

文章编号: 1004-4965(2010)04-0429-09

基于副高-季风非线性动力模型的動力特性讨论与机理分析

余丹丹¹, 张韧², 洪梅², 程亮¹

(1. 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100081; 2. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

摘 要: 基于 NCEP/NCAR 再分析资料, 依据动力系统反演思想, 采用遗传算法从 1998 年实际观测资料中, 客观合理地反演重构了副高特征指数与东亚夏季风因子的非线性动力模型, 并结合 1998 年天气实况, 讨论了模型中外参数的变化对副高系统平衡态失稳和分岔的影响。从而为副高等难以准确构建动力模型的复杂天气系统的物理机理分析和动力行为讨论, 提供了有益的研究思想和方法手段。研究发现, 副高指数平衡态的分布和变化与实际副高的中短期异常活动相对应, 副高系统由高值稳定平衡态向低值稳定平衡态跳跃的突变行为对应副高的异常南落过程, 副高系统由双稳定平衡态向单稳定平衡态并入的分岔行为对应副高“双脊线”并存到消失的过程。

关 键 词: 天气学; 非线性动力模型; 遗传算法; 副热带高压

中图分类号: P434.5

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2010.04.006

1 引 言

西太平洋副热带高压(下文简称副高)是东亚夏季风系统的重要成员, 与季风环流相互作用、互为反馈, 共处于非线性系统之中, 其异常活动常常导致我国江淮流域出现洪涝和干旱灾害。如 1998 年 8 月长江流域特大洪涝灾害是由于副高的异常南落所致。可以说, 每一年副高的季节性转换都有不同特点, 特别是副高形态突变与异常进退是一个极为复杂的过程, 因此, 建立“精确”的副高-季风非线性动力模型(非线性微分方程组)非常困难, 而从实际年份副高及其影响因子的时间序列资料中反演副高动力学模型是对副高异常活动和形态变异进行机理研究和动力行为分析的有益探索。

为此, 本文拟在相关研究工作的基础上^[1-2], 基于副高与季风系统的诊断事实, 选取副高活动异常年份的观测资料, 计算副高及与之相关密切的季风系统成员的特征指数; 运用系统优化理论对其进行副高与季风系统的非线性动力模型反演和模型参数优化研究; 对反演所得的副高-季风动力学模型进

行动力系统的平衡态与稳定性分析和外参数导致的分岔、突变等动力行为讨论。

2 资料与方法

2.1 资料说明

选取 NCEP/NCAR 提供的副高活动异常年份(1998 年)和多年平均的 4—10 月逐日再分析资料以及对应的 NOAA 卫星观测的全球逐日 OLR 资料, 水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

2.2 动力系统重构原理

Takens 在其相空间重构理论中阐述和证明了从观测资料时间序列中重构动力系统的基本思想, 认为系统中任一分量的演化是由与之相互作用的其他分量所决定, 因此这些相关分量的信息隐含在任一分量的发展过程中^[3]。

设任一非线性系统随时间演变的物理规律可表示为,

$$\frac{dq_i}{dt} = f_i(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

函数 f_i 为 $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N$ 的广义非线性函

收稿日期: 2008-12-21; 修订日期: 2009-04-09

基金项目: 江苏省气象灾害重点实验室开放课题(KLME0507); 热带海洋气象科学基金(200609); 国家自然科学基金资助项目(40375019)共同资助

通讯作者: 余丹丹, 女, 湖北省人, 工程师, 博士, 主要从事热带海洋天气学的研究。yyllyc@126.com

数, N 为状态变量个数, 一般可根据动力系统吸引子的复杂性 (可通过计算其分维数来衡量) 来确定。方程 (1) 差分形式可写成,

$$\frac{q_i^{(j+1)\Delta t} - q_i^{(j-1)\Delta t}}{2\Delta t} = f_i(q_1^{j\Delta t}, q_2^{j\Delta t}, \dots, q_i^{j\Delta t}, \dots, q_N^{j\Delta t}) \quad (2)$$

($j = 2, 3, \dots, M-1$)

其中 M 为观测资料的时间序列长度, 模型参数和系统结构可以通过反演计算从观测数据中获取。

$f_i(q_1^{j\Delta t}, q_2^{j\Delta t}, \dots, q_i^{j\Delta t}, \dots, q_N^{j\Delta t})$ 为未知非线性函数, 可写成 $f_i(q_1, q_2, \dots, q_n) = \sum_{k=1}^K G_{jk} P_{ik}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, M$, $k = 1, 2, \dots, K$ 。式 (2) 的矩阵形式为 $D = GP$, 其中,

$$D = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_M \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{q_1^{3\Delta t} - q_1^{\Delta t}}{2\Delta t} \\ \frac{q_1^{4\Delta t} - q_1^{2\Delta t}}{2\Delta t} \\ \vdots \\ \frac{q_1^{M\Delta t} - q_1^{(M-2)\Delta t}}{2\Delta t} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

$$G = \begin{Bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1K} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2K} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ G_{M1} & G_{M2} & \dots & G_{MK} \end{Bmatrix}, \quad P = \begin{Bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ \vdots \\ P_{1K} \end{Bmatrix}$$

上述广义的未知方程组的系数项可通过实际观测数据予以反演确定。给定一个向量 D , 要求一个向量 P 使上式满足。对于 q_i 而言, 这是一个非线性系统, 但是我们换个角度, 对 P 而言, 上式正好是一个线性系统, 可以用经典的最小二乘法估计, 使残差平方和 $S = (D - GP)^T (D - GP)$ 最小, 进而得到正则方程 $G^T G P = G^T D$ 。由于 $G^T G$ 经常是奇异矩阵, 所以可将其特征值与特征向量求出, 剔除其中零值点, 剩下 K 个 $l_1, l_2, \dots, l_i$ 组成对角矩阵 Λ_k 与相应的 K 个特征向量组成的特征矩阵 U_L 。 $V_L = G U_L / l_i$, $H = U_L \Lambda^{-1} V_L^T$, 再求参数 $P = HD$ 。

基于上述方法途径, 即可反演确定出非线性动力系统诸系数, 进而得到对应观测数据序列的非线性动力学方程组。

2.3 遗传算法运算流程

基于 2.2 节动力模型反演的基本思想, 以保持残差平方和 $S = (D - GP)^T (D - GP)$ 最小作为约束条件, 利用遗传算法的全局搜索和并行计算优势, 在参数空间中作最优参数搜索。遗传算法搜索得到的目标函数最小的进化种群即为非线性动力方程组的

最优系数解。具体计算原理和详细说明可参阅文献 [4], 不再赘述。文献 [5] 通过比较采用遗传算法与最小二乘估计所得的 Lorenz 模型参数的反演结果, 得出遗传算法不仅计算快捷、操作方便, 而且反演参数更精确地接近模型真值, 反演效果优于常规的最小二乘估计。因此本文将该研究思想和技术途径移植应用于从观测资料中反演重构实际的副高-季风非线性动力模型。

3 副高-季风指数的非线性动力模型反演

3.1 样本年份的选取

在讨论影响夏季副高的中、短期变化和导致副高活动异常 (突变) 的非线性机理和外部强迫因素之前, 先对典型副高活动个例进行筛选。参照中央气象台 [6] 定义的副高特征指数, 计算并绘制了 1980—2007 年夏半年 (5—10 月) 副高各个特征参数逐月演变 (图略), 图上各年副高的逐月变化千差万别, 个别年份可出现连续几个月的“异常”变动, 其中最突出的是 1998 年, 副高面积指数都在均值以上, 副高西脊点指数都在均值以下, 其中 5、6 和 8 月均是 28 年的极值, 表明该年副高范围最广、强度最强且位置明显偏西。该年副高脊线只有 5、7 和 8 月偏南明显, 其他月份偏北。有研究表明 1998 年 7 月副高经历了异常的变化过程, 长江中、下游地区出现了“二度梅”, 且在“一度梅”结束、“二度梅”形成之前的梅雨间歇期, 副高出现了“双脊线”现象 [7]。可见, 1998 年夏半年, 副高在整体偏强偏西的情况下, 7 月位置偏南, 中短期变化明显, 故选择该年夏季副高的异常变化过程作为研究个例。

3.2 影响制约副高活动的因子选取

基于副高与东亚夏季季风系统的诊断研究 [8-9], 可知副高的强度变化和进退活动与东亚季风环流、南亚高压、热带对流及南半球环流的关系最密切, 这里综合考虑了影响副高活动的季风系统成员及热力、环流因子的物理意义, 选择若干重要区域夏季风系统要素格点平均值作为副高-季风动力系统的模型备选因子: (1) 南亚高压东西位置指数: 参考杨辉等 [10] 的定义, 选取 200 hPa 上, 120°~140°E, 25°~35°N 区域内的平均涡度值来衡量南亚高压东端变化。(2) 东亚季风指数: 根据陶诗言等 [11] 的定义, 计算 850 hPa 上, 100°~150°E, 10°~20°N 区

域的平均的纬向风减去 $100 \sim 150^\circ\text{E}$, $25 \sim 35^\circ\text{N}$ 区域的平均纬向风, 以此来描述东亚季风的强弱。(3) 孟加拉湾对流指数: 选取 $85 \sim 105^\circ\text{E}$, $10 \sim 20^\circ\text{N}$ 区域的平均 OLR 值来表示该地区的对流活跃程度。(4) 热带 ITCZ 对流指数: 选取 $120 \sim 150^\circ\text{E}$, $10 \sim 20^\circ\text{N}$ 区域的平均 OLR 值来表示该地区的对流活跃程度。(5) 马斯克林高压强度指数: 选取 $40 \sim 90^\circ\text{E}$, $25 \sim 35^\circ\text{S}$ 区域的平均海平面气压值来表征马斯克林高压的强度。描述副高南北异常活动则采用中央气象台定义的副高脊线指数。为了对应南亚高压东西位置指数, 以 500 hPa 上, $115 \sim 140^\circ\text{E}$, $20 \sim 30^\circ\text{N}$ 区域内的平均涡度值来描述副高东西异常活动, 当该区域负涡度值增大(减小), 副高西伸(东撤)。

考虑到 4 月季风开始活跃, 而副高减弱撤退要到 10 月以后, 故选取 1998 年 4 月 1 日—10 月 31 日的逐日资料, 对副高特征指数与上述备选因子进行相关计算, 表 1 中相关系数均达到 95% 的信度要

求, 按照相关系数大于 0.5 (表中加粗) 的原则, 分别选取两组副高-季风指数模型因子, 第一组为副高脊线指数、孟加拉湾对流指数和热带 ITCZ 对流指数, 第二组为副高东西位置指数、南亚高压东西位置指数和东亚季风指数。下文将分别对这两组指数序列进行反演, 积分步长为 1 天。

表 1 副高与季风系统成员特征指数的相关分析

特征指数	副高脊线指数	副高东西位置指数
南亚高压东西位置指数	-0.21	0.54
东亚季风指数	0.15	0.75
孟加拉湾对流指数	-0.51	-0.23
热带 ITCZ 对流指数	-0.50	-0.33
马斯克林高压强度指数	0.29	0.24

3.3 动力学模型参数的反演

设拟反演的非线性动力模型有如下基本形式,

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14}x^2 + a_{15}y^2 + a_{16}z^2 + a_{17}xy + a_{18}xz + a_{19}yz + a_{21}x^3 + a_{22}y^3 + a_{33}z^3 \\ \frac{dy}{dt} = b_{11}x + b_{12}y + b_{13}z + b_{14}x^2 + b_{15}y^2 + b_{16}z^2 + b_{17}xy + b_{18}xz + b_{19}yz + b_{21}x^3 + b_{22}y^3 + b_{33}z^3 \\ \frac{dz}{dt} = c_{11}x + c_{12}y + c_{13}z + c_{14}x^2 + c_{15}y^2 + c_{16}z^2 + c_{17}xy + c_{18}xz + c_{19}yz + c_{21}x^3 + c_{22}y^3 + c_{33}z^3 \end{cases} \quad (4)$$

选取第一组数据, 以 x 、 y 、 z 分别代表副高脊线指数、孟加拉湾对流指数和热带 ITCZ 对流指数。基于上述遗传算法的动力系统重构理论和 1998 年 4—10 月的逐日观测资料, 从上述三个指数序列中

反演得到副高脊线-季风非线性动力模型中的各项参数, 计算和比较模型中各项对系统的相对方差贡献, 综合分析并剔除对模型影响小的虚假项, 得到描述副高南北活动的非线性动力模型方程组,

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -3.0002x + 6.3725y - 3.9525z - 0.21222x^2 - 0.047041y^2 + 0.015239z^2 + 0.027802xz + 0.0028872yz \\ \quad + 0.00014068y^3 - 2.701 \times 10^{-5}z^3 \\ \frac{dy}{dt} = 12.19y - 16.848z - 0.06847y^2 + 0.13687z^2 + 0.0001721y^3 - 0.00046424z^3 \\ \frac{dz}{dt} = 5.9559y - 15.738z + 0.13331z^2 - 0.013225yz - 0.00041554z^3 \end{cases} \quad (5)$$

同理, 选取第二组数据, 以 x 、 y 、 z 分别代表副高东西位置指数、南亚高压东西位置指数和东亚

季风指数。可得到描述副高东西活动的非线性动力模型方程组,

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -0.062083x - 0.068652z - 25225x^2 + 16820z^2 + 25645xz - 3.2079 \times 10^9x^3 + 4.4698 \times 10^8z^3 \\ \frac{dy}{dt} = -71384x + 0.086699y - 1.3068 \times 10^5z - 2.4111 \times 10^{10}x^2 - 4.6485 \times 10^9z^2 + 5.62 \times 10^{10}xz - 26073yz \\ \quad - 9.6771 \times 10^{14}x^3 + 5.2948 \times 10^{14}z^3 \\ \frac{dz}{dt} = 0.28476x - 0.38846z + 13998x^2 + 11628z^2 - 9754.3xz + 3.5169 \times 10^8z^3 \end{cases} \quad (6)$$

分别对两组反演模型进行积分预报试验, 通过设定真实的预报初值(从指数序列中选取), 对模型的时间差分值进行数值拟合积分。各项指数的拟合值和实际值的相关系数都超过 0.5, 这说明上述反演模型基本能客观描述实际副高和季风系统。

3.4 平衡态稳定性的判别

动力系统的奇点(平衡态)是描述该动力系统的方程组不随时间变化的一组解, 奇点的稳定性对应于动力系统的稳定性。对于副高等大尺度天气系统, 当其处于相对稳定的准定常状态时, 其动力模式中的时间变化项为小值, 以副高脊线的模型方程组(5)为例, 这时方程组左边项可近似为零, 通过解常微

系统的平衡态方程组求得系统的奇点,并依据导算子矩阵特征值的性质来讨论其平衡态稳定性。

如计算求得副高脊线模型方程组(5)的二组奇点分别为 $(-14.137, 254.61, -54.82)$ 和 $(25.73, 267.97, 240.9)$ 。根据平衡态稳定性的判别理论^[12],可知前者为鞍点,是不稳定奇点(副高脊线为 -14.137 位于南半球的形态是难以维持的,实际情况亦是如此);后者为稳定结点(25.73°N 正好是副高第二次北跳后江南梅雨期间相对稳定的形势,与实际副高活动情况基本符合)。

4 1998年夏季的天气事实

4.1 副高变异特征分析

图1是经过3天平滑后的逐日副高脊线指数和副高东西位置指数的变化曲线,4—10月副高共有3次明显的北跳(箭头所示);若以负涡度开始增大为西伸日,副高还有2次明显的西进,分别为6月中旬—6月底和7月底—8月中旬(箭头所示)。前面指

出1998年副高变化异常主要发生在5—8月,故通过考察 110°E 、 120°E 和 130°E 的586 dagpm线的演变,重点分析在此期间副高南北和东西变化特征。

(1) 南北变化特征。图2是1998年5—8月,沿 110°E 、 120°E 和 130°E 的586 dagpm线纬度-时间分布(实线),用来表征副高的北跳和南撤,长虚线为多年平均值,图中阴影区表示 OLR 距平 $\leq -20 \text{ W/m}^2$ 的纬度-时间分布,表示热带强对流活动区以及对流降水区的位置。图2清楚地再现了7月中旬副高突然大幅度从长江流域南撤的过程(箭头所示),从 130°E 到 110°E 每隔10个经度的副高脊南落日依此之间相差大约2天,可见副高异常从主体开始,由东向西最终影响到我国大陆东岸。在我国江南和长江中下游地区(120°E),整个5月副高586 dagpm线位置明显偏北,此时南海季风爆发, 10°N 附近有强对流活动中心生成。6月初—6月第4候,副高稳定位于 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间,这时对流降

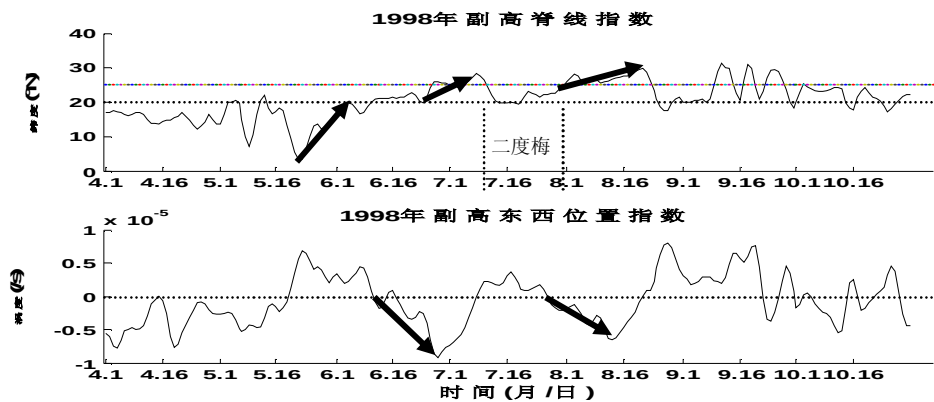


图1 1998年4—10月逐日副高脊线以及副高东西位置指数的变化 纵坐标为纬度。

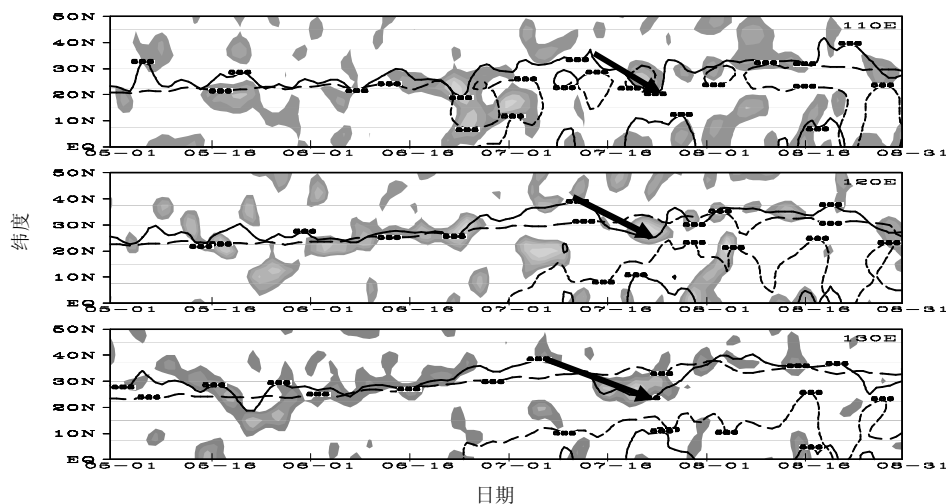


图2 1998年5—8月逐日沿 110°E 、 120°E 和 130°E 586 dagpm 特征线纬度-时间剖面

水维持在华南-江南南部。6 月第 5 候开始, 副高迅速北跳至 25°N 左右, 这时江淮流域进入梅雨期。随后, 副高继续北抬, 7 月上旬超过 30°N , 第一阶段梅雨结束。从 7 月 13 日起, 副高 586 dagpm 线突然南撤至 25°N 以南, 长江中下游进入“二度梅”阶段。8 月 1 日以后, 副高再次北跳, 长江中下游第二次梅雨结束, 雨带移至华北地区。

(2) 东西变化特征。图 3 是同期沿 20°N 、 25°N 和 30°N 平均的 500 hPa 位势高度经度-时间剖面, 以表征副高西伸和东退过程, 阴影区由浅至深表示位势高度大于 586 和 588 dagpm 区域, 长虚线为多年平均的 586 dagpm 线。可见副高位置明显偏西, 在长江流域一带 (30°N), 副高出现两次明显西伸和一次东撤过程, 6 月下旬—7 月中旬副高一直伸展到 120°E 或以西地区, 7 月中旬副高东退, 8 月中下旬副高更是伸及近 90°E 地区。在 25°N 以

南, 副高多次伸到 100°E 以西地区。

总之, 1998 年副高总体偏强、偏西。副高的南北进退活动出现显著异常, 尤其是 7 月中旬, 副高突然大幅度南撤, 之后副高偏南持续维持至 8 月初。副高西伸过程增多, 最显著的有两次 (6 月中旬—6 月底、7 月底—8 月中旬), 期间副高东退正好与副高南撤过程相对应。

4.2 季风因子的异常特征

(1) 孟加拉湾和热带 ITCZ 对流活动。图 4 给出非绝热加热活动与副高短期变异的局部对应关系。图中热带 ITCZ 地区 ($120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 对流的 3 次增强与副高的 3 次起跳时间吻合 (箭头方向), 此外 7 月中旬孟加拉湾地区 ($85^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$) 对流减弱正好对应副高异常偏南、偏东的时段, 以上事实说明热带 ITCZ 活跃有利于副高北上、西进, 孟加拉湾对流活跃则通过纬圈环流使副高加强西伸。

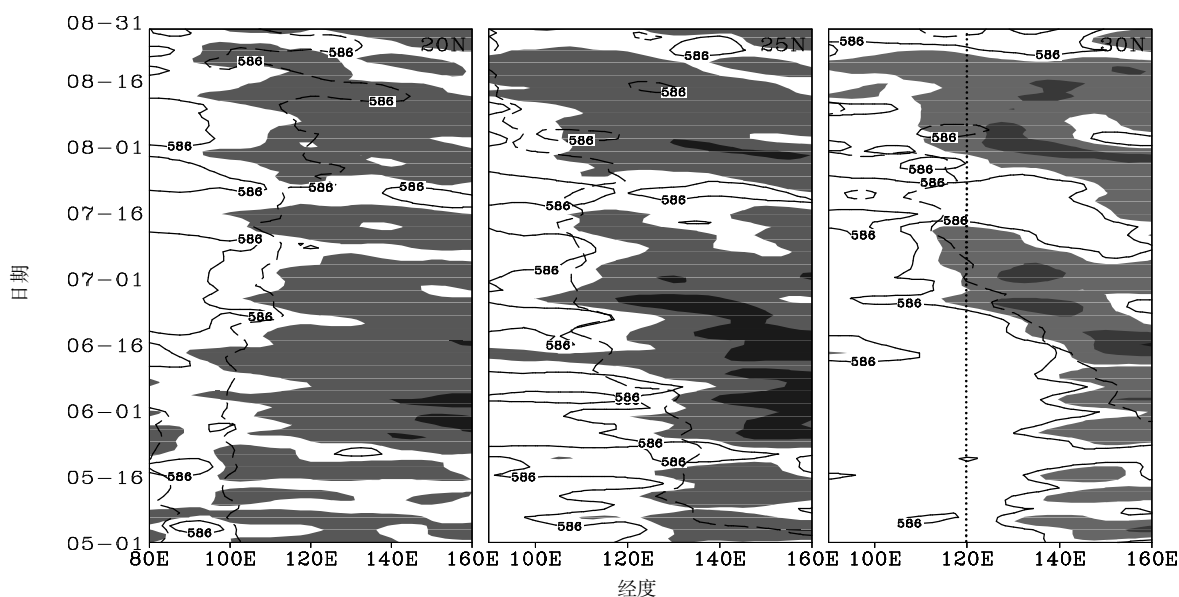


图 3 1998 年 5—8 月逐日沿 20°N 、 25°N 和 30°N 500 hPa 位势高度 (单位: dagpm) 经度-时间剖面

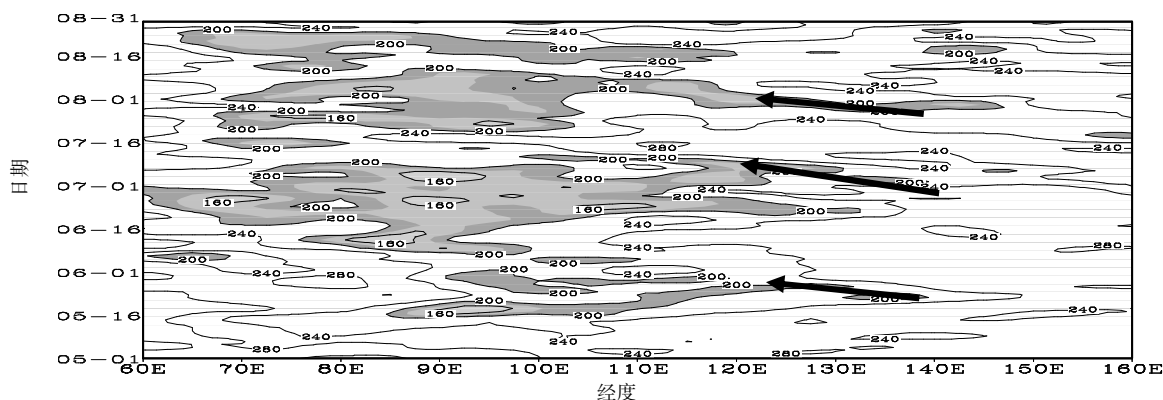


图 4 1998 年 5—8 月逐日 OLR (单位: W/m^2) 沿 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 平均的经度-时间剖面

(2) 南亚高压。图 5 是 1998 年 5—8 月 200 hPa 和 500 hPa 高度场、涡度场的经度-时间剖面, 反映了南亚高压和副高的演变, 图中实线为等高线, 200 hPa 和 500 hPa 上阴影区由浅到深分别表示涡度小于 $-3 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ 和 $-4 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ 、涡度小于 $-1 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ 和 $-2 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ 的区域。在 5 月底—6 月中旬期间, 500 hPa 上太平洋中部副热带地区 (140~180 °E) 有一片明显的负涡度区, 对应高层 200 hPa 上也出现向东伸展的负涡度区。6 月中旬副高第一次西伸, 伴随着负涡度西移, 此时南亚高压东伸, 负涡度东移 (图中箭头方向)。无论是副高 7 月中旬的东退过程, 还是 8 月初的西伸过程, 南亚高压与副高都表

现出很好的“相向而进、相背而退”的特征。因此南亚高压的异常东伸和相应的负涡度东传可能是导致 1998 年夏季副高异常西伸的重要原因。

(3) 东亚季风。图 6 为 1998 年沿 100~150 °E 平均的 850 hPa 纬向风纬度-时间剖面, 反映了东亚季风的强弱变化。从图 6 中可以看出, 1998 年夏季的低纬地区盛行东风, 西风明显偏弱, 从东西风切变线的走向可以发现 2 次西风北抬的过程 (箭头方向) 与副高 2 次西进过程基本吻合, 而 7 月中旬, 低纬地区西风增强, 正好对应副高异常偏南、偏东的时段。因此, 1998 年东亚季风减弱可能是副高异常西伸的原因之一。

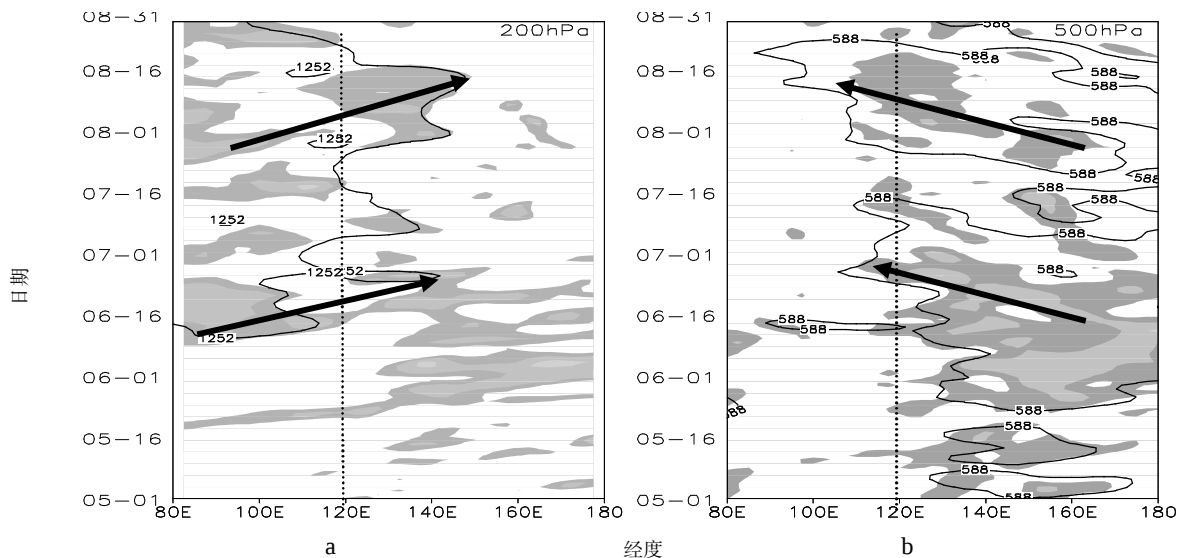


图 5 1998 年 5—8 月逐日 200 hPa 上沿 25~35 °N (a) 和 500 hPa 上沿 20~30 °N (b) 平均的位势高度 (单位: dagpm) 及涡度 (单位: s^{-1}) 经度-时间剖面

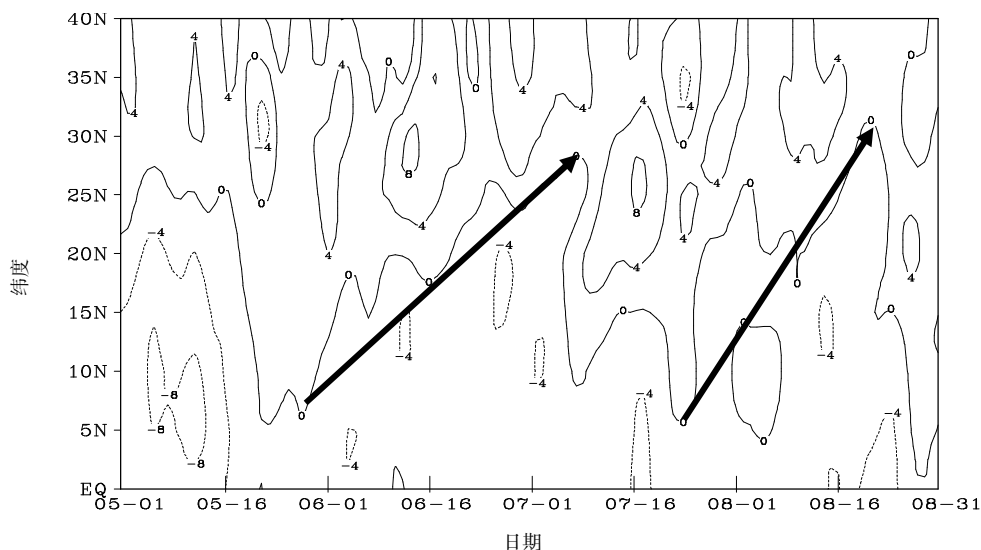


图 6 1998 年 5—8 月逐日沿 100~150 °E 平均的 850 hPa 纬向风 (单位: m/s) 纬度-时间剖面

5 模型动力特性讨论与副高异常机理的解释

将方程组(5)和(6)的时间变化项(左边项)取为零,即得到描述副高南北(脊线)和东西(西脊点)进退活动的动力学平衡态方程组,采用数值求解的方法,改变方程组某一参数值,讨论上述平衡态方程组的平衡态的分布和变化,可以大致反映副高准定常系统随外参数的演变情况。

5.1 外参数对副高脊线模型平衡态的影响

先以描述副高南北活动的非线性动力模型方程组(5)为例,讨论不同的参数对副高脊线平衡态的影响,方程组里的参数比较多,这里选取几个有代表性的参数 b_{12} 、 b_{13} 、 c_{13} 来进行讨论。根据前面对平衡态稳定性的判断,计算并绘制副高脊线平衡态随 b_{12} 、 b_{13} 、 c_{13} 的演变图(图7),图中实线表示稳定平衡态,虚线为不稳定平衡态。

图7a反映了模型参数 b_{12} 对副高脊线平衡态的影响,副高脊线平衡态随 b_{12} 增加到约-2.5时出现分岔,由单解变为三个解,即在分岔点前后,系统由单平衡态变为多平衡态,分岔前的单平衡态解是不稳定的,分岔后的多平衡态解中只有一个高值平衡态是稳定的;当 b_{12} 继续增加到0时左右,系统又由

三个平衡态变为单一的稳定平衡态,且随着 b_{12} 继续增大出现较明显的北抬;当 b_{12} 增至4时,平衡态变得不稳定,且随着 b_{12} 继续增大出现比较明显的下降;当 b_{12} 增至6时,平衡态又由不稳定变为稳定,在 $6 < b_{12} < 12$ 时,稳定状态维持且有上升趋势。图中稳定平衡态的取值范围与副高脊线实际位置相符,脊线稳定平衡态由 $5 \sim 20^\circ\text{N}$ 、 $20 \sim 30^\circ\text{N}$ 和 $25 \sim 35^\circ\text{N}$ 的三次由南向北的跃升过程(实线箭头所示)与图2中副高脊线的3次北跳类似,而且图中由一个稳定的高值平衡态突降至一个稳定的低值平衡态(虚线箭头所示)也与图2中副高的“异常南落过程”相匹配。因此, b_{12} 可能是一个影响制约副高南北活动的重要因子(遗憾的是该因子的物理意义尚难以辨别,这也是反演模型的不足之处),当该参数超过某临界值时,副高系统出现的上述平衡态转换和跳跃过程,可较为贴切地描述和解释1998年夏季副高活动,特别是副高异常南落的天气事实。

图7b反映了模型参数 b_{13} 对副高脊线平衡态的影响,图中最明显的特征是南北各有一个稳定的平衡态,且都随 b_{13} 的增大而缓慢上升,这表明在适当的外强迫作用或物理因子作用下,副高南北两个平衡态共存的状态,可较为合理地应用于1998年夏季副高“双脊线”现象的特征表述和机理解释。

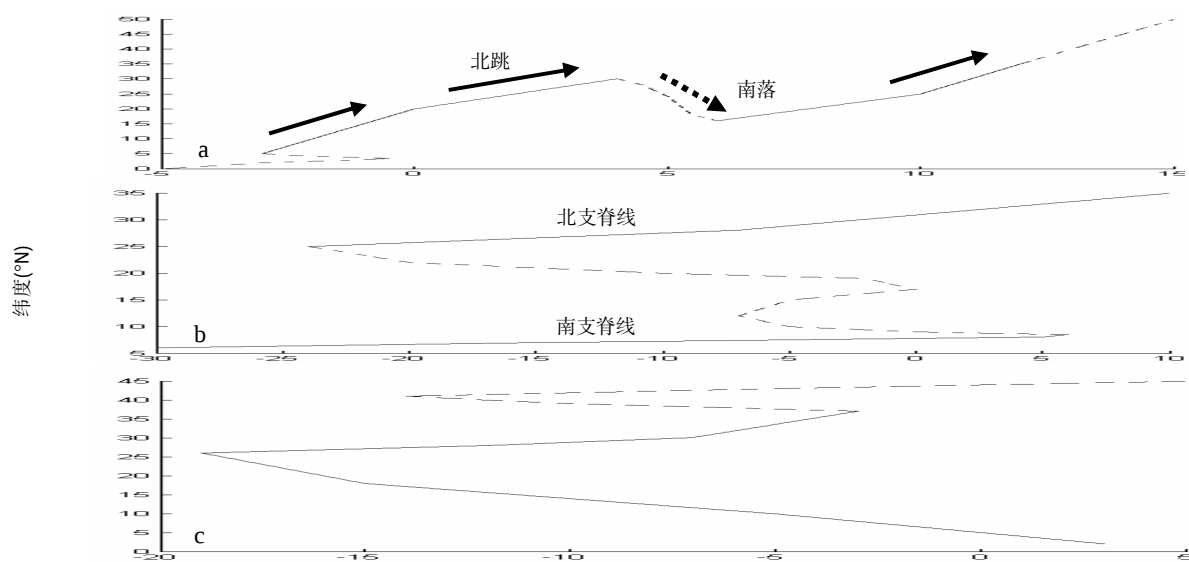


图7 副高脊线平衡态随外参数 b_{12} (a)、 b_{13} (b)、 c_{13} (c)的分布 实线表示稳定平衡态,虚线为不稳定平衡态。

图7c反映了模型参数 c_{13} 对副高脊线平衡态的影响,当 $c_{13} > -4$ 时,副高脊线存在两个平衡态,其中处于低纬的平衡态是稳定的;副高脊线平衡态随

c_{13} 减小到约-4时出现分岔,由双解变为4个解,分岔后的多平衡态解中处于 35°N 以北的两个高值平衡态是不稳定的,事实上副高脊线在这样的纬度上

也不易稳定维持,处于中低纬的2个低值平衡态是稳定的,其中偏南的稳定平衡态随 c_{13} 减小而上升,而偏北的稳定平衡态随 c_{13} 减小而下降,最终两个平衡解汇入单平衡解之中。上述结果刻画了外参数减小到某临界值时,副高从双稳定平衡态变为单稳定平衡态的过程,对应1998年副高活动,上述平衡态随 c_{13} 参数的演变、分岔和稳定性变化的特征,可用于表现和描述副高由南北两侧脊线并存到双脊线消失,恢复为单脊线过程的天气事实。

5.2 外参数对副高西脊点模型平衡态的影响

基于描述副高东西活动的非线性动力模型方程组(6)为例,讨论不同的参数对副高东西活动平衡态的影响。图8a、8b是副高东西位置平衡态随 a_{11} 、 b_{12} 的演变,其中实线表示稳定平衡态,虚线为不稳定平衡态。

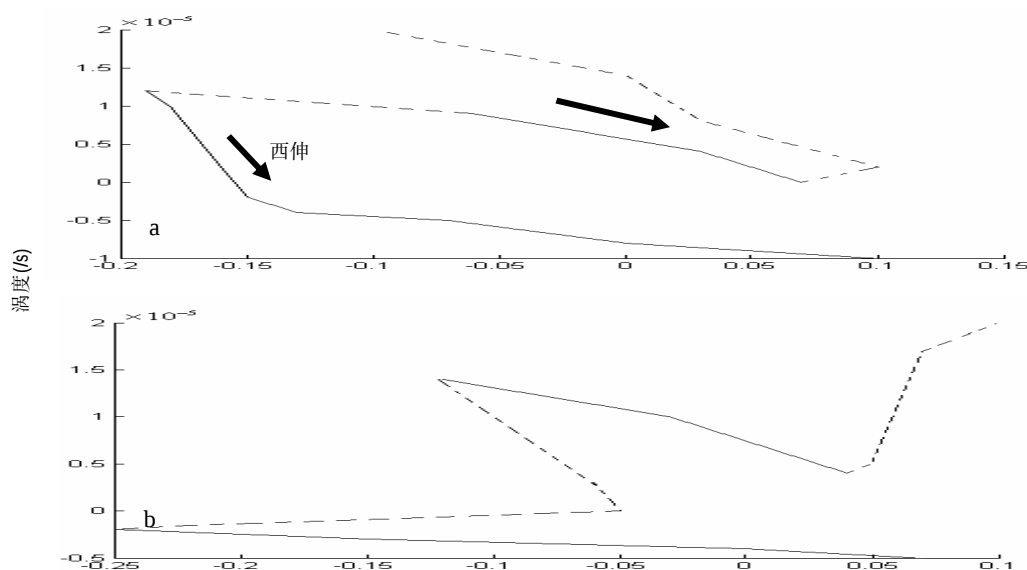


图8 副高东西位置平衡态随外参数 a_{11} (a)、 b_{12} (b)的分布 实线表示稳定平衡态,虚线为不稳定平衡态。

综上所述,在副高-季风指数非线性动力模型中,受外参数强迫或内在物理因子的影响,副高系统平衡态的数目和稳定性会发生改变。结合1998年副高活动异常,发现副高平衡态的转换、失稳和跃迁与副高的三次北上、二次西伸和一次异常南落和东退过程相对应;动力模型的分岔和突变可较为贴切和合理地描述并表现副高的“双脊线”现象,及“双脊线”从南北并存到合并归一的天气事实。

6 小 结

(1) 1998年夏半年,副高在整体偏强、偏西

图8a表现了模型参数 a_{11} 对副高东西位置平衡态的影响,在 a_{11} 达到-0.2时平衡态出现分岔,由单解变为两个解,分岔后的两个平衡态解中,稳定的平衡态随 a_{11} 的增加急剧下降,不稳定的平衡态随 a_{11} 的增加缓慢下降,当 a_{11} 增至-0.05时,不稳定的平衡态变为稳定平衡态,此时平衡态的数目增至3个,且随着 a_{11} 继续增大都出现比较明显的下降。图中稳定平衡态由正涡度向负涡度的两次突降过程(图中实线箭头所示),可能与1998年夏季实际天气中副高的两次显著西伸过程相对应。

图8b反映了参数 b_{12} 对副高东西位置平衡态的影响,图中最明显的特征是当 b_{12} 增至-0.12时,系统会从一个较低值稳定平衡态跳跃到一个较高值稳定平衡态上,这次明显的突变现象,可能与1998年夏季天气中副高的一次东退过程相联系。

的情况下,中短期变化明显,主要表现为7月中旬副高大幅南撤,以及6月中旬—6月底和7月底—8月中旬两次显著的西伸,而这与夏季风因子的异常活动有很好的对应关系。其中热带ITCZ和孟加拉湾地区对流活跃将有利于副高北上、西进;而南亚高压异常东伸和东亚季风减弱也可能是导致副高异常西伸的重要原因。

(2) 遗传算法全局搜索和并行计算优势可客观准确和方便快捷地反演重构副高-季风非线性动力模型,模型中参数的变化会导致副高系统平衡态的失稳和分岔变化。

(3) 副高系统平衡态的分布、稳定性的变化以及突变和分岔行为与 1998 年副高形态变异有很好的对应关系: 副高系统由高值稳定平衡态向低值稳定平衡态跳跃的突变行为对应副高的异常南落过程; 副高系统由双稳定平衡态向单稳定平衡态并入的分岔行为对应副高“双脊线”并存到消失的过程

等。

需要说明的是, 由于方法的局限性对于该动力模型参数的物理意义尚未弄清, 影响了其动力学性质的深入讨论, 而且模型中包含的物理变量和影响因素有限, 对副高的描述和刻画也有待进一步改进和完善。

参 考 文 献:

- [1] 黄建平, 衣育红. 利用观测资料反演非线性动力模型[J]. 中国科学(B 辑), 1991, 21(3): 331-336.
- [2] 马军海, 陈予恕, 刘曾荣. 动力系统实测数据的非线性混沌模型重构[J]. 应用数学和力学, 1999, 20(11): 1 128-1 134.
- [3] TAKENS F. Detecting strange attractors in fluid turbulence[J]. Lecture Notes in Mathematics, 1981, 898(2): 361-381.
- [4] 王小平, 曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 7-9.
- [5] 洪梅, 张韧, 吴国雄. 用遗传算法重构副热带高压特征指数的非线性动力模型[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 346-352.
- [6] 中央气象台长期预报组. 长期天气预报技术经验总结(附录)[Z]. 北京: 中央气象台, 1976: 5-6.
- [7] 占瑞芬, 李建平, 何金海. 西太平洋副热带高压双脊线及其对 1998 年夏季长江流域“二度梅”影响[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 294-307.
- [8] 余丹丹, 张韧, 洪梅, 等. 基于交叉小波与小波相干的西太平洋副高与东亚夏季风系统的关联性分析[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(6): 755-769.
- [9] 刘科峰, 张韧, 洪梅, 等. 混合递阶遗传径向基网络及其在副热带高压预报中的应用[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 507-511.
- [10] YANG Hui, SUN Shuqing. Study on the characteristics of longitudinal movement of subtropical high in the western Pacific in summer and its influence[J]. Advance sin Atmospheric Sciences, 2003, 20(6): 921-933.
- [11] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 747-758.
- [12] 高普云. 非线性动力学: 分叉、混沌与孤立子[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005: 5.

DYNAMIC CHARACTERISTICS AND MECHANISMS OF A NONLINEAR DYNAMIC MODEL FOR THE SUBTROPICAL HIGH-MONSOONS: DISCUSSIONS AND ANALYSIS

YU Dan-dan¹, ZHANG Ren², HONG Mei², CHENG Liang¹

(1. 61741 Troops of PLA, Beijing 100081, China;

2. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and following the idea of retrieval from dynamic systems and the genetic algorithm, a non-linear dynamic model for the subtropical high indices and the East Asian summer monsoon factors is retrieved and reconstructed objectively and correctly from the actual observations of 1998. Then, with the weather facts of that year, the impacts of changes in model parameters are also discussed on the loss of equilibrium of the subtropical high and its bifurcation so as to provide constructive research ideas, methods and means for the discussion of physical mechanisms and dynamic behaviors of such complex synoptic systems as the subtropical high, for which it is usually difficult to establish correct dynamic models. It is found that the distribution and change of the equilibrium corresponds with the actual medium-and short-term abnormal activity of the subtropical high; the abrupt change in the stable balance state from high values to low values is corresponding to the process of “abnormal southward advancement” of the subtropical high, while the bifurcation from the dual high-value stability to dual low-value equilibrium of the subtropical high is corresponding to the existence and disappearance of “double ridge lines” of the subtropical high.

Key words: synoptic meteorology; non-linear dynamic models; genetic algorithm; subtropical high