

文章编号: 1004-4965 (2003) 01-0107-06

利用卫星云图变分同化初始场对热带气旋 路径影响的数值试验

王学忠^{1,2}, 沙文钰², 端义宏³

(1. 南京气象学院大气科学系, 江苏 南京 210044; 2. 解放军理工大学气象学院,
江苏 南京 211101; 3. 上海台风研究所, 上海 200030)

摘 要: 利用上海台风研究所的东海热带气旋预报模式, 讨论用卫星亮温资料变分同化初始温度场及相对湿度场对热带气旋移动路径的影响。结果表明, 对 400 ~ 925 hPa 模式的温度场、相对湿度场和温度场的变分同化对热带气旋移动路径预报有较好的实用意义。

关 键 词: 热带气旋; 卫星资料; 变分同化; 路径; 数值模拟

中图分类号: P447

文献标识码: A

1 引 言

我国大部分地区受热带气旋的影响, 热带气旋登陆时的大风、暴雨和海潮可对沿海地区造成一定的损失, 但它带来的大量降水能缓解其影响区域的干旱问题。因此对它的移动和天气进行准确的预报具有重要意义。热带气旋一般生成于海洋, 那里测站稀少, 常规观测资料十分缺乏, 初始资料的获得和处理日益成为其预报发展的瓶颈。而卫星云图能较好地反映热带气旋的一些特征, 对卫星资料的使用对热带气旋的预报具有很强的实用价值。

变分方法最早引入气象领域是用于客观分析, Sasaki 等^[1]用变分技术对卫星资料和 NASA 的观测资料进行同化。Cram 等^[2]对 GOES 和 VAS 探测资料进行了变分同化试验, 指出 VAS 温度同化可改善对流不稳定区的预报, 而 VAS 湿度同化虽不能明显改善不稳定区的分布, 但对不稳定的强度有正贡献。从技术角度来讲, 卫星具有时间和空间的相关误差 (Phillips 等^[3]; Schlatter^[4]); 因而有人认为卫星资料的梯度信息比量值信息更加具有可靠性 (Charney 等^[5]; Hillger 等^[6])。沈桐立等^[7]采用统计变分反演方法进行降水预报试验, 发现用湿度同化可改善降水量的预报, 而对雨区预报没有明显改善; 若仅对温度场同化, 则可以明显改善雨区的预报; 两者同时应用效果更好。王登炎等^[8]采用卫星资料同化处理得到的湿度场进行降水预报, 预报效果好于利用常规处理方法的预报。

收稿日期: 2001-03-22; 修订日期: 2001-09-24

基金项目: 总参重点项目[2000]参作气字第 61 号

作者简介: 王学忠 (1971-), 男, 吉林柳河人, 讲师, 在读博士生, 主要从事天气气候学的研究。

2 模式和方法

2.1 模式介绍

本文使用东海热带气旋预报系统模式^[9], 该模式以 PSU/NCAR 设计的 MM4 为框架, 采用 Lambert 地图投影。地形资料取自 $1/6 \times 1/6$ 经纬度格点的全球地形资料, 模式网格为均匀网格, 格距 50 km。预报区域格点数为 91×99 , 模式层顶气压为 100 hPa, 垂直分层为等距 10 层。采用海绵侧边界条件, 总体边界层方案和郭晓岚积云对流参数化方案。模式台风构造采用 Iwasaki 方案^[10], 该方案和积云对流参数化方案具有较好的相容性。

2.2 变分方法

所谓变分方法就是求解泛函的极值问题。变分同化的基本原理, 就是满足一定约束条件的分析场的泛函, 在最小二乘法意义上达到最小。本文所采用的约束条件为分析场在量值上接近客观分析场, 而在梯度上接近卫星资料的梯度。泛函可以表示为

$$J = \iint_{x,y} \left[A(V - \hat{V})^2 + B(\nabla_x V - \nabla_x \tilde{V})^2 + C(\nabla_y V - \nabla_y \tilde{V})^2 \right] dx dy \quad (1)$$

其中 A 、 B 、 C 为权重系数; V 为分析场; $\hat{V}$ 是客观分析得到的要素场; $\tilde{V}$ 表示卫星亮温场, 从上海中心气象台的卫星云图信息管理系统中获得。取泛函极小值的边界条件为

$$V|_r = \tilde{V}|_r \quad (2)$$

根据不动边界泛函极值的欧拉方程方法, 则式 (1) 的欧拉方程为

$$A(V - \hat{V}) - B(\nabla_x^2 V - \nabla_x^2 \tilde{V}) - C(\nabla_y^2 V - \nabla_y^2 \tilde{V}) = 0 \quad (3)$$

假设场值是各向同性, 即 $B=C$, 取 $\sigma = \nabla^2 \tilde{V} - b\tilde{V}$, 其中 $b=A/B$, 则可得到赫姆霍兹形式的方程

$$\nabla^2 V - bV = \sigma \quad (4)$$

然后用超松弛方法求解上述赫姆霍兹方程, 其迭代公式为

$$V_{i,j}^{(n+1)} = \frac{\omega}{A + 4B \cdot m_{i,j}^2 / \Delta s^2} \left\{ A \cdot V_{i,j}^{(0)} + B(m_{i,j}^2 / \Delta s^2) \left[V_{i+1,j}^{(n)} + V_{i-1,j}^{(n)} + V_{i,j+1}^{(n)} + V_{i,j-1}^{(n)} \right] - (\tilde{V}_{i+1,j} + \tilde{V}_{i-1,j} + \tilde{V}_{i,j+1} + \tilde{V}_{i,j-1}) \right\} + (1-\omega)V_{i,j}^{(n)} \quad (5)$$

其中 n 为迭代次数, m 为地图放大系数, ω 为松弛因子 ($1 < \omega < 2$), Δs 为网格距。

对反演资料进行质量控制, 采用一种以客观分析场为标准的质量控制方法: 在假定卫星资料值和客观分析场具有线性相关, 取卫星云图的亮温作为自变量, 线性回归得到的量具有和要素场相同的量级。这种做法的主要根据在于, 客观分析场和卫星资料是对台风系统通过两种途径得到的资料, 两者应该存在本质上的 consistency。

2.3 计算流程

先读取测站资料及 T_{30} 预报场资料 (1995 年前为 T_{20}), 然后把 T_{30} (T_{20}) 资料作为初估场, 对 1000 ~ 100 hPa 的标准等压面进行客观分析, 对地面物理量场和高空相对湿度采用二维单变量最优插值方案; 对位势高度场、温度场和风分量场则采用多元最优插值。再根据台风的位置和强度参数, 加入模型台风, 得到的初始场用云顶亮温资料同化, 通过正规初值化, 进入模式运算。

3 数值试验

3.1 试验设计

设计 3 种共 6 组试验对加入模型台风后的温度场和相对湿度场进行同化 (表 1), 其中等压面 1 ~

10 层依次对应为：100、150、200、250、300、400、500、700、850 和 925 hPa；针对 9414 号台风的 1994 年 8 月 8~10 日 08 时（北京时，下同），9417 号台风的 1994 年 8 月 21 日 08 时，9711 号台风的 1997 年 8 月 17 日 08 时 3 个台风 5 个时次进行数值试验。由于云顶的亮温值的梯度在某些区域非常大，为了保证模式计算的稳定性，对其进行了必要平滑。

表 1 利用云图亮温同化的试验设计

同化的要素场	1~5 等压面层	6~10 等压面层
温度场	试验 1	试验 2
相对湿度场	试验 3	试验 4
温度场和相对湿度场	试验 5	试验 6

3.2 试验结果分析

9414 号台风于 8 月 8 日 3~4 时在台湾基隆登陆，风力达到 12 级，最大风速 50 m/s，中心气压 945 hPa。由于海陆分布和周围天气系统的影响，8 月 8 日出现云型的非对称结构，大风区和强降水区主要集中于台风的东部，成为十分典型的非对称的热带气旋。图 1~3 分别给出了 94080808 时的云顶亮温场、500 hPa 的温度场、变分同化后的 500 hPa 温度场。从图 3 可以看出，变分同化后的温度场的场值比较“平滑”，与图 2 相比较，加入的模型台风的中心暖心结构有所减弱。

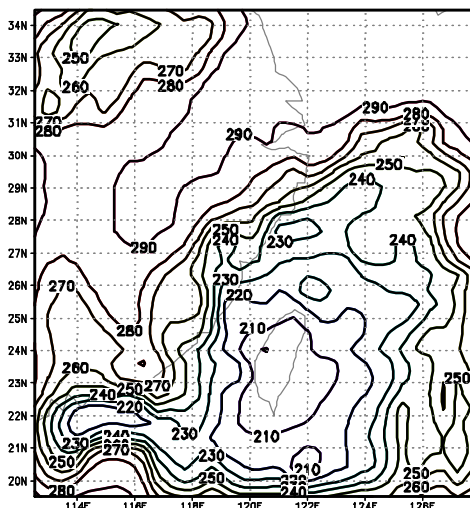


图 1 94080808 时的云顶亮温（单位：K）

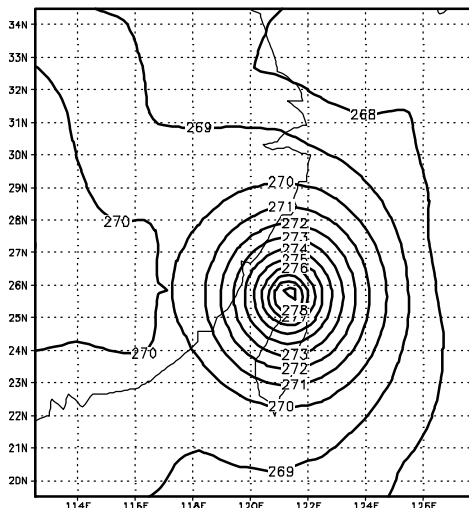


图 2 94080808 时的 500 hPa 的温度场（单位：K）

在数值试验中热带气旋中心位置是利用模式层的输出值，插值到标准等压面，然后利用地形高度，通过静力平衡关系，求出海平面气压的最低值，再由双线性插值，求出所在的网格坐标，用地图投影公式反算出经纬度得到的。

表 2 给出了 3 个热带气旋 5 个时次相对于实况位置的偏差。其中 AV48/3 表示 48 小时预报所有每 3 小时所在位置和与实况位置偏差的平均，可认为是模式对台风预报能力较为全面的反映。在业务应用中这种预报能力往往通过 24 小时和 48 小时的台风预报位置偏差来衡量。

对于 9414 号热带气旋在 8 日 08 时预报的路径偏差：对于试验 1，其预报能力比控制试验稍差；试验 2 总体的预报能力较控制试验有所提高，24 小时预报精度提高约 26 km，48 小时预报基本持平；

试验 3 总体上稍有改善；试验 4 的预报能力较强，相对于实况总体偏差减少了约 23 km，24 小时预报的精度提高了 54 km，48 小时也略有提高；试验 5 所有时次的平均和控制试验持平；试验 6 前 36 小时预报误差都较小，就相对于实况总体平均而言达到最小，可以说最为“真实”地反映了台风在这 48 小时内的移动。

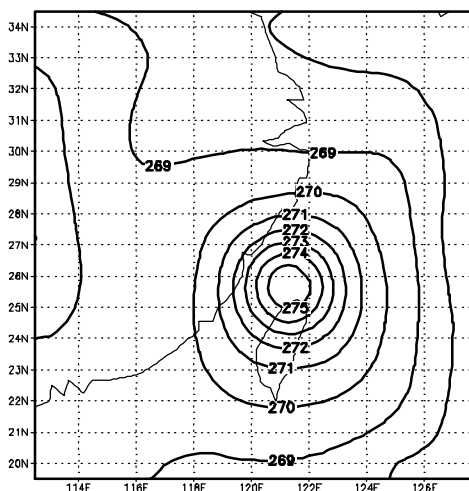


图 3 同化后的 500 hPa 温度场(单位: K)

对于 9414 热带气旋在 9 日 08 时的试验路径偏差，相对于实况试验 1 的偏差较大，平均每个时次较控制试验误差多 20 km，试验 4、5 的误差也很大；试验 3 与控制试验持平；试验 2、6 较好，在各个预报时次都有所改进，24 小时预报的误差提高了 40 km 左右，48 小时的预报提高了约 70 km。

10 日 08 时的路径偏差，试验 1、4、5 总体上相对于实况位置的偏差比控制试验大，约有 20 km；试验 6 和试验 2 的预报状况有所改进；其中试验 2 最好，每 3 个小时的时次平均偏差减少了 24 km 左右；所列的几个时次均有改善；试验 6 的在前面的时段有一定的改善，但 48 小时预报的误差增加了十几 km。

对于 9417 号台风的路径偏差，试验 1 就 24 小时和 48 小时预报的准确性而言稍有提高；试验 4 在 48 小时略有改善。从总体的效果来看，试验 1、2、3、4 和控制试验相对于实况位置的偏差持平，变化幅度不超过 2 km；试验 5、6 有所改善。

9711 台风是 1997 年对我国影响最大的热带气旋，17 日 08 时同化预报路径偏差相对实况位置总体而言，试验 1、2、3、5 的偏差和控制试验相仿，试验 4、6 有一定改善。

为了从总体上看各个试验对热带气旋路径的影响，表 2 还给出了上述的 3 个热带气旋 5 个时次的平均。从表中可以看出各个试验的总体效果：试验 1、5 相对于实况位置的偏差比控制试验还要大；试验 3、4 对台风位置的预报和控制试验持平；试验 2、6 有一定程度的改善；24 小时试验 2 的预报精度提高了 16 km，试验 6 提高了 23 km；48 小时的位置预报试验 2 的精度提高了 16 km，试验 6 提高近 5 km；从每个时次的平均来看，试验 6 大约提高了 17 km，试验 2 提高 13 km。利用同化技术改变上、下层的相对湿度场（试验 3、4）与控制试验的偏差 5 个个例平均每 3 小时路径偏差在 1 km 之内，可见试验对于相对湿度场不敏感；对于温度场（包括温度-湿度场）较为敏感，上层同化（试验 1、5）与控制试验的平均偏差为 6~7 km，下层同化（试验 2、6）最敏感与控制试验的偏差大于 10 km。

表 2 3 个热带气旋 5 个时次相对于实况的路径偏差（单位：km）

对比项目	预报时次	控制试验	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 6
Case 1 9414 94080808	12	130.98	134.77	126.64	131.14	120.13	137.03	116.97
	24	230.17	232.75	203.87	228.20	185.88	229.42	174.99
	36	207.54	205.47	210.90	204.20	180.30	205.68	173.99
	48	108.51	113.94	108.46	100.79	104.02	110.10	135.06
	AV48/3	169.98	170.67	161.52	168.79	146.45	169.90	144.05
Case 2 9414 94080908	12	140.62	146.15	134.09	140.42	135.21	146.34	123.65
	24	280.95	294.96	242.71	280.68	277.50	293.46	234.61
	36	278.25	321.16	224.05	276.22	315.12	315.30	228.80
	48	238.23	291.79	163.11	235.22	281.55	284.73	172.24
	AV48/3	218.74	240.64	184.05	217.42	234.32	238.02	182.15
Case 3 9414 94081008	12	72.35	74.98	59.31	73.85	78.94	75.65	71.80
	24	111.72	128.95	91.75	111.17	125.22	128.68	101.86
	36	74.03	114.10	53.83	74.12	95.96	115.59	53.98
	48	97.24	149.00	72.97	93.83	116.11	149.02	109.13
	AV48/3	86.19	107.75	62.77	86.35	101.92	108.11	75.14
Case 4 9417 94082108	12	76.14	62.66	67.00	77.17	93.41	59.69	62.56
	24	83.67	68.30	84.86	86.08	92.82	67.95	91.17
	36	146.44	137.44	145.93	145.01	126.94	136.76	116.44
	48	263.94	254.35	280.41	265.70	248.14	248.03	264.93
	AV48/3	110.32	112.24	110.92	109.54	110.87	100.77	104.58
Case 5 9711 97082108	12	112.28	127.28	111.53	109.17	109.94	129.10	112.60
	24	268.99	265.29	271.76	267.57	255.24	267.19	255.74
	36	319.95	330.31	325.09	316.14	328.87	305.14	313.49
	48	445.42	443.67	449.11	443.21	462.94	451.48	447.20
	AV48/3	257.16	255.30	258.05	255.98	250.91	256.82	249.22
Case 1~5 平 均	12	106.47	109.17	99.71	106.35	107.53	109.56	97.51
	24	195.10	198.05	178.99	194.71	187.33	197.34	171.67
	36	205.24	216.29	191.96	203.14	209.44	215.69	177.34
	48	230.67	250.55	214.81	227.75	242.55	248.67	225.71
	AV48/3	168.48	175.32	155.46	167.62	168.89	174.72	151.03

4 结 论

(1) 对相对湿度进行同化（试验 3、4），3 个台风 5 个时次每 3 小时的总体平均路径偏差在 1 km 之内，对预报路径的影响不大，即热带气旋的路径对湿度场不敏感。

(2) 等压面层的温度场(包括温度-湿度)同化对路径的影响各个时次的平均较大。且下层(试验 2、6)比上层(试验 1、5)敏感。由于 400~925 hPa 是对流层主体，湿湿场的改变作用相对比较重要。

(3) 在试验中，下层的温度场同化和下层的温度相对湿度场同化对提高路径预报的精度有正的贡献。从 5 个时次的平均来看，对 24 小时和 48 小时的预报位置精度，下层的温度场同化均提高约 16 km；下层湿湿场的同化分别为 23 km 和 5 km；对于预报路径每 3 小时的平均也有提高，分别是 13 和 17 km。这说明同化后的路径更接近于实况位置，对热带气旋路径预报有较好的改善。另外，下层的湿度场的同化使得 24 小时的预报精度平均提高约 8 km，但后期的路径偏差平均有所增加，这说明下层湿度场的同化对台风路径的较短时间尺度的预报是正贡献。

有待于进一步研究的问题：在试验的设计中垂直层次分得不够细，未必是对预报有最大改善的层次；同化的区域由于资料的限制仅限于热带气旋云系，还应对整个模式预报区域的同化作进一步研究；若能利用 TOVS 资料的温度廓线资料进行同化分析，效果或许会更好；尚需对更多个例做进一步研究。

究。

参 考 文 献：

- [1] SASAKI Y K, GOERSS J. Satellite data assimilation using NASA data system test 6 Observations[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 1635 - 1644.
- [2] CRAM J M, KAPLAN M L. Variational assimilation of VAS data into a mesoscale model; Assimilation method and sensitivity experiments[J]. *Mon Wea Rev*, 1985, 113: 467 - 484.
- [3] PHILLIPS N, MCMILLAN L, GRUBER A, et al. An evaluation of early operational temperature soundings from TIROS-N[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1979, 60: 1188 - 1197.
- [4] SCHLATTER T W. An assessment of operational TIROS-N temperature retrievals over the United States[J]. *Mon Wea Rev*, 1981, 109: 110 - 119.
- [5] CHARNEY J, HALEM M, JASTROW R. Use of incomplete historical data to infer the present state of atmosphere[J]. *J Atmos Sci*, 1969, 26: 1160 - 1163.
- [6] HILLGER D W, T A VONDER Haar. Deriving mesoscale temperatures and moisture fields from satellite radiance measurements over the United States[J]. *J Appl Meteor*, 1977, 16: 715 - 726.
- [7] 沈桐立, 闵锦忠, 吴诚鸥, 等. 有限区域卫星云图资料变分分析的试验研究[J]. *高原气象*, 1995, 15: 58 - 67.
- [8] 王登炎, 俞康庆. 用 GMS 双谱资料估计湿度场及其在数值预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 1997, 8: 413 - 419.
- [9] 端义宏, 雷小途. 东海热带气旋预报业务系统的研制[A]. 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究[C]. 北京: 气象出版社, 1996. 295 - 302.
- [10] IWASIKI T, NAKANO H, SUGI M. The performance of a tropical track prediction model with cumulus parameterization[J]. *J M S Japan*, 1987, 65: 555 - 570.

A NUMERICAL STUDY OF TROPICAL CYCLONE FORECASTING BASED ON SATELLITE IMAGES VARIATIONAL ASSIMILATION INITIAL FIELD

WANG Xue-zhong^{1, 2}, SHA Wen-yu², DUAN Yi-hong³

- (1.Department of Atmospheric Science, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044 , China;
- 2. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 , China;
- 3. Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030 , China)

Abstract: Using the East China Sea Tropical Cyclone (TC) Forecasting Model developed by Shanghai Typhoon Institute, in connection with a variational assimilation of initial temperature and relative humidity fields basing on meteorological satellite brightness temperatures, the TC track is addressed. The result shows that the assimilation of the 400 ~ 925 hPa temperature, and temperature-relative humidity initial fields has improved the TC track prediction in some degree which is of much operational importance.

Key words: tropical cyclone; meteorological satellite image; variational assimilation; track; numerical simulation