

一个预报西北太平洋台风移动的 Markov 型相似模式

王 继 志

C. J. Neumann

(国家气象局北京气象中心, 北京)

(美国国家飓风中心)

摘 要

本文建立了一个 Markov 型相似模式, 用于预报西北太平洋热带气旋的移动。在概率求解方法上部分吸取了美国大西洋飓风预报的 HURRAN 方法。本模式跟传统的相似求解方法与概念是有原则区别的, 为了使相似的选择能不断逼近和适应新的资料, 采用 Markov 过程来描写台风移动的概率预报问题。72 小时预报分 6 步来作, 每步预报起始资料和相似概率求解资料都在不断更新。

为试验模式性能, 文中还移植了传统的相似法, 建立了预报太平洋台风移动的相似模式(方案 1), 并将方案 1 与 Markov 型相似模式(方案 2)做相同实例的平行对比预报。对 1981 和 1982 年共 95 次台风的独立资料, 进行了 72 小时预报试验。结果表明, 方案 2 预报误差明显减小。

一、引 言

从 1969 年飓风季节开始, 美国 HURRAN 方法作为一个北大西洋飓风业务预报模式, 一直沿用至今^[1]。Haggard^[2] 1965 年提出了风暴侵袭的概率预报问题。后来 Hope 和 Neumann 也进一步提出了这种设想^[3]。七十年代, Neumann 和 Mandal^[4] 用相似方法预报了孟加拉湾和阿拉伯海的热带气旋。我国中央气象台也应用相似法, 建立了一种台风移动预报模式^[5]。

美国 HURRAN 相似模式的优点之一是, 预报的设计逻辑思路严谨, 预报结果输出的参考数据量大。预报可以概率的形式给出, 输出概率椭圆的各类参数, 这是一个很有预报能力的方法。在业务预报中, 预报员往往把这种方法得出的结果作为第一预报结论来使用^[1, 6]。

然而, 观测和研究表明, 热带气旋移动的相似运动现象是有条件的、短时的。相似方法的预报水平有待于改进和提高^[7]。本文通过在电子计算机上分析和计算 96 年的 2355 个热带气旋的路径后认为, 台风的移动是一种不规律的运动, 尽管台风有偏西和西偏北移动的总趋势。把 96 年中, 在同一季节或同一月份的几百个台风路径进行比较, 也很难找到一个台风在长达 48 小时至 72 小时这样一个时段里, 有完全类同的移动路径。图 1 给出了 1884 到 1979 年 7 月 1 日至 10 日十天的台风路径总图, 此图正反映出上述事实。因此, 为了改进和提高预报准确率, 从理论上和方法上对相似方法进行改进是很有必要的。

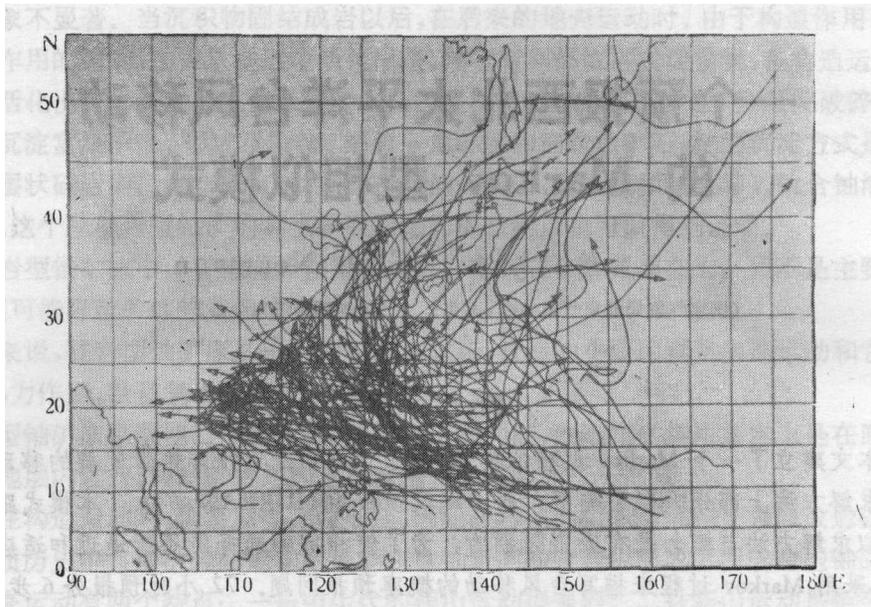


图1 使用历史资料的部分样本
(1884—1979年7月1日—10日十天台风路径总图)

台风既有一个总的移动趋势但又是随机移动的现象表明,在预报思路中必须同时注意到这两点。一是考虑持续性因子,但必须限定在一个较短的时间间隔内;二是应把一个台风在长达两到三天的移动看作是与某个时期前的运动状态无关的一种 Markov 过程。正如把质点的 Brown 运动看作是三维 Markov 过程一样,台风的移动应看作是一种具有二维概率运动的 Markov 过程 (William, 1981)^[8]。通常,在 Markov 过程中,把一种运动的所有可能状态分别记为 E_1, E_2, \dots , 把发生转移的时间记为 t_1, t_2, \dots 。用 P_{ij} 表示系统由状态 E_i 经过一次转移到状态 E_j 的概率,则转移概率 P_{ij} 可以排列成一个一阶矩阵。高阶转移概率可以排列成高阶转移矩阵^[9]。

$$P^{(k)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(k)} & p_{12}^{(k)} & p_{13}^{(k)} & \dots \\ p_{21}^{(k)} & p_{22}^{(k)} & p_{23}^{(k)} & \dots \\ p_{31}^{(k)} & p_{32}^{(k)} & p_{33}^{(k)} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

然后,通过计算高阶转移概率,转移矩阵得出状态的演变,作出预报。但这需要繁杂的计算才能完成。本文采用 HURRAN 相似概率求解方法^[10]。这样可吸取该方法在台风移动和侵袭的概率预报方面的优点。由于在描述整个移动状态时采用 Markov 过程,利用其“无后效性”的特点,相似的选择将更逼近实际状态。随着预报一步步作下去,相似选择可在更新的初始资料基础上,在新环境中寻求更合适的解。

二、基本方法

考虑到热带气旋运动的复杂特征,当时段 T 足够大时,即 $T > t$, 风暴侵袭某地的概率看作与时间 t 以前的运动状态无关。于是只考虑与新的地点环境有关的新的概率,即某种意义

上的所谓“转移概率”。转移过程是以预报状态为最大概率, 需要求解的是对新环境的概率相似运动。

在本文中, 72 小时预报分 6 步来作, 时间 $T \leq 12$ 小时以内的运动为概率相似运动, 当 $T > 12$ 小时, 作为一种 Markov 过程的无后效运动, 概率的求解需重新进行。我们使用了计算概率椭圆的理论和方法, 这个方法可用于任意条件下(如 $T > t$)。

二维正态概率密度函数可由下式表示:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho_{xy}^2}} e^{-G/2},$$

其中 G 为 xy 平面上描绘一个椭圆的轨迹, 即

$$G = \frac{1}{1-\rho_{xy}^2} \left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho_{xy}(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right]$$

(Lindgren, 1962)^[11], 这里母体参数是: μ_x 为 x 坐标(纬向)的平均值, μ_y 为 y 坐标(经向)的平均值, σ_x 为 x 坐标的标准偏差, σ_y 为 y 坐标的标准偏差, σ_x^2 为 x 坐标方差, σ_y^2 为 y 坐标方差, ρ_{xy} 为 x 与 y 坐标的相关系数。

一种随机选择点落入 x, y 平面 s 区域内的概率, 可通过积分概率密度函数来求得:

$$P(s) = \iint_s f(x, y) dx dy.$$

这里 $G = C^2$, 每一给定 C 值, 可决定一个常值 $f(x, y)$, 即给定了等概率椭圆。 C 值给定后所确定的概率为:

$$P = 1 - \exp(-C^2/2).$$

计算概率椭圆长轴半径和短轴半径, 可先求出特别指定的概率下的 C 值(如指定 $P=0.50$, 则 $C = 1.1774$), 然后将 C 与沿该轴的标准差相乘求得。于是, 任意一个给定概率, 其长短轴的长度都可以求出。任意指定概率条件下, 台风可出现的预报区域即可得出。

三、历史资料与相似选择

本文采用了美国国家飓风中心多年历史资料。这些资料包括 1884 年以来共 96 年的太平洋台风路径资料。每天有两次标准观测资料, 每次各观测资料均有记载。整个 96 年期间共有 26623 个观测时次的记录, 其中包括移向和移速等重要资料。这些资料均作为本模式的相似资料序列。

相似选择是用计算机对 2355 个热带气旋逐一审阅比较, 以决定它们是否满足相似条件。

我们同时对移植原相似方法和 Markov 型相似方法的两个方案进行试验, 它们都必须满足如下两个条件:

(1) 一个待预报的台风, 其实况的中心位置, 必须落入以被选取的历史上的台风中心的‘实况’位置为中心, 以 1.2 个纬距为半径的圆内。

(2) 待预报的台风和被选取的历史上的台风, 它们 12 小时前的位置也必须满足上述相似条件。

在初始时刻 $t = 0$ 时, 选取并计算了一组相似风暴路径, 然后 12 小时直到 72 小时的预报, 均依据这一组已选路径由相似法给出, 这就是方案 1 的方法。

LIST OF LATITUDE AND LONGITUDE PAIRS....

18.7	136.1	18.2	136.3	19.2	136.5	19.8	135.9
19.2	136.3	18.4	137.0	19.5	136.9	19.3	136.2
19.0	135.9	20.3	135.6	18.2	135.4	18.2	135.5
19.0	137.0	19.3	136.7	18.8	136.4	19.4	136.6
19.5	133.6	18.7	137.2	17.8	137.6	19.0	136.8
19.8	136.4	19.9	135.4				

NUMBER OF CASES 22

STANDARD DEVIATION ALONG UNROTATED X AND Y AXES 0.79 0.64

COVARIANCE XY -0.16 CORRELATION COEFFICIENT -0.315

ROTATION (DEGS) OF MAJOR (X') AXIS FROM EAST -27.8

STANDARD DEVIATION ALONG ROTATED X AND Y AXES 0.84 0.57

PROBABILITY (PERCENT)

....SEMI LENGTH....
MAJOR AXIS MIN OR AXIS

5	0.27	0.18
10	0.39	0.26
15	0.48	0.32
20	0.56	0.38
25	0.64	0.43
30	0.71	0.48
35	0.78	0.53
40	0.85	0.58
45	0.92	0.62
50	0.99	0.67
55	1.07	0.72
60	1.14	0.77
65	1.22	0.83
70	1.31	0.88
75	1.40	0.95
80	1.51	1.02
85	1.64	1.11
90	1.81	1.22
95	2.06	1.39
99	2.56	1.73

ELLIPSE CENTROID (MEAN LAT/LON) IS 19.05 136.24

NOTE....ALL DISTANCES ARE IN DEGREES OF LATITUDE

(a) 方案 2

LIST OF LATITUDE AND LONGITUDE PAIRS....

18.9	136.9	20.1	135.6	17.8	137.6	19.8	137.6
21.7	134.2	18.9	133.9	19.4	136.6	17.3	134.8
20.0	140.2	18.9	136.8	17.9	138.0	17.9	137.1
19.0	137.0	20.4	136.1	16.9	136.9	20.4	133.8

NUMBER OF CASES 16

STANDARD DEVIATION ALONG UNROTATED X AND Y AXES 1.59 1.30

COVARIANCE XY -0.52 CORRELATION COEFFICIENT -0.250

ROTATION (DEGS) OF MAJOR (X') AXIS FROM EAST -25.5

STANDARD DEVIATION ALONG ROTATED X AND Y AXES 1.66 1.20

PROBABILITY (PERCENT)

.... SEMI LENGTH....
MAJOR AXIS MINOR AXIS

5	0.53	0.38
10	0.76	0.55
15	0.95	0.68
20	1.11	0.80
25	1.26	0.91
30	1.41	1.01
35	1.54	1.11
40	1.68	1.21
45	1.82	1.31
50	1.96	1.41
55	2.10	1.52
60	2.25	1.63
65	2.41	1.74
70	2.58	1.86
75	2.77	2.00
80	2.99	2.15
85	3.24	2.34
90	3.57	2.58
95	4.07	2.94
99	5.05	3.64

ELLIPSE CENTROID (MEAN LAT/LON) IS 19.08 136.44

NOTE....ALL DISTANCES ARE IN DEGREES OF LATITUDE

(b) 方案 1

图 2 第 24 小时预报的计算机打印结果

LIST OF LATITUDE AND LONGITUDE PAIRS

22.8	130.4	24.7	130.0	25.7	130.4	23.1	129.7
23.6	130.6	24.5	128.9	23.8	130.6	24.9	130.6
23.6	129.8	22.9	128.2	24.1	129.3	23.7	130.0
23.8	130.9	22.9	130.2	24.8	129.1	23.2	129.7
24.3	131.2	25.6	131.5	23.2	128.4	24.4	130.0

NUMBER OF CASES 20

STANDARD DEVIATION ALONG UNROTATED X AND Y AXES	0.80	0.87
COVARIANCE XY	0.25	CORRELATION COEFICIENT 0.363
ROTATION (DEGS) OF MAJOR (X') AXIS FROM EAST	51.7	
STANDARD DEVIATION ALONG ROTATED X AND Y AXES	0.98	0.66

PROBABILITYSEMI LENGTH....

(PERCENT)	MAJOR AXIS	MINOR AXIS
5	0.31	0.21
10	0.45	0.30
15	0.56	0.38
20	0.65	0.44
25	0.74	0.50
30	0.82	0.56
35	0.91	0.61
40	0.99	0.67
45	1.07	0.72
50	1.15	0.78
55	1.23	0.83
60	1.32	0.89
65	1.41	0.96
70	1.51	1.02
75	1.63	1.10
80	1.75	1.19
85	1.90	1.29
90	2.10	1.42
95	2.39	1.62
99	2.96	2.00

ELLIPSE CENTROID (MEAN LAT/LON) IS 23.98 129.97

NOTE....ALL DISTANCES ARE IN DEGREES OF LATITUDE

(a) 方案 2

LIST OF LATITUDE AND LONGITUDE PAIRS.....

22.8	133.1	27.0	126.7	21.9	130.4	25.1	136.0
28.4	125.9	26.8	125.1	24.2	130.7	21.1	127.6
28.4	132.9	24.2	142.4	21.6	136.6	25.0	142.8
19.7	136.9	28.8	127.0	22.3	129.4	26.4	129.1

NUMBER OF CASES 16

STANDARD DEVIATION ALONG UNROTATED X AND X AXES	5.05	2.85
COVARIANCE XY	-5.13	CORRELATION COEFICIENT -0.356
ROTATION (DEGS) OF MAJOR (X')AXIS FROM EAST	-15.3	
STANDARD DEVIATION ALONG ROTATED X AND Y AXES	5.19	2.60

PROBABILITYSEMI LENGTH....

(PERCENT)	MAJOR AXIS	MINOR AXIS
5	1.66	0.83
10	2.38	1.19
15	2.96	1.48
20	3.47	1.73
25	3.94	1.97
30	4.38	2.19
35	4.82	2.41
40	5.24	2.62
45	5.67	2.84
50	6.11	3.06
55	6.56	3.28
60	7.02	3.52
65	7.52	3.76
70	8.05	4.03
75	8.64	4.32
80	9.31	4.66
85	10.11	5.06
90	11.13	5.57
95	12.70	6.36
99	15.75	7.88

ELLIPSE CENTROID (MEAN LAT/LON) IS 24.61 132.04

NOTE....ALL DISTANCES ARE IN DEGREES OF LATITUDE

(b) 方案 1

图 3 第 72 小时预报的计算机打印结果

Markov 相似模式(即方案 2), 72 小时预报分成 6 步作出, 每步作 12 小时预报. 虽然相似条件与方案 1 相同, 但每一步的“转移概率”预报是通过当时已获取的最新、最优概率为基础, 在新的环境中寻求新的相似概率. 因此, 每次预报的起点位置和相似的风暴集合的选取都在更新.

四、预报举例

下面给出 1981 年 8 月 27 日 00 时(世界时)对台风 AGNES (中央气象台编号为 8114 号台风)的预报例子. 从这一例子可以看到, 以本方案作预报的完整过程. 当时, 台风 AGNES 位于北纬 17.3 度, 东经 139.7 度. 12 小时前它位于北纬 16.9 度, 东经 142.0 度.

图 2 是 24 小时预报概率椭圆及各种数据的计算打印结果. 图 2a 给出了所有被选中的风暴概率椭圆长、短轴的半径以及各种数字特征, 最后给出从 0.05 的概率到 0.99 的概率下的所有概率椭圆的资料. 图 2a 是用方案 2 作出的. 图 2b 为方案 1 的结果, 所给数据资料格式与方案 2 完全相同. 类似地, 我们还打印给出 36 小时、48 小时、60 小时、72 小时的预报结果. 图 3 为 72 小时预报结果. 图 2a 是方案 2 的结果, 图 2b 为方案 1 的结果. 图 4 绘出所选取的台风在 2.5 经纬度方格内的分布及台风未来的移动趋势.

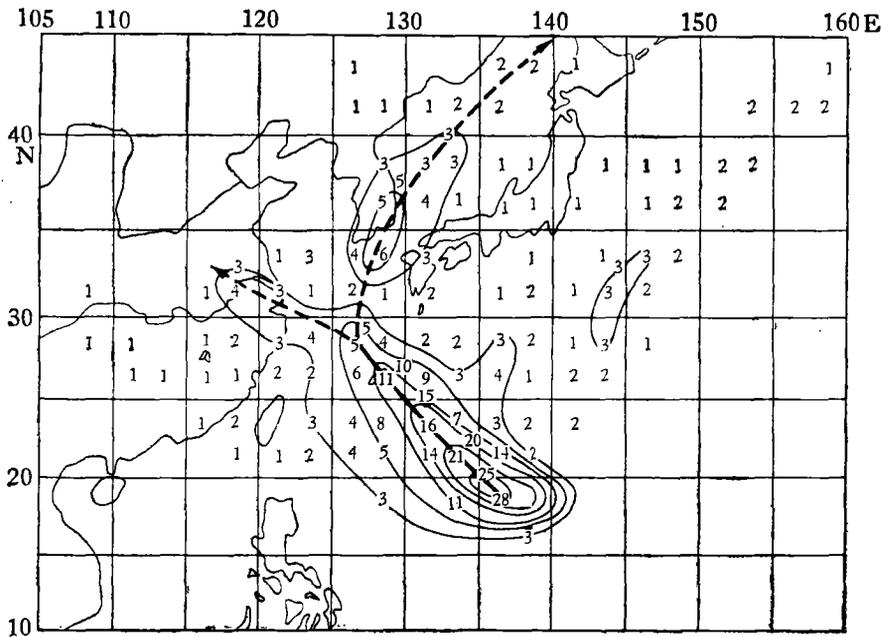


图 4 方案 2 的 36 小时预报所选取的台风在 2.5 经纬度网格内的分布 (台风个数)

对比图 2 和图 3 上下两方案的结果可见, 在方案 2 中, 每一新的预报时段里, 所选取的一组相似台风是有变化的. 由图 5a 可见, 台风 AGNES 的实际路径与方案 2 的预报更接近, 即方案 2 预报比方案 1 效果好. 图 5b 给出该台风 72 小时概率预报结果.

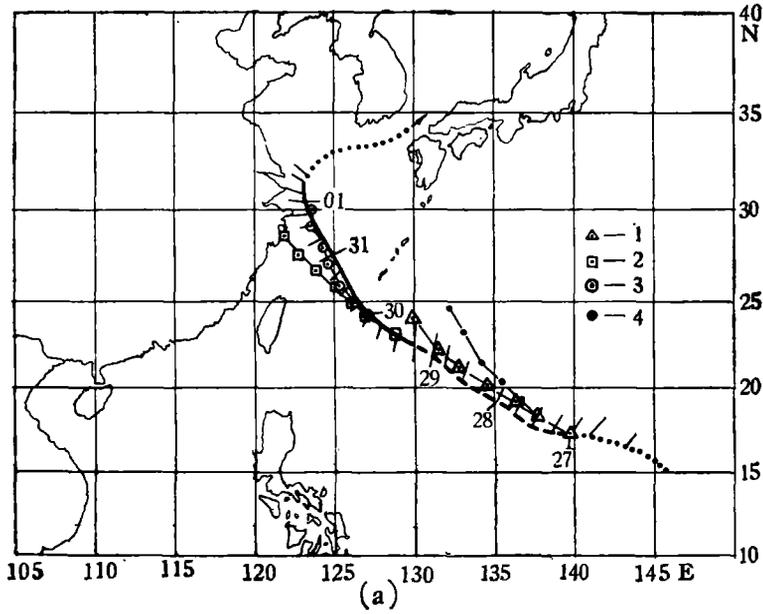


图 5(a) 台风 AGNES 的实况路径与预报路径

(图中符号 1. 方案 2 所作 9 月 27 日 00 时起报的路径,起报位置 17.3N, 139.7E; 2. 方案 2 的 29 日 12 时预报,起报位置 23.1N, 129.0E; 3. 方案 2 的 30 日 00 时的预报,起报位置 24.3N, 127.2E; 4. 方案 1 所作 9 月 27 日 00 时起报的路径)

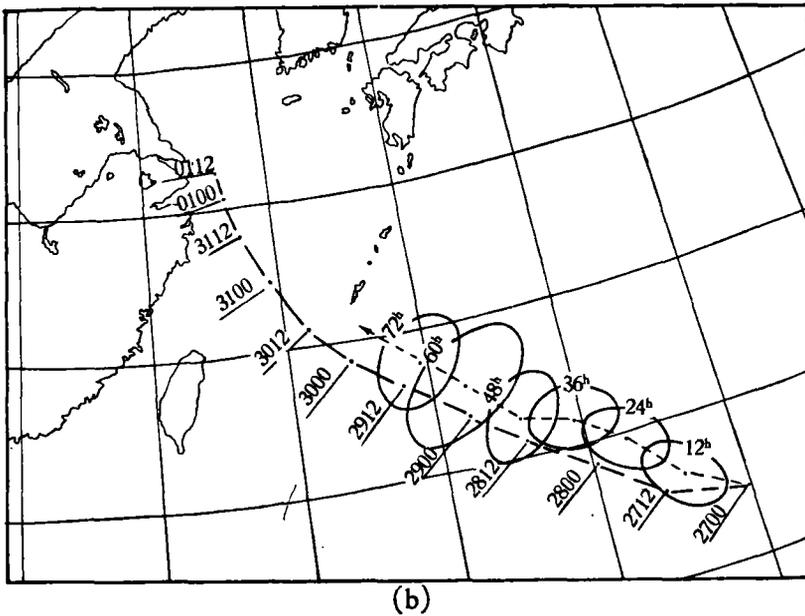


图 5(b) 方案 2 所作台风 AGNES 72 小时移动的概率预报结果
(起报时间为 9 月 27 日 00 时)

五、预报误差

风暴的观测位置是取自最佳路径。最佳路径的取得,是在得到所有可能得到的资料后,经分析整理和归纳,最后成为历史档案路径。预报误差是用以下公式计算的^[7]:

$$FE = \{[(x_0 - x_t) \cos(y_0 + y_t)/2]^2 + (y_0 - y_t)^2\}^{\frac{1}{2}},$$

其中 (y_t, x_t) 和 (y_0, x_0) 分别为预报和观测的纬度和经度。本文计算了各台风的平均预报误差。图 6 给出了方案 1 和方案 2 的平均预报误差。由图 6 可得如下结果:

1) 由方案 2 作出的 1981 年台风移动的平均预报误差 24 小时和 72 小时分别为 1.3 和 4.3 纬距; 1982 年的平均预报误差 24 小时和 72 小时分别为 1.2 和 3.7 纬距。这表明本文给出的新方案对于西北太平洋台风预报是一个有预报能力的模式。

2) 方案 1 的平均预报误差比方案 2 大,但仍然具有一定的预报能力。

3) 总的看来,移植和改进的方案 1 和 Markov 型相似模式(方案 2)对西北太平洋台风的预报,比原来 HURRAN 模式在大西洋区域的预报^[7]误差有了减小。

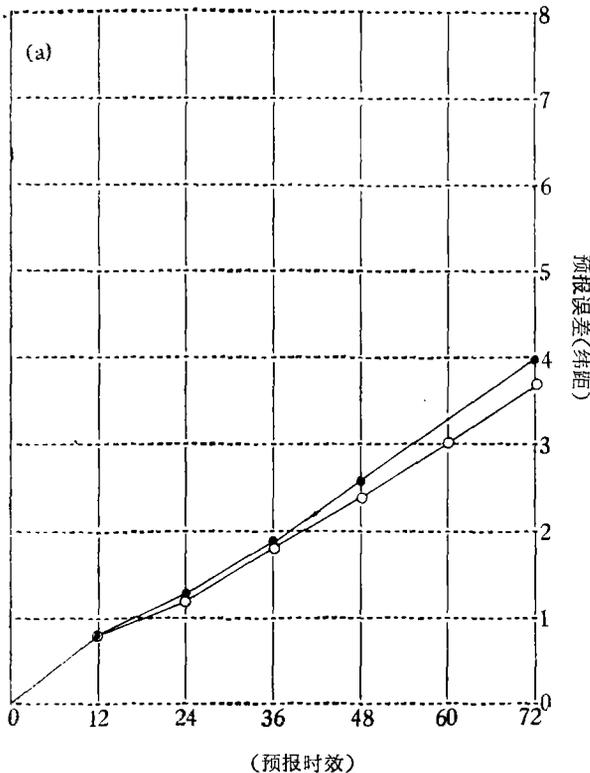


图 6a 1982 年台风试报的平均预报误差
(○为方案 2, ●为方案 1)

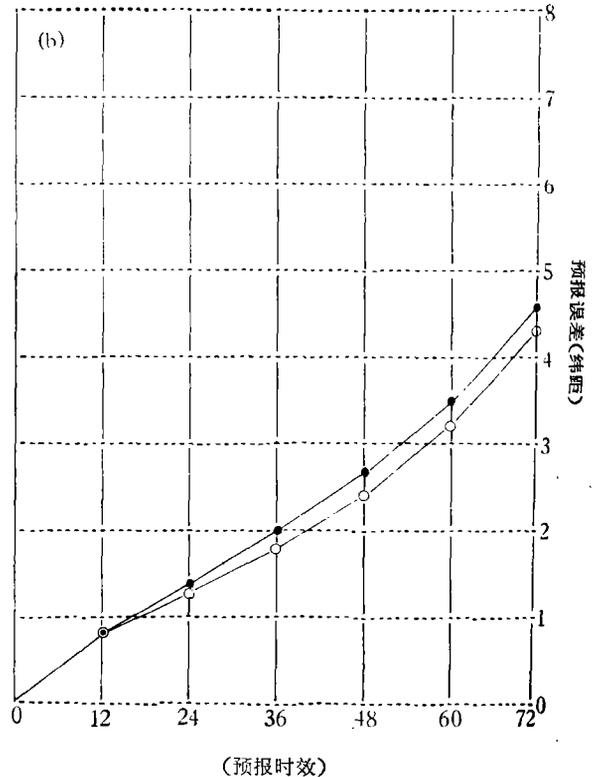


图 6b 1981 年台风试报的平均预报误差
(○为方案 2, ●为方案 1)

六、讨 论

Neumann 对于在大西洋区域使用的若干飓风预报模式的研究指出^[7],不可能有这样的模

式,它在预报时效、可预报范围经济和效益方面的优点全部具备.也未发现各方面全都失败的模式.本文给出的两个预报模式也有类似情形.方案 1 系经改进的由大西洋飓风模式移植而成.它与原 HURRAN 模式原理类同,其误差较 Markov 方案大.但对某些例子,其预报效果仍较好. Markov 型(方案 2)相似模式预报效果有明显改进,但目前我们只作了两个台风年度的预报,还有待进一步试验.应当指出,在业务预报中,使用初始资料未经修正,也将会使预报误差有所增加.

Markov 型方案的一个不足是占用计算机时间较长,需要六次由计算机自动阅读历史资料文件.但据 1981 和 1982 年两年的预报试验看来,这样作是值得的,其结果是使预报误差减小.

概率椭圆参数具有十分重要的预报意义.在一个闭合的区域(A)内,对二维正态密度函数积分^[10]

$$\iint_A F(x, y) dx dy$$

可以求出一个风暴在任意给定时间进入一个指定区域的概率.这个积分结果提供了在预报的时段内,一个风暴可能进入任意一特定城市,在某一给定距离范围内的概率有多大.从这个理由上看,在某一可以允许的预报误差范围内,一个风暴的预报概率椭圆越小,预报效果则越好.

本文提出的 Markov 型相似模式,预报西北太平洋台风的移动,既吸取了 HURRAN 模式在大西洋飓风概率预报方面的优点,同时,在模拟西北太平洋台风移动时,考虑了台风运动路径的复杂性和不确定性,使相似求解不断更新和逼近适应新的环境场.

预报试验结果表明,该模式取得了良好的预报效果,预报误差明显减小.

致谢:本工作是在本文第一作者作为访问学者在美国大气海洋局国家飓风中心工作期间开始的.大量计算工作是在美国国家大气海洋局大型计算机 IBM-360 上完成的,后又在中国国家气象局大型计算机 M-170 上完成复算和检验,并完成 1982 年度台风的试报工作,作者对此深表谢意.中国科学院大气物理研究所陶诗言教授,美国国家飓风中心主任 Frank 博士和研究与发展办公室 Leftwich 博士以及中央气象台牟惟丰高级工程师对本工作给以有益的帮助,作者一并致谢.

参 考 文 献

- [1] Hope, J. R. & Neumann, C. J., *Preprints 11th Tech. Conf. Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami Beach, Amer. Meteor. Soc., 1977, 367—374.
- [2] Haggard, William H., et al, *Presented at the Forth Tech. Conf. On Hurricanes and Tropical Meteorology*. Miami Fla., 1965, Nov., 22—24.
- [3] Neumann, C. J. & Hope, J. R., *Tech. Memorandum WBTM SOS-1*, 1968, 67.
- [4] Neumann C. J., Mandal, G. S., *Indian J. Met. Geophys.*, 29(1978), 3: 487—500.
- [5] 陈联寿、丁一汇,西太平洋台风概论,科学出版社,1979,388—391.
- [6] Neumann, C. J., *NOAA Tech.*, NHC 11, 1979, 26.
- [7] Neumann, C. J. & Pelissier, J. M., *M. W. E.*, 109(1981), 3: 522—538.
- [8] William, G. L., *A Hurricane Prediction Model Using Markov Processes*, University of Texas Austin.
- [9] 王宗皓、李麦村等,天气预报中的概率统计方法,科学出版社,1974,116—122.
- [10] Hope, J. R. & Neumann, C. J., *M. W. Rev.*, 98(1970), 925—933.
- [11] Lindgren, B. W., *Statistical Theory*, The Macmillan Company, N. Y., 1962, 422.