

暴雨分析方法

有关物理量的计算

王德翰 吴宝俊等编著



气象出版社

P428.121.1

139

暴雨分析方法

有关物理量的计算

王德瀚 吴宝俊 韦筑健 徐文金 张光智

TW24/06

气象出版社

内 容 简 介

本书以简明的方式介绍与暴雨和强对流天气有关的物理量计算方法，包括基本原理、操作步骤、查算用表、计算程序以及分析图表、应用举例等。

本书可供气象、水文部门工作人员和有关专业院校师生参考。

暴 雨 分 析 方 法

有关物理量的计算

王德瀚 吴宝俊等编著

责任编辑 康文骅

*

气 象 出 版 社 出 版

(北京西郊白石桥路46号)

北京丰华印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本：787×1092 1/32 印张：7.5 字数：163千字

1985年2月第一版 1985年2月第一次印刷

印数：1—6,000 统一书号：13194·0179

定价：1.75元

前 言

1979年秋冬之交，长江流域暴雨研究协作组为满足协作片广大台站工作人员的要求，在陶诗言同志的支持与章淹同志的主持下，在北京举办了一期以物理量计算分析为中心内容的暴雨讲习班，由本书作者以及廖洞贤、寿绍文同志分头编写、汇集成一份讲义，由湘中中小尺度暴雨综合实验基地油印，作为讲习班的教材。

鉴于物理量计算在暴雨和强对流天气分析预报工作中的应用日益广泛，我们在1979年讲义的基础上，经过较大的修改、补充和改编，写成现在这本书，希望能对广大台站工作同志和其他有关同志学习、掌握常用物理量计算方法提供一点帮助。

本书各章的编写者如下：第一章，韦统健、张光智；第二章，徐文金、王德瀚；第三章，吴宝俊；第四章，吴宝俊、王德瀚；第五章，王德瀚；第六章，徐文金；附录程序，张光智。全书最后由王德瀚、吴宝俊作了内容上的调整和文笔上的适当统一。书中不妥之处，敬请批评指正。

本书是在章淹同志发起、鼓励、支持以及陶诗言同志的关怀下完成的，谨此表示衷心的感谢。书中插图由石宗祥同志绘制，一并表示谢意。

王德瀚 吴宝俊 韦统健 徐文金 张光智

目 录

前言

引论 物理量计算分析的效用和限度	(1)
------------------------	-------

第一章 流场特征量	(3)
-----------------	-------

§ 1.1 流线	(3)
----------------	-------

§ 1.2 轨迹	(14)
----------------	--------

§ 1.3 散度和涡度	(20)
-------------------	--------

§ 1.4 铅直速度	(39)
------------------	--------

§ 1.5 直接用观测资料计算散度、涡度和铅直速度	(54)
---------------------------------	--------

第二章 ω 方程	(74)
-----------------------	--------

§ 2.1 准地转 ω 方程	(74)
-----------------------------	--------

§ 2.2 平衡模式的 ω 方程	(92)
-------------------------------	--------

§ 2.3 水汽凝结潜热的计算	(101)
-----------------------	-------

§ 2.4 各种铅直速度计算方法的比较	(106)
---------------------------	-------

第三章 温湿特征量	(111)
-----------------	-------

§ 3.1 总温度与湿静力温度	(111)
-----------------------	-------

§ 3.2 假相当位温(θ_{se})	(123)
------------------------------------	-------

§ 3.3 静力稳定度	(128)
-------------------	-------

§ 3.4 预告强对流发展的其他指标	(136)
--------------------------	-------

第四章 水分收支量	(139)
-----------------	-------

§ 4.1 水分收支方程	(139)
--------------------	-------

§ 4.2 水汽通量与水汽通量散度	(141)
-------------------------	-------

§ 4.3 降水率的计算	(154)
--------------------	-------

§ 4.4 水汽收支的铅直分布	(163)
-----------------------	-------

第五章 暴雨分析辅助图表	(169)
--------------------	-------

§ 5.1	铅直空间剖面图	(169)
§ 5.2	等熵面图和等 θ_e 面图	(178)
§ 5.3	单站探空、测风资料的应用	(185)
§ 5.4	风柱图	(191)
第六章	中尺度分析	(195)
§ 6.1	中尺度分析的一般知识	(195)
§ 6.2	中尺度分析方法	(198)
§ 6.3	中尺度分析实例	(206)
附录		(217)

引论 物理量计算分析的效用和限度

自从“75.8”河南特大暴雨会战以来，物理量计算已经比较普遍地应用于我国暴雨和强对流天气的分析研究工作中，有些单位并且正在试验将物理量计算结果直接用于日常的降水预报业务。

大家知道，暴雨及强对流天气的发生，与大尺度环境条件有密切关系，一般要求^[1]：

- 1) 有位势不稳定层结，对雷暴系统还要有逆温层存在；
- 2) 低层有湿舌或水汽辐合；
- 3) 有使位势不稳定释放的机制(如低空辐合、重力波、密度流和地形等)；
- 4) 常有低空急流和高空急流存在；
- 5) 强雷暴要求有强的铅直风切变；
- 6) 对于强对流天气，中空有冷干空气。

这些条件多数不能从天气图上直接看出，只有通过计算才能得到。

在暴雨和强对流天气分析中常用的物理量大致包含以下几个方面：

- 1) 流场特征量，如铅直速度、散度和涡度等；
- 2) 温湿特征量，如湿静力能量和大气层结稳定度等；
- 3) 水分收支量，如水汽通量和水汽通量散度等。

其中铅直速度、散度和涡度等量，由于要通过与这些量有关的动力学方程进行间接的计算才能求得，因此有时把对这些量的计算称作动力分析。其实物理量计算不限于动力因子，

动力分析也不仅是计算几个物理量。凡揭示大气结构、运动以及结构和运动变化的天气学分析、理论分析和数值模拟等都属于广义动力(物理)分析的范畴^[2]。所谓“诊断分析”,就是分析某个瞬时各个物理量之间的关系,它是广义动力分析的一个组成部分。

物理量计算的优点在于它能在一定程度上弥补天气图的不足。天气图的缺点之一是不定量,物理量计算分析作为天气图的辅助工具,可以帮助我们定量地计算并分析与天气过程有关的物理量,从而能部分地揭示天气演变的主要过程,抓住天气过程的主要矛盾,寻找预报着眼点。

进行物理量计算必须建立在可靠的天气图分析的基础上。因为只有这样,才能有目的地选择应计算的物理量,并把计算的结果与天气过程的演变有机地结合起来,以达到对大气过程有深刻的理解。譬如根据计算的铅直速度和观测到的水平速度可以绘制大气三维运动的图象,有助于加深对系统结构、变化的认识,这种认识对天气预报是十分重要的。

物理量计算结果能给天气系统的现状和演变以量的概念,虽然它所反映的也只是实况,不是预报,但这种实况显然比天气图深入了一步。相信通过大量的天气图与物理量计算相结合的天气过程对比分析,一定能得到一些有用的预报指标,使预报工作逐步向客观化、定量化过渡,对提高预报准确率起到一定作用。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言等, 大气科学, 3(3), 227—238(1979)。
- [2] 谢义炳等, 北京大学学报(自然科学版), (3), 1—9(1978)。

第一章 流场特征量

暴雨以及许多其他天气现象都是空气运动引起的。因此流场分析是暴雨分析的基础与重点。本章介绍流线和轨迹分析以及散度、涡度和铅直速度计算等问题。

§ 1.1 流 线

在日常业务工作中分析等高线或等压线，乃是因为它通过地转风关系而与流场相联系。我国暴雨及强对流天气多发生在夏季，往往与低纬环流有密切关系，地转风原则不适用。因此，直接分析流场有重要意义。

(一) 表示流场的方法

流场是一空间向量场，这里我们主要讨论它的水平分量，即水平流场。某个时刻的流场，就是那个时刻水平面上（或等压面上）各空气质点运动的总趋势，恰似在那个时刻气流运动的一张快照。表示流场的方法很多，主要有：

(1) 箭头法 某一时刻每个测站的风可以用箭头表示。其长度表示风速，其指向表示风向，用这种方法虽然大致上给出了整个场上的气流状况，但站点间的状况仍不是十分清晰。

(2) 流线法 由于上述方法不能表示出流场的连续情况，所以人们又设计出流线法。流线是具有方向的光滑曲线，其各点切线方向和风向一致。绘制流线时常以疏密大致表示风速的大小，即在风速大的地方流线分析得密些，风速小的地方分析得疏些。

(3) 流线-等风速线法 流线法虽给出了流场的连续变化图象,但风速的大小仍不能确切给出,所以人们又在流线上加画一组等风速线,使图上任一点气流的方向和速度都能一目了然。这是目前流场分析中最常用的方法。由于加画了一组等风速线,因此流线可以分析得均匀些,无需要考虑和风速的关系。

此外,绘制风速分量 u , v 等值线或绘制等风向线和等风速线,虽然也都能表示出流场,但却不能给出空气运动的直观图象,因此日常业务中很少采用。

(二) 流场中的基本形式:

由于流场中存在着一些奇异线和奇异点,往往给初学者带来一定的困难,为此让我们先认识一下流场中的基本形式(图 1.1)。

(1) 大范围平直气流或波状气流 在对流层里,中、高纬度地区盛行西风,低纬盛行东风,这种大范围的东、西风带构成了较为平直的或波状的东、西风气流,这是流场中的主要流型之一(图 1.1 a)。

(2) 奇异线(间断线) 在流场中经常有槽线和切度线,一般都作为连续线处理。但当其两侧风向变化很大,而难以进行连续的流线分析时,可作为不连续线处理,称其为流场中的间断线。在间断线两侧的流线可以分别分析,并起止于该线上(图 1.1 b)。

渐近线 这是流场中另一类间断线。当气流从某地向外发散或向某地辐合时,附近的流线都从某一根流线向外分枝或向它汇合,该流线分别称为辐散渐近线和辐合渐近线。从理论上讲,任何一点只可能有一个确定的风向,因而流线既不能交叉也不能分枝,但因天气图比例尺小,所以一般绘成分枝

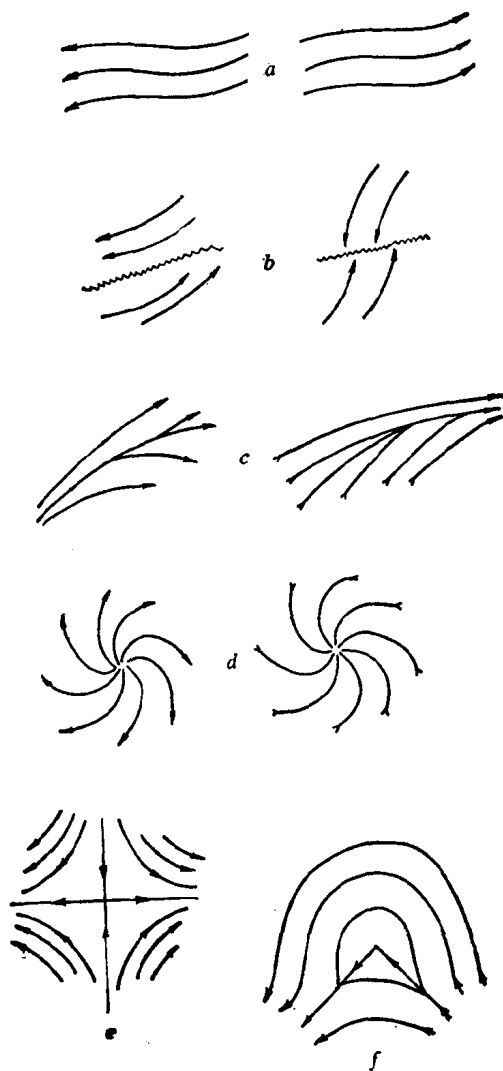


图 1.1 流场中的基本形式
 a 为平直或波状气流 b 为奇异线 c 为渐近线 d 为涡旋流场
 e 为变形场 f 为尖点

的形式，实质上是一种渐近线(图 1.1 c)。

(3) 奇异点(间断点) 在流场中往往存在着涡旋和变形场。涡旋中心或变形场中的中性点都是静风点，即风速为零，而在它周围 360° 有不同的风向，风向通过这类点是不连续的，称为流场中的奇异点。图 1.1 d 给出了涡旋的流场形式：气旋式流入，流线汇集于中心；反气旋式流出，流线从中心向外发散。这是北半球常见的形式。在中小尺度系统或高层大气中也能见到气旋式流出或反气旋式流入。完全无辐散、辐合的圆形流场或只有流入、流出的纯辐合、辐散型流场是比较少见的。

图 1.1 e 是变形场流型，中性点是变形场中辐合渐近线和辐散渐近线的交点，周围流线呈四角星形，两对角象限中的流线分别为气旋性弯曲和反气旋性弯曲。

另外，由波状流型转变为气旋(或反气旋)流型的过程中，出现一种过渡形式的风向不连续点，称为尖点(图 1.1 f)。在涡旋发展过程中，尖点将很快地转变为涡旋中心。由于尖点存在的时间短暂，所在的层次很薄，通常不易分析出来。

以上是流场中的一些基本形式。另外，在流场中还存在某些流型的组合。例如，若是在宽广一致的气流里有一涡旋存在，则和涡旋相伴应存在一变形场，变形场中性点的位置视环流状况而定；显然，在相邻两气旋或相邻两反气旋之间也应有一变形场存在，如图 1.2。

(三) 流线的分析方法

熟悉了流场中的基本形式之后，现在来着手分析流线。流线的分析方法有两种：直接法和等风向线法。

(1) 直接法 直接法就是依照风的矢量徒手直接分析流

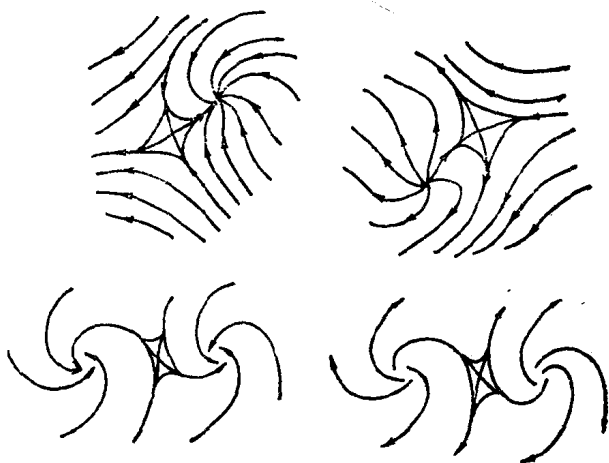
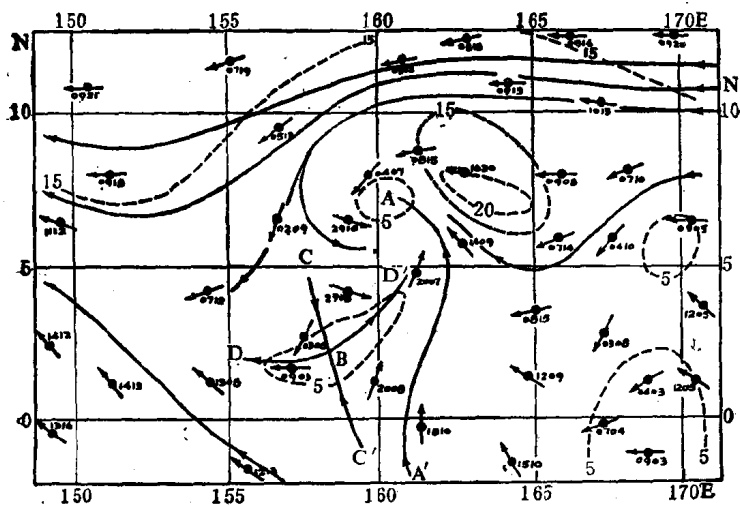


图 1.2 流型的组合

线，其原则就是要使流线上的各点处处都和风向相切。首先将风的矢量（风的填图符号或向量线段）填在图上，纵观整张图上的气流形势，如果有大范围的平直气流区，可先勾画出几条流线以显示出气流的总趋势。其次，要千方百计地确定出流场中的奇异线和奇异点（这是流场分析中的关键），并画出和其相联系的流型，不要漏掉系统。待大致勾画出流型之后，即是一张流场形势的概略草图。最后经加绘、修改，便能完成整张图的分析。在中、高纬度地区，除了可以参照前一时次或其他层次的分析之外，尚有等压面图可供借鉴，确定奇异线和奇异点并不困难。但在低纬地区，既无等压面图可供参考，且记录又十分稀少，确定这些奇异线和奇异点比较困难，因而在分析中除利用常规资料以及有关系统的连贯性和铅直结构等已有的知识之外，尚需尽可能地利用卫星、雷达和飞机探测等其他观测资料。分析中一般从大系统开始，例如副热

带高压脊线和赤道辐合带是易于辨认的,它们大致呈东-西走向,其两侧有较大的东、西风切变,可先大致勾画出来。考虑到奇异点上风速为零,周围应有小值的风速闭合线,再根据风向环流可确定出涡旋中心,如图 1.3 a 中的 A 点。在宽广一致的气流中,应有和涡旋相联系的变形场的中性点。根据风场可以确定出辐合渐近线和辐散渐近线,如图 1.3 a 中的 CC' 和 DD' ,两渐近线的交点 B 即中性点。由图中可以看出,有一条和涡旋相联系的辐合渐近线 AA' ,两侧的风都向 AA' 辐合。这样,整个流场的轮廓就十分清晰了。然后再将其余的部分完成(图 1.3 b)。流线需分析得光滑均匀,不能有突然的弯曲,也不可分析得过疏或过密,以能够完整清晰地表示出流场的形势为宜。

(2) 等风向线法 直接法是流线分析中常用的方法,简便迅速,但分析的准确性常取决于个人的熟练程度,而等风向



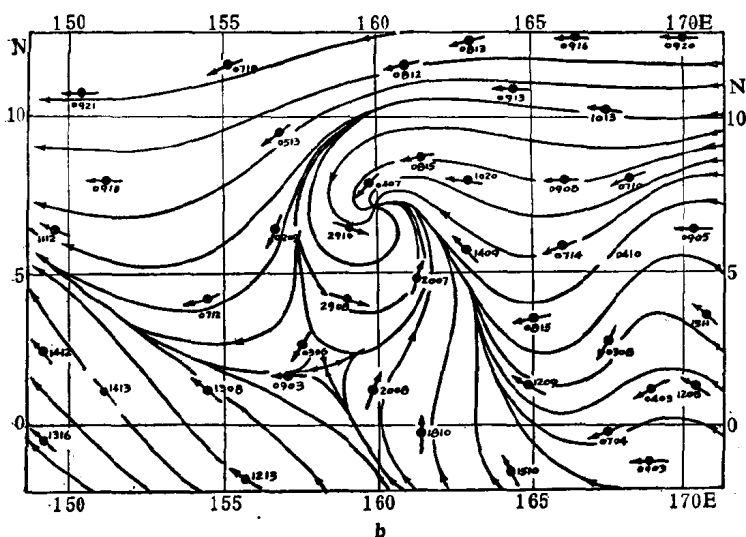


图 1.3 直接法分析流线示例

线法则较客观。所谓等风向线，是指平面上风向相同的点的联线，通常每隔 30° 分析一条，如 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots$ ，分别标以 00, 03, 06, $\dots$ 。

先看一个圆形的气旋流场。对于这种圆形流场，我们很

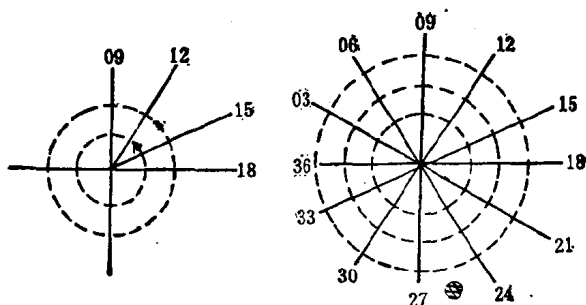


图 1.4 圆形气旋流场的等风向线

容易画出它的等风向线,如图 1.4;如果我们已分析出这样的等风向线,并且在每条等风向线上,依照风向值间隔适当距离画一些和风向相一致的短划线,然后把这些短划线依次连接起来,这些连接线就是我们所要分析的流线。

那么怎样分析等风向线呢?分析等风向线和分析其他标量场一样仍根据内插原则。例如,我们已有一张填好了风向数值的图,相邻两站由北风转为东风,我们认为其间要经过东北风地段。但等风向线图上有奇异点,所以分析中第一步仍然必须先确定出风向的奇异点,待勾画出奇异点附近的等风向线之后,再分析图上其余部分。在勾画奇异点附近等风向线时,可先将东、西、南和北四个基本方向的等风向线画出,之后内插出其余的等风向线。各种类型奇异点、奇异线附近的等风向线分布如图 1.5。图 1.5 a 为具有气旋和反气旋的圆形流场,等风向线呈直线向外辐射;图 1.5 b 为相邻的气旋和反气旋之间有一条同值的等风向线连接,两个系统的其余等风向线均为另一条 180° 线所隔开;图 1.5 c 为相邻的两气旋或两反气旋之间有一变形场的中性点;图 1.5 d 为切变线,是风向不连续线,两侧的等风向线应分别分析。

分析出等风向线之后,在等风向线上依照风向画短划线并依次连接,即得到流线图 1.6。

分析等风速线与分析其他等值线(如等温线)的原则相同,有高值区、低值区和鞍形区等。奇异点上风速为零,其周围有小值的闭合等风速线;中性点周围的等风速线呈四角星形,角点位于渐近线上。在流线曲率较大的地区风速一般比较小。大范围的平直气流区,常伴有和流线近于平行的最大风速带。大风速带的标准,在低层多选择 12 米/秒以上的风,高层多选择 20 米/秒以上的风。大风速带常用带箭头的黑粗

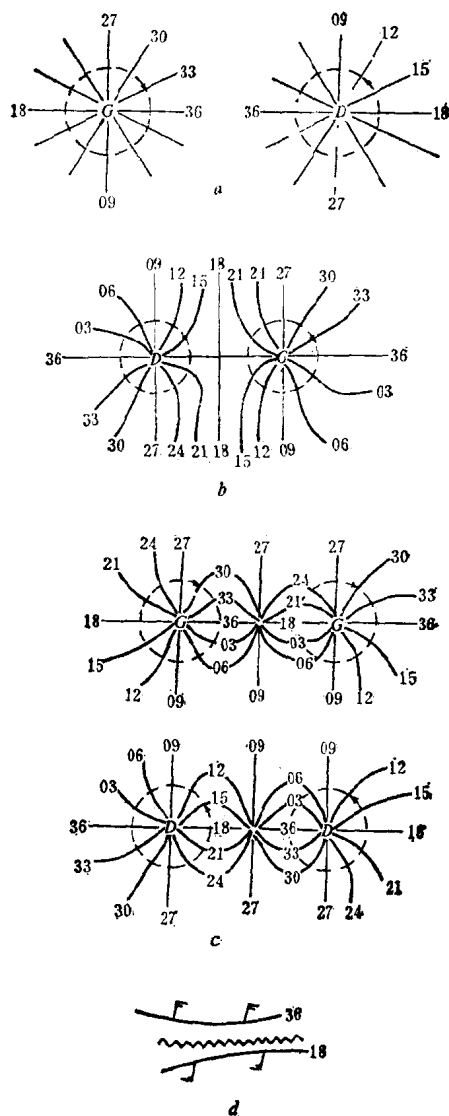


图 1.5 各种类型奇异点、奇异线附近的等风向线