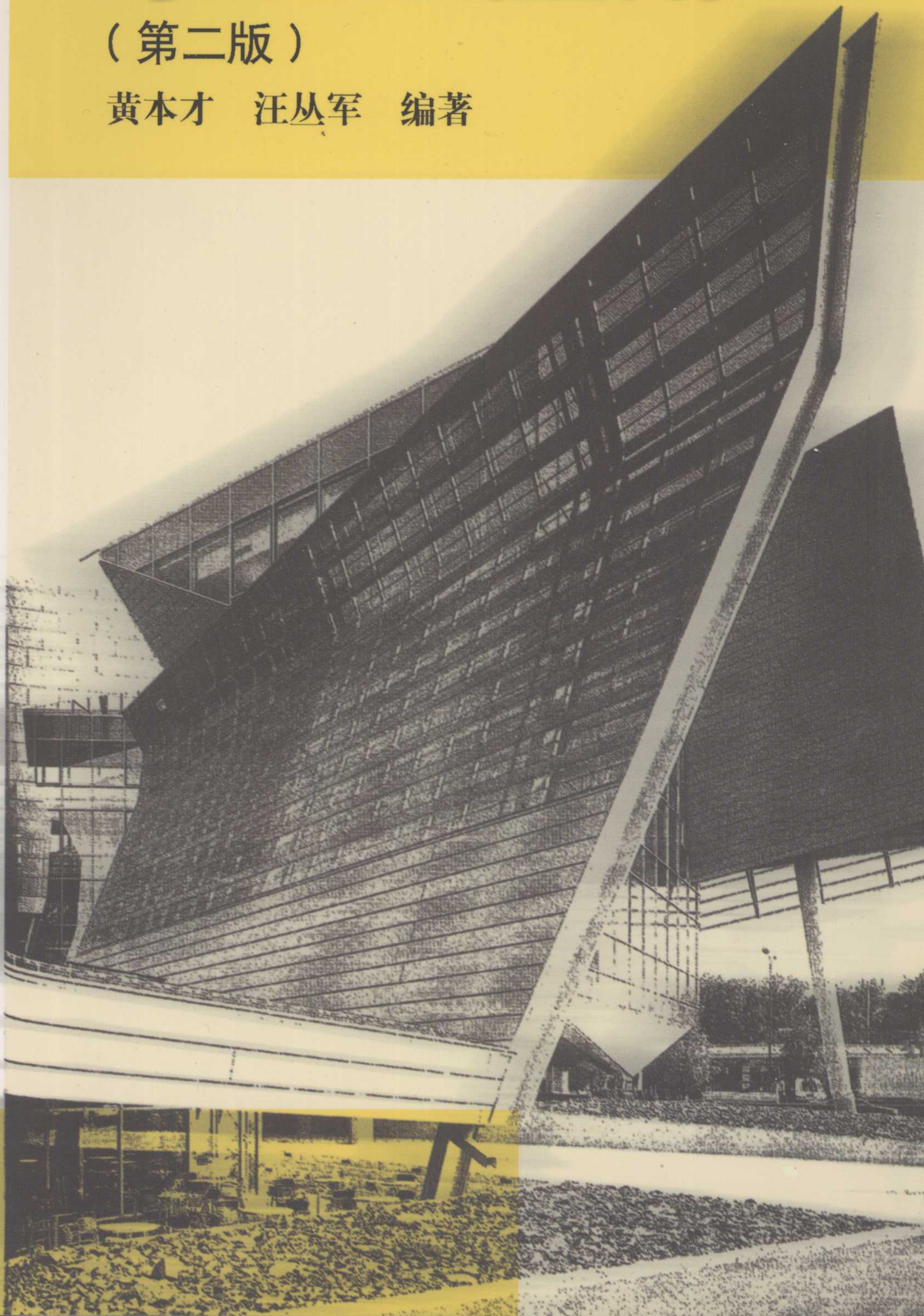


结构抗风分析 原理及应用

(第二版)

黄本才 汪丛军 编著

同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



结构抗风分析原理及应用

(第二版)

黄本才 汪丛军 编著

目錄(CT)目錄列在左側

8-5383-8025-7-879 978-7-2608-3835-8

原林台風莊陳彭



同濟大學出版社

TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

全书共有九章和五个附录,内容包括大气边界层的风、结构上平均风和脉动风的基本概念以及结构平均风荷载、风致响应和风振动力荷载的计算原理和实用计算方法。书中还结合国内外相关文献和规范介绍和探讨了高层建筑、高耸结构和大跨屋盖结构静动力风荷载的分析方法及实际应用,并参考国内外文献和本课题组的研究,详细介绍和讨论了计算风工程的理论基础及最新研究和应用进展,同时也适当介绍了风洞实验内容。附录中列出的加拿大、日本和美国的规范或建议的条文规定及注解,亦很有参考和应用价值。附录五给出本书中涉及到的随机振动基础内容,便于读者在阅读有关章节内容时查找。

本书可作为高等工科院校土建类专业、工程力学专业等研究生的教材,也可供设计单位和其他有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构抗风分析原理及应用/黄本才,汪丛军编著. —2
版. —上海:同济大学出版社,2008.9

ISBN 978-7-5608-3832-8

I. 结… II. ①黄…②汪… III. 高层建筑—抗风结
构—结构分析 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 139333 号

结构抗风分析原理及应用(第二版)

黄本才 汪丛军 编著

责任编辑 郁 峰 责任校对 徐春莲 装帧设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 28.25

印 数 1—5000

字 数 705000

版 次 2001 年 2 月第 1 版 2008 年 9 月第 2 版 2008 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3832-8/TU·788

定 价 48.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

第二版前言

《结构抗风分析原理及应用》一书自 2001 年 2 月第一版出版以来,受到各高校、研究单位和工程界的欢迎,被许多学校选为研究生的教材。

七年多来,结构风工程的研究与应用进展很快,加之我们在研究生的教学中又有了新的认识和体会,也发现原书中有一些叙述和印刷的错误,遂对第一版进行修订。

本书总体上仍保持九章的内容,只是将原第一版的“第六章高层建筑静动力风荷载”和“第七章高耸结构的静动力风荷载”的内容合并为“第八章高层建筑和高耸结构静动力风荷载”,但增加“建筑模型风洞试验”一章(第六章),并另增加“附录五随机振动基础”。

具体地说,本书除修改和删去部分内容外,主要在第二章中新增加了台风(飓风)风剖面的内容;第三章中加强了绕钝体流动规律的叙述,增加了高宽比和厚宽比对平均风荷载的影响的内容;第四章中增加了顺风向脉动风的准定常假定的内容,加深了对顺风向结构风致响应方法内容的介绍,除介绍中国国家规范的惯性风荷载方法外,还增加了加拿大国家规范的阵风荷载因子方法的内容;第五章中加强了横风向颤振的阐述,增加了抖振方面的内容;第七章增加了湍流物理模型的一方程标准 $S-A$ 模型、 $RANGL-k-\varepsilon$ 模型、 $Wilcox\ k-\omega$ 模型和 $SST-k-\omega$ 剪应力模型等内容,压缩了有关雷诺应力方程物理模型(RSM 模型)的部分内容,除大旋涡模拟模型外,还适当介绍了混合模型和分离涡模拟,并结合本课题组的研究,新加了有关钝体绕流稳态数值模拟的建议和计算风工程的实例与分析,有一定的参考和应用价值;第八章增加了对高层建筑平均风和脉动风的特性的介绍,加深了对高层建筑风致动力响应的阐述,新加了高层建筑风振控制和输电塔结构的风致响应等内容;第九章中加深了对大跨屋盖抗风分析特点的描述,新加了准确的大跨屋盖上静力等效风荷载计算方法和大跨屋盖结构风振算例分析等内容。

本次修订由黄本才教授执笔撰写第一章至第五章和第八章,汪丛军博士执笔撰写第六章和第九章,第七章由汪丛军和黄本才合写。

本教材由同济大学研究生教材出版基金资助(2006 年)出版,在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限,书中不足之处,望读者批评指出。

作 者

2008 年 8 月于上海同济大学

第一版前言

本书根据高等工科院校土建类专业和工程力学专业(含本科生和研究生)的教学需要,对大气边界层中的风、平均风和脉动风的基本概念进行了详细的阐述,使学生能够真正掌握这一领域的基础知识。对结构上平均风荷载和顺风向、横风向风振动力计算这些结构风工程中最基本的内容,从与结构动力学有关的最基本分析原理、计算公式的来龙去脉直到我国规范在高层建筑、高耸结构和大跨屋盖结构中的具体应用,本书都进行了深入的介绍和探讨,使本科生在学习了本门课程的部分内容之后,在工程单位能结合有关风荷载规范,主动地处理和计算分析一般结构和部分特殊结构的静动力风荷载问题,而研究生在学习了本门课程之后,可以很快进行有关课题论文的研究。

全书共有九章和四个附录。第一章、第二章介绍自然界和大气边界层中风的基本概念和特性,以及结构风工程计算中要用到的风剖面,其中介绍结构风灾内容的目的是要引起结构工程技术工作者对抗风的足够重视;第三章介绍结构上平均风荷载的计算方法,其中关于地面粗糙度类别划分的原理和方法,我国规范合理风压高度变化系数的建议,是作者近期的研究成果;第四章、第五章结构顺风向静动力风荷载和横风向风振,是结构风工程中最基本的内容;第六章、第七章的高层建筑和高耸结构静动力风荷载,是土木工程结构中应用最多的基本内容,这两章的内容除结合我国有关最新风荷载规范条文的内容外,还对比介绍了作者近期研究的更简单实用的计算方法,以及用准确的方法分析不规则高层建筑静动力风荷载的软件,该软件已通过由建设部组织的专家鉴定,是作者近期的科研成果;第八章大型悬挑屋盖上的风荷载内容是国内外正在研究的新课题和热点,屋盖结构风振机理有待作深入的工作,本章所述内容是作者所能收集到的国外有关研究成果和作者近期部分的科研成果;第九章的计算风工程,是运用计算流体动力学的理论,进行结构风工程的数值模拟,即采用数值风洞的方法,预测或模拟风流场和结构物表面上的平均压力分布,它无疑是今后结构风工程中很有前途的一个方向。附录二至附录四列出了加拿大、日本和美国规范或建议的关于风荷载的条文及注解,这些内容不仅有助于高等院校、科研单位的风工程专家进行防风研究,而且对建筑设计院的工程师进行实际工程的防风设计,都是很有价值的参考资料。

感谢复旦大学徐有恒教授对本书提出了宝贵的意见。在编写本书的过程中,研究生朱川海、刘军和陈勇参加了附录三和附录四的翻译和抄写工作,研究生郑本辉、陈勇分别参加了第九章中单幢高层建筑和体育场大悬挑屋盖的风流场和风压分布的数值模拟实例计算,在此表示谢意。

由于编著者水平有限,不当之处,望读者批评指正。

作 者

2000年9月于上海同济大学

目 录

801	.....	金知同风壁射危数	0
801	.....	脚基金知同风	1.0
811	.....	金知同风壁射危数	2.0
811	.....	金知同风立效风又建荷本总响数	3.0
第二版前言			
第一版前言			
1	绪 言	.....	1
1.1	自然界的风	.....	1
1.2	结构风灾	.....	9
1.3	风对结构的作用	.....	14
2	大气边界层的平均风特性	.....	16
2.1	大气边界层	.....	16
2.2	平均风速剖面	.....	16
2.3	台风(或飓风)风剖面	.....	20
2.4	地面粗糙度类别划分的原理和方法	.....	22
3	结构上的平均风荷载	.....	26
3.1	基本风速和基本风压	.....	26
3.2	结构上的平均风荷载	.....	34
3.3	山地(山丘、悬崖)风压修正	.....	46
4	结构顺风向静动力风荷载	.....	49
4.1	顺风向脉动风的准定常假定	.....	49
4.2	脉动风的主要特性	.....	51
4.3	顺风向结构风致响应一般计算方法	.....	59
4.4	加拿大国家规范的阵风荷载因子方法	.....	68
4.5	中国国家规范的惯性风荷载方法	.....	75
5	结构横风向风振	.....	80
5.1	主要横风向风振机理分析	.....	80
5.2	涡激振动	.....	82
5.3	横风向驰振	.....	98
5.4	颤 振	.....	102
5.5	抖 振	.....	104

6	建筑模型风洞试验	108
6.1	风洞试验基础	108
6.2	建筑模型风洞试验	113
6.3	结构总体荷载及风效应风洞试验	118
7	计算风工程	125
7.1	纳维-斯托克(Navier-Stokes)方程	125
7.2	雷诺平均纳维-斯托克斯方程及湍流物理模型	130
7.3	钝体绕流稳态数值模拟的建议	139
7.4	计算风工程中湍流模型的改进与展望	144
7.5	大旋涡模拟、混合模型和分离涡模拟	150
7.6	计算风工程的实例与分析	159
8	高层建筑和高耸结构静动力风荷载	172
8.1	高层建筑的平均风力	172
8.2	高层建筑面上的脉动风压特性	184
8.3	高层建筑风致动力响应	189
8.4	高层建筑人体舒适度验算	213
8.5	高层建筑风振控制	217
8.6	我国计算高耸结构动力风荷载的规范方法	234
8.7	电视塔结构顺风向的动力风荷载	237
8.8	输电塔结构的风致响应	240
9	大跨屋盖结构的静动力风荷载	247
9.1	大跨屋盖抗风分析的特点	247
9.2	体育场悬挑屋盖静动风荷载	252
9.3	大跨屋盖上静力等效风荷载计算	260
9.4	大跨屋盖结构风振算例分析	266
附录 A	风荷载体型系数(中国)	295
附录 B	《加拿大国家建筑规范》(《NBC》)关于风荷载的条文及注解 (1995)	306
A1	风荷载条文	306
A2	注解 B:风荷载	307

附录 C 《日本建筑学会对建筑物荷载建议》关于风荷载的条文和注解 (1996)	344
6 风荷载(条文)	344
6 风荷载(注解)	362
附录 D 美国规范《建筑物和其他结构最小设计荷载(ANSI/ASCE7-95)》 关于风荷载的条文和注解(1996)	387
6 风荷载(条文)	387
6 风荷载(注解)	408
附录 E 随机振动基础	423
参考文献	429

1 绪 言

1.1 自然界的 风

风是空气相对于地面的运动。由于太阳对地球上大气加热和温度上升的不均匀性,从而在地球相同高度的两点之间产生压力差,这样,使不同压力差的地区产生了趋于平衡的空气流动,形成了风^[1]。自然界常见的几种风包括热带气旋(tropical cyclone)、台风(typhoons)、飓风(hurricanes)、季风(monsoons)和龙卷风(tornadoes)等,下面分别进行介绍。

一、热带气旋、台风

发生在低纬度热带洋面上的低气压或空气涡旋统称为热带气旋。按世界气象组织规定,热带气旋按其中心附近2 min 平均最大风力等级区分为不同的强度。从1989年起,采用国际标准,将热带气旋分为以下四类:

- (1) 热带低压:热带气旋中心附近的最大平均风力达6级到7级;
- (2) 热带风暴:热带气旋中心附近的最大平均风力达8级到9级;
- (3) 强热带风暴:热带气旋中心附近的最大平均风力达10级到11级;
- (4) 台风:热带气旋中心附近的最大平均风力达12级或以上。

我国国家气象中心对出现在东经180°以西、赤道以北的西太平洋和南海海面上的热带气旋(当中心附近最大平均风力达到8级或以上时)按照出现的先后次序进行编号,当其云系结构和环流清楚时,只要获得中心附近最大平均风力为7级的报告,即进行编号。如果在同一时间有两个热带气旋都符合编号条件,一般对其位置经度偏西和纬度偏北的一个编号在前。热带气旋的编号采用4个数码,前两个表示年份,后两个表示其出现的先后次序。例如,福建省厦门-龙海“9914”号台风,即为1999年第14个达到编号标准的台风。

根据亚太经社理事会和世界气象组织下设的台风委员会的决定,从2000年1月起,西北太平洋和南海的台风采用具有亚洲风格的名字,它命名简短、通俗、易记,将有助于公众传递台风信息,提高警觉和增加警报效果。它的名字共有140个,分别由亚太地区的柬埔寨、中国、朝鲜、香港、日本、老挝、澳门、马来西亚、菲律宾、韩国、泰国和越南等14个国家和地区提供,每个成员国和地区分别征集提供10个名字,命名表按顺序排列,循环使用。我国提供的名字大多是人们熟悉的各种神话传说中的主角,如龙王、玉兔、悟空等;日本提供的是星座名称;香港提供的有启德、姗姗等女性化名字;澳门则大多是花鸟虫鱼的名字等。中央气象台和香港天文台、澳门地球物理暨气象台经过协商,已确定了一套统一的中文译名。例如,已预报的2000年第一号台风名为“维达”(柬埔寨提供)、第三号台风名为“鸿雁”(朝鲜提供)、第四号台风名为“启德”(香港提供)等。

在北半球,热带旋风的风向是逆时针方向旋转;而在南半球,则为顺时针方向旋转。热带气旋的形成随地区不同而异,它主要是由太阳辐射在海洋面所产生的大量热能转变为动能(风能和海浪能)而产生。海洋水面受日照影响,往往在离赤道10°纬度地区生成热而湿的水汽向上升起,形成庞大的水汽柱。热低压区和稳定的高压区气压之差产生空气

流动,由于平衡产生相互补充的力使之成螺旋状流动,气压高低相差越大,旋转流动的速度越快。因而,台风的成因来自空气的负压,负压来自水蒸气的凝结,水蒸气来自夏日太阳的连续直射所产生的高温,最终太阳是导致台风产生的根本动因。

台风涡旋的平均直径为 $600 \sim 1\,000\text{ km}$,高度可达 $15 \sim 20\text{ km}$ 。台风由外围区、最大风速区和台风眼三部分组成。外围区的风速从外向内增加,有螺旋状云带和阵性降水;最大风速区的螺旋状云带伴随着大风、阵雨呈逆时针方向旋向中心区,越靠近中心,空气旋转速度加大越迅速,并突然转为上升运动,这里发生着摧毁性的暴骤风,与台风眼之间有环形云墙或眼壁。在眼壁附近,风速急剧增大,达到极大值;台风眼位于台风中心区,最常见的台风眼呈圆形或椭圆形,直径约 $10 \sim 70\text{ km}$ 不等,平均约 45 km 。眼区的风速和雨势骤然减少,基本上是晴空少云,只在低层有少量层积云。眼区中心的气压最低,风速也很小,为微风或静风。一个台风有时可能会多于一个眼,由于某种原因,台风眼还会呈现双眼结构,甚至更多,如眼中眼、同心眼等。

图 1-1 是台风粗略的结构图。从水平方向看,低空是台风的流入层,气流呈逆时针旋转流入;在高空,结构有所改变,离台风眼大约 200 km 的范围内,气流呈逆时针旋转流出,但约在 200 km 范围以外,气旋则呈顺时针旋转流出。从垂直方向上看,台风可以分为三层,分别是流入层、中层和流出层。流入层从地面向高空延伸大约 3 km ,气流由四周向中间辐合;中层从 3 km 高度延伸到大约 8 km 高度,这里的气流主要是旋转的,流入或流出的量很小;从中层以上到台风顶部,是流出层,气流在这里向外辐散。

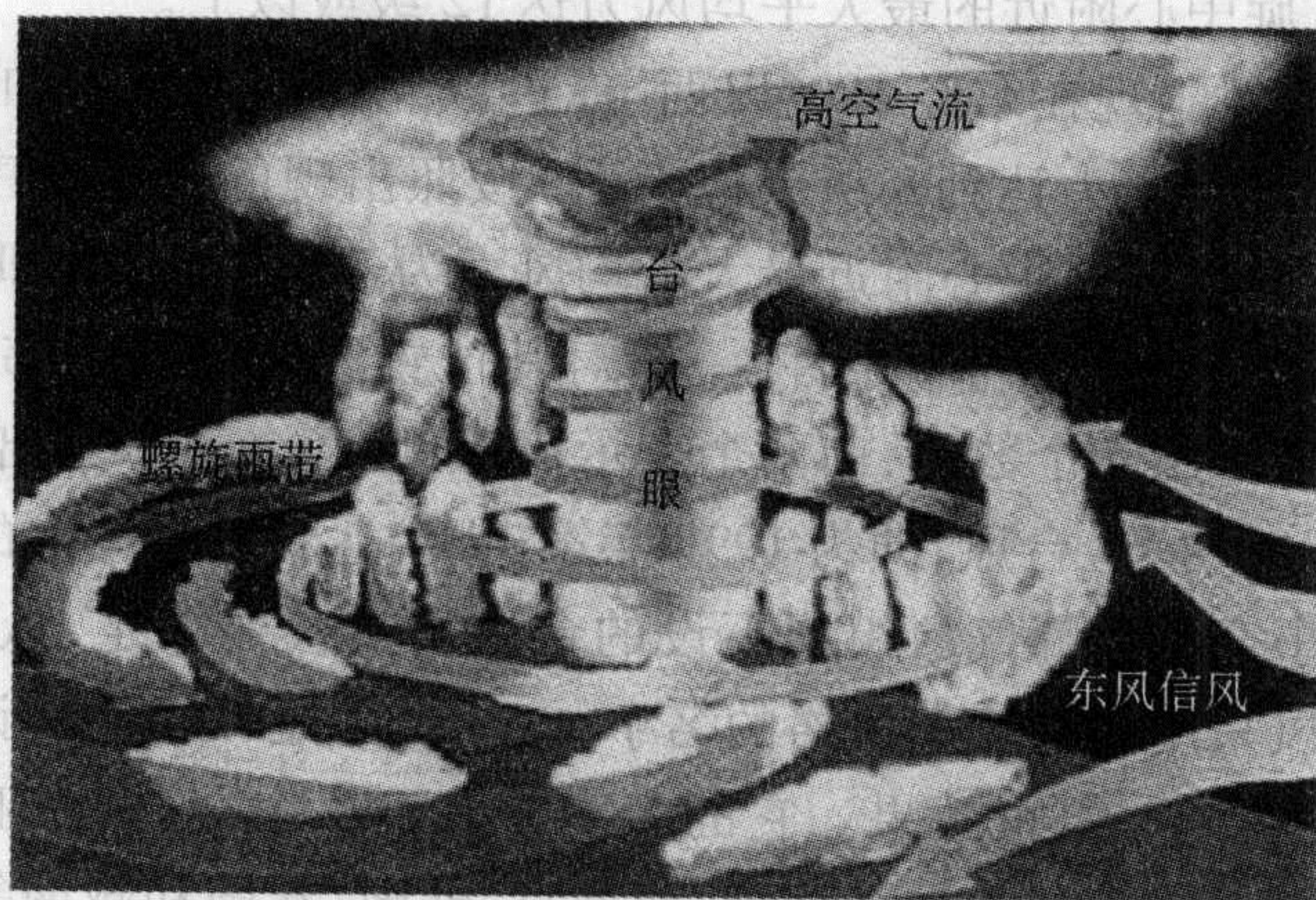


图 1-1 台风结构粗略图

图 1-2 为 2002 年位于印度洋上空的热带气旋“KESINY”的卫星云图(5 月 6 日),正以 6.7 m/s 的速度向西移动,最大平均风速 33.5 m/s ,最大阵风风速 41.2 m/s 。

热带气旋的移动速度与高空气流的流速有关系,平均移动速度为 $20 \sim 30\text{ km/h}$,转向时,移速较慢,转向后较转向前移速要快一些。

热带气旋的路径一般受 $3 \sim 5\text{ km}$ 高空的气流的引导,影响我国的热带气旋路径主要有西移路径、西北移路径、转向路径和特殊路径(如打转、蛇行、停滞、突变,等等)四类。其中,西北太平洋台风的路径见图 1-3,包含有西移路径、西北移路径、转向路径三类,大部分可达到台风的强度。在我国登陆的台风占整个西北太平洋台风总数的 35% 。

一般,我国沿海、海南、广西、广东省等遭遇热带气旋的次数最多,沿东海岸向北,台湾、福建、

浙江、上海、江苏、山东、辽宁等省(市)遭遇热带气旋的次数依次减少,由沿海向内陆,遭遇热带气旋的次数也是减少的。我国仅青海、甘肃、西藏、新疆四个省(自治区)没有热带气旋影响。

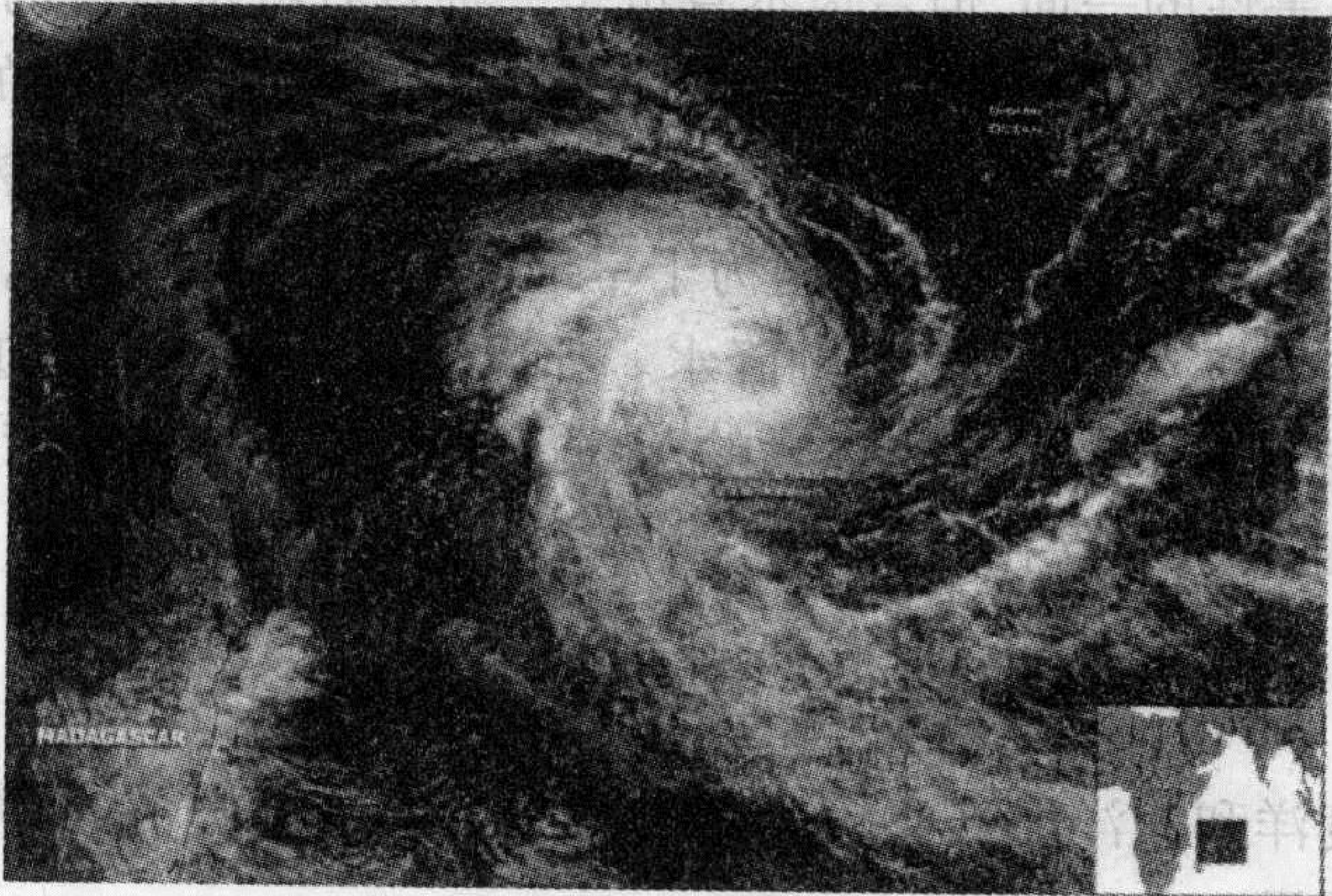


图 1-2 2002 年位于印度洋上空的热带气旋“KESINY”

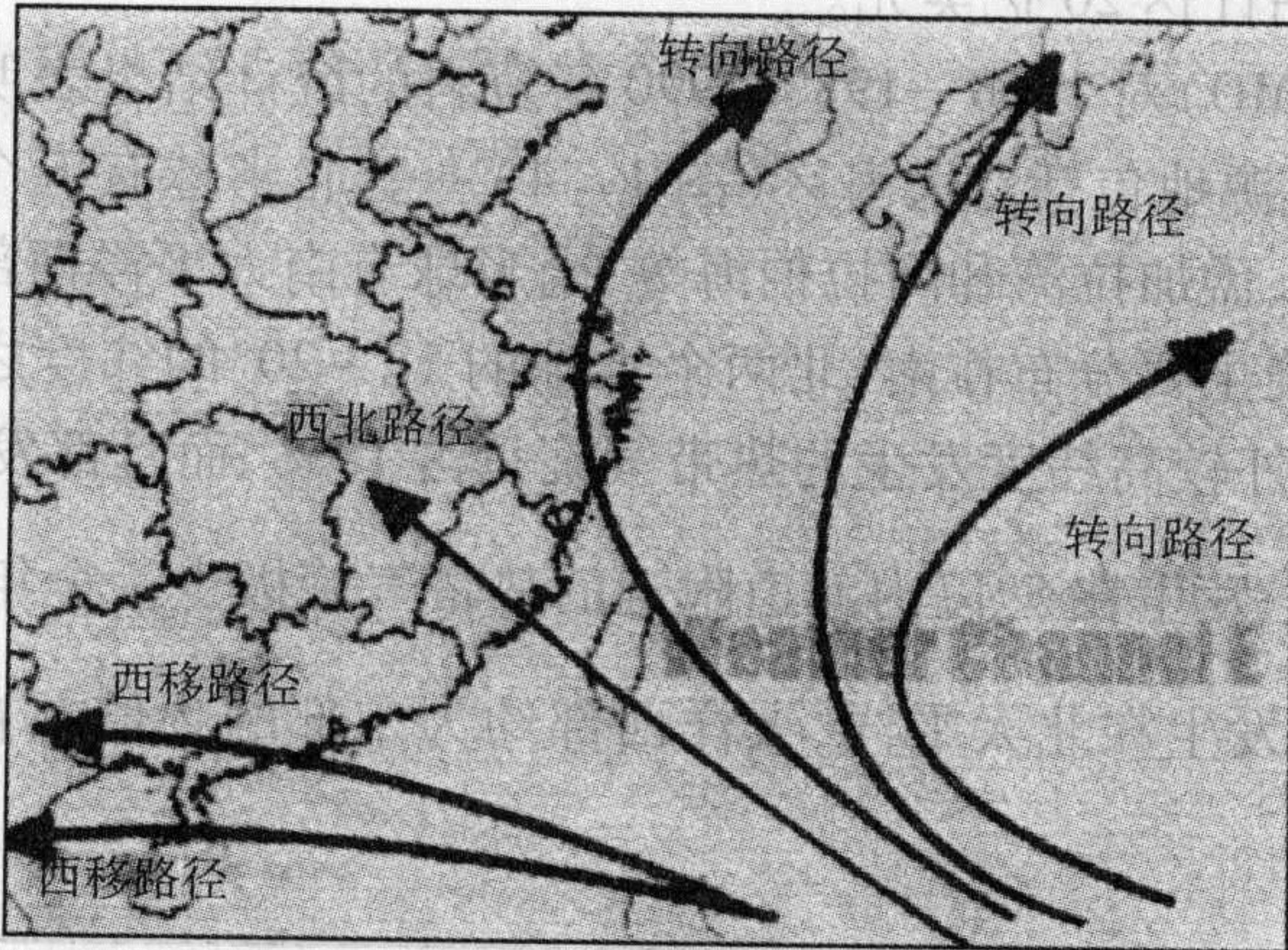


图 1-3 西北太平洋热带气旋的路径

西北太平洋是全球生成热带气旋最多的海区,全球约有 30% 的热带气旋生成于西北太平洋,而这些热带气旋中约有 80% 会发展成台风。这是因为西北太平洋有全球最大最广阔的洋面,热带气旋有更长时间可以停留其上发展;同时,热带西北太平洋也是全球大洋最暖的地方,有“暖池”(warm pool)之称。夏季强烈的东亚夏季风环流在此造成强烈的上升运动,既容易形成热带扰动,也有利于高温高湿的水汽从海洋向大气输送,为热带气旋生成提供有利条件。

西北太平洋台风的源地主要相对集中在三个区,即菲律宾以东洋面、关岛附近洋面和南海中部。在这三个区域形成的台风对我国沿海地区的影响比较大。其中,由菲律宾吕宋岛东侧海面分成以下三条可能的途径:

- (1) 向西进入南海北部,可能继续向西经海南岛附近海面到达越南北部,也可能北上登陆广东;
- (2) 向西北方向经台湾附近海面而在东南沿海地区登陆,或继续北上径往山东半岛和辽宁一带;
- (3) 北上转向移往日本,台风主要对我国东南沿海影响较大,登陆地区主要集中在浙江

省以南的沿海地区和台湾岛、海南岛。

台风带来的灾害有三种,即狂风引起的摧毁力、强暴雨引起的水灾和巨浪暴潮的冲击力。

台风有其造成灾害性的一面,但台风本身也是一种具有特定能量的自然气候现象,它是保证地球表面生态平衡的要素之一,可降低赤道地区的热量,调节地球的表面气温。赤道地区日照最多,气候炎热,如果没有台风驱散这一地区的热量,热带会更热,寒带会更冷,而温带则将从地球上消失。随台风而来的暴雨为干旱地区输送了淡水资源,据测算,一次直径不算太大的台风,登陆时可带来近 30 亿 t 的降水。如果没有台风,本已严重的全世界水荒将会更加严重。台风又能为地球表面释放很大的蕴藏能量以保持全球平衡,台风最大时速可达 200 km/h,地球全凭这种能量保持住了热的平衡。

二、飓风

热带气旋在印度洋和大洋洲则直接命名为热带气旋或气旋,在西大西洋和墨西哥湾生成的热带气旋称为飓风。

飓风的地面风速可达到 70 m/s,具有极强的破坏性,其影响范围是很大的。美国平均每年由飓风造成的损失估计达 20 亿美元。

世界气象组织(WMO)对 1968—1989/1990 年资料的统计结果表明,全球每年平均约有 83 个热带气旋发生,其源地包括八大海区(图 1-4)^[2]。北半球有五个海区,即太平洋西部和东部、北大西洋西部、孟加拉湾和阿拉伯海等;南半球有南太平洋西部、南印度洋东部和西部三个海区。热带气旋主要分布在南、北两个半球的 5°~20° 的纬度之间,其中 10°~20° 之间占了 65%,在 20° 以外较高纬度发生的热带气旋只占 13%,而且都发生在西北太平洋和西北大西洋这两个海域。发生在 5° 以内赤道附近的热带气旋极少。全年约有 $\frac{2}{3}$ 的热带气旋形成于北半球,一半以上发生在北太平洋,大洋西部约为东部的 2 倍左右,西北太平洋发生的热带气旋数最多。

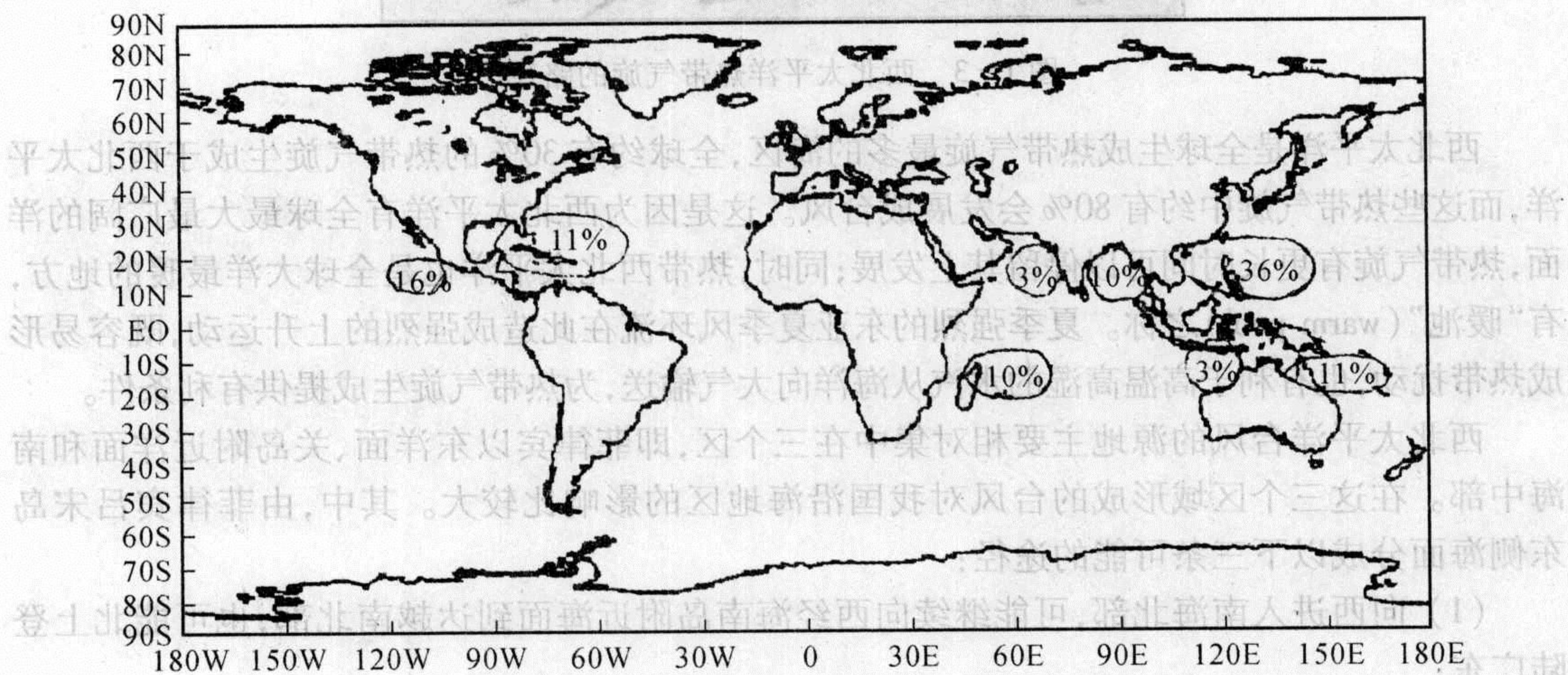


图 1-4 每年热带气旋发生数占全球热带气旋总数百分率的区域分布图

全世界范围内热带气旋、台风和飓风等的路径和发生时间列于图 1-5^[2]中。

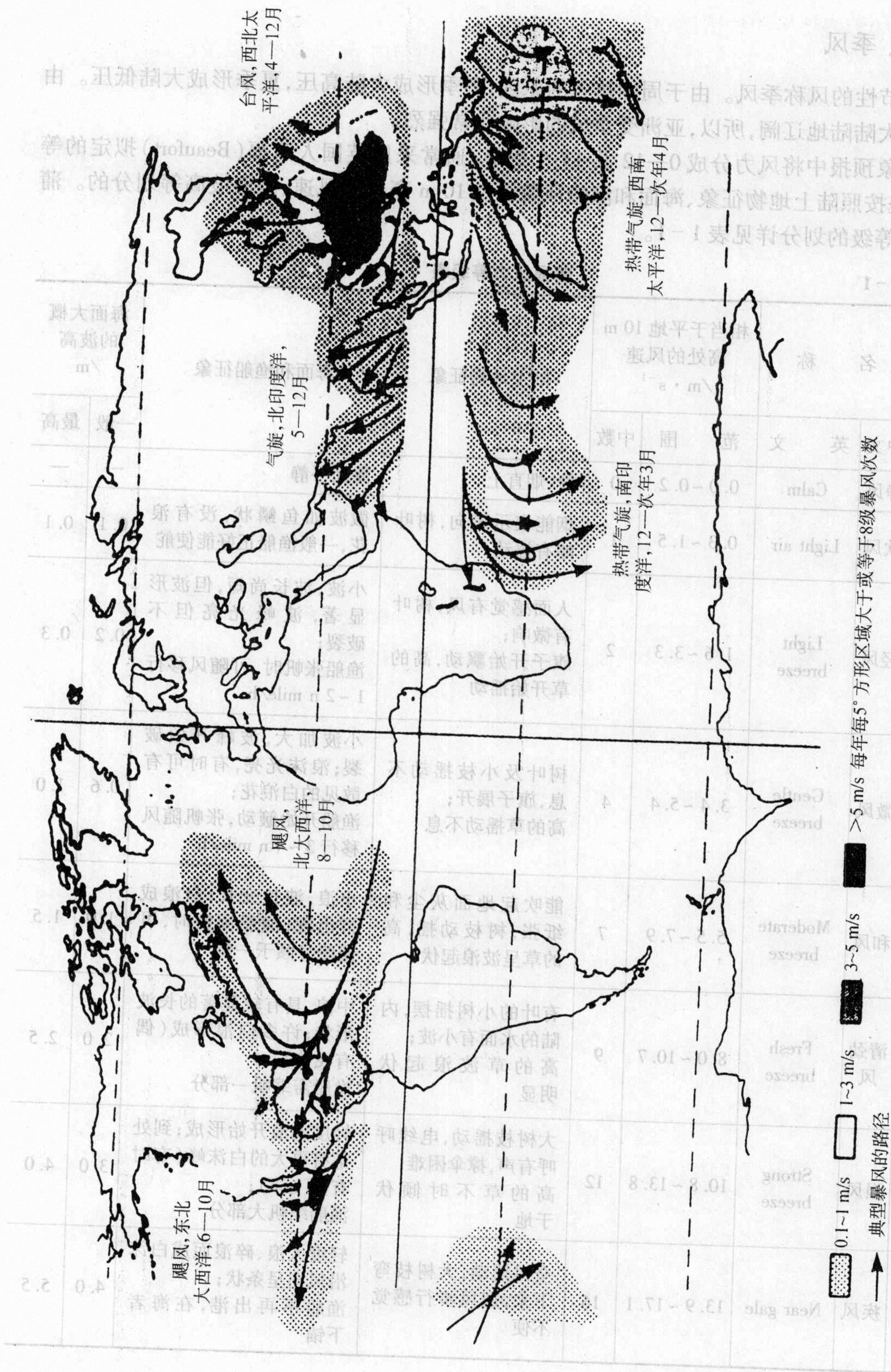


图 1-5 全世界范围内暴风路径和发生时间

三、季风

季节性的风称季风。由于周围热力的原因,冬季形成大陆高压,夏季形成大陆低压。由于亚洲大陆陆地辽阔,所以,亚洲受季风的影响非常强烈。

气象预报中将风力分成0—12共13个等级,通常采用英国人蒲福(Beaufort)拟定的等级,它是按照陆上地物征象、海面 and 渔船征象以及10 m 高处的风速、海面波高等划分的。蒲福风力等级的划分详见表1-1。

表1-1

蒲福风力等级表

风力等级	名称		相当于平地10 m 高处的风速 /m · s ⁻¹		陆上地物征象	海面 and 渔船征象	海面大概的波高 /m	
	中文	英文	范围	中数			一般	最高
0	静风	Calm	0.0 ~ 0.2	0	静、烟直上	海面平静	—	—
1	软风	Light air	0.3 ~ 1.5	1	烟能表示风向,树叶略有摇动	微波如鱼鳞状,没有浪花,一般渔船正好能使舵	0.1	0.1
2	轻风	Light breeze	1.6 ~ 3.3	2	人面感觉有风,树叶有微响; 旗子开始飘动,高的草开始摇动	小波,波长尚短,但波形显著,波峰光亮但不破裂; 渔船张帆时,可随风移行1 ~ 2 n mile/h	0.2	0.3
3	微风	Gentle breeze	3.4 ~ 5.4	4	树叶及小枝摇动不息,旗子展开; 高的草摇动不息	小波加大,波峰开始破裂;浪沫光亮,有时可有散见的白浪花; 渔船开始簸动,张帆随风移行3 ~ 4 n mile/h	0.6	1.0
4	和风	Moderate breeze	5.5 ~ 7.9	7	能吹起地面灰尘和纸张,树枝动摇,高的草呈波浪起伏	小浪,波长变长;白浪成群出现;渔船满帆时,可使船身倾于一侧	1.0	1.5
5	清劲风	Fresh breeze	8.0 ~ 10.7	9	有叶的小树摇摆,内陆的水面有小波; 高的草波浪起伏明显	中浪,具有较显著的长波形状;许多白浪形成(偶有飞沫); 渔船需缩帆一部分	2.0	2.5
6	强风	Strong breeze	10.8 ~ 13.8	12	大树枝摇动,电线呼呼有声,撑伞困难; 高的草不时倾伏于地	轻度大浪开始形成;到处都有更大的白沫峰(有时有些飞沫); 渔船缩帆大部分	3.0	4.0
7	疾风	Near gale	13.9 ~ 17.1	16	全树摇动,大树枝弯下来,迎风步行感觉不便	轻度大浪、碎浪而成白沫沿风向呈条状; 渔船不再出港,在海者下锚	4.0	5.5

(续表)

风力等级	名 称		相当于平地 10 m 高处的风速 /m · s ⁻¹		陆上地物征象	海面 and 渔船征象	海面大概的波高 /m	
	中文	英文	范 围	中数			一般	最高
8	大风	Gale	17.2 ~ 20.7	18	可折毁小树枝,人迎风前行感觉阻力甚大	有中度的大浪,波长较长,波峰边缘开始破碎成飞沫片;白沫沿风向呈明显的条带。所有近海渔船都要靠港,停留不出	5.5	7.5
9	烈风	Strong gale	20.8 ~ 24.4	23	草房遭受破坏,屋瓦被掀起,大树枝可折断	狂浪,沿风向白沫呈浓密的条带状,波峰开始翻滚,飞沫可影响能见度;机帆船航行困难	7.0	10.0
10	狂风	Storm	24.5 ~ 28.4	26	树木可被吹倒,一般建筑物遭破坏	狂涛,波峰长而翻卷;白沫成片出现,沿风向呈白色浓密条带;整个海面呈白色;海面颠簸加大有震动感,能见度受影响、机帆船航行颇危险	9.0	12.5
11	暴风	Violent storm	28.5 ~ 32.6	31	大树可被吹倒,一般建筑物遭严重破坏	异常狂涛(中、小船只可一时隐没在浪后);海面完全被沿风向吹出的白沫片所掩盖;波浪到处破成泡沫;能见度受影响,机帆船遇之极危险	11.5	16.0
12	飓风	Hurricane	> 32.6	> 33	陆上少见,其摧毁力极大	空中充满了白色的浪花和飞沫;海面完全变白,能见度严重地受到影响	14.0	—

气象预报中的风向通常用 16 个方位来表示,见图 1-6。同时,气象台站用风向仪记录的风向资料,可以按月也可以按年统计风向变化的平均值,绘制成风向玫瑰图,玫瑰图中各方位辐射线的长度表示风向的频度,即每月或每年在不同方位上记录的次数占全年总记录次数的百分比,其中出现频度最大的应是该地的主导风向。

风向玫瑰图也有按不同风速的等级来绘制的。图 1-7 是上海市闵行非台风地面风速和风向的年概率分布图(风玫瑰图),图中各方位辐射线的长度表示风速(m/s),且五个等级环线分别代表在一个方位(22.5°)内不超过该风速的风向年概率,环线从内到外的年概率分别为 1%, 0.1%, 0.01%, 0.001% 和 0.0001%。从该图看出,最常吹的风向是西北、东北和东南方向。在夏季,主要应在 SSE(东南偏南),即南偏东 22.5° 方向。

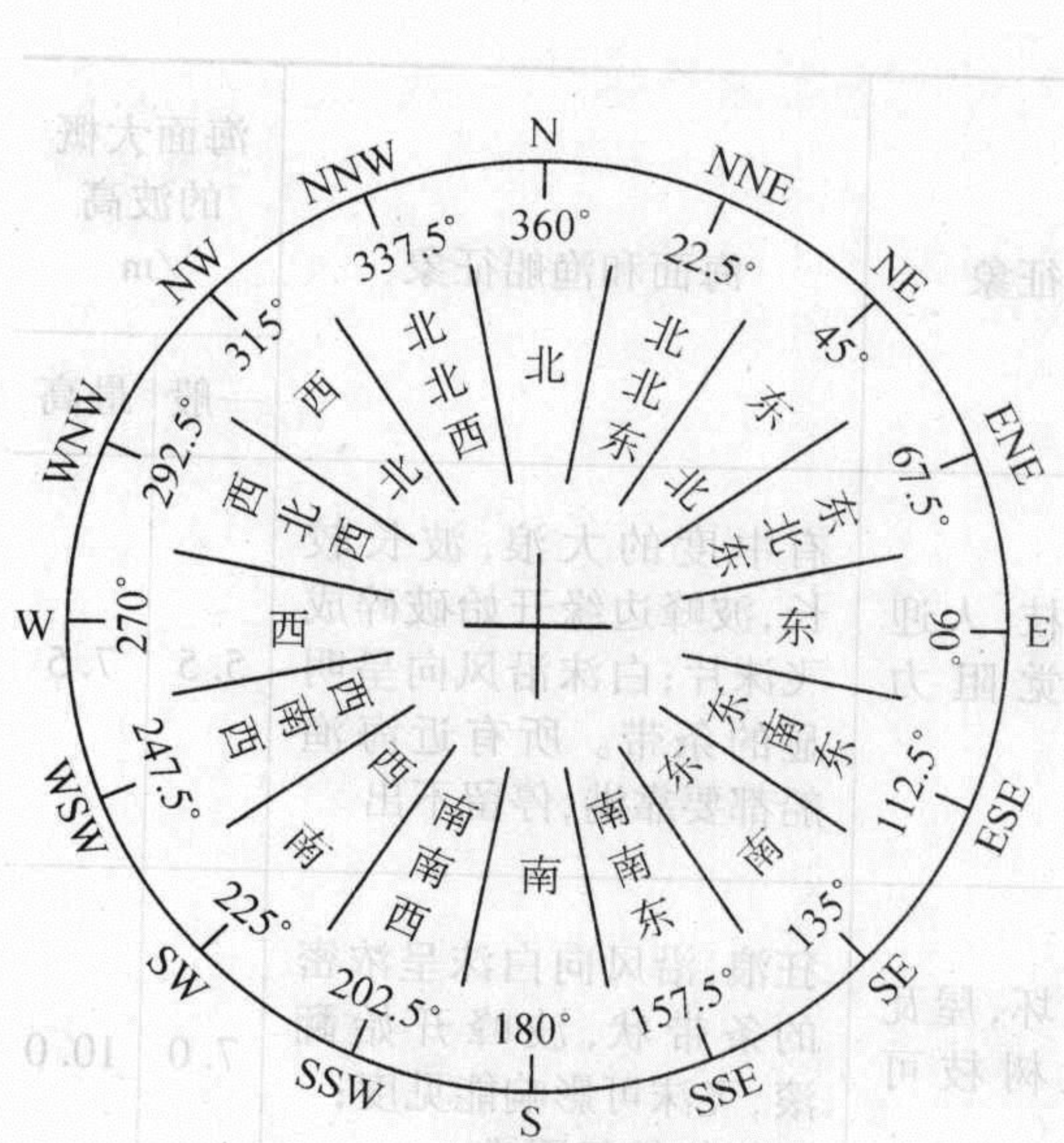


图 1-6 风向的 16 个方位

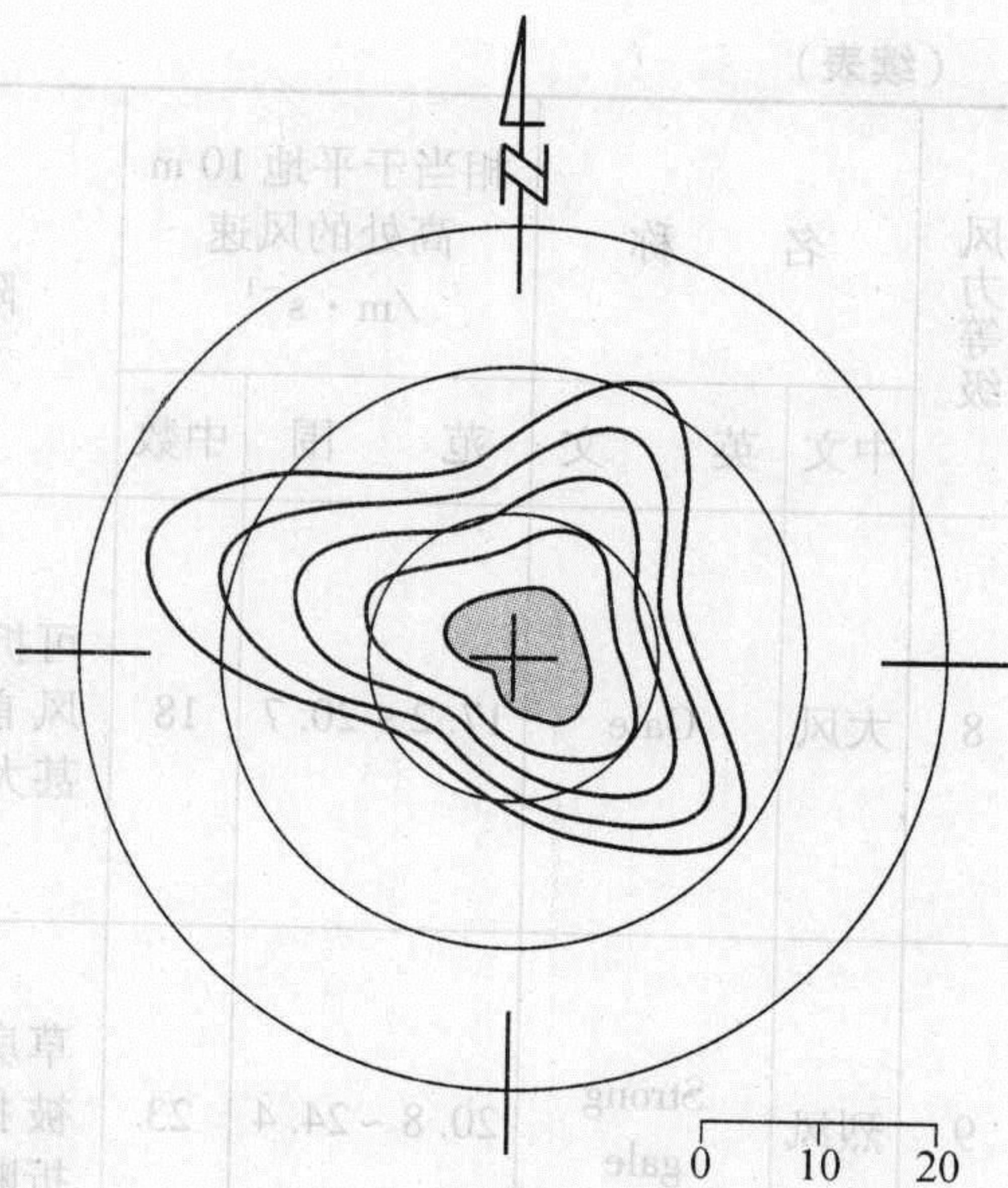


图 1-7 上海闵行非台风 10 m 高度地面风速和风向年概率分布

四、龙卷风

盛夏雷暴的日子里,有时会看到浓黑的积雨云底部伸出一个形状跟大象鼻子相似的漏斗云柱,有时挂在半空,有时还延伸到地面,一边旋转,一边快速前行,这就是龙卷风,见图 1-8。龙卷风是大范围的与空气气温有关的空气流动的自然气候现象。



图 1-8 漏斗形龙卷风

龙卷风是一种剧烈旋转的大气涡旋,其直径在 300 m 左右。它是在强雷暴雨中形成的,并以 10 ~ 30 m/s 的速度沿大约 15 km 长的路径向东北方向移动。龙卷风大多是逆时针方向

旋转的涡旋,其前进方向的右侧力最强。据估计,龙卷风的切向速度达 100 m/s 左右,也有可能还会更大。龙卷风漏斗边缘的切向风速可能是最大的,由此向漏斗中心和向漏斗外围的风速随距离的增大而减少。

龙卷风有陆龙卷和水龙卷之分,前者发生在陆地上空,后者多产生于江河海洋上空。龙卷风发生在海上,犹如“龙吸水”的现象,称为“水龙卷”;出现在陆上、卷扬尘土、卷走房屋和树木等的龙卷,称为“陆龙卷”。远远看去,它不仅很像吊在空中晃晃悠悠的一条巨蟒,而且很像一个摆动不停的大象鼻子。

龙卷风的活动区域极广,几乎遍及全球。在我国,有两个龙卷风高发区:一个在长江三角洲经苏皖至黄淮海平原,另一个在华南。每年出现在我国东部的陆龙卷约 600 余个(次),其中造成严重灾害的有 12~22 个(次)。靠近太平洋海岸的美国,也是龙卷风经常光顾的地方,因为那里靠近海岸,夏季空气湿度较大,经常变化的气候很容易使空气中的水蒸气凝结,进而形成局部的小规模的空气负压中心,导致龙卷风形成。

龙卷风形成的条件复杂多样,在气旋、静止峰、冷峰、台风等大型天气系统附近,都有可能生成。此外,大地震、大火灾也可引发龙卷风。

龙卷风伴有比台风大得多的强风,巨大的气压差及每秒数十米的上升气流,使其具有范围小、寿命短、走直线、破坏力强的特点。

龙卷风是所有风暴中最强的风,但对任何一个地方,龙卷风发生的概率却低于其他风暴,在我国,目前的一般建筑规范或标准中尚未包括抗龙卷风的设计要求。但在设计那些损坏后果特别严重的设施时,例如核电站等,则必须考虑龙卷风袭击的影响,以保证核电站等对龙卷风作用有足够的抵抗力。

龙卷风的影响可分为以下三类:

- (1) 由气压直接作用在结构上引起的风压;
- (2) 由龙卷风刮过结构物时大气压力场变化引起的压力;
- (3) 龙卷风带起的飞掷物引起的冲击力。

在大城市中心,由于形成了比四周乡村温度高的所谓“城市热岛”。有专家认为,人口聚集达 400 万人以上的大城市,其热岛效应对龙卷风的活动将产生影响,可降低龙卷风的强度。

1.2 结构风灾

国内外统计资料表明,在所有自然灾害中,风灾造成的损失为各种灾害之首。例如 1999 年,全球发生严重自然灾害共造成 800 亿美元的经济损失。其中,在被保险的损失中,飓风造成的损失占 70%^[3]。下面主要涉及与结构损坏有关的风灾事例,以进一步引起对结构抗风灾的防御和结构抗风设计的重视。

一、台风灾害

1. 9417 号台风对浙江温州市的影响^[4]

1994 年 8 月 21 日晚 10 时 30 分,9417 号台风在浙江省温州市的永强和瑞安梅头镇之间