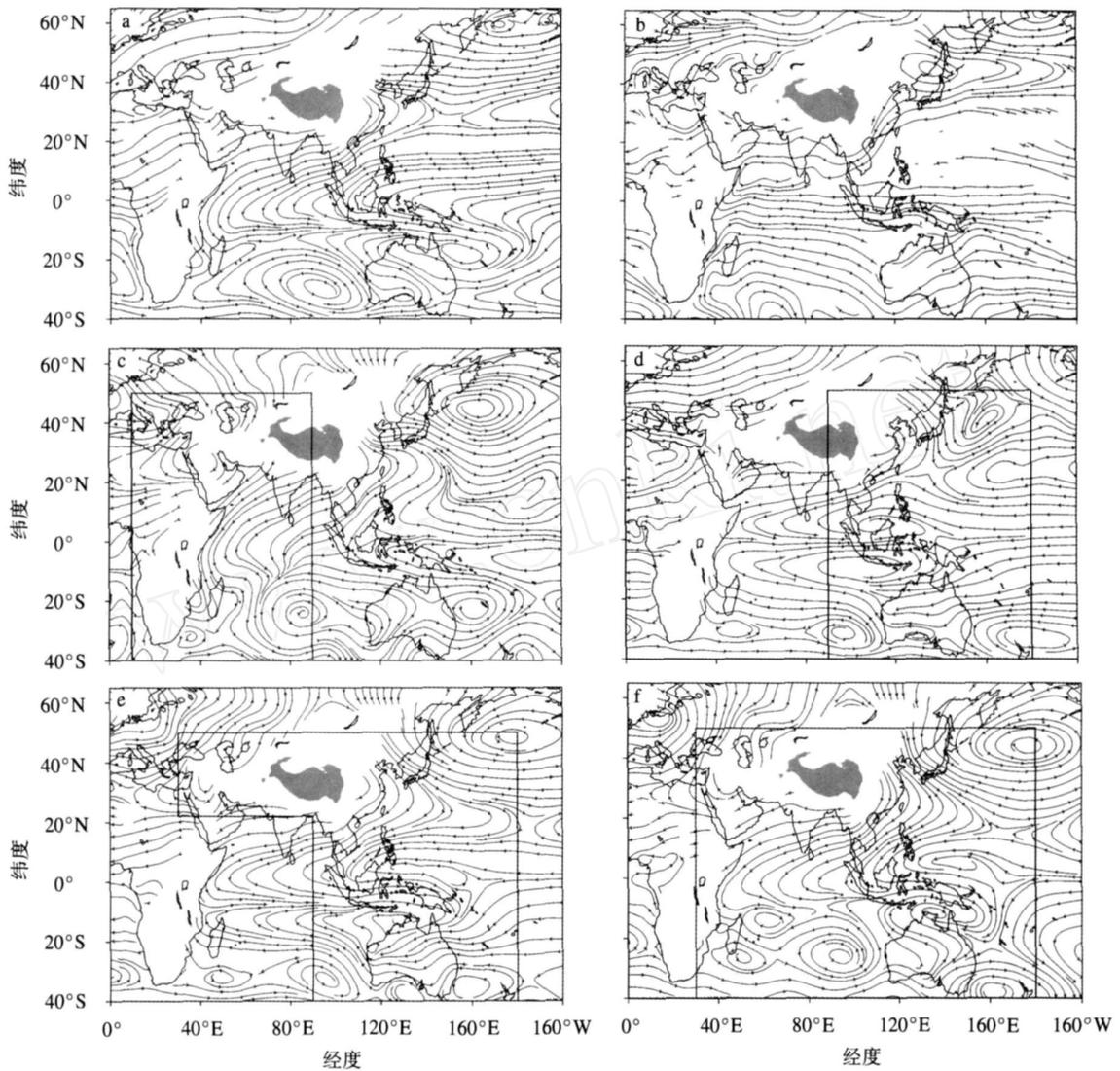


图 2 各敏感试验模拟的 925 hPa 流场 a CT; b Adiabatic; c WAQ; d EAAUSQ; e AAUSQ; f AQ

Fig 2 Simulated 925 hPa flow fields in control and sensitive experiments a CT; b Adiabatic experiment; c WAQ; d EAAUSQ; e AAUSQ; f AQ

南,西太平洋东北信风、澳大利亚北部的热低压系统都没有被模拟出来,从南印度洋到澳大利亚东部皆被强大的高压系统所控制。此外,南海的冬季东北季风只发生在南海北部,因而没有出现实测的自东北到南海赤道转向的东北季风,由此表明,只加 90°E 以西的大气冷(热)源可以激发出 90°E 以东的部分冬季风环流,整个东亚冬季风系统难于模拟出来。在 200 hPa 流场上(图 3c),120°E 以西,15~40°N 之间均为西风带所控制,由于西太平洋副热带高压位置偏北且强度偏强导致 120°E 以东北半球西风带北抬到 25°N 以北。50°N 以北受东风带控制,东、西风带之间存在四个气旋中心。南半球非洲大陆对流层上层有一个强大的高压系统,其强度超过

图 2c 所示的该地区的高压系统强度,且位置略偏东,此高压北部的东南风越过赤道到达 10°N 附近转向为西南风。澳大利亚北部反气旋北部偏东风并不能跨过赤道进入北半球,赤道印度洋和太平洋上空都由偏东风控制。

由此可见,单纯加入亚洲地区西部及相应的南半球上空的大气冷(热)源,不能模拟出完整的东亚冬季风环流系统,低空南半球澳大利亚热低压也无法成功模拟,西太平洋未出现东北信风,南海越赤道气流也未出现。所以对于东亚冬季风系统而言,还需要其他地区大气冷(热)源的加入。下面将讨论东亚地区及其对应的南半球大气冬季冷(热)源的作用。

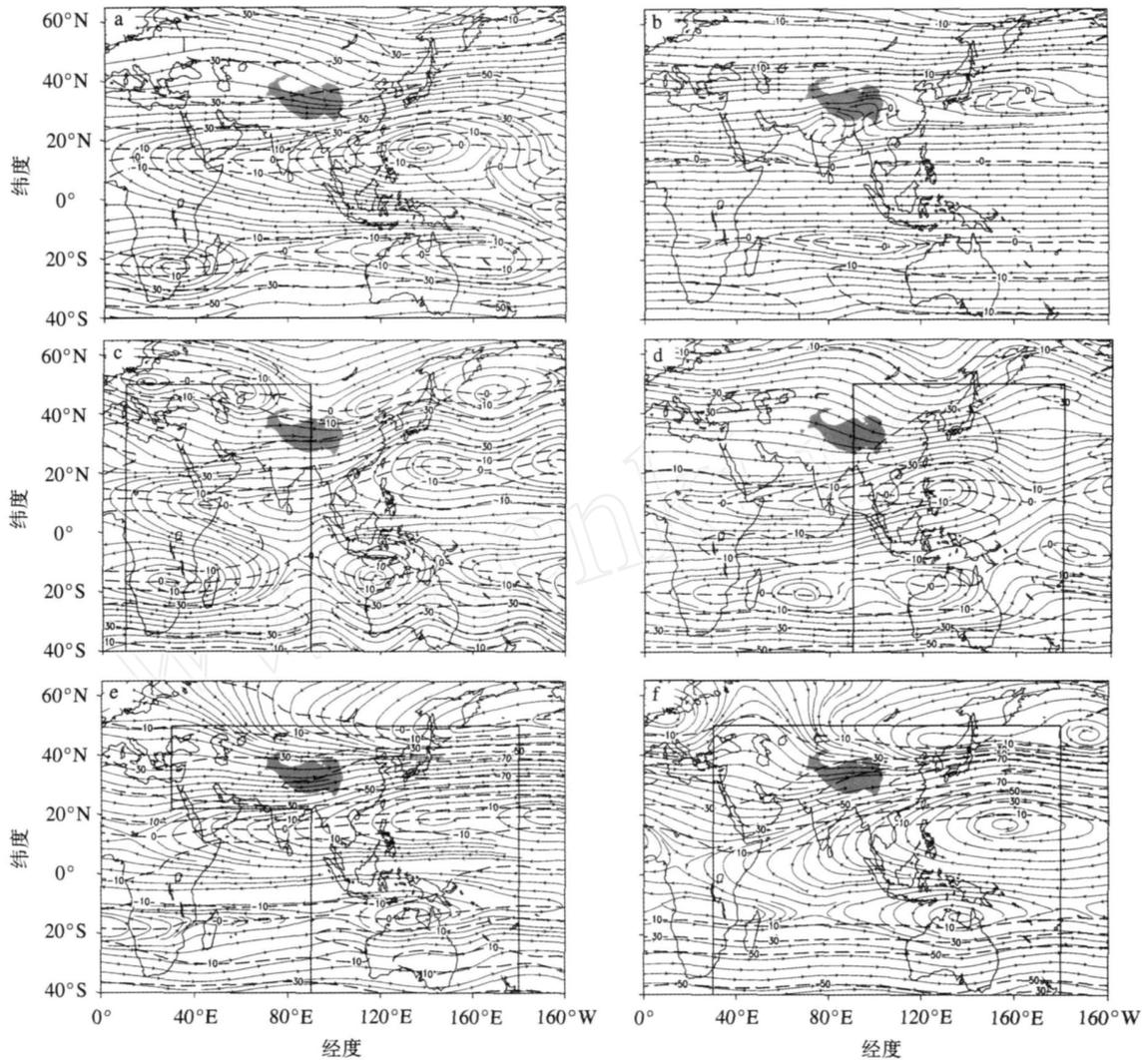


图 3 各敏感试验模拟的 200 hPa 流场 (长虚线为等风速线; 单位: m/s) a CT; b Adiabatic; c WAQ; d EAAUSQ; e AAUSQ; f AQ

Fig 3 Simulated 200 hPa flow fields in control and sensitive experiments (long dash is wind speed iso-line; units: m/s) a CT; b Adiabatic experiment; c WAQ; d EAAUSQ; e AAUSQ; f AQ

2.3 EAAUSQ 试验的流场分析

试验中,在 (40 ~ 50 N, 90 E ~ 180) 范围内加入大气冷 (热) 源,模拟结果表明,在 925 hPa 流场上 (图 2d),欧亚大陆上空被强大的高压系统所控制,我国东北、华北以及朝鲜、日本等地上空为西北风,西北气流在 30 N 附近转向为东北风,此东北气流经中南半岛、孟加拉湾、印度半岛和阿拉伯海向西传播并在 5 N 附近转向为西北风与来自南印度洋反气旋北侧延伸出的西南风汇合。EAAUSQ 试验中北太平洋出现低压系统,但位置偏西南,强度偏弱。虽然南海出现了东北风,但北风分量较弱,并未能在苏门答腊岛至加里曼丹间越过赤道形成越赤道气流,而是在南海南部出现一个气旋中心。虽然在澳大利

亚西北洋面出现低压系统,但低压中心位置远离澳大利亚大陆。就 200 hPa 高空流场 (图 3d) 而言,北半球 20 N 以北均为西风带控制,中纬度西风急流最强的中心位于日本西南洋面上空,较 CT 试验模拟的位置偏西,且最大风速较实测明显偏小。该试验中冬季副热带高压明显完整出现,但中心位置太偏西,副高向西南方向伸展,赤道地区基本为偏东风所控制。南半球从非洲大陆到澳大利亚上空出现一个高压带,在南印度洋和澳大利亚北部存在两个弱的高压中心。由于南半球反气旋系统强度很弱,而西太平洋冬季副热带高压中心位置偏西且向西南伸展,导致在 90 E 以东的地区,高层的跨赤道气流基本上是北风,而 90 E 以西地区赤道地区以东风

为主。

2.4 AAUSQ试验的流场分析

在 EAAUSQ 试验中,只考虑亚洲东部地区及相应南半球冬季大气冷(热)源对亚洲冬季风的影响,一些东亚和印度冬季风系统的特征未能模拟出来,探讨其原因发现,亚洲副热带西部的冷(热)源对东亚、印度冬季风形成十分重要。因而在 EAAUSQ 试验中加入了 30~90 E, 22~50 N 范围内的大气冷(热)源进行模拟(AAUSQ)。图 2e 中给出 1 月 AAUSQ 试验的 925 hPa 流场。由图 2e 可以看出,当加入亚洲西部大气冷(热)源之后,阿留申低压明显出现,但位置略微偏南;经我国东北、华北、朝鲜和日本等地的西北风转向形成的东北风经向分量明显增大,该东北风一部分在苏门答腊岛与加里曼丹岛之间越过赤道,另一部分经中南半岛继续向西传播,在 5 N 附近转为西北风后在赤道印度洋处跨过赤道;澳大利亚北部低压系统明显向东移动且强度有所增强,东亚地区冬季风模拟结果得到显著改善。由于该方案并没有添加印度洋上空的大气冷(热)源,AAUSQ 试验南印度洋低空流场形势与 EAAUSQ 试验较为相似,没有很好的模拟出如同 CT 试验 925

hPa(图 2a)的南印度洋强反气旋系统。从 200 hPa 流场(图 3e)上可以看出,20~50 N 的中纬度地区都被西风气流所控制,急流中心位于日本岛以东的整个洋面上,此急流中心的范围较实测要大很多。南半球非洲大陆南部和澳大利亚北部的高空反气旋较实测强度偏弱,其北侧赤道到南半球副热带地区都被赤道东风所控制。

为了说明亚洲副热带西部的大气冷(热)源重要性,图 4 给出了 AAUSQ 和 EAAUSQ 的模拟结果差值分布。图 4a 为 AAUSQ 试验模拟的 1 月 925 hPa 流场与 EAAUSQ 试验间的差值风场分布,由图 4a 可见,北半球出现强的差值气旋,即在我国东北、华北、朝鲜、日本以及日本东南洋面上出现强的差值西北风,而在我国江南、华南、南海到中南半岛存在强的差值东北风。这说明亚洲大陆西部副热带地区冬季的大气冷源可以增强东亚大陆上空冷高压的强度,致使阿留申低压增强、东亚大陆东部的东北冬季风增强。图 4c 给出了 1 月 200 hPa AAUSQ 试验与 EAAUSQ 试验间的差值风场,由图 4c 可见亚洲副热带西部的大气冷(热)源可以是 40 N 以南的北半球西风带强度增强,而使 40 N 以北的西风带强度

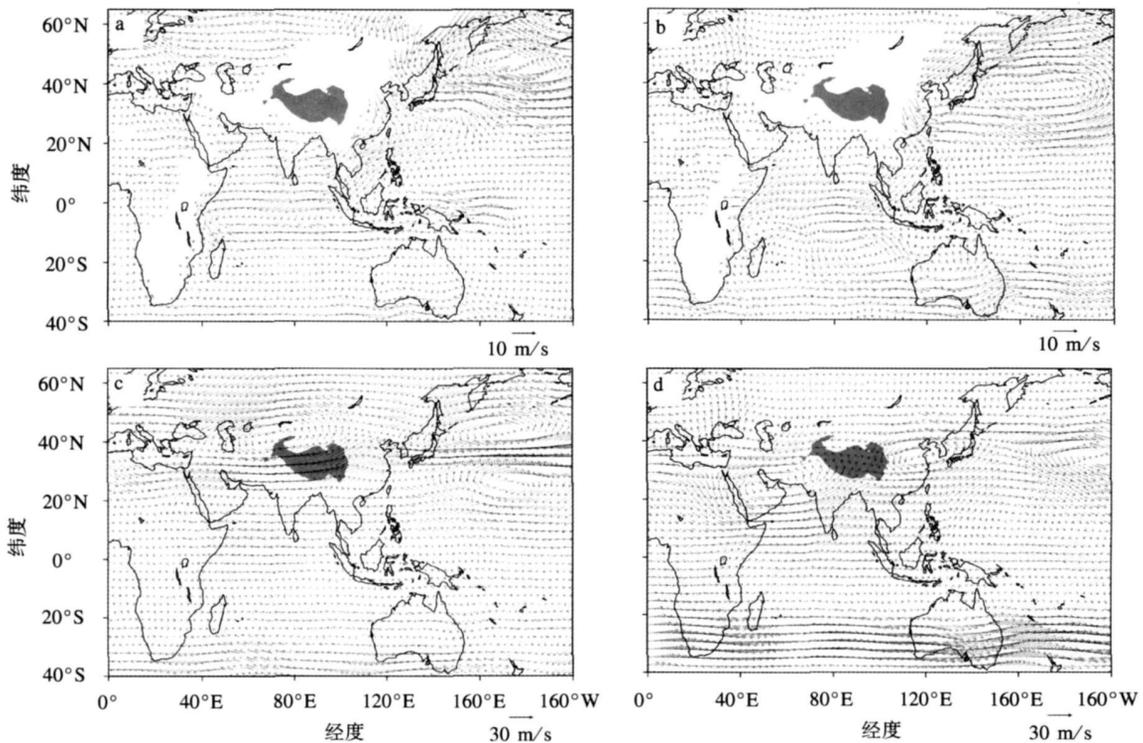


图 4 925 hPa(a, b)和 200 hPa(c, d)各敏感试验的差值流场 (m/s) a, c AAUSQ-EAAUSQ; b, d AQ-AAUSQ

Fig 4 Simulated flow field differences (m/s) for (a) 925 hPa AAUSQ-EAAUSQ, (b) 925 hPa AQ-AAUSQ, (c) 200 hPa AAUSQ-EAAUSQ, and (d) 200 hPa AQ-AAUSQ

减弱。

2.5 AQ 试验的流场分析

在方案 AAUSQ 的基础上,增加了印度洋的大气冷(热)源,与 AAUSQ 试验相比,可以发现 1 月 925 hPa 低空流场上(图 2f),来源于亚洲大陆高纬度地区的西北风经过我国的东北、华北、朝鲜和日本等地,然后在 30°N 附近转向为东北风经过我国江南、华南、东南沿海、中南半岛继续西传,此来源于东亚大陆冷高压系统的东北风在赤道印度洋及加里曼丹岛附近越过赤道转为偏西风。与 CT 试验相比,该试验中北太平洋的阿留申低压位置偏南,澳大利亚北部的热低压系统位置偏西。结合 200 hPa 高空流场(图 3f)可见,与试验 AAUSQ 相比,100°E 以西赤道高层存在自南半球向北半球的跨赤道经向风分量,它与西太平洋副热带高压共同作用使得从阿拉伯海、印度半岛、孟加拉湾、中南半岛直到我国华南地区均为西南气流所控制。

图 4b 为 AQ 试验模拟的 1 月 925 hPa 流场与 AAUSQ 试验间的差值流场分布,由图 4b 可以看到 22°N 以南阿拉伯海和印度洋上空大气热源的加入可以使南海上空的东北季风加强,孟加拉湾南部至阿拉伯海南部出现差值东风,80°E 以西的赤道印度洋低空由北向南的越赤道气流有所增强。此外,在南半球东印度洋出现了差值反气旋。图 4d 是 1 月 200 hPa AQ 试验与 AAUSQ 试验间的差值风场说明 22°N 以南阿拉伯海和印度洋上空大气热源的加入可以加强南支西风急流强度,但削弱北支西风急流强度。

3 结论

本文使用 NCAR CAM3.1 模式并利用 NCEP/NCAR (version 1) 再分析资料计算的全球各层大气非绝热加热率,设计了一系列数值试验以研究冬季 1 月亚洲及南半球各地大气冷(热)源对亚洲冬季风形成的影响。结果表明:

(1) 印度季风系统地区及该区北侧的副热带地区(40°S~50°N, 10°~90°E) 的大气冷(热)源可以激发出东亚大陆冷高压、欧亚大陆东部的阿留申低压、赤道印度洋的由北向南越赤道气流。但南半球澳大利亚北部的热低压以及西太平洋上空的东北信风都没有激发出来。在 200 hPa 高度上,激发的西太平洋副热带高压分裂出两个高压中心,实况北半球中高纬的西风带被压缩到 40°~60°N 之间,并且高纬度东风带与中纬度西风带中出现四个低压中心。这

表明,单纯 90°E 以西的大气热源并不能激发出完善的东亚冬季风系统各个环流要素。

(2) 东亚季风系统地区(40°S~50°N, 90°E~180°) 的大气冷(热)源同样也可以激发出东亚大陆上空冷高压,但其强度较弱,致使其东部阿留申低压强度弱、范围小,冷高压东侧转向的东北季风经中南半岛西传并没有在加里曼丹岛附近跨过赤道。与印度季风系统地区大气冷(热)源影响不同的是,东亚季风系统地区的热源可以使澳大利亚西北部出现热低压,但中心位置过于接近赤道且强度较弱。在 200 hPa 高度上,此区域的大气冷(热)源激发出的北半球对流层高层的环流形势更接近于实测。但单纯这个地区冷(热)源激发出来的东亚冬季风系统并不完全,只有加入亚洲大陆西部副热带地区大气冷源后,明显地纠正了单独由东亚季风系统地区大气冷(热)源模拟的阿留申低压中心位置及强度,也使东亚大陆冷高压东南部在南海上空气流的经向分量有所增强,同时也使澳大利亚西北部热低压的位置更接近与实测。因而亚洲副热带西部(22°~50°N, 30°~90°E) 地区的大气冷(热)源对东亚和印度冬季风系统的形成起了重要的作用。

(3) 与夏季大气冷(热)源对季风系统形成影响不同,冬季印度和东亚地区冷(热)源对印度和东亚冬季季风系统的环流形成似乎相互影响更多些。

参考文献:

- [1] 朱乾根, 谢立安. 1986—1987 年北半球冬季亚澳地区大气环流异常及其与西太平洋 SST 异常的联系 [J]. 热带气象, 1988, 4(3): 254-262.
- [2] 徐淑爱. 冬季风异常年份的环流特征及其与华南前汛期降水的关系 [J]. 热带气象, 1988, 4(3): 263-271.
- [3] 郭其蕴, 王日昇. 东亚冬季风活动与厄尔尼诺的关系 [J]. 地理学报, 1990, 45(1): 68-77.
- [4] 王建德, 唐东升. 东亚冬季风环流与大气加热场的联系 [J]. 气象科学, 1994, 14(2): 143-148.
- [5] 孙淑清, 孙柏民. 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系 [J]. 气象学报, 1995, 53(4): 440-450.
- [6] 陈隆勋. 东亚季风环流系统的结构及其中期变化 [J]. 海洋学报, 1984, 1(6): 744-758.
- [7] 丁一汇. 东亚冬季风的统计研究 [J]. 热带气象, 1990, 6(2): 119-128.
- [8] 葛玲, 唐小新, 章基嘉. 北半球冬季大气环流异常的水平垂直结构 [J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(3): 383-393.
- [9] 金祖辉, 孙淑清. 东亚大陆冬季风的低频振荡特征 [J]. 大气科学, 1996, 20(1): 101-111.
- [10] 施能. 近 40 年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系 [J]. 应用气象学报, 1996, 7(2): 175-182.

- [11] 王启,丁一汇. 东亚冬季风的演变特征 [J]. 应用气象学报, 1997, 8(2): 186-196.
- [12] 裴顺强,李崇银. 东亚冬季风及其影响的进一步研究. 东亚冬季风变化及异常的特征 [J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 124-136.
- [13] 陈海山,孙照渤,倪东鸿,等. 东亚冬季风对秋、冬季 SSTA 响应的数值实验 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 721-730.
- [14] 张庆云,王媛. 冬夏东亚季风环流对太平洋热状况的响应 [J]. 气候与环境研究, 2006, 11(4): 487-498.
- [15] 金启华,何金海,陈隆勋,等. 亚洲南部地区海陆分布和南半球陆地对亚洲夏季风影响的数值试验 [J]. 大气科学, 2006, 30(5): 1044-1053.
- [16] 陈隆勋,李维亮. 亚洲季风区各月的大气热源结构 [C]//全国热带夏季风学术会议文集. 昆明:云南人民出版社, 1982: 246-258.
- [17] Chen Longxun, Li Weiliang, He Jiahua. On the atmospheric heat source over Asia and its relationship with the formation of summer circulation [C]//Reiter E. Symposium on the mountain meteorology. Beijing: Science Press, 1982: 265-289.
- [18] Johnson D R, Yanai M, Schaack T K. Global and region distributions of atmospheric heat sources and sinks during the GWE [C]//Chang C P, Krishnamarti T N. Monsoon meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987: 271-297.
- [19] Luo M, Zhang K. Numerical experiment on the effects of the large scale topography and diabatic heating on the formation of east Asian monsoon and Indian monsoon circulation [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1991, 15: 41-52.
- [20] Yanai M, Tomita T. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis [J]. J Climate, 1998, 11(3): 463-481.
- [21] 陈隆勋,李薇,赵平. 青藏高原冬季热状况对赤道太平洋纬向风异常的影响 [J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(增刊): 320-326.
- [22] 黄荣辉,严邦良. 地形与热源强迫在亚洲夏季风形成与维护中的物理作用 [J]. 气象学报, 1987, 45(4): 394-407.
- [23] 骆美霞,张可苏. 大气热源和大地形对夏季印度季风和东亚季风环流形成作用的数值模拟 [J]. 大气科学, 1991, 15(2): 41-52.
- [24] 徐海明,何金海. 澳洲夏季风热源低频变化对北半球冬季风影响的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 1994, 17(1): 58-63.
- [25] 邬鸿勋,陈隆勋. 1956年1月到3月上旬亚洲上空大气环流的结构 [J]. 气象学报, 1956, 27(4): 361-381.
- [26] Yeh T C. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945-1946 [J]. Tellus, 1950, 2(3): 173-183.

(责任编辑:张福颖)