



2009年度普通高等教育精品教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号2013-1-068)

第

2

版

天气学

寿绍文◎编著

SYNOPTIC
METEOROLOGY

 气象出版社
China Meteorological Press

2009年度国家级精品教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号 2013-1-068)

Synoptic Meteorology

天 气 学

(第二版)

寿绍文 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

本书概要介绍了天气学的基本原理和方法,共分九章。其内容依次为气象变量场及其运动学、制约大气运动的基本定律、风场和温压场的关系、气团与锋、温带气旋和反气旋、大气环流概观、天气形势和天气预测、重要天气过程以及天气诊断分析。

本书注重基本概念、基本理论、基础知识的介绍,每章的后面都有小结,归纳、整理了本章的主要概念和知识点,并有适量的复习思考题,以帮助读者掌握基本内容。在编排上,本书采用新的编写体系,开篇就介绍气象场的概念及运动学方法,进而深入至动力学分析,理论紧密联系实际;书中大量引用了天气学的新理论、新成果,以更好地适应实际科研和业务的需要。本书可以作为气象专业或相关专业课程的基本教材,也可以作为科研及业务工作的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天气学/寿绍文编著. —2版. —北京:气象出版社,
2014.12

ISBN 978-7-5029-5811-4

I. ①天… II. ①寿… III. ①天气学 IV. ①P44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 296671 号

Tianqixue

天气学(第二版)

寿绍文 编著

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.qxcbs.com>

责任编辑:蔺学东 李太宇 王萃萃

封面设计:八 度

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:610 千字

版 次:2015 年 5 月第 2 版

定 价:60.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:邵俊年

责任技编:吴庭芳

印 张:31

印 次:2015 年 5 月第 1 次印刷

第二版前言

天气学是研究天气变化规律以及天气分析和预报原理及方法的学科,它具有很强的理论性和实践性。天气学理论与实践是一个内容极为丰富的巨大的知识和技能体系,因此只有建立成套教材才能有效地适应其教学任务的需要。多年来,我们通过不断地教学实践,已经逐步形成了天气学的成套教材,本书即为其中的一种。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,自第一版出版以来,受到广大读者的厚爱,并且还很荣幸地获评为教育部 2009 年度国家级精品教材。最近,本书又荣幸地获评为江苏省高等学校重点教材项目,因而得到了一次宝贵的修订机会。值此机会,我们对本书的部分内容和章节结构做了必要的修正和调整。

修订后,全书共九章,内容依次为气象变量场特征及其运动学、制约大气运动的基本定律、风场和温压场的关系、气团与锋、温带气旋和反气旋、大气环流概观、天气形势和天气预报、重要天气过程以及天气诊断分析。

本书修订过程中得到很多专家以及学校领导、同事和气象出版社的领导及编辑的热情支持与帮助。此外,修订稿还得到李泽椿院士、丁一汇院士、陆汉城教授、姚秀萍教授和王咏青教授等专家的评阅和教正。在此谨向他们一并表示最深切的谢意。同时也殷切期望继续得到广大读者的批评指正。

编著者

2014 年 12 月于南京

第一版前言

天气学是研究天气变化规律和天气分析与预报方法的科学,是气象学的重要分支。天气与人类生活和国计民生息息相关,天气变化规律复杂多样,因此,天气学研究具有极为重要的应用价值和科学意义。

天气学课程是气象和其他相关专业学生最重要的基础和专业课程之一。最近几十年来国内外涌现了不少优秀的天气学教材和大量科研成果。在编写本书时我们尽可能地博采众长,广泛吸收前人的天气学研究和教学成果。本书是对天气学基本原理和方法的概要介绍。全书共九章,内容依次为气象变量场及其运动学、制约气象场变量变化的基本定律、风场和温压场的关系、气团与锋、温带气旋和反气旋、大气环流概观、天气形势的预报、天气分析和预报、天气诊断分析。本书可以作为气象专业或相关专业本科课程的基本教材,也可以作为科研及业务工作的参考书。

本书很荣幸地被立项为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。为了不辱使命,我们试图在以下方面作出努力使本书具有新的特色:(1)加强基本概念、基本理论、基础知识的介绍;(2)尝试新的编写体系,以介绍气象场的概念及其运动学开篇,进而深入至动力学分析,并以变量场分析、诊断和预报的理论及应用贯穿通篇;(3)大量引用新理论、新成果,以更好地适应实际科研和业务的需要。

本书编写过程中得到陶诗言院士等著名专家的热情鼓励,以及学校领导、同事、同学和气象出版社的领导及编辑的大力支持与帮助。在此谨向他们表示最深切的谢意。同时也殷切期望得到广大读者的批评指正。

编著者

2008年11月于南京

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 气象变量场特征及其运动学	(1)
1.1 天气图	(1)
1.2 气象标量场的表征	(3)
1.3 气象矢量场的表征	(7)
1.4 气象场变量的时间变率	(14)
1.5 气压系统的运动学	(14)
1.6 本章小结	(21)
第 2 章 制约大气运动的基本定律	(24)
2.1 大气运动方程	(24)
2.2 大气连续方程	(37)
2.3 大气热力学能量方程	(40)
2.4 大尺度大气运动方程组	(44)
2.5 p 坐标系中的基本方程组	(49)
2.6 本章小结	(58)
第 3 章 风场和温压场的关系	(62)
3.1 地转风	(62)
3.2 梯度风	(65)
3.3 惯性流和旋衡风	(75)
3.4 地转偏差	(77)
3.5 热成风	(88)
3.6 本章小结	(96)
第 4 章 气团与锋	(98)
4.1 气团	(98)
4.2 锋的概念与锋的类别	(100)
4.3 锋面附近气象要素场的特征	(108)

4.4	锋面分析	(120)
4.5	锋生与锋消	(130)
4.6	本章小结	(142)
第5章	温带气旋和反气旋	(147)
5.1	气旋和反气旋的一般特征	(147)
5.2	温带气旋与反气旋	(149)
5.3	东亚气旋与反气旋	(161)
5.4	气压倾向方程	(165)
5.5	涡度与涡度方程	(166)
5.6	位势倾向方程	(177)
5.7	准地转 ω 方程	(181)
5.8	温带气旋与反气旋的发生发展	(184)
5.9	东亚气旋的发生发展	(190)
5.10	应用位涡思想解释地面气旋的发展	(195)
5.11	本章小结	(202)
第6章	大气环流概观	(207)
6.1	大气环流的模型及控制因子	(207)
6.2	大气平均水平环流流场的特征	(222)
6.3	极地和热带环流概况	(226)
6.4	西风带大型扰动	(233)
6.5	副热带高压	(254)
6.6	急流	(261)
6.7	中小尺度环流系统	(265)
6.8	本章小结	(268)
第7章	天气形势和天气预报	(273)
7.1	天气系统的外推和运动学预报法	(273)
7.2	高空天气形势的预报	(277)
7.3	地面天气形势的预报	(285)
7.4	地形和摩擦对天气系统的影响	(290)
7.5	锋的移动预报	(299)
7.6	经验预报法	(305)
7.7	卫星云图在天气形势预报中的应用	(310)
7.8	用天气学方法做形势预报的一般程序	(313)
7.9	天气预报的基本方法	(314)
7.10	本章小结	(320)

第 8 章 重要天气过程	(325)
8.1 大风天气过程	(325)
8.2 寒潮天气过程	(329)
8.3 降水天气过程	(338)
8.4 对流天气过程	(356)
8.5 台风天气过程	(382)
8.6 高影响天气过程	(400)
8.7 环境气象问题	(418)
8.8 本章小结	(420)
第 9 章 天气诊断分析	(425)
9.1 气象场的客观分析	(425)
9.2 水平流场分析	(433)
9.3 垂直运动的诊断	(443)
9.4 水汽通量、水汽通量散度及降水量的计算.....	(463)
9.5 本章小结	(471)
附表 I 常用数据	(473)
附表 II 西北太平洋和南海热带气旋命名表	(475)
参考文献	(476)

第1章 气象变量场特征及其运动学

“天气”是由各种气象要素综合表现的大气状态，每种气象要素都是随时间和地区变化的场变量，所以“天气”也是随时随地变化的。一般应用天气图来表现各种场变量的时空分布和演变，因此天气图是天气分析和预报的一种基本工具。本章将从简介天气图入手，引入气象变量场(包括标量场、矢量场)、梯度、拉普拉斯算子、散度、涡度、形变度以及天气系统和场变量的时间变率等重要概念，并在此基础上讨论天气系统的运动学，从而为天气分析和预报奠定理论基础。

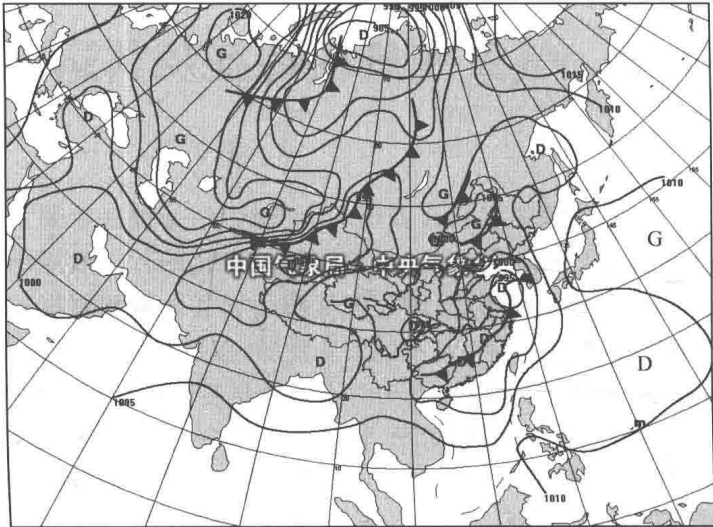
1.1 天气图

气压、气温、湿度、风、云、能见度和天气现象等用以定量或定性地表征某种大气状态(如质量大小、暖湿程度、运动状况和天空状况等)的物理量称为“气象要素”。由各种气象要素所共同表现的综合的大气状态就是一般所说的“天气”。每种气象要素都是随时间、随地区而变化的，所以天气也是随时、随地变化的。

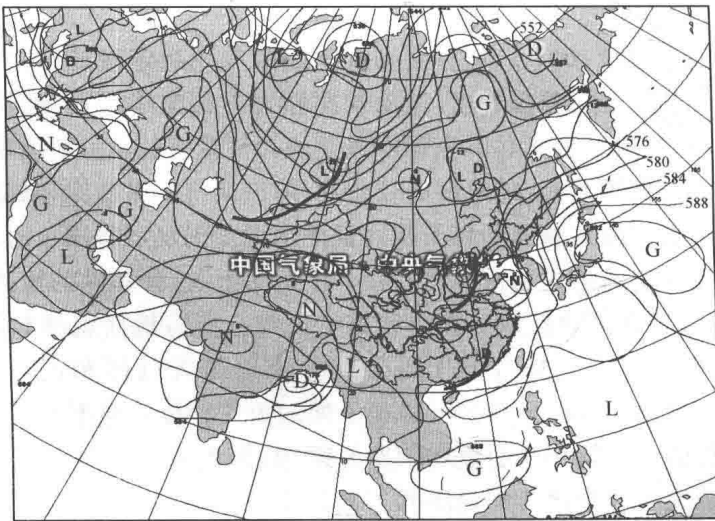
世界各地的气象观测台站每天都在观测当地的天气。将同一时刻各地的天气观测记录用一定的格式和符号填写在一张地图上，这种特殊的地图称为“天气图”。常规的气象观测包括地面观测和高空观测。填写地面观测和高空观测记录并按一定规则进行分析的天气图分别称为地面天气图和高空天气图(图1.1)。应用天气图就可以分析当时各地不同的天气特征。根据不同时刻的天气图的连续分析就可了解天气的演变情况和规律，因此天气图是天气分析和预报最基本的工具之一。现代天气观测的工具和手段多种多样，如卫星、雷达、雷电探测等，其探测资料分布图也是广义的天气图，此外还有各种辅助天气图表，它们都是天气分析和预报的基本工具。有了天气图，使我们能综观天气，不仅看到当地天气，而且能够“纵观世界，一览天下”。英文“synoptic meteorology(天气学)”的希腊文原意正具有“综观气象学”的含义。

通过天气图分析，可以看到各种气象要素场“特征”，通常称它们为“天气系统”，常见的有：低压、高压、槽、脊以及气旋、反气旋和短波、长波以及云团、回波团等。在控制论中，所谓“系统”的概念是指由相互制约、相互作用的元素构成的并具有整体功能和综合行为的统一体。类似地，天气系统就是指一团以某种规律联系或组织在一起的具有某种共同特征的空气。天气系统与天气

有着紧密的联系,他们是天气现象的制造者和携带者。



(a)



(b)

图 1.1 地面天气图(a)和高空天气图(b)

各种天气系统的相互配置,称为“天气形势”。在一定的天气形势下,天气系统及天气都会不断地演变。某种天气系统和天气现象的发生、发展、演变、消亡的过程称为“天气过程”。天气过程持续的时间长度往往很不相同,有的可以持续数十天或更长,有的可以持续数天,但是有的持续时间很短,只有数十小时或数小时,甚至数十分钟或更短。

天气学是以天气图为基础工具专门研究各种天气系统和天气过程的发生、发展和演变的规律,并利用这些规律来预测预报未来天气的学科。

作为一门现代科学,天气学的各种概念和理论在一定程度上都可以用数学和物理方程式来表述。以下我们将引入标准坐标系、气象标量场、气象矢量场、气象场变量的特征量以及梯度、拉普拉斯(梯度的梯度)、散度、涡度、形变度以及天气系统的理论模型和场变量的时间变率等重要概念。

1.2 气象标量场的表征

由于每种气象要素都是随时随地变化的,所以称它们为气象变量。气象变量包括标量和矢量两类,前者只有数值大小,后者不仅有数值大小,而且还有方向。

气压、气温、湿度等很多气象要素只有数值大小、高低的不同,这类变量称为气象标量。对气象标量场可以用分析等值线的方法来进行分析。等值线是指具有相等数值的点的连线。例如,等压线就是具有相等气压的点的连线。等压线的一侧气压较高,另一侧气压较低。当两条相邻的等压线相互紧靠,表示气压的空间变率较大,相反当两条相邻的等压线间隔较大,表示气压的空间变率较小。当一条等压线围成闭合圈时,圈内的气压便高于或低于圈外的气压,等压面(即具有相等气压值的面)便呈现上凸或下凹的形状。标量的空间变率的这些特点常用梯度和拉普拉斯这两个物理量来表征。

1.2.1 梯度

如上所述,由气象观测表明,气象要素随时随地而变。如果忽略大气离散的分子特性,则可以视其为连续的流体介质。在特定时刻气象要素在连续介质中的确定位置上具有单一的量值,也就是说气象要素是空间和时间的函数,或者说气象要素是一种场变量,即

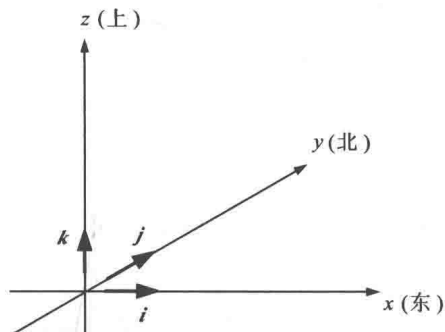
$$A = A(x, y, z, t) \quad (1.2.1)$$

式中 A 为任意标量气象要素, t 为时间, (x, y, z) 为直角坐标系,其中 x, y 为水平坐标,它们位于地面上,分别以指向正东方和正北方为正; z 为垂直坐标,它垂直于地面,以指向上为正。这种坐标称为标准坐标系或 z 坐标系(图 1.2)。

对确定的时间而言,有

$$A = A(x, y, z) \quad (1.2.2)$$

确定时间的气象要素的空间分布称为气象要素场或气象变量场。表示气象场变量的空间变率的物理量 ∇A 称为**梯度**(gradient),它是一个三维矢量。其中 ∇ 称为**哈密顿算子**(Hamilton operator)或**梯度算子**(gradient operator),它是一个微

图 1.2 z 坐标系

分算子,是一个表示空间微分的矢量

$$\nabla = \mathbf{i} \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \cdot \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \quad (1.2.3)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 方向的单位矢量, $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ 分别为 x, y, z 方向的空间变率。 $\nabla A > 0$ 的方向由低值指向高值,气象上习惯称其为升度(ascendent)。 $\nabla A < 0$ (或 $-\nabla A > 0$) 时,表示由高值指向低值,气象上习惯将 $-\nabla A$ 称为下降度(descendent, 简称降度, 或反梯度, counter-gradient)。 $|\nabla A|$ 是矢量 ∇A 的“模”,表示梯度的大小。

水平面上二维的 ∇A 可写作

$$\nabla_2 A = \mathbf{i} \frac{\partial A}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial A}{\partial y} \quad (1.2.4)$$

$\nabla_2 A$ 表示变量 A 在水平方向上的空间变率,它的大小反映了天气图上气象要素 A 的等值线的间距的大小,即等值线的密集程度。也反映了要素 A 的连续性。当 $|\nabla_2 A|$ 很小时,表示要素 A 的等值线很稀疏,说明 A 的分布很均匀。相反,当 $|\nabla_2 A|$ 很大时,表示要素 A 的等值线很密集,说明 A 的分布很不均匀, A 的水平不连续性较大。在第四章中要讲到的“气团”和“锋区”所在的地区,就分别是气象要素的分布很均匀和很不均匀,或者说是气象要素的连续性较好和不连续性较大的地区。

1.2.2 拉普拉斯

梯度算子 ∇ 可以重复使用,例如将 ∇ 和 ∇A 点乘,使得

$$\nabla \cdot \nabla A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (1.2.5)$$

$\nabla \cdot \nabla A$ 表示 ∇A 的空间变率(即梯度的梯度),习惯上将 $\nabla \cdot \nabla A$ 写成 $\nabla^2 A$,有

$$\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \quad (1.2.6)$$

∇^2 称为拉普拉斯算子, $\nabla^2 A$ 称为要素 A 场的拉普拉斯,在水平面上的二维拉普拉斯可写为

$$\nabla_{\frac{2}{2}} A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \quad (1.2.7)$$

在 $\nabla_{\frac{2}{2}} A = 0$ 以及 $\nabla_{\frac{2}{2}} A > 0$ 处,表示 A 值出现低值中心(极小值),而在 $\nabla_{\frac{2}{2}} A = 0$ 以及 $\nabla_{\frac{2}{2}} A < 0$ 处,表示 A 值出现高值中心(极大值)。例如对一个等压面的高度(H)场而言,当 $\nabla_{\frac{2}{2}} H > 0$ 时,表示等压面下凹,反之,当 $\nabla_{\frac{2}{2}} H < 0$ 时,表示等压面上凸(图 1.3)。所以 $\nabla_{\frac{2}{2}} H$ 也表示等压面的空间凹凸度。

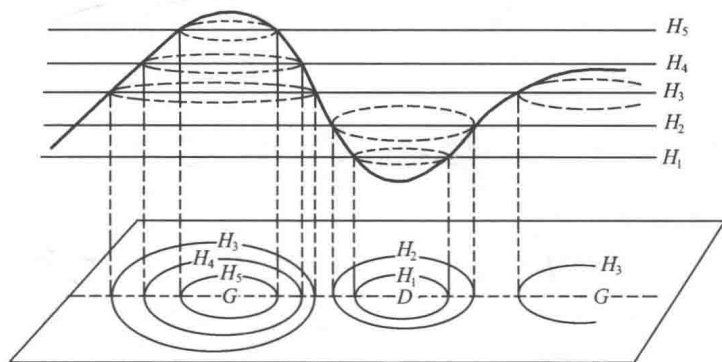


图 1.3 等压面(粗线)和等高线(虚线)

1.2.3 气压场的基本型式

根据在水平面上的等压线的分析,可以把气压场分为六种基本型式,即低压槽、高压脊、锋面槽、低压、高压和鞍形场,分别如图 1.4 中的(a),(b),(c),(d),(e),(f)所示,这些基本气压场型式称为气压系统。

对上述六种气压系统,可以根据气压场的梯度和拉普拉斯来分别表征。

(a) 低压槽一般以“槽线”表示。一个南北向的对称的低压槽(也叫竖槽)的槽线的特征是

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > 0 \quad (1.2.8)$$

(b) 高压脊以“脊线”表征。一个南北向的高压脊的脊线的特征是

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} < 0 \quad (1.2.9)$$

(c) 锋面槽(也叫斜槽)为非南北向的和不对称的低压槽, 它的槽线特征是

$$p - p' = 0, \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial p'}{\partial x} \neq 0 \quad (1.2.10)$$

式中 p, p' 分别为槽线两侧的气压, $\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p'}{\partial x}$ 分别为槽线两侧的气压梯度。

(d) 低压中心的特征是

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} > 0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > 0 \quad (1.2.11)$$

(e) 高压中心的特征是

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} < 0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} < 0 \quad (1.2.12)$$

(f) 鞍形场的特征是

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} < 0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} > 0 \quad (1.2.13)$$

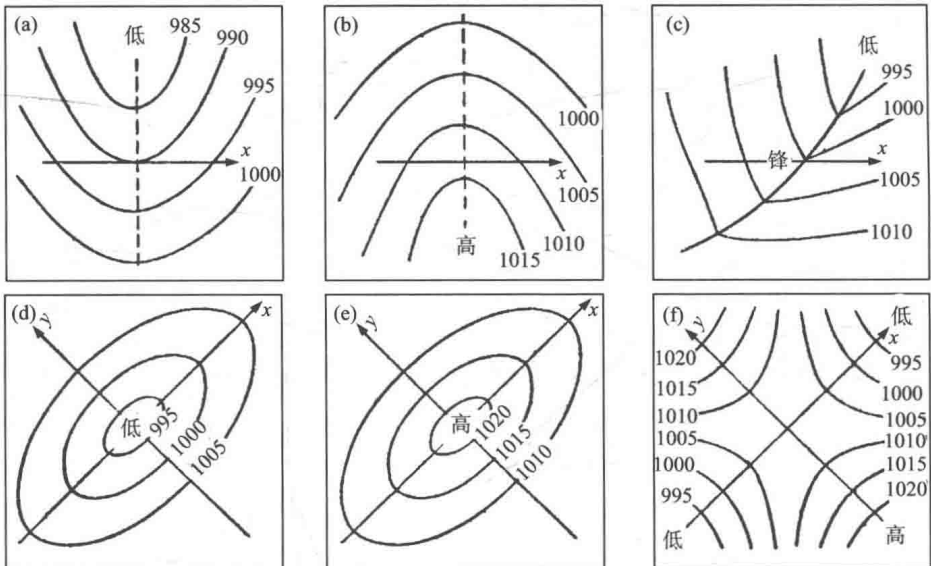


图 1.4 理想的气压场的基本型式(Petterssen, 1956)

(a) 低压槽; (b) 高压脊; (c) 锋面槽; (d) 低压; (e) 高压; (f) 鞍形场

1.3 气象矢量场的表征

“风”等场变量不但有大小,而且有方向,这类变量称为矢量。对矢量场的分析,不能像分析标量场一样简单地只用等值线(如等风速线)来进行分析,常常还需通过分析流线来表征矢量场的方向特点以及用散度、涡度、形变度和速度势及流函数等物理量来表示其特征。

1.3.1 基本的流场型式

流线是一种带箭头的线条。在流线上每一点上的风向都与流线相切。根据流线分析,可以把常见的流场分成相对均匀气流、奇异线(包括间断线和渐近线)以及奇异点(包括尖点、涡旋和中性点)三种基本流场形式。其中涡旋的流型又有流入气流、流出气流、气旋式气流、反气旋式气流等。图 1.5、图 1.6 和图 1.7 分别表示在流线分析中可能出现的六种基本涡旋流型以及单纯的流入(汇)和流出(源)流型;尖点和中性点以及间断线和渐近线的基本特征。

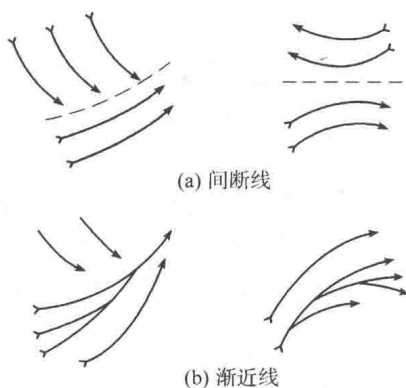


图 1.5 间断线和渐近线

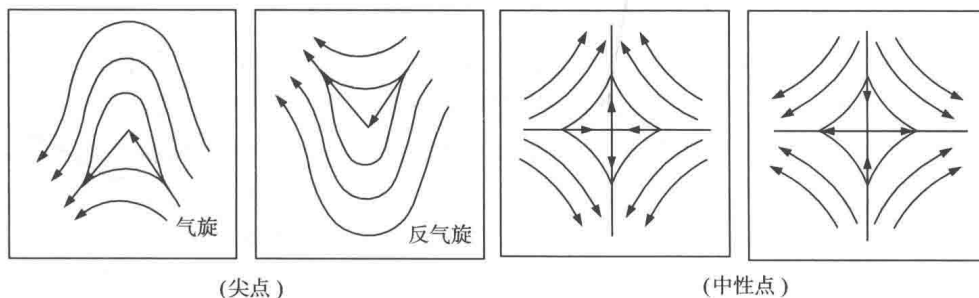


图 1.6 尖点和中性点

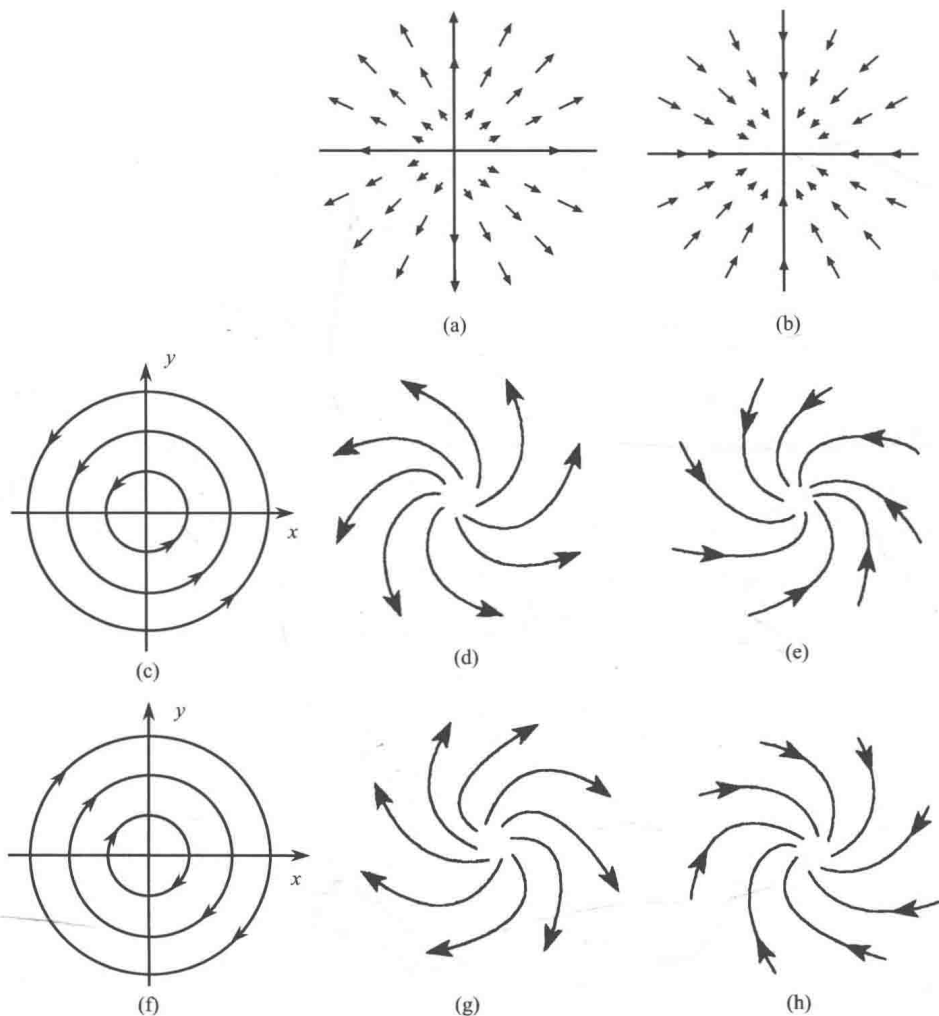


图 1.7 涡旋以及流入(汇)和流出(源)流型

(a) 流出; (b) 流入; (c) 气旋; (d) 气旋性流出; (e) 气旋性流入;
 (f) 反气旋; (g) 反气旋性流出; (h) 反气旋性流入

上述三种基本的流场形式中,相对均匀气流是指在相当宽广的范围内,由一束束近于平行,略有弯曲的流线组成的气流。有时,在相对均匀的流线中,常会出现风速的大值区。奇异线包括间断线和渐近线两种,其中间断线是指风向不连续的线,如锋、切变线均为间断线;渐近线是指流线分支或汇合的线,相当于数学中的渐近线。奇异点即流场中的静风点,此点上风速为零,没有风向(或可认为有任意多个风向)。奇异点有尖点、涡旋(汇、源)、中性点三种形式,其中尖点是波和涡旋(如槽和气旋,脊和反气旋)之间发展的过渡形式;涡旋有流入气流、流出气流、气旋式气流、反气旋式气流等形式,流入和流出气流分别称为汇和源。

在北半球作逆时针旋转的气流称为气旋式气流、作顺时针旋转的气流称为反气旋式气流。在南半球相反,作逆时针旋转的气流称为反气旋式气流,作顺时针旋转的气流称为气旋式气流。中性点即两条气流汇合渐近线与两条气流散开渐近线的交点。它相当于气压场中的鞍形场。在两个气旋式涡旋之间(或槽与气旋之间),或两个反气旋式涡旋之间(或脊与反气旋之间)也都会出现中性点。以上所说的气旋、反气旋、汇、源等均称为流场系统。

1.3.2 散度

设以矢量 \mathbf{V} 表示三维风矢量,在标准坐标系 (x, y, z) 中, \mathbf{V} 可写成三个分矢量之和,即

$$\mathbf{V} = iV_x + jV_y + kV_z \quad (1.3.1)$$

式中 i, j, k 分别为 x, y, z 方向的单位矢量, V_x, V_y, V_z 分别为 \mathbf{V} 在 x, y, z 方向的分量,若以 u, v, w 分别表示 V_x, V_y, V_z (图 1.8),则式(1.3.1)可写成

$$\mathbf{V} = iu + jv + kw \quad (1.3.2)$$

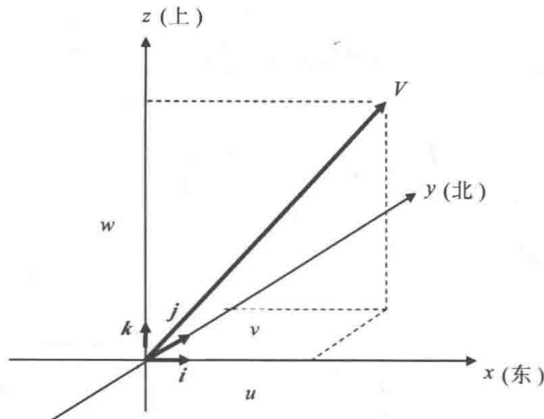


图 1.8 三维风矢量的 u, v, w 分量

风速矢量 \mathbf{V} 的大小为 $|\mathbf{V}|$, 表达为

$$|\mathbf{V}| = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1.3.3)$$

将 ∇ 算子点乘 \mathbf{V} , 得

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \mathbf{V} \quad (1.3.4)$$

$\nabla \cdot \mathbf{V}$ 或 $\text{div } \mathbf{V}$ 称为速度场散度。在水平面上,有