

大气涡旋动力学

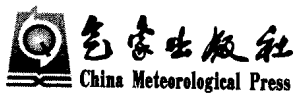
刘式达 刘式适 著



气象出版社
China Meteorological Press

大气涡旋动力学

刘式达 刘式适 著



内容简介

大气中有很多涡旋(气旋、反气旋、副热带高压、切断低压、龙卷风、台风等),它们都和天气息息相关。本书力图从这些涡旋速度场的奇点(即涡旋中无风点)的性质来定性判断这些涡旋的二维、三维结构。书中并不是去解大气运动方程组,而是从力的平衡的角度,求出这些涡旋的速度表达式,利用微分方程定性理论来分析这些涡旋的奇点性质。由此在应用方面,能利用气象上常用的控制参数(水平辐合辐散、涡旋强度等)来判断大气涡旋的结构,从几何和拓扑上将涡旋加以分类。本书在学术上是将涡旋的物理机理和奇点(无风点)的性质相结合。

书中研究结果表明,利用可测的水平辐合、辐散、涡度等物理量,能了解天气分析中的涡旋的三维整体结构及其性质,可对天气预报提供足够的信息和科学依据,有利于提高对大气涡旋在天气预报中的作用及形成机理的认识。

本书是国内第一本论述大气涡旋的专著,也是第一本用定性分析的方法论述大气涡旋的著作,可供从事大气、海洋、天气预报的科技工作者和有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气涡旋动力学/刘式达,刘式适著. —北京:气象出版社,2011.3

ISBN 978-7-5029-5178-8

I. ①大… II. ①刘… ②刘… III. ①涡旋(气象)-大气动力学-研究 IV. ①P424.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 030756 号

Daqi Woxuan Donglixue

大气涡旋动力学

刘式达 刘式适 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:隋珂珂 李太宇

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:460 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版

印 数:1~3000 册

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:18

印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

专家评说《大气涡旋动力学》

——代序

刘式达教授、刘式适教授的专著《大气涡旋动力学》的特色是将微分方程定性理论和大气涡旋相结合，国内外还没有这样的“结合”。这是一个创新的尝试。两位教授的学术水平高，数理基础好。他们出版了多部有影响的专著。该书是一本气象界不可多得的教科书和参考书。

中国科学院院士 穆 穆
2010年3月8日

在旋转地球上的大气涡旋丰富多彩，有气旋、反气旋、阻塞高压、切断低压以及台风、龙卷风等。从动力学角度论述这些涡旋，在气象界尚不多。刘式达、刘式适教授的著作《大气涡旋动力学》，对大气中的各种涡旋结构进行了系统介绍和论述，并以几何图像定性地刻画了大气涡旋的结构，是气象学中的一本好的专著，值得学术界参考。两位教授对大气涡旋的结构发表了多篇学术论文，有较高的学术水平，因此，我推荐《大气涡旋动力学》一书尽早出版。

中国科学院大气物理研究所研究员 李建平
2010年3月8日

刘式达、刘式适教授合著的《大气涡旋动力学》是大气科学领域中系统论述大气涡旋动力学的国内第一部专著。该书的特点不是去求解大气动力学方程组，而是从力的平衡角度定性分析涡旋中无风点的特征，强调大气涡旋的结构和涡旋中心的无风点的性质有关，这是一个创新。

天气预报中时常要和大气涡旋打交道。根据预报工作的需要，该书对大气涡

旋的水平辐合辐散、涡旋强度这些参数如何和大气涡旋的结构相联系，进行了详细的介绍。这些内容为天气预报提供了足够的信息和科学依据，对研究大气涡旋和天气预报有重要的参考价值。

两位作者已出版了《大气动力学》、《大气湍流》、《物理学中的非线性方程》等专著，受到各界好评。该书是作者多年来在大气涡旋动力学领域中的研究成果，学术上达到了国内大气科学的先进水平。书中文字通畅，图文并茂，可读性强，特推荐出版。

中国气象局培训中心教授 郑祖光

2010年3月5日

前言

自从有了地面天气图以来，人们逐渐发现天气图中气旋、反气旋的涡旋，并且用等压线绘出它们的闭合涡旋型式。有了高空天气图之后，还了解到气旋、反气旋的垂直结构，地面辐合的气旋，到高空则是槽前的辐散，地面辐散的反气旋，到高空则是槽后辐合。副热带高压和台风显示出三维柱状结构，龙卷风涡旋常显示出上层口大，下层口小的漏斗状结构。这些涡旋结构从物理上如何解释呢？大气涡旋应该遵循黏性流体的纳维—斯托克斯方程（Navier-Stokes，简称 N-S 方程），可是它是一个非线性的偏微分方程组，能求出其解析解是非常困难的。但是 N-S 方程中所受的力是可以分析的。气压梯度力就控制着涡旋的三维压力分布，科里奥利力（Coriolis）和曲率项力能改变速度方向，使其弯曲成涡旋，大气温度的纬度分布以及垂直方向的温度分层所产生的浮力正是涡旋产生的驱动力。人们常常忽略 N-S 方程中的黏性力，实际上它使涡旋成为螺旋形式是不可缺少的。由于分析了受力，因而它是属于大气涡旋动力学的范畴。

本书的特色是采取动力系统定性分析的方法来分析大气涡旋。无论是二维涡旋还是三维涡旋，它们中间总有一些没有风的点，这些无风的点常称为平衡态。风速为零的点数学上称为奇点，该点速度场 $\mathbf{v}\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}\right)$ 为零，也就是速度场的分量 $\frac{dx}{dt}=0, \frac{dy}{dt}=0, \frac{dz}{dt}=0$ ，所以也称为位置随时间不变化的点，或位置的定常解。那么，我们只要知道这些无风点的性质，就可以判断涡旋的形态。这种定性分析方法，很多物理学家、气象学家并不熟悉，但是由于它并未求解微分方程，因而是比较简单的。“定性”两个字表面上没有“定量”重要，实质上它使你掌握这些平衡态的“性质”，这当然是最根本的。“定性”方法主要以几何拓扑的图像来分析，因而对涡旋来说更直观。在计算机广泛使用的今天，在上计算机之前掌握一些定性分析的方法对青年学生就更为重要了。据我们所知，目前国内外还没有一本以定性理论去论述涡旋动力学的教材。

本书的另一个特点是将波和涡、混沌和涡旋联系起来。波和涡在高空大气中是常见的现象，混沌或湍流场有大大小小的涡旋这也是共识，所以本书将介绍波、孤立波、混沌等现象是如何和涡旋相联系的，仍然采取“定性”分析的方法。

本书共分 12 章，第 1 章介绍大气中常见的涡旋现象以及相关的旋度、散度、环流等概念。第 2 章介绍大气涡旋所满足的动力学方程组，着重分析各种力对形成涡旋的作用，特别介绍与“定性”分析相关的速度场的分解。第 3 章介绍动力系统中常用的概念，第 4 章用多种实例说明如何定性分析涡旋等平衡态。第 5 章、第 6 章介绍孤立波、混沌是如何和涡旋相联系的。第 7 章介绍涡旋曲率以及如何用曲率来描述涡旋。第 8 章到第 12 章介绍大气涡旋的种种模型，包含曲面上的涡旋，流体力学中的涡旋、大气气旋、反气旋、阻塞高压等二维涡旋以及台风，龙卷风，副热带高压等三维涡旋以及球面上的波和涡旋。

本书是作者多年来在北京大学讲授《非线性动力学》、《大气动力学》、《大气湍流》等课程以及科学研究的结晶。本书着重物理概念，图文并茂，通俗直观，对研究大气涡旋和天气预报的工作者是一本必备的参考书，可供大气科学学科的本科生、研究生参考，也可供流体力学学科，物理学科的大学生、研究生作为参考书。

著 者

2011 年 2 月于北京大学物理学院

目 录

专家评说《大气涡旋动力学》——代序

前 言

第 1 章 大气流体涡旋斑图	(1)
1.1 什么是涡旋?	(1)
1.2 气旋、反气旋的二维(2D)流场	(2)
1.3 龙卷风、台风的三维(3D)流场	(5)
1.4 多种螺旋涡旋的流场	(6)
1.5 散度、旋度和环流	(10)
1.6 无旋场、有势场、无散场	(14)
1.7 速度场的坐标变换	(17)
本章小结	(18)
思考题	(18)
第 2 章 大气动力—热力学方程组	(19)
2.1 流体力学的 N-S 方程	(19)
2.2 大气运动方程组	(20)
2.3 大气分层的显示	(21)
2.4 大气动力—热力学方程组的无因次形式	(24)
2.5 柱坐标、球坐标系的 N-S 方程	(26)
2.6 科里奥利力、浮力、曲率项力、黏性力对形成涡旋的作用	(28)
2.7 大气中无风的点及速度场的分解	(33)
2.8 涡度方程和位涡方程	(39)
本章小结	(43)
思考题	(44)
第 3 章 动力系统	(45)
3.1 什么是动力系统	(45)
3.2 非线性动力系统	(46)
3.3 动力系统的平衡态	(47)
3.4 极限环	(49)
3.5 保守系统和耗散系统	(52)
3.6 耗散系统的吸引子	(54)
3.7 同异宿轨道	(58)
3.8 分岔和突变	(60)
本章小结	(63)

思考题	(63)
第 4 章 平衡态和极限环的定性分析	(64)
4.1 相平面、相空间及相轨迹	(64)
4.2 平衡态(奇点)	(65)
4.3 二维系统的定性分析	(67)
4.4 三维流场的拓扑结构	(75)
4.5 同(异)宿轨道的定性分析	(81)
4.6 同(异)宿轨道所代表的涡旋	(86)
4.7 分岔的定性分析	(89)
4.8 奇点指标	(94)
4.9 地球大气球面上的所有奇点指标之和为 2	(99)
本章小结	(100)
思考题	(100)
第 5 章 孤立波和涡旋	(101)
5.1 波和涡旋	(101)
5.2 正(余)弦波、椭圆余弦波和孤立波	(102)
5.3 孤立波和同宿轨道	(106)
5.4 波前和异宿轨道	(109)
5.5 多个峰和多个槽的孤立波	(111)
5.6 子波是孤立波	(113)
5.7 Silnikov 同宿轨道	(116)
5.8 蓝色天空突变	(118)
5.9 二维和三维同(异)宿环	(121)
本章小结	(122)
思考题	(122)
第 6 章 混沌和涡旋	(123)
6.1 伸长、折叠和扭转	(123)
6.2 从上升运动到对流再到湍流	(124)
6.3 Lorenz 方程的定性分析	(126)
6.4 3D 混沌动力系统分析	(128)
6.5 Jerk 系统	(133)
6.6 三维对流速度势	(136)
6.7 贝尔特拉米(Beltrami)流	(139)
本章小结	(143)
思考题	(143)
第 7 章 空间涡旋的曲率	(144)
7.1 涡旋是空间曲线和曲面	(144)
7.2 什么是曲率和挠度	(144)
7.3 高斯曲率	(149)

7.4	多种涡旋螺旋曲线曲率	(151)
7.5	卡门涡旋等复杂涡旋	(155)
7.6	从曲率的观点看孤立波	(158)
7.7	Gauss-Bonnet(高斯—邦尼特)定理	(161)
	本章小结	(162)
	思考题	(162)
第8章	空间曲面上的涡旋运动	(163)
8.1	涡丝(Vortex filament)和柱螺旋	(163)
8.2	锥(conic)螺旋	(164)
8.3	圆锥面(circular conic)上的螺旋	(165)
8.4	回转抛物面(paraboloid of revolution)上的螺旋	(167)
8.5	回转双曲面(hyperboloid of revolution)上的螺旋	(167)
8.6	二维环面上的螺旋	(168)
8.7	三叶纽结上的螺旋	(170)
8.8	球面上的螺旋	(171)
8.9	螺旋面上的螺旋	(172)
8.10	悬链面(catenoid)上的螺旋	(173)
	本章小结	(175)
	思考题	(175)
第9章	流体力学中的涡旋模型	(176)
9.1	点涡、复位势和复速度	(176)
9.2	离心力和黏性力相平衡的涡旋	(182)
9.3	惯性力和黏性力相平衡的涡旋	(183)
9.4	轴对称的伯格—罗特(Burgers-Rott)涡旋	(184)
9.5	沙利文(Sullivan)涡旋	(188)
9.6	仅有径向速度的涡旋	(193)
9.7	螺旋度和缠绕数	(196)
	本章小结	(200)
	思考题	(200)
第10章	气旋、反气旋的二维涡旋动力学	(201)
10.1	闭合气旋和反气旋涡旋	(201)
10.2	副热带高压椭圆涡旋	(204)
10.3	气旋、反气旋螺旋斑图	(205)
10.4	阻塞高压和切断低压	(208)
10.5	正压准地转方程中的涡旋	(210)
10.6	偶极子解	(214)
10.7	洛伦兹(Lorenz)方程所表现的水平涡旋	(216)
	本章小结	(218)
	思考题	(218)

第 11 章 台风、龙卷风的三维涡旋	(219)
11.1 大气三维运动结构的定性分析	(219)
11.2 气旋、反气旋的三维螺旋结构	(221)
11.3 台风、副热带高压的三维结构	(226)
11.4 大气三维轴对称涡旋的精确解	(229)
11.5 龙卷风的三维螺旋结构	(233)
11.6 洛伦兹方程中的三维涡旋	(236)
11.7 平均流场和湍流的相互作用模型	(238)
11.8 三维不可压缩散度方程和涡旋	(241)
本章小结	(243)
思考题	(243)
第 12 章 全球球面上的大气涡旋	(244)
12.1 全球风场的典型型式	(244)
12.2 向量场的分区	(246)
12.3 全球流场的初步分析	(247)
12.4 全球流场的拓扑结构	(251)
12.5 椭圆函数和球面上的基本涡旋形式	(253)
12.6 球面上的涡旋理论	(255)
12.7 球面上的波和涡	(260)
12.8 大气环流基本流场的描述	(263)
本章小结	(269)
思考题	(269)
参考文献	(270)
索引	(274)

第 1 章 大气流体涡旋斑图

大气和其他流体中普遍存在着涡旋。如大气中气旋、反气旋、台风、龙卷风等，流体中的卡门(Karman)涡旋、贝纳(Benard)对流等。木星上的“大红斑”也是一种旋涡状的气体云。由于流体经不起搓，一搓就搓出了涡，所以著名流体力学家柯西曼(D Kuchemann)说过，“涡旋是流体运动的肌腱”，湍流也是由大大小小不同尺度的涡旋所组成的。

1.1 什么是涡旋？

在流体力学中，通常将闭合形式或螺旋形式的流线斑图称为涡旋或螺旋。但是更广义地讲，螺旋不仅限于流线，它在自然界中普遍存在，如海螺壳、向日葵的排列等都可以称为螺旋涡旋，这些涡旋是三维状态空间中的形态。图 1.1 是木星大红斑的图像，图 1.2 是鹦鹉螺的图像，图 1.3 是漏斗型楼梯，图 1.4 是向日葵图像，图 1.5 是等角航线管，图 1.6 是圆锥环状螺旋。这六张图虽然不是大气或流体中的螺旋，却是自然界的常见的螺旋形式。

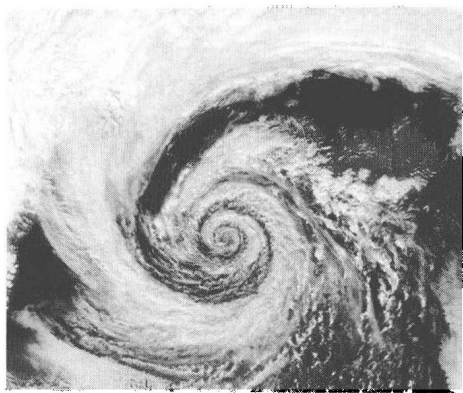


图 1.1 木星大红斑

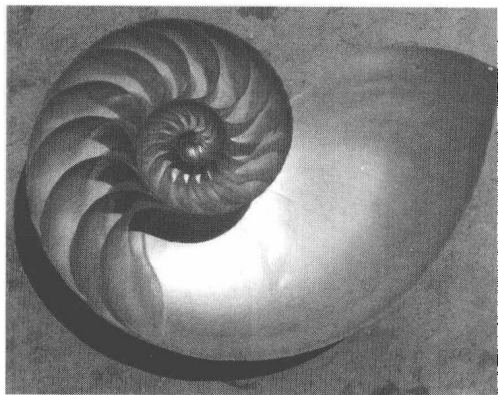


图 1.2 鹦鹉螺

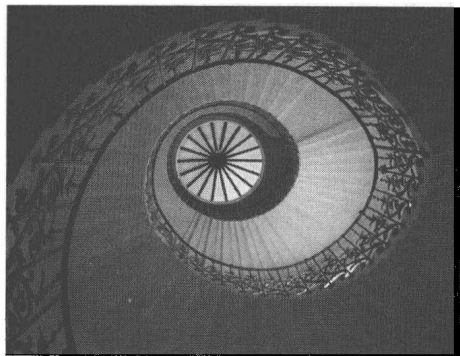


图 1.3 漏斗楼梯

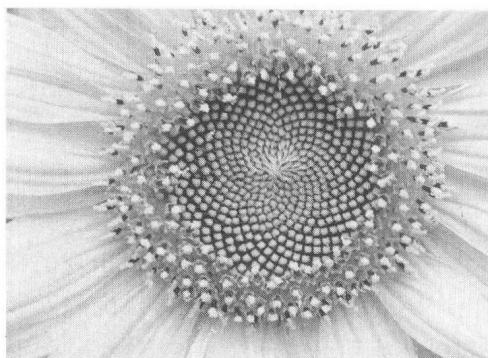


图 1.4 向日葵



图 1.5 等角航线管

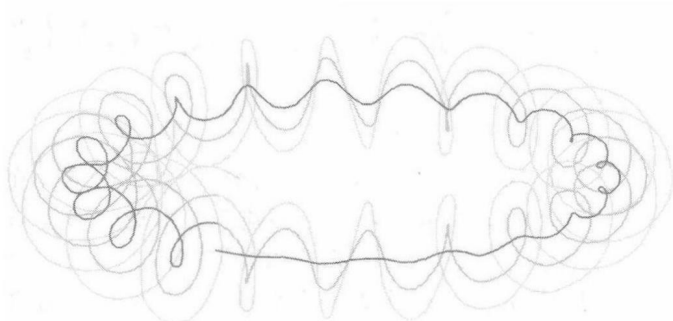


图 1.6 圆锥状环状螺旋

涡旋、涡度或旋度(vorticity)是紧密相联的,但是认为涡旋一定有旋度是不正确的,涡度是一个流体微团的局部旋转概念,但下面我们将看到有的涡旋却是无旋度的。

1.2 气旋、反气旋的二维(2D)流场

在地面天气图上绘制等压线图时就发现有气旋式的低压流场和反气旋式的高压流场。一般气旋反气旋的中心是无风的,它们称为中心点。

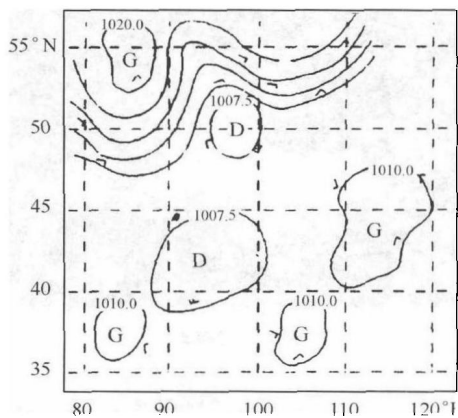


图 1.7 地面天气图上的气旋(D)和反气旋(G)

应该指出,由于地面等压线图的绘制常常把气旋反气旋的等压线绘成闭合涡旋,但是它们并不是按风向的切线方向来绘制流线的,由于摩擦力,一般地面图上气旋式流场的风向是穿过等压线而向内吹的,反气旋式流场的风向是穿过等压线而向外吹的。所以它们实际上的流线应该是向内的螺旋涡旋(气旋)或向外的螺旋涡旋(反气旋)。见图 1.7。

由于空气的连续性,向内吹的空气就要产生上升运动,从而到高空空气就要向外辐散出去,高空流线表现为由窄变宽,而地面向外吹的空气,必须有高空空气向下来补充,所以高压上空一定是辐合气流,表现为上空流线由宽变窄。图 1.8 显

示的是气旋反气旋的三维结构。

在天气图上不仅仅只有气旋、反气旋涡旋流场。而且还有其他形式的流场。

图 1.9 是气旋、反气旋之间常出现的鞍形流场。

由于主要关心气旋、反气旋涡旋的天气,所以绘图员常常并不注意这种鞍形场。向内流动流线和向外流动流线的交点称为鞍点(图中黑点)。应该指出,地面天气图上的等压线是三维压力场在等高度(地面 1000 hPa)面上的等值线。

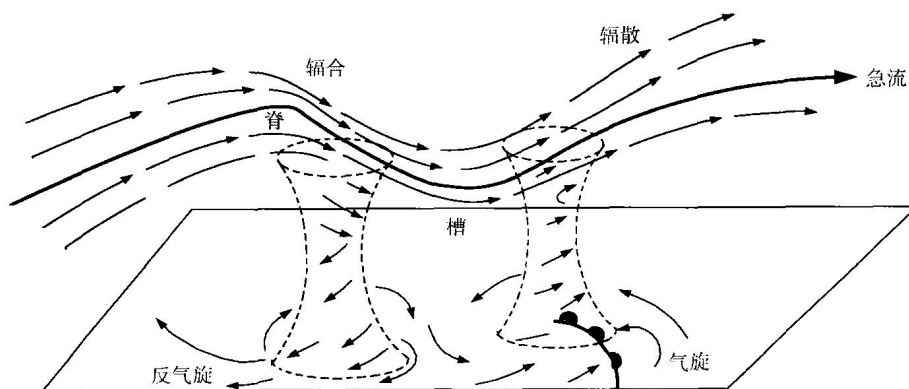


图 1.8 气旋、反气旋的三维结构

图 1.10(a)是实际的三维压力场曲面。明显看出有峰(高压)和谷(低压)以及高低压之间的鞍点。图 1.10 (b)图则是地面图上等压线,即右图取高度为常数的廓线。

图 1.11(a)和 (b)是常见的地面辐合流场和辐散流场。向内辐合的点称为稳定结点,向外辐散的称为不稳定的结点。

前面我们已经说明,地面天气图严格地讲等压线并非流线,由于风场是要穿过等压线的,所以实际上气旋和反气旋涡旋的流场是一种螺旋流场,见图 1.12(a)和(b)。

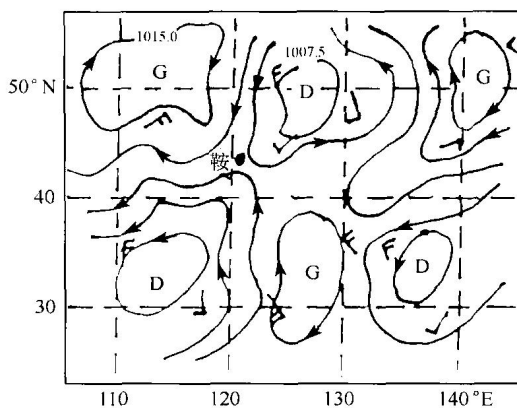


图 1.9 鞍形流场

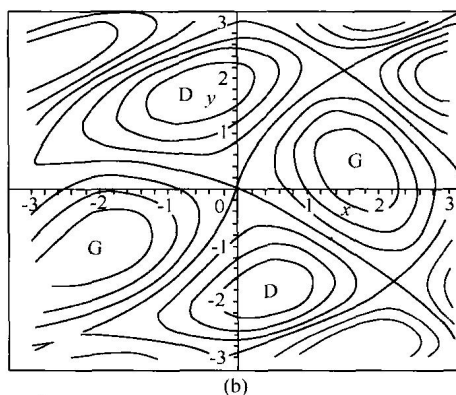
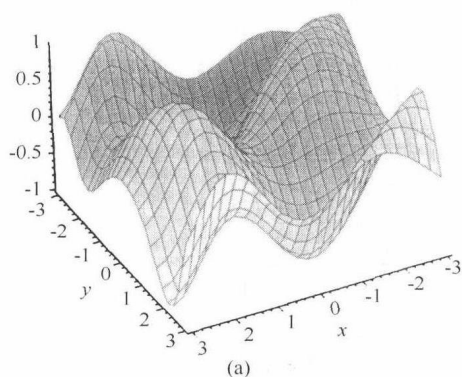


图 1.10 三维压力场曲面(a)和其高度为常数的等值压力线廓线(b)

图 1.12 气旋(a)和反气旋(b)的螺旋流场螺旋向内~~的~~点称为稳定焦点,从一点螺旋向外,则该点称为不稳定焦点。

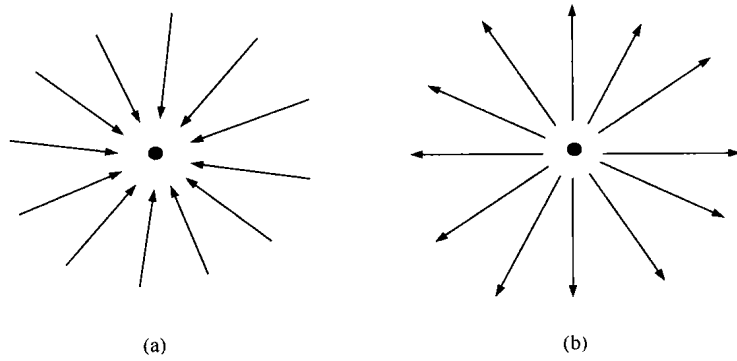


图 1.11 辐合(a)和辐散流场(b)

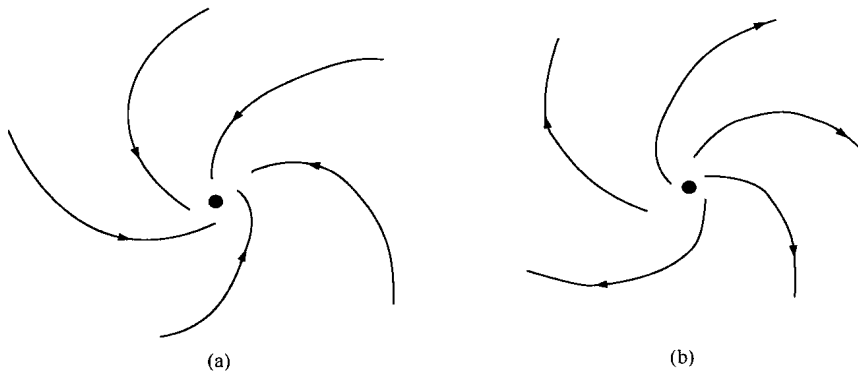


图 1.12 气旋(a)和反气旋(b)的螺旋流场

在高空天气图上还会出现阻塞高压和切断低压流场形式,见图 1.13。

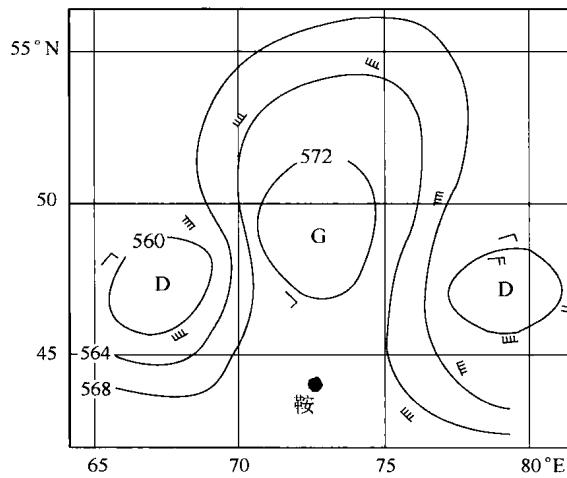


图 1.13 阻塞高压和切断低压

该流场中除了有高低压的中心之外,还有一个用来切断或阻塞的鞍形场(图中黑点称为鞍点)。

1.3 龙卷风、台风等三维(3D)流场

龙卷风、台风等流场由于其风暴强烈,常常只观测到它的外形图像。图 1.14 是台风的图像。

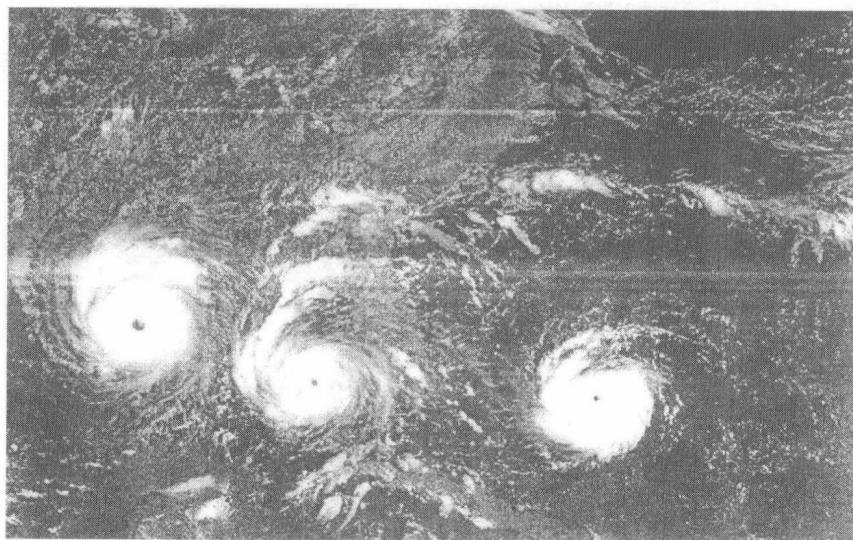


图 1.14 台风图像照片

从图上看,台风是一种螺旋结构,由于台风是一个三维结构,它的三维流场示意图见图 1.15。

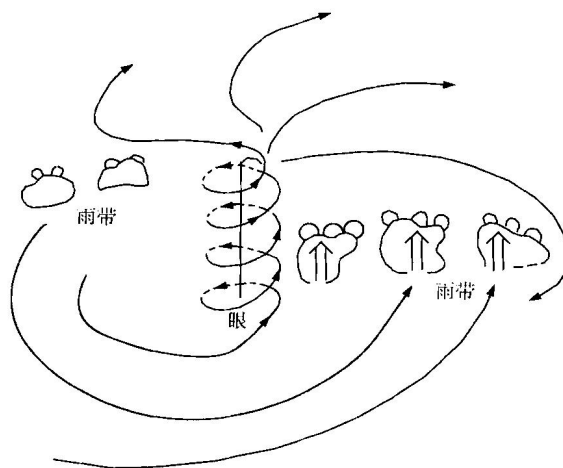


图 1.15 台风的三维结构

从图 1.15 看出,台风更像一个 3D 螺旋柱状结构,图 1.16 是龙卷风的常见图像。



图 1.16 龙卷风图像

图 1.17 是龙卷风的三维结构示意图。

从图上看,龙卷风 3D 结构是一种漏斗状结构,漏斗的大口在上,小口在下。

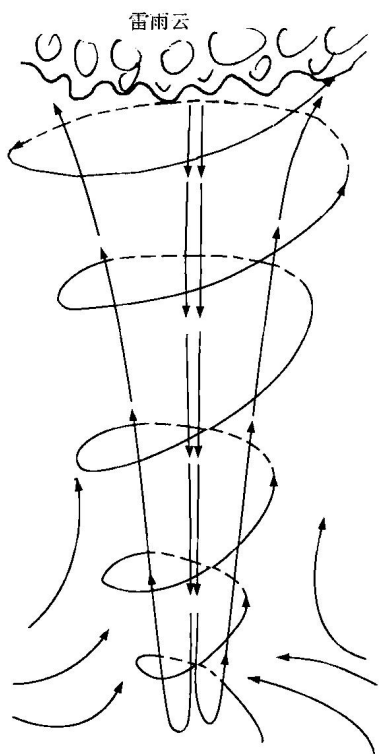


图 1.17 龙卷风示意图

1.4 多种螺旋涡旋流场

大家知道,半径为 R 的圆的轨道在平面 (x, y) 上可以表示为

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (1.1)$$

也可以写成参数形式

$$x = R \cos t, \quad y = R \sin t \quad (1.2)$$

其中 t 是参数,几何上表示旋转的角度,见图 1.18。

若写成极坐标形式,则是

$$r = R \quad (1.3)$$

若将参数 t 看成是时间,那么将(1.3)式对时间 t 微商一次得到

$$\dot{r} = \frac{dr}{dt} = 0 \quad (1.4)$$

(1.4)式表示向径 r 不随时间变化,那么它当然表示轨道是一个圆涡旋,将(1.2)式分别对时间微商得到