

续表

电码	现时强度 (CI 指数)	最大持续风速 (kt)	最大持续风速 (m/s)	海平面气压 (hPa)
45	4.5	77	39	969
50	5.0	90	46	959
55	5.5	102	52	948
60	6.0	115	59	933
65	6.5	127	65	920
70	7.0	140	72	906
75	7.5	155	79	894
80	8.0	170	87	882
99	向温带气旋转变	不明		
//				

为了业务值班使用方便,把以上实用公式做成表格(表 3.2)直接查用。值得注意的是该统计关系仍然是 1 分钟最大持续风速的风压关系,与我国热带气旋等级标准(GB/T19201—2006)对台风强度规定为 2 分钟平均的最大持续风速的定义并不一致,因此在台风强度确定的实际业务过程中,还需做一定程度的修订。

表 3.2 台风中心附近最大风速 V_{\max} (m/s) 与中心海平面气压 P_c (hPa) 对应查算表

0~14°N																		
V_{\max}	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
P_c	1000	995	988	981	974	965	957	947	937	927	916	905	893	881	869	856	842	829
15~24°N																		
V_{\max}	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
P_c	1000	994	987	980	972	963	954	944	933	922	911	899	886	873	860	846	831	817
≥25°N																		
V_{\max}	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
P_c	999	993	986	979	970	961	951	940	929	917	904	891	877	863	849	833	818	802

3.4 路径预报

对于防台减灾而言,首先需要知道台风未来途经的区域,而这主要取决于台风的移动路径(一般用 3 小时或 6 小时间隔的各台风中心位置连线来表达),因此台风路径预报是防台减灾的首要问题。随着沿海经济的快速发展和城市化进程的加快,精确的台风路径预报越发显得重要,尤其是在登陆台风可能侵袭情况下,路径预报更是人员撤离和财产保护的重要科学依据。台风路径预报的偏差会导致风雨强度和分布以及风暴潮增水等的预报偏差,甚至预报失败。

在地面天气图上,台风环流的平均半径为数百千米,属于中尺度天气系统,其运动受到环境场更大尺度(数千千米)气压系统的影响,这就好比河

流中的旋涡随整个水流移动，另一方面也会受到台风内部更小尺度（数千米到数十千米）系统的影响。正如河流的运动受河岸和河床等边界的影响一样，台风的移动也会受到下垫面（海表、陆表）状况、地形（如山脉）等的影响。台风的路径预报涉及到多方面的复杂因素。

由于观测手段和资料的不断丰富，例如各种遥感卫星、多普勒天气雷达和GPS（全球定位系统）下投式探空仪观测等以及数值天气预报模式的发展，尤其是模式分辨率的提高、模式中物理过程的改进和资料同化技术应用的日益成熟，台风路径预报水平在过去20多年里取得了长足进步（见图3.19），2010年中央气象台24、48、72、96和120小时台风路径预报误差分别为107、199、296、387和499千米。随着沿海经济和城市的快速发展，精确的台风路径预报为登陆台风影响下人员疏散、撤离和财产保护提供科学的防台减灾指导尤其显得重要。台风路径预报中的难点之一是预报近海台风是否转向，转向的时间以及转向的位置等，台风转向预报的偏差会导致台风暴雨、大风和风暴潮等预报的偏差，甚至预报失败。

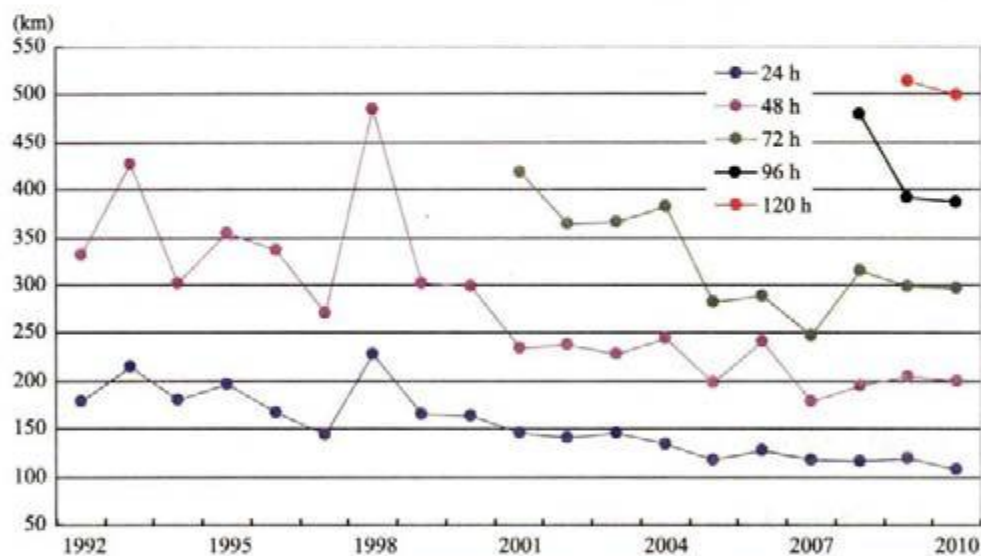


图 3.19 1992—2010 年中央气象台台风路径预报误差的逐年变化

在各种因素的综合影响下，台风路径会呈现各种特征，西北太平洋台风路径主要有5类，即非转向路径、西折路径、缓慢北折路径、快速北折路径和打转奇异路径（图3.20）。台风的移动与台风内部和外部影响的复杂相互作用息息相关，因此，精确预报各种台风路径需要正确地了解台风的内部特征以及环境对台风的影响，综合考虑各系统之间的关系和相互作用。

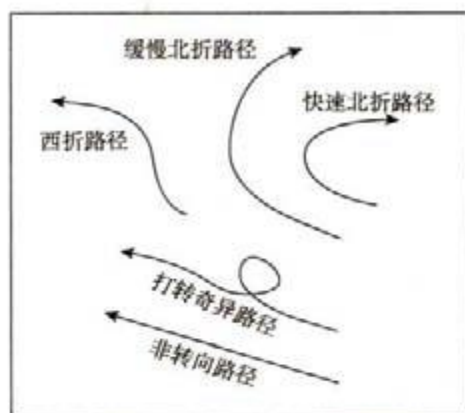


图 3.20 西北太平洋 5 类台风路径示意图
(NRL/PU/2541-95-0010)

3.4.1 传统台风路径业务预报方法

在 20 世纪 60—80 年代初,对台风的监测手段不多,大洋上的台风资料甚少,对台风移动规律的研究还处于天气学(大尺度环境场气压系统的作用)定性分析和气候学特征分析的认识水平,业务应用的台风路径预报方法大多建立在预报经验总结基础上,在科学性和客观性方面还存在不足,但是即使在气象监测手段、计算机资源、台风应用基础研究和台风数值预报水平较快发展之今日,预报经验(包括天气学分析诊断经验及各种客观预报和数值预报产品的应用经验)依然是对多种客观预报和数值预报路径作出分析判断和最终决策的重要依据。

(一) 天气气候学预报方法

(1) 外推预报方法

在大尺度环境场气压系统(如副热带高压和西风带长波槽)处于较稳定状态下,假设台风移动的方向和速度变化不大,可以根据台风前期(例如前 6 小时或 12 小时)的移向移速进行推算得到台风未来的位置,一般可在地面天气图上用尺来量测,将前期路径进行延伸即可,十分简便,但对于移向或移速发生突变的异常路径则往往预报失败。

(2) 相似预报方法

根据现时台风的特征或状态从台风历史资料库,检索满足相似判据的若干历史台风个例,综合分析其路径、风雨影响等作为现时台风可能的移动路径和风雨影响等预报。其相似判据包括 1) 活动时间相似。选取的历史台风的活动时间应与现时台风活动时间接近,通常前后不超过 1 个旬,以保证大尺

度大气状况的季节性相似；2) 位置相似。通常历史台风路径与关注时段现时台风位置的距离小于某一设定值，例如 200 km、300 km 等；3) 移向相似。历史台风移向与现时台风的移向偏差小于某设定值，例如取 22.5° ；4) 移速相似。历史台风移速与关注时段现时台风的移速偏差小于某设定值，例如取 10 km/h；5) 大尺度环境系统相似。取现时台风周围大尺度系统（如副热带高压、大陆高压、西风带长波槽、相邻台风等）的相对位置或方位距离等特征。

图 3.21 是用中国气象局上海台风研究所的西北太平洋台风检索系统查找的关于台风“圣帕”（Sepat, 2007）的相似路径分布，从图中可看出类似当前“圣帕”路径（图中绿色阴影表示）的历史台风路径主要分三类：一直西行在广东或海南登陆，西北行在台湾或福建浙江沿海登陆，西北偏北行在海上向东北转向，登陆我国的概率较大。

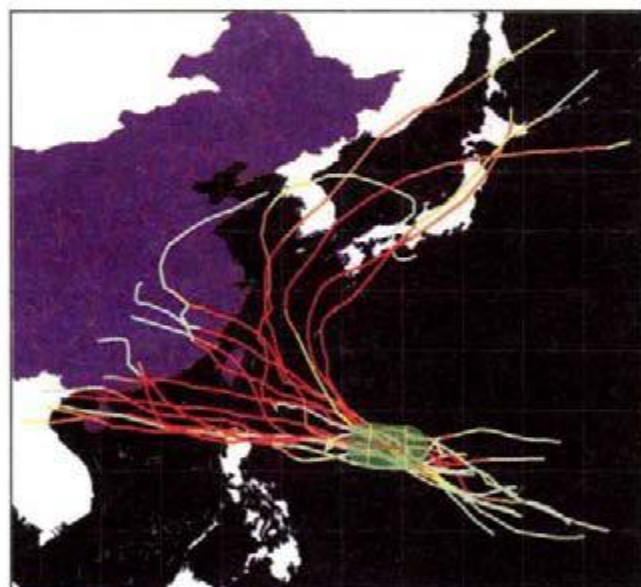


图 3.21 台风“圣帕”（2007）相似路径查询结果

通过相似路径分析可以初步判断（尤其在台风发展初期）现时台风未来可能的影响区域；若再结合大尺度环境场形态特征的比较，寻找出历史资料中相似大尺度环境场，能够帮助预测台风未来移动特征。

（3）气候持续性预报方法

在研究台风移动路径气候特征的基础上，选择表示台风所处季节的“日期”（以元旦为首日计算的日序数）、台风所在位置的气候平均位移等作为反映气候规律的预报因子，以台风初始移速作为持续性预报因子，运用数理统计方法建立一定程度上反映台风移动气候规律的台风路径预报方程，它既是

最基本最简单的一种路径预报工具，又可作为衡量其他预报方法水平的基准。

(4) 大尺度环境流场特征与台风的移动

台风运动是不同尺度环流系统相互租用的结果，而引导气流是这种相互租用的综合结果，它引导台风的运动，大尺度环流系统包括副热带高压、中高纬西风带系统、热带辐合带（ITCZ）、赤道缓冲带等，其中副热带高压外围的气流是台风移动最主要的影响因素，它的变化除了副热带高压本身的影响外，中高纬西风带系统、热带辐合带、赤道缓冲带等大尺度环流的变化均会对副热带高压外围的气流产生影响。

当西风带呈纬向环流时，副热带高压较强，并保持西伸状态，形态和位置基本稳定，台风一般在副热带高压南侧的偏东或东南气流的引导下，向偏西或西北方向移动，如0216号强台风“森拉克”持续西行登陆浙江就是这种形势下发生的（图3.22）；而当西风带转为经向环流时，副热带高压强度弱，进退活动多变，经常被高空槽切断分裂，台风转向的可能性将加大，还可能出现突然减速或打转等异常路径。

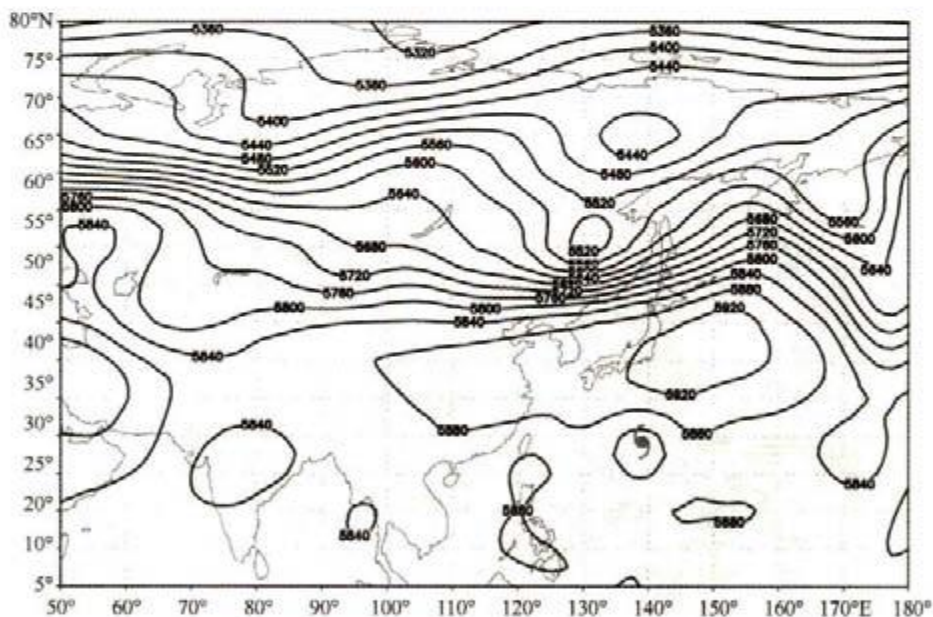


图 3.22 2002 年 9 月 2 日 20 时 500 hPa 位势高度场

当热带辐合带呈纬向带状连续分布时，其东西范围可延续数千千米，这时热带辐合带北侧的东风环流平直，副热带高压呈纬向带状且不断加强西伸，台风将稳定西移。但这种情况也是多台风发生的有利环流背景，特别是当热带辐合带出现断裂，多个台风同时出现将使副热带高压的形态和强度发生很大变化，台风可能出现转向、停滞、打转甚至互旋。

当南半球越赤道气流向北半球涌进时，赤道缓冲带将稳定向北推进。如果北进的赤道缓冲带与台风东侧的西太平洋副热带高压合并，台风将在西南气流引导下向偏北或东北方向移动或转向；若赤道缓冲带与台风西侧的西太平洋副热带高压合并，台风将受到阻挡而减速或停滞，或在较强的偏北气流引导下折向西南方向移动。对于南海台风因赤道缓冲带的北进，从而使台风发生北翘，如2010年1013号超强台风“鲑鱼”（Megi）移入南海后的路径北翘因素之一就是赤道反气旋东进北抬至菲律宾群岛附近所致。

西风带系统、热带辐合带（包括多台风活动）与赤道缓冲带对台风移动路径影响的一个典型个例是1968年7月下旬相继生成的台风超强台风 Mary (6804)、台风 Nadine (6803) 和强热带风暴 Olive (6805) 三个台风的移动路径。1968年7月下旬初，由于南半球越赤道气流向北半球涌进，从我国南海海域到加罗林群岛的广阔海域为纬向带状分布的热带辐合带维持，其东西范围延续达3000 km以上，热带辐合带中相继有 Mary、Nadine 和 Olive 生成（图 3.23a），东端的 Mary 向西北方向移动，西端的 Nadine 和 Olive 则先向偏西方向移动，后在多台风活动的影响下，先后出现打转现象；随着赤道缓冲带的稳定向北涌进，赤道缓冲带与台风东侧的副热带高压合并（图 3.23b、c），加之西风带系统的影响，最后导致三个台风在向偏西或西北方向移动的过程中均先后转向东北方向移动（图 3.23d）。

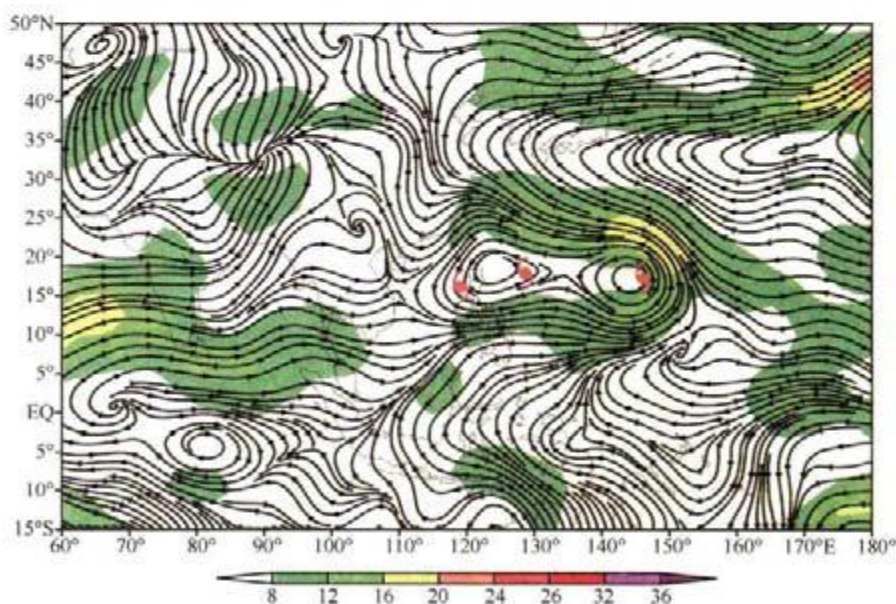


图 3.23a 1968年7月21日20时850 hPa 流线与风速分析（大于8 m/s，填色阴影）

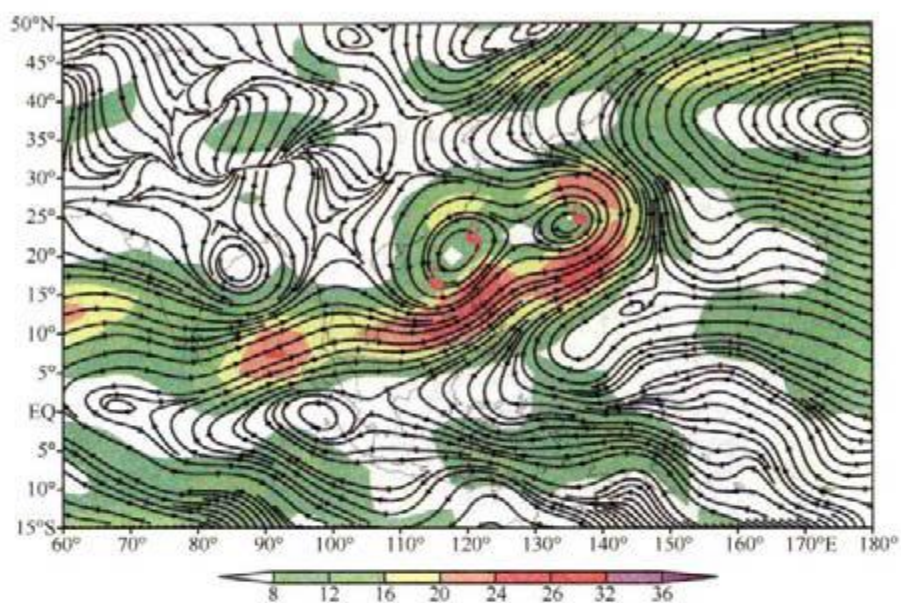


图 3.23b 1968 年 7 月 25 日 20 时 850 hPa 流线 with 风速分析 (大于 8 m/s, 填色阴影)

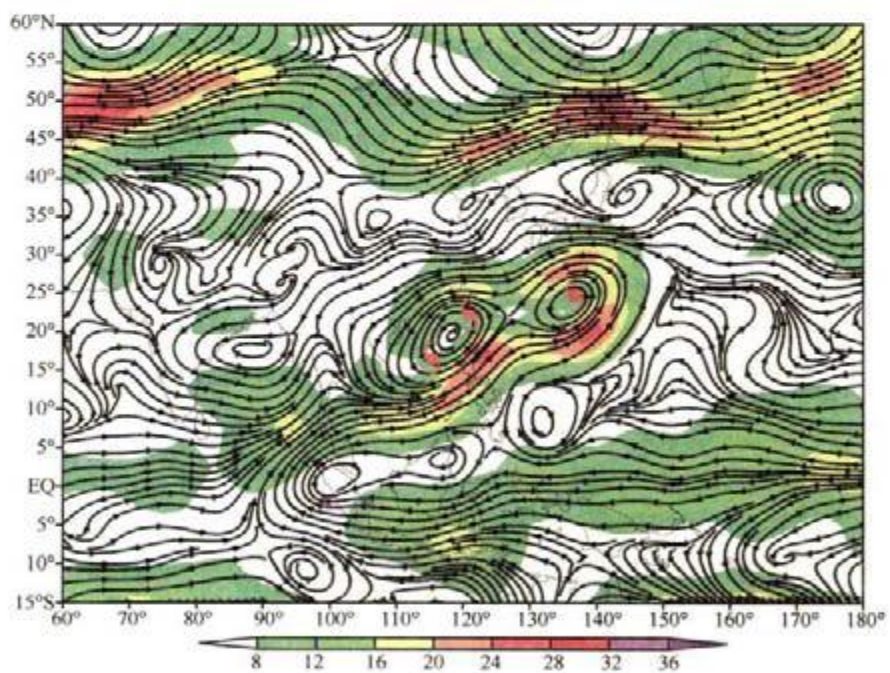


图 3.23c 1968 年 7 月 25 日 20 时 500 hPa 流线 with 风速分析 (大于 8 m/s, 填色阴影)

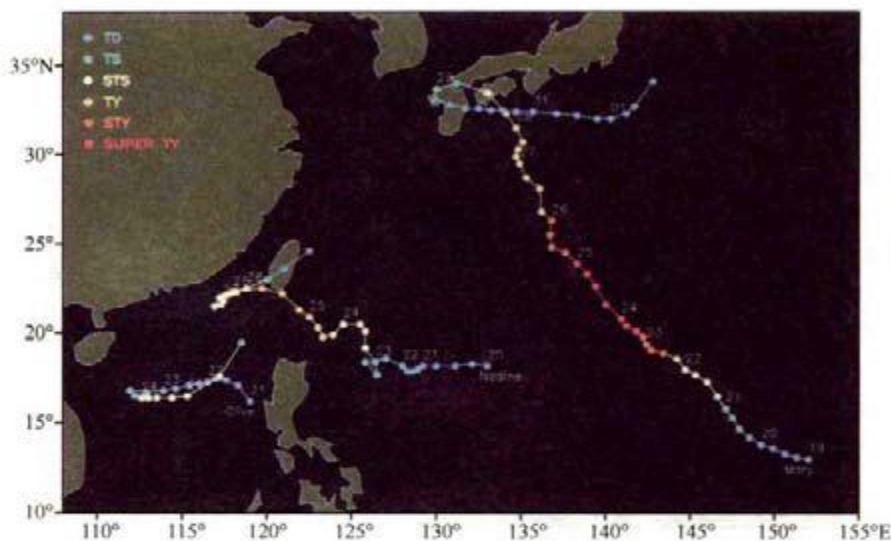


图 3.23d 强热带风暴 Olive、台风 Nadine 和超强台风 Mary 路径图 (由左至右)

此外，青藏高压的稳定和东进对台风移动也有着重要影响。青藏高压的稳定对东亚长波槽的加强有利，这时西太平洋西部副热带地区往往形成经向环流，西太平洋副热带高压将退到东海甚至更东的海面，有利于台风北上或转向；当青藏高压向东移出时，东亚和西太平洋副热带地区的环流变化完全相反，这时高原将出现一个低压槽，而高原东侧的槽减弱，西太平洋高压将明显西伸，有利于台风西进。

(二) 环境引导气流预报方法

将台风看作没有内部结构的刚体，它好像是在大江大河中漂流的一叶孤舟，江河之水流决定了它的流动轨迹，这就是台风路径环境引导气流预报方法的基本概念。就是说引导气流是控制和影响台风移动的最主要外部因子，大约超过70%的台风移动与之有关。计算引导气流的技术困难在于分离台风自身的影响，以及确定合适的层次或者多层加权平均来计算。

早期计算环境引导气流，将台风近似作为对称的涡旋从实际的高空气压场中移除，这样计算所得的结果并不能真实反映环境引导气流，因为台风总是非对称的，移除对称涡旋的过程会将一部分环境场中的非对称信息也一同移除。此后，一些科学家提出从涡旋中分离其非对称信息的方法，从而使环境场中保留涡旋非对称信息，具体流程为先对流场进行滤波得到基本场和涡旋扰动场，然后确定涡旋中心，其后用850 hPa风场确定涡旋范围，再计算涡旋扰动场中的非台风扰动部分，接着从涡旋扰动场中减去非台风扰动部分即得到与台风相关的风场，最后将与台风相关的风场移除得到计算引导气流的

环境场。图 3.24 为用上述方法对 2004 年台风“云娜”进行处理后得到的涡旋风场和环境场。

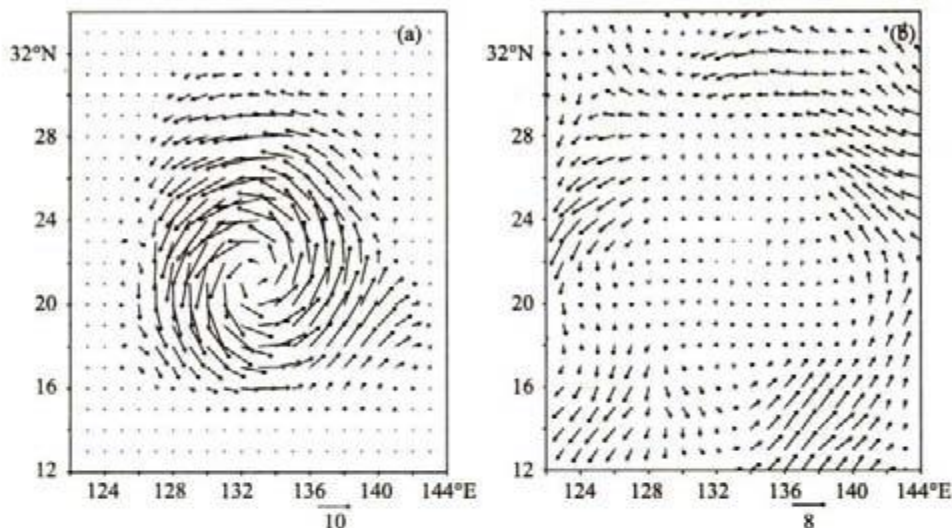


图 3.24 2004 年 8 月 10 日 08 时台风“云娜”的 (a) 涡旋风场和 (b) 移除涡旋风场后的环境风场

通常采用距台风中心 1~7 个纬距环状范围内平均环境流计算引导气流。确定计算引导气流的层次和台风的强度有关，通常强度越强的台风系统在对流层中延伸越高，因此引导气流层次也越高。一般达到热带风暴强度的台风，可考虑 850~500 hPa 多层平均的结果作为相应的引导气流，而计算超过热带风暴强度的台风引导气流可使用 850~300 hPa 多层加权平均值。

此外，确定环境引导气流还应注意：

- 由于引导气流是准地转的，因此通常引导气流方向与台风实际的移动方向有一定偏差；
- 由于尺度较大的台风系统和环境之间的相互作用使得引导气流较难确定，并且这类台风的移动似乎受引导气流作用比尺度较小的台风要小；
- 在预报制作中，如果多层加权平均所得引导气流不可信，对于强度超过热带风暴的台风，则 500 hPa 可作为“最佳引导层”以计算引导气流；对于热带风暴强度的台风，则可以用 700 hPa 作为“最佳引导层”以计算引导气流；
- 若环境风的垂直切变较大，台风将发生倾斜使得对流层上下层的涡旋中心偏离，可以用 850 或 700 hPa 作为“最佳引导层”以计算引导气流。
- 用引导气流诊断台风移动具有时效性，它的有效时间与大尺度环境场

的稳定程度有关。环境场系统较稳定时,用引导气流预报台风移动的有效时间也较长;而环境场急剧调整时期,用引导气流预报台风移动的有效时间相应较短。通常有效时间不超过 24 小时(王志烈和费亮,1987)。

图 3.25 为 2004 年台风“云娜”的引导气流和实际观测路径,从图中可以看出大多数时刻台风移动方向略偏向引导气流方向左侧,并且移动速度的变化与引导气流大小变化一致,这表明引导气流是影响“云娜”移动的主因。

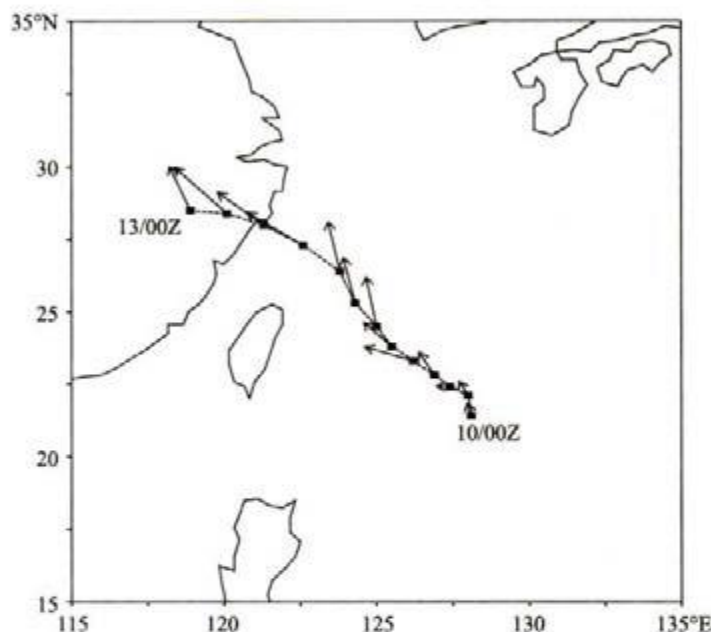


图 3.25 2004 年台风“云娜”的路径(虚线)和环境引导流(箭头)
(注:标注的台风中心位置间隔为 6 小时)

3.4.2 客观预报方法

近 30 余年来,较普遍使用的台风路径客观预报方法有统计预报方法、动力统计预报法、预报专家系统、模式输出统计释用法、神经网络法、集成预报法、动力释用预报等,大多采用台风历史资料作为统计样本,在对影响台风移动的大尺度环境场气压系统(如副热带高压、高空长波槽、高空切断冷涡等)、环境场引导气流、海洋要素(如海温、洋流等)、下垫面状态(如地形、地温等)作相关分析基础上,选择具有天气学、大气热力动力学等物理意义的作为预报因子,一般以特定时效(如 12、24、36、48 小时)的经向和纬向移动距离(或移向和移速)作为预报量,采用各种数理统计方法对历史样本研究建立用于预报台风路径的模型,以简单的统计预报方法为例,其预

报模型可表为两个预报方程:

$$\Delta\lambda = \lambda_c + X_1 + X_2 + X_3 + \cdots + X_n$$

$$\Delta\varphi = \varphi_c + Y_1 + Y_2 + Y_3 + \cdots + Y_m$$

其中 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\varphi$ 分别表示设定的预报时效 (24 或 48 小时) 的经向和纬向预报位移 (单位为经度和纬度), 而 X_i 和 Y_j ($i=1, 2, 3, \dots, n, j=1, 2, 3, \dots, m$) 分别表示经统计选择的 n 和 m 个预报因子; λ_c 和 φ_c 分别为常数。

3.4.3 数值预报方法

台风预报方法是随着人类对台风天气现象认识的深化以及现代科学技术的发展而不断进步的。最初的台风天气气候预报方法虽然有天气学、动力气象学和气候学作为理论基础, 但主要工具是地面和高空天气图以及一些辅助图表, 靠的是预报员长期积累的预报经验和总结归纳的诊断分析判据, 这类预报方法的根本性问题就在于缺乏客观和定量依据; 至于客观预报方法虽在使用时避免了主观性缺陷, 但在研制预报模型过程中依然受主观因素的影响。而数值预报方法的理论基础是基于牛顿力学第一定律和能量守恒定律的流体动力、热力学, 它从根本上克服了主观和定性的缺陷。数值预报方法的进步得益于计算机性能、计算数学和技术、空间探测技术和气象综合探测站网的发展, 近半个世纪以来数值天气预报模式由简单到复杂、由粗略到精细、由有限区域到全球范围, 发展很快, 其高空地面形势场的中、短期预报已经在日常业务预报决策中显现出重要作用。

目前, 数值预报模式中的预报量包括主要的气象要素场, 但对于大气环流中具有极大破坏力的灾害性天气系统—台风而言, 通用的数值预报模式还不能完全胜任, 鉴于台风内在结构及其与环境气压系统和海—陆下垫面相互作用等独特性, 台风路径数值预报模式系统是在数值天气预报模式框架基础上研发的专业应用的数值预报系统, 其预报初始场中含有三维独特结构的台风系统, 在模式中含有反映台风独有的物理过程计算方案 (如积云参数化, 边界层参数化, 海—气耦合) 和针对台风建立相应的物理过程。模式变量初始场中的台风与实际状况有较大的差异, 因此台风路径数值预报首先要解决的问题是台风初始场的形成技术。我国国家气象中心以及上海和广州运行的台风路径数值预报模式、美国地球流体动力学实验室 (GFDL) 飓风模式、日本的台风模式 (TYM)、此外在各全球预报模式 (如我国的 T213、美国的 AVN、英国的 UKMET、美国海军的 NOGAPS 和日本的 GSMD 等) 中都有针对台风的初始化模块。

美国国家飓风中心正在业务运行的飓风路径数值预报模式包括 GFS (NCEP 中期预报模式) 和 NOGAPS (美国海军全球大气预报业务系统), 它

们都是全球谱模式，GFDL 则是有限区域斜压台风预报模式。日本气象厅有两个台风数值预报业务模式，一个全球谱模式（GSM），另一个是有限区域谱模式（TYM），但台风模式（TYM）已在 2007 年停止运行。

近年美国国家环境预报中心（NCEP）在其天气研究预报模式（WRF）基础上研发的专用于预报飓风的模式（HWRF）已于 2007 年替代 GFDL 台风模式投入业务应用。HWRF 是随台风移动的双向嵌套的高分辨率模式系统，其内、外层预报分辨率分别为 9 km 和 27 km，垂直方向分 42 层，模式含有先进的物理过程。现正在研究将 HWRF 与嵌套网格的波浪模式耦合，而波浪模式又与风暴潮模式耦合；此外，陆面要素则将作为水文和洪涝预报模式的输入量，因此未来的 HWRF 将发展成为高分辨率的海—陆—气模式耦合的台风预报系统，可用于预报台风路径、强度、结构、降水以及风暴潮增水和洪涝灾害。

我国的台风路径数值预报系统包括国家气象中心在有限区暴雨预报模式（LAFS）基础上发展起来的区域模式（2005 年起停止运行）和基于全球谱模式 T213 的台风数值预报系统。除国家气象中心外，上海区域气象中心和广州区域气象中心也分别建立了东海和南海的台风路径数值预报系统，沈阳区域气象中心建立的路径数值预报系统是以中尺度模式 MM5 为框架用于预报北上的台风路径。上海区域气象中心运行的模式由中国气象局上海台风研究所在“八五”国家科技攻关期间建立并负责业务运行，该系统是在 MM4 基础上发展起来（殷鹤宝等，1996），在 2002 年升级使用 MM5 模式，从 2007 年开始使用基于 GRAPES 模式建立的台风数值预报系统（GRAPES-TCM）。广州区域气象中心运行的模式是中国气象局广东热带海洋气象研究所在“八五”国家科技攻关期间建立并负责业务运行，该系统是在热带有限区业务模式（TL10）基础上发展起来（王康玲，1996），并经过了大量的升级改进工作。

尽管卫星和雷达资料的逐渐增多，对台风的描述越来越全面，但是对于发生在海上的台风来说，现阶段要在数值模式初始场中得到完善的台风三维结构，这些资料依然是不够的。为解决模式初始场中对台风结构描述的误差，较早的研究是采用经验构造 Bogus 台风的方法。美国空军和 NCAR 联合开发了针对大西洋飓风的 NCAR-AFWA 方案，该方案在滤除有误差的台风涡旋、构造台风涡旋等方面都采用了新的技术。但是由于这类方法中所有的台风都是根据通用的经验公式来构造，对于在不同的环境场中发展起来的台风并不能区别对待，而且经验构造的台风环流并不能保证与数值模式中动力和物理过程的协调性。为使模式初始场中的台风构造更合理，与模式物理过程更协调，一些科学家在 4 维变分资料同化（4D-Var）的基础上发展了 BDA（Bogus data assimilation）技术，并投入了业务运行。

由于台风数值预报模式的初始场含有观测误差和分析误差，而大气运动本身存在“混沌”性，因此数值预报同时受初始场误差和模式误差的影响，而使最终预报结果偏离实际观测，也就是说预报结果具有不确定性。为了克服这种不确定性，近年来发展了集合预报技术。集合预报是不同初始场和不同模式预报（称作集合预报成员）结果的一种集合，最早期的集合就是取各集合预报成员的预报结果的算术平均，后来发展为袭击概率预报来表达这种预报的不确定性（如图 3.26 所示）。集合预报是目前解决天气预报不确定性问题的有效办法。当今一些发达国家的天气预报中心，如欧洲中期天气预报中心（ECMWF）、美国国家环境预报中心（NCEP）等均已建立了各自的集合预报系统作为其数值预报业务系统的重要组成部分。相对而言，集合预报技术应用于台风数值预报还处在研究和应用的初期阶段，且主要用于台风路径的短期预报。

近年来，国外一些学者做了一些多模式集合预报 TC 路径的工作，效果也是令人鼓舞的，但是如何应用于丰富台风预报产品还有待研究。

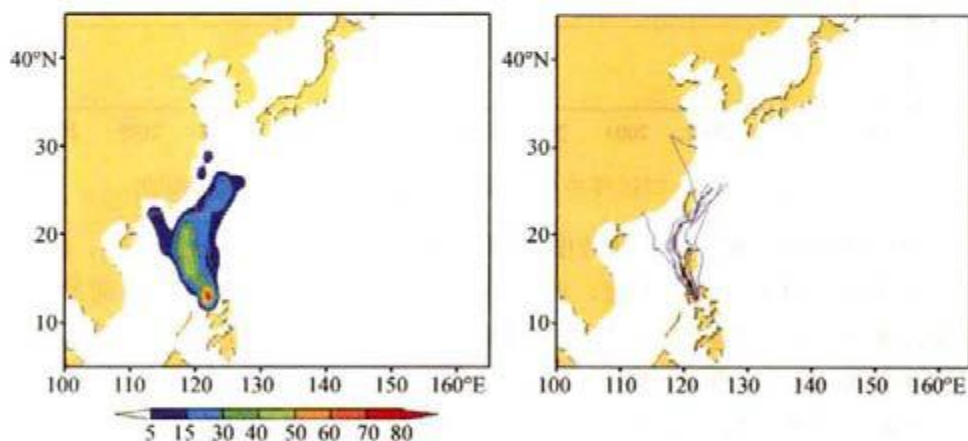


图 3.26 上海台风模式集合预报系统给出的 2008 年 6 月 21 日 20 时台风“风神”的 72 小时路径集合预报。

（左图中彩色为未来台风出现在该地区的概率，右图是集合预报系统给出的可能出现的台风路径）

3.5 强度预报

台风强度预报的对象是近中心最大平均风速或台风中心最低气压。根据对世界气象组织迈阿密区域气象中心和美国联合台风警报中心预报的分析，