

岛屿地形对台风影响的流体力学模拟实验研究

王允宽

文字信贵*

(中国科学院大气物理研究所) (日本京都大学防灾研究所)

一、引言

有关岛屿地形对台风的影响,国内外一些气象学者,用实际观测资料研究了登陆前后台风的强度、移速、路径、眼的直径、中心气压以及最大旋衡风速半径等的变化特征^[1-6]。因观测资料所限,对台风经过岛屿地形时,流场变化特征分析研究较少^[7]。近年来,人们以流体力学模拟实验的方法,研究了分布在太平洋西北部的岛屿(如台湾岛、海南岛等)对台风的影响^[8-10]。模拟实验研究可在一定程度上揭示台风经过岛屿的流场变化特征,但对台风中心移动(移速和方向)的变化,一般仅能作定性描述。

本文用实验室模拟实验方法,研究东北-西南走向的日本列岛地形对台风的影响。为了便于实际参考,我们给出了台风登陆前后移速及移动方向变化廓线。另外,通过调整,改变实验装置的旋转及加热参数,得到了模拟涡旋与台风转换图。这些在过去台风模拟实验中没有涉及。

二、入侵日本列岛的台风路径

1949—1980年共32年的资料中^[11],入侵日本列岛的台风共有75个(以路径穿过日本岛,台风生命史 >3 天,最大风速 $\geq 17\text{m/s}$ 为标准),这些台风对列岛或沿岸带来灾害。按照其入侵路径及影响的不同分类如下:

1. A型路径

这种类型的台风,一般出现在日本仍较热的季节,通常是呈抛物线形的转向路径^[12]。图1a给出了此种类型的三条具有代表性而入侵路径。它大多数出现在九月份,而且均较强大,常给日本带来严重灾害。从图1中也可看到A型路径入侵的台风(A₁型除外)几乎经历了日本岛的绝大部分沿岸或地域,影响范围也最大。从表1还可看到,这类台风次数多达34次,占入侵总数的45.3%。

1987年6月29日收到,8月4日收到修改稿。

*应邀到中国科学院大气物理所进行短期合作研究。

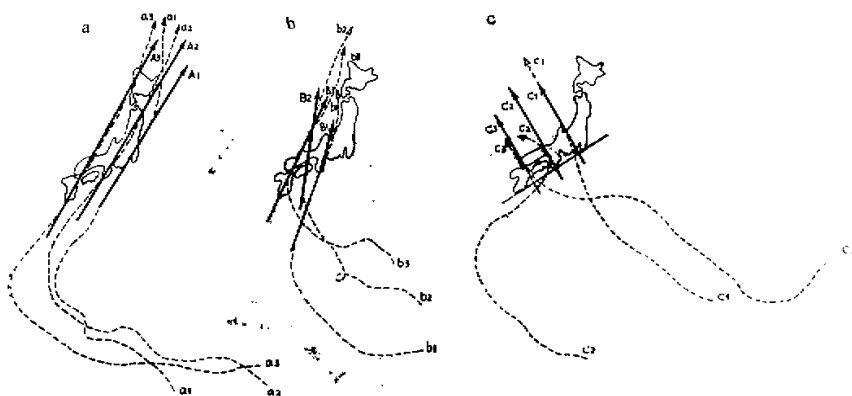


图 1 入侵日本列岛台风的主要路径

粗实线表示在实验容器内模拟台风的路径；虚线表示在大气中台风的路径。

(a) A 型路径, (b) B 型路径, (c) C 型路径

2. B 型路径

图 1b 中虚线表示沿 B 型路径入侵日本的三条具有代表性的台风路径。入侵路线仍是自西南指向东北,但它们一般仅穿过日本的西南部,给九州岛、四国岛及本州西南部带来影响(其中 B_1 型仅影响本州岛)。此类入侵台风不仅影响范围较小,而且强度一般比 A 型弱,共 24 次,占 32%。

3. C 型路径

这类台风的入侵路径与上述两种不同,其移向是自东南指向西北,与岛屿沿岸近似垂直(见图 1c 中虚线表示的三种有代表性的路径)。除 C_1 路径影响本州岛中部外, C_2 、 C_3 主要影响日本的西南部。由表 1 可知,这类台风出现了 12 次,占入侵总数的 16%。这些台风没有一个是发生在九月份,强度相对较弱,影响也比前两类小。

顺便指出,图 1 中所示的 9 条有代表性的台风路径,其中有 7 条均影响了日本岛西南部(A_1 及 C_1 型路径除外),这说明入侵这一地区的台风最频繁,经统计占入侵总数的 81.4%。

表 1 1949—1980 年不同路径入侵日本列岛的台风次数统计表

入侵路径类型	A_1	A_2	A_3	A 型	B_1	B_2	B_3	B 型	C_1	C_2	C_3	C 型	入侵总次数
入侵次数	8	14	12	34	4	6	14	24	1	5	6	12	75
百分比(%)	10.7	18.7	16	45.3	5.3	8	18.7	32	1.3	6.7	8	16	93.3*

* 32 年中入侵日本列岛的 75 个台风,有 5 个不属于 A、B、C 三型之列。

三、实验方法及设计

实验用的转台及容器同文献[13], 模拟台风的红外加热装置同文献[14], 其加热功率为 5—20W 可调。实验容器内的介质是空气, 示踪物质为香烟的烟雾。水平片光源的厚度为 0.6cm, 拍取实验流场资料时, 片光置于地形最高处, 距容器底部为 1cm, 相当于大气中 700hPa 附近的高度。实验时转台的周期为 30 秒。实验中仍以移动地形的办法(台风在容器内不移动)实施模拟台风沿不同类型路径移动的研究。实验时, 移动的路线均为直线(见图 1 中粗实线所示的 9 条路径), 与实际路径略有差异。显然, 有关台风移动的这种实验方法(目前仍受实验设备条件所限)有待改进。

我们的实验设计是以相似理论为依据的, 有关实验的相似性已在文献[15]中有过讨论。实验设计的核心问题是要求转盘模拟中各个参量与实际大气的参量一致。

岛屿地形的模型是按日本列岛地形图缩小比例制作的, 基本满足几何形体的相似(但

表 2 台风在大气转盘中各特征参量的数据

特征参量	$g(\text{cm/s}^2)$	$\Delta T(\text{K})$	$\bar{T}(\text{K})$	水平尺度 L (cm)	垂直尺度 H (cm)	风速尺度 V (cm)	角速度 ω (rads^{-1})	粘性系数 ν (cm^2/s)
大 气	10^3	10	300	10^4	1.2×10^6	2×10^3	7.29×10^{-3}	1.5×10^4
转盘模拟	10^3	3.8	290	27	3.5	1.5	0.21	0.23

因考虑实验时移动地形的方便, 把原为分离的部分连成了一个整体)。而运动学相似, 要考虑模拟台风移动速度(即台风中心的移速)及水平环流风速(即台风的相对风速或台风风速)与实际台风的相似问题。一般入侵日本列岛的台风中心移速为 20—40km/h^[3](相当于 4.4—8.7 纬距/日)。实验时地形移动为 156mm/盘日(即为 5.8 纬距/盘日)与实际一致。我们所复制的模拟台风的速度(实验条件: 转台周期为 30s, 加热源加热功率为 15—20W), 测得为 1.5—1.8cm/s, 相当于实际大气中台风风速为 19—23m/s。从表 2—3 的数据表明, 我们的实验也是满足动力学相似的。

表 3 台风在大气(取 $\varphi = 35^\circ\text{N}$) 转盘中无量纲相似判据的数值

相似判据	热 Rossby 数	Rossby 数	Forde 数	Ekman 数
大 气	0.57	0.24	0.4×10^{-4}	1.8×10^{-4}
转盘模拟	0.47	0.23	0.8×10^{-4}	7.5×10^{-4}

四、模拟台风的生成

在我们的实验中, 台风的形成取决于对转台的旋转因子, 即旋转角速度 ω ($\omega = 2\pi \times$

$\frac{1}{T}$ (s^{-1}) 及红外加热源的加热参数 P (加热功率单位为 W) 的适当控制。当转台转速较低时, 并无台风生成。只有当转速增大到一定数值以后, 则从无限涡旋环流转换为具有眼区结构的台风。

为了探讨涡旋向台风转变的问题, 我们进行了改变加热和旋转参数的多次试验。现以加热参数固定在 $10W$, 不断改变旋转参数时, 实验容器内流场演变情况来说明这一转变过程。初始只有加热因子, 转台不旋转 ($\omega = 0$)。此时呈现出一般的热对流运动, 其水平流场特征是: 中、下层气流从四周均沿径向方向向加热中心辐合; 上层自加热中心沿径向向四周辐散(上、中、下层距底部高度分别为 31 、 16 、 $6mm$ 图略)。随着转台启动, 转速的上升, 在加热中心附近的辐合、辐散气流开始出现切向分量, 这个切向分量随转速增加而加大。当转速上升到接近某值时, 涡旋中、上层出现近似眼的特征, 底层仍为无限涡旋(为涡旋开始向台风转换的过渡环流, 图略)。此后转速再加大就形成具有眼区的台风环流结构。

图 2 为在我们使用的实验设备上复制的涡旋与台风的转换图。图中纵坐标反映加热参数 $P(W)$ 的变化; 横坐标(为对数坐标)表示转速变化, 我们以 $\frac{1}{T}$ (s^{-1}) 表示旋转参数(其中 T 为转台的周期)。粗实线是涡旋与台风转换的分界线(在实验中发现, 实际上是在界限附近存在一个极为狭窄的转换过渡带)。图示表明, 转速是极为重要的参数(即为科氏参数), 当旋转作用因子较小时, 即使不断加大加热量, 台风仍不能形成。大气中的观测事实正是如此, 即在赤道附近洋面温度很高, 但在这一地区因科氏力作用几乎不存在, 热带扰动总是不能发展成台风。然而加热因子的作用也是重要的。图示表明, 当转速上升到靠近分界线(狭小过渡带)时, 随加热量增加, 将导致这个转换过渡带向转速的低值区偏

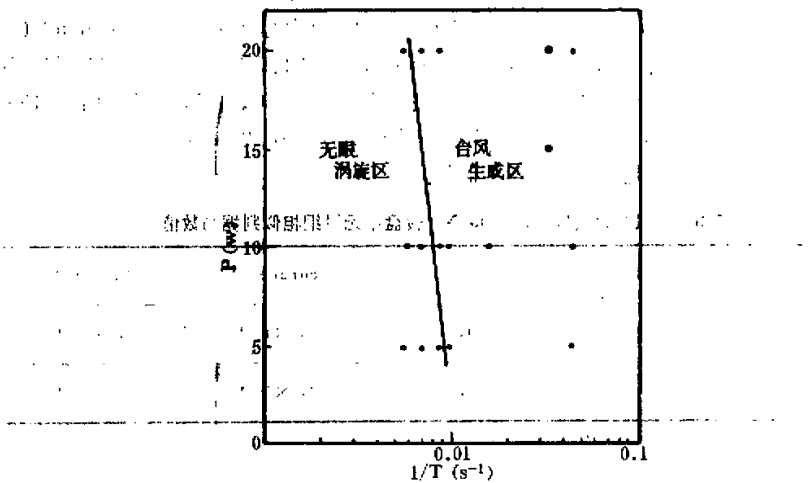


图 2 涡旋与台风转换图

圆圈为依相似性选定的模拟台风生成控制参数的坐标点; 黑点为实验中确定分界线时的实验控制参数的坐标点

移(即表现为分界线随加热量的增加而略向左侧倾斜),此后随转速及加热参数的加大,台风的风速亦不断加大。而在小尺度涡旋的实验室模拟中,涡旋的转换及其风速的变化主要与底层辐合气流的切向角有关^[16,17]。

在我们的实验中,控制因子是旋转参数(即科氏参数)与加热参数(即模拟热带地区的潜热能),这是由于在实验中的介质是静止的空气,与自然界大气不同,实验时我们这里没有复制另外的基本气流或环境流场。因此,在实验里我们只能强调最基本的形成因素,是同 Palmén^[18] 及 Grany^[19] 所提出的台风生成的必要条件相吻合的。

五、实验结果

图 3A 和 B 中实线表示模拟台风中心在登陆前后移动速度的变化,虚线表示在登陆前后移动方向的变化。图中各坐标点代表台风中心的位置。横坐标 L 上 0 处的粗实垂线表示岛屿位置,登陆前台风距登陆点位置取负号,中心离开岛屿后取正号,纵坐标的 0 处与 L 轴平行的实线,亦用以表示岛屿位置,负号表示台风中心向左偏移,正号表示向右偏移(其左右偏移均是指相应于图 4 或 5 中坐标线的坐标中心而言)。

1. 岛屿地形对台风移动速度的影响

A_1 型 此型一般在伊豆半岛-东京湾一带登陆,很快就在鹿岛滩一带入海。其登陆地点正处富士山地域,是全岛地势最高的地方。从图 3Aa 可看到台风中心距登陆点约 80 km 处移速开始加快(图中 1cm 相当于 40km),邻近登陆时又出现减速,直至出海后离岸约 80km 时才停止减速。距登陆点几十公里出现加速现象仅出现在 A_1 型。从图 3A 和 B 可看到这一特点是其它各型都没有的。其所以登陆前移动速度发生变化可能与富士山区地势高存在地形的动力抬升作用有关。

A_2 型 此型模拟台风在大阪湾附近登陆后,沿地形走向穿过本州岛绝大部分地区。

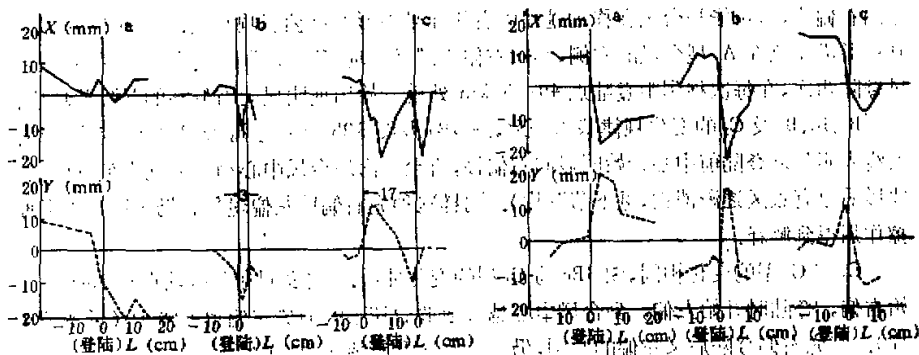


图 3A A_1 型路径台风通过岛屿前后
台风中心移动的特征

a: A_1 路径, b: A_2 路径, c: A_3 路径。

实线: 台风移动速度的变化

虚线: 台风移动方向的变化

图 3B B_1, B_2, B_3 型路径台风通过岛屿前后台风
中心移动的特征

a: $B_1 \sim B_3$ 路径, b: $B_2 \sim B_3$ 路径, c: $C_1 \sim C_3$ 路径。

其他说明同图 3A

入海以后又在北海道的钏路一带第二次登陆。在距登陆点约 100km 附近出现缓慢减速,近第一个登陆点时明显减速,但出海后又立即加速,直至第二次登陆仍在加速移动。但第二次出海后又立即减速,见图 3Ab。

A₁ 型 此型模拟台风在九州岛登陆,穿过本州岛西南端入海,后又在北海道的熊石一带第二次登陆。它亦在距登陆点约 200km 附近缓慢减速,但临登陆时略有加速,登陆时明显减速,直至入海后离岸 200km 又加速移动。到第二次邻近登陆时又明显减速,入海距岸 60km 后又变加速,见图 3Ac。

B₁ 型 登陆前移速无明显变化,登陆后速度显著减慢,直至入海后眼区消失为止,见图 3Ba。

B₂ 型 登陆前移速有小幅度变化,到距登陆点 40km 附近开始减速,邻近登陆时明显减速直至入海后眼区消失为止,见图 3Bb。

B₃ 型 移速变化与 B₂ 型基本一致(图略)。

C₁ 型 其与 B₁ 型不同之处是在距登陆点 40km 左右出现缓慢加速(图略)。

C₁、C₂ 型 变化一致,见图 3Bc。当台风中心距登陆点 80km 附近就出现减速,直至穿越岛屿后入海眼区很快消亡减速终止。

2. 岛屿地形对台风移动方向的影响

A₁ 型 台风移到距登陆点 160km 的海面上开始向左偏,入海后仍是向左偏移,直到离岸 250km 以后才停止。可能由于此型台风靠近岛屿沿岸并依其走向移动,在移动过程中台风左前部受岛屿地形的摩擦影响有关,可称其为“趋岸”现象见图 3Aa。

A₂ 型 见图 3Ab,可以看到台风距登陆点 300km 时开始左偏,邻近登陆时明显左移,入海后离岸 40km 时开始向反方向偏移,直至第二次登陆,登陆前向左偏移的原因,仍主要是与地形摩擦作用有关。

A₃ 型 见图 3Ac 虚线所示,我们会发现其变化趋势与前二者皆相反。系邻近登陆,中心向右偏移,这可能与台风在移动过程中右前部受地形的摩擦影响有关。从图 1a 可以看到地形沿岸位在 A₃ 型台风的右侧,其向右偏移即又呈现了“趋岸”现象。曲线表明 A₃ 型台风登陆两次,在每次移到距登陆点 40—50km 处就开始出现明显向右偏移的“趋岸”现象。

B₁、B₂、B₃ 及 C₁ 的变化规律基本一致,图 3Ba 及图 3Bb 分别为 B₁ 及 B₂ 型的变化曲线。图线表明邻近登陆前中心开始明显向右偏移,直至入海后台风中心消亡才向左偏移(穿越地形后原有眼区逐渐消亡,见下节图片)。同样这种先右偏后左偏现象,仍可以从地形摩擦作用得到解释。

C₁ 与 C₂ 型的变化相同,图 3Bc 为 C₂ 型的变化曲线。它表明在距登陆点约 200km 开始右偏,登陆时开始左偏,到台风中心越过地形后随眼区消失左偏也就终止(见下节图片)。其先右偏登陆后又左偏的原因,仍为岛屿地形摩擦作用影响的结果。

3. 岛屿地形对台风环流的影响

a) 沿 A 型路径入侵台风的水平环流

此类台风沿岛屿地形走向入侵,当距地形较近时,台风环流及眼区近于圆形(见图版

I 图 4, A-1a)。台风中心接近岛屿时, 眼区呈椭圆形, 北部烟云与地形相遇, 其西北部出现了明显分支, 并伸向东北方(见图版 I 图 4A-1b、A-2a、A-3a)。而大气实况是当台风中心靠近日本岛时, 呈现了一条指向东北方形似“彗尾”的宽大云带, 见图 6。这主要由于日本岛处中纬地区, 进入秋季, 北方冷空气常对台风产生影响。正如有人指出, 在过渡



图 6 1980 年 9 月 11 日沿 B₂ 路径入侵日本岛的台风(可见光)卫星云图^[11]

季节, 高空槽与台风两者的作用在对流层上部表现最显著, 在台风东北侧伸出长度不等的云带^[20]。图 6 的实况正揭示了这一特征, 但岛屿地形对台风低空环流的影响可能被掩盖了。然而上述实验事实弥补了这个不足, 它揭示出了岛屿地形对台风低空流场影响的情况。台风登陆后眼区逐渐衰亡, 除上述特征外, 沿 A₁、A₂ 及 A₃ 路径移动的台风还有其各自的特点。

A₁ 型 从上节知 A₁ 型台风在登陆前后, 因“趋岸”作用致使气旋式辐合气流加强(见图 4A-1b、A-1c)。当其登陆后入海眼区明显变小(见图 4A-1c、A-1d)。沿此路径入侵的台风因岛屿地形的隔挡, 朝向西北的另一侧沿岸受到的影响几乎很小, 从图片中可以看到在这侧沿岸观察不到明显的辐合气流。

A₂ 型 在台风接近登陆点或登陆时, 同 A₁ 型相似有强辐合气流入侵沿岸, 台风从伊势湾附近登陆也会引起“风暴潮”, 登陆后沿岛屿走向入侵日本东部。由于地形的摩擦及阻挡, 不仅眼区消亡, 而且还可以看到地形两侧沿岸分别出现两股来向完全相反的辐合气旋(见图 4A-2b)。因台风在岛上移动的路途较长, 其能量受极大损耗, 故入海后仅复现涡流环流, 而眼的特征已不明显(见图 4, A-2c, A-2d)。

A₃ 型 台风靠近登陆点或登陆时, 气旋性辐合气流侵入九州, 四国及本州岛的西端, 入海后涡旋变形, 不对称(图略)。日本岛的地形影响使涡旋右边辐合气流减弱, 在东京湾附近海上呈现了一个槽。涡旋中心附近吹向沿岸的辐合气流较强, 这种风力分布的不平

衡发生了前述的“趋岸”作用。此时环流形式在本州岛北部西岸附近为一个变形的不对称涡旋,岛的东南岸有地形槽(见图4, A-3b)。当台风将要第二次登陆时,在涡的西南方洋面上出现了一个倒槽(见图4, A-3c)。待第二次登陆结束入海后又复现一个弱的对称的涡旋环流(见图4, A-3d)。

b) 沿B型路径入侵台风的水平环流

此类台风在登陆前眼区变化与A型相似,近登陆时台风北部烟云在地形影响下也出现分支(见图版II图5, B-2a)。尽管B₁、B₂、B₃型在穿越地形时移动方向略有差异,但均从岛屿地形迎风坡登陆,然后越过地形从背风坡入海,故环流变化基本一致。当台风中心从背风坡沿岸入海时,我们观察到眼区先明显扩大(见图5, B-2b)此后迅速填塞,左填塞了的眼的左前方,有气流快速辐合,出现了一个次生涡旋中心(见图5, B-2c及B-2d)。

c) 沿C型路径入侵台风的水平环流

C型路径的特点是与岛屿地形走向呈垂直方向穿越,特别是C₁路径正好,在靠近富士山的地区登陆,穿越了岛屿地势最高的区域,可以清楚地看到受地形影响在背风坡低层台风入海后眼填塞消亡及一个次生涡旋中心生成的过程(见图5, C-1a—d)。另一组图5, C-3a—d为沿C₂路径入侵台风在岛屿地形影响下水平环流的变化过程。比较这两组图片可以十分清晰地看到台风眼的消亡及另一新的眼区的形成。C₂路径与C₁十分一致(图略)。从图5C-1b及C-3b还可看到,由于地形影响台风北部烟云仍出现分支,但这支烟云不如A型及B型的分支明显突出。

六、小 结

我们的实验结果表明:

(1) 入侵日本岛的台风临近登陆及登陆时一般均为减速,入海移动一段距离后又转为加速。只有沿岛屿走向移动在东京湾附近登陆的台风是例外——邻登陆前加速,登陆则减速。

(2) 沿日本岛地形走向入侵的台风,当地形沿岸在移动的台风中心左侧,台风中心移近登陆点时,其路径就向左侧偏移,反之则向右侧沿岸偏移。这种与岛屿地形有关的台风中心向岛屿沿岸一侧偏移的现象,可简称为“趋岸”现象。

穿越日本岛地形的台风临近登陆时路径开始向右偏移,登陆或入海后转为向左偏移。

(3) 当台风中心靠近日本岛地形时,其北部烟云在地形影响下出现伸向东北方向的分支。

(4) 同岛屿沿岸呈直角或较大角度登陆的台风穿越地形入海,在低层可出现一次原台风眼区的填塞消亡,并在消亡眼区的左前方次生出一个新的涡旋中心过程。

(5) 在沿日本岛东南沿岸移动入侵的台风,由于岛屿地形的阻挡,对另一侧沿岸地区影响不大。

当入侵台风沿朝向西北方一侧沿岸移动时,这一地区影响沿岸的辐合气流相对要弱。这时岛的另一侧沿岸,有一个地形槽生成。

(6) 当台风登陆后在岛上沿山脉走向移动时,台风的眼消亡,岛屿两侧出现来向完全

相反的辐合气流环流结构。

上述实验结果, 还有待天气观测事实的进一步证实。

这项合作研究工作得到了日本京都大学防灾所光田宁教授和中国科学院大气物理所曾庆存教授的支持和关注, 魏鼎文同志实验中曾予以协助, 刘俊清、黄中华同志参加全部实验, 作者一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Brand, S. and Belloch J. W., 1973, Changes in the characteristics of Typhoons crossing the Philippines, *J. Appl. Met.* Vol. 12, P. 102—109.
- [2] Brand, S. and Belloch, J. W., 1974, Changes in the characteristics of Typhoons crossing the Island of Taiwan, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 102, P. 708—713.
- [3] Mitsuta, Y., Fujii, T. and Kawahira, K., 1979, Analysis of Typhoon pressure patterns over Japanese Islands, *J. Natural Disaster Science*, Vol. 1, No. 1, P.3—19.
- [4] 董克勤、李曾中, 1980, 海南岛地形对过岛台风强度和移速影响的初步统计分析, *大气科学*, Vol. 4, No.3, P. 288—292.
- [5] 李曾中, 1981, 对海南岛登陆台风的研究, 台风会议文集(1978), 上海科技出版社, P. 110—116.
- [6] 董克勤、李曾中、张婉佩等, 1982, 大型岛屿对过境台风影响的研究, 热带天气会议论文集(1980), 科学出版社, P.166—168.
- [7] Chu K. K., Wang S. T. and Pao H. P., 1978, Surface wind fields and moving tracks of typhoon when encountering the island of Taiwan. 11th technical conference on hurricanes and tropical meteorology. American Meteorological Society. P. 84—87.
- [8] 张捷迁、魏鼎文、何卓华, 1975, 台风结构和中国东南沿海地形对台风影响的初步实验研究, *中国科学*, No. 3, P. 302—314.
- [9] 魏鼎文、张捷迁, 1978, 台风路径的某些模拟实验研究, *大气科学*, Vol. 2, No.4, P. 290—296.
- [10] Pao, H. P., and Hwang, R. R., 1978, Effects of mountains on a typhoon vortex: A Laboratory Study. 11th technical conference on hurricanes and tropical meteorology. American Meteorological Society. P. 88—91.
- [11] 上海台风研究所编, 1984, 西北太平洋台风基本资料集(1949—1980), 气象出版社.
- [12] Fukui, E. E., 1977, The Climate of Japan. Developments in Atmospheric Science 8. P. 119—132.
- [13] 王允宽、刘俊清、黄中华, 台风形成中冷空气作用的模拟实验(即将发表).
- [14] 王允宽、刘俊清、黄中华, 1986, 青藏高原地形对孟加拉湾热带气旋动力影响的模拟实验研究, *大气科学*, Vol. 10, No. 1, P. 27—34.
- [15] 魏鼎文、王允宽, 1982, 热带气旋形成理论中的几个基本问题——流体力学模拟实验研究, *海洋文集*, Vol. 5, No.1, P. 23—40.
- [16] Mitsuta, Y., and Monji, N., 1984, Development of a laboratory simulator for small scale atmospheric vortices, *Natural Disaster Science*, Vol. 6, No.1, P.43—54.
- [17] Monji, N., 1985, A laboratory investigation of the structure of the multiple vortices, *J. Met. Soc. Japan*, Vol. 63, P. 703—713.
- [18] Palmén, E., 1948, On the formation and structure of tropical cyclones, *Geophysica*, Vol. 3, P. 26—38.
- [19] Gray, W. M., 1980, Global climatological aspects of tropical cyclone occurrence, Pre-Prints and Abstracts of Paper, Symposium on Typhoons, Shanghai, China, 6—11, October.
- [20] 陈联寿、丁一汇, 1979, 西太平洋台风概论, 科学出版社, P. 405—409.
- [21] GMS-1 VISSR IMAGE (35mm negative film), 1980, Geo. Met. Sate Vis Scan Radio (Japan).



图 4 台风沿 A 型路径移动时的流场变化情况

A-1a-1d: 沿 A₁ 路径, A-2a-2d: 沿 A₂ 路径, A-3a-3d: 沿 A₃ 路径,



图5 台风沿B或C型路径移动时的流场变化情况

C-1a-1d: 沿 C_1 路径, B-2a-2d: 沿 B_2 路径, C-3a-3d: 沿 C_3 路径。