

# T63L16 气候模式预报能力的空间尺度分布研究<sup>\* 1</sup>

许晓光<sup>1,2</sup> 李维京<sup>2</sup> 任宏利<sup>2\*</sup> 张培群<sup>2</sup>  
XU Xiaoguang<sup>1,2</sup> LI Weijing<sup>2</sup> REN Hongli<sup>2</sup> ZHANG Peiqun<sup>2</sup>

1. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000

2. 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京, 100081

1. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *Laboratory for Climate Study, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*  
2008-08-13 收稿, 2009-02-02 改回.

**Xu Xiaoguang, Li Weijing, Ren Hongli, Zhang Peiqun. 2009. Distributions of prediction capacity of T63L16 model for medium-range forecast at different spatial scales. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(6):992–1001**

**Abstract** The 500 hPa geopotential height fields of NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data from 1970 to 2003 and hindcasting results from 1982 to 2002 derived from Monthly Dynamic Extended Range Forecast System of National Climate Center (T63L16 Model) were analyzed by the spherical harmonic expansion and variance analysis to the spherical harmonic coefficients. Spatial scale-dependence of day-to-day forecast capacity of T63L16 model and predictable stable components for midium-range forecast were studied. The results suggest that capacity of the model prediction is rather isotropic in total wave number  $n$ , and the main errors happen at total wave number from 5 to 10, or synoptic-scale wave. Based on analyzing the evolution of the ratio of T63L16 model internal variance to climatic external variance, an effective scale-dependent ratio threshold was defined which is the average of ratio for 26–40 day prediction to quantitatively decide the predictable limits of T63L16 model for a variety of spatial scales. Furthermore, a set of rational weight coefficients which represent wave energy spectrum were introduced to study the relationship between predictable limits of the model and latitudinal wave number  $m$ , as well as total wave number  $n$ . The results indicate that the day-to-day predictable limits of the T63L16 model are relevant to the zonal and total wave number, as well as the seasons. It was shown that predictable limits, as a whole, gradually shorten with spatial scale reduction, but the variation is not completely monotonic; the limits at latitudinal wave number of 2 are shorter than that between 3 and 5. In addition, the seasonal averaged predictable stable components to midium-range forecast were examined. As far as global mean is concerned, for above 6 day forecast, the predictable stable components are zonal wave number smaller than 12/7 (or total wave number smaller than 17/13) in summer/other seasons, while for 11–15 day forecast, predictable stable components are zonal wave number smaller than 5, 3, and 2 (or total wave number smaller than 13, 8, and 7) in both winter and summer, spring, and fall, respectively. The understanding of predictable components for medium-range forecast could provide the basis for developing new prediction strategies and methods, as well as for improving forecasting skills.

**Key words** Prediction capacity, Medium-range forecast, Variance analysis, Predictable components

**摘 要** 采用球谐谱展开和方差分析方法, 利用 1970—2003 年 NCEP 再分析 500 hPa 高度场资料和国家气候中心 T63L16 月动力延伸预报业务回报 1982—2002 年的结果, 研究了 T63L16 模式逐日预报可预报能力的空间尺度依赖特征和对于中期预报的可预报稳定分量。分析表明, T63L16 模式预报能力在总波数  $n$  上具有各向同性, 其主要的误差发生在波数为 5—10 的

\* 资助课题: 国家科技支撑计划项目(2006BAC02B04 和 2007BAC29B03), 国家自然科学基金项目(40805028, 40675039 和 40575036), 国家重点基础研究发展计划 973 计划(2006CB403606), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806005)。

作者简介: 许晓光, 主要从事气候动力与气候模式, 可预报性。E-mail: xxu@huskers.unl.edu

通讯作者: 任宏利, 主要从事气候动力学和短期气候预测、气候诊断分析、数值模拟。E-mail: renhl@cma.gov.cn

天气尺度波。基于对 T63L16 气候模式 500 hPa 位势高度场球谐系数内部方差和该物理量气候外部方差之比  $R$  演变特征的分析,本文定义了模式 26—40 d 预报的方差比的平均作为  $R$  的临界值来定量地确定 T63L16 模式对不同空间尺度气象场的可预报期限,并引入波能谱为权重系数研究了模式可预报期限与纬向波数和总波数的关系。结果显示该模式的逐日可预报期限与纬向波数和总波数、以及季节均有关系。可预报期限在整体上随着空间尺度的减小而逐渐缩短,但并不是纯粹的单调递减;对于纬向 2 波分量的可预报期限比 3—5 波要短,可能是由于该模式对表征东亚大槽和北美大槽的 2 波的刻画相对不够好。另外,对季节平均的中期预报可预报稳定分量的考察表明,就全球而言,对于提前 6 d 以上的预报,夏季具有的可预报稳定分量为纬向波数小于 12 或总波数在 17 以内,其他季节为纬向波数小于 7 或总波数小于 13;对于提前 11—15 d 的预报,冬夏两季的可预报稳定分量为纬向波数小于 5 或总波数小于 10,春(秋)季节为纬向波数小于 3 (2)或总波数不大于 8 (7)。这为针对该尺度发展新的预报策略和方法、改进预报效果,提供了依据。

**关键词** 预报能力, 中期预报, 方差分析, 可预报稳定分量

**中图法分类号** P435

## 1 引言

可预报性研究在大气动力学和数值预报领域中一直占有重要地位。CLIVAR(气候变率及可预报性计划)和 THORPEX(观测系统研究与可预报性试验计划)都把可预报性作为重点研究方向(李崇银,1999;Shapiro, et al, 2004)。大量研究表明,逐日天气预报的可预报期限一般不超过 2—3 周(丑纪范等,1995)。然而,当前世界上最好的数值模式逐日预报达到 70% 预报技巧的预报长度只有 7 d (Shapiro, et al, 2004)。为此,THORPEX 把改善第 2 周的预报(中期预报)作为重要的研究目标。实质上,可预报性问题是时空尺度问题(穆穆等,2002; Li, et al, 2003)。正如 Monin(1981)所言:“确定可预报期限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,应该是指出在这时期中所预报的气象场的特征。”那么,对中期预报而言,大气或者描述大气运动的数值模式中的哪些分量是可预报的,哪些分量是不可预报的? 这对于提高该尺度的预报技巧尤为重要,但目前尚无明确结论,这正是本文研究的根本出发点。

Lorenz(1965)在进行可预报性的理论研究时,提出由多个扰动初值预报的“集合”来考虑误差增长的思想,并进一步研究了大气可预报性的空间尺度特征(Lorenz, 1969)。这一思想在复杂数值模式误差增长和实际可预报性问题的研究中被广泛采用(Lorenz, 1982; Dalcher, et al, 1987; Simmons, et al, 1995; Saha, et al, 1988; Savijarvi, 1995; Boer, 1984, 1994)。主要结论是:可预报期限随空

间尺度的减小而缩短;数值模式的预报技巧在逐步提高,但仍具有很大的改善潜力。中国学者在可预报性研究中也取得了很大进展(Chou, 1989; Mu, 2004; 范晓青等,2003a),例如,利用数值试验方法研究了模式预报中误差增长的物理机制(陈明行等,1989),通过谐波分析和 EOF 分析探讨了可预报性的时空依赖性(李志锦等,1996),研究了短期气候预测的可预报性(赵彦等,2000),考察了实际大气 500 hPa 高度场的月尺度可预报性(范晓青等,2003b),以及气温和降水的模式可预报性(王会军等,2007)。此外,还提出和引入了一些研究可预报性的新概念和新方法,包括胞映射全局分析方法(范新刚等,1999),非线性奇异向量(Mu, et al, 2001)和条件非线性最优扰动(Mu, et al, 2006),以及界定可预报期限的非线性局地 Layapunov 指数(Chen, et al, 2006)等。这些研究为可预报性理论的发展做出了重要贡献,为建设性地解决可预报性问题提供了丰富的理论依据。在此基础上,对于极受关注的中期预报问题,很有必要从考察气候模式可预报空间分量的角度深入加以研究。

本文利用国家气候中心 T63L16 业务模式 21 年(1982—2002 年)的回报数据和 NCEP 再分析资料,采用方差分析方法通过考察逐日预报的预报能力的空间尺度分布特征多年的季节平均,分析模式对不同空间尺度分量的预报效果,研究模式逐日预报对不同分量的预报能力。在此基础上,进一步深入探讨对于中期范围逐日预报的可预报空间分量,希望以此为依据对数值模式的预报策略和预报效果进行改进。

## 2 资料和研究方案

### 2.1 资料

本文研究采用的资料:①中国国家气候中心提供的 T63L16 模式月动力延伸预报历史回报产品中的逐日 500 hPa 高度场。T63L16 模式采用初始持续性海温异常,每天进行未来 45 d 的滚动预报,每次预报包括连续 5 d 40 个集合成员。该模式采用全球谱模式形式,水平三角形截断 63 波,经纬向网格数是  $192 \times 96$ ,网格距约为  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ ;垂直方向是随地形变化的非等距的 16 层  $\eta(p, p_s)$  坐标。本文利用了 1982—2002 年除 5 和 10 月(此两个月回报资料部分缺失)之外的其他所有月份 16—20 日起报的从 21 日开始的未来 40 d 集合预报。②美国 NCEP/NCAR 发布的 1970—2003 年的 1 日 4 次的逐日 500 hPa 高度场的再分析资料中的 12 时(世界时)数据。

### 2.2 高度场的球谐谱展开

球谐谱展开是气象中常用的一种二维谱分析。通过球谐谱展开,可以把位势高度的水平格点场转化为球谐谱系数场,从而方便对各种空间尺度大气波动的特征进行分析。对某一经度  $\lambda$  和余纬  $\theta(\theta=90^\circ-\varphi, \varphi$  为纬度)的高度值  $Z(\lambda, \theta)$  进行球谐谱展开。

$$Z(\lambda, \theta) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N [a_n^m \cos m\lambda + b_n^m \sin m\lambda] P_n^m(\cos \theta)$$

式中,  $m$  称为纬向波数,  $n-m$  是勒让德多项式的幂次数,也是球面函数中平行纬圈的节点数。由于  $l = n-m+1$  表示经圈大圆上的波数,于是  $n+1$  便为球谐函数在经圈大圆和纬向圆周上的波数总和,通常把  $n-m$  和  $n$  分别称为经向波数和总波数。因此,球谐函数表示了经圈大圆上为  $l$  波,纬向圆周上为  $m$  波的空间结构。 $a_n^m$  和  $b_n^m$  为实部和虚部的球谐谱系数,  $P_n^m$  为第一类标准连带勒让德函数,定义为

$$P_n^m(\mu) = \sqrt{(2n+1) \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} \frac{1}{2^n n!} \cdot (1-\mu^2)^{m/2} \frac{d^{n+m}}{d\mu^{n+m}} (\mu^2-1)^n$$

由于  $a_n^m$  和  $b_n^m$  具有几乎完全相同的空间结构(Savijarvi, 1984),本文只把实部的球谐谱系数  $a_n^m$  作为方差分析的研究对象。

### 2.3 方差分析

假定  $A_k$  是第  $k$  年的实况要素值(再分析资料)进行球谐谱展开之后的谱系数值,本文所用实况值

的总年数  $K=34$ (1970—2003 年);又假定  $F_{i,j}$  是第  $j$  回报年某次集合预报的第  $i$  个集合成员要素值的球谐谱系数,每次集合预报初始场个数即集合成员个数  $N_e=40$ ,历史回报总年数  $N_y=21$ (1982—2002 年)。则某日实况的气候平均  $\bar{A}$  和第  $j$  回报年该日预报的集合平均  $\langle F \rangle_j$  分别为

$$\bar{A} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A_k$$

$$\langle F \rangle_j = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} F_{i,j}$$

这里,  $A_k$ 、 $F_{i,j}$ 、 $\bar{A}$  和  $\langle F \rangle_j$  都是纬向波数  $m$  和总波数  $n$  的函数。分别定义内部方差  $\sigma_i$ 、外部方差  $\sigma_E$  以及此二者之比  $R$  表示为

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N_e N_y} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_e} (F_{i,j} - \langle F \rangle_j)^2 \quad (1)$$

$$\sigma_E^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (A_k - \bar{A})^2 \quad (2)$$

$$R = \sigma_i / \sigma_E \quad (3)$$

其中,内部方差衡量由初始扰动和模式系统误差造成的集合成员之间的离散度,反映了由大气内部的动力不稳定和非线性相互作用引起的自然变率;外部方差反映外界强迫引起的年际变率,如海温、海冰分布、积雪分布、土壤湿度等异常下边界的强迫作用以及太阳辐射等,一年之中它表现出平稳的波动变化。

本文所采用的方差分析方法就是在假定月、季时间尺度内无外强迫变化的情况下,对上述自然变率与年际变率的比值进行方差检验,若比值不超过某一信度下的临界值,则认为外强迫的变化对大气环流演变的影响是显著的,进一步认为存在可预报性。其实质是,用数值模式做集合预报时,因为小振幅扰动的不稳定性,多个具有微小差异的初始状态(集合成员),每一个都按照同样决定论的物理规律演变,随时间差异越来越大,终于变成和不同年内同一天、同一时刻随机选定的两个解那样的完全不同,此时的预报与随机在历史上进行猜测并无区别,这个使差别增长到显著不同的时间即为可预报期限(丑纪范等,1995)。因此,本文的研究是围绕季节平均的外部方差  $\sigma_E$ 、内部方差  $\sigma_i$ 、特别是二者的方差比值  $R$  进行的,它们是纬向波数  $m$  和总波数  $n$  的函数。

### 3 外部方差的空间尺度分布

由于不同空间尺度的外部方差可以表示相应尺度运动对整体大气运动的贡献,因此,波数域中的方差分布可以表征某一空间尺度的大气可预报性对整个大气可预报性的贡献,这里称之为可预报能力。模式的可预报能力表征了某一空间尺度分量的预报效果对实际预报的贡献大小,也就是可以用来预报的能力。若某一空间尺度分量的方差贡献较大,表明该分量的预报效果对整体的预报效果影响会较大,那么该分量就具有较强的可预报能力,反之亦然。图1给出了冬季全球500 hPa位势高度场球谐谱系数外部方差的多年气候平均(1970—2003年)在波数域中的分布。

由图1可以看出:(1)总体上,经纬向低频波的方差贡献比较大,高频波的方差贡献很小,但其最大值并不在总波数为0处,而是位于 $m=0, n-m=4$ 处。这表明整体上大尺度运动的可预报能力要比小尺度的强,但最大尺度的分量并不是可预报能力最强的分量,而是发生在纬向波数为0、经圈大圆波数 $l=n-m+1=5$ 处。(2)在每一个纬向尺度上, $\sigma_E$

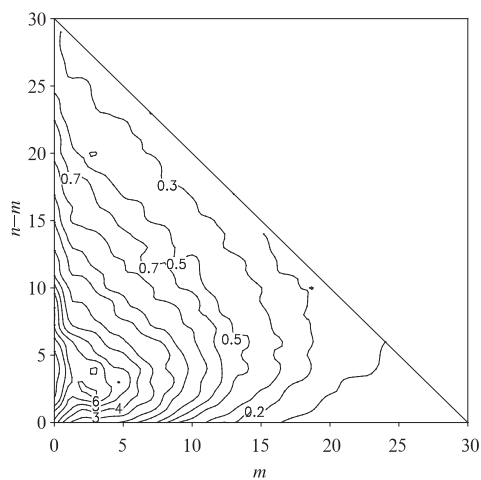


图1 全球500 hPa位势高度场球谐谱系数外部方差的气候平均(1970—2003年)在波数域中的分布

( $m$ 和 $n-m$ 分别为纬向波数和经向波数)

Fig.1 External variance's climate average of spherical harmonic coefficients for global 500 hPa geopotential height as a function of wave number

( $m$  and  $n-m$  are zonal and meridional wave number, respectively)

的最大值分布在 $n-m=3-5$ 也就是 $l=4-6$ 处,这表明3圈环流是经向尺度中贡献最大的,具有最强的可预报能力。(3)当 $n-m<4$ 时, $\sigma_E$ 随纬向波数 $m$ 的增加而减小,随经圈大圆上波数的增加而增加,与总波数 $n$ 正交。这表明在 $n-m<4$ 这一尺度区域中,可预报能力随纬向尺度减小而变差,但随经向尺度的减小而变好,而与总波数无关。(4)当 $n-m>4$ 时, $\sigma_E$ 在总波数 $n$ 上具有各向同性并且随 $n$ 的增加单调递减,这表明对于天气尺度以及更小尺度的大气运动,其可预报能力随着尺度的减小而单调减弱。

由上述结果可以看到,可预报能力在空间尺度很大程度上依赖于总波数,这种依赖性不仅表现在纬向尺度,对经向尺度也同等重要。因此,分析可预报期限的空间尺度依赖行为,只考虑纬向尺度的依赖是不全面的,经向尺度与纬向尺度具有相同的重要性。进而,后面同时探讨了总波数域和纬向波数域上可预报期限的空间尺度分布,并引入波能谱分量作为相应球谐谱分量的权重系数。

### 4 内部方差的空间尺度分布演变

一般来说,内部方差与预报误差的增长是一致的,随着预报长度的增加会越来越大。当误差增长达到饱和,内部方差同样也会表现出饱和波动状态。然而在波数域中,各尺度谱分量的内部方差具体的演变会怎样呢?图2给出了不同季节中,在总波数 $n$ 上内部方差随预报天数的演变情况。这里分别给出了提前1、4、7、10和15 d预报的内部方差,并考察它们与外部方差的关系。

由图2可以看出,波数域中内部方差 $\sigma_I$ 的分布与外部方差 $\sigma_E$ 的分布在形势上是一致的,但其随着预报天数的增加的演变特征为:(1)不管是低频波还是高频波, $\sigma_I$ 都随预报的延长而增加。其中,低频波增幅大,高频波增幅小。(2)在总波数 $n=5-10$ 附近, $\sigma_I$ 的值相对较大,说明主要的误差增长发生在天气尺度波,这包括中纬度斜压波(Savijarvi, 1995)。(3)不同尺度的运动在经历相应不同的预报天数之后,其 $\sigma_I$ 的增长将达到饱和,并与外部方差不管是在数值上还是在分布形势上趋于一致。低频波 $\sigma_I$ 达到饱和的时间要比高频波长,我们定义此达到饱和的时间即为可预报期限。

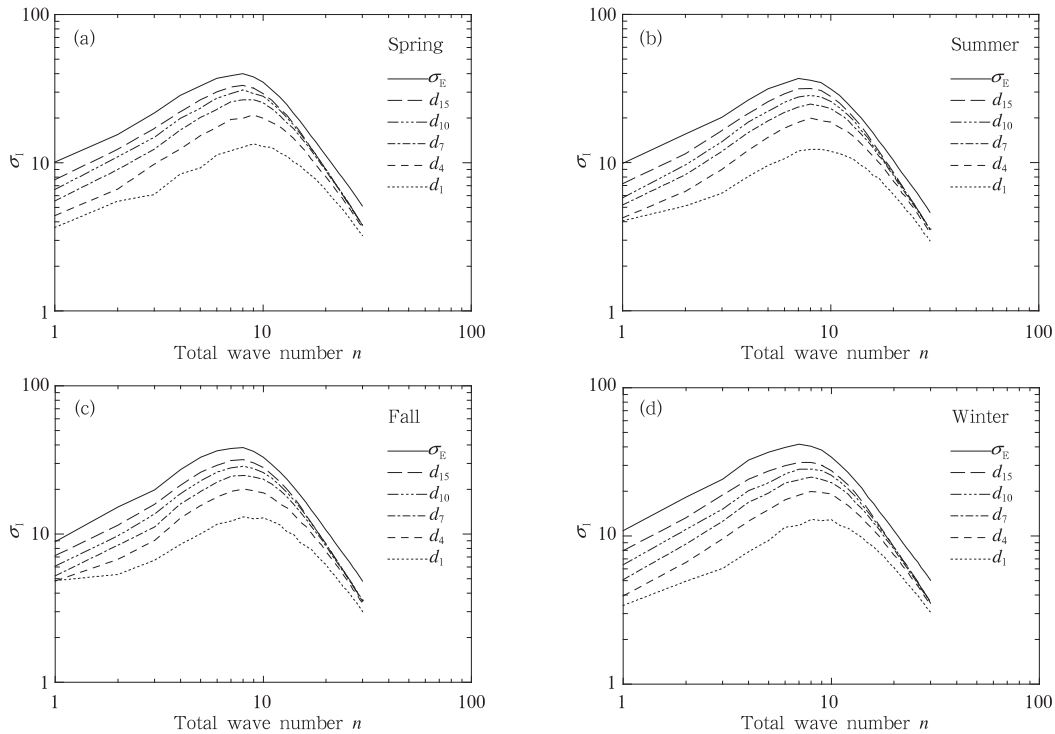


图2 4个季节中T63L16模式预报500 hPa位势高度场谱系数的内部方差( $\sigma_1$ )随预报天数的演变及其与外部方差的分布关系( $d_x$ 分别表示提前 $x$ 天预报; $\sigma_E$ 表示气候外部方差)

Fig. 2 Evolution of seasonal internal variance ( $\sigma_1$ ) of spherical harmonic coefficients of T63L16 model forecasting 500 hPa geopotential height and its relationship with external variance ( $d_x$  represents forecast to the leading day of  $x$  and  $\sigma_E$  represent climate external variance)

## 5 R的分布和演变特征以及可预报期限的界定

### 5.1 R在二维波数域中的分布和演变特征

因为 $\sigma_E$ 表现出稳定的波动变化,也就不难想象波数域中 $R$ 的演变特征在结构上与 $\sigma_1$ 是类似的,即 $R$ 随着预报长度的增加会达到饱和并且不再增长。在此时,从历史资料中随机地选取某日的天气便可以作为当前的预报,这也就不再有预报技巧可言了。因此,我们可以进一步认为在误差未达到饱和并且 $R$ 不超过某一信度的临界值时,表示具有预报能力,这一信度值其实就是方差达到饱和时的值。那么,在二维波数域中 $R$ 的分布又如何呢?

以冬季为例,图3给出了预报第2和6天 $R$ 在二维波数域中的季节平均分布。可以看出, $R$ 在低频波域的值较小,在高频波域的值较大,表明预报能力会随着波数的增加越来越差。这和相应尺度波的生命周期有一定关系,缓变的超长波和大气长波要长于天气尺度波,而斜压波次之,重力波和声波的可

预报期限更短。随着预报天数的增加,在第6天,整个波数域中 $R$ 有明显的增长,其结构依然和第2天基本一致。

通过图3虽然可以定性地了解预报能力在二维波数域中的分布和随预报时间的演变,但却不能定量客观地得到各尺度波的可预报期限。为了进一步分析各尺度波具体的可预报期限,并且考虑经向尺度对可预报性研究的重要性,下面引入了一个可以表征可预报能力的权重系数。把每一个经圈上的 $R$ 分布加权投影到纬向波数 $m$ 或总波数 $n$ 上,并给出其可预报期限的界定。这样便可以清晰地得到每一个纬向波数和总波数的可预报期限。

### 5.2 权重系数的引入和可预报期限的界定

为了引入客观的权重函数,以便得到每一个纬向波数和总波数的 $R$ 随预报天数的演变,首先分析500 hPa高度场的波能谱,即谱分量,希望以此为权重,对纬向尺度和总波数尺度上的各种经向波数进行加权平均,投影到纬向波数和总波数。

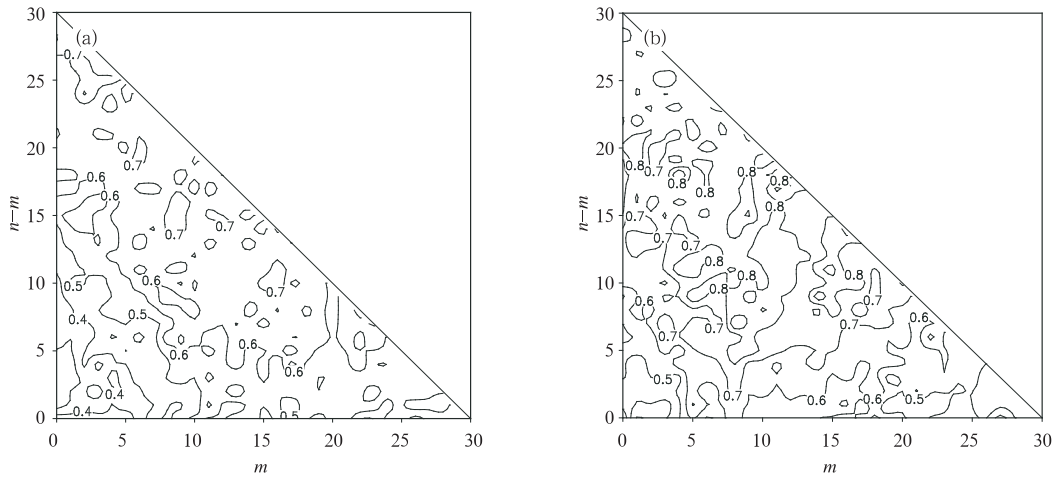


图3 T63L16 模式提前 2(a)和 6(b)天预报的 500 hPa 位势高度场  $R$  的波数域分布  
( $m$  和  $n-m$  分别为纬向波数和经向波数)

Fig. 3 Ratio of T63L16 model forecasting 500 hPa geopotential height as a function of wave number for the leading day of 2 (a) and 6 (b), respectively  
( $m$  and  $n-m$  are zonal and meridional wave number, respectively)

谱分量作为纬向波数  $m$  和总波数  $n$  的函数,可由再分析资料的球谐谱系数来计算(Eliassen, et al, 1965)。

$$D(m, n) = n(n + 1)A^2(m, n) \quad (4)$$

其中,  $A(m, n)$  为再分析资料进行球谐谱展开的实部谱系数数值。计算权重系数  $D(m, n)$  时仅取奇数递增的总波数  $n$ ,  $n$  为偶数时  $D$  的值赋为 0, 即球面函数关于赤道是反对称的。以  $D(m, n)$  为权重可以把二维波数域中的  $R$  合理地投影到纬向波数  $m$  和总波数  $n$ , 分别为  $R^m$  和  $R^n$ 。

$$R^m = \frac{\sum_{n=1}^{N-m} D(m, n)R(m, n)}{\sum_{n=1}^{N-m} D(m, n)} \quad (5)$$

$$R^n = \frac{\sum_{m=1}^n D(m, n)R(m, n)}{\sum_{m=1}^n D(m, n)} \quad (6)$$

仍以冬季为例,图 4 给出了  $R^m$  和  $R^n$  随预报天数的演变(其他季节的分布特征与此类似,图略)。可以看出在 1—10 d 的预报时段里,不管对于总波数还是纬向波数,  $R$  随着预报长度的增加而变大,在高频区域远比在低频区域增长得快。这表明小尺度运动的误差增长远比大尺度来得快。另外,不管在高频区域还是低频区域,这个增长到了一定的

天数之后便进入了稳定的波动状态,也就是饱和状态。

由图 4 可以看出,几乎所有的波在预报 25 天之后均达到饱和,因此取最后 15 天(预报的第 26—40 天)  $R$  的平均作为饱和值  $R_s$ 。本文采用 Dalcher 等(1987)所取的饱和值的 95% 作为可预报期限的界定,即  $R_0 = R_s \times 95\%$ 。只有预报误差不超过所预报量的平均气候变化时,也就是  $R_0$  不大于 1 时,个别过程的预报才能给出超过统计(气候)描述所给的信息之外的补充信息。因此规定当  $R_0 > 0.95$  时,以  $R_0 = 0.95$  作为界定指标。为了检验这一界定指标的合理性,以冬季为例,图 5 展示了此指标  $R_0$  对纬向 2 和 7 波的饱和界定效果。可以看出,当  $R$  超过  $R_0$  之后,便处于稳定的波动状态,表明采用  $R_0$  作为可预报期限的界定指标是合理的。

图 6 给出了不同季节饱和指标  $R_0$  随波数的变化。可以看出,在所有季节,低频区域的  $R_0$  明显要大于高频部分,但最大值并不是在最大尺度区域,而是在纬向  $m = 4-7$  波,总波  $n = 1$  处也有一个最大值。这说明该数值模式的集合预报成员在纬向 4—7 波尺度里离散程度较大。另外,夏季的  $R_0$  明显高于其他 3 个季节,可见模式的集合预报成员在夏季的离散程度明显大于其他季节。

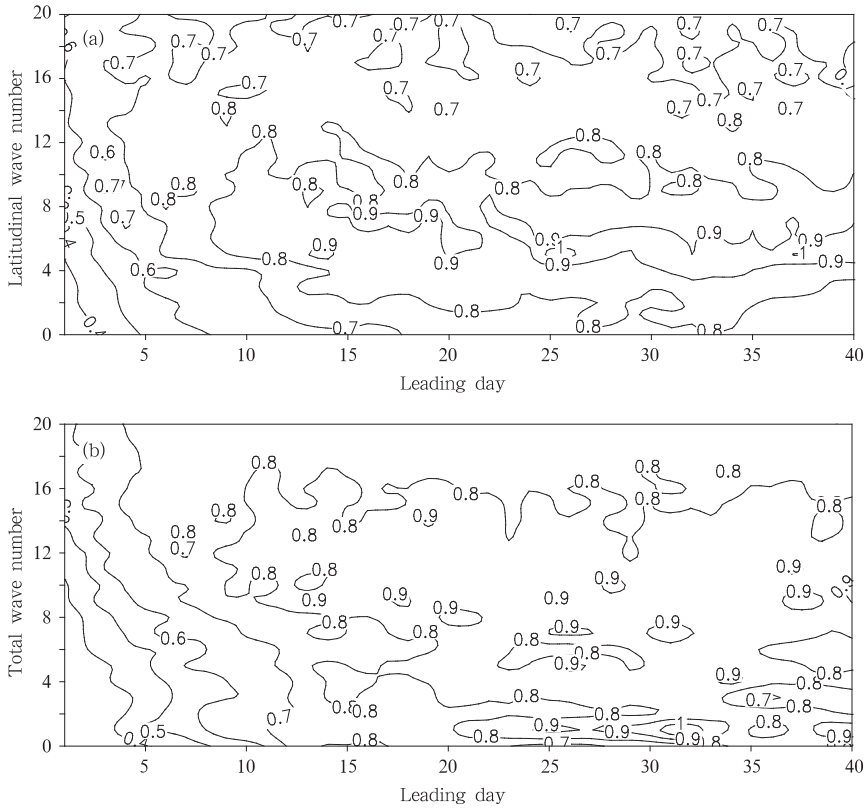


图4 T63L16 模式预报 500 hPa 位势高度场的  $R$  的冬季平均关于纬向波数  $m$ (a)和总波数  $n$ (b)随预报天数(1—40 天)的演变

Fig. 4 Evolution of the ratio averaged in winter of T63L16 model forecasting 500 hPa geopotential height as a function of latitudinal wave number  $m$  and total wave number  $n$

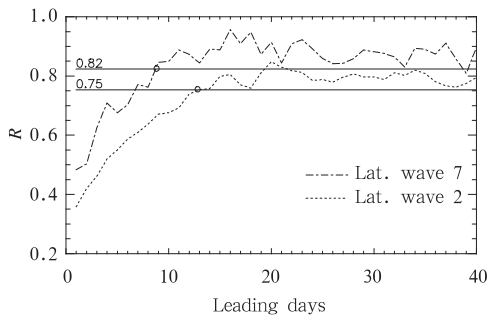


图5 界定值  $R_0$  对于方差比达到饱和的界定效果 (Lat. wave 2 和 Lat. wave 7 分别表示纬向 2 和 7 波分量,其  $R_0$  分别为 0.75 和 0.82)

Fig. 5 Effect of  $R_0$  as the critical value of  $R$  attaining saturation

(Lat. wave 2 and Lat. wave 7 represent wave number of 2 and 7, and their  $R_0$  are 0.75 and 0.82, respectively)

### 6 中期预报的可预报稳定分量

基于此界定指标  $R_0$ , 我们得到了 T63L16 模式逐日预报各尺度纬向波和总波的可预报期限, 如图

7 所示。可以看出整体上, 随着波数的增加可预报期限逐渐缩短。对纬向尺度而言, 夏季的在  $m=7-13$  波的可预报期限明显高于其他季节。可能的原因是, 北半球夏季之时, 南半球为冬季, 南半球冬季的西风环流要比北半球其他季节的环流形势都要稳定。4 个季节 0 波和 1 波的可预报期限最大, 为 3 周左右, 2 波比 3—5 波都要小, 可能的原因是, 该模式对表征东亚大槽和北美大槽的 2 波的刻画相对不够好; 夏季在 13 波以内仍表现出较长的可预报期限 (大于 7 d), 其他季节 10 波以外的可预报期限不超过 5 d。对总波数而言, 在  $n=0-10$  波, 各季节的可预报期限显得参差不齐, 不过夏、冬两季 0 波的可预报期限却要低于 1 和 2 波, 而且春季的 0 波和 1 波也小于 2 波的可预报期限, 说明其预报能力对总波数的依赖不是简单的单调关系, 此模式中 0 波的可预报期限不一定是各分量中最长的; 另外,  $n$  在 6—8 波谱分量的预报能力要比预期的好, 这和纬向 3—5 波有很好的对应关系。

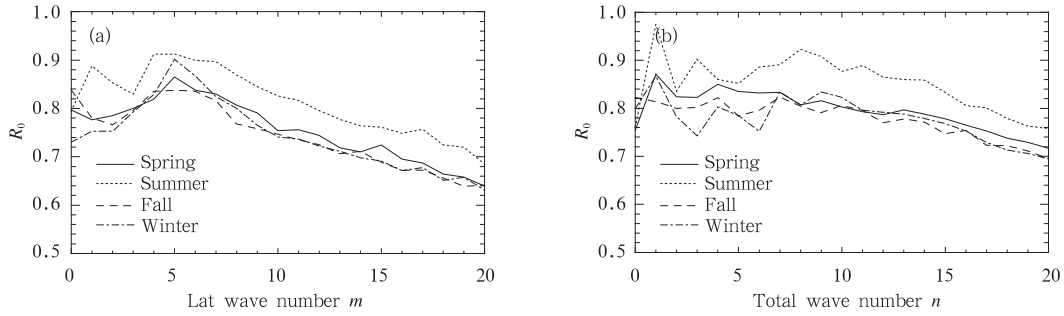


图 6 界定值  $R_0$  的季节平均在纬向波数  $m$ (a)和总波数  $n$ (b)上的分布

Fig. 6 Seasonal average of the threshold value  $R_0$  as a function of latitudinal wave number  $m$  and total wave number  $n$

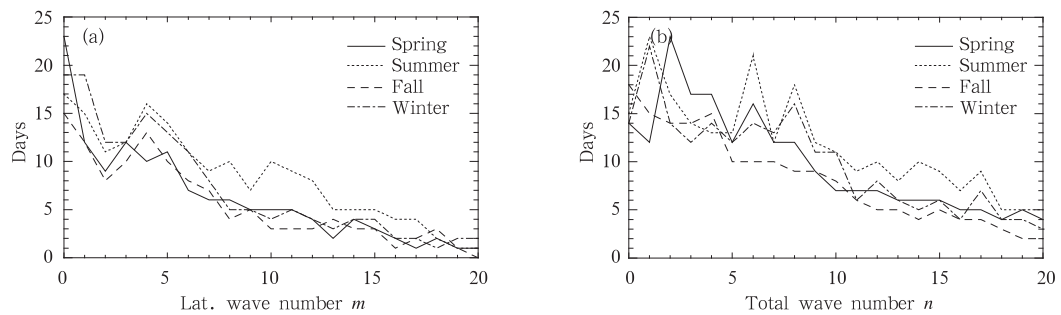


图 7 T63L16 模式 500 hPa 位势高度场可预报期限在纬向波数  $n$ (a)和总波数  $m$ (b)上的分布

Fig. 7 Predictable limits of T63L16 model forecasting 500 hPa geopotential height as a function of latitudinal wave number  $n$  and total wave number  $m$

对于某一特征尺度而言,系统可预报的部分称为稳定分量(即可预报空间分量),不可预报的部分称为混沌分量(即不可预报空间分量)(穆穆等, 2002)。对于超出目前信度预报的中期预报, T63L16 模式有哪些稳定分量呢? 由图 7 可以看出,就全球平均而言,对于提前大于 6 d 的预报,在夏季仍然有纬向波数小于 12 或总波数在 17 以内的特征尺度都是可预报的稳定分量;其他季节也有纬向波数小于 7 总波数在 13 以内的是可预报的稳定分量。对于提前 11—15 d 预报,在冬夏两季仍有纬向波数小于 5 或总波数在 10 以内的可预报特征分量;在春(秋)季节,仍有纬向波数小于 3(2)或总波数小于 8(7)的可预报特征分量。

综上所述,知道了该时期可预报的气象场特征,即明确了该模式可预报的稳定分量,那么就有可能从数值模式的预报结果中分离出可预报分量,滤掉不可预报的分量,进而通过某种方法增加可预报分量的贡献来改善预报效果,这将在以后的工作中进行深入研究。

## 7 结论与讨论

本文首先对全球逐日的 NCEP 再分析资料和 T63L16 模式回报的 500 hPa 位势高度场的谱特征进行了方差分析,发现该模式逐日预报可预报能力在总波数  $n$  上具有各向同性,并且模式中主要的误差发生在波数为 5—10 的天气尺度波,这包括中纬度斜压波。在此基础上,进一步对 T63L16 模式逐日预报的预报能力的空间尺度依赖特征进行了分析。由于其预报能力对经向尺度的依赖与纬向尺度具有同等重要的作用,因此,本文同时考虑了其预报能力在纬向尺度和总波数上的依赖,由二维波数域向一维投影的时候,引入了一个由各空间尺度谱分量决定的权重系数。结果表明,该模式的逐日可预报期限与纬向波数和总波数、以及季节均有关系。随着波数的增加可预报期限逐渐缩短,但不是完全单调递减,模式在纬向 2 波分量的可预报期限比 0、1 和 3—5 波都要短,可能的原因是,该模式对表征东亚大槽和北美大槽的 2 波的刻画相对不够好。对



全球平均而言,夏季的在  $m=7-13$  波的可预报期限明显高于其他季节,这可能与时值冬季的南半球稳定的环流型有关。

最后,考察了对于中期预报的可预报稳定分量。分析显示,就全球平均而言,对于提前 6 d 以上的预报,夏季具有的可预报稳定分量为纬向波数小于 12 或总波数在 17 以内,其他季节为纬向波数小于 7 或总波数在 13 以内;对于提前 11—15 d 预报,冬夏两季的可预报稳定分量为纬向波数小于 5 或总波数在 10,春(秋)季节为纬向波数小于 3(2)或总波数小于 8(7)。当前,利用动力-统计相结合提高预报水平方面已有很多新的尝试(任宏利等,2006,2007),本文结论将为针对该时间尺度发展新的预报策略和方法、改进预报效果,提供了新的依据。

值得说明的是,数值模式的预报是对大气的一种模拟,数值模式的预报能力并不能完全描述大气的内在可预报性,不过它可以看成是对大气可预报期限的一种估计。另一方面,采用大气模式来分析可预报性具有较大的模式依赖性,本文采用的是国家气候中心的 T63L16 业务模式,关于中期预报稳定分量的结论仅限于此模式,对于本文思路在其他模式上的研究是值得尝试的。其次,可预报性不但具有尺度依赖性,同样具有地域依赖性,并且与大气流型有至关重要的关系,本文是对该模式 21 a 的业务结果的每个季节全球平均的分析,当然不可避免地会有某些地域在一定的大气流型下会表现出更好的预报能力。此外,对于某一数值模式,不同层次高度场和不同变量的可预报能力及其空间尺度分布特征会有不同,本文仅利用 T63L16 模式具有代表性的 500 hPa 高度场进行分析。在下一步工作中有必要对其他层次和变量进行更为全面的研究。

**致谢:**感谢丑纪范院士的有益指点和国家气候中心气候预测室提供 T63L16 月动力延伸预报业务回报 1982—2002 年结果。

## References

- Boer G B. 1984. A spectral analysis of predictability and error growth in an operational forecast system. *Mon Wea Rev*, 112: 1183-1197
- Boer G B. 1994. Predictability regimes in atmospheric flow. *Mon Wea Rev*, 122: 2285-2295
- Chen Baohua, Li Jianping, Ding Ruiqiang. 2006. Nonlinear local Lyapunov exponent and atmospheric predictability research. *Sci China (D)*, 149: 1111-1120
- Chen Mingxing, Ji Liren. 1989. Error growth in numerical prediction and atmospheric predictability. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 47 (2): 147-155
- Chou Jifan. 1989. Predictability of the atmosphere. *Adv Atmos Sci*, 6: 74-85
- Chou Jifan, Gao Jidong. 1995. Long-term Numerical Weather Prediction (Revision) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 353pp
- Dalcher A, Kalnay E. 1987. Error growth and predictability in operational ECMWF forecasts. *Tellus*, 39: 474-491
- Eliassen E, Machenhauer B. 1965. On the observed large-scale atmospheric wave motions. *Tellus*, 21: 149-165
- Fan Xingang, Zhang Hongliang, Chou Jifan. 1999. Global study on climate predictability. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 57 (2): 190-198
- Fan Xiaoqing, Li Weijing, Zhang Peiqun. 2003a. Survey of study on predictability of short-term climate prediction at present. *Meteor Mon (in Chinese)*, 29: 3-6
- Fan Xiaoqing, Li Weijing, Zhang Peiqun. 2003b. Contrast study of model atmospheric monthly-scale predictability. *Quart J Appl Meteor (in Chinese)*, 14 (22): 49-60
- Li Chongyin. 1999. Climate change and its predictability research of 21st century: International CLIVAR plan and its conference introduction. *Quart J App Meteor (in Chinese)*, 10(2): 158-160
- Li Jianping, Chou Jifan. 2003. The global analysis theory of climate system and its application. *Chinese Sci Bull*, 48: 1034-1039
- Li Zhijin, Ji Liren. 1996. Analysis of the dependence of predictability on spatial and temporal scales from operational forecasts. *Scientia Atmos Sinica (in Chinese)*, 20(2): 290-296
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17: 321-333
- Lorenz E N. 1969. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 21: 636-646
- Lorenz E N. 1982. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 34: 505-513
- Monin A C. Translated by Lin Benda, Wang Shaowu. 1981. Weather Forecasting as a Problem in Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 165pp
- Mu Mu, Wang Jiacheng. 2001. Nonlinear fastest growing perturbation and the first kind of predictability. *Sci China (D)*, 44: 1128-1139
- Mu Mu, Li Jianping, Chou Jifan, et al. 2002. Theoretical research on the predictability of climate system. *Clima Environ Rese (in Chinese)*, 7: 227-235
- Mu Mu. 2004. Recent advances in predictability studies in China.

Adv Atmos Sci, 21: 437-443

- Mu Mu, Duan Wansuo, Wang Bin. 2006. Conditional nonlinear optimal perturbation and its application. *Nonlinear Processes Geophysics*, 10: 493-501
- Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, et al. 2006. A new method of dynamical analogue prediction based on multi-reference-state updating and its application. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 55(8): 4388-4396
- Ren Hongli, Chou Jifan. 2007. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction. *Sci China (D)*, 50(10): 1589-1599
- Saha S, Van Del Dool H M. 1988. A measure of the practical limit of predictability. *Mon Wea Rev*, 2522-2526
- Savijarvi H. 1984. Spectral properties of analyzed and forecast global 500 mb fields. *J Atmos Sci*, 35: 1771-1787
- Savijarvi H. 1995. Error growth in a large numerical forecast system. *Mon Wea Rev*, 123: 212-221
- Shapiro M, Thorpe A. 2004. THORPEX International Science Plan (Version 3). WMO/TD-NO. 1246, WWRR/THORPEX NO. 2, 51pp
- Simmons A J, Mureau R, Petroligis T. 1995. Error growth and estimates of predictability from the ECMWF forecasting system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 33: 1739-1771
- Wang Huijun, Chen Lijuan, Li Weijing, et al. 2007. Predictability of DERF on monthly mean temperature and precipitation over China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(5): 725-732
- Zhao Yan, Guo Yufu, Yuan Chongguang, et al. 2000. Study on the predictability of numerical short-term climate prediction. *Quart J Appl Meteor (in Chinese)*, 11(1): 64-71

## 附中文参考文献

- 陈明行, 纪立人. 1989. 数值天气预报中的误差增长及大气可预报性. *气象学报*, 47:147-155
- 丑纪范, 郜吉东. 1995. 长期数值天气预报(修订本). 北京: 气象出版社, 353pp
- 范晓青, 李维京, 张培群. 2003a. 目前短期气候预测可预报性的研究概况. *气象*, 29:3-6
- 范晓青, 李维京, 张培群. 2003b. 模式大气月尺度可预报性的对比研究. *应用气象学报*, 2003, 14(11):49-60
- 范新岗, 张红亮, 丑纪范. 1999. 气候系统可预报性的全局研究. *气象学报*, 57(2): 190-198
- 李崇银. 1999. 21 世纪的气候变化及其可预报性研究——国际 CLIVAR 计划及科学大会介绍. *应用气象学报*, 10:158-160
- 李志锦, 纪立人. 1996. 实际预报可预报性的时空依赖性分析. *大气科学*, 20(3):290-296
- 莫宁 A C. 林本达, 王绍武译. 1981. 天气预报——一个物理学的课题. 北京: 科学出版社, 165pp
- 穆穆, 李建平, 丑纪范等. 2002. 气候系统可预报性理论研究. *气候与环境研究*, 7:227-235
- 任宏利, 张培群, 李维京等. 2006. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用. *物理学报*, 55(8):4388-4396
- 任宏利, 丑纪范. 2007. 动力相似预报的策略和方法研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(8):1101-1109
- 王会军, 陈丽娟, 李维京等. 2007. 中国区域月平均温度和降水的模式可预报性分析. *气象学报*, 65(5):725-732
- 赵彦, 郭裕福, 袁重光, 李旭. 2000. 短期气候数值候预测可预报性问题. *应用气象学报*, 11(1):64-71