

# 用自由模对 1998 年夏季阻塞形势的诊断分析\*

张恒德

(南京气象学院大气科学系, 南京, 210044; 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

陆维松 陶 丽

高守亭

(南京气象学院大气科学系, 南京, 210044)

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

张友姝

(空军气象中心, 北京, 100083)

## 摘 要

鉴于大气自由模和阻塞高压的重要性, 首先简要介绍阻塞高压与中国夏季降水的关系及 1998 年夏季 500 hPa 异常环流场; 然后利用 21 波菱形截断的谱方法求出无粘性、无强迫正压涡度方程的自由解, 即和实际大气环流十分接近的大气自由模, 并讨论其特征; 最后利用大气自由模的特征诊断分析了实际大气的环流特征, 并重点用其分析了 1998 年夏季的大气环流异常形势。结果表明大气自由模能很好地反映大气环流大尺度特征, 而略去了中、小尺度涡旋; 大气自由模的流场和绝对涡度场之间的散点图反映了  $(q, \Psi)$  的函数关系是分段线性或非线性的, 尽管实际流场与绝对涡度场之间的点阵图反映两者之间成不同斜率的线性函数关系, 但点阵比较发散, 不能突出某些重要系统; 1998 年夏季实际大气自由模态突出了大气环流的重要特征, 例如, 越赤道气流、西风急流、副热带高压、阻塞高压及两极的边界效应等; 通过自由模态的特征可以识别出纬向流及阻塞高压的持续异常, 利用自由模的稳定性判断阻塞高压的稳定性, 不稳定模态可以维持一段较长的时间, 且由于这些不稳定的模存在, 才使 1998 年 6 月中旬到下旬的中高纬阻塞高压稳定维持。

关键词: 阻塞高压, 自由模, 诊断分析, 环流异常。

## 1 引 言

自由模是无粘性、无强迫大气控制方程的自由解, 人们所熟悉的 Rossby-Haurwitz 波、孤立波、偶极子都属于自由模态。McWilliams<sup>[1]</sup> 研究了 1963 年 1 月东北大西洋和欧洲的一次阻塞异常现象, 提出了 Modons(偶极子) 理论; Marshall 等<sup>[2]</sup> 利用自由模的概念在准地转理论下讨论了行星波的热力平衡问题; 陆维松<sup>[3]</sup> 使用变分方法, 首次求得近定常有限振幅准确解, 即新的斜压自由解, 并提出“不相容原理”, 即正压定常行星波和斜压定常行星波数不能相等; Pierrehumbert 等<sup>[4]</sup> 研究了无粘性无强迫系统的定常解(即自由模态), 指出自由模态的存在可以导致大振幅有闭合环流线的径向流和纬向流两类平衡态, 并且讨论了阻塞现象的周期特征和共振性;

Branstator 等<sup>[5]</sup> 为了寻找定常自由解, 提出了一个新的泛函, 用变分法求出使泛函达到极小值且最接近初始场的流场, 那么, 此流场即为一个自由模, 并指出对于任何初始条件, 非线性正压大气在弱强迫耗散作用下, 大气可由一种自由模态转向另一种自由模态; Anderson<sup>[6]</sup> 求出无强迫正压涡度的自由解, 并讨论了冬季大气环流持续异常, 其中包括阻塞现象和急流现象; Wu<sup>[7]</sup> 发现自由模态虽然是全球性的, 但以自由模态作为强迫项所激发出的多平衡态是局地性的。因此, 自由模态的存在可以激发出多平衡态, 另外, 利用自由模态的概念和特征可以将多平衡态的全局性和局地性结合起来进行研究。

关于中国夏季降水与 ENSO 及季风的的关系很多学者已做了大量研究, 而阻塞高压等大气环流异常现象也是造成中国夏季降水异常的重要原因, 张

\* 初稿时间: 2003 年 8 月 11 日; 修改稿时间: 2003 年 10 月 13 日。

资助课题: 国家自然科学基金委(40275016, 40035010) 和中国科学院海外杰出学者基金(2002-1-2)。

培忠等<sup>[8]</sup>指出阻塞高压活动对中国降水有很大影响,高守亭等<sup>[9]</sup>从天气、气候学的角度提出了对阻塞高压流型形成及维持的分析和看法。对阻塞高压和副热带高压持续性异常的物理机制的研究大体上可以分为两类:一类用高原和海洋等大地形的外源强迫作用来解释;另一类是用孤立波、偶极子、多平衡态等理论从大气内在动力学原因来解释大气环流持续性异常的形成和维持。孤立波、偶极子本身就是自由模态,平衡态是强迫耗散系统的定常解,而自由模的存在可以导致大振幅的两类平衡态。

罗德海等<sup>[10]</sup>利用日本气象厅发布的北半球 5 d 平均的 500 hPa 位势高度图,对 1969~ 1984 年北半球所产生的偶极子阻塞进行了统计研究。Verkley<sup>[11]</sup>通过求解球面正压涡度方程模拟出西风气流中定常的正压偶极子且分析了偶极子的线性不稳定;Verkley<sup>[12]</sup>于 1990 年再次求出旋转球面上正压涡度方程的偶极子解并通过其分析阻塞高压。Nils 等<sup>[13]</sup>将准地转自由模理论用于诊断 1989 年 2 月东北太平洋的一次阻塞过程。因此,用自由模及其特征去研究大气环流异常尤其是诊断分析阻塞高压是实际可行的。

通过以上论述,可以利用自由模理论进一步理解高低指数平衡态间的转换及大气低频振荡和遥相关发生的机制,从而可以对副热带高压、西风急流及阻塞高压等异常大气环流现象进行诊断分析。本文

将针对引起 1998 年夏季异常降水的环流场,尤其对异常的阻塞形势将用大气自由模理论进行诊断分析。

本文所用资料分别为 NCEP/NCAR 的 1998 年 5 月 1 日~ 8 月 31 日全球日平均、1951~ 2000 年夏季(6, 7, 8 月)月平均再分析场格点资料及中国气象局整理编制的 1951~ 2000 年夏季全国 160 个站逐月降水资料。

研究表明<sup>[8, 14, 15]</sup>,中纬度阻塞形势特别是东亚阻塞高压的持续维持和发展是影响中国的重要原因之一。由于鄂霍次克海、贝加尔湖、乌拉尔山这 3 个地区是阻塞发生频率较高的区域,且这 3 个地方夏季有无阻塞高压建立和维持对中国夏季降水及早涝影响较大(我们分别用 1951~ 2000 年 50 a 此 3 个关键区阻高指数与同期全国 160 个站的降水的相关性分布再次验证了阻塞高压对中国夏季降水的影响,本文不再赘述)。在 1998 年夏季日平均位势高度沿 50~ 60°N 平均的经度-时间剖面图上(图 1)可以反映出整个夏季中纬度阻塞高压的演变和发展情况,在亚洲中高纬度的乌拉尔山、贝加尔湖西侧和鄂霍次克海 3 个地区多次出现阻塞高压形势,尤其是鄂霍次克海阻高稳定少动,亚洲西风带经向环流占绝对优势,促使西伯利亚的冷空气频繁南下影响中国,这是长江流域持续多雨的冷空气条件,从 6 月中旬到下旬,维持稳定的双阻型,即鄂霍次克海区及乌

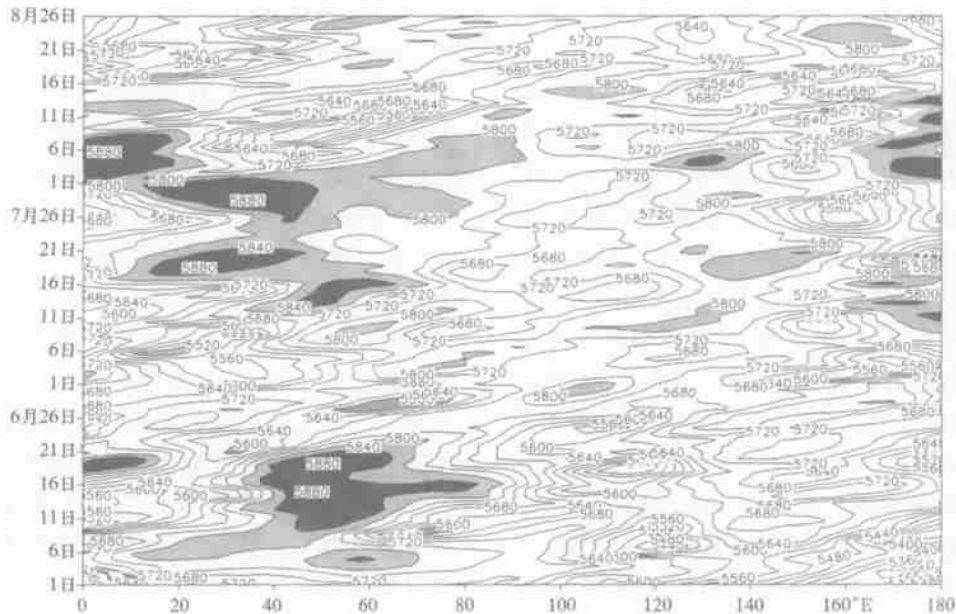


图 1 1998 年夏季 500 hPa 位势高度沿 50~ 60°N 平均的经度-时间剖面(等值线间隔: 40 gpm)

Fig. 1 Longitude-time section of 500 hPa geopotential height along the average of

50- 60°N for 1998 summer (Contour interval is 40 gpm)

拉尔山地区分别存在阻塞高压, 在高压之间为宽广的低压槽, 这种两脊一槽型中高纬环流非常有利于冷空气活动, 而且乌拉尔山阻高压于鄂霍次克海阻塞高压; 到了 6 月下旬至 7 月初, 西部阻塞高压逐渐衰弱减退, 中部的贝加尔湖阻塞形势发展, 亚洲中高纬地区转为两槽一脊的环流型; 7 月中旬到 8 月初, 西部的乌拉尔山阻塞高压重新建立发展, 由于鄂霍次克海区位优势高度与乌拉尔山地区优势高度距平的遥相关, 在鄂霍次克海地区也重新建立起阻塞高压, 两者之间为一低压槽, 亚洲中高纬地区又形成两脊一槽型环流; 而这 3 次阻塞高压的持续异常均伴随着 3 次强降水过程。为了更好地分析阻塞高压等环流异常引入自由模概念。

## 2 大气自由模的求解及其特征

自由模即无粘性、无强迫大气控制方程的自由解, 要利用其理论来分析副热带高压、阻塞高压等大气环流特征, 首先需求出大气自由模。准定常水平无辐散、无粘性、无强迫大气运动正压涡度方程可写为雅可比算子形式

$$J(\Psi, \nabla^2 \Psi + f) = 0 \quad (1)$$

大气定常自由解必须满足上面的大气控制方程, 将此方程无量纲化后, 方程形式不变, 只不过式中均为无量纲量; 设雅可比算子在地球球面上的形式为:

$$J(A, B) = \frac{1}{a^2 \cos \varphi} \left( \frac{\partial A}{\partial \lambda} \frac{\partial B}{\partial \varphi} - \frac{\partial A}{\partial \varphi} \frac{\partial B}{\partial \lambda} \right)$$

其中  $\lambda$  为经度,  $a$  为地球半径, 特征值为  $2 \times 10^7$ ; 对于正压涡度方程 (1) 的任何解均为自由解。为了求出正压涡度方程 (1) 式中的流函数  $\Psi$ , 构造一个泛函

$$F(\Psi) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} [J(\Psi, \nabla^2 \Psi + f)]^2 \cos \varphi d\varphi d\lambda \quad (2)$$

此泛函代表了流场和自由模之间的距离, 为了找到自由模必须使构造的泛函尽可能小, 最好能使它的值为零, 若找到一个  $\Psi$  使得泛函  $F(\Psi) = 0$ , 则此  $\Psi$  为自由解。这里, 将  $\Psi$  用球谐函数表示, 取 21 波菱形截断, 全球取  $48 \times 40$  格点; 再用拟牛顿法求解泛函式 (2) 的极值问题, 用此求极值方法求得的自由解还不足以和实际环流相似, 因此需要在式 (2) 中加一个权重场  $\bar{\Psi}$  进行修正来弥补这个缺陷, 所以有修订后的泛函为

$$F_{\mu}(\Psi) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \left\{ [J(\Psi, \nabla^2 \Psi + f)]^2 + \mu(\Psi - \bar{\Psi})^2 \right\} \cos \varphi d\varphi d\lambda \quad (3)$$

这里权重场  $\bar{\Psi}$  为给定的初始场,  $\mu$  依次分别取为无量纲量为 1, 0.01, 0.0001 和 0, 而对应的初始迭代场分别依次取为实际流场和用前一个  $\mu$  所求得的解, 在最后一步  $\mu = 0$ , 所以用式 (3) 最终所求得的解应为无摩擦耗散、无强迫系统的定常解即自由解, 是和实际流场十分接近的自由模态, 而且不能找到更接近实际流场的自由解。

利用上面的谱模式可以取任意的实际流场作为初始场计算其对应的实际大气自由模, 我们随意取 1998 年 7 月 19 日 500 hPa 实际流场作为初始场对大气自由模特征作一简单分析。根据该日 500 hPa 的实际风场资料计算出绝对涡度和实际流函数场, 由图 2a 所示的实际流函数场可以看出, 高度场在南半球大部分地区较为平直, 只是在极地附近有一些大尺度的波动存在, 在整个赤道地区 ( $20^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{N}$ ) 环流特征不明显, 而在北半球中高纬地区则存在很多高低压系统, 其中包含一些小尺度的涡旋; 而比较自由模态的流场 (图 2b) 与实际流场, 可以看出, 自由模态的流场较接近实际初始流场, 这表明模式所求得的解应是自由解, 而且是和实际流场十分接近的定常自由解, 但自由模态的流场更加突出地表现了大气中的某些环流特征, 例如: 自由模态的流场比实际流场在赤道地区的气流更为平直, 一些小尺度的波动基本消失, 自由模态的流场图上, 在中低纬度地区, 可以看出西太平洋副热带高压明显加强, 在中高纬地区, 一些小的涡旋活动变得不太明显, 但大尺度的重要系统诸如阿留申低压及阻塞现象等更加明显。从实际的绝对涡度场上 (图 2c) 也可以看出与实际流场相应的特征, 在中低纬度绝对涡度等值线较为平直, 中高纬度各种涡旋活动明显, 与实际流场相比等涡度线与等流函数线趋于近似平行, 但两者之间等值线都相交, 由此可知此流场不能看成是大气定常的自由解。这从实际绝对涡度与实际流函数之间的点阵图 3a 上也可以反映出, 由  $(q, \Psi)$  点阵图说明绝对涡度  $q$  的局地值与流函数  $\Psi$  的局地值之间的关系, 此点阵图经常用于研究和表征大气流型的定常性且非常有用, 例如,  $q$  的等值线与  $\Psi$  的等值线越接近平行, 流场  $\Psi$  越接近定常, 而对于定常态两者等值线处处平行, 表明没有  $q$  的平流, 点阵比较发散, 但大体可以将  $(q, \Psi)$  点阵划分为 3 个特

征不同的区域: A, B, C。每个区域的绝对涡度  $q$  与流函数  $\Psi$  的函数关系不一样, 区域 A 和区域 C 中  $q$  与  $\Psi$  呈斜率为负的近似线性关系, 区域 B 里  $q$  与  $\Psi$  呈斜率为正的近似线性关系, 其中区域 A 与 C 分别对应南、北两个半球的赤道外地区, 而区域 B 对应赤道地区, 这说明赤道地区与赤道外地区的 ( $q, \Psi$ ) 函数关系不同, 环流特征明显不同。

从自由模态对应的绝对涡度场(图 2d)与流场可以发现, 两者等值线几乎平行, 其平行程度决定大气流型的定常性, 应由式 (3) 中的泛函  $F_{\mu}(\Psi)$  来衡量, 实际流场中的无量纲量泛函值  $F = 3.824 \times 10^{-4}$ , 而自由模流场中的  $F = 5.816 \times 10^{-8}$ , 很显然后者的泛函值要比前者小得多, 流场与涡度场等值线之间的平衡程度也强得多, 这再次表明图 2c 中流

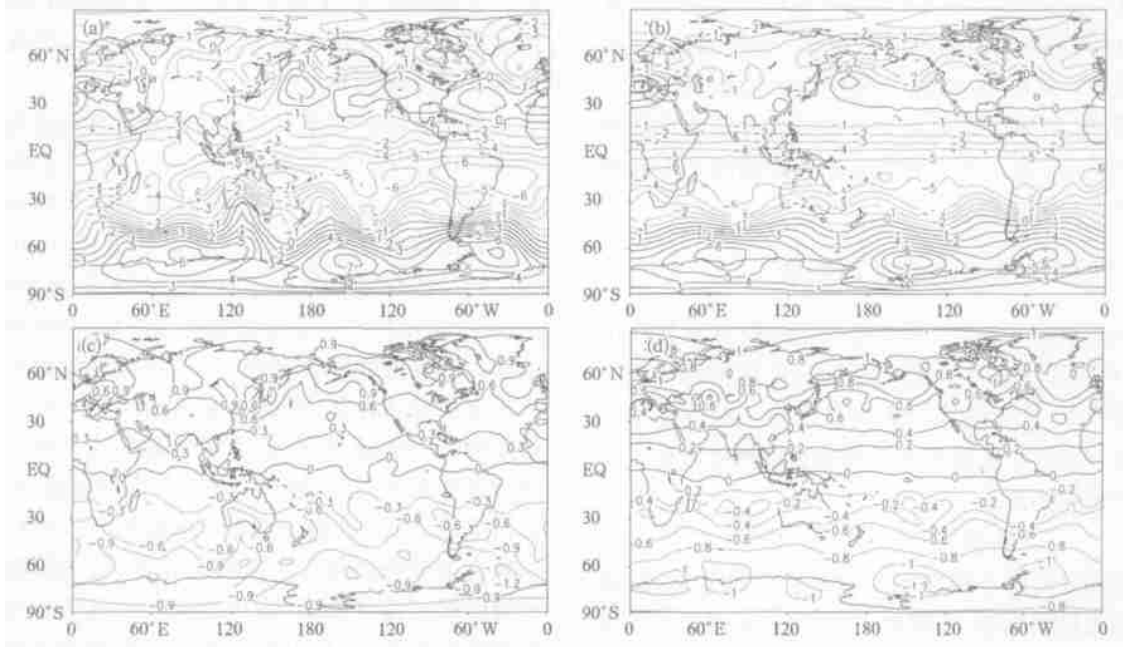


图 2 1998 年 7 月 19 日实际流场 (a. 等值线间隔:  $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$ )、自由模态的流场 (b. 等值线间隔:  $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$ )、实际绝对涡度场 (c. 等值线间隔:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 和自由模态的绝对涡度场 (d. 等值线间隔:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 2 Observed streamfunction (a. Contour interval is  $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), free mode streamfunction (b. Contour interval is  $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$ ), observed absolute vorticity (c. Contour interval is  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), and free mode absolute vorticity (d. Contour interval is  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) for 19 July 1998

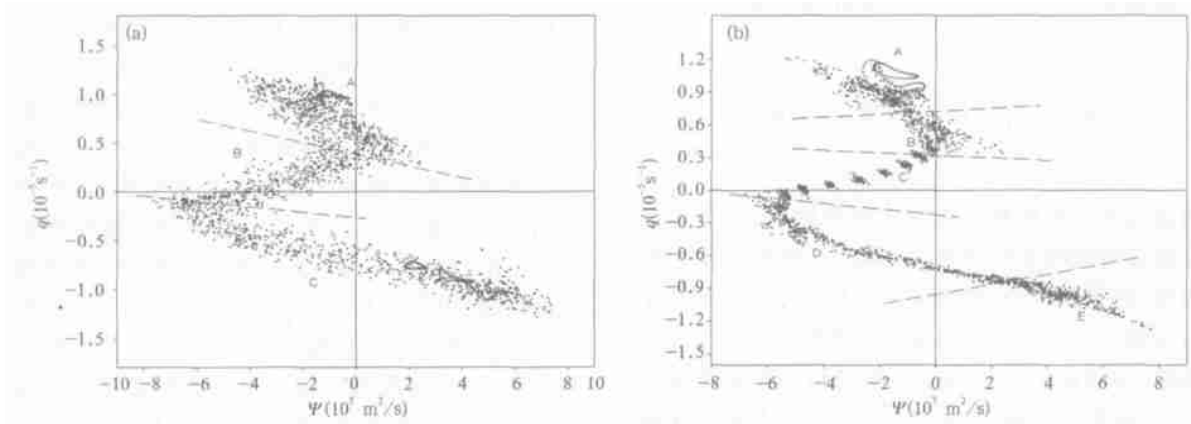


图 3 1998 年 7 月 19 日实际流场与绝对涡度之间的点阵 (a) 和自由模态的流场与绝对涡度场之间的点阵 (b)

Fig. 3 The plots between streamfunction and absolute vorticity (a. for observed, and b. for free mode) for 19 July 1998

场所对应的解应为大气的定常自由解。从图 3b 中也可以看出, 点阵的发散程度比实际流场与其对应的绝对涡度场的点阵的发散程度已经降低很多, 这主要是因为自由模态对应的流场中很多尺度较小的波动已被忽略, 而北半球的点阵比南半球的点阵发散程度稍高是由南半球多为海洋、气流较为平直、涡旋系统活动较少而北半球地形复杂、各种波动较多等原因所致。根据自由模态的流场与绝对涡度场之间点阵的发散程度及流函数与绝对涡度之间的  $(q, \Psi)$  函数关系可将点阵图划分为 5 个性质的区域: A, B, C, D 和 E, 其中 B 区域对应高度场上的赤道地区, E, A 两个区域对应高度场上的南、北半球的高纬地区, B, D 两个区域对应高度场上的北半球的中纬度地区和南半球的低纬到中高纬一带。再仔细分析自由模态的流场和其对应的绝对涡度场的点阵图上  $(q, \Psi)$  的函数关系发现, 除了在 C, D 两个区域流函数与绝对涡度分别呈现正、负线性关系, 其他区域则呈现为交叉线性关系或者非线性关系, 这些都与实际流场中的环流特征相对应, 在 C, D 两个区域为太平洋、大西洋及印度洋的大洋穿越流, 气流平直, 反映到点阵图上的流函数与绝对涡

度之间呈现线性关系。

既然实际大气自由模可以很好地反映大气环流特征, 下面将其用于诊断分析引起 1998 年夏季中国大范围降水异常的环流异常情况。

### 3 用自由模去诊断分析阻塞高压

通过前面的分析可知 1998 年夏季(6~8 月)阻塞高压活动异常, 整个夏季中纬度地区共出现阻塞高压 84 d, 其中在 6, 7 月份几乎每天都有阻塞形势存在, 从 500 hPa 位势高度沿 50~60°N 平均的经度-时间剖面图(图 1)上, 可以明显地发现 3 次持续的阻塞形势维持, 即 6 月中旬到下旬、7 月中旬到 8 月初和 8 月上中旬, 在这里, 选取第一次阻塞高压的持续异常进行诊断分析。

在 1998 年 6 月 10 日的 500 hPa 位势高度场(图 4a)上, 乌拉尔山区和鄂霍次克海区分别有一阻塞高压存在, 这种阻塞形势一直维持到 6 月 26 日。根据 1998 年 6 月 10 日 500 hPa 风场, 可以算出实际流场(图 4b)及绝对涡度场(图略), 图上也看出在中高纬度有阻塞高压, 而在中低纬地区的副热带高压活动明显, 另外有大量小尺度涡旋。将实际流

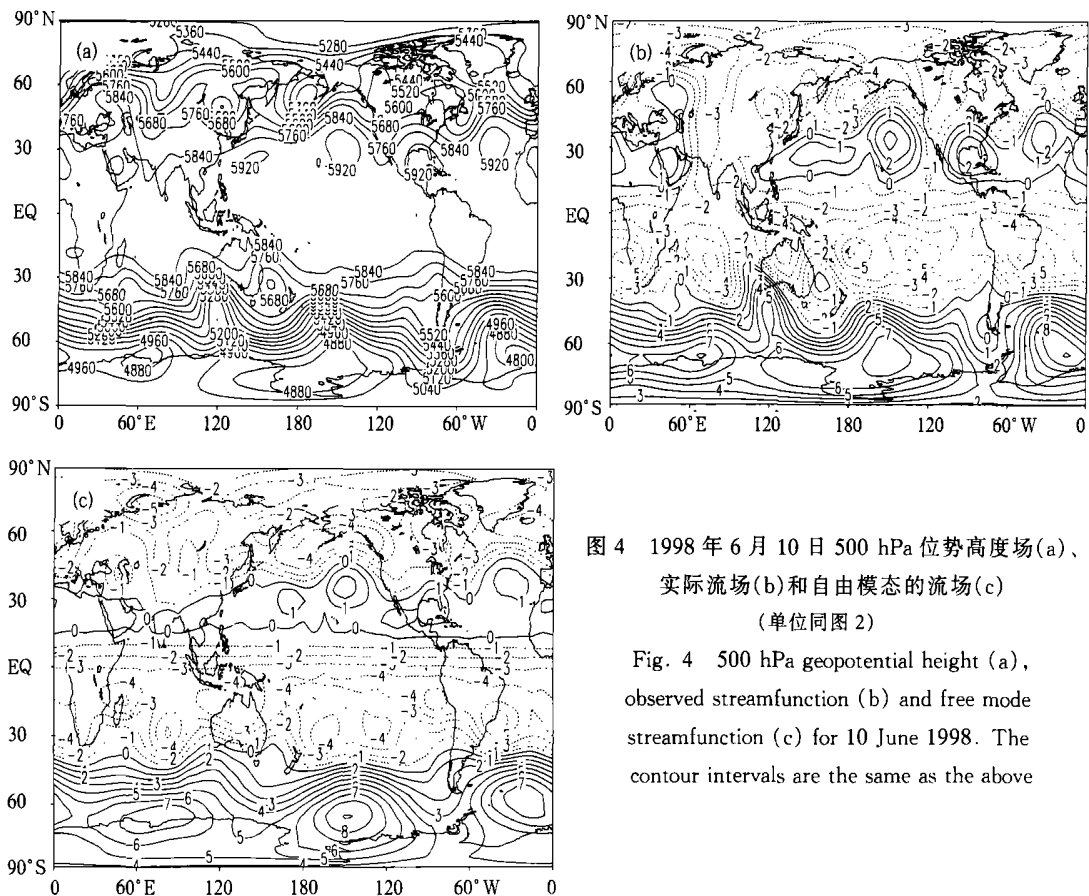


图 4 1998 年 6 月 10 日 500 hPa 位势高度场(a)、实际流场(b)和自由模态的流场(c) (单位同图 2)

Fig. 4 500 hPa geopotential height (a), observed streamfunction (b) and free mode streamfunction (c) for 10 June 1998. The contour intervals are the same as the above



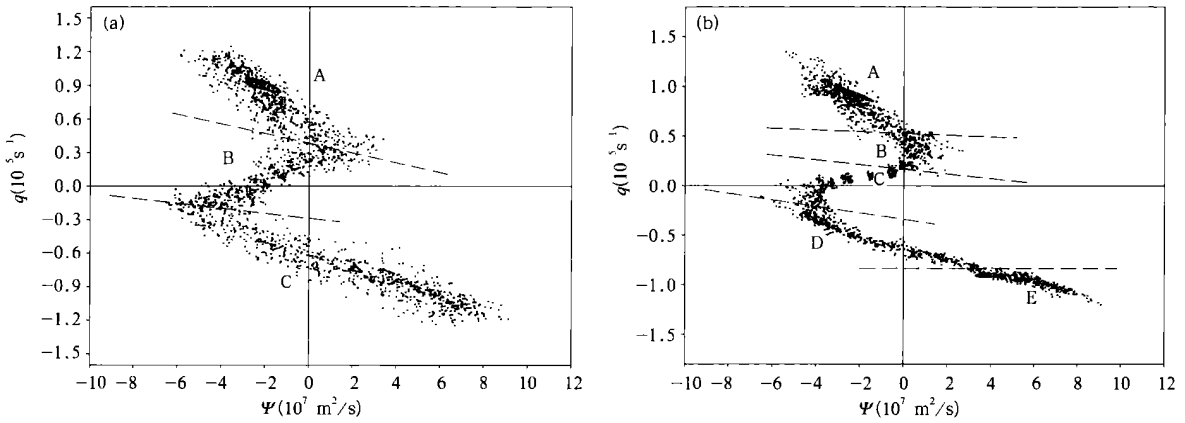


图 6 1998 年 6 月 10 日实际流场与绝对涡度之间的点阵 (a) 和自由模态的流场与绝对涡度场之间的点阵 (b)

Fig. 6 The plots between streamfunction and absolute vorticity (a. for observed, and b. for free mode) for 10 June 1998

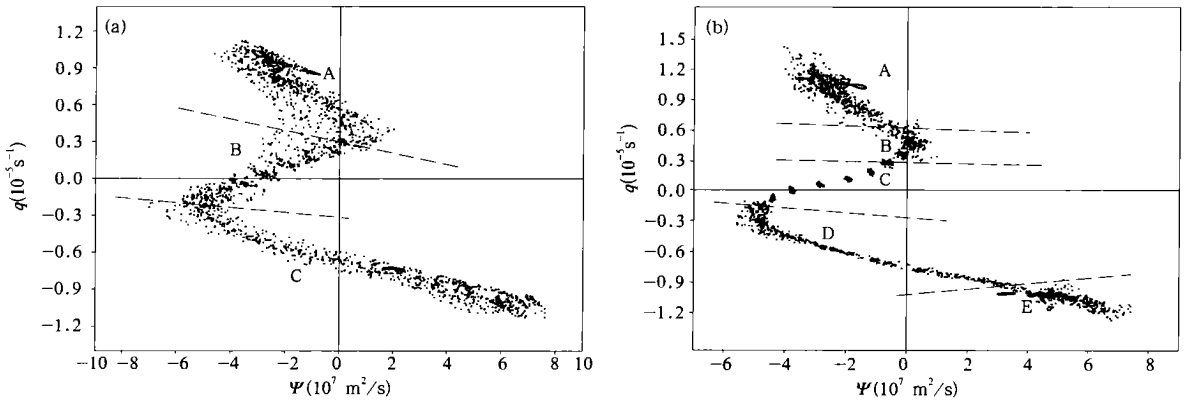


图 7 说明同图 6, 时间为 1998 年 6 月 10~ 23 日平均

Fig. 7 As in Fig. 6 except the time is average of 10-23 June 1998

在 B 区域呈正斜率的近似线性关系(其中区域 A, B, C 分别表示北半球非赤道地区、赤道地区、南半球非赤道地区); 后者的点阵已经比前者的点阵收敛很多, 但流场与绝对涡度场的函数关系(  $q, \Psi$  ) 已经不再是分段的线性关系, 而是非线性关系, 这和 Rossby- Haurwitz 波的(  $q, \Psi$  ) 函数关系明显不同, 因为在 Rossby- Haurwitz 波中(  $q, \Psi$  ) 为线性关系; 在图 7b 可以看到与 6 月 10 日似的特征, 即在两条横线之间除了 D 所对应的区域其他地区点阵收敛效果非常好, 因为在赤道地区及南半球大部分地区气流平直, 只是在区域 D 由于南半球的副热带高压的出现而引起了点阵有一点发散, 在 A, F 所对应的区域由于南北半球边界效应点阵发散, 在 B, C 所对应区域分别应北半球中高纬度的阻塞高压及中低纬度的

副热带高压引起了点阵的发散。

那么, 中高纬地区的阻塞高压的稳定性又如何呢? 下面简要介绍 Verkley<sup>[11, 12]</sup> 求标准模方法 (Verkley 用三角形 30 波截断谱模式, 而本文用了菱形 21 波截断谱模式), 若定常自由模态受到一个小扰动, 令  $q' = \dots^2 \psi', q_0 = \dots^2 \Psi_0 + f$ ,  $\Psi_0$  与  $\psi'$  分别为一定常解和小扰动, 则涡度为  $q = q_0 + q'$ , 流函数为  $\Psi = \Psi_0 + \psi'$ , 可将正压水平无辐散涡度方程进行线性化为

$$\partial q' / \partial t + J(\Psi_0, q') + J(\psi', q_0) = 0 \quad (4)$$

将扰动绝对涡度和扰动流场分别用标准模表示

$$\begin{cases} \psi'(\lambda, \phi, t) = \Phi[\theta(\lambda, \phi)e^{i\omega t}] \\ q'(\lambda, \phi, t) = \Phi[\varepsilon(\lambda, \phi)e^{i\omega t}] \end{cases} \quad (5)$$

在上式  $\theta, \varepsilon$  均为复数, 将式(5)代入式(4)得一个

判断自由模态稳定性的特征方程:

$$u \epsilon + J(\Psi_0, \epsilon) + J(\theta, q_0) = 0 \quad (6)$$

其特征值和特征向量  $u, \epsilon$  (以及相对应的  $\theta$ ) 分别为  $u = u_r + i u_i, \epsilon = \epsilon_r + i \epsilon_i, \theta = \theta_r + i \theta_i$ .

利用上述方法求出 1998 年 6 月 10 日实际大气自由模态特征值  $u = u_r + i u_i$  (其中  $u_r$  为实部,  $u_i$  为虚部) 的分布 (图 8), 发现不稳定模的个数很多, 由于这些特征值都围绕在两个坐标轴附近, 即特征值实部  $u_r$  的绝对值较小, 因此由  $e^{-t}$  折时间尺度  $\tau \equiv 1/|u_i|$  可得, 不稳定模态衰减的时间尺度较大, 这说明大部分不稳定模是缓变的, 如果  $u_i = 0$ , 则模态随时间以周期  $T \equiv 2\pi/|u_r|$  变化. 图 9a, b, c, d 分别给出了 1998 年 6 月 10 日最快增长的 4 个不稳定模态的空间结构图, 这最快增长的 4 个不稳定模态的周期和  $e^{-t}$  折时间尺度见表 1

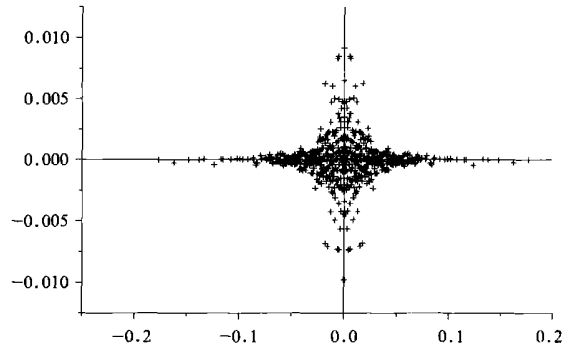


图 8 1998 年 6 月 10 日实际大气自由模特征值分布图 (横坐标为虚部, 纵坐标为实部)

Fig. 8 Eigenvalue of observed atmospheric free modes for 10 June 1998. The horizontal axis is imaginary part; the vertical axis is real part

表 1 最快增长的 4 个不稳定的周期和  $e^{-t}$  折时间尺度

$T$	$\tau$	$T$	$\tau$	$T$	$\tau$	$T$	$\tau$
999	8.7	94	9.4	9.7	8.2	28	12.8

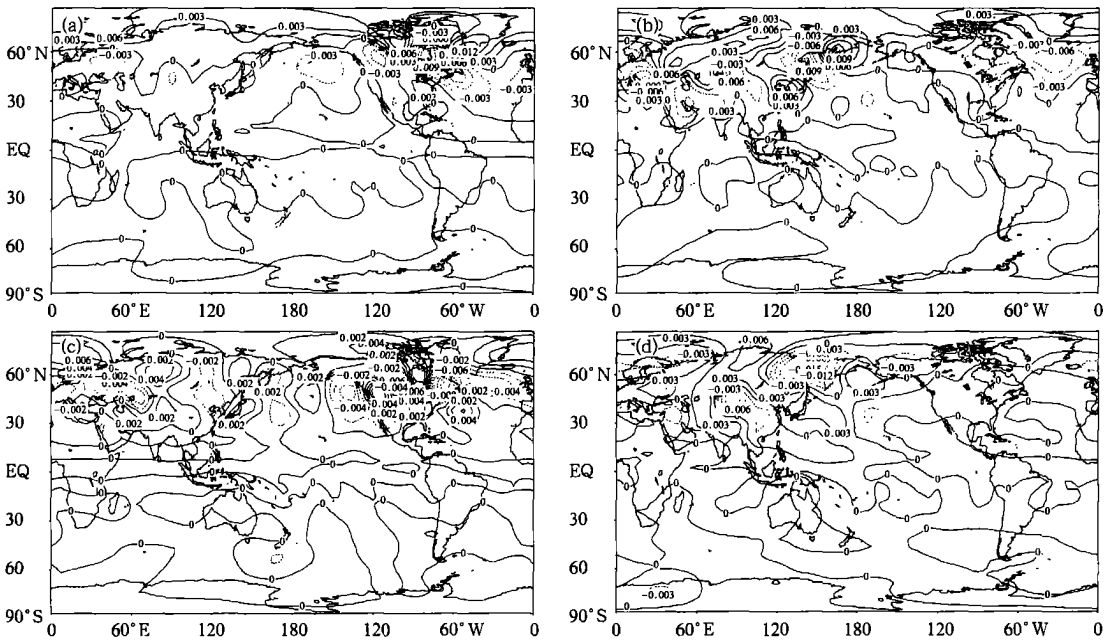


图 9 1998 年 6 月 10 日实际大气自由模中最快 (a)、第 2 快 (b)、第 3 快 (c) 和第四快增长 (d) 的模态空间结构

Fig. 9 Spatial structure of the first four fastest growing modes of observed atmospheric free modes (a. the first fastest, b. the second fastest, c. the third fastest, d. the fourth fastest.)

这些不稳定模的  $e^{-t}$  折时间尺度至少为 8 d, 而周期最短为 9 d, 这表明这些不稳定模态可以维持一段较长的时间, 也说明 1998 年 6 月 10 日的流场所对应的自由模中的不稳定模是低频变化的, 进而说

明这一天环流形势较为稳定, 可以持续一段时间. 从第 2, 3 和 4 快增长的 3 个模的空间结构图上可以在鄂霍次克海区附近一直有高压存在, 而在第 3, 4 快增长模的空间结构图上乌拉尔山附近有反气旋性



环流, 反映在位势高度场上即为阻塞高压这些高压环流好像是波列从其西面不断传过来一样, 这种情况并不是由外源强迫所产生的准定常波传播引起, 而是由正压不稳定所产生的最快增长的波动所致, 正是由于这些不稳定的模存在, 才使 1998 年 6 月中旬到下旬的中高纬阻塞高压稳定维持。

#### 4 结果与讨论

本文对阻塞高压和大气自由模态作了一定的论述, 解释了如何求得自由模, 简要分析了自由模的特征, 并利用自由模分析阻塞高压。

(1) 用菱形 21 波截断的谱方法来求无粘性、无强迫正压涡度方程的自由解, 即和实际大气流场十分接近的大气自由模; 大气自由模能很好地反映大气环流特征, 略去了小尺度涡旋; 大气自由模的流场和绝对涡度场之间的散点图, 反映了( $q$ ,  $\Psi$ )的函数

关系是分段线性或非线性的。

(2) 利用自由模的特征诊断分析了 1998 年夏季的阻塞高压持续异常, 认为大气自由模态突出了大气环流的重要特征, 例如, 越赤道气流、西风急流、副热带高压、阻塞高压及两极的边界效应等, 指出通过自由模的特征可以识别出阻塞高压的持续异常。

考虑到计算的稳定性问题, 本文只进行了 21 波菱形截谱数值试验(网格数为  $48 \times 40$ ), 实际场和自由模态场之间在整体环流上也有一定差异, 这可能是正压自由模的局限性, 我们将采用不同阶谱的数值试验, 并利用斜压自由模态对阻塞等现象进行诊断分析。对阻塞高压及大气自由模这样非常复杂的课题有待进一步探讨及研究: 进一步分析阻塞高压的发生、发展及维持的机制; 利用斜压模式求出大气自由模, 根据斜压自由模诊断分析阻塞高压及副热带高压, 并且模拟出大气的环流异常。

#### 参考文献

- 1 McWilliams J C. Application of equivalent modons to atmospheric blocking. *Dyn Atmos Oceans*, 1980, 5(1): 43~ 66
- 2 Marshall J, Damon W K. Thermal equilibration of planetary waves. *J Atmos Sci*, 1990, 47(8): 963~ 978
- 3 陆维松. 近定常有限振幅斜压 Rossby 波的激发与选择性衰减和不相容原理. *南京气象学院学报*, 1995, 18(2): 155~ 165
- 4 Branstator G, Opsteegh J D. Free solutions of the barotropic vorticity equation. *J Atmos Sci*, 1989, 46(12): 1799~ 1814
- 5 Pierrehumbert R T, Malguzzi R. Forced coherent structures and local multiple equilibria in a barotropic atmosphere. *J Atmos Sci*, 1984, 41(2): 246~ 257
- 6 Anderson J L. Barotropic stationary states and persistent anomalies in the atmosphere. *J Atmos Sci*, 1992, 49(18): 1709~ 1722
- 7 Wu P. Nonlinear resonance and instability of planetary waves and low-frequency variability in the atmosphere. *J Atmos Sci*, 1993, 50(21): 3590~ 3607
- 8 张培忠, 杨素兰. 阻塞高压活动的气候变化及其对中国某些地区旱涝的影响. *气象学报*, 1996, 54(5): 633~ 640
- 9 高守亭, 朱文妹, 董敏. 大气低频变异中的波流相互作用. *气象学报*, 1996, 56(6): 666~ 680
- 10 罗德海, 纪立人. 大气中偶极子阻塞的观测研究. *大气科学*, 1991, 15(1): 52~ 57
- 11 Verkey W T M. Stationary barotropic modons in westerly background flows. *J Atmos Sci*, 1987, 44(17): 2383~ 2398
- 12 Verkey W T M. Modons with uniform absolute vorticity. *J Atmos Sci*, 1990, 44(6): 727~ 745
- 13 Nils R E, Swaters G E. Geostrophic scatter diagrams and the application of quasigeostrophic free-mode theory to a northeast Pacific blocking episode. *J Atmos Sci*, 1994, 51(4): 563~ 581
- 14 陈希, 孙照渤, 沙文钰等. 东亚阻塞高压对中国降水影响的诊断分析研究. *南京气象学院学报*, 2001, 24(3): 331~ 337
- 15 黄菲, 蒋治娜. 欧亚大陆阻塞高压的统计特征及其与中国东部夏季降水的关系. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(2): 186~ 192

## DIAGNOSE ANALYSE ATMOSPHERIC BLOCKING HIGH BY FREE MODE

Zhang Hengde Lu Weisong Tao Li

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Gao Shouting

(*Institute of Atmospheric physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029*)

### Abstract

Aimed at stud of atmospheric free mode and blocking high, firstly, the relationships between blockings and China summer rainfall are clarified, and the 500 hPa height in the summer of 1998 are detailed analysed. Then, using 21- wave rhomboidal truncation spectral model procedure, it is searched for steady solutions to the inviscid, unforced barotropic vorticity equation, which are called free solutions or free modes. These free solutions are extremely similar to the planetary scale structure of observed flows. Thirdly, the characteristics of atmospheric free modes are particularly discussed. Finally, by virtue of atmospheric free modes, we diagnose observed atmospheric circulation and put stress on analyzing the anomalous circulation during the summer of 1998, and the Normal-mode instability analysis is performed to examine observed stability of free modes and blocking. The results show the following:

- (1) The mid-high latitudes blocking has a close relationship with China summer rainfall, and the atmosphere underwent three times blocking anomaly in the summer of 1998.
- (2) Each observed flow is corresponding to a free mode, and the scatter field between observed free mode streamfunction and the corresponding absolute vorticity (also called plots) reflects their subsection-linear even nonlinear relationship. The plots for observed stream flow lay out the linear relationship in different slope between streamfunction and the corresponding absolute vorticity, but the scatters are relatively emanative.
- (3) Observed atmospheric free modes show most characteristics of atmospheric circulation in large scale, while neglect the mesoscale and microscale vortex.
- (4) During the summer of 1998, the observed atmospheric free modes show prominence to important characteristic of atmospheric circulation, such as cross-equatorial flow, zonal flow, blocking, subtropical high and boundary effects in polar regions, especially for blocking in mid-high latitudes.
- (5) Zonal flow and blocking anomaly can be identified through free modes and examine the stability of blocking by means of stability of free modes. All the observed free modes are locally unstable and durative, and the e-folding times of the four fastest growing modes last one week at least. The existence of these unstable modes maintains the blocking in middle to late of June 1998.

**Key words:** Blocking, Free mode, Diagnose and analyse, Circulation anomaly.