

依据月平均资料作月预报——利用自然相似的探讨*

邱崇践 丑纪范

杨大伟

(兰州大学)

(甘肃省计委计算站)

提 要

本文利用1956年1月—1972年12月的月平均1000, 500, 100 hPa位势高度和太平洋、大西洋、印度洋的海表温度资料中存在的自然相似,对依据月平均资料作的海洋-大气变量月平均值的预报可能达到的水平进行了分析研究。结果表明在一个海-气耦合系统中,大气变量的预报是比海温预报更为困难的一环。根据月平均海表温度决定相应的月平均位势高度场的准确度较低,但在考虑了过去的海温和高度场资料后能有所改进。

一、引 言

在用动力学方法作天气预报而设计数值模式时,由于下面两个要求使近似和省略不可避免:(1)方程组必须闭合;(2)定解条件是有观测的可以知道的量。近似和省略通常是各式各样的,从而导致了不同的模式,它们可能有不同的预报准确率。对同一预报对象可以有不同的定解条件,对同样的定解条件也可以有不同的预报方案。这在长期数值预报的模式设计中格外明显。

由于把一个方案实现出来,工作量一般都很大,很自然地产生这样的问题,

能否预先对不同方案的潜在预报能力作出比较?

能否把一个大型模式分解成若干“部件”分别鉴定其准确程度?

一个数值模式实现之后,能否判断其是否尚有潜力?

这些问题的解决,使我们有可能避免在那些值得试验的方案上浪费时间和精力,有可能从若干方案中挑选出最佳者来做,有可能从一个大型复杂模式中找出最需改进的关键之处。

从另一个角度看,决定动力数值模式的准确率的两个基本因素是:(1)定解条件中包含着的预报信息量的大小;(2)数值模式对信息量提取的能力。要提高预报准确率,首先要寻找含预报对象信息量大的定解条件,然后再寻找有效的预报方法。

本文仅就长期数值预报问题进行一些讨论。

众所周知,逐日的预报不可能超过两、三周。于是,长期数值预报转而预报平均量,如

* 本文于1984年9月12日收到,1984年12月11日收到修改稿。该文系国家气象局资助的动力统计长期数值预报研究课题的一部分。

月平均位势高度距平、温度距平。近年来,国内外相继提出了几个预报方案^[1-4]。这些方案大体可分为两类,一类是利用大气环流模式作出逐日预报再进行平均,得到月平均预报。另一类则是直接将月平均值作为预报对象。这两类模式虽然预报的最后结果是同一对象,然而其定解条件(初始条件)是完全不同的,前者是大气和海洋在某一时刻的瞬间状态,而后者是其月平均状态。有一个来自直觉未曾严格从理论上论证的看法:“预报因子与预报量的时空尺度要匹配”^[5]。“任何尺度的初始值都只能对应本阶次尺度的预报量,超出一定的范围,就应当改变初始量的阶次”^[6]。按这种看法,在作月平均量预报时,用月平均量而不是某一时刻的瞬间状态作为动力数值模式的定解条件是合适的。不过,由于资料条件的限制,有些要素并未掌握其月平均资料。本文试图分析仅依据海面温度和三个等压面上的位势高度的月平均资料作出的长期预报是否有价值?这种资料对未来演变包含有多少信息?也希望分析一下,具体用什么样的定解条件可能更有利。

二、资料和方法

定解条件采用的资料(以下简称定解条件)中包含的预报对象的信息量从根本上制约着预报准确率。这种信息量可以这样来衡量:定解条件完全相同时,预报对象(实况)是否也完全相同?倘若是,定解条件中就包含了预报对象的全部信息。否则就只是包含了部分信息,但预报对象越相近,这种信息量就越大。因而我们可以从实际资料中分析定解条件的相似性(因为实际上找不到两个完全相同的要素场)与预报对象相似性之间的关系来对此作出判断。Lorenz^[7]曾利用这种自然相似性研究逐日天气形势预报的可预报期限,得到了与数值实验方法相一致的结果。不过他的着眼点在于分析初始误差的增长率。

要素 A 在不同时间的两个场 A_k 和 A_l 的相似性可以由它们的距离 $d_{k,l} = \|A_k - A_l\|$ 来定义。若资料是网格点上的离散值,则可以将距离定义为阿基米德空间的距离。通常还可以用相关系数来定义相似性。但相关系数等于 1 的两个场并不一定完全相同,由于控制大气运动的方程组是非线性的,以这样的两个场作为初始场,由数值模式得出的预报结果相关系数一般也不为 1。而我们最终是要通过“相似”的分析引出“定解条件相同时”的结果,故只能以距离来定义相似性。为便于统计分析,类似 Lorenz 的作法将 A_k 和 A_l 两个场的相似指数定义为

$$\alpha_{k,l}(A) = -c \ln \left(\frac{d_{k,l}^2}{\bar{d}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 $c = 16/\ln 2$, \bar{d}^2 是距离平方 $d_{k,l}^2$ 的平均值(对所有可能的 k, l)。称 $S_r = \frac{d_{k,l}^2}{\bar{d}^2}$ 为两个场的相对离差。依上述定义, $\alpha > 0$ 时可认为两个场有某种相似性¹⁾, α 越大相似程度越高。 $\alpha < 0$ 时则可认为没有相似性, α 越小相距越远。将计算结果取整数值, α 每增加 1, 表示相对离差减少为原来的 $2^{-\frac{1}{16}} = 95.8\%$ 。

在我们的研究中,预报对象是月平均大气位势高度场(ϕ)和海表温度场(T_s),它们同

1) $\alpha > 0$ 表明这两个场的距离大于样本平均距离,因而认为有相似性。但须指出 α 的平均值($\bar{\alpha}$)一般大于 0。因一般有 $\frac{d^2 - \bar{d}^2}{\bar{d}^2} \ll 1$, 故 $\alpha = -\frac{c}{2} \ln \left(1 + \frac{d^2 - \bar{d}^2}{\bar{d}^2} \right) \approx -\frac{c}{2} \left[\frac{d^2 - \bar{d}^2}{\bar{d}^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 - \bar{d}^2}{\bar{d}^2} \right)^2 \right]$, $\bar{\alpha} \approx \frac{c}{4} \left(\frac{d^2 - \bar{d}^2}{\bar{d}^2} \right)^2 > 0$ 。

时也是定解条件所采用的资料。我们所用的大气资料为中央气象台整编的北半球 1000, 500, 100 hPa 月平均位势高度, 按球函数展开(截取纬向 4 波、经向 5 波)作了滤波处理。海表温度资料系美国麻省理工学院 R. E. Newell 等整编, 包括太平洋、大西洋和印度洋共 546 个点(网格距 $5^\circ \times 5^\circ$)。时间为 1956 年 1 月—1972 年 12 月共 17 年。考虑到季节变化, 不同月份的气候背景差距颇大, 我们只计算同一月份的不同年间各要素的相似指数。这样每一个月份有 $17 \times 16/2 = 136$ 个相似指数, 全部是 $136 \times 12 = 1632$ 个相似指数。表 1 给出了大气位势高度场 (ϕ) 和海表温度场 (T_s) 各级相似指数出现的次数。显然要从实际资料中找出非常接近的两个场是很困难的, 我们只能从现有的较低水平的相似个例出发推断相似程度很高时可能出现的情况。

只研究一个月预报的问题。对于各种可能的预报方案先确定其要求的定解条件。统计定解条件相似指数为 r 时对应的预报对象的平均相似指数 $\bar{\alpha}_r$ 。由于我们希望得到的是定解条件相同或极相似时预报对象的相似程度, 故现只分析 $r > 0$ 的情况。经分析和试验发现, 可以用下面的经验公式表征二者的关系

$$\bar{\alpha}_r = a + b(1 - e^{-kr}) \quad (2)$$

其中, a, b, k 三个系数根据统计资料由最小二乘法确定(为了尽量增加确定系数的样本, 计算时取了 $r \geq -1$ 的情况)。(2) 式中 b 和 k 为正值, 它反映了 $\bar{\alpha}_r$ 随 r 增加而增加, 但增长率逐渐降低, k 越大降低得越快。 $r \rightarrow \infty$ 时得极限

$$\alpha_L = \lim_{r \rightarrow \infty} \bar{\alpha}_r = a + b \quad (3)$$

我们称之为极限预报水平, 即定解条件完全相同时, 预报对象的平均相似指数。显然, 除非改变定解条件, 否则无论怎样改进预报模式, 预报水平平均而言不可能超过上述极限水平。实际上由于观测资料总含有误差, 预报中所采用的定解条件与实际状态还有一个差距, 实际预报所能达到的最高水平还应低于极限预报水平。就目前的观测资料情况, 暂且认为其相对均方误差(即本文中的相对离差 S_r)为 $1/8$ (相当于 $r=48$)。这样将实际最高预报水平定义为

$$\alpha_M = a + b(1 - e^{-48k}) \quad (4)$$

通过比较 α_M 和 α_L 的差异就可分析造成预报水平不高的原因主要是由于信息量不足还是资料误差?

以下两节将按上述方法分别分析海面温度和大气位势高度的预报问题。

表 1 各级相似指数出现次数

α	ϕ	T_s
14	1	
13	2	
12	4	
11	6	
10	10	
9	12	
8	27	1
7	49	2
6	55	12
5	82	48
4	89	74
3	134	140
2	138	202
1	159	285
0	300	268
-1	174	252
-2	131	154
-3	113	86
-4	64	55
-5	46	33
-6	26	17
-7	8	2
-8	0	1
-9	2	

三、海温预报问题

海表温度作为预报大气的边界条件, 一般认为在长期预报中是必须考虑的因素。预报海水温度所需要的定解条件应包括初始的三维海温场、流场和密度场以及整个预报时段内近海面的大气状况。倘若将海洋活动层视为温度均匀的混合层, 认为海流可以由大气流场计算, 未来的大气状态也可根据初始的 T_s 和 ϕ 计算, 于是定解条件可归结为起始月的 T_s 和 ϕ 。表 2 即 ϕ 和 T_s 场出现各种相似指数时, 一个月后 T_s 的平均相似指数。

表 2 ϕ 相似指数(i)和 T_s 相似指数(j)对应落后一月的 T_s 平均相似指数
(括号内数字为个例数)

$j \backslash i$	7	6	5	4	3	2	1	0	-1
7	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	2.00 (1)
6	7.00 (1)	2.00 (2)	3.50 (2)	5.00 (1)	1.50 (2)	2.50 (2)	(0)	3.00 (2)	(0)
5	(0)	6.00 (1)	4.00 (1)	3.75 (4)	3.00 (2)	1.71 (7)	2.75 (4)	2.64 (11)	2.60 (5)
4	4.00 (4)	4.33 (3)	2.33 (6)	5.00 (2)	0.80 (5)	2.14 (7)	4.00 (10)	2.07 (14)	-0.33 (3)
3	1.83 (6)	2.00 (4)	2.78 (9)	2.79 (14)	1.29 (7)	1.00 (10)	1.84 (14)	2.38 (26)	2.57 (14)
2	2.00 (9)	1.56 (9)	3.00 (4)	1.55 (11)	0.76 (17)	1.83 (24)	1.74 (19)	1.10 (30)	1.29 (24)
1	0.50 (8)	0.86 (7)	0.64 (11)	0.53 (15)	0.66 (32)	0.93 (27)	0.97 (35)	1.18 (51)	0.12 (26)
0	0.75 (4)	0.21 (14)	-0.16 (19)	0.69 (13)	0.52 (27)	0.42 (19)	0.40 (20)	0.54 (52)	0.13 (31)
-1	-0.67 (9)	-0.14 (7)	-1.00 (13)	0.00 (11)	-0.05 (21)	-0.64 (14)	-0.68 (25)	-0.07 (43)	-1.44 (25)

为了节省篇幅, 表中只给了初始场相似指数 ≥ -1 的部分。现只考虑起始月 ϕ 的相似指数(记为 i)和 T_s 的相似指数(记为 j)均相等(设同为 r)的情况, r 即为上节所说的定解条件的相似指数。不过为了减少偶然性误差, 在统计预报对象相应的平均相似指数时是将 $i=j=r$ 及周围四点的值一起作平均计算的, 所得结果又作了一次平滑。依据上述统计结果按最小二乘法定出(2)式中的系数值为 $a=0.29$, $b=11.57$, $k=0.0520$ 。从而有 $\alpha_L=11.86$, $\alpha_M=10.91$ 。图 1 是所得曲

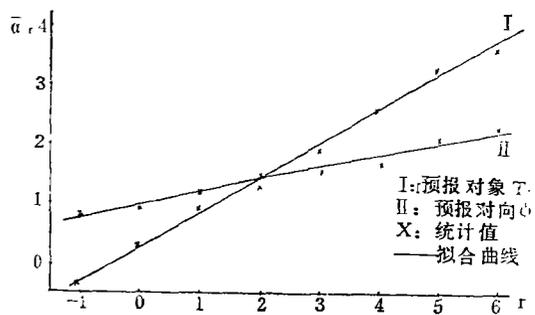


图 1 预报对象相似指数($\bar{\alpha}_r$)与定解条件相似指数(r)的关系

图 1 是所得曲

线与资料拟合的情况,拟合的方差贡献 $R=99.5\%$ 。 $(R=1-\frac{\sum_{i=1}^N(\hat{\alpha}_i-\alpha_i)^2}{\sum_{i=1}^N(\alpha_i-\bar{\alpha})^2})$,

$\hat{\alpha}_i$ 为拟合值, α_i 为实际值, N 为取样点数, $\bar{\alpha}$ 为 α_i 的平均值)。至此我们得出结论,按现有资料,一个月海表温度预报的最好水平大约能达到与实况有 11 的相似指数的程度,折算为相对离差是 $S_r=62\%$ 。

进一步考虑以下几种简化的预报方案:

(1) 若大气采用一层模式,则以 500 hPa 位势高度代替初始场中的三层位势高度。

(2) 不考虑大气对海洋的作用,定解条件中只有初始海温场。

(3) 海温分布由一段时间内的大气状况决定,海温初值的作用略去,定解条件为连续若干个月的 ϕ 场。由于连续多月 ϕ 场相似指数均较高的个例甚少,现只考虑连续两个月相似的情况。

按前面所述的方法计算这几种预报方案的极限预报水平、最高预报水平及各种参数一并在表 3 中列出。比较各种预报方案看到,若大气采用一层模式, T_s 的预报水平不会明显下降。不考虑大气的作用, T_s 的预报水平会明显下降,但仍可达到较高的预报水平。考虑连续两个月的大气状况也可以对海温作出一定水平的预报。若考虑的时段更长,预报水平也许还会高一些。

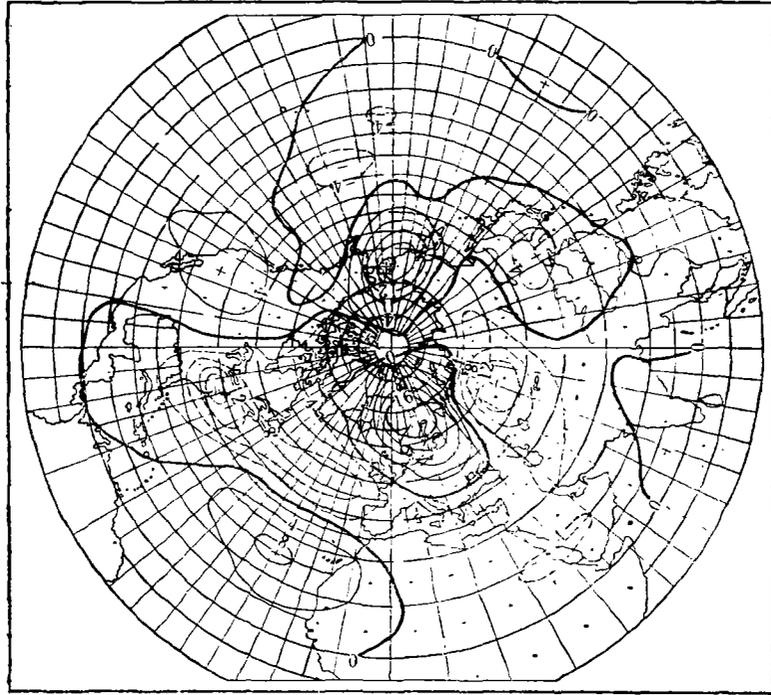
表 3 各种海温预报方案的比较

定解条件	预报对象	a	b	k	R	极限预报水平		最高预报水平	
						α_L	S_r	α_M	S_r
T_s^m, ϕ^m	T_s^{m+1}	.29	11.57	.0520	.995	11.86	.598	10.91	.623
T_s^m, ϕ_{500}^m	T_s^{m+1}	.34	11.09	.0520	.993	11.43	.609	10.52	.634
T_s^m	T_s^{m+1}	.17	4.54	.148	.995	4.71	.815	4.71	.815
ϕ^m, ϕ^{m+1}	T_s^{m+1}	.27	3.06	.109	.993	3.33	.866	3.31	.866
T_s^m, ϕ^m	ΔT_s^{m+1}	.24	7.49	.0520	.981	7.73	.715	7.11	.735
T_s^m	ΔT_s^{m+1}	.19	5.12	.0671	.990	5.31	.794	5.11	.801

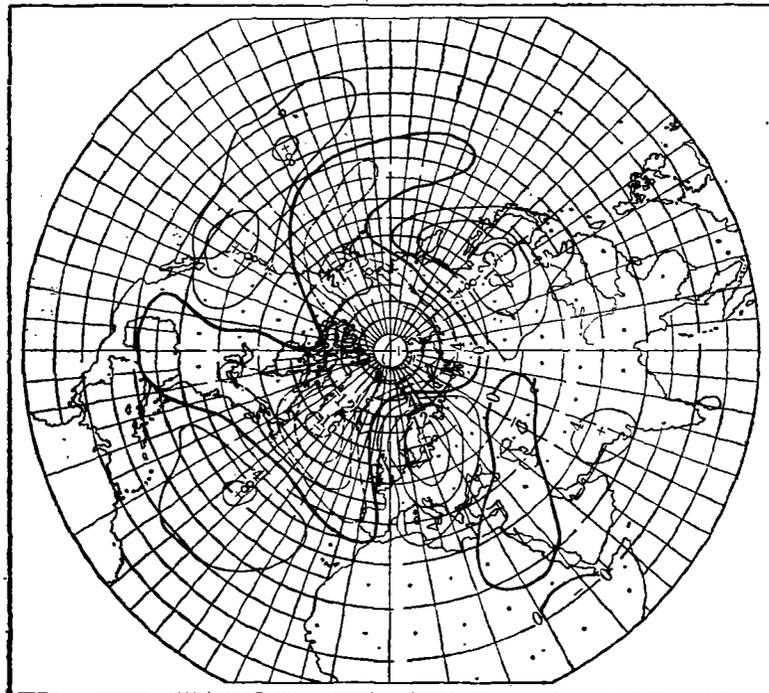
由于海洋具有很大的热惯性,仅仅根据持续性也可以对海温作出很不错的预报。因而一般认为应以海温月际变化 $\Delta T_s^m = T_s^m - T_s^{m-1}$ 作为检查的标准。将 ΔT_s 作为预报对象,按同样的分析方法所得的结果也在表 3 中列出。情况与 T_s 的预报大体相同,只是预报水平略低一些。

四、大气预报问题

取地转近似和准静力近似,大气流场和温度场均可用位势高度表示,预报所需的初始场是起始月的位势高度 ϕ^m 。边界条件应有预报时段内的下垫面温度,据现有资料就是起始月及预报月的海表温度 T_s^m 和 T_s^{m+1} 。为便于分析,将 $\frac{1}{2}(T_s^m + T_s^{m+1})$ 作为边界条件,按第二节所述的方法得出大气位势高度的最高预报水平 $\alpha_M=5.17$ 。经验曲线与统计资料拟合的情况见图 1。显然大气预报所能达到的水平远低于海温预报。相似指数为 5



b, 1960年3月
图 2 相似指数为 5 的一对北半球 500 hPa 高度距平场



a, 1959年3月

左右的两个场究竟有多少共同之处呢？不妨看看图 2 给出的一对例子。倘若我们的预报与实况的相似程度能达到这样的水平，那也算有不小的成绩了。

在实际预报时， T_s^{m+1} 也是待预报的。将预报对象考虑为一个海气耦合系统，定解条件为起始月的海表温度 (T_s^m) 和大气位势高度 (ϕ^m)。得到大气最高预报水平是 $\alpha_M = 4.78$ 。

考虑以下几种简化的预报方案，相应的统计参数均在表 4 中列出。

(1) 不考虑海洋对大气的作用，预报的定解条件只是起始月的 ϕ 。这时所能达到的预报水平很低(见表 4 第 6 行)，表明海面温度对长期天气过程的影响是不可忽略的。

(2) 认为大气高度场向海温场适应，此时定解条件只是预报月的 T_s ，即“过滤模式”方案^[3]。其可能达到的预报水平比方案(1)高，但也还是比较差的(见表 4 第 5 行)。

(3) 考虑连续两个月的海温场，以 $(T_s^m + T_s^{m+1})/2$ 作为边界条件，而略去大气初始场的作用。这时预报水平接近于未经简化的方案(见表 4 第 3 行)，表明大气初始场的作用确实是迅速衰减的。

(4) 采用“多时刻模式”^[4]，定解条件为预报月前若干个月的 ϕ 场。现仅考虑两个月的情况，可能达到的预报水平比只考虑初始月时有明显提高(见表 4 第 4 行)。

表 4 各种大气预报方案的比较

定解条件	预报对象	a	b	k	R	极限预报水平		最高预报水平	
						α_L	S_r	α_M	S_r
$\phi^m, \frac{1}{2}(T_s^m + T_s^{m+1})$	ϕ^{m+1}	.97	4.57	.0542	.965	5.54	.787	5.17	.799
ϕ^m, T_s^m	ϕ^{m+1}	1.01	3.77	.0531	.800	4.78	.813	4.50	.823
$\frac{1}{2}(T_s^m + T_s^{m+1})$	ϕ^{m+1}	.78	3.70	.0542	.972	4.48	.823	4.18	.834
ϕ^{m-1}, ϕ^m	ϕ^{m+1}	.92	2.63	.0770	.910	3.56	.857	3.48	.860
T_s^{m+1}	ϕ^{m+1}	.89	.85	.221	.595	1.74	.927	1.74	.927
ϕ^m	ϕ^{m+1}	.92	.40	.443	.928	1.32	.944	1.32	.944

倘若采用一层(500 hPa)大气预报模式，结果如何呢？用一层资料代替三层资料作类似的统计分析。结果表明，预报水平并不会有明显变化(详细结果略)。正如王绍武等^[8-10]所指出的，月平均大气异常有明显的正压性，因此 500 hPa 一层资料的信息已基本包括了三层资料的信息。一层模式的计算量远小于多层模式，如果能在一层模式中也能较好地描写温度平流过程，那一层模式就是很可取的。

总的看来，大气的预报较之海温预报更为困难。在长期天气过程中，大气自身不能看作为一个闭合的系统，而是“大气-下垫面活动层”系统之一部分。在这个系统中，大气部分惯性很小，变化剧烈，而海洋部分惯性很大，较为稳定。因而得出上述结论是不足为怪的。

五、结 语

根据自然相似的分析我们认为，仅仅利用文中列举的月平均资料制作一个月的平均预报，可望达到的预报水平是很有限的，其中大气要素的预报较海温预报更困难。尽管如此，这种预报的价值还是应当肯定的，在这方面继续做出努力是有意义的。本文给出的数

据可以作为选择预报方案的一种依据, 在方案实现后也可以用来估计是否还有潜力可挖, 这对于设计和改进预报模式都是有指导意义的。

需要指出, 本文得出的一些结论还不能认为是最终的。由于手头缺少系统的资料, 象冰盖、雪盖面积、地面温度及南半球的大气观测资料等重要因素均未能参加统计, 增加这些资料有可能提高我们估计的预报水平。另外, 我们采用的经验公式也带有一定的主观性, 这是不足之处。

参 考 文 献

- [1] Spar, J., R. Atlas and E. Kuo, Monthly mean forecast experiments with the GISS model, *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1215—1241, 1976.
- [2] Марчук, Г. И., Методы долго-срочного прогноза погоды на основе решения основных и сопряжённых задач, *Метеор. И Гидр.* 3, 17—34, 1974.
- [3] 长期数值天气预报研究小组, 长期数值天气预报的滤波方法, *中国科学*, 1, 75—84, 1979.
- [4] 郭秉荣、史久恩、丑纪范, 使用多时刻历史资料的动力-统计长期天气数值预报模式, 第二次全国数值天气预报会议论文集, 科学出版社, 115—126, 1980.
- [5] 曹鸿兴, 局地天气预报的数据分析方法, 气象出版社, 17—18, 1983.
- [6] 张家诚, 长期天气预报方法概要, 农业出版社, 12—16, 1981.
- [7] Lorenz, N., Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues, *J. Atmos. Sci.*, 26, 636—651, 1969.
- [8] 王绍武、赵宗慈, 长期天气预报基础, 1981.
- [9] Edmon, H. J. Jr., A diagnostic study of the 1976—77 and 1977—78 winters over the Northern Hemisphere, Proceedings of the Fourth Annual Climate Diagnostics Workshop, Wisconsin, 156—172, 16—19, October, 1979.
- [10] Quiroz, R.S., Long-wave contributions to tropospheric and stratospheric temperature anomalies in winter, Proceedings of the Fourth Annual Climate Diagnostics Workshop, Wisconsin, 37—40, 16—19, October, 1979.

PREDICTABILITY LEVELS OF MONTHLY FORECAST BASED ON TIME AVERAGED OCEAN/ATMOSPHERE VARIABLES: A NATURALLY OCCURING ANALOGUES STUDY

Qiu Chongjian Chou Jifan

Yang Dawei

(Lanzhou University)

(Gaesu Computing Station)

Abstract

Naturally occurring analogues in the monthly averaged date of 1000, 500, 100hPa height and sea-surface temperature (SST) in the Pacific, Atlantic, Indian Ocean during the period January₁ 1956—December 1972 are used to study the potential predictability levels of monthly mean forecast of Ocean/atmosphere variables.

It is found that in the ocean-atmosphere system the forecast of geopotential height may be more difficult than SST. It is also found that the predictability level of geopotential height anomaly calculated from the corresponding monthly SST appear relatively poor, but it can be improved by using past observational date of monthly mean SST/geopotential fields.