

台湾岛地形诱生次级环流系统对 热带气旋异常运动的影响机制

孟智勇 徐祥德 陈联寿

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要 对经过中国台湾岛和海南岛、吕宋岛、日本诸岛以及朝鲜半岛的热带气旋在过岛前后的运动、结构和强度的时空变化进行了统计诊断分析。研究表明, 台湾岛附近热带气旋运动左偏(定义为偏于以前路径的左侧)机率最大, 且台湾岛周围是产生诱生低压的高频区。采用理想东、西风环境场作为数值模拟背景场, 数值研究了岛屿地形强迫与台湾附近的环境流场的相互作用及其对热带气旋运动偏转的影响, 提出了岛屿地形强迫、背景场和热带气旋涡旋三者相互作用对热带气旋路径突然转折影响的观点, 即台湾地形有利于环境场中诱生出一对偏差偶极涡, 这对诱生偏差偶极涡将导致逼近岛屿的热带气旋产生运动方向的突然偏折, 且在不同基本气流条件下, 岛屿地形对热带气旋运动可能产生显著不同的影响。

关键词 诱生次级环流系统 台湾岛地形 热带气旋异常运动

1 引言

热带气旋是影响我国最严重的天气系统之一, 往往造成很严重的灾害。从辽宁到广西漫长的沿海地区都可能有热带气旋登陆, 热带气旋带来的强风、大暴雨和海潮等对人民的生命财产是一个严重的威胁, 能否较准确地预报热带气旋的路径是减轻这种灾害的关键。对影响热带气旋运动物理机制的探讨, 一直是国内外热带气旋研究者关注的问题。

影响热带气旋运动的因子主要包括环境引导气流, 热带气旋内部结构, 效应, 不同尺度天气系统之间的相互作用以及下垫面作用等。一般认为, 环境引导气流是影响热带气旋运动的主要因素。环境场的变化可导致热带气旋的异常运动。本文的研究对象就是探讨台湾岛地形通过改变热带气旋背景场而影响热带气旋运动的动力机制。

台湾地形对热带气旋路径和结构的影响已有不少研究。观测研究表明, 热带气旋过岛时, 不仅结构会发生变化, 其运动速度和方向也会发生改变, 往往出现路径的突然转折、跳跃和打转等异常路径。未能考虑地形因子的统计预报模式对这类热带气旋的预报常常出现较大误差, 甚至预报失败而导致灾害。而数值预报模式考虑了地形作用后, 大大地改进了热带气旋经过台湾岛的路径预报。利用数值模式研究台湾岛地形对热带气旋路径的影响越来越受到气象工作者的重视。1987年, Bender等利用 σ 坐标系中的11层原始方程模式较细致地研究了台湾岛地形对热带气旋运动的影响, 得出从东北部接近台湾岛的热带气旋有加速并向西北折向的现象, 并指出, 因地形的存在而造成的低层环境气流的改变是热带气旋路径异常的主要原因^[1]。Chang在1982年的研究表明, 山

1995 - 12 - 06 收到, 1996 - 12 - 13 收到修改稿

脉地形引起的气流偏转主要局限于低层, 低层的基本东风气流受山脉阻挡会出现绕流现象, 在这种情况下, 低层的热带气旋中心移近台湾岛时速度加快并向北运动, 当热带气旋中心越过山脊后, 热带气旋将减速并向南转向^[2]。

由于以前缺乏较密的观测资料, 缺少岛屿地形对热带气旋运动影响的研究, 特别是有关的数值研究一直进展比较缓慢。为研究热带气旋转向和异常运动的物理机制, 提高对热带气旋异常运动的预报能力, 1990年8、9月间世界气象组织台风委员会在西北太平洋实施了台风转向和异常运动的现场特别实验 SPECTRUM - 90, 同时美国的 TCM - 90 和前苏联的 TYPHOON - 90 现场实验也在同一海域同步进行并选取了几乎相同的目标台风投入实验。3个实验独立进行但又密切分工合作, 为台风研究工作提供了大量典型的高时空分辨率的观测资料。与此同时, 台湾又实施了台湾地区台风实验 (TAI-TEX)。该实验的科学目标是研究台湾地形对台风结构、强度和运动的影响提供加密观测资料^[3]。

近年来, 一些研究利用上述现场科学实验的加密观测 (IOP) 资料, 对岛屿地形影响热带气旋运动的物理机制有了进一步的了解。1992年, 胡元龙、邓兴秀等利用原始方程模式研究了不同高度和形状的海岛地形对从不同方位登陆的热带气旋路径的影响, 以及在不同环境引导气流和有无效应的情况下, 热带气旋受海岛地形的影响特征^[4]。研究表明, 岛屿地形造成基本气流的变化以及热带气旋逼近海岛时与岛屿长轴方向所成的角度是重要的影响因子。1993年罗哲贤等利用平面上的准地转正压模式, 应用 SPECTRUM - 90 和 TCM - 90 期间的加密观测资料, 针对台湾岛对热带气旋运动的影响进行了数值试验^[5], 其结果表明, 如果地形和热带气旋相距不远, 比如小于 150 km, 地形的存在可使最大风速区移向热带气旋中心, 从而造成热带气旋空间尺度的减小, 致使热带气旋在一定时段内向右偏转。1993年, Tien - Chiang Yeh 等^[6]通过观测分析和数值试验, 对靠近台湾岛的西行热带气旋的路径偏差作了较深入的研究。其结果表明, 在台湾东北部热带气旋先偏北然后偏南, 在台湾东南部热带气旋先偏南然后偏北, 并且这种偏差与风暴的结构 (包括尺度和强度) 以及热带气旋的移动速度密切相关。但对引起这种偏差的机制却并未作深入研究。

本文将针对热带气旋在台湾岛附近折向运动的机制进行初步分析。

2 岛屿对热带气旋运动影响的统计分析

本文运用国家气象局编制的 1949~1992 年共 44 年的《台风年鉴》和《热带气旋年鉴》资料, 对直接影响西太平洋上中国的台湾岛和海南岛、日本、吕宋岛以及朝鲜半岛 5 大岛屿的热带气旋在过岛前后的环流以及强度变化做了初步统计 (表 1)。表 1 中,

$$\text{平均最大风速变化} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{2i} - V_{1i}) / n, \quad (1)$$

$$\text{平均最低气压变化} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{2i} - P_{1i}) / n, \quad (2)$$

其中, V_{1i} 、 P_{1i} 分别为热带气旋 i 登陆某一岛屿前 6 小时内的最大风速和最低中心气压。 V_{2i} 、 P_{2i} 分别为热带气旋 i 离开某一岛屿后 6 小时内的最大风速和最低中心气压。

表 1 热带气旋经过岛时的结构、中心最低气压、最大风速和路径变化的统计结果

岛屿	气旋个数	平均最大风速变化 $v/ (m/s)$	平均最低气压变化 p/ hPa	产生诱生低压的 气旋个数	产生诱生低压的 气旋个数	路径发生左折的 气旋个数	路径发生左折的 气旋个数
海南岛	100	- 5.22	6.92	2	2.0 %	25	25.0 %
日本岛	145	- 9.43	12.60	5	3.4 %	8	5.5 %
朝鲜半岛	42	- 5.26	5.04	0	0.0 %	2	4.8 %
台湾岛	91	- 9.04	10.58	18	19.8 %	26	28.6 %
吕宋岛	167	- 5.20	8.28	2	1.2 %	38	22.8 %

n 为 44 年内直接影响该岛屿的气旋个数。

左折运动如图 1 所示，主要考虑因地形摩擦效应所造成的热带气旋路径的左偏。

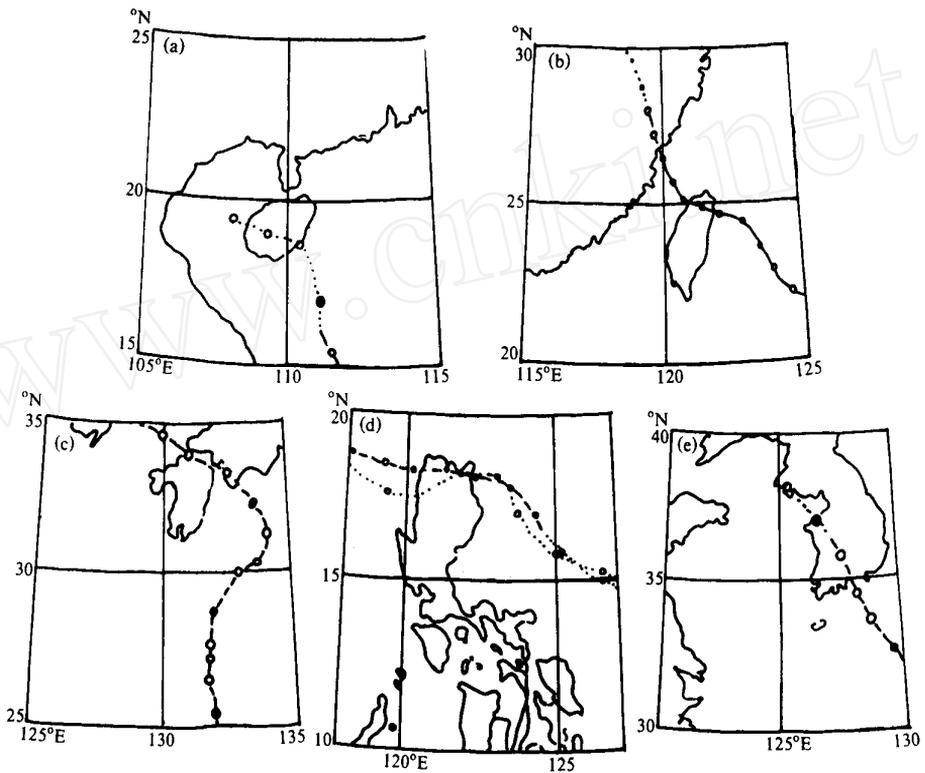


图 1 统计分析所选左折路径举例

对应图中的台风号为：(a) 9103，(b) 6005，(c) 9209，(d) 6711、6710，(e) 8911

统计结果表明，台湾岛是产生诱生低压最多的岛屿，生成机率为 19.8%。这与 1979 年陈联寿等^[7]的统计结果基本一致。另外，所有产生诱生低压的热带气旋其强度大多在热带风暴强度之上。从统计结果中还可以看出，台湾岛附近出现路径左偏的热带气旋也最多，机率为 28.6%；在朝鲜半岛，热带气旋发生左偏的机率最小，为 4.8%。

另外，大部分的热带气旋过岛尤其是台湾岛时会出现强度减弱，风速降低等现象，热带气旋强度越强，这种现象越明显，但在热带气旋生成初期或变性阶段，这种现象不明显。因此，台湾岛对热带气旋运动的影响的物理机制很值得研究。

3 试验设计方案中台湾岛地形特征类型

本文采用 NCAR 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬网格地形资料，针对台湾岛实际地形进行插值得到 $(1/5)^\circ$ 地形分布如图 2，定义该地形为原地形，以此为基础，数值试验采用 4 种类型的台湾岛地形分布。地形 A：原地形中的台湾地形高度减少一半；地形 B：原地形；地形 C：台湾地形高度为原地形的 1.5 倍；地形 D：不考虑台湾地形的作用。

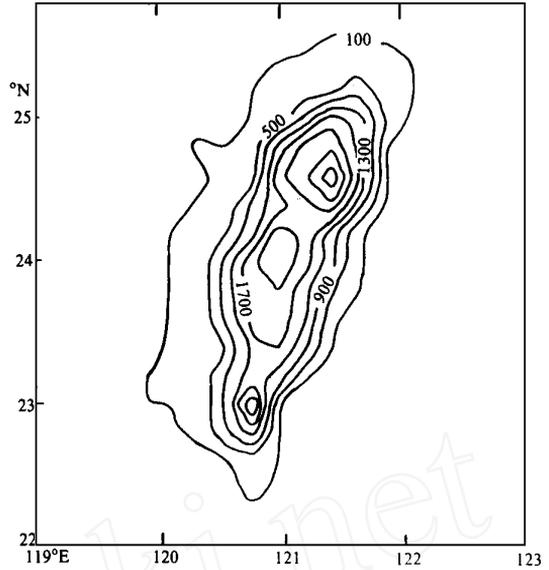


图 2 模式原地形中的台湾地形，等高线间隔为 400 m

4 台湾岛对热带气旋背景场影响的数值试验

一般来讲，环境引导气流是影响热带气旋运动的重要因子，大尺度环境场的改变往往导致台风路径的变化。从东部接近台湾岛的热带气旋大多处于偏东气流的大尺度环境场中。从西部接近台湾岛的热带气旋一般处于偏西气流的背景场中。台湾岛可以通过影响东西风等大尺度背景场而影响热带气旋的运动。

本文的数值试验所用的模式为美国国家大气研究中心 (NCAR) 和宾夕法尼亚州立大学研制的中尺度模式的第四版本 MM4，该模式建立在兰勃脱正交投影基础上，垂直方向为 10 层仿地形坐标，

$$= \frac{P - P_t}{P_s - P_t} \quad (3)$$

其中， P 为气压， P_s 为地表气压， P_t 为模式顶层气压。

数值试验采取的物理过程参数化方案如下：

为控制模式中非线性不稳定和混淆现象，水平扩散采用以下两种形式：

$$F_{H2} = P^* K_H \nabla^2 \quad (4)$$

$$F_{H4} = - P^* K_H \nabla^4, \quad (5)$$

其中， ϕ 为某一预报变量， $K_H = s^2 K_H$ ， K_H 为水平扩散系数， s 为格距，二阶形式 (4) 式用在接近侧边界的格点组成的行和列上，而四阶形式 (5) 式用于内部格点。

行星边界层的处理采用 Deardorff 在 1972 年设计的总体空气动力学边界条件，水循环采用 Anthes - Kuo 的积云对流参数化方案，积分区域为 $1860 \text{ km} \times 1860 \text{ km}$ ，格距为 60 km，侧边界采用海绵边界条件。

4.1 基本东风场的数值试验

初始资料: 在该试验中, 地面气压 P_s 和 10 个标准气压层上的位势高度 H , 相对湿度 R 和温度 T 来源于 1990 年 9 月 15 日 12 时 (UTC) $0 \sim 50^\circ\text{N}$, $90 \sim 180^\circ\text{E}$ 范围内的 T42 客观分析资料的纬向平均, 经向风 V 在整个积分区域内的所有 10 层上均赋为零, 纬向风 U 的分布见表 2。

表 2 初始理想东风场中的纬向风速 U 的分布

层次/ hPa	1000	850	700	500	400	300	250	200	150	100
$U/ (\text{m/s})$	- 5	- 6	- 7	- 8	- 9	- 10	- 11	- 12	- 13	- 14

用此基本东风气流作为数值试验的理想东风场来研究台湾地形对向西运动的热带气旋背景场的影响。

试验方案: 方案一 应用地形 B; 方案二 应用地形 D。

结果分析: 由于台湾地形引起的气流偏转仅局限于低层, 因而我们只给出地面气压场来加以说明。图 3a、b 分别为方案一和方案二的积分 12 h 后的地面气压场。图 3a 表明, 在考虑了地形 B 的情况下, 基本东风气流在台湾东北部地区很快转为东南风。而去掉了台湾地形的方案二的结果 (见图 3b) 中东风气流的方向没有发生明显变化。该结果表明地形迎风一侧偏南风的加强可作为一种环境引导使从东北部接近台湾的热带气旋向北偏转, 该结果与 Bender^[1]和 Chang^[2]分析结果是基本一致的。

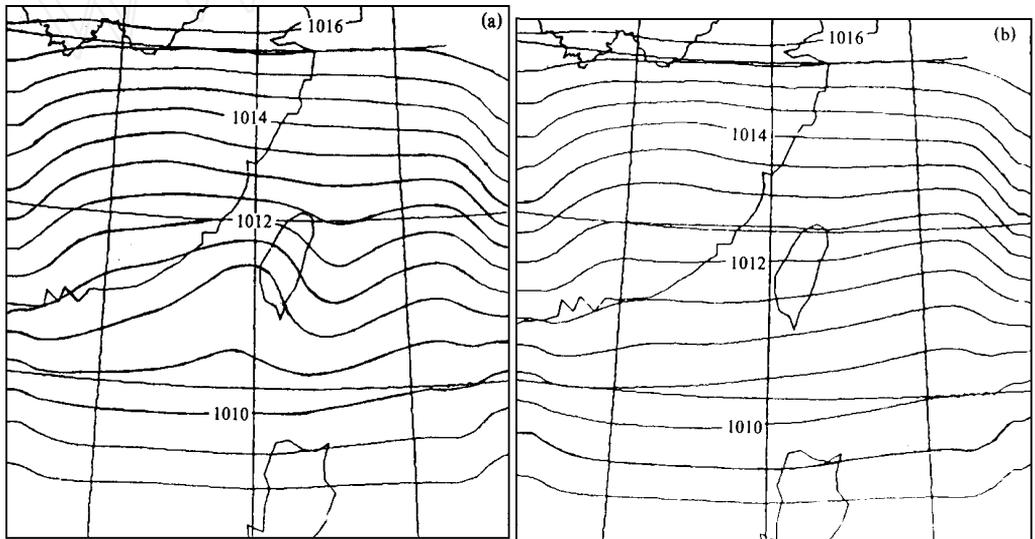


图 3 东风场中模式积分 12 h 后的模拟地面气压场
(a) 应用地形 B, (b) 应用地形 D

为了更清楚地看到这种地形的作用, 我们用方案一 (有地形) 各时次的模拟气压场减去方案二 (无地形) 相应时次的气压场, 于是得到了各时次的地面气压偏差场, 即

$$[\text{地面气压场}]_{\text{有地形}} - [\text{地面气压场}]_{\text{无地形}} = [\text{地面气压场}]_{\text{偏差场}} \quad (6)$$

图 4a 给出了积分 12 h 的地面气压偏差场。从图中可以看出, 台湾岛能在东风气流

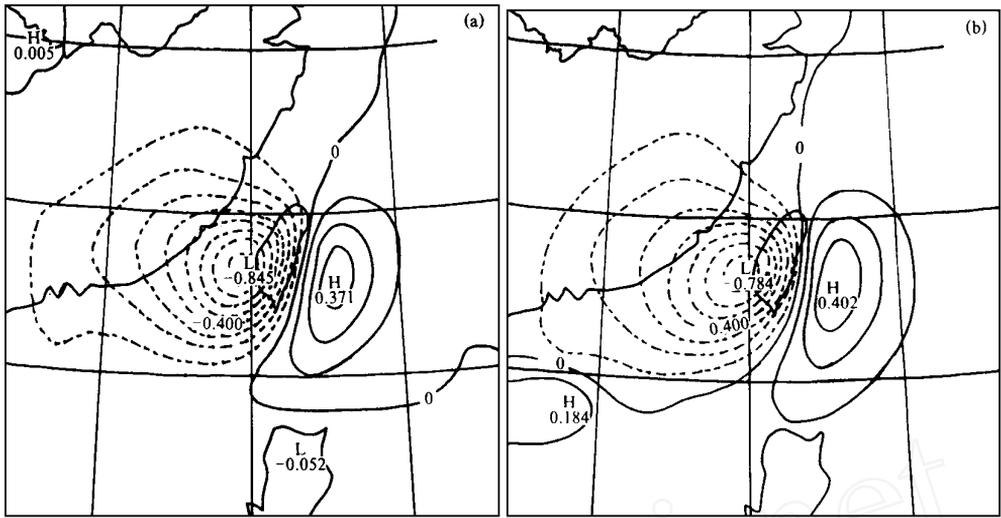


图4 东风场的模拟地面气压偏差场

(a) 积分 12 h, (b) 6 个时次 (9, 12, 15, 18, 21, 24) 的平均场

中诱生出一对偶极涡, 台湾西部为一个低中心, 东部为一个高中心。我们把积分开始后的前 8 h 作为系统向平衡的调整阶段, 把积分 9、12、15、18、21、24 h 的 6 个地面气压偏差场取平均得到了如图 4b 所示的平均地面气压偏差场, 该图表明, 因台湾岛地形的存在, 东风气流的地面气压偏差场中, 台湾附近稳定地存在着一对高低值中心。高、低中心值分别为 0.40 hPa、-0.78 hPa 左右。

4.2 基本西风场的数值试验

初始资料: 该试验的初始场即在基本东风的基础上, 把各层 U 值乘上 -1, 同时使地面气压梯度和各层的位势高度梯度与基本东风场的数值试验中的相应层次的梯度大小相等, 梯度方向相反。

试验方案: 与东风场相同。

结果分析: 图 5 为西风场积分 12 h 后的地面气压场。从图 5a 中可以看出, 应用地形 B, 台湾西北部南风分量有所加强, 可引导靠近的热带气旋向北运动, 而去掉台湾地形后, 基本气流方向没有发生明显的变化 (见图 5b)。

图 6a 为根据 (6) 式处理过的积分 12 h 后的地面气压偏差场。从图可以看出, 台湾岛同样能在西风场中诱生出一对偶极涡, 与东风场不同的是, 此时台湾东部为气旋, 西部为反气旋。图 6b 为平均地面气压偏差场, 该图表明西风场的地面气压偏差场中同样稳定地存在着一对高、低中心, 高、低值中心值分别为 0.53 hPa、-0.59 hPa 左右。

东、西风场的这一对偏差偶极涡对热带气旋运动的影响将在后面的章节中进行详细分析。这对偶极涡的产生与前人的理论研究结果是一致的。1979 年, 陈联寿等人^[7]利用涡度方程

$$\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} = -f \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (7)$$

和 P 坐标上的连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial p} = 0, \tag{8}$$

推导出仅考虑地形对涡度的局地影响的情况下, 山坡以上某一层大气内的平均涡度变化为

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \right) f \frac{p - p_0}{P - P_0} \text{ 气压} \frac{p_0}{P_0 - P}, \tag{9}$$

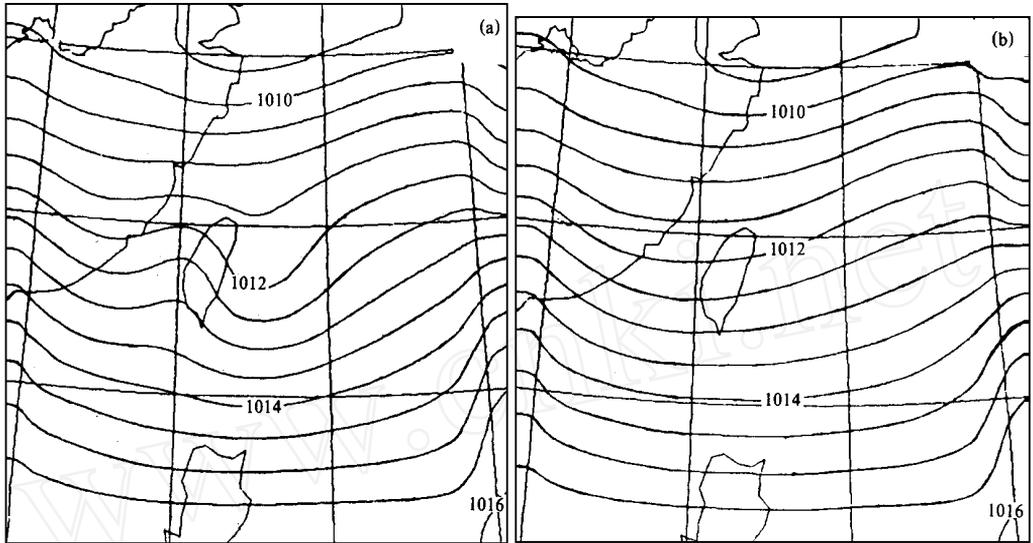


图 5 西风场中模式积分 12 h 后的模拟地面气压场

(a) 应用地形 B, (b) 应用地形 D

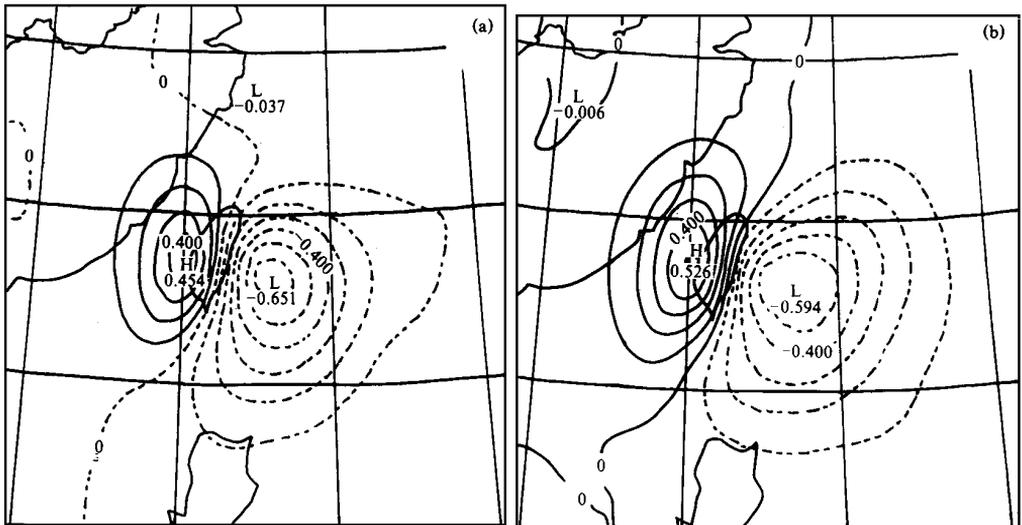


图 6 西风场的模拟地面气压偏差场

(a) 积分 12 h, (b) 6 个时次 (9, 12, 15, 18, 21, 24) 的平均场

其中， ζ 代表涡度， t 代表时间， f 为科里奥利参数， w 为某一层大气的垂直速度， w_0 为坡面垂直速度， P_0 为坡面气压， P 为某一大气层的气压。

从上式中可以看出，在迎风坡 $w_0 < 0$ ，因而 $\left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right) < 0$ ，正涡度减小，有利于产生反气旋中心。而在背风坡 $w_0 > 0$ ，故 $\left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right) > 0$ ，正涡度增加，因而有利于气旋中心的产生。本文在理想场数值试验的偏差场中，在东风气流的背景下，台湾岛附近出现了一对偶极涡，东部（迎风坡）为反气旋，西部（背风坡）为气旋；同样在西风气流的背景下，台湾附近也出现了一对偶极涡，由于此时为西风背景，因而台湾东部为气旋，西部为反气旋。这一结果与上述理论研究是一致的。

4.3 地形诱生偶极涡的影响因子

为了进一步研究基本气流中的地形诱生偶极涡，我们设计了以下的数值试验。

(1) 诱生偶极涡对不同地形高度的敏感性试验

- 试验方案：方案一 应用地形 A 和 D
- 方案二 应用地形 B 和 D
- 方案三 应用地形 C 和 D

图 7 为东、西风场中积分 12 h 后的地面气压偏差场中诱生偶极涡的强度与地形高度的相关关系。该结果表明地形越高，诱生涡旋越强。这一结论也可由 (9) 式加以解释：如果地形升高，则坡面气压将降低，导致 $\left(\frac{\partial \zeta}{\partial t}\right)$ 加大，因而诱生涡旋加强等 [7]

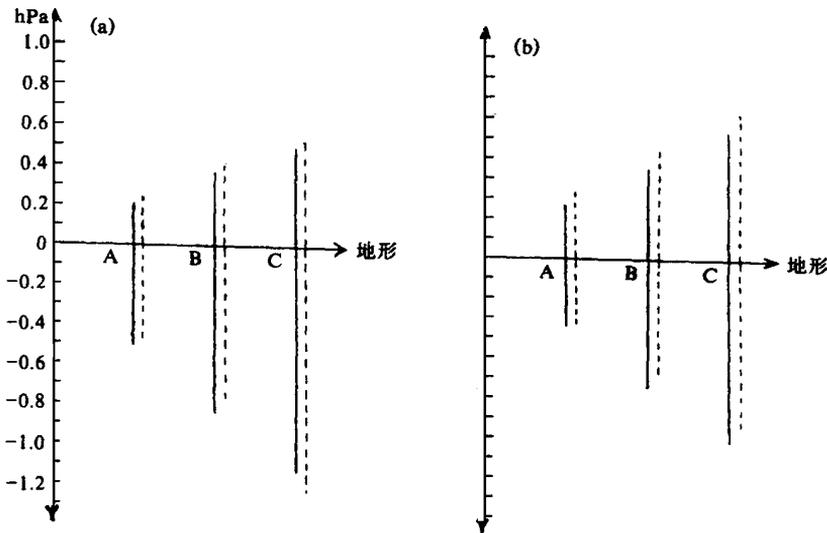


图 7 理想场试验模拟地面气压偏差场中涡旋偶的强度随地形高度的变化
正值代表高中心，负值代表低中心；实线：积分 12 h；虚线：6 个时次的平均场
(a) 东风场，(b) 西风场

(2) 模式分辨率对台湾岛地形诱生偶极涡的影响

该试验利用地形 B 和 D 分别选用不同的格距进行计算。

试验方案：方案一 格距为 40 km；
 方案二 格距为 60 km；
 方案三 格距为 80 km。

图 8 为东、西风场中积分 12 h 后的地面气压偏差场中诱生偶极涡的强度与模式分辨率的变化关系。试验结果表明，随着格距的加大，也即随着模式分辨率的降低，诱生涡旋的强度逐渐减弱。这与地形高度对诱生涡旋影响的结论是一致的：模式分辨率的提高可使模式地形高度因客观分析过程而升高，致使诱生涡旋加强。

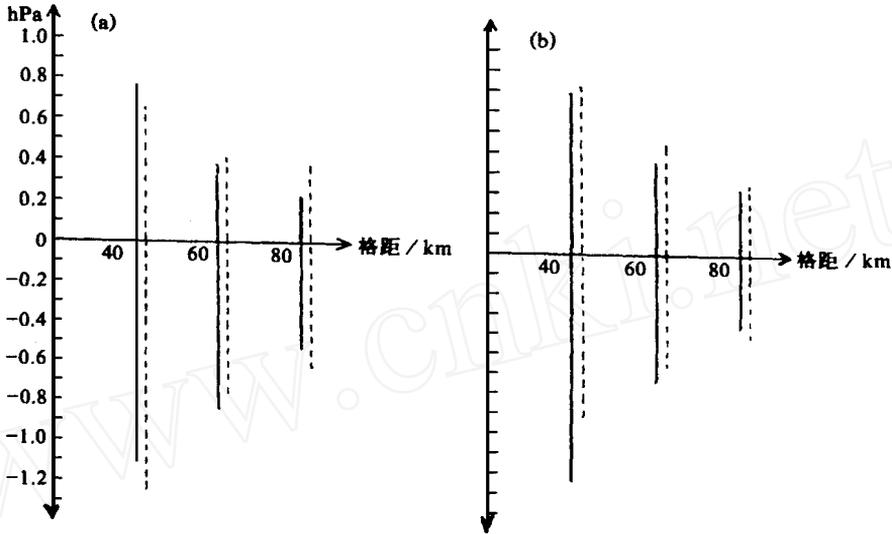


图 8 理想场试验模拟地面气压偏差场中涡旋偶的强度随模式格距的变化
 正值代表高中心，负值代表低中心；实线：积分 12 h，虚线：6 个时次的平均场
 (a) 东风场，(b) 西风场

总之，上述理想场试验结果证明了台湾地形对基本气流存在着显著的影响，它可使基本气流在岛屿附近的运动方向和气压梯度发生变化，从而对热带气旋的运动产生影响，这与模式分辨率和地形高度有着密切的关系。这些结论反映着台湾岛地形强迫的动力机制。

5 地形诱生偶极涡影响靠近热带气旋运动的动力分析

理想场试验表明，台湾岛能在基本气流中诱生出一对偏差偶极涡，这对偶极涡一经产生便有可能对靠近热带气旋的运动产生影响。本文就前人的研究结果对这种影响进行初步的分析。

1993 年，徐祥德、解以扬对热带气旋运动轨迹的曲率的相关因子作了比较深入的研究^[8]，得到了如下的曲率变化公式：

$$K_n = - \frac{f^*}{K^{1/2}} + \frac{f^* (\tilde{u} \tilde{u} + \tilde{v} \tilde{v})}{K^{3/2}} + \frac{(-\tilde{v}_y + H^* + \tilde{F}_v) \tilde{u} - (\tilde{u}_x - \tilde{v}_y + \tilde{F}_u) \tilde{v}}{K^{3/2}}$$

$$+ \frac{(-\tilde{v}_y + H^* + \tilde{F}_v)\tilde{u} - (-\tilde{u}_x + -\tilde{F}_u)\tilde{v}}{K^{3/2}} - \frac{3f\tilde{u}(-\tilde{v}_y + H^* + \tilde{F}_v) - \tilde{v}(-\tilde{u}_x + \tilde{F}_u)}{K^{5/2}} J(\tilde{u}\tilde{u} + \tilde{v}\tilde{v}), \quad (10)$$

其中 K_n 为热带气旋运动轨迹曲率，基于上式，曲率变化与环境场气压分布的关系可表示如下：

$$K_n = -\tilde{y}\tilde{u}/(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)^{3/2}, \quad (11)$$

其中 K_n 为热带气旋轨迹曲率的变化趋势， \tilde{y} 为环境场经向气压梯度的变化趋势， \tilde{u} 和 \tilde{v} 分别为热带气旋移动速度的纬向分量和经向分量。

本文着重讨论纬向环境气流条件下，台湾地形诱生偶极涡的附加经向气压梯度变化对台风运动的影响。

5.1 东风场

图 9 为东风气流的平均地面气压偏差场。此时的背景场 y 方向气压梯度即 $\tilde{y} > 0$ ，由于无地形时的热带气旋背景场在台湾附近的 \tilde{y} 是均匀的，因此在高中心北端背景场 \tilde{y} 减小，南端背景场 \tilde{y} 加大；低中心恰相反，北端背景场 \tilde{y} 加大，南端背景场 \tilde{y} 减小，而在高中心和低中心的左右侧背景场 \tilde{y} 变化较小。

当热带气旋从东北部的 A 点附近接近台湾时， $\tilde{u} < 0$ ， $\tilde{y} < 0$ ，根据 (11) 式可得 $K_n < 0$ ，因此反气旋性曲率加大，热带气旋有向北运动的趋势。这种右偏运动与 1993 年罗哲贤等的研究结果是一致的^[5]。

当热带气旋处于 B 点和 C 点附近时， $\tilde{u} < 0$ ， $\tilde{y} > 0$ ，则 $K_n > 0$ ，故气旋性曲率加大，热带气旋将转西、西南方向运动，即所谓的“左折”现象。该结果与地形摩擦效应对热带气旋运动的影响一致。此时气旋性曲率的加大可能会导致热带气旋的打转运动。

当热带气旋处于 D 点附近时， $\tilde{u} < 0$ ， $\tilde{y} < 0$ ，则 $K_n < 0$ ，反气旋性曲率加大，热带气旋又恢复原来的运动方向，即向西北方向运动。

整个过程的热带气旋路径见图 9 的 NN。热带气旋的这种运动特征与 Chang^[2] 的研

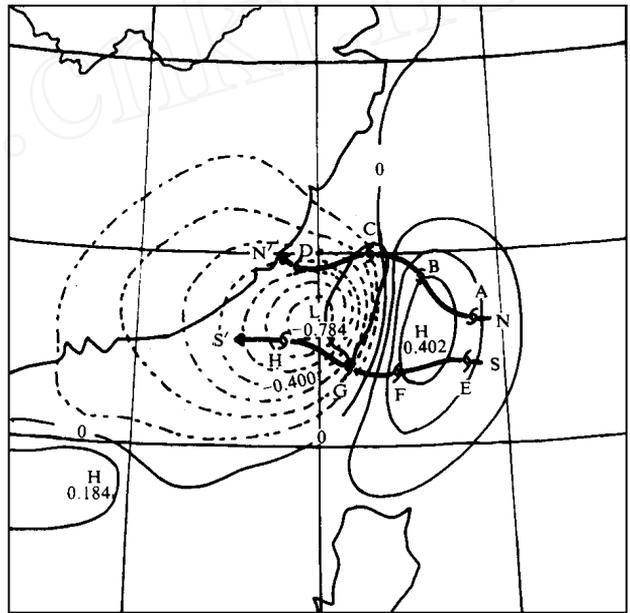


图 9 东风场中诱生偏差涡旋偶对从东北 (NN) 和东南 (SS) 部靠近台湾的热带气旋运动轨迹曲率的影响分析

- A: 反气旋东北部, B: 反气旋西北部, C: 气旋东北部,
D: 气旋西北部, E: 反气旋东南部, F: 反气旋西南部,
G: 气旋东南部, H: 气旋西南部

究结果是基本一致的，即热带气旋在山脊前向北运动，而到了山脊后则转向偏南方向运动。这类路径在实际中很常见，如图 11a；在别的岛屿附近也时常出现，如图 1d。

当热带气旋从东南部的 E 点附近接近台湾时， $\tilde{u} < 0$ ， $\tilde{v}_y > 0$ ，则 $K_n > 0$ ，因此气旋性曲率加大，热带气旋将向南运动。

当热带气旋处于 F 点和 G 点附近时， $\tilde{u} < 0$ ， $\tilde{v}_y < 0$ ，则 $K_n < 0$ ，反气旋性曲率加大，热带气旋将转西、西北方向运动。

当热带气旋处于 H 点附近时， $\tilde{u} < 0$ ， $\tilde{v}_y > 0$ ，则 $K_n > 0$ ，气旋性曲率加大，热带气旋将转向偏南方向运动。

整个过程的热带气旋路径见图 9 的 SS。这类路径的实际例子如图 11b。

东风场中这一对高低值中心对热带气旋的运动可能产生的影响与 Tien - Chiang Yeh 等在 1993 年的观测分析^[6]是一致的，即西行热带气旋从台湾北部移近时路径会偏北，从南部移近时路径会偏南。

5.2 西风场

图 10 为西风气流中的平均地面气压偏差场。此时的背景场 y 方向气压梯度即 $\tilde{v}_y < 0$ ，

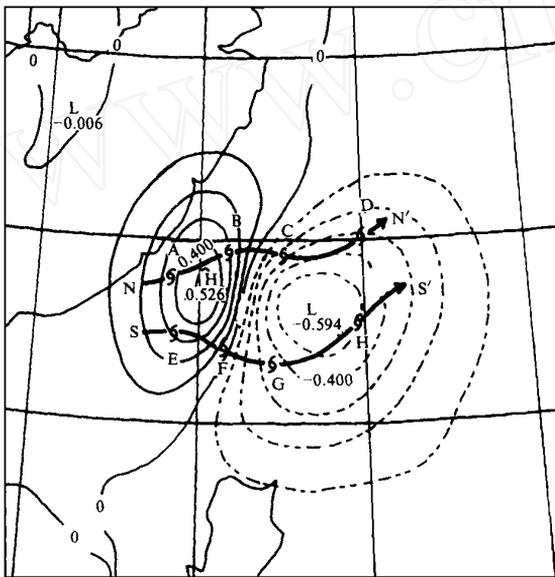


图 10 西风场中诱发偏差偶极涡对从西北 (NN) 和西南 (SS) 部靠近台湾的热带气旋运动轨迹曲率的影响分析

- A: 反气旋西北部, B: 反气旋东北部, C: 气旋西北部,
- D: 气旋东北部, E: 反气旋西南部, F: 反气旋东南部,
- G: 气旋西南部, H: 气旋东南部

由于无地形时的热带气旋背景场在台湾附近的 \tilde{v}_y 是均匀的，因此背景场 \tilde{v}_y 在高中心北端减小，南端加大；低中心则相反，北端加大，南端减小，在高中心和低中心的左右侧背景场 \tilde{v}_y 变化较小。因此，当热带气旋从台湾西部的 A 点附近接近台湾时， $\tilde{u} > 0$ ， $\tilde{v}_y < 0$ ，则 $K_n > 0$ ，因此气旋性曲率加大，热带气旋将向偏北方向运动。

当热带气旋处于 B 点和 C 点附近时， $\tilde{u} > 0$ ， $\tilde{v}_y > 0$ ，则 $K_n < 0$ ，反气旋性曲率加大，热带气旋将向东、东南方向运动。

当热带气旋处于 D 点附近时， $\tilde{u} > 0$ ， $\tilde{v}_y < 0$ ，则 $K_n > 0$ ，气旋性曲率加大，热带气旋将转向东北方向运动。

整个过程的热带气旋路径见图 10 的 NN。由于能够到达台湾西北部的热带气旋一般经向风速比较大，因此，这种情况下以西风场为背景

的热带气旋并不多见。

当热带气旋从台湾西南部的 E 点附近接近台湾时， $\tilde{u} > 0$ ， $\tilde{v}_y > 0$ ，则 $K_n < 0$ ，因此反气旋性曲率加大，热带气旋将向偏南方向运动。

当热带气旋处于 F 点和 G 点附近时, $\tilde{u} > 0$, $\tilde{v}_y < 0$, 则 $K_n > 0$, 气旋性曲率加大, 热带气旋将转向东、东北方向运动。

当热带气旋处于 H 点附近时, $\tilde{u} > 0$, $\tilde{v}_y > 0$, 则 $K_n < 0$, 反气旋性曲率加大, 热带气旋将转向偏东方向运动。

整个过程的热带气旋路径见图 10 的 SS, 这类路径的实际例子如图 11c。

该分析结果表明, 台湾岛可以通过改变热带气旋所处的背景场来改变热带气旋的运动, 而且其路径的变化随热带气旋靠近台湾岛的方位的不同而不同。该机制能够解释台湾岛以及其他岛屿附近热带气旋的折向运动, 尤其是能够解释如图 1 所示的热带气旋路径有规律的曲率变化, 而这是摩擦效应所不能解释的。

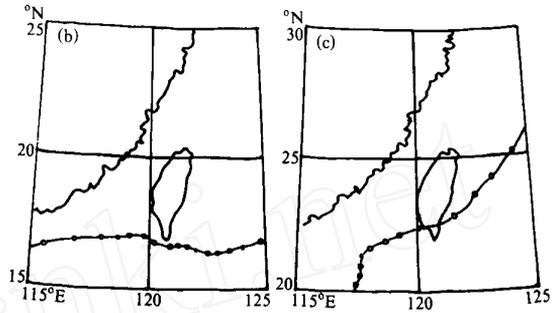
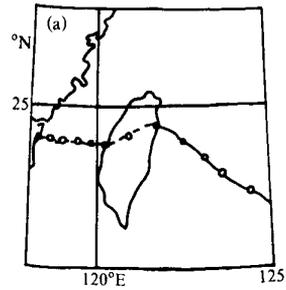


图 11 台湾岛附近与理想场动力分析各路径相对应的热带气旋实例

(a) 台风 5612, 对应图 9 中 NN; (b) 台风 6811, 对应图 9 中 SS; (c) 台风 6617, 对应图 10 中 SS

6 结论

通过对过岛热带气旋的统计研究和对理想东、西风场受台湾地形影响的数值试验研究, 我们得到了以下结论:

- (1) 台湾附近是产生诱生低压的高频区, 而且热带气旋左偏运动也比较明显;
- (2) 台湾岛地形能显著地影响基本气流运动的动力特征, 且在不同基本气流条件下, 地形对热带气旋运动可产生显著不同的影响效应;
- (3) 台湾岛地形强迫与基本气流的相互作用, 可产生一对偶极涡, 这对偶极涡附加环流的叠加作用能够显著影响热带气旋的运动, 从而构成热带气旋的异常路径。

东风场中, 岛屿西侧为气旋, 东侧为反气旋, 当热带气旋从台湾东北部接近台湾时, 东侧的反气旋与热带气旋环流相互作用能使热带气旋向北运动, 西侧的气旋环流使热带气旋向西南方向转向, 也即“左折”现象; 当热带气旋从台湾东南部接近台湾时, 东侧的反气旋可使热带气旋向南偏转, 西侧的气旋则可使台风向北运动。

西风场中, 岛屿东侧为气旋, 西侧为反气旋, 此时的情况刚好与东风场相反, 从台湾西北部接近台湾的热带气旋先向北然后转为偏东或东南方向运动; 从台湾西南部接近台湾的热带气旋则先向南然后转向偏东或东北方向运动。

此外, 这对地形诱生偶极涡的强度与台湾岛地形高度具有相关性, 随着台湾岛地形的升高, 诱生涡旋将有所加强。这一对地形诱生涡旋偶的强度与模式分辨率也有一定关系。

上述初步的结果还有待于对其他岛屿和不同速度的东风气流进行数值试验来加以证明。另外,观测研究表明,并非所有从东北部移近台湾的热带气旋都发生打转或左折,这取决于大尺度环境引导气流的强弱、热带气旋本身的特性或其他因子的影响程度。

参 考 文 献

- 1 Bender, M. A., R. A. Tuleya and Y. Kurihara, 1987, A numerical study of the effect of island terrain on tropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 130 ~ 155.
- 2 Chang S. W., 1992, The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1255 ~ 1270.
- 3 R. L. Elsberry, 1990, Recap and future research opportunities for the tropical cyclone motion (TCM - 90) field experiment, Papers presented at the First Spectrum Technical Conference, WMO/ TD - No. 426, 3 ~ 22.
- 4 Hu Yuanlong and Deng Xingxiu, 1992, An observational study of the Island terrain effect on typhoon motion and its structure during SPECTRUM, Proceedings of the seminar on tropical cyclone forecasting and research in Nanjing.
- 5 Luo Zhexion and Chen Lianshou, 1993, Effect of the topography of Taiwan Island on typhoon tracks, Proceedings of the third technical conference on SPECTRUM.
- 6 Yeh, Tien - Chiang and Russell Elsberry, 1993, Interaction of typhoons with the Taiwan orography, Part I: Upstream track deflections, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3193 ~ 3212.
- 7 陈联寿、丁一汇, 1979, 西太平洋台风概论, 北京: 科学出版社.
- 8 徐祥德、解以扬, 1993, 热带气旋运动曲率的数学模型与路径异常的月尖突变判据, *热带气象学报*, **9** (4), 308 ~ 316.

Mechanism of the Impact of the Cyclone System Induced by the Taiwan Island Topography on Tropical Cyclone Unusual Motion

Meng Zhiyong, Xu Xiangde and Chen Lianshou

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The present paper analyzes statistically the temporal and spatial variation of the movement, structure and intensity of the tropical cyclone (TC) before and after it passes Taiwan Island, Hainan Island, Luzon Island, the Philippines, Islands of Japan and Korea Peninsula. The result shows that the left - turning (deviate to the left of pre - track) probability of TC motion is the largest around Taiwan Island. Furthermore, Taiwan is a high - frequency area to occur the induced cyclone. Using the numerical simulation in which the ideal easterly and westerly wind are considered to be the background field, this paper studies the interaction between the island topographical forcing and the environmental flow field around Taiwan Island and its impact on the turning of tropical cyclone. The results show that the interaction among island topographical forcing, environmental field and tropical cyclone vortex has influence on the sudden turning of the tropical cyclone track. Thus the Taiwan topography has the positive effect on inducing a dipole difference vortex in the environment field, which will result in the sudden turning of the motional direction of tropical cyclones of approaching the island. Besides, the island topography has significantly different effects on tropical cyclone motion under different basic flow conditions.

Key words induced cyclone system Taiwan topography tropical cyclone unusual motion