

热带气旋  
的发展、结构和影响

〔美〕 R·A·安赛斯



144  
155

# 热带气旋的发展、结构和影响

[美] R. A. 安赛斯 著

李毓芳 黄安丽 周钦华 译

丁一汇 陶诗言 张则恒 校

气象出版社

R. A. Anthes  
**TROPICAL CYCLONES**  
**Their Evolution, Structure and Effects**  
*American Meteorological Society*  
1982

**热带气旋的发展、结构和影响**

[美] R. A. 安赛斯 著

李毓芳 黄安丽 周钦华 译

丁一汇 陶诗言 张则恒 校

责任编辑 康文骅

\* \* \*

**气象出版社出版**

(北京西郊白石桥路46号)

常熟文化印刷厂排版 密云体校印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

\* \* \*

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.125 字数: 178 千字

1987年10月第一版 1987年10月第一次印刷

印数: 1—1500

定价: 1.90元

**ISBN 7-5029-0025-X**  
**P.0016**

## 内 容 简 介

本书描述了热带气旋的生成、发展和消亡，评述了对热带气旋的认识、模拟和预报方面所取得的成就以及人工影响热带气旋的试验。

本书共分八章。第一章介绍了飓风的巨大能量，以及它们对人类和社会的影响。通过对无线电探空、飞机和人造卫星资料的分析，揭示了成熟飓风的各种特性。第二、三章全面地、系统地阐述了热带气旋发生、发展和维持的各种物理过程，并用图解作了定性和定量的说明。对行星边界层、积云对流和辐射的作用也作了详尽的讨论。第四章细致地评述了热带气旋数值模拟方面的进展，近年来三维模式在模拟诸如飓风眼和螺旋雨带这些已观测到的特征和预报三天内风暴移动方面所取得的成就。第五、七章分别评述了人工影响飓风和分析当前飓风预报的能力，并对业务预报的方法和存在的困难，风暴预报的经济效益和官方预报精确度的趋势都作了讨论。对人工影响飓风的潜在好处和科学试验上的问题，主要是通过催化飓风云系效益而进行的试验与理论成果来加以评述的。第六章将各种观测现象和理论结合起来，对飓风与海洋之间的相互作用进行了综合叙述与讨论。最后一章总结了当前热带气旋研究工作的现状，并提出了今后研究工作的展望。

本书可作为气象科技、科研工作者及有关气象院校师生参考用书。

## 作者为中译本写的序

受到热带气旋影响的大多数人并不属于英语语系的国家。因此,我这本热带气旋的专著能译成中文出版,感到非常高兴。与其他住在热带和副热带地区的气象学者一样,中国的气象学者对热带气旋的研究已有几百年的历史,这是因为热带风暴对中国的文化和人民生活有着密切的影响。我希望这一中译本将成为沟通各国研究热带风暴动力学和从事热带风暴预报的人们之间的一个桥梁。

R. A. 安赛斯  
1984年3月7日

# 序

美国国家大气科学研究中心主任安赛斯博士从事热带气旋的动力学研究多年。本书是他对这个问题的有系统的概括。全书共分八章，包括热带气旋的结构、发生和发展，以及热带气旋的预报和人工影响热带气旋的试验，还提出了今后热带气旋研究的展望。书中有关边界层过程、积云对流和辐射对热带气旋发生发展的影响，以及热带气旋的数值模拟，不少是作者自己的研究成果。正如作者在中译本序言中所说那样，本书是热带气旋动力学和热带气旋预报的桥梁。不论是从事理论研究或从事实际预报工作的人，都能从本书获得益处。

陶诗言

1986年10月12日

# 目 录

作者为中译本写的序

序

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第一章 绪言 .....               | 1   |
| 第二章 热带气旋的结构和生命史 .....      | 14  |
| 2.1 飓风的测量和分析技术 .....       | 14  |
| 2.2 描述飓风系统的方程组 .....       | 16  |
| 2.3 飓风成熟阶段的动力和热力结构 .....   | 21  |
| 2.3.1 概述 .....             | 21  |
| 2.3.2 风的分布 .....           | 23  |
| 2.3.3 气压和温度的分布 .....       | 32  |
| 2.3.4 飓风眼的形成 .....         | 38  |
| 2.3.5 水汽和降水的分布 .....       | 43  |
| 2.3.6 飓风的雨带 .....          | 46  |
| 2.4 热带气旋的生成 .....          | 57  |
| 2.4.1 有利于热带气旋生成的物理参数 ..... | 58  |
| 2.4.2 热带气旋生成的概念模式 .....    | 70  |
| 2.5 热带气旋的衰亡 .....          | 74  |
| 第三章 热带气旋中的物理过程 .....       | 79  |
| 3.1 边界层的热量、水汽和动量输送 .....   | 79  |
| 3.2 积云对流过程 .....           | 90  |
| 3.2.1 积云对其环境温度的影响 .....    | 91  |
| 3.2.2 积云对其环境湿度的影响 .....    | 96  |
| 3.2.3 积云对其环境动量的影响 .....    | 98  |
| 3.2.4 积云参数化方案 .....        | 102 |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 3.3   | 辐射加热和冷却 .....                | 106 |
| 第四章   | 热带气旋的数值模拟 .....              | 113 |
| 4.1   | 模式的概况 .....                  | 113 |
| 4.2   | 轴对称飓风模式 .....                | 117 |
| 4.2.1 | 早期的困难 .....                  | 117 |
| 4.2.2 | 飓风的模拟 .....                  | 118 |
| 4.2.3 | 另一种对流处理方法 .....              | 127 |
| 4.3   | 三维飓风模式 .....                 | 129 |
| 4.3.1 | 研究模式 .....                   | 129 |
| 4.3.2 | 使用观测资料的模式 .....              | 137 |
| 4.4   | 模拟结果总结 .....                 | 145 |
| 第五章   | 人工影响飓风 .....                 | 147 |
| 5.1   | 试验的例证 .....                  | 151 |
| 5.2   | 数值模拟 .....                   | 154 |
| 第六章   | 海洋对热带气旋的反应 .....             | 162 |
| 6.1   | 观测研究 .....                   | 164 |
| 6.2   | 海洋反应的理论模式 .....              | 172 |
| 6.2.1 | 总的考虑 .....                   | 172 |
| 6.2.2 | 浅层流体对于质量和动量场之间不平衡的反应 .....   | 174 |
| 6.2.3 | 在海洋对不平衡的反应中层结的作用 .....       | 182 |
| 6.2.4 | 海洋反应的非线性模式 .....             | 187 |
| 6.2.5 | 一个耦合的海-气飓风模式 .....           | 196 |
| 6.3   | 上翻和混合以外的其它过程引起的海温变化的估计 ..... | 197 |
| 6.4   | 沿海岸的海水反应和风暴潮 .....           | 198 |
| 6.4.1 | 定性方面 .....                   | 198 |
| 6.4.2 | 风暴潮模式 .....                  | 202 |
| 6.4.3 | 提要 .....                     | 208 |
| 第七章   | 热带气旋预报 .....                 | 211 |
| 7.1   | 经济方面 .....                   | 211 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 7.2 预报方法 .....     | 214 |
| 7.2.1 统计模式 .....   | 217 |
| 7.2.2 动力模式 .....   | 224 |
| 7.3 官方预报的准确率 ..... | 229 |
| 第八章 总结和展望 .....    | 237 |
| 参考文献 .....         | 238 |
| 缩写词索引 .....        | 249 |
| 后记 .....           | 252 |

## 第一章 绪 言

孕育于热带暖洋面之上,诞生于猛烈的雷阵雨之中,靠吸收远方流入的水汽养育而发展成熟的热带气旋,是大气的一个产物。它对人们的生活有着有利和不利两个方面的影响。强烈的热带气旋是所有自然灾害中破坏力最大的灾害之一,它能毁灭沿海一带的城市和千百万人民的生命。热带气旋的有利方面虽然不为人们所注目,但它能给所经过的大片土地带来必要的降水。热带气旋比温带气旋小,温带气旋产生于中纬度西风气流的扰动中并随扰动而移动。而飓风的特点是近中心处的强风(以最小风速为32米/秒或115公里/小时定义)以及丰沛的降水量。迄今记录到的热带气旋中最大持续风速(一分钟平均)为88米/秒(317公里/小时)它发生在1966年的Inez飓风中(Colon, 1966),最大阵风超过100米/秒(360公里/小时)。但大多数风暴的最大持续风速约为50米/秒(180公里/小时)。

强大的飓风能给海上船舶或生活在近海岸一带的人民带来恐惧,但对于那些从未碰见过热带气旋的人来说,向他们讲述这种恐惧是困难的。在《早期美国飓风》一书中,David Ludlum (1963)曾汇编了1492—1870年影响大西洋、加勒比海和墨西哥湾的各个飓风的情况说明综合表。陆军少将Vaughan在1780年10月一次强飓风的报告中描述了这个风暴给巴巴多斯糖岛造成的悲惨、凄凉情景(Ludlum, 1963, p.69):

“我非常忧虑地报告阁下,从本月10日星期二开始,飓风

差不多不停地刮了48个小时，这个岛几乎全被这个猛烈的飓风所毁。要想对这个风暴作出描绘是很难的，只告诉你在岛上能逃过这次浩劫的人家很少就够了。整个岛上不会有10幢房子留下来；在布里奇顿难得有一幢房子还没有倒塌；有的全家人都被埋在倒塌的房屋下面；有许多想逃走的人都受伤致残。好象整个自然界在发生大变动，宇宙在毁灭。用最灰暗的色彩我也难以向阁下描绘出当地居民悲惨的境遇：地面上遍地都是血肉模糊的尸体，幸存的人家则在废墟之间徘徊，寻找着食物和避难的地方。总之，这个可怕的恐怖情景是难以想象的。”

巴巴多斯地方长官对同一风暴记述了由此所造成的财产、家畜和树木的损失情况(Ludlum, 1963, p.70)：

“他们焦急地等待着拂晓来临，以为天亮时暴风雨将会停止。但在天亮时暴风雨仍没有缓和，这一天他们度过的最悲惨情景是可想而知的。周围一切所呈现的骇人的破坏是无可比拟的；房屋完全倒塌了；树木不是连根拔起，就是只剩下树干；春天般的繁茂景象一夜之间变得象冬天一样的凄凉。人们到处在寻找避难所，但一无所获。人们认为有一定程度保护作用的房屋，此时已全部倾倒在地，即使劫后余生的悲惨幸存者，也已上无片瓦覆身。”

在同一记事中，地方官员在估价某些人的生命好象比另一些人尊贵时，作了如下有趣的陈述：

“到目前为止，在这样可怕的灾害中，要对已经死亡的人数作任何确切的计算是不可能的。白人和黑人一起，可以推测超过几千人，不过幸运的是在这个数目中有声望的人不多。”

不是所有的飓风都伴有闪电和雷鸣，但那些有闪电和雷

鸣的飓风是特别恐怖的。1772年9月6日 Alexanden Hamilton 15岁时,经历了一场飓风袭击西印度群岛的圣·克罗瓦岛。Hamilton 在给他父亲的信中写道(Hughes, 1976);

“上帝啊!多么恐怖和残忍!我是无法描绘的,您也是无法想象的。好象自然界正在发生整个地瓦解,海洋和风在咆哮,火红的流星在天空中飞舞,几乎不停的闪电闪耀着光的奇观,房屋哗啦啦坍下来,悲伤的尖声叫喊足以致天使惊赫不已。岛上大部份建筑物倒在地上;人们几乎都不得安宁,一些人已死亡,许多人家已破产——全家人在街上徘徊,不知道何处能找到避难的地方——病人敞露在凛烈的风雨之中,没有一张床可躺,或没有一块干的地方可以藏身。我们的避难所已一无所有。总而言之,整个国家的外表都笼罩着悲惨。”

在陆地上遭受飓风的威胁没有海上感觉到的那样凄凉。哥伦布,他最初三次航海时非常幸运地避免了热带气旋,但第四次航海时运气却不怎么好。在巴拿马运河现在的入口处附近,他遇到了一个强烈的飓风。哥伦布在风、雨和闪电的大旋涡中绝望地写道(Ludlum, 1963, p.7):

“暴风雨的发生和烦扰,使我不知道该转向何处;我的旧伤复发,接连九天迷路,失去了生活的希望;我从未见到过海面上是那样地怒涛汹涌,恶浪滚滚。风不但阻挡我们前进,而且也不使我们有机会驶向后方任何峡谷去隐蔽;因此我们不得不漂泊在这血腥的海面上,它沸腾得象一壶烧开的水。天空,看起来从来没有这样可怕,整日整夜象一团熊熊烈火,雷电爆发得如此猛烈,每次我都担心风帆和桅杆有没有被击毁;闪光来得如此凶险和令人可怕,以致我们都以为船将被摧毁。大雨一直不停地从天空倾泻而下,我不认为它是下雨,因为它是倾盆如注的。人们是那样疲乏不堪,以致他们只得渴望以死

亡来结束这种可怕的遭遇。”

有关飓风的早期知识，是来自 William Redfield (1789—1852) 的报导，他搜集船舶的航海日记和其他来源的记录，推断在飓风中风是环绕着一个中心而旋转的，并且整个风暴系统是沿着一条正规的路径移动的。Redfield 在 1831 年发表的第一篇论文中，对该年发生在纽约州长岛的飓风作了研究，在该文中他作了如下典型性的结语：

“空气块能在几小时之内十分迅速地经过纽约州的米德尔顿城镇上空，流向只有 30 分钟行程的某一点，但永远不能到达该点；然而相同的或者空气块的一部分却能以等速从该点折回来。回顾这些事实，它促使我们去探索上述情况为什么能发生或以什么方式发生，以及去探索在同一时间所出现的这些大气运动的最猛烈部分，又为什么全被限制在一个直径约为一百英里<sup>1)</sup> 的范围之内？作者对于这些现象作了一个满意的解释，即这种风暴是以一个巨大的旋风形式出现的。” (Redfield, 1831)

在 Redfield 发表历史名著的同一年，陆军中校 William Reid 研究了 1831 年巴巴多斯岛的大飓风。以后几年，Reid 研究了一些风暴，同时把它的研究结果与 Redfield 的发现作了比较；另一个对飓风研究有重要贡献的早期气象学家是 James Espy，他认为潜热释放是风暴的能量来源 (Espy, 1841)。

热带气旋在不同地区有不同名称。在大西洋和东太平洋称为“飓风”，这名称来自中美洲叫做泰诺斯的古代土著部落。“飓风”是一个“凶神”，热带风暴的名称就是由此获得的。在西太平洋，飓风被称为“台风”。在菲律宾称为“碧瑶风”，这是

1) 1 英里(mi)=1.609 公里(km)，下同。

由菲律宾群岛的碧瑶城而来的,在那里,1911年7月份的一次24小时降水量达46英寸<sup>1)</sup>(116.8厘米)(Huschke,1959)。在澳大利亚,他们称飓风为“威来风”,而澳大利亚以外的民间说法,“威来风”则指小尘暴。

为了方便通讯和警报,在世界上部分地区飓风的命名是基于通常的习惯。多年来,西班牙人依照圣人的名字来命名加勒比海上空的飓风。直到1978年,大西洋上的飓风和太平洋上的台风才以女性的名字命名。而为了纠正性别的偏见,现在也同样可以用男性名字来命名。

全球每年发生80—100个热带气旋,这是造成平均20000人死亡和60—70亿美元经济损失的原因(Southern, 1979)。表1.1引自大不列颠百科全书年鉴(Southern, 1979),它把1964—1978年期间死于热带气旋和其它自然灾害的人数作了比较。由表可见,死于热带气旋的人数估计约占总死亡数的64%,它是远远超过其它灾害的。正如表1.2所表示的那样,即使是个别的热带气旋也能造成生命财产的毁灭性损失。

表 1.1 自然灾害

(资料引自 1979 年 Southern 编辑的大不列颠百科全书)

| 灾 害        | 14年死亡总人数 | 最大一次事件死亡的人数       |
|------------|----------|-------------------|
| 热带气旋       | 416972   | 300000(孟加拉国,1970) |
| 地震和潮汐波     | 195328   | 66794(秘鲁,1969)    |
| 洪水         | 26724    | 8000(越南南方,1964)   |
| 龙卷、灾害性局地风暴 | 4062     | 540(孟加拉国,1969)    |
| 雪崩和山崩      | 5790     | 1450(秘鲁,1974)     |
| 火山爆发       | 2572     | 2000(扎伊尔,1973)    |
| 温带气旋       | 1860     | 166(美国,1966)      |
| 热浪(寒潮)     | 505      | 291(印度,1973)      |

1) 1英寸(in)=0.0254米(m),下同。

表 1.2 热带气旋或大洪水中死亡的人数  
(Southern, 1979)

| 年 份     | 地 点   | 气 旋    | 洪 水     |
|---------|-------|--------|---------|
| 1281    | 日本九州  | 100000 |         |
| 1642    | 中国开封  |        | 300000  |
| 1737    | 加尔各答  | 300000 |         |
| 1851—66 | 长 江   |        | 40—50百万 |
| 1876    | 吉 大 港 | 300000 |         |
| 1881    | 越南海防  | 300000 |         |
| 1882    | 孟 买   | 100000 |         |
| 1887    | 长 江   |        | 150 万   |
| 1911    | 长 江   |        | 100000  |
| 1915    | 广 东   |        | 100000  |
| 1931    | 黄 河   |        | 3—4百万   |
| 1931    | 长 江   |        | 140000  |
| 1939    | 中 国   |        | 200000  |
| 1970    | 孟加拉国  | 300000 |         |
| 1971    | 越南北方  |        | 100000  |

如图 1.1 所示, 热带气旋造成了多种多样的灾害。灾害的主要原因是强风、风暴潮和暴雨。仅由强风引起的财产损失的主要与建筑物的质量和最大风速的变化有关。图 1.2 表示, 澳大利亚建筑物损失的增加可看作是最大阵风风速的函数(Leicester and Beresford, 1978)。损失指数, 即房屋修理费与最初建筑费之比率(假定建筑费不变)是随风速非线性增加的。由图 1.2 估计, 损失近似地随风速的立方而增加。即使最小的飓风风速也能引起财产的损失, 特别是质量

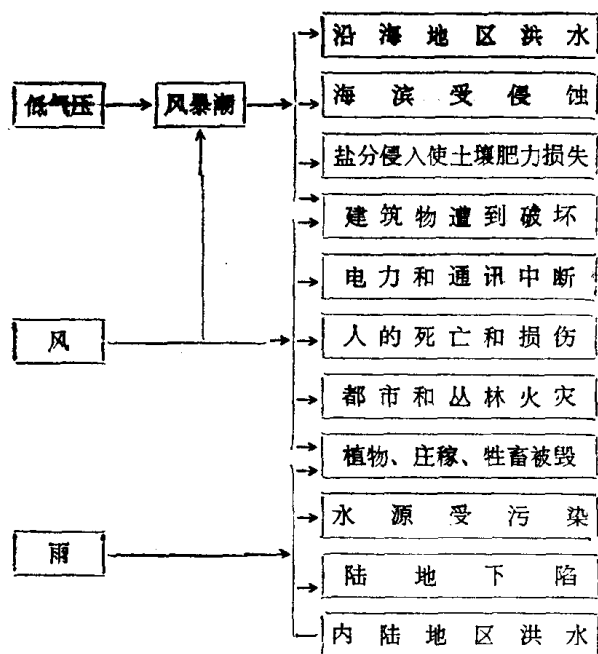


图 1.1 热带气旋可能造成的损失的种类  
(Southern, 1979)

差的建筑物。由热带气旋登陆所造成的大部分损失 [按美国气象学会(1973)年统计,在美国为 90%] 是由风暴潮引起的。风暴潮是指沿着海岸,海面高度急速增加的一种现象,它主要是由于风推动海水上岸而形成的。海水升高几米并非罕见,极端情况下升高可达 10 米。1970 年 11 月 13 日发生在孟加拉国的热带气旋,是造成最恶劣灾害的热带气旋之一,其灾害估计主要由于 6 至 9 米高的风暴潮所引起。在这个气旋中,有 200000 至 300000 人死亡。这个异常的涌浪不是因为气旋的强度接近了最高记录,事实上,它的最低气压只有 950 mb<sup>1)</sup> 左右。这个数值与热带气旋中记录到的最低气压(表 1.3)相

1) 1mb(毫巴)=1hPa(百帕)下同。

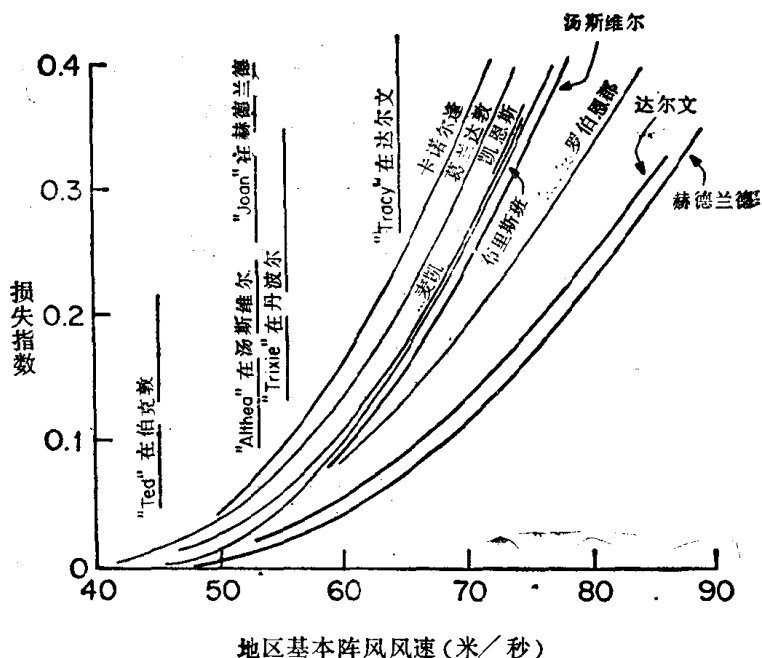


图 1.2 损失指数(修理费/最初建筑费)

假定建筑费不变。(Leicester and Beresford, 1978)

(图中带引号的英文均为热带气旋的名字——译者注)

比要高得多，同时比 1876 年 10 月 31 日气旋 “bakergani” 930mb 的数值也高。“bakergani” 气旋的死亡人数为 100000 至 400000(船员天气日记, 1971)。为什么 1970 年的气旋有那么大的破坏力，这主要是因为气旋登陆和大潮汐正好遭遇，25 厘米以上的降水已造成了平坦地区的洪水，再加上风暴潮的作用，结果便造成如此大的灾害。在这次风暴到来之前，尽管吉大港气象台发布了“危险”警报[UNESCO (联合国教育、科学和文化组织), 1972]，但仍造成巨大的死亡。这说明当前防止伤亡是困难的，因为有些人不愿意离开家园丢下财产而躲避到安全的地方去，有些人不相信风暴来临的严重性，有些人