

伴随南海季风爆发区域尺度环流演变 机理的诊断分析和数值模拟*

张耀存¹, 周天军²

(1. 南京大学大气科学系, 南京, 210093; 2. 中国科学院
大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京, 100029)

摘要: 利用 1957—1998 年 NCEP/NCAR 候平均再分析资料, 分析伴随南海夏季风爆发中南半岛和南海地区环流系统的演变, 揭示该地区热力特征与南海夏季风爆发之间的可能联系. 结果发现, 不同高度上标志着南海季风爆发的环流系统如 500 hPa 上的副热带高压、200 hPa 上的南亚高压以及 850 hPa 上的孟加拉湾低槽等系统在南海季风爆发期间具有显著的变化特征, 对流层中高层以上的环流系统反映了大尺度环流的季节变化特征, 而对流层低层环流系统的变化可能与局地特征具有密切关系. 从中南半岛和南海两个地区地面感热和潜热加热与该地区温压场变化之间的关系上看, 中南半岛地区的热力作用对南海季风爆发期间区域环流系统演变具有重要作用, 数值试验结果进一步证实了这一点.

关键词: 中南半岛, 热力特征, 区域环流演变机理

中图分类号: P461

Diagnostic and Numerical Study of Evolutions of Regional Circulation System Associated with the South China Sea Monsoon Onset

Zhang Yuocun¹, Zhou Tianjun²

(1. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China;

2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China)

Abstract: The NCEP/NCAR reanalysis data from 1957—1998 are used to study the regional circulation evolutions associated with the South China Sea monsoon onset in the South China Sea and Indochina peninsula region and to reveal the connections between the thermal characteristics in this region and the South China Sea monsoon onset. It is found that the regional circulation systems, such as the subtropical high at 500 hPa, the South Asia high at 200 hPa, and the trough over the bay of Bengal at 850 hPa, change significantly during the

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(40175021), 中国科学院创新工程项目(KZCX2-108)
收稿日期: 2002-03-15

South China Sea monsoon onset. The evolution of circulation systems in the upper troposphere reflects the seasonal variation of large scale circulation and the change of lower level circulation system is related to the local thermal characteristics. The analyses of the sensible and latent heat on the ground associated with temperature and geopotential height fields show that the heating of the Indochina peninsula plays an important role in the evolution of regional circulation systems during the South China Sea monsoon onset, which is further verified by the numerical experimental results.

Key words: Indochina peninsula, thermal characteristics, regional circulation evolution

伴随着南海夏季风的爆发南海和中南半岛地区的高低层大气环流系统会发生一系列显著的季节变化,对此人们已进行了较多的研究,发现亚洲夏季风建立征兆最早出现在中南半岛和南海地区,随后自该地区分别向西、向东扩展^[1,2],对流层低层副热带高压脊从中南半岛和南海地区东撤到菲律宾以东的洋面上,对流层高层南亚高压从菲律宾以东移到中南半岛北部是南海季风爆发期间南海和中南半岛地区环流系统最显著的变化特征^[3-5].因此,南海和中南半岛附近地区环流系统的演变在南海季风活动过程中起着非常重要的作用,但其中的机理是什么,在大尺度热力对比的背景下,局地海-陆-气相互作用在触发南海季风爆发过程中所起的作用有多大,目前还不十分清楚,关于南海和中南半岛地区对流层高低层大气环流在南海季风爆发期间发生变化的原因和机理也有待于深入研究.

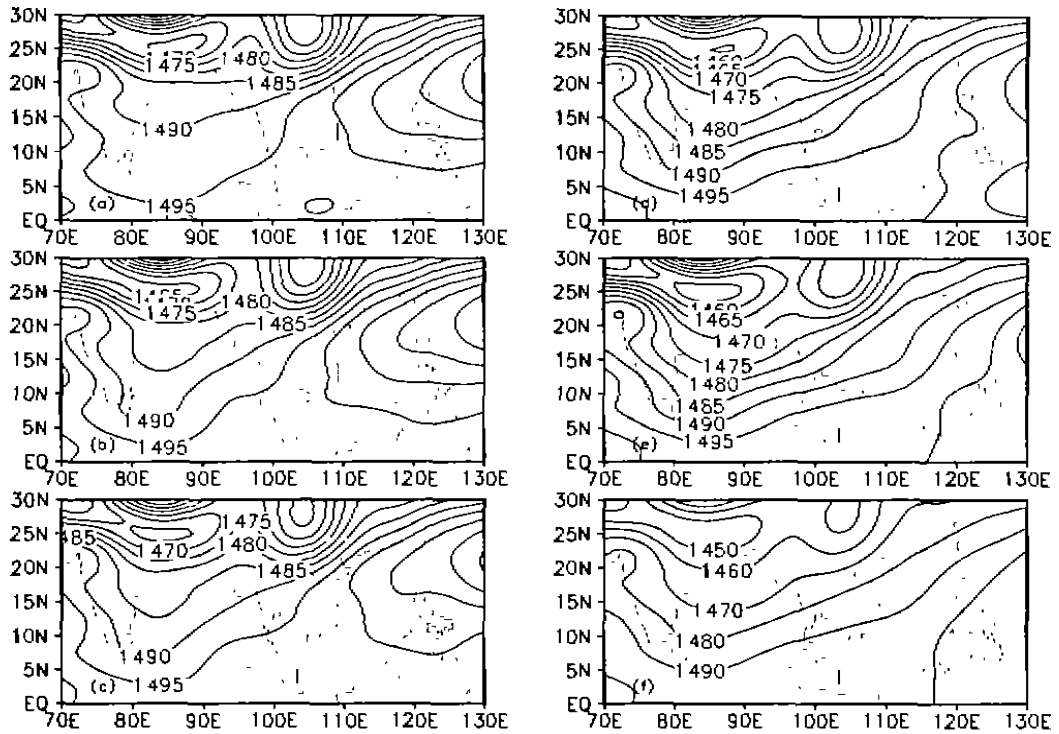
本文将通过资料的诊断分析和数值模拟研究伴随南海夏季风的爆发南海和中南半岛地区大气环流演变的原因和机理,着重分析该地区热状况的异常与区域环流系统变化之间的可能联系,为进一步揭示南海季风爆发机制提供线索和依据.

1 资料

本文所用资料为 1958 年 1 月—1997 年 12 月共 40 年的 NCEP/NCAR 再分析候平均数据资料集,该资料的水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,垂直方向 17 层,包括位势高度、温度、风速、比湿、地面感热和潜热通量等要素.本文的主要目的在于试图揭示南海和中南半岛地区热状况的异常与南海季风爆发期间区域环流系统演变之间的可能联系,由于诸多研究表明,南海季风爆发的气候平均日期为 5 月中旬或 5 月第 4 候即第 28 候,因此我们重点分析南海季风爆发期间(25~30 候)各要素场的变化特征及其相互之间的联系.

2 南海季风爆发期间的区域环流系统特征

关于南海季风爆发期间大尺度平均环流变化特征文献^[3,4]已进行了较详细的分析,但并没有与中南半岛和南海附近地区的热力特征相联系,本文结合中南半岛和南海附近地区的热力特征进一步分析南海季风爆发期间区域平均环流的变化特征.图 1 给出了南海季风爆发期间(25~30 候)850 hPa 位势高度的分布情况,从图中可以看到在南海季风爆发前的 25 和 26 候整个南海地区基本为西太平洋副高西侧高压脊所控制,印度东海岸的孟加拉湾地区为一低槽区,27 候西太平洋副高脊开始东撤,到 28 候副高脊已经完全撤出南海,孟加拉湾低槽明显加深,而且槽前西南走向的等高线扩展到南海地区,中南半岛地区的位势高度进一步降低,位势高度梯度加强,较强的位势高度梯度有利于西南风的加强,进而有利于触



(a)25 候;(b)26 候;(c)27 候;(d)28 候;(e)29 候;(f)30 候

图1 南海季风爆发期间 850 hPa 位势高度分布

Fig.1 The geopotential height at 850 hPa during the period of SCS monsoon onset

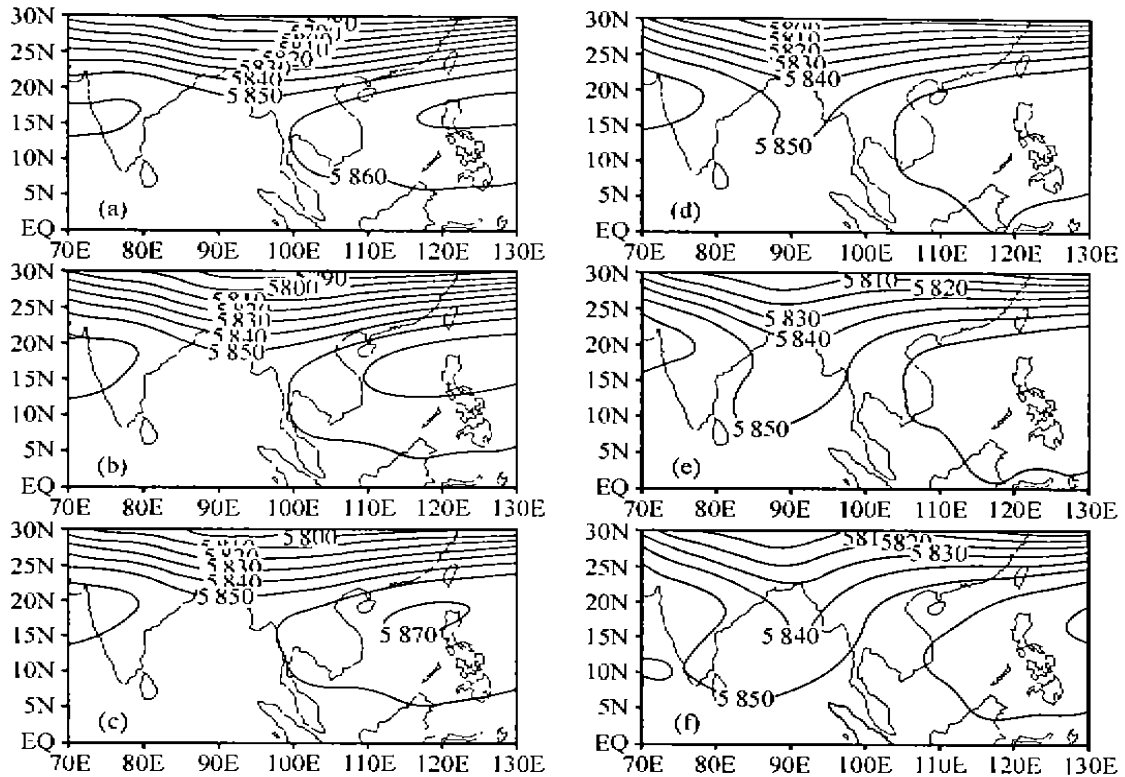
(a)-(f)Pentad 25-Pentad 30

发夏季风爆发和维持西南季风的强度.此后,该地区的环流形势基本维持这一状态,只是位势高度有进一步降低的趋势.

图2为南海季风爆发期间(25~30候)500 hPa位势高度的分布情况.分析发现,南海季风爆发前的25~27候副热带高压带在孟加拉湾地区断裂为两部分,中南半岛和南海地区为副高西侧高压脊所控制.南海季风爆发以后(28候~30候)西太平洋副高脊开始东撤,孟加拉湾低槽形成并逐渐加深,范围也逐渐扩大,中南半岛地区为槽前西南走向的等高线所控制.

图3给出了南海季风爆发期间(25~30候)200 hPa位势高度的分布图.分析发现,南海季风爆发前的26候南亚高压西侧的高压脊到达孟加拉湾、中南半岛和南海地区,27候南亚高压在中南半岛上空加强,28~30候南亚高压在中南半岛上空范围进一步扩大并加强北移.

从以上分析可以看到,在不同的高度上标志着南海季风爆发的环流系统如500 hPa上的副热带高压、200 hPa上的南亚高压以及850 hPa上的孟加拉湾低槽等系统在南海季风爆发期间具有显著的变化特征.从它们各自的演变情况来看,对流层中高层以上的环流系统反映了大尺度环流的季节变化特征,而对流层低层环流系统的变化可能与局地特征具有密切关系,这一点从各层温度的演变图上(图略)能够更加清楚地看到.



(a)25 候;(b)26 候;(c)27 候;(d)28 候;(e)29 候;(f)30 候

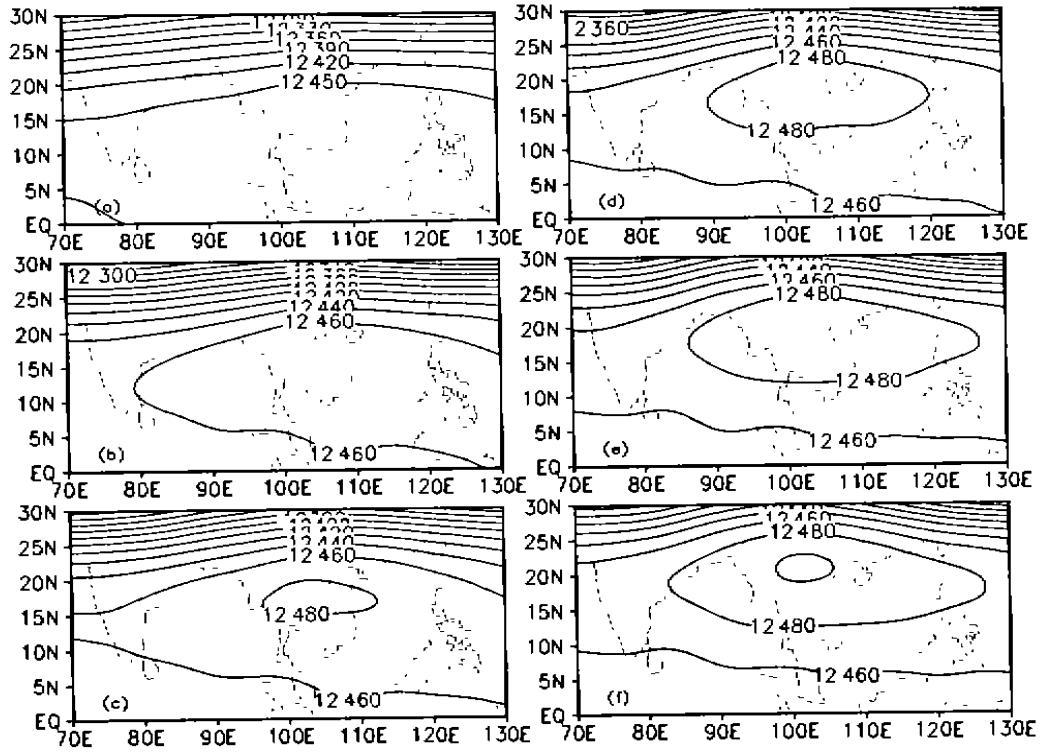
图 2 南海季风爆发期间 500 hPa 位势高度分布

Fig. 2 The geopotential height at 500 hPa during the period SCS monsoon onset

(a)-(f)Pentad 25-Pentad 30

3 地面热通量的变化特征及其与区域环流系统变化的联系

图 4 给出了 $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 平均感热通量和潜热通量的时间-经度演变图。从图 4a 可以看到, 在 $95^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 之间的中南半岛地区从第 6 候左右开始出现大于 60 Wm^{-2} 的地面感热通量, 并一直持续到 25 候即 5 月初, 同时较大的感热加热区随着时间推移逐渐偏向西北方向, 并且范围缩小, 仅出现在 $95^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 之间的中南半岛西北部地区。到了 5 月下旬以后中南半岛地区的感热通量迅速变小, 这与南海季风的爆发可能有着密切的关系, 因为伴随着南海夏季风的爆发这一地区云量和降水增多, 到达地面的太阳辐射减少, 地表温度降低, 使得地面感热通量减少, 印度半岛地区的感热通量在 6 月中旬以前一直维持在比较大的数值上, 最大的地面感热加热出现在 15~25 候之间, 此后感热通量逐渐减小。而从地面潜热通量的时间-经度演变图 (图 4b) 可以明显看到, 在南海夏季风爆发前中南半岛地区为地面潜热通量的相对低值区, 季风爆发后地面潜热通量明显增加, 印度半岛地区潜热通量的演变情况与中南半岛地区类似, 印度季风爆发之前潜热通量较小, 季风爆发之后潜热通量显著增加。因此, 从中南半岛和印度半岛地区地面感热加热和潜热加热的时间演变来看, 在夏季风的酝酿和爆发过程中, 陆地的感热加



(a)25 候;(b)26 候;(c)27 候;(d)28 候;(e)29 候;(f)30 候

图 3 南海季风爆发期间 200 hPa 位势高度分布

Fig.3 The geopotential height at 200 hPa during the period of SCS monsoon onset

(a)-(f)Pentad 25-Pentad 30

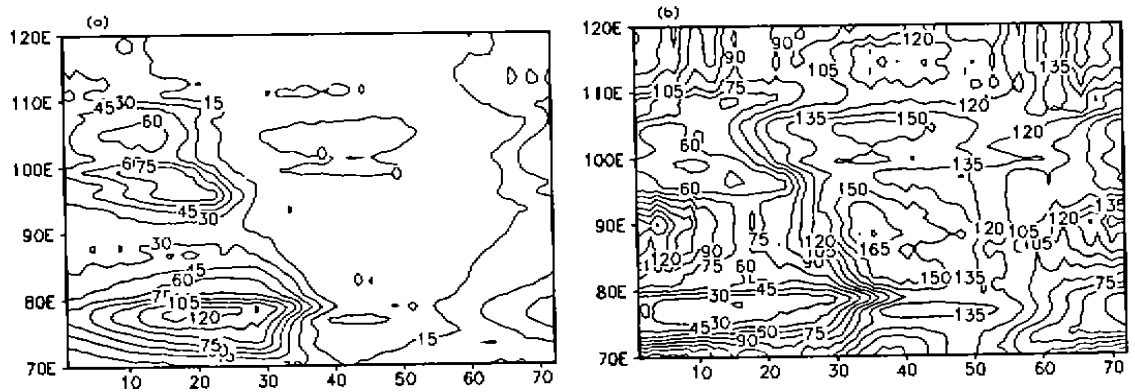


图 4 10°N~25°N 平均感热通量(a)和潜热通量(b)的时间-经度演变图

Fig.4 The latitude-time sections of sensible(a) and latent heat flux(b) averaged from 10°N to 25°N

热具有触发作用,而潜热加热增加可能是季风爆发的伴随现象.

图 5 为 $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 平均的 850 hPa 高度上温度和位势高度相对于 $70^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 平均值偏差的经度-时间演变图.分析图 5a 发现,在 26 候以前中南半岛、印度半岛和孟加拉湾地区均为同纬度带上的高温区,此后中南半岛地区变为负偏差,印度半岛地区仍为正偏差并逐渐增强.由此可见,中南半岛地区纬圈温度偏差转变的时间与多年平均的南海季风爆发日期(5 月中旬)基本一致.分析位势高度纬圈偏差的时间演变(图 5b)发现,26 候以前位势高度低值区位于孟加拉湾到中南半岛的西部地区,随着时间的推移具有从西向东移动或扩展的趋势.26 候以后负纬圈偏差区移到孟加拉湾西侧和印度半岛地区,并得到加强.结合这一地区地面感热加热变化的分析发现,中南半岛和印度半岛地区感热加热与温度偏差的变化具有非常好的对应关系,感热加热较强时,对应较强的正温度偏差和负位势高度偏差.由此可以推断,南海季风爆发期间南海和中南半岛地区环流系统的演变与这一地区的地面感热加热有着密切关系.

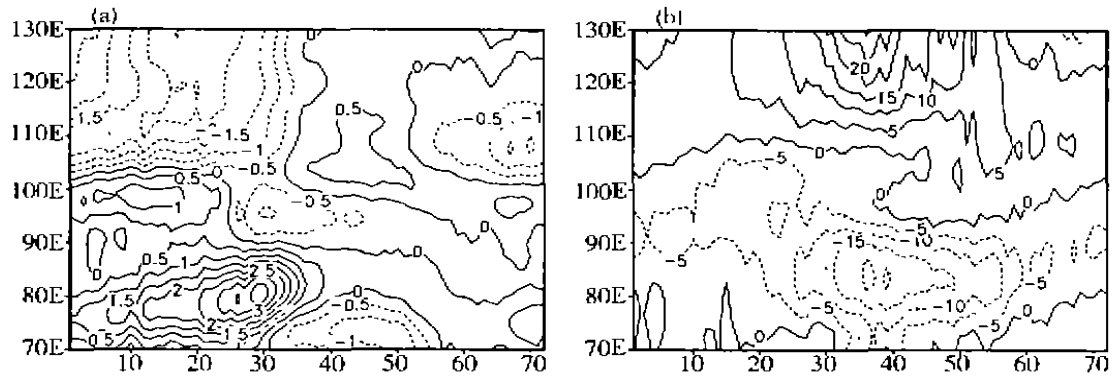


图 5 $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 平均的 850 hPa 高度上的温度(a)和位势高度(b)相对于 $70^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 平均值偏差的经度-时间演变图

Fig.5 The longitude-time sections of temperature(a) and geopotential height (b) deviations averaged from 10°N to 25°N along $70^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$

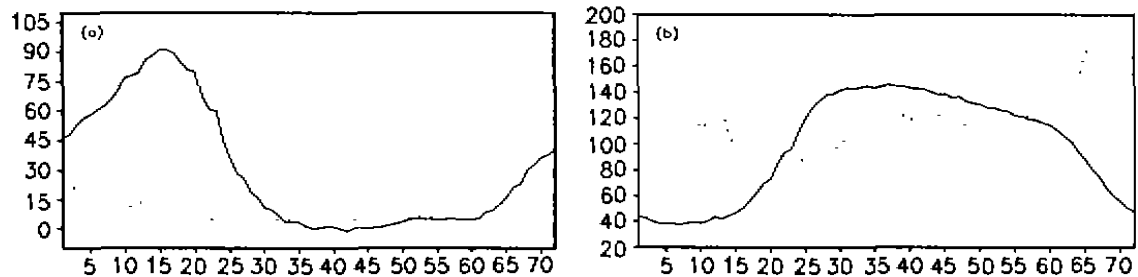
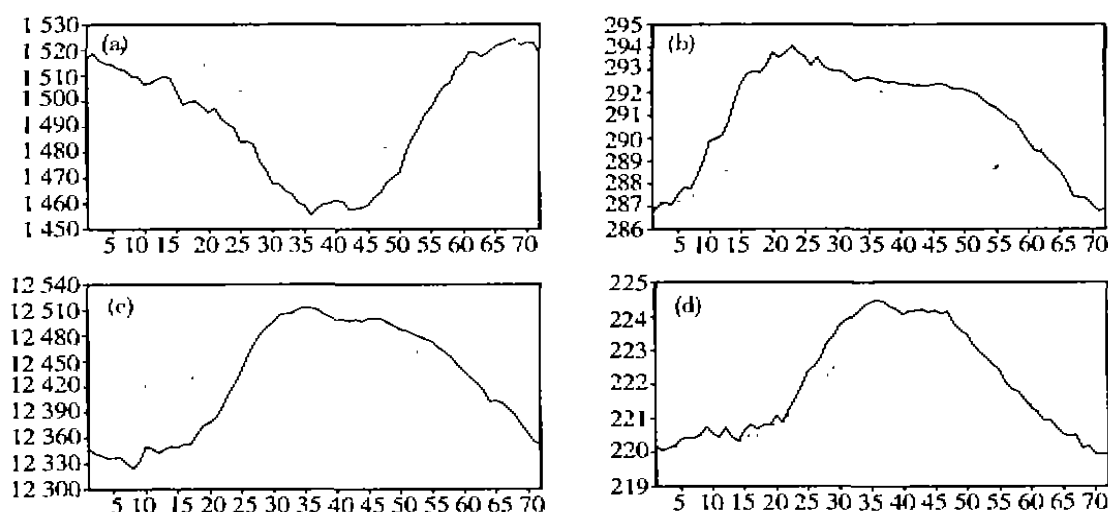


图 6 中南半岛($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$)和南海(实线—中南半岛,点线—南海) ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)地区感热通量(a)的潜热通量(b)的时间演变图

Fig.6 The variations of sensible(a) and latent heat flux(b) averaged over the Indo-China peninsula ($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$) and the South China Sea region($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) (Solid line: Indo-China Peninsula, dot line: South China Sea)

图 6 给出了中南半岛($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$)和南海($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)地区感热通量和潜热通量的时间演变,从图中可以看到,中南半岛地区感热通量具有明显的季节变化,季风爆发前感热加热较强,季风爆发后加热较弱.而南海地区的感热通量季节变化并不明显,季风爆发前后变化幅度非常小.潜热通量在中南半岛和南海两个地区都表现出明显的季节变化,季风爆发前中南半岛地区潜热通量较小,季风爆发后潜热通量增大,而南海地区季风爆发前潜热通量较大,季风爆发后减小.进一步分析与中南半岛和南海两个地区地面感热和潜热加热演变相对应的该地区温压场的变化(图 7a~d)发现,对流层低层 850 hPa 位势高度季风爆发前逐渐降低,温度逐渐增加,对流层高层 200 hPa 位势高度季风爆发前逐渐升高,温度也逐渐增加,中南半岛地区温度和位势高度的变化幅度均明显大于南海地区.从中南半岛和南海两个地区的区域平均位势高度的变化中仍可清楚地看到季风爆发期间对流层低层副热带高压东撤、对流层高层南亚高压西进等区域环流系统的演变.与图 6 进行对比发现,对流层低层温度变化与地面感热和潜热加热具有较好的一致性.因此从中南半岛和南海两个地区地面感热和潜热加热与该地区温压场变化之间的联系上,进一步说明了中南半岛和南海地区的热力作用对南海季风爆发期间区域环流系统演变的重要作用.



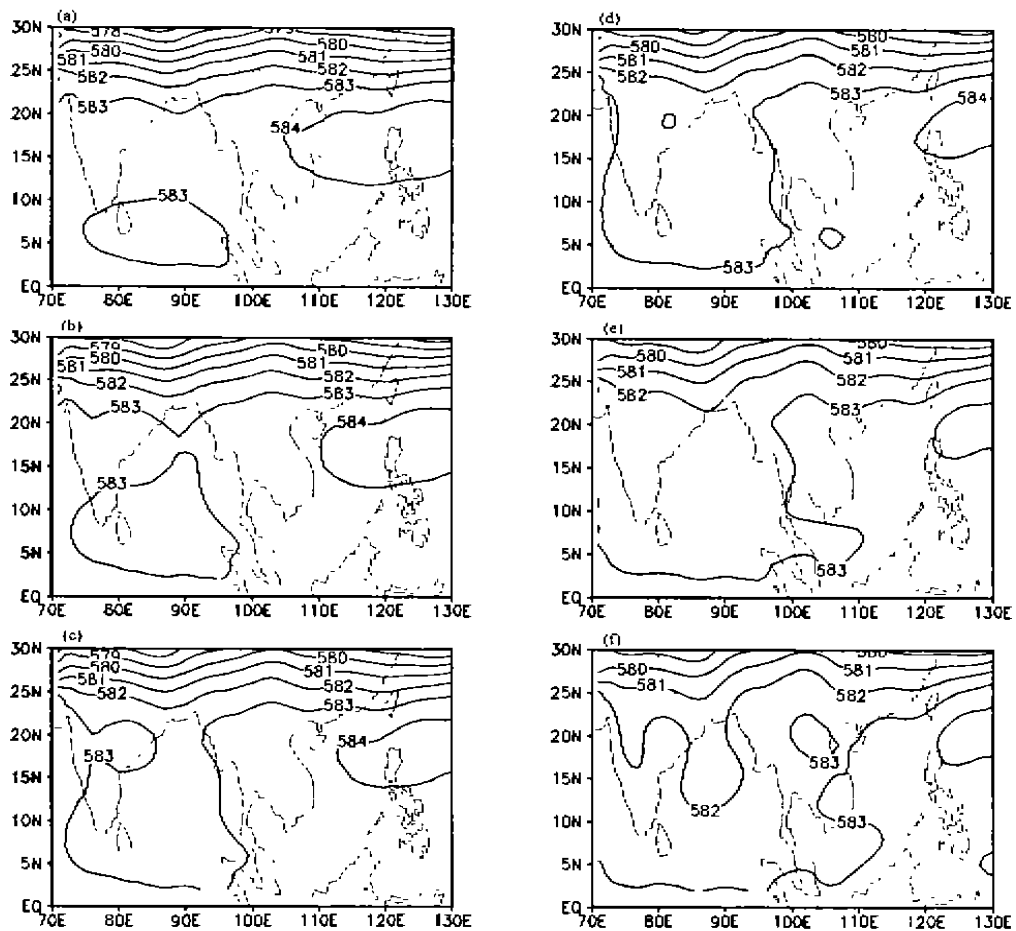
(a)850 hPa 位势高度;(b)850 hPa 温度;(c)200 hPa 位势高度;(d)200 hPa 温度
图 7 中南半岛($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$)和南海($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$)地区位势高度和温度时间演变图(实线—中南半岛,点线—南海)

Fig.7 The variations of geopotential height and temperature averaged over the Indo-China peninsula ($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 105^{\circ}\text{E}$) and the South China Sea region($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) (Solid line: Indo-China Peninsula, dot line: South China Sea)
(a)geopotential height at 850 hPa (b)temperature at 850 hPa
(c)geopotential height at 200 hPa (d)temperature at 200 hPa

4 中南半岛热力作用的数值试验

为进一步揭示中南半岛在南海季风爆发期间区域环流系统演变中的作用,下面将利用数值模式进行虚拟试验.所用的区域气候模式最早由钱永甫等人设计^[6],经数 10 年的发展

和完善而形成^[7-9]. 模式区域为 75°E~145°E, 5°S~45°N, 包括了青藏高原主体、孟加拉湾、中国邻海以及西太平洋部分海域, 模式使用真实地形, 青藏高原最高处达 5 000 m 以上. 模式水平格距为 1°×1°, 时间积分方案采用 1 h 欧拉后差和 5 h 中央差交替进行, 时间步长为 3 min. 初始场和侧边界强迫由 NCEP 再分析资料中 1979—1995 年 17 年平均的月平均场提供. 逐月表层海温由多年平均的表层海温资料提供. 模式积分从 1 月 15 日 20 时(北京时)开始, 至 8 月 31 日结束, 这一模拟试验称为控制试验. 另一个试验是将中南半岛范围内的陆地变为“海洋”, 这一块“海洋”的海温用同时段内南海和孟加拉湾海区的平均海温插值得到, 其余均与控制试验相同, 该试验称为虚拟试验. 图 8 和图 9 给出了控制试验和虚拟试验模拟得到的南海季风爆发期间(25~30 候)500 hPa 位势高度分布, 对比两图可以看到, 控制试验中得到的副热带高压在季风爆发期间的演变与实际情况非常相似, 25 候时副高脊位于中南半岛东部和南海地区, 此后逐渐东撤, 到 28 候副高基本撤出南海地区. 而在虚拟试验中副热带

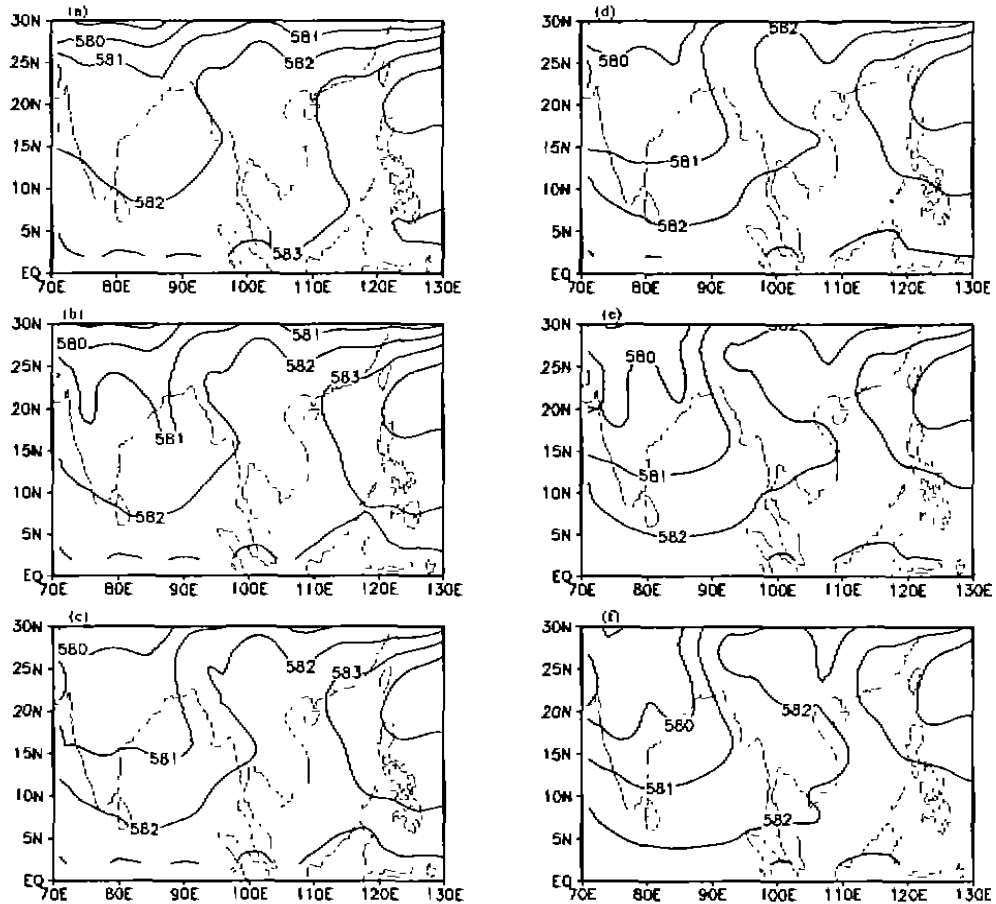


(a)25 候;(b)26 候;(c)27 候;(d)28 候;(e)29 候;(f)30 候

图 8 控制试验模拟的南海季风爆发期间 500 hPa 位势高度分布

Fig.8 The simulated geopotential height at 500 hPa during the period of SCS monsoon onset in the control experiment (a)-(f)Pentad 25-Pentad 30

高压在季风爆发期间位置变化较小,基本上稳定在菲律宾和台湾以东地区,并没有出现副高东撤的现象.分析高层100 hPa南亚高压的变化(图略)发现,控制试验中南亚高压在25候时到达南海和中南半岛地区,然后强度逐渐加强,范围逐渐扩大,南亚高压在季风爆发期间的演变与实际情况非常相似.而虚拟试验中南亚高压在季风爆发期间并未出现在南海和中南半岛地区.因此从数值试验的分析中也可以看到,中南半岛的热力作用在南海季风爆发期间区域环流系统的演变过程中具有重要作用,进一步支持了观测资料分析中发现的现象.



(a)25候;(b)26候;(c)27候;(d)28候;(e)29候;(f)30候

图9 虚拟试验模拟的南海季风爆发期间500 hPa位势高度分布

Fig.9 The simulated geopotential height at 500 hPa during the period of SCS monsoon onset in the hypothetical experiment (a)-(f)Pentad 25-Pentad 30

5 结论和讨论

通过本文以上的分析,我们可以得到以下结论:

(1)对流层低层副热带高压脊从中南半岛和南海地区东撤到菲律宾以东的洋面上,对流层高层南亚高压从菲律宾以东移到中南半岛北部是南海季风爆发期间南海和中南半岛地区

环流系统最显著的变化特征. 对流层中高层以上的环流系统反映了大尺度环流的季节变化特征, 而对流层低层环流系统的变化可能与局地特征具有密切关系. 从中南半岛和南海两个地区地面感热和潜热加热与该地区温压场变化之间的关系上看, 中南半岛地区的热力作用对南海季风爆发期间区域环流系统演变具有重要作用.

(2) 中南半岛热力作用的数值试验结果表明, 不同高度上标志着南海季风爆发的环流系统在控制试验中的演变与实际非常相似, 而在虚拟试验中对流层低层副热带高压脊从中南半岛和南海地区东撤到菲律宾以东的洋面上、对流层高层南亚高压从菲律宾以东到达中南半岛地区上空等环流特征都不能模拟出来. 因此数值试验结果证实了中南半岛的热力作用在南海季风爆发期间区域环流系统的演变过程中具有重要作用, 也进一步支持了观测资料分析中发现的现象.

本文重点分析了伴随南海季风爆发中南半岛和南海附近地区热力状况异常在区域环流系统变化过程中的作用. 实际上南海季风区的环流演变可能是在大尺度环流背景下局地海-陆-气相互作用的结果, 许多研究表明, 南海季风爆发具有突变特征, 当海陆热力差异及南北半球气压梯度渐变到其临界值时, 外界的微小扰动即可促使季风爆发. 一般认为, 南亚地区的感热加热扰动、孟加拉湾的局地气旋扰动、副热带环流系统的异常进退都可起到触发作用, 其中感热加热作用具有较普遍的气候学意义, 后两个因素随年份不同而异, 具有天气学意义, 由于本文所使用的资料为多年平均的气候资料, 不宜分析季节内的影响因子, 因而有关南海季风区天气尺度扰动与加热场气候背景态之间相互作用特征及其在南海季风爆发过程中的作用有待于进一步深入研究.

References

- [1] He Jinhai, Zhu Qiangen, M Murakami. T_{BB} Data-revealed features of Asian-Australian monsoon seasonal transition and Asian summer monsoon establishment. *J Trop Meteor*, 1996, 12; 34~42.
- [2] He Jinhai, Luo Jingjia. A study on the mechanism and characteristics of SCS monsoon and Asian summer monsoon onset. He Jinhai: *New progresses in the Asian monsoon study*. Beijing: The Meteor Press, 1996, 74~81.
- [3] He Jinhai, Xu Haiming, Zhou Bing, *et al.* Large scale features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism. *Clim Envir Res*, 2000, 5; 333~344.
- [4] Li Chongyin, Qu Xin. Large scale atmospheric circulation evolutions associated with summer monsoon onset in the south China Sea. *Chinese J Atmos Sci*, 2000, 24; 1~14.
- [5] Shao Hui, Qian Yongfu. Main feature of regional circulation variation during onset of the South China Sea monsoon in 1998. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17; 322~338.
- [6] Qian Yongfu, Yan Hong, Luo Qiren, *et al.* A Primitive equation numerical model with topography. *Chinese J. Atmos Sci*, 1978, 29; 91~102.
- [7] Kuo H L, Qian Yongfu. Influence of the Tibetau Plateau on cumulative and diurnal change of weather and climate in summer. *Mon Weath Rev*, 1981, 109; 2 337~2 356.
- [8] Liu Huaqiang, Qian Yongfu. Numerical simulation of monthly mean field in summer and winter by a limited model with P- σ incorporated coordinate. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 1999, 35; 337~345.
- [9] Zhang Qiong, Qian Yongfu. Effects of boundary layer parameterization on the monthly mean simulation. *Acta Meteor Sin*, 1999, 1; 73~85.