

预报副高脊面变化的动力模型及其简化数值试验

任宏利^{1, 2} 张培群² 郭秉荣³ 丑纪范¹

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 武汉大学数力系, 武汉 430074

摘 要 发展了一个描述副热带高压脊面变化的动力模型。这一模型基于大气环流角动量的守恒原理, 得到了作为东、西风交界面的副高脊面变化所满足的方程, 由于副高脊面直接成为预报量, 因此, 该模型对这一特定的研究对象有明确的动力学意义, 便于进行脊面变化的动力影响因素研究。进一步发展了模型的简化数值方案, 在权重函数为常数的假设下进行了初步试验, 结果显示, 副高脊面形态的时空变化基本能够模拟出来, 主要体现在脊面的进退和倾斜等特征, 说明该模型具有一定的模拟能力, 而且三维积分格式的采用使得模拟结果比较平稳, 过滤掉了高频噪音。数值试验的结果表明, 按照脊面动力模型, 确实能够直接计算副高脊面变化(移动和形变), 并定量地考察影响脊面变化动力因子的贡献。

关键词 副热带高压 脊面 动力模型 角动量

文章编号 1006-9895(2005)01-0071-08

中图分类号 P435

文献标识码 A

Dynamical Model of Subtropical High Ridge-Line Section and Numerical Simulations with Its Simplified Scheme

REN Hong-Li^{1, 2}, ZHANG Pei-Qun², GUO Bing-Rong³, and CHOU Ji-Fan¹

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Laboratory of Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Maths and Mechanics Department, Wuhan University, Wuhan 430074

Abstract A dynamical model is developed to simulate the variation of subtropical high ridge-line section (SHRS). The model's basic equations, originated from the principle of angular momentum conservation, represent the movement of SHRS (the section of westerly and easterly of subtropics). In the equations, the SHRS is expressed explicitly as a predictand, which benefits to study the dynamical factors affecting SHRS directly. Further, a simplified numerical scheme of the SHRS-model is designed and the preliminary experiments of simulation are conducted on the assumption that the weight function is constant. The results show that the temporal and spatial variation of subtropical high shape is simulated basically well, especially in the features of SHRS's slope and its advance and retreat, which indicate that the model has elemental capability of simulation and prediction of SHRS and redounds to investigating dynamical factors affecting variation of SHRS quantificationally.

Key words subtropical high, ridge-line section, dynamical model, angular momentum

1 引言

早在 20 世纪 50 年代, 叶笃正就研讨了角动量守

恒在大气环流中的重要性^[1, 2]。可是, 在数值模式中这一原理并未受到重视, 如何发挥这一原理的作用, 是一个值得探讨的问题。大气中天气尺度的可预报性

期限不超过 2~3 周, 因此, 在季节的时间尺度上, 逐日的天气预报是不可能的。“确定可预报性本身并不是一个建设性的课题(本身也不应该是目的), 建设性地解决某个长时期的可预报性问题应该是指出这个时期中所能预报的是何种气象场的特征^[3]。在月、季的时间尺度上, 哪些有重要意义的气象场的特征是可以预报的? 副热带高压是大气环流中的重要成员, 对天气和气候变化具有显著影响。副高及其变异的预报, 对于我国以及东亚地区的旱涝预测非常关键^[4~9], 特别是西太平洋副高脊线由冬到夏北跳过程的预报。这方面的研究工作很多, 也建立了统计预报模型^[10], 但尚未找到预报副高脊线的有效动力方法^[11]。目前, 一般采用大气环流模式(GCM)来制作季度预报^[12], 由于 GCM 中包含各种尺度运动, 长期积分后, 快变的天气尺度成为慢变的副高脊线变化的干扰^[11], 使得预报并不准确。对于季度预测而言, 我们认为, 后者是可预报的稳定分量, 而前者是不可预报的混沌分量, 需要建立能够将其过滤掉的模式。这种认识有实践基础, 从天气图的逐日变化上, 我们常常看到, 当中高纬度槽来脊去有显著变动时, 副高脊线却没有显著变动, 天气尺度的快速变化与副高脊线的缓慢变动关系不甚密切。

热带大气的动力特征明显地不同于温带大气和极地大气, 热带大气几乎就好像是另一种流体一样^[13]。中高纬盛行西风, 低纬盛行东风, 在它们之间存在一个东西风交界面, 也就是副热带高压脊面。脊面北侧为 Rossby 环流控制, 运动是准地转的, 大气主要能源是斜压不稳定能量的释放, 系统变化较快; 脊面南侧物理量水平分布均匀, 盛行 Hadley 环流和 Walker 环流, 运动是半地转的, 系统变化缓慢近乎定常状态, 潜热释放是大气运动的主要能源。由此可见, 副高脊面恰好介于两种不同性质的大气之间, 按照动力学观点, 脊面变化在保持大气角动量守恒中具有重要作用, 其南面东风区为大气角动量之源, 北面西风区则是大气角动量的汇, 通过副高脊面实现角动量的输送过程。角动量的变化必然与分界面位置以及形态密切联系, 这样就获得了描述副高脊面位置变化的动力学特征量。因此, 本文将从大气角动量守恒关系出发, 分别推导出东西风盛行区各自的广义角动量变率方程, 从而得到副高脊面变化的动力学模型, 并在一定简化条件下进行数值试验。

2 副高脊面变动的动力模型的建立

设 $\theta_s(\lambda, \zeta, t)$ 表示副高脊面, 其动力方程可以按

照如下过程导出:

在地形坐标系 $\zeta = (p - p_t)(p_s - p_t) = (p - p_t)/p_{es}$ 下, 球坐标系 (λ, θ, ζ) 中的大气水平运动方程^[14] 为

$$\frac{\partial v_\lambda}{\partial t} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial v_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial v_\lambda}{\partial \theta} + \zeta \frac{\partial v_\lambda}{\partial \zeta} + \left(2\Omega \cos \theta + \frac{\cot \theta}{a} v_\lambda \right) v_\theta + \frac{RT_e}{p_{es} a \sin \theta} \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = D_\lambda, \quad (1)$$

连续性方程为

$$\frac{\partial p_{es}}{\partial t} + \frac{1}{a \sin \theta} \left(\frac{\partial p_{es} v_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_{es} v_\theta \sin \theta}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial p_{es} \zeta}{\partial \zeta} = 0, \quad (2)$$

其中, λ 为经度, θ 为余纬, v_λ 和 v_θ 分别为纬向和经向速度, $m = v_\lambda a \sin \theta + \Omega a^2 \sin^2 \theta$ 为单位体积的角动量, ζ 为垂直速度, D_λ 为湍流耗散项, ϕ 为位势高度。

以 $p_{es} a \sin \theta$ 乘 (1) 式加 m 乘 (2) 式, 便得到角动量方程为

$$\frac{\partial p_{es} m}{\partial t} + \frac{1}{a \sin \theta} \left(\frac{\partial p_{es} v_\lambda m}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_{es} v_\theta m \sin \theta}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial p_{es} \zeta m}{\partial \zeta} = - \frac{\partial p_{es} \phi}{\partial \lambda} + \frac{\partial \zeta \phi}{\partial \zeta} \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} + p_{es} D_\lambda a \sin \theta. \quad (3)$$

由于副高脊面的变化与大气角动量的输送关系密切, 下面将利用角动量方程来考察脊面两侧广义角动量的变化率, 本文以北半球为例, 南半球情况类似。

在西风盛行区: $0 \leq \theta \leq \theta_s$, $0 \leq \lambda \leq 2\pi$, $0 \leq \zeta \leq 1$, 求广义角动量的变率, 设 $P_n(\lambda, \theta, \zeta)$ 为权重函数, 它满足条件

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{p_{es} v_\lambda m}{a \sin \theta} - p_{es} \phi \right) \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{p_{es} v_\theta m}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} + \left(p_{es} \zeta m + \frac{\partial p_{es} \zeta \phi}{\partial \lambda} \right) \frac{\partial}{\partial \zeta} \right] P_n(\lambda, \theta, \zeta) = 0, \\ P_n(\lambda, \theta, \zeta) \Big|_{\theta=\theta_s} = S_n(\lambda, \zeta). \end{cases} \quad (4)$$

以 $P_n(\lambda, \theta, \zeta)$ 乘 (3) 式, 并积分得到

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left[\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_s} P_n p_{es} (v_\lambda a \sin \theta + \Omega a^2 \sin^2 \theta) a^2 \sin \theta d\theta d\lambda d\zeta \right] \\ &= \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \Omega a^4 d\lambda d\zeta - \\ & \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n \left[p_{es} \sin^3 \theta \left(\frac{v_\theta}{a} - \zeta \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right) \right]_{\theta=\theta_s} \Omega a^4 d\lambda d\zeta + \\ & \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n \left(p_{es} \phi \frac{\partial \theta_s}{\partial \lambda} - \zeta \phi \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right)_{\theta=\theta_s} a^2 \sin \theta_s d\lambda d\zeta + \\ & \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_s} (P_n \phi)_{\zeta=1} \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} a^2 \sin \theta d\theta d\lambda + \end{aligned}$$

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_s} P_n p_{es} D_\lambda a^3 \sin^2 \theta d\theta d\lambda d\zeta. \quad (5)$$

当取 $P_n(\lambda, \theta, \zeta) = 1$ 时，上式就是西风盛行区大气的角动量变率。

在东风盛行区： $\theta_s \leq \theta \leq \theta_b$ ， $0 \leq \lambda \leq 2\pi$ ， $0 \leq \zeta \leq 1$ ，求广义角动量的变率，其中 θ_b 为南部边界位置，设 $Q_n(\lambda, \theta, \zeta)$ 为权重函数，它满足条件

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{p_{es} v_\lambda m}{a \sin \theta} - p_{es} \phi \right) \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{p_{es} v_\theta m}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} + \left(p_{es} \zeta m + \frac{\partial p_{es} \zeta \phi}{\partial \lambda} \right) \frac{\partial}{\partial \zeta} \right] Q_n(\lambda, \theta, \zeta) = 0, \\ Q_n(\lambda, \theta, \zeta) \Big|_{\theta=\theta_s} = S_n(\lambda, \zeta). \end{cases} \quad (6)$$

以 $Q_n(\lambda, \theta, \zeta)$ 乘 (4) 式，并积分得到

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_b} Q_n p_{es} (v_\lambda a \sin \theta + \Omega a^2 \sin^2 \theta) a^2 \sin \theta d\theta d\lambda d\zeta \right] = \\ - \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \Omega a^4 d\lambda d\zeta + \\ \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n \left[p_{es} \sin^3 \theta \left(\frac{v_\theta}{a} - \zeta \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right) \right]_{\theta=\theta_s} \Omega a^4 d\lambda d\zeta - \\ \int_0^1 \int_0^{2\pi} \left[Q_n p_{es} v_\theta (v_\lambda + \Omega a) \right]_{\theta=\theta_b} a^2 d\lambda d\zeta - \\ \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n \left(p_{es} \phi \frac{\partial \theta_s}{\partial \lambda} - \zeta \phi \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right)_{\theta=\theta_s} a^2 \sin \theta_s d\lambda d\zeta + \\ \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_b} (Q_n \phi)_{\zeta=1} \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} a^2 \sin \theta d\theta d\lambda + \\ \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_b} Q_n p_{es} D_\lambda a^3 \sin^2 \theta d\theta d\lambda d\zeta. \end{aligned} \quad (7)$$

当取 $Q_n(\lambda, \theta, \zeta) = 1$ 时，上式就是东风盛行区大气的角动量变率。

将西风盛行区广义角动量变率方程 (5) 减去东风区方程 (7)，整理得到副高脊面变动的动力方程：

$$2 \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} \Omega a^4 d\lambda d\zeta = \sum_{i=1}^6 R_i, \quad (8)$$

其中，右端各项分别表示为

$$R_1 = \frac{d}{dt} \left\{ \int_0^1 \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{\theta_s} P_n p_{es} (v_\lambda a \sin \theta + \Omega a^2 \sin^2 \theta) a^2 \sin \theta d\theta - \int_0^{\theta_b} Q_n p_{es} (v_\lambda a \sin \theta + \Omega a^2 \sin^2 \theta) a^2 \sin \theta d\theta \right] d\lambda d\zeta \right\},$$

$$R_2 = 2 \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n \left[p_{es} \sin^3 \theta \left(\frac{v_\theta}{a} - \zeta \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right) \right]_{\theta=\theta_s} \Omega a^4 d\lambda d\zeta,$$

$$R_3 = - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \left[Q_n p_{es} v_\theta (v_\lambda + \Omega a) \right]_{\theta=\theta_b} a^2 d\lambda d\zeta,$$

$$R_4 = - 2 \int_0^1 \int_0^{2\pi} S_n \left(p_{es} \phi \frac{\partial \theta_s}{\partial \lambda} - \zeta \phi \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \right)_{\theta=\theta_s} a^2 \sin \theta_s d\lambda d\zeta,$$

$$\zeta \phi \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} \frac{\partial \theta_s}{\partial \zeta} \Big|_{\theta=\theta_s} a^2 \sin \theta_s d\lambda d\zeta,$$

$$R_5 = - \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_s} (P_n \phi)_{\zeta=1} \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} a^2 \sin \theta d\theta d\lambda - \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_b} (Q_n \phi)_{\zeta=1} \frac{\partial p_{es}}{\partial \lambda} a^2 \sin \theta d\theta d\lambda \right],$$

$$R_6 = - \left[\int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_s} P_n p_{es} D_\lambda a^3 \sin^2 \theta d\theta d\lambda d\zeta - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_b} Q_n p_{es} D_\lambda a^3 \sin^2 \theta d\theta d\lambda d\zeta \right].$$

方程 (8) 左端包含有脊面的局地时间变化项。右端各项分别是脊面变化的影响因子： R_1 为脊面两侧总积分角动量之差的个别导数； R_2 主要是通过脊面的地转角动量输送； R_3 是通过赤道垂直剖面的角动量通量； R_4 为脊面形变所产生的贡献； R_5 和 R_6 分别为东西风盛行区山脉力矩之差和摩擦力矩之差。后面将要看到，脊面模型可以直接输出各项贡献大小。

由于 $\theta_s(\lambda, \zeta, t)$ 的局地项位于积分符号里面，因此，考虑到方程 (8) 对未知函数 θ_s 的确定性，这里设

$$\theta_s(\lambda, \zeta, t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) e_n(\lambda, \zeta),$$

有

$$\frac{\partial \theta_s(\lambda, \zeta, t)}{\partial t} = \sum_{n=1}^N \frac{dA_n(t)}{dt} e_n(\lambda, \zeta),$$

并取

$$S_n(\lambda, \zeta) = \frac{e_n(\lambda, \zeta)}{2 p_{es}(\lambda, \theta_s) \Omega a^4 \sin^3 \theta_s},$$

其中， $e_n(\lambda, \zeta)$ 为一组已知的空间正交基底函数。这样，方程 (8) 变为

$$\frac{dA_n(t)}{dt} = \sum_{i=1}^6 R_i, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

这样就得到了副高脊面变化的动力学方程。

这一模型的优点是：(1) 实现了副高脊面动力学特征量的特殊描述；(2) 空间积分的使用过滤掉不可预报的混沌分量；(3) 给出了影响脊面移动变化的动力因子；(4) 方程推导来源于背景环流，表现出大气角动量守恒在副高脊面变动中的重要性。本文推导是在已有研究^[15, 16]基础上，进行了一定程度的改进和完善。需要说明的是，模型的推导是基于一个纬向闭合的连续脊面，这是将物理概念抽象为数学模型所必须的假设。经验表明，连续的副高带上也会出现西风通道，此时把西风动能最小处作为脊面位置，而脊面存在时就直接使用纬向风为 0 作为副高脊面。下面将进

行数值方案的设计和初步试验。

3 简化数值方案

在给定大气环流场的情况下, 驱动副高脊面模型进行数值模拟试验, 是在完成理论推导之后所必需的一个环节, 同时, 这一过程也是对理论模型所做的可行性分析。但是, 对于诸如 (8) 或 (9) 式这样复杂的方程, 数值求解方案显然存在很多困难, 主要有: (1) 多重空间积分的存在, 高度非线性项很多; (2) 方程两端存在两个时间个别导数项; (3) 脊面正交展开所需基底函数 (即空间模态) 的选取; (4) 三维权重函数 P_n 和 Q_n 的求解问题。

为此, 我们在模型的数值方案中进行了相应处理。首先, 对于所有空间积分, 均采用梯形公式处理。其次, 由于方程中两个个别导数的存在, 时间积分使用了迭代算法:

$$\frac{I(\theta_s(t + \Delta t)) - I(\theta_s(t))}{\Delta t} = \frac{R_1(\theta_s(t + \Delta t)) - R_1(\theta_s(t))}{\Delta t} + E(\theta_s(t)).$$

然后, 对于正交基底函数的选取, 这里脊面采用欧氏空间正交模态展开, 即

$$e_n(\lambda, \zeta) = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ \text{I(第 } n \text{ 点)} \ 0 \ \dots \ 0).$$

三维权重函数 P_n 和 Q_n 的求解问题是比较复杂的, 本文为了首先能够建立模型的数值方案, 进行了简化处理。不妨直接取 $S_n(\lambda, \zeta) = e_n(\lambda, \zeta)$, 方程 (8) 左端变形为

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} 2\Omega a^4 (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} S_n \frac{\partial \theta_s}{\partial t} d\lambda d\zeta = \int_0^1 \int_0^{2\pi} 2\Omega a^4 (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} \left[e_n(\lambda, \zeta) \sum_m \frac{dA_m(t)}{dt} \right] d\lambda d\zeta \approx \frac{dA_n(t)}{dt} \int_0^1 \int_0^{2\pi} 2\Omega a^4 (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} d\lambda d\zeta = M \frac{dA_n(t)}{dt},$$

这里近似有

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} 2\Omega a^4 (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} \left[e_n(\lambda, \zeta) \cdot \sum_m \frac{dA_m(t)}{dt} e_m(\lambda, \zeta) \right] d\lambda d\zeta = \int_0^1 \int_0^{2\pi} W e_n \frac{dA_1}{dt} e_1 d\lambda d\zeta + \int_0^1 \int_0^{2\pi} W e_n \frac{dA_2}{dt} e_2 d\lambda d\zeta + \dots + \int_0^1 \int_0^{2\pi} W e_n \frac{dA_n}{dt} e_n d\lambda d\zeta + \dots \approx \bar{W} \int_0^1 \int_0^{2\pi} e_n \frac{dA_1}{dt} e_1 d\lambda d\zeta + \dots + \bar{W} \int_0^1 \int_0^{2\pi} e_n \frac{dA_2}{dt} e_2 d\lambda d\zeta +$$

$$\dots + \bar{W} \int_0^1 \int_0^{2\pi} e_n \frac{dA_n}{dt} e_n d\lambda d\zeta + \dots = \frac{dA_n(t)}{dt} \int_0^1 \int_0^{2\pi} 2\Omega a^4 (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s} d\lambda d\zeta,$$

其中, $W = 2\Omega a^4 (p_{es} \sin^3 \theta)_{\theta=\theta_s}$ 。这样方程 (9) 就变为

$$\frac{dA_n(t)}{dt} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^6 R_i. \quad (10)$$

与方程 (9) 相比, 方程 (10) 中的 S_n 定义是不同的。按照上述处理后, 求解方程 (4) 和 (6) 所需的脊面边界条件就变得非常简单, 几乎全部为 0, 因此, 这里将权重函数 P_n 和 Q_n 取为均匀常数, 同样能满足方程 (4) 和 (6), 并能近似满足边界条件。针对所使用的欧氏空间模态, 由于 S_n 几乎均为 0, 所以取 P_n 为 1.0, Q_n 为 -1.0, 这主要基于对脊面两侧角动量特征的考虑, 同时还便于分析方程右端不同物理因子对脊面变化的贡献大小。

另外, 副高脊面模型直接采用 144×73 的经纬度网格, 这里积分区域为整个北半球; 南部边界取为赤道, 即 $\theta_0 = \pi/2$; 垂直方向分为 10 层。边界条件: 纬向为周期性边界, 地面和模型顶部垂直速度为 0, 北极点处, 纬向风和纬向梯度均为 0。经过上述相应处理和简化, 我们编制完成了副高脊面模型的简化数值方案。

4 数值试验

下面使用上述简化方案进行数值试验, 分别选取 2002 年 4 月和 11 月作为模拟个例, 一方面, 考虑到模型是把副高脊面作为一个纬向闭合的连续面, 初步试验的个例也选择为存在连续或者接近连续脊面的时期, 至于季风爆发后副高脊面的断裂问题^[7], 本文不作探讨; 另一方面, 4 月份北半球脊面逐渐北移, 而 11 月份脊面向南移动, 脊面的倾斜状况也会出现季节性改变, 这些是我们在数值试验中所要着重关注的方面。模拟个例的初始场分别为 2002 年 4 月 1 日 00 时和 11 月 1 日 00 时, 连续积分一个月, 时间步长取为 1 小时。副高脊面初始场和“实况”的选取按照 $v_\lambda = 0$ 以及 $\partial v_\lambda / \partial \theta < 0$ 的条件 (西风通道处使用 $v_\lambda^2/2$ 最小), 下面称为副高脊面的分析场。本文所用数据均为 NCEP/NCAR 一日四次的再分析资料。

4.1 结果对比

首先, 给出了 4 月份平均的分析和模拟的副高脊面位置 (见图 1)。可以看到, 在分析场中, 4 月中低层脊面要比高层明显偏北, 表明脊面向南倾斜, 这在北非、太平洋和大西洋地区更为突出, 而在南亚—孟

加拉湾地区的向南倾斜程度要小很多；模拟的脊面很好地再现了分析场中脊面倾斜的上述特征。

由于简化方案中权重函数均取为常数场，使得方程(10)的右端除了 R_2 和 R_4 之外，其余各项对于脊面上不同位置的贡献是一样的，即表现为脊面的整体移动，而 R_2 和 R_4 则表现出脊面自身的形状改变，这在后面的影响因子比较中可以看到。图 2 给出了纬向平均脊面的逐日变化情况，可以看到，4 月初脊面缓慢南移，8 日以后迅速北移，模拟曲线基本能够反映出这样的移动过程，向南移动情况较好，但向北转向略有滞后，北移的幅度也明显偏小，低层情况略好于高层。

下面进一步考察 11 月份平均的分析和模拟的副高脊面情况(图 3)。可以看到，在分析场中，11 月的整体情形与 4 月份差别不大，中低层脊面要比高层明显偏北，表明脊面向南倾斜，同 4 月类似，南亚—

孟加拉湾地区的向南倾斜程度要比其他地区小的多；分析场中脊面倾斜的上述特征在模拟的脊面结果中也有很好的反映。

图 4 给出了纬向平均脊面的逐日变化情况，可以看到，11 月中上旬低层脊面缓慢北移，高层变化比较剧烈，在 20 日以后均存在一个迅速的南移过程，相比而言，简化模型对缓慢的北移过程模拟较好，而对迅速南移的模拟存在与 4 月份相似的问题，即移动转向略有滞后，南移的幅度也明显偏小，高层的模拟情况并不理想。

上述两个月的试验结果表明，使用模型的简化方案，副高脊面的时空变化基本能够被模拟出来，主要表现在脊面的南北移动和倾斜特征，说明该方案具有一定的模拟能力。另外，模拟结果的逐日变化明显要比分析的平滑许多，这主要是因为数值方案中采用了三维积分格式，从而过滤掉了高频变化成分。

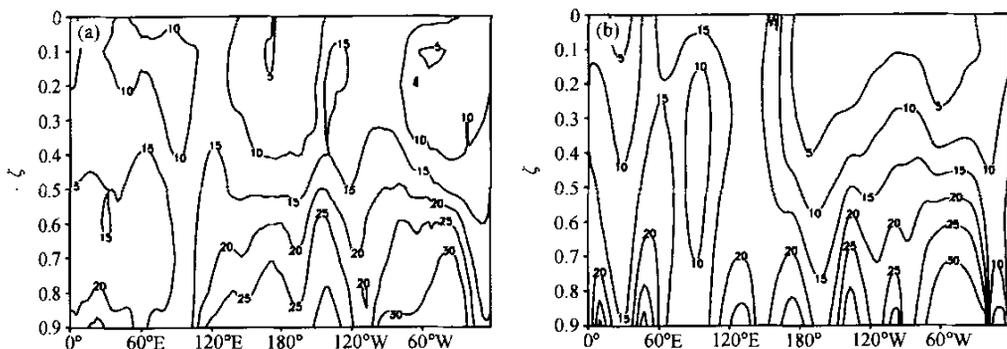


图 1 2002 年 4 月平均的分析 (a) 和模拟 (b) 的北半球副高脊面位置 (单位：纬度)

Fig. 1 The monthly mean of SHRS location in the Northern Hemisphere (a) analyzed from NCEP data and (b) simulated by the model in April 2002 (units : degrees of Latitude)

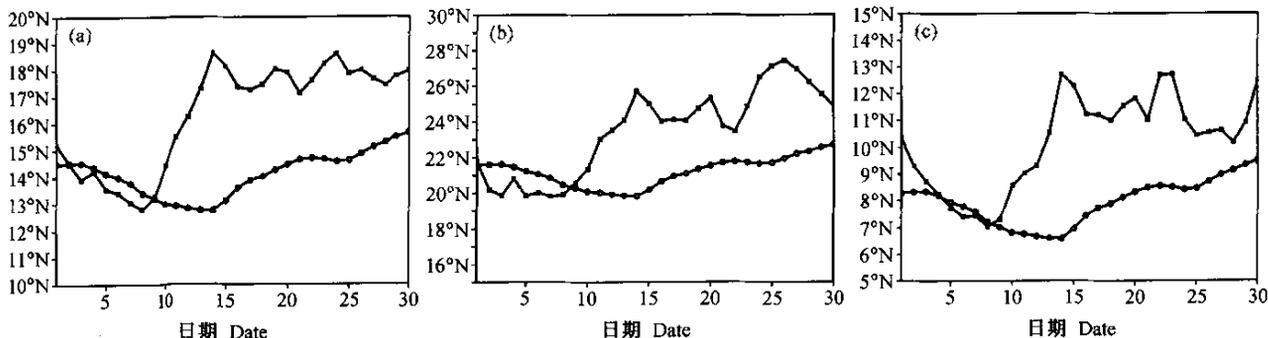


图 2 2002 年 4 月 1~30 日纬向平均的分析和模拟的北半球副高脊面位置：(a) 整层平均；(b) 0.7~0.9 层平均；(c) 0.1~0.3 层平均；实心圆线为分析值，空心圈线为模拟值

Fig. 2 The zonal mean of daily SHRS location in the Northern Hemisphere in April 2002 : (a) All sigma levels averaged ; (b) 0.7 - 0.9 sigma levels averaged ; (c) 0.1 - 0.3 sigma levels averaged. The closed circle curve stands for analysis and the open circle for simulation

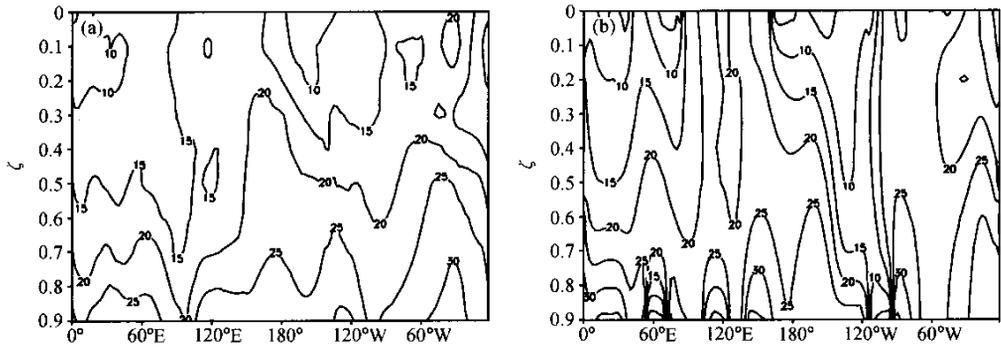


图3 2002年11月平均的分析(a)和模拟(b)的北半球副高脊面位置(单位:纬度)

Fig. 3 The monthly mean of SHRS location in the Northern Hemisphere (a) analyzed from NCEP data and (b) simulated by the model in November 2002 (units : degrees of latitude)

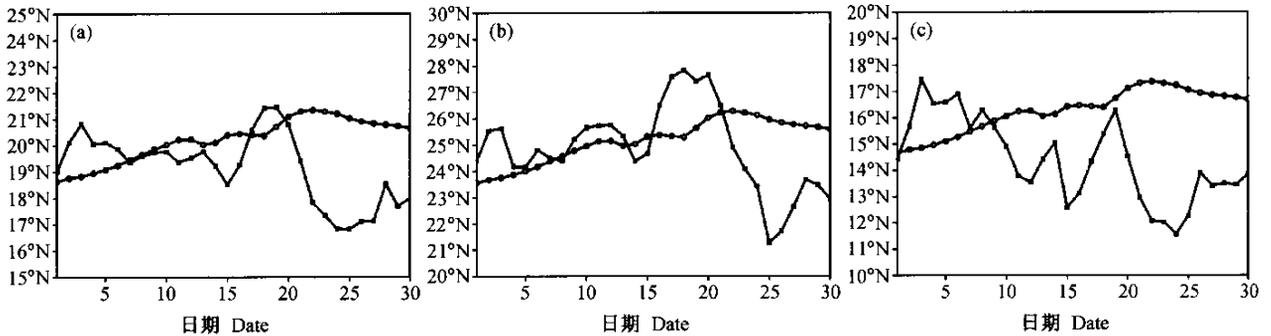


图4 2002年11月1~30日纬向平均的分析和模拟的北半球副高脊面位置:(a)整层平均;(b)0.7~0.9层平均;(c)0.1~0.3层平均;实心圆线为分析值,空心圆线为模拟值

Fig. 4 The zonal mean of daily SHRS location in the Northern Hemisphere in November 2002:(a) All sigma levels averaged;(b) 0.7-0.9 sigma levels averaged;(c) 0.1-0.3 sigma levels averaged. The closed circle curve stands for analysis and the open circle for simulation

4.2 影响因子

副高脊面模型的一个优点,就是能直接诊断出不同物理因子对脊面变化的贡献情况,2002年4月的脊面变化是先向南后向北,而11月则基本上先向北后向南,考察形成这两种不同移动类型的动力影响因素,对于深入认识脊面变化的物理过程是很有帮助的。下面给出这两个月副高脊面南北移动影响因子的变化情况。我们知道,由于常数权重函数的使用,方程(10)右端 R_2 和 R_4 贡献于脊面的形状改变,其余各项则贡献于脊面的位置移动,而按照前面分析,模拟脊面倾向于整体一致移动,试验也表明, R_2 和 R_4 的贡献要比其他各项小1个量级,因此,这里只给出 R_1 , R_3 , R_5 和 R_6 的逐日变化情况(如图5所示)。

可以看到,脊面两侧总角动量差的个别导数在不同月份具有不同特征,4月脊面总体上向北移动, R_1 基本为负,11月总体上向南移动, R_1 基本上为正,且其波动变化的位相几乎都与山脉力矩项的变化相反,而摩擦力矩项对脊面变化则基本都为负贡献,与

山脉和摩擦力矩有关项的贡献都是大项,前者振荡较大,后者相对平稳;另一个显著特征是,无论是4月还是11月,当脊面向南移动时,赤道通量项为正,而脊面向北移动时,赤道通量项为负,而且,这种对应关系在脊面移动突然转向的过程中有更为明显的体现。另外,对应于通过脊面的地转角动量输送以及由脊面自身而产生的形变的两项(R_2 和 R_4),由于量值相对较小,而且脊面上各点分布差别较大,这里没有进行比较分析。

5 总结与讨论

本文发展了一个描述副热带高压脊面变化的动力模型。这一模型基于大气环流角动量的守恒原理,得到了作为东、西风交界面的副高脊面所满足的动力方程,使得副高脊面直接成为预报量,因此,该模型具有研究对象的特殊性和明确的动力学意义,便于进行脊面变化的物理影响因素研究。为了考察理论模型的可行性,并逐步分解模型数值方案的实施难度,进一

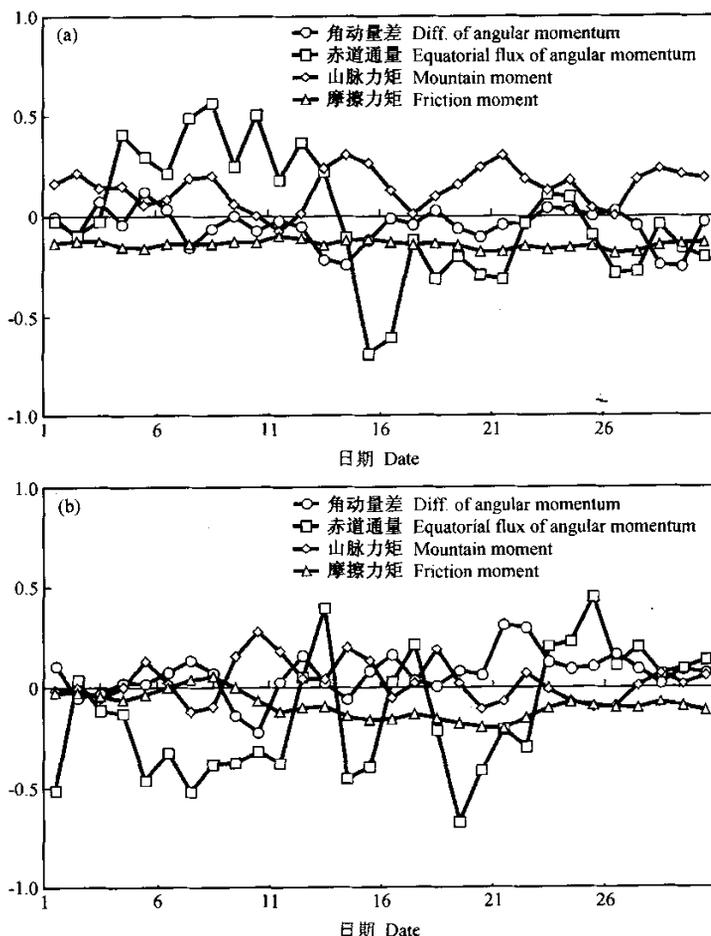


图5 2002年4月(a)和11月(b)的北半球副高脊面影响因子的逐日变化情况, 纵坐标单位: 10^{-4} rad

Fig. 5 The variation of factors affected SHRS location in the Northern Hemisphere in (a) April and (b) November 2002. Units of y-axis: 10^{-4} rad

步建立了模型的简化方案, 在权重函数为常数的假设下进行了初步试验。

试验结果显示, 副高脊面形态的时空变化基本能够模拟出来, 主要表现在脊面的南北移动和倾斜特征, 说明模型简化方案具有一定的模拟能力, 而且三维积分格式的采用使得模拟结果比较平稳, 过滤掉了高频噪音。简化方案的试验表明, 依据副高脊面的动力模型, 确实能够直接计算脊面的变化(移动和形变), 并可以定量考察影响脊面变化动力因子的贡献情况。本文对于权重函数所采取的简化处理, 必然会影响到模拟脊面变化的性能, 因此, 进一步求解出权重函数, 将是十分必要和关键的, 这是我们正在进行的工作。

参考文献

[1] 叶笃正, 杨大升. 北半球大气角动量的年变化和它的输送机

制. 气象学报, 1955, 26 (4): 281 ~ 294

Yeh Tu-Cheng, Yang Ta-Cheng. The annual variation of the atmospheric angular momentum of Northern Hemisphere and the mechanism of its transfer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1955, 26 (4): 281 ~ 294

[2] 叶笃正, 朱抱真. 大气环流的若干基本问题. 北京: 科学出版社, 1958, 159pp

Yeh Tu-Cheng, Zhu Bao-Zhen. *Some Fundamental Problems on General Circulation of Atmosphere* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1958, 159pp

[3] 莫宁 A C. 天气预报——一个物理学的课题. 林本达, 王绍武译. 北京: 科学出版社, 1981

Monin A C. *Weather Forecast-A Physical Problem* (in Chinese). Translated by Lin Benda, Wang Shaowu. Beijing: Science Press, 1981

[4] 黄土松, 余志豪. 副热带高压结构及其同大气环流有关若干问题的研究. 气象学报, 1961, 31 (4): 339 ~ 359

Hwang S S, Yu Zhi-Hao. The structure of subtropical high and some research related with atmospheric circulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1961, 31 (4): 339 ~ 359

- [5] 陶诗言,徐淑英. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征. 气象学报, 1962, **32** (1): 1~10
Dao Shih-Yen, Hsu Shu-Ying. Some Aspects of the circulation during the period of the persistent drought and flood in Yantze and Hwai-Ho valleys in summer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1962, **32** (1): 1~10
- [6] 陶诗言,徐淑英,郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向流型的特征. 气象学报, 1962, **32** (2): 91~103
Dao Shih-Yen, Hsu Shu-Ying, Kuo Chi-Yunn. The characteristics of the zonal and vertical circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1962, **32** (2): 91~103
- [7] 陶诗言,朱福康,吴天祺. 夏季中国大陆及其邻近海面副热带高压活动的天气学研究. 见:陶诗言编,中国夏季副热带天气系统若干问题的研究. 北京:科学出版社,1963,106~123
Tao Shiyang, Zhu Fukang, Wu Tianqi. Synoptic research on activities of subtropical high over Chinese continent and its contiguous ocean in summer. *Some Studies on Subtropical Synoptic Systems over China in Summer* (in Chinese), Tao Shiyang, Ed. Beijing: Science Press, 1963, 106~123
- [8] 黄士松. 副热带高压东西向移动及其预报的研究. 气象学报, 1963, **33** (3): 320~332
Hwang, S.S. A study of the longitudinal movement and its forecasting of subtropical anticyclone. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1963, **33** (3): 320~332
- [9] 刘屹岷,吴国雄. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识. 气象学报, 2000, **58** (4): 500~512
Liu Yimin, Wu Guoxiong. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (4): 500~512
- [10] 陈兴芳,赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京:气象出版社,2000,241pp
Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. *Researches on Precipitation Prediction of Flood Season and Its Applications in China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000, 241pp
- [11] 丑纪范,徐明. 短期气候数值预测的进展和前景. 科学通报, 2001, **46** (11): 890~895
Chou Jifan, Xu Ming. Advancement and prospect of short-term numerical climate prediction. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46** (11): 1497~1502
- [12] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京:气象出版社,2001,141~158
Wang Shaowu. *The Evolution on Modern Climatology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001, 141~158
- [13] 洛伦兹 E.N. 混沌的本质. 刘式达等译. 北京:气象出版社,1997,174
Lorenz E.N. *The Essence of Chaos* (in Chinese). Translated by Liu Shida, et al. Beijing: China Meteorological Press, 1997, 174
- [14] 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础. 北京:科学出版社,1977
Zeng Qingcun. *The Physical-Mathematical Basis of Numerical Weather Prediction* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1977
- [15] 张培群. 副热带高压脊线位置移动的动力学方程及其诊断研究. 兰州大学大气科学系博士学位论文,1997
Zhang Peiqun. Dynamical equations for the movement of subtropical high ridge-line location and its diagnosis. Ph. D. dissertation, Lanzhou University, 1997
- [16] 吴国雄,丑纪范,刘屹岷,等. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京:科学出版社,2002,270~294
Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. *Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclone* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002, 270~294
- [17] 毛江玉,吴国雄,刘屹岷. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究 I: 副高结构的气候学特征. 气象学报, 2002, **60** (4): 400~408
Mao Jiangyu, Wu Guoxiong, Liu Yimin. Study on model variation of subtropical high and its mechanism during seasonal transition, Part I: Climatological features of subtropical high structure. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 400~408