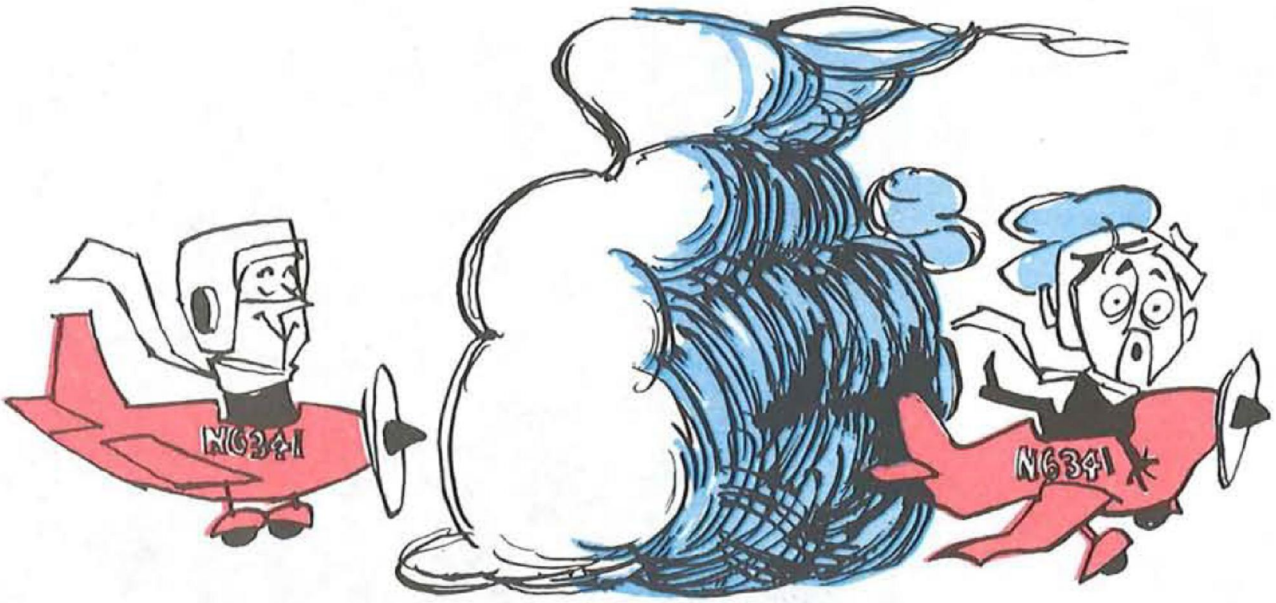

第七章 云

对于每个人来说，云彩都有它的用处。当你成为飞行员时，云就像是“空中的指示牌”。它们给你指明了空气的流动、稳定性和水分。云可以帮你把天气情况和潜在的危险天气显示出来。让我们来看看这些指示牌表示了些什么。

云的识别

为了要识别云，你只需要关心云的四种基本的类型，它们是：高云；中云；低云和巨大的垂直的云。前三种云都是依照它们的形成方式分类的。因不稳定空气内的垂直对流产生的云称为积云（cumulus），意思是堆积在一起的云。这种云是因为它起伏和汹涌的样子而得名的。由稳定空气层降温形成的云称为层云（stratus），意思是分层的或层状的。因为它们像一大块床单。

可以以上这些云的名字前缀（nimbo）或后缀（nimbus）代表雨云。所以，雨水从层状云中落下时，我们称这种云为雨层云（nimbostratus）。能产生降水的巨型积状云被称为积雨云（cumulonimbus）。碎成小块的云被加上后缀（fractus），如碎积云（cumulus fractus）。

高云

高云的云是卷装的，包括卷云（cirrus）、卷积云（cirrocumulus）和卷层云（cirrostratus）。它们基本上都是由冰晶组成的。在中纬度地区，这些云的云底高度大约为 16500 英尺至 45000 英尺。图 45、图 46、图 47 是高云的样子。

中云

中云包括：高层云（altostratus）；高积云（altocumulus）和雨层云（nimbostratus）。这些云主要由水组成，其中很多是过冷水滴。在中纬度地区，这些云的云底高度通常为 6500 英尺至 23000 英尺。图 48、图 49、图 50、图 51、图 52 是中云。

低云

低云包括：层云（stratus）；层积云（stratocumulus）和晴好天气时的积云（cumulus）。低云主要成分是水，有部分可能是过冷水滴。当低云的温度低于冰点时，云中可能带有雪和冰粒。在中纬度地区，低云的云底高度大约为地面至 6500 英尺。图 53、图 54、图 55 为低云。

垂直发展的云

垂直发展的云包括塔状积云（towering cumulus）和积雨云（cumulonimbus）。在零度层以上部分的云常常包含过冷水滴。但是当积云发展到高高度时，上半部分的云结冰形成冰晶，形成了积雨云。这些积状云的云底高度大约为 1000 英尺或更低，至 10000 英尺。图 56、图 57 就是垂直发展的云。

云的样子

以下图片来自于网络。由于原文中的图片是黑白的，难以分辨。

图 45 卷云。卷云是薄、羽毛状的冰晶形成的云，以块状或细带状分布。较大的冰晶在卷云的尾部朝下形成一小束，就像“马尾巴”一样。这些一束束的卷云不会造成严重的积冰或颠簸。但是稠密的带状卷云常常含有颠簸，我们将在第 13 章讨论。

图 46 卷积云。卷积云是一片片薄薄的云。单独看来，每一小块云就像白色的鳞片或一小块棉花。卷积云包含很多过冷水滴。有些含有颠簸和积冰。

图 47 卷层云。卷层云是一层薄薄的白色云层，就像白色床单或白色面纱。云的组成是多变的，有时部分呈现条纹状或纤维状。这种云常常伴有光环（halo）,围绕太阳或月亮的大圆圈。云中无颠簸，极少量积冰。在这种云中飞行的最大问题是能见度受限。

图 48 高积云。高积云是由白色或灰色、层状或块状的云组成的。云体看上去像波浪。有些含有点播，少量积冰。

图 49 高层云。高层云就是一层淡蓝色的面纱或云层。它经常和高积云相伴，有时融合了卷层云。你可以从高层云中满陇地看到太阳。云中会有少量或无颠簸，中度积冰。

图 50 堡状高积云。堡状高积云是中层对流云。它们的特点是顶部的翻腾变化和较高的底部。它们不是由于地面受热形成的，而是从中层不稳定空气形成的，和地面无关。它们表示中等强度颠簸和一些积冰。

图 51 荚状高积云。荚状高积云是由于风吹过山顶之类的障碍物后形成的。虽然，这些云看起来不怎么移动，但是可能会强风吹过这些云。这些云的特点是边缘光滑分明。如果空中出现这种云，就代表那里有很强的颠簸，不能靠近。第 9 章将详细解释这些云。

图 52 积雨云。积雨云是一些灰色或黑色的大型云层。弥漫着或多或少的雨、雪或冰粒。虽然它被分在中云的类别中，但是它可能和非常低的层云或层积云结合在一起。云中含非常少量的颠簸。如果环境温度接近或低于冰点时，云中会产生严重的积冰。

图 53 层云。层云是一种灰色的、一致的、层状云。它有相对很低的云底。当层云和大雾或降水同时出现时，对目视飞行影响非常大。云中极少或无颠簸。当温度接近或低于冰点时，云中会产生危险的积冰。

图 54 层积云。层积云的云底是小球状的云块或云团，这和底部模糊不清的层云不同。层积云通常形成于含有中等强度地面风的空气层之上。有时它们也形成自层云的分离部分或积云的延伸。它很有一些颠簸，可能在低于冰点的温度时形成积冰，云底高和能见度通常比低层云好。

图 55 积云。晴朗天空中的积云由对流产生，特点是平整的底部和屋顶一样的顶部。晴朗天空中的积云不代表强烈的垂直对流，也不产生降水。更多的情况下，它们表示有一小段不稳定的空气存在，有一些颠簸，没有严重的积冰。

图 56 塔状积云。塔状积云表示一种较强的不稳定空气对流，显示着大量的垂发展运动。因为这种垂直运动造就了塔状积云菜花形状的顶部。这种积云可以引起小雨，强烈的颠簸，在冰点以下时存在积冰。

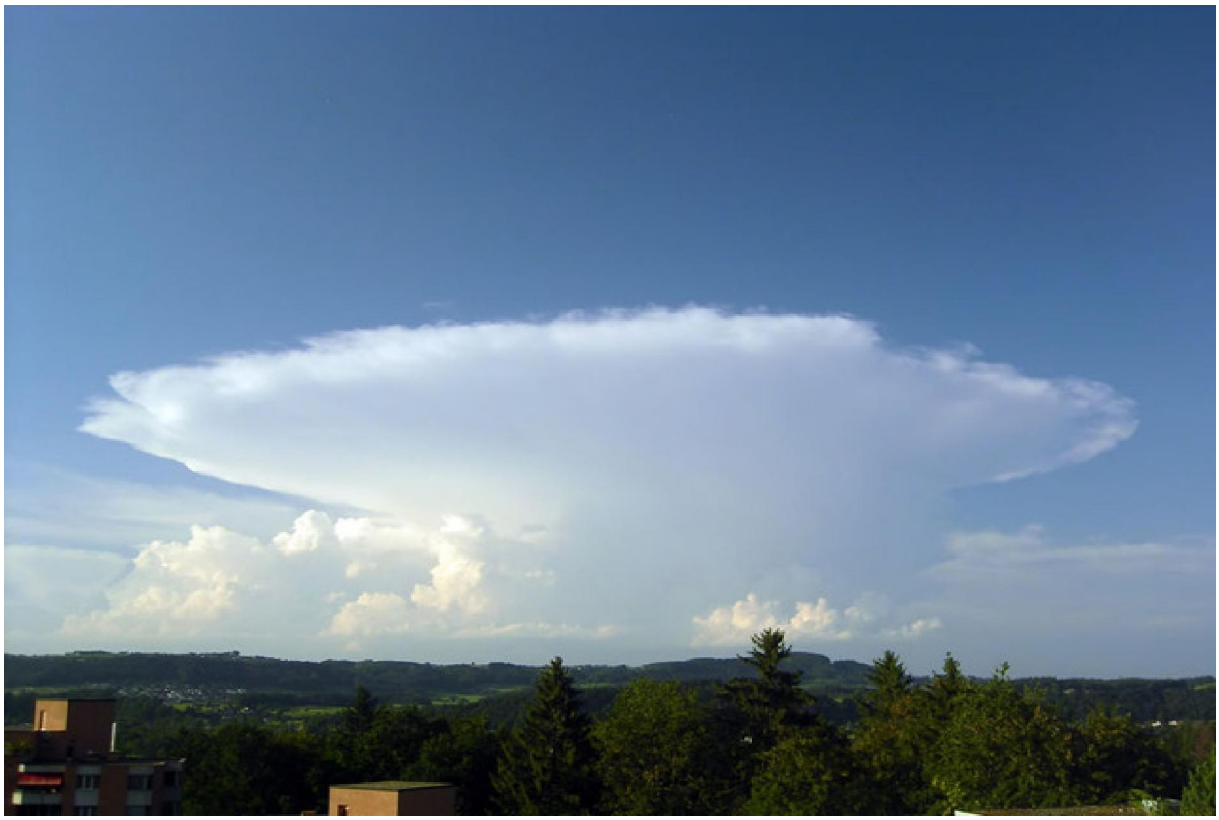

图 57 积雨云。积雨云是空气不稳定的终极表现。积雨云是大范围的垂直发展的云，这些云的顶部翻腾，并戴着面纱形状的卷云，被称为“砧（the anvil）”。云中包含了所有的危险天气，比如剧烈的颠簸。飞行时任何时候都不能靠近它们。积雨云也是雷暴云，将在第 11 章详细讨论。

空中的指示牌

以上的图片只是一些基本类型的云。每张图片都解释了云的特点和对飞行的影响。最后，我希望你能再看一边这些云的照片。继续学习它们的形态和潜在的危险，学着把它们看作“空中的指示牌”。

第八章 气团和锋面

为什么俄克拉荷马（Oklahoma）的天气晴朗又寒冷，而同时在阿拉巴马（Alabama）的天气温暖又潮湿呢？或者，你在阿肯色州（Arkansas）东部绕开的那一连串雷雨是什么造成的呢？问题的答案就是气团（air masses）和锋面（fronts）。如果你能事先评估气团和锋面影响，你就能更好地计划你的飞行路线，提高安全性和经济性。本章节解释锋面和气团的作用，并将它们与天气现象和飞行计划联系起来。

气团

当某一片大面积区域呈现出大致相同的属性（温度和湿度），并且上方的空气停滞或缓慢移动经过这个区域，空气将变成与这片区域相同的属性。结果，空气在巨大的水平分布上都保持一致的属性，形成了一个整体，称为气团（图 58）。气团获得属性的区域被称为“气团的源地（source region）”。

气团的源地多种多样，其中最佳的源地是大面积冰雪覆盖的两极地区、寒冷的北部海洋、热带海洋、大片沙漠地区。中纬度地区不适合产生气团，因为变化多端的扰动控制着中纬度区域，使得空气无法停下脚步，无法和地面充分接触，无法获得地面的属性。

气团的变性

就如果气团生成时获得气团源地的属性一样，在气团移动的过程中，气团也会获得所经过区域的属性，所以气团就发生了变性。

气团变性的程度取决于气团移动的速度、移动路径上经过区域的性质、气团与地面的温度差。气团变性有以下几种：

1. 移经暖地表的冷气团：冷气团经过温暖的地表，底部受热，增加了空气的不稳定，容易产生阵雨。
2. 移经冷地表的暖气团：暖气团经过寒冷的地表，底部降温，增加了空气的稳定性，如果空气被降温到露点，那么就会形成层云或雾。
3. 增加水汽：气团从水体表面的蒸发效应中得到水蒸气，或者上方的降水使气团得到水蒸气。当水的温度比气团温度高时，水的蒸发会快速提高露点温度，使空气饱和，形成层云或雾。
4. 减少水汽：因为凝结或者降水，使得气团失去水蒸气。

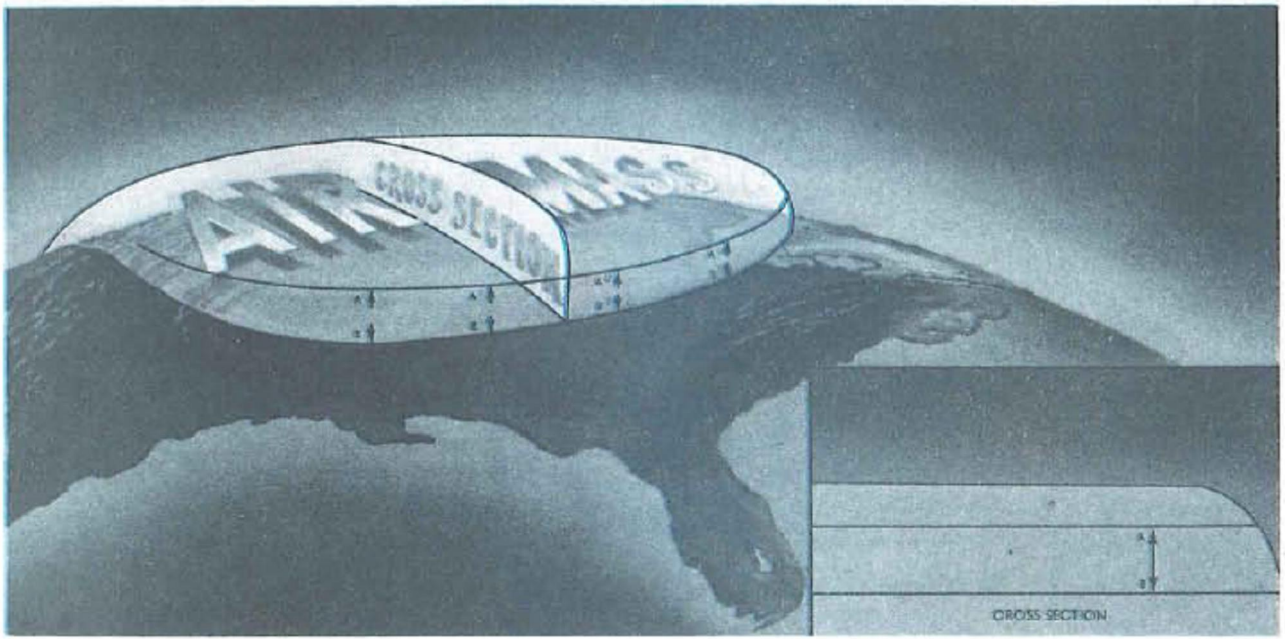

图 58

气团的稳定性

气团的稳定性决定了它特殊的天气特点。当一种气团覆盖在另一种气团之上时，情况随高度而变。稳定和不稳定气团的天气特点如下：

- 不稳定：积状云、阵性降水、颠簸、除了风沙之外（原文：except in blowing obstructions），能见度良好。
- 稳定：层状云、雾、连续的降水、无颠簸、由于烟或霾，能见度较差。

锋面

当气团从气团源地移动，就会和其他不同类型的气团接触。两个气团的交界处称为锋面区域或锋面（front）。在这个交界处的温度、湿度、风都会快速变化。

变化

当你从一个气团穿越到另一个性质不同的气团时，环境的变花有时是非常突然的。变化得越突然表明锋面越狭窄。其他时候，环境的变化是平缓的，表明锋面是比较宽的。

温度变化

在锋面中，温度的变化是最容易察觉的。在地面，当锋面经过时，气温常常会有明显的变化。当你在飞行时，特别是低高度飞行时，你会注意到温度的剧大变化。在飞越锋面时的温度变化量会比在气团内飞行的温度变化量还要大，即使锋面的温度变化是相对柔和的。处于安全的考虑，在飞越锋面时，你应该调一下你的高度表拨正值。第 3 章已经讨论过温度变化对飞机高度表的影响。

露点变化

你在第 5 章已经学过，露点温度是衡量空气中水蒸气多少的数值。温度露点差是描述饱和程度的数值。露点温度和温度露点差在锋面的两边常常是不同的。这可以用来判断锋面的位置，也可以为判断云或雾的形成提供线索。

风的变化

在锋面的影响下，风肯定会变化。风的不连续可能表现为风向、风速或两者同时变化。所以在锋面附近飞行时，要注意风变（wind shift）。风变会使你突然偏离航道，甚至使你失去方向。风速风向的突然变化还造成了风切变（wind shear），你将在下一章节“颠簸”中学习他的重要性。

气压变化

锋面会“躺在”气压糟中，而且在冷空气中的气压通常更高一些。所以当你穿过锋面飞入冷空气团时，气压经常会急剧升高。当你朝暖空气团方向靠近锋面时，气压会慢慢下降，直到你穿过锋面，然后在暖气团内保持稳定或略微下降一点。但是，在锋面两边的气压形式变化很大，你最好别直接穿过锋面的航路飞行。如果飞过锋面，最重

要的就是记住：你将经历不同的气压变化率；特别注意时刻保持你的气压表拨正值正确。

锋面的类型

有三种主要的锋面类型：冷锋（cold front）、暖风（warm front）和静止锋（stationary front）。

冷锋

冷气团推进向前就形成了冷锋。在地面上，冷空气推动并占领了暖空气的位置。冷锋移动的速度等于摩擦层（frictional layer：地表至 1000 米范围内，摩擦力对大气运动有影响的区域）之上的风速垂直于冷锋面的分量。图 59 画的是冷锋的垂直结构，以及它在地面天气图上的样子。如果冷气团较浅或冷锋移动较慢，冷锋的坡面就会像图 60 中的暖锋。

暖锋

一个前进的暖气团的前缘称作暖锋，暖气团经过并替代了冷气团的位置。由于冷空气比暖空气密度大，所以冷空气紧贴着地面。暖空气会滑到冷空气上方，并没有直接推动冷空气。所以，冷空气在暖空气的威逼下后退得比较慢。这种缓慢的后退方式造成了暖锋的锋面坡度，这个坡度比冷锋的锋面坡度更小（图 60）。所以在地面图上暖锋出现得次数比冷锋少。在风速相同的情况下，暖锋的移动速度比冷锋慢一半左右（they usually move about half as fast when the general wind flow is the same in each case）。

静止锋

当两个气团都无法战胜对方时，锋面就静止了。图 61 画的是一个静止锋的剖面图以及它在地面图上的标志。相反的两个力施加在相邻的两个不同密度的气团上，这两个力如此相同，以至于锋面几乎不移动。地面风会向着平行于静止锋的方向吹。静止锋的锋面坡度通常是比较浅的，但可能受到风的干扰或密度的区别造成锋面坡度变陡。

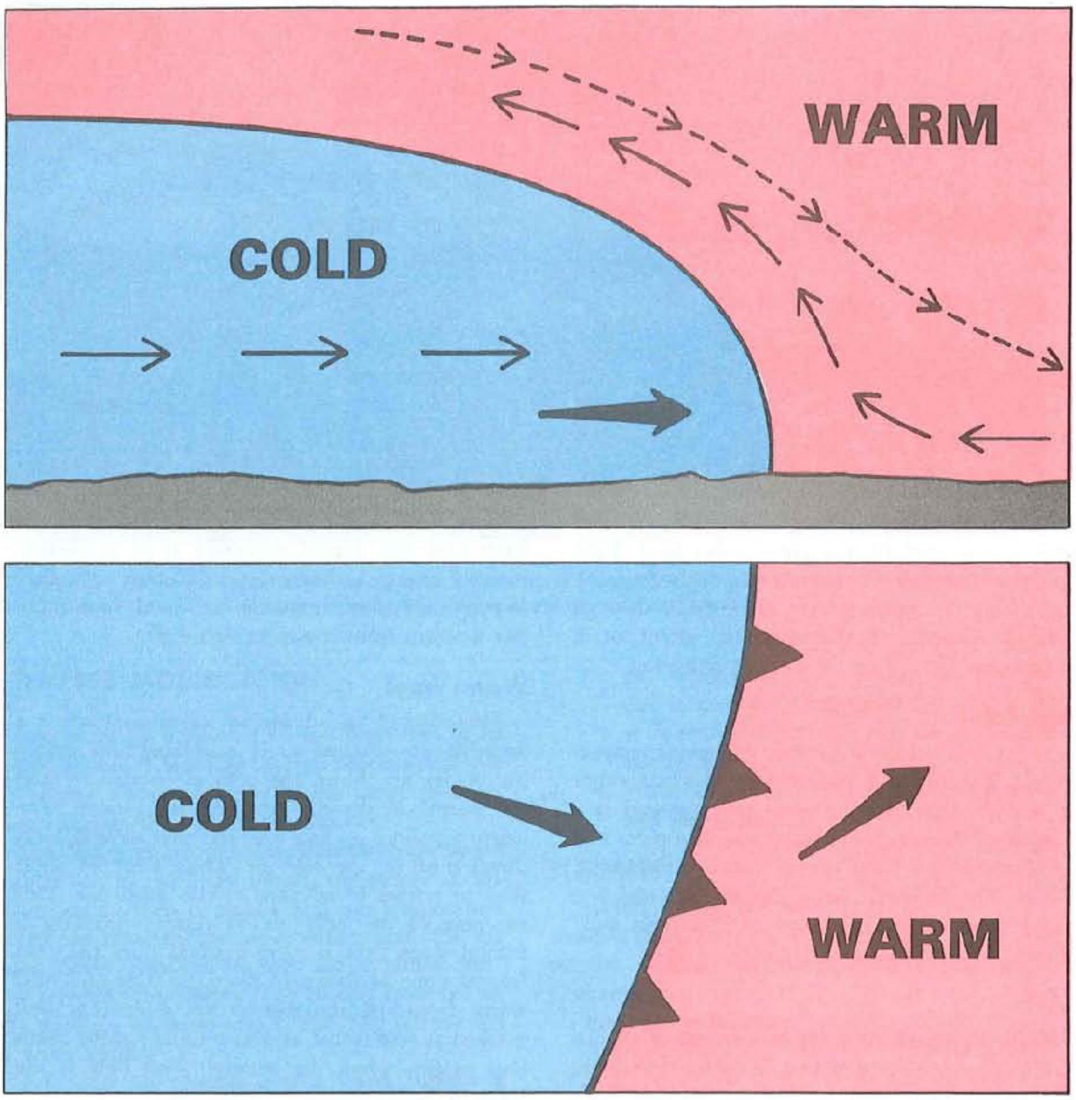

图 59

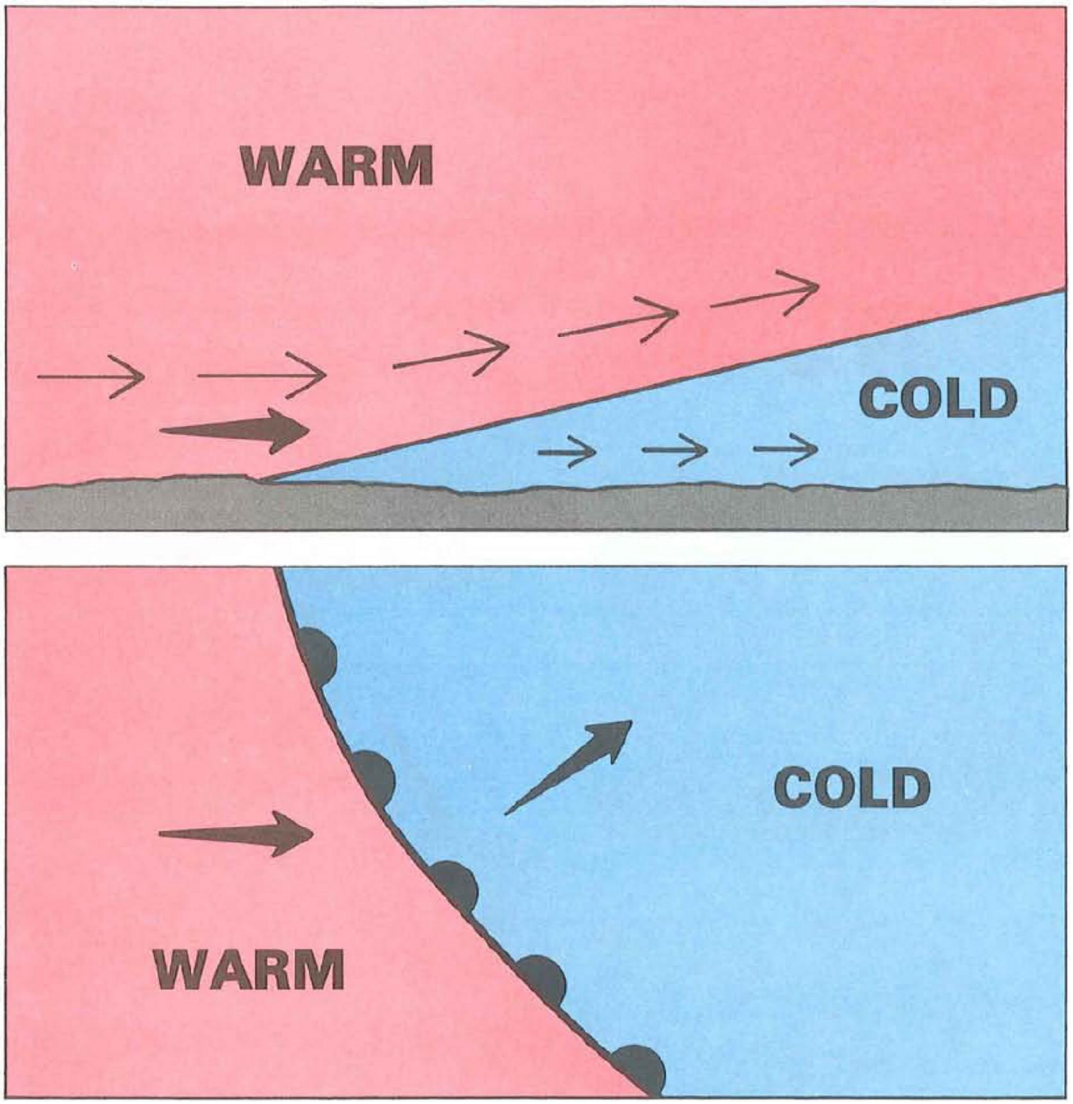

图 60

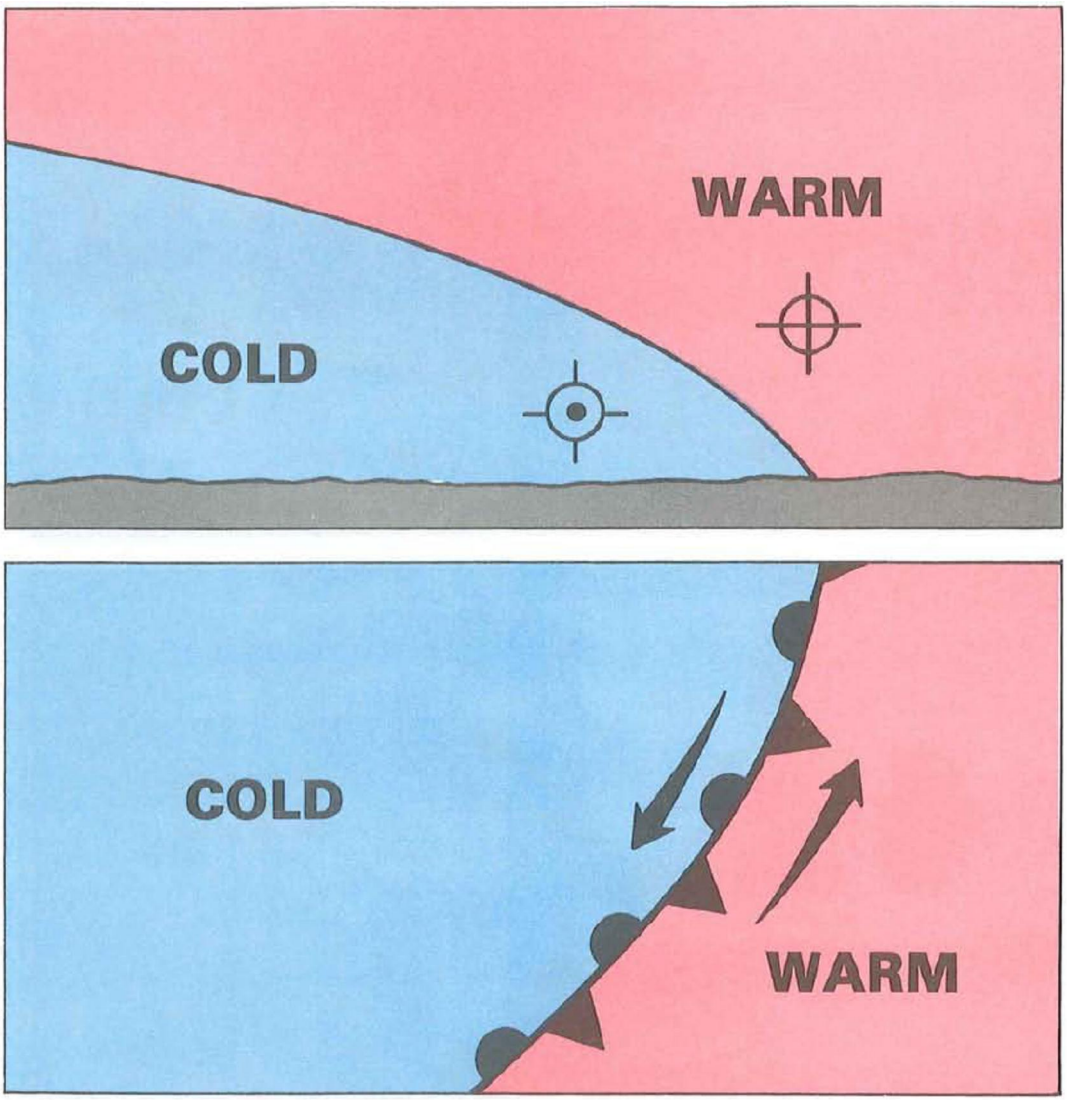

图 61

锋面波和固锢锋

锋面波（frontal wave）和气旋（低压区域）常常形成于缓慢移动的冷风或静止锋。气旋的生命周期和运动方式很大程度上听命于其上方的风。

锋面波的最初形成阶段（图 62），锋面两边的风向都平行于锋面方向（A）。某个细小的扰动就会在锋面中造成一个波浪形的弯曲（B）。如果扰动继续的话，锋面波会变大，一个气旋（逆时针）环流就发展起来了。静止锋的一部分开始移动，变成了暖锋，另一部分移动并变成了冷锋（C）。这种变形就被称为锋面波。

在锋面波的顶端区域的气压下降，形成了低压中心。这个气旋环流变得越来越强大，地面风变大到可以影响锋面的移动。冷风的移动速度比暖锋快（D）。当冷锋追上暖锋时，两个锋面挤压在一起（靠近）。结果是两者形成了固锢锋面（an occluded front）（E），简单说就是固锢锋（occlusion）。此时为锋面波气旋最强烈的时候。固锢锋的符号是暖风和冷风的组合。

当固锢锋继续变长，气旋环流的强度被减小了，锋面运行变慢（F）。有时，一个新的锋面波会在冷锋的西面尾部区域形成（F、G）；或者第二个低压系统在固锢锋的顶点形成。在锋面波的最后阶段，冷锋和暖锋可能又变成了一个静止锋。低压中心和剩下的固锢锋慢慢消失了（G）。

图 63 画的是一个暖固锢锋（warm-front occlusion）的剖面图。这种暖固锢锋的形成原因是：一个冷气团推动着一个暖气团经过一个更冷的气团，更冷的冷气团沉到最下面，把暖气团抬了起来。

图 64 画的是一个冷固锢锋（cold-front occlusion）的剖面图。这种冷固锢锋的形成原因是：一个更冷的冷气团推动着一个暖气团经过一个冷气团。这两个冷气团把暖气团抬了起来。

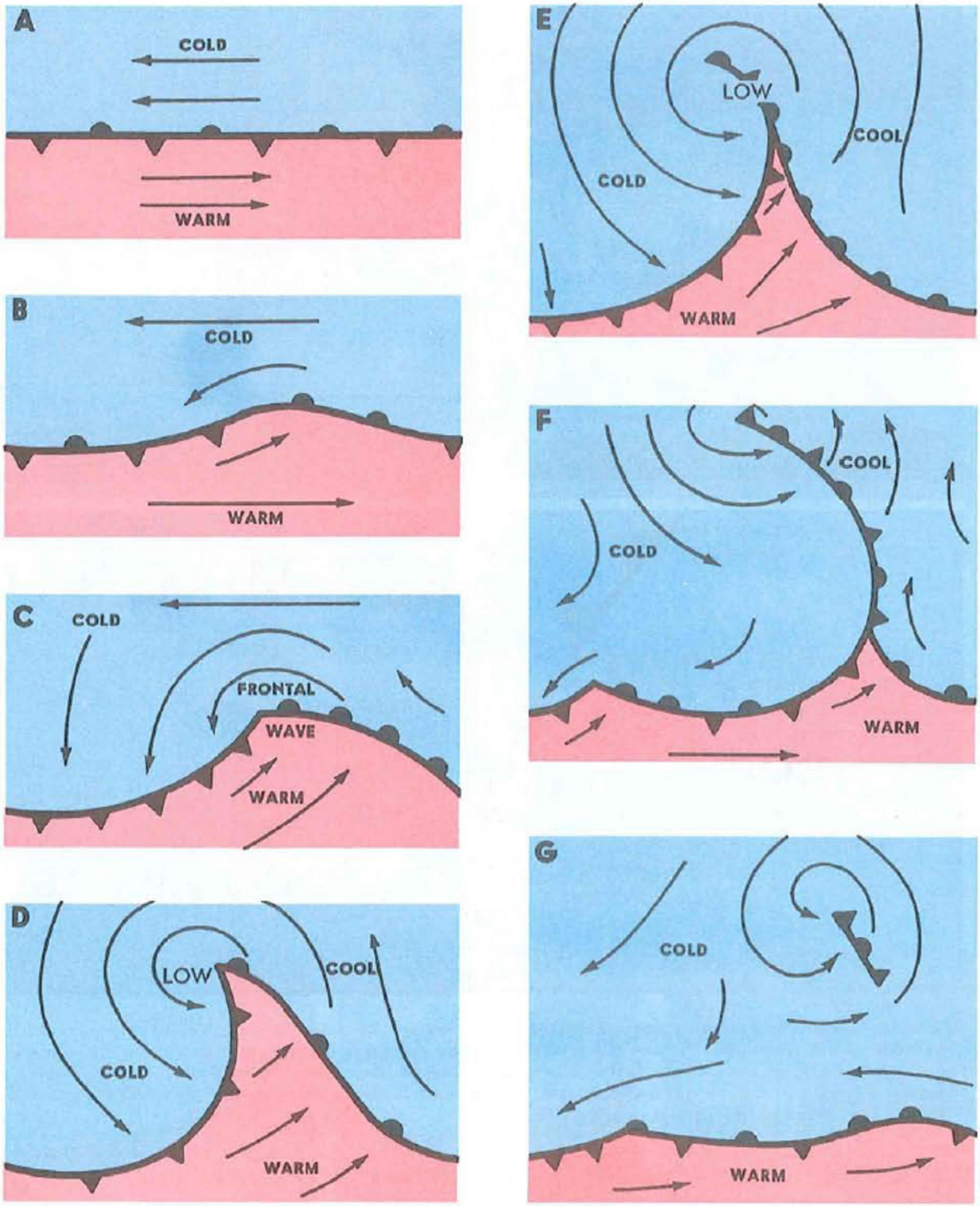
A
COLD
WARM
B
COLD
WARM
C
COLD
FRONTAL
WAVE
WARM
D
LOW
COOL
COLD
WARM
E
LOW
COOL
COLD
WARM
F
COOL
COLD
WARM
G
COLD
WARM

图 62

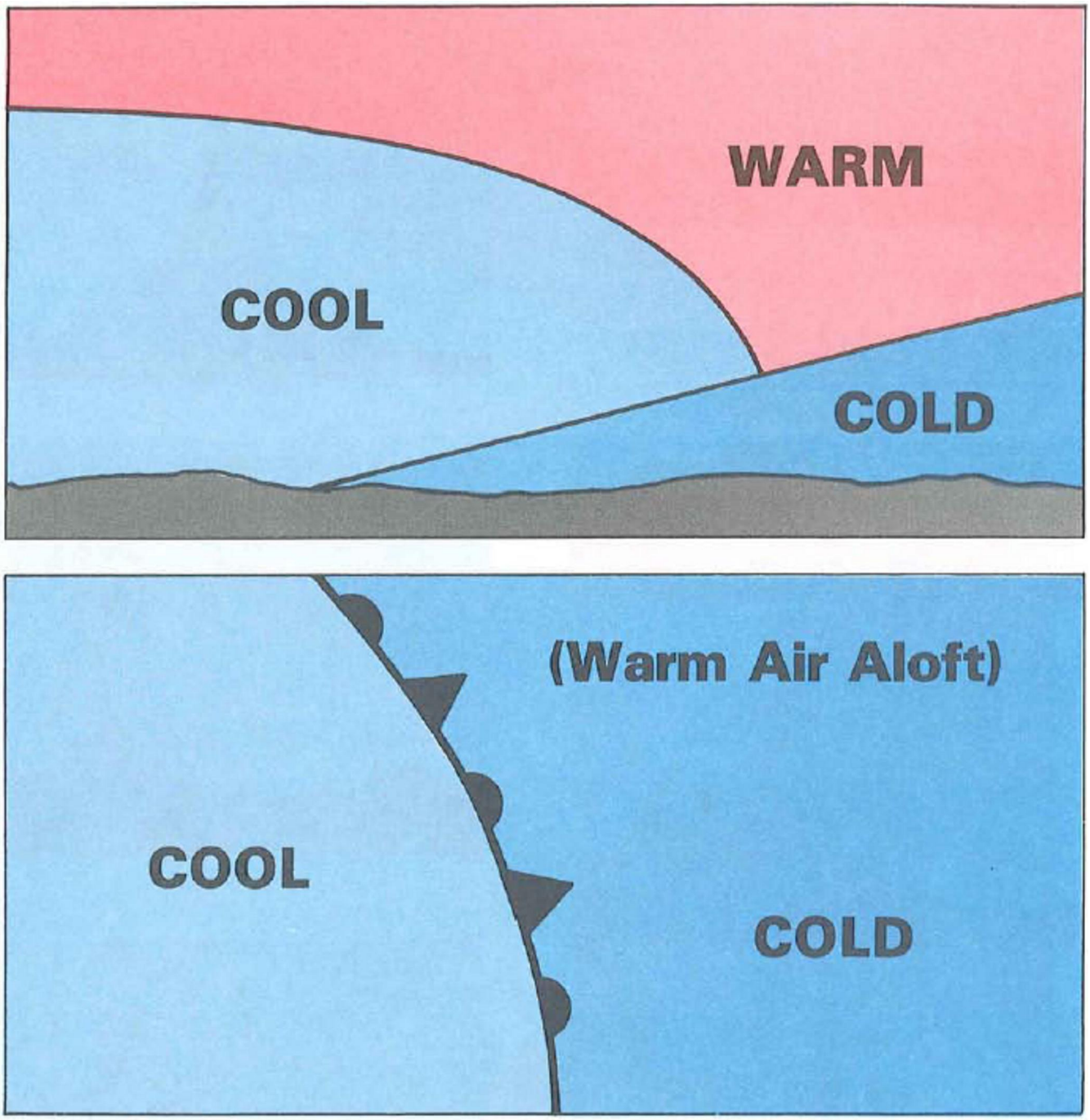

图 63

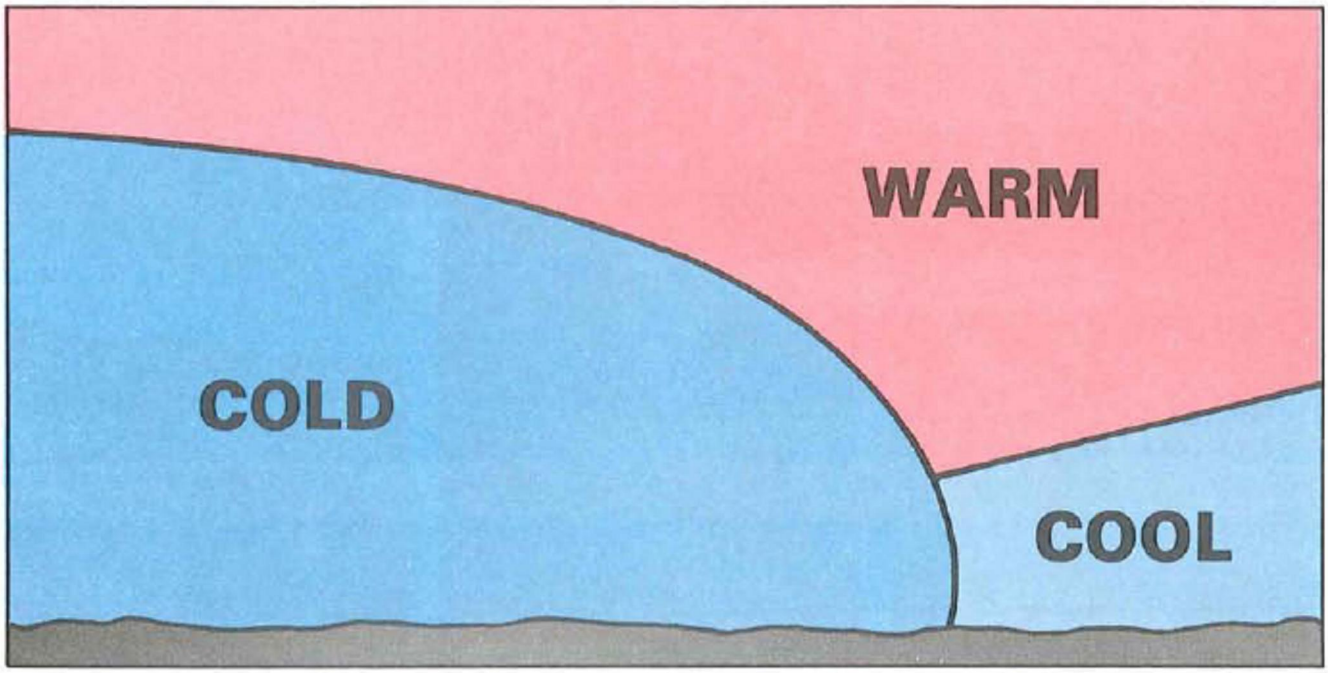

图 64

非锋面低压

因为锋面是两种不同属性空气团之间的边界，所以锋面和气团内部独立存在的低压是无关的。非锋面低压（non-frontal lows）在洛基山脉的中纬度地区不常见，但在暖和的几个月中偶尔可以见到。小型的非锋面低压在西部山区是很常见的，因为它是存在于美国最西南部的一种半静止（semi-stationary）热低压。热带低压也是一种非锋面低压。

锋面消散和锋面加强

当相邻的两个气团性质放生改变，温度和气压的差别渐渐消失的时候，锋面就消散了。图 65 画的就是锋面消散（frontolysis）的情况。锋面加强（frontogenesis）就是锋面的产生过程。它发生在两个气团之间的特定区域，两个气团的密度渐渐地变得不同。锋面两边相应的风也随之产生。图 66 就是锋面加强的例子。

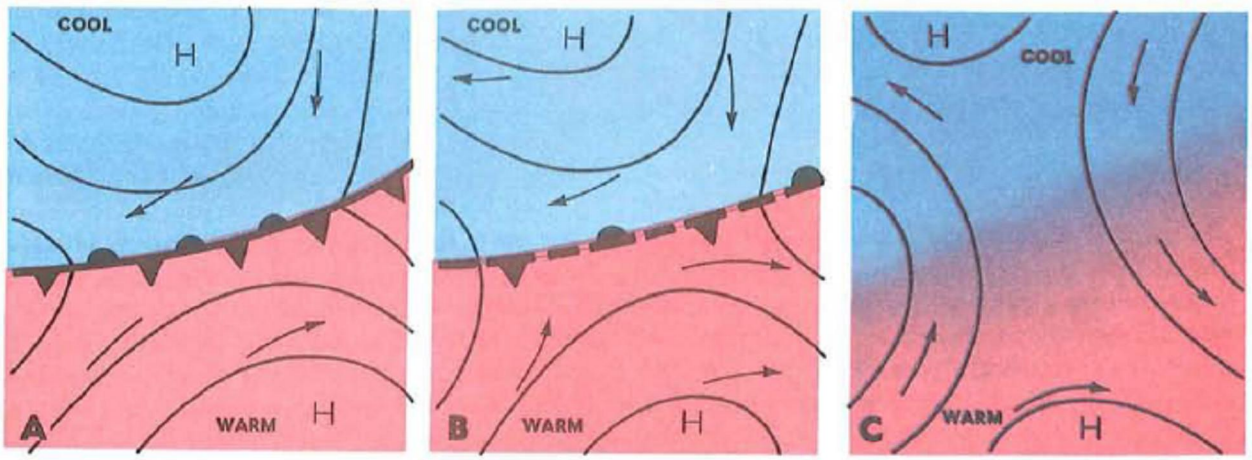

图 65

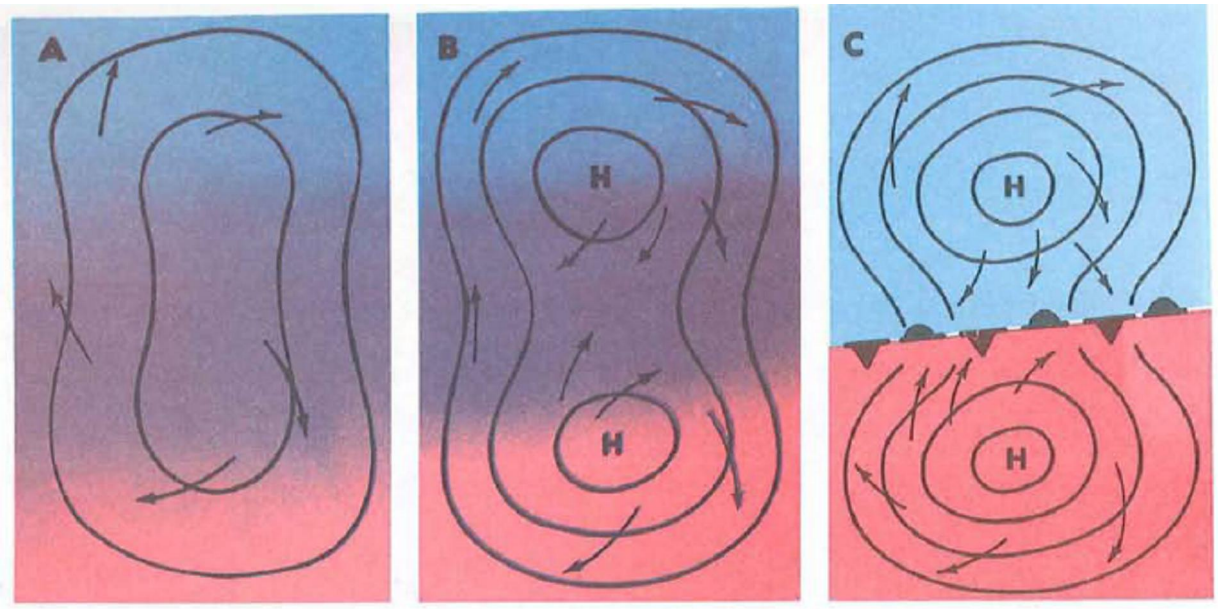

图 66

锋面天气

当穿过锋面飞行时，你可能会遇到多变的天气：万里无云或危险天气（冰雹、颠簸、积冰、低云、低能见度）。锋面会形成哪种天气现象取决于：

1. 水汽的含量
2. 被抬升空气的稳定程度
3. 锋面的坡度
4. 锋面的移动速度
5. 锋面上方风的运动

充足的水分才能形成云。当一个缓慢的锋面经过饱含水分的区域时，云和降水就会快速地发展。一个最好的例子就是从洛矶山脉干燥的山坡上吹向东面的冷锋，遇到了从墨西哥湾吹来的潮湿空气。当两者在美国的大平原上相遇时会快速形成暴风雨，速度之快足以使飞行员感到意外。

被抬升空气的稳定程度决定了它将形成层状云还是积状云。如果上冲的热空气（warm air overriding the front）是稳定的，那将会形成层状云。如果热空气不稳定，那将形成积状云。随着层状云而来的降水过程通常很稳定，几乎很少有颠簸（图 67）。积状云中的降水过程常常以阵雨形式发生，而且云中有颠簸（图 68）。

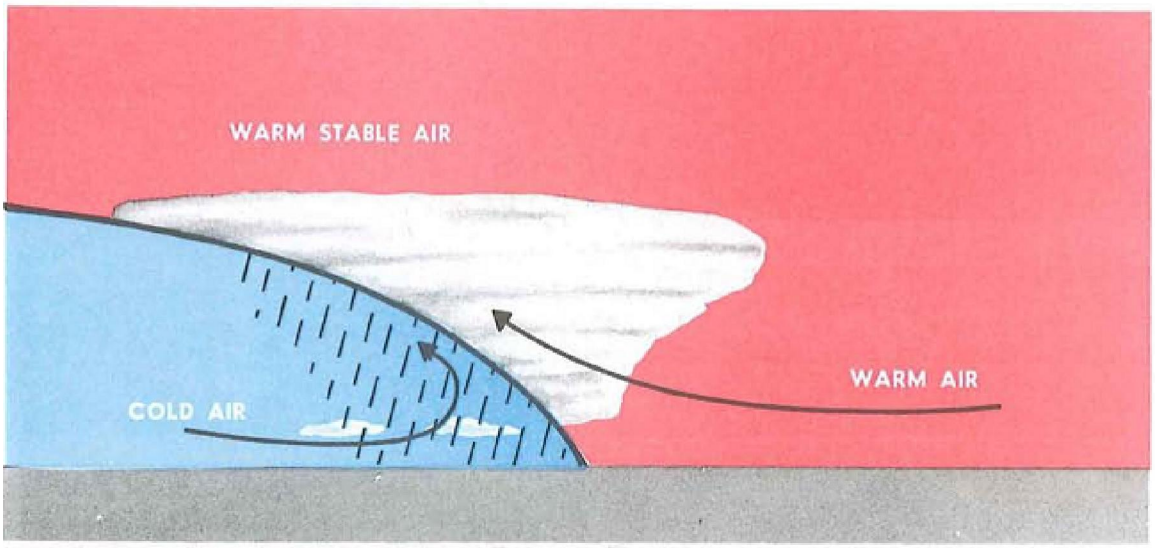

图 67

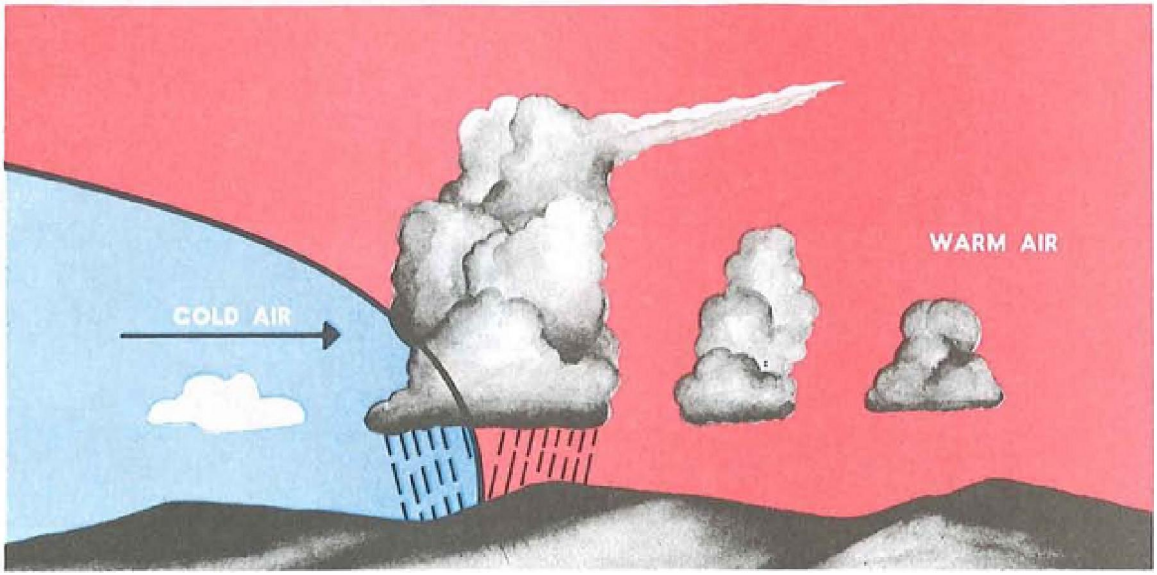

图 68

锋面越平缓，降水云团的面积越宽广（图 69）。伴随着锋面平缓的坡度，大面积的降水会变成云底很低的层云或雾。雨水增加了冷空气中的湿度并使其饱和，可能造成数千平方英里的地区低云和低能见度。如果靠近地面的冷空气是低于冰点的，同时上方的热空气是高于冰点的，那么就会形成冬雨或冰粒（ice pellets）。如果上方的较暖的空气也是低于冰点的，那就开始下雪了。

当上冲的暖气团是潮湿不稳定时，会形成大面积的云体（cloud mass），在这些云体内会镶嵌着高积云、积云甚至雷暴（图 70、图 71）。这些镶嵌着的雷暴多出现于暖锋或静止锋中，也可能出现在一个缓慢移动的平缓冷锋里。飞行前良好的准备会帮助你预见这些隐形的风暴。气象雷达也能帮到你，我们将在第 11 章讨论气象雷达的作用。

当一个快速移动的、陡峭的冷锋迫使前方的暖空气向上运动时，如果暖空气是潮湿的，那么在冷锋前沿的地面上将出现快速生成的降水（图 72）。

由于冷锋追赶上一个暖锋时形成了固囚锋，固囚锋的天气现象就是冷锋天气和暖锋天气的结合体。图 73 和图 74 就是暖固囚锋和冷固囚锋的天气现象。

锋面也可能不带来一朵云彩。当上方的暖空气沿锋面坡度滑下，干锋面（dry fronts）就形成了。也有可能空气实在是太干燥了，只在高空形成一点点云。

除了锋面的移动之外，高空风也是决定云量多少和降雨的因素。记得我们在第四章说过的，高空风影响着锋面的移动。当高空风垂直于锋面，那么锋面会随着风向移动；如果高空风平行于锋面（如果可能的话），那么锋面缓慢移动。一个深深的、慢慢移动的高空槽，会形成广袤的云和降水。而一个快速移动的小高空槽会把天气情况限制在一个很窄的带状区域内。但是后者常常在春天孕育出严重的、快速移动的颠簸（However, the latter often breeds severe, fast moving, turbulent spring weather.）。

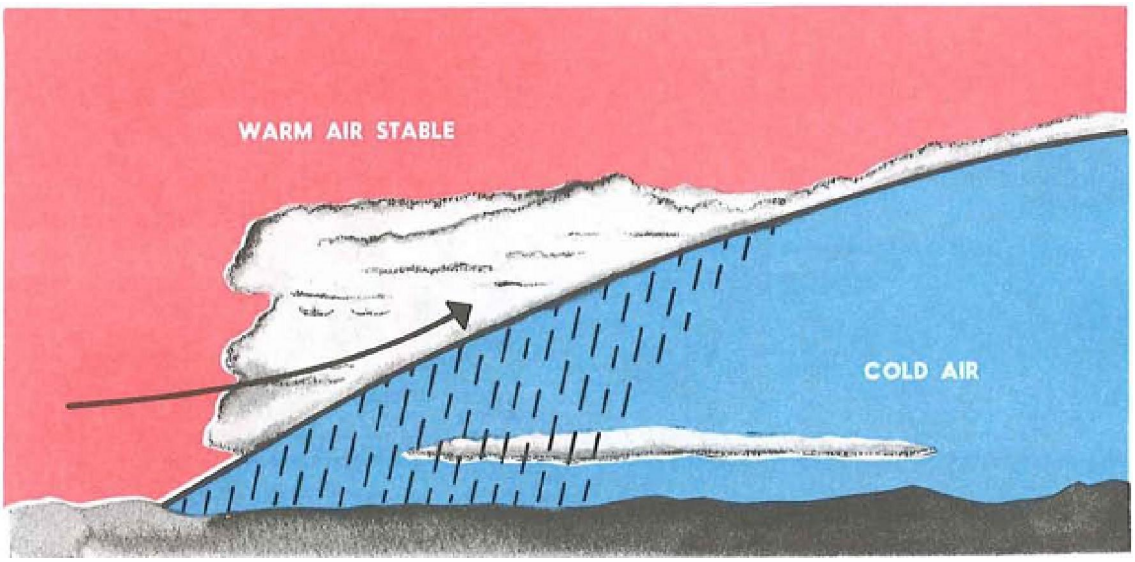
WARM AIR STABLE
COLD AIR

图 69

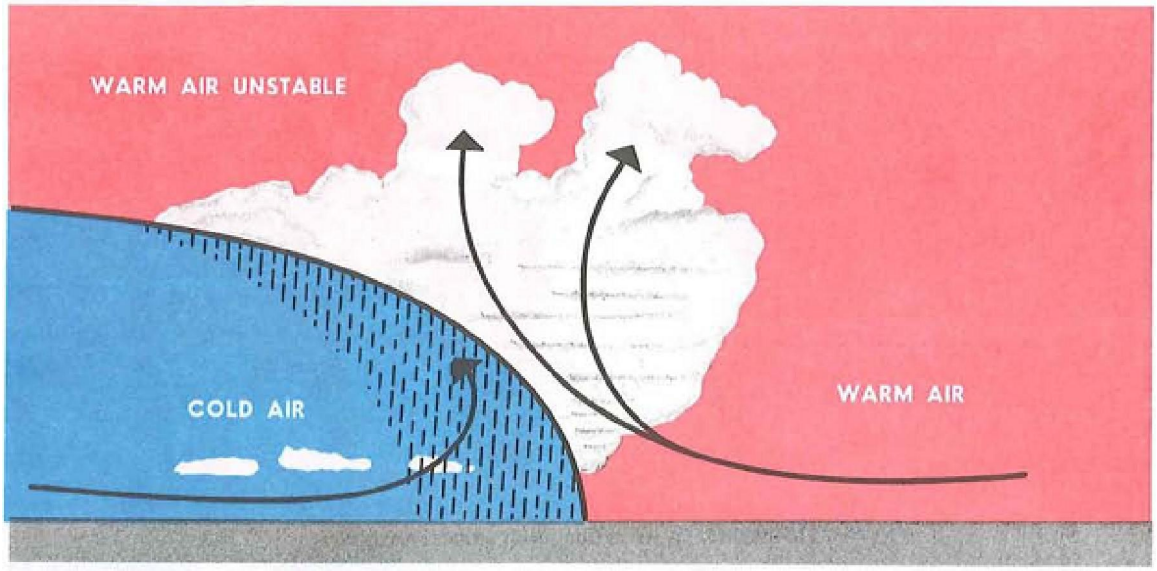
WARM AIR UNSTABLE
COLD AIR
WARM AIR

图 70

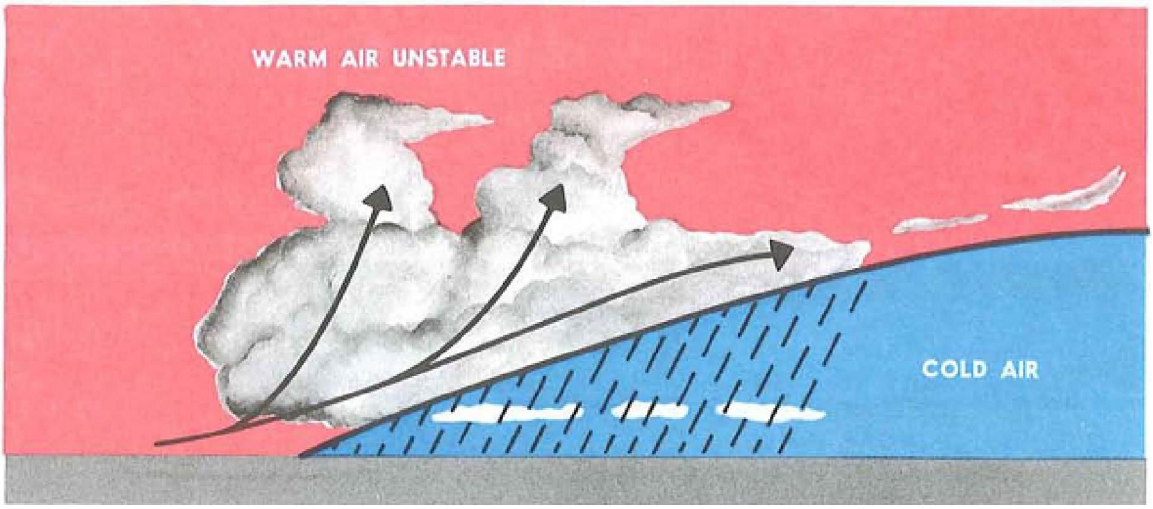
WARM AIR UNSTABLE
COLD AIR

图 71

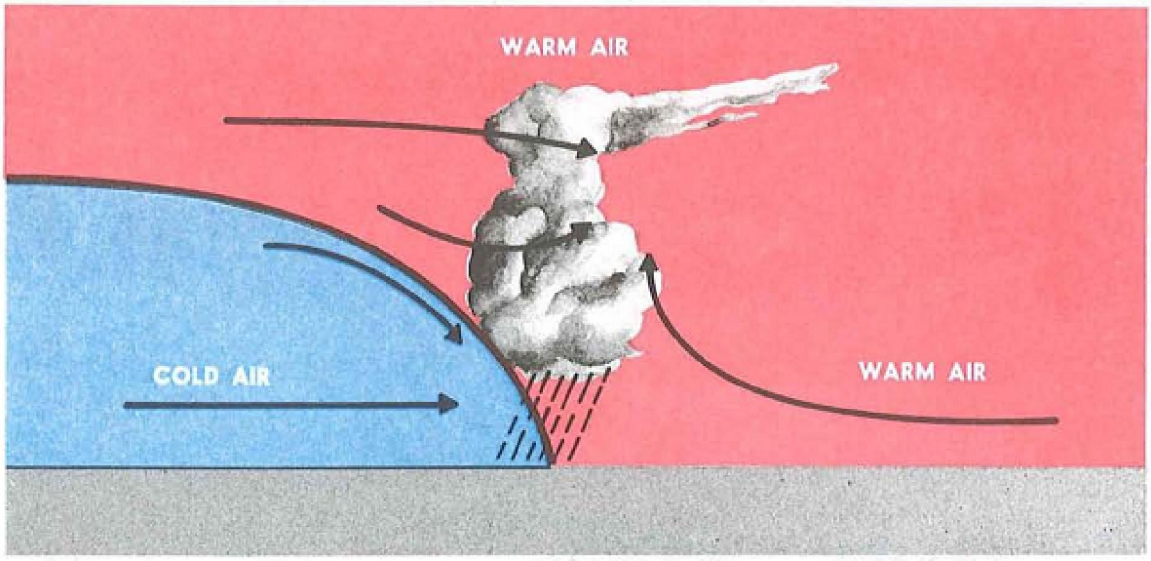
WARM AIR
COLD AIR
WARM AIR

图 72

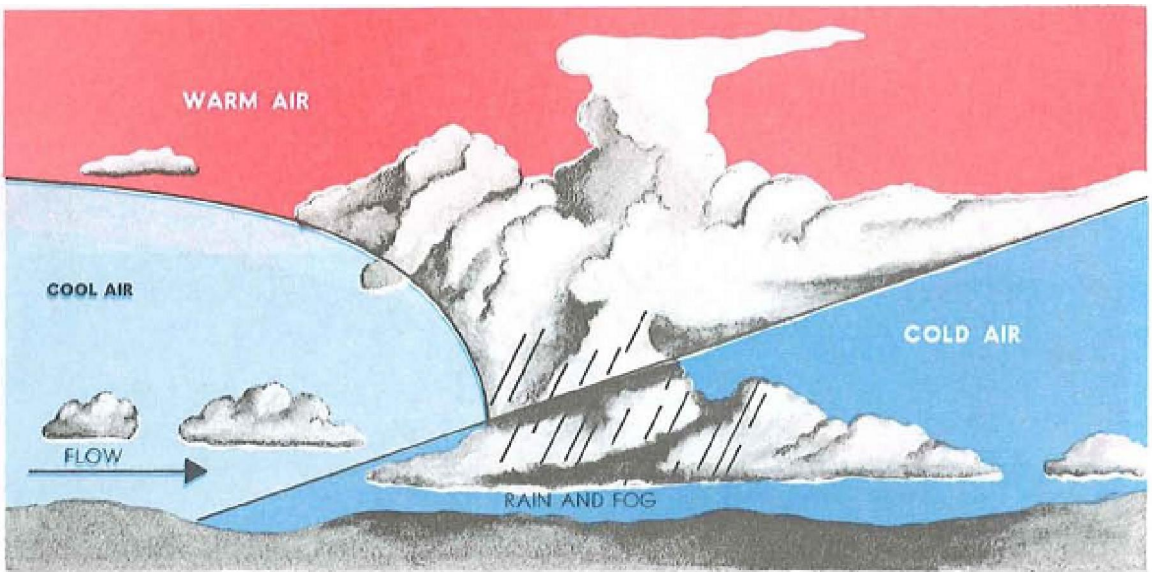
WARM AIR
COOL AIR
COLD AIR
FLOW
RAIN AND FOG

图 73

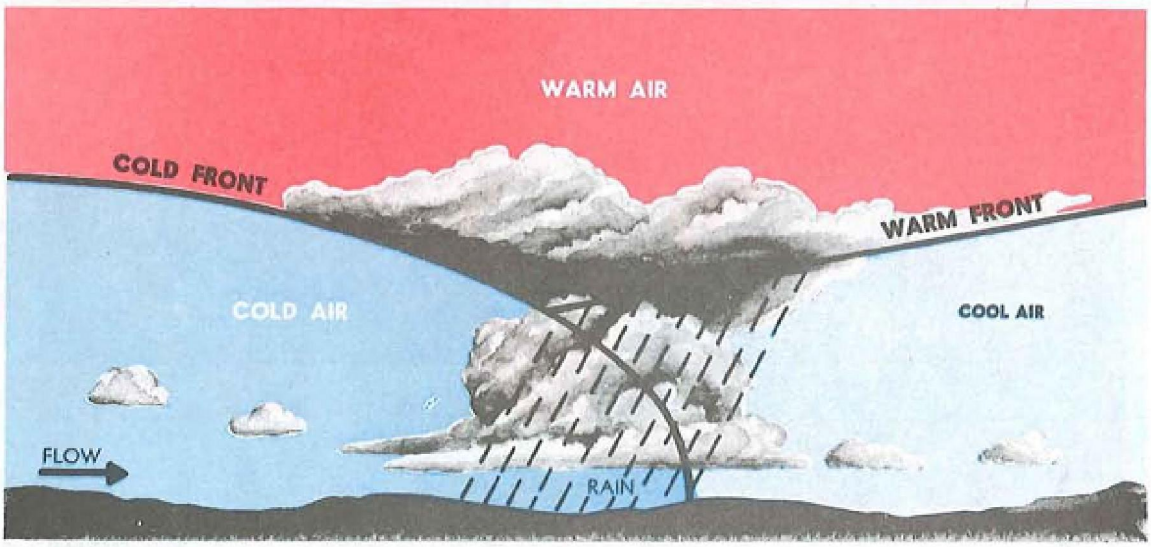
WARM AIR
COLD FRONT
WARM FRONT
COLD AIR
COOL AIR
FLOW
RAIN

图 74

不稳定线

不稳定线（instability line）是一条狭长的非锋面线（nonfrontal line）或一条对流活动带（band of convective activity）。如果对流活动发展成了雷暴（图 75），这条不稳定线被称为飑线（squall line，见第 11 章）。不稳定线形成与潮湿的不稳定空气中。它可能在锋面之外的其他地方形成，但是多数时候它生成与冷锋前缘，有时还会运动到锋面之前去。不稳定线最常见的发生地点在露点锋面（dew point front），或称为干线（dry line）。这一位置的不稳定线常常激发成严重的雷暴。

露点锋或干线

一年中的很多时候，露点锋（dew point front）在西德州和新墨西哥州东部的平原上很常见。潮湿的空气从墨西哥湾向北飘，靠近了从西南方向飘来的干燥、略微稠密的空气，形成锋面。这两个气团几乎没什么不同，除了湿度不一样。这种锋面被称为“干线（dry line）”。在潮湿那一侧的区域，夜晚和清晨常常发生低云和雾；同时，在干燥那一侧天空晴朗。在春天和夏天的前几个月，德州、奥拉巴马州、堪萨斯州以及更东边的一些区域，干线所在的区域大量产生了飑线和龙卷风。

图 75（网上图片）

锋面和飞行计划

地面天气图很清晰地描绘出了锋面。将它与其他预告图、特殊的分析结合，可以帮助你预计航路上的天气情况。了解锋面的位置和相伴的天气可以帮你确定能否按计划飞行。你可以改变航路以避开不利天气。

锋面天气是很多变的。比如，伊利诺斯州北部受冷风影响，早晨天气阴沉，但是下午却变为飑线。亚特兰大市收暖锋影响，下午多云，预报在傍晚变为毛毛雨和浓雾。一个经过堪萨斯州的冷风创造了狂乱的雷暴，但是到了午夜，高空风却吹散了雷暴，减弱了冷风。一个慢慢靠近西雅图的太平洋锋面（a pacific front）可能会在午夜形成大雨。

如果脑海中形成了什么正在发生和将会发生什么的概念，就会对你避开不利天气带来很大帮助。比如在航路上遇到意外的不利天气，脑海中的概念就会帮助你计划备降方向。所以说，如果可以的话，一定要好好了解飞行前的天气讲解。

我们建议你再回顾一遍图 67 至图 75，再复习一遍不同锋面的天气形态和稳定情况。虽然这些图片只是多种可能性中的一部分，但是它们可以给你的飞行前计划或飞行中决断带来些帮助。

第九章 颠簸

每个人在飞行中都会遭遇到颠簸（turbulent）。所谓颠簸，就是空气在一个很短的距离内发生强烈的气流变化。小到柔和的漩涡，大到强而巨大的对流。当飞机飞过这些气流时，飞机原本平静的飞行路径被气流“推挤”成了变化的加速度。这种“推挤”就是颠簸。颠簸的范围可以只是打扰到机组或旅客休息的小震动，或严重到造成飞机结构损伤或旅客受伤。

飞机对于颠簸的反应是多样的，它取决于气流中的风速、飞机的大小、机翼的载荷、空速和飞机的姿态。当飞机从一个气流快速飞进另一个气流时，它会感受到突然的加速度变化。显然，当飞机本身的速度就不快时，这种加速度的变化就会温和多了。所以，在颠簸中飞行的首要规则是减小空速。你的飞机手册上应该有穿过颠簸的建议空速（recommended turbulence penetration speed）。

如果知道颠簸会在哪里发生，将帮助飞行员避开那些区域，或者减小颠簸的不适和危险。颠簸发生的三个主要原因是：

1. 空气对流
2. 气流遇到障碍物
3. 风切变

另一种颠簸是由于飞机的尾流产生的，当机翼产生升力时就会产生尾流颠簸（wake turbulence）。以上这些原因都可能在同一时刻发生。

空气对流

空气对流是颠簸产生的常见原因，特别是在低高度时最容易发生。这些对流是局部地区的空气垂直运动，既存在上升又存在下降。对于每一个上升的空气，都会伴随着一个下降的空气作为补偿。通常情况下，发生下降气流的面积比上升气流的面积大，所以下降气流的速度要比上升气流的速度慢一些。

空气对流常常发生在少风的温暖的夏季下午。靠近地面的空气被加热，形成薄薄的一层不稳定层，热空气就会

上升。地面受热越多，对流发生的强度就越大、高度就越高。贫瘠的地面（如沙地、乱石堆和荒地）在太阳照射后温度上升比水面、植被区温度高。结果就是地面受热不均，因此在较短的距离内，对流发生的强度变化会较大。

当冷空气经过暖空气表面时，空气的底部会变得不稳定。对流从地面发展到几百英尺的上空，在冷空气中形成波浪起伏的颠簸。这种情况可能发生在任何季节，常常发生在冷风路径之后。

图 76 画的是当飞机近进时，低高度对流颠簸对其的影响。这种存在于近进区域的颠簸会造成空速的突然变化，可能会造成在低高度的失速。为了避免这种危险的失速，你的近进速度可以比正常的更大一些。这种加速的方法和上文提到的减速方法看似矛盾，其实是不相干的两件事。飞机近进时的速度已经远远低于穿过颠簸的建议空速。

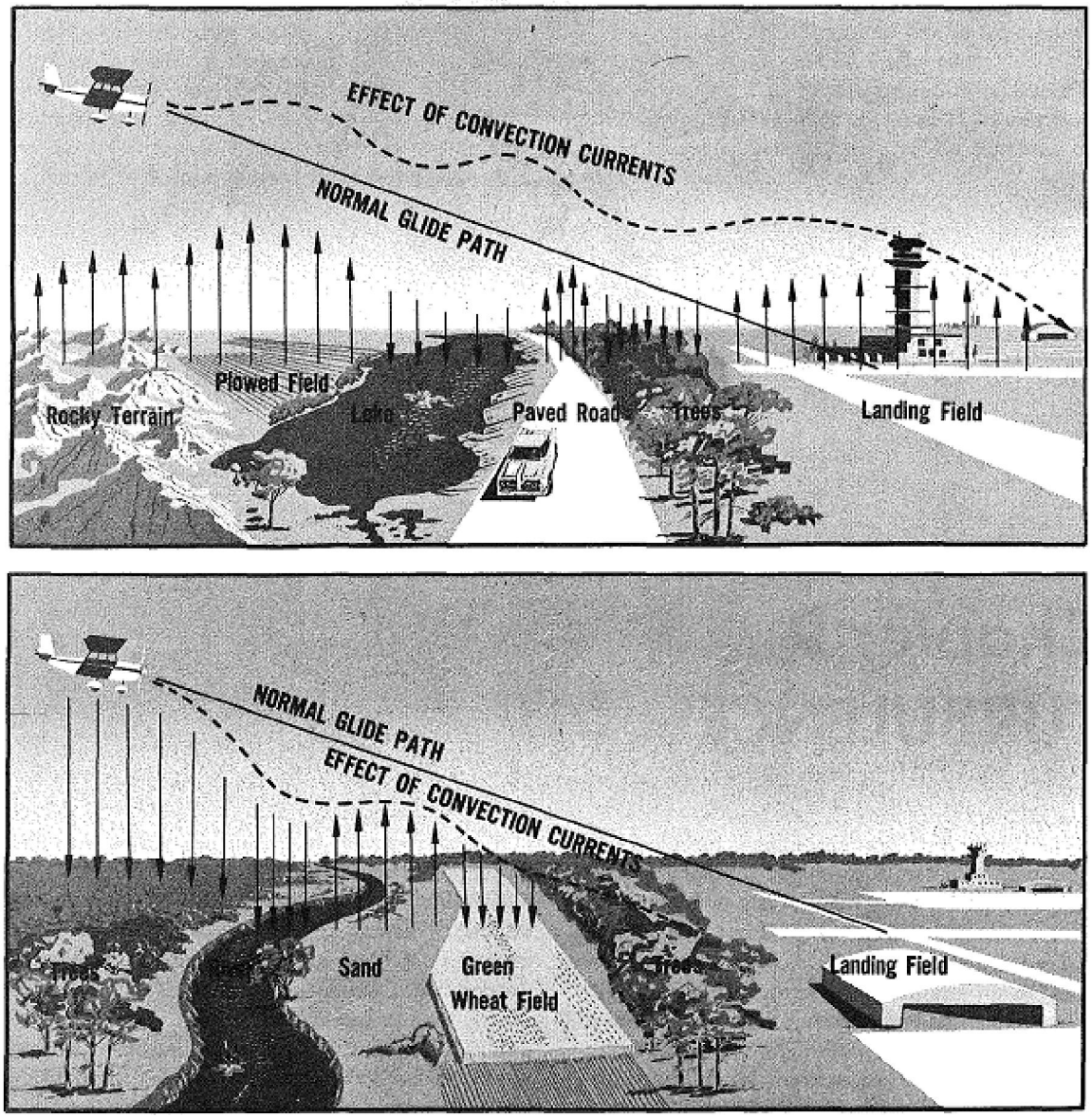

图 76

当空气上升时，因为膨胀而降温，直到它的温度和外界温度相等后，对流运动就停止了。如果对流的空气冷却到了凝结点，那么空气中的水分就形成了云。天气晴朗、阳光普照的下午，在空中形成的巨大积云就是对流强烈的表现，也是对流颠簸的标志。积云的云顶通常标明了对流运动的顶。飞行员常常感到在云中或云下颠簸严重，而云顶之上的飞行很平稳。你将会发现在积云顶之上飞行是一件十分舒服的事情（图 77）。

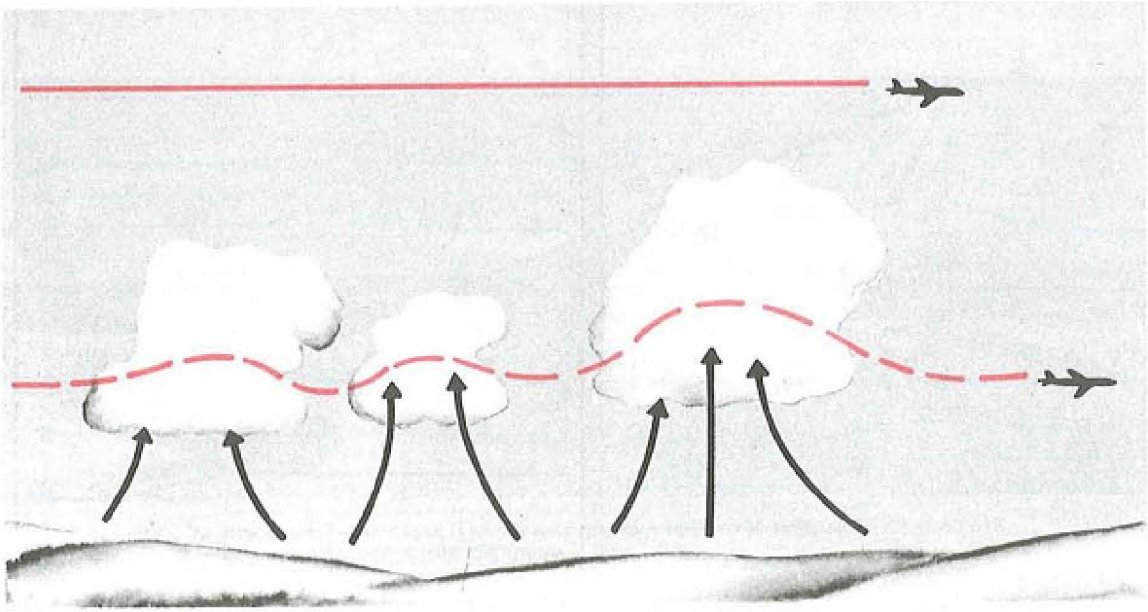

图 77

当对流发展到极高的高空时，它会形成巨大的塔状积云和带有砧状云顶的积雨云。积雨云就是严重对流颠簸的警告标志，我们将在第十一章继续讨论。

飞行员还需要明白，有的时候空气太干燥了，不可能形成积云。但是对流空气依然会形成颠簸。飞行员根本看不到颠簸的迹象，然而颠簸的感觉突然出现了。

气流遇到障碍物

当平缓的风吹过障碍物（如大楼、树木、高高低低的地形）时，空气会被扰乱成为无序的漩涡（图 78）。当飞机飞过这些漩涡时就会遇上颠簸。我们把这类颠簸归为“机械性颠簸（mechanical turbulence）”，因为颠簸的产生是由于平顺的气流被机械性地破坏了。

机械性颠簸的强度取决于风速和障碍物外表面的粗糙程度。风速越大，颠簸越强；障碍物越粗糙，颠簸越强。风把障碍物产生的颠簸漩涡向下游方向移动。移动的距离取决于风速和空气的稳定程度。不稳定空气比稳定空气更容易产生大漩涡；但是不稳定空气能快速分解一个漩涡，而稳定空气则可以使漩涡缓慢消散。

机械性颠簸也会在其干扰的空气上方形成云，云的类型可以用来判断颠簸的成因。机械性颠簸形成条状或带状的层状云；而对流颠簸形成不规则形状的云。条状排列的云可能平行于风向，也可能是垂直于风向，其中的气象原因，我们在此就不讨论了。

机场区域尤其容易受机械性颠簸的影响，而且必然会在地面形成强烈而不稳定的阵风。当飞机在阵风区域近进或爬升时，空速可能变化剧烈，甚至因此失速。在极端的阵风情况下，你可以选择一个比正常进近或爬升速度更大的速度，从而允许空速的瞬间改变。当你在如图 79 的侧风环境下落地时，要时刻警惕机械性颠簸，保持对飞机的控制。地面阵风还会对滑行造成影响。

机械性颠簸可能发生于低空飞行的任何阶段。高山会产生颠簸，颠簸延伸的高度可能远远高于山峰本身的高度。

在起伏的丘陵上飞行时，也会遇到机械性颠簸。通常这种颠簸无害，但会让你不舒服。爬高几个高度层就可减小颠簸。

当你飞过崎岖的丘陵或山区时，你会遇到真正有害的颠簸。我们必须把机械性颠簸和风速以及空气稳定性结合起来讨论。当吹过山区的风速大于 40 节时，你就可能遇到颠簸。这些颠簸的位置和强度主要取决于空气的稳定性。

如果吹过山区的空气是不稳定的，那么我们有把握确定山的迎风面（windward）存在颠簸。如果空气中有足够的水汽，那么所形成的对流云会加强颠簸的程度。当对流云分布在山顶上或延山脊分布时，对流云就可以作为山顶或迎风面存在颠簸的显著标志。

当不稳定空气穿过障碍物时，它从下风面（leeward）倾斜而下，形成危险的下行气流（downdraft）。有些时候，下行气流的速度甚至超过飞机的最大爬升率，会把你的飞机推向山腰（图 80）。因为空气在穿过障碍物时被搅动，

减小了一部分不稳定性，所以不稳定空气的颠簸不会在障碍物后持续很长的距离。

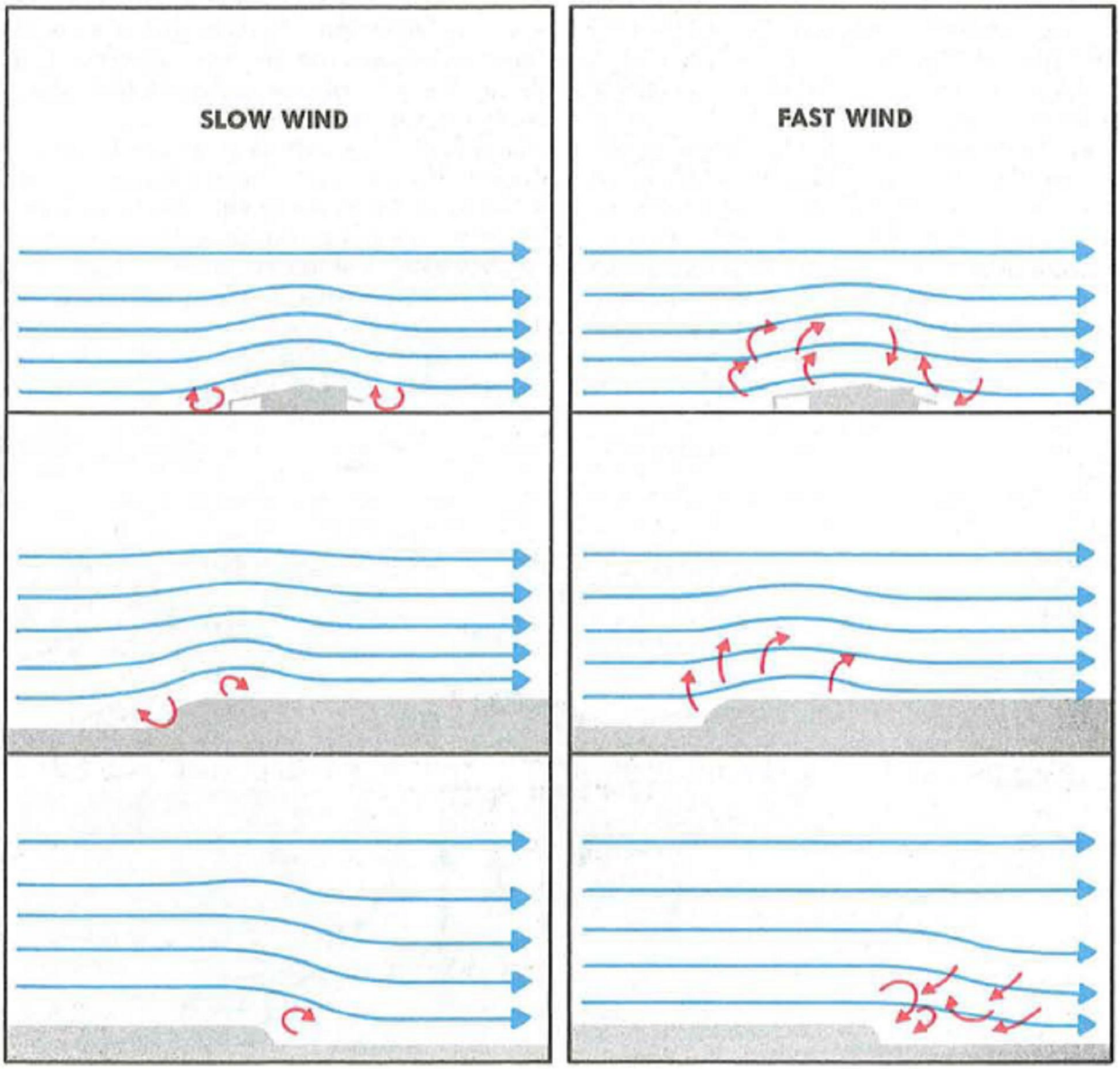

图 78

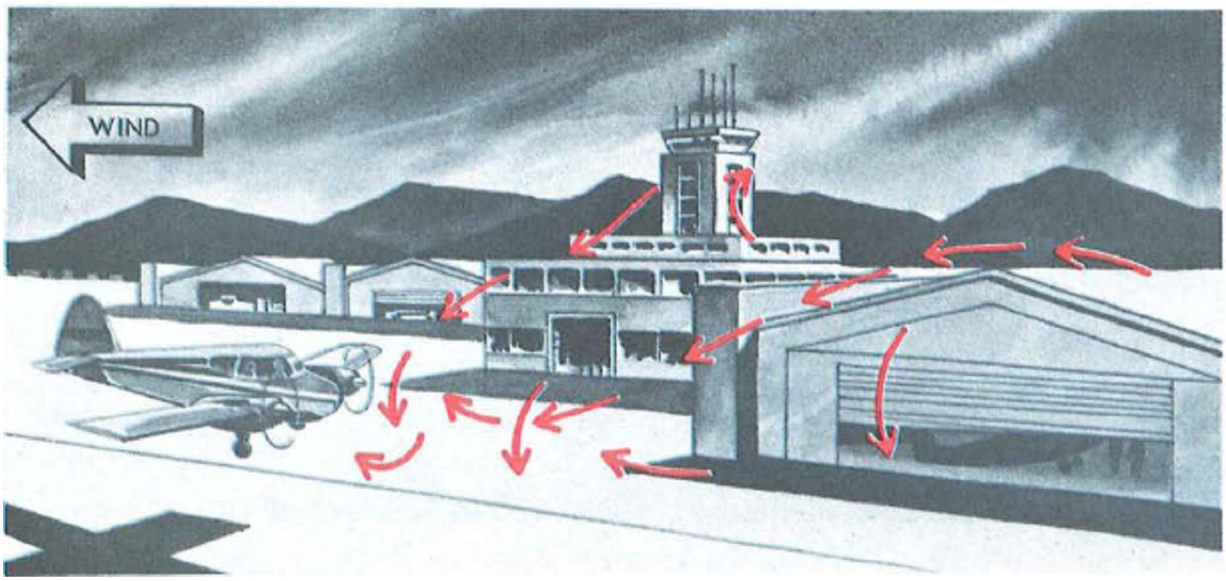

图 79

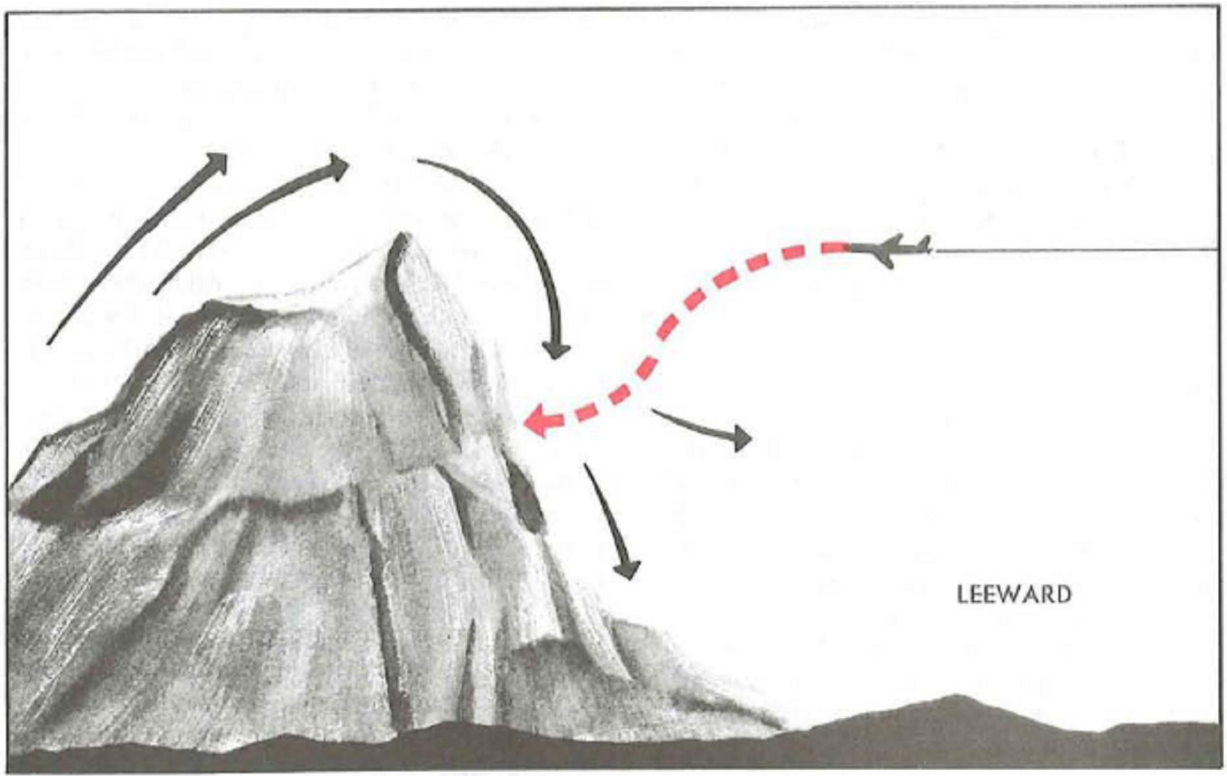

图 80

地形波

当稳定空气穿过山地区域时，颠簸的情况和先前正好相反。迎风面的气流相对平稳。气流在穿过障碍物时，趋向于挤压在同一个层面上。障碍物会对这层空气造成扰动并形成波浪，就好像障碍物扰动水面后的波浪一样。就算风快速地吹过这些波浪，它们看起来依然静止不动。这种波称为“驻波（standing wave）”或“地形波（mountain wave）”（图 81）。这种波几乎静止不动，并且伴随山地而生，因此得名。地形波可能从障碍物的下风面一直延续到 100 英里的地方。

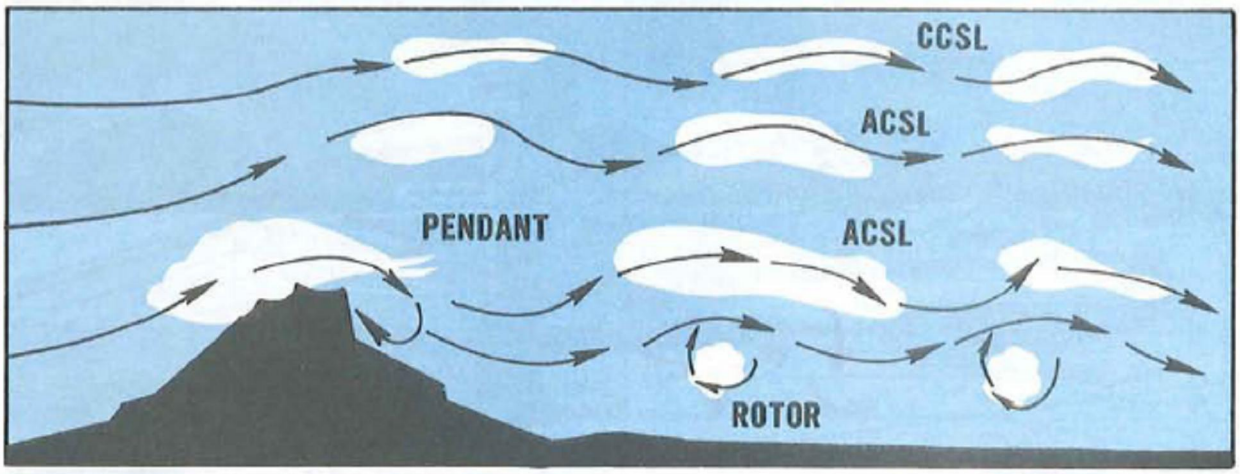

图 81

地形波的波峰有时大大高于山顶，甚至延伸到平流层的底部。每一个波峰下面是一个气旋（rotary circulation）（图 81）。这些气旋形成于山顶的高度之下，剧烈的颠簸就伴随在其旋转强烈的位置上。伴随气旋的上升和下降气流也会造成颠簸。

图 81 还画出了和地形波相伴的云。当水汽足够充分的时候，山的下风面会形成分层的云。静止波的波峰会形成静止的、豆荚装的云，称为“静止荚状云（standing lenticular clouds）”（图 82）。它们形成于上升气流，消散与下行气流，所以总体上说它们不会随着风移动位置。气旋也会形成“气旋云（rotor cloud）”。图 83 画的是一系列的气旋云，每一个波峰下都对应着一个气旋云。不过，需要记住的是，有时云的形态无法标记出地形波的存在。因为空

气实在是太干燥了。只要当空气稳定、风速等于或超过 40 节、风向吹过山峰或山脊时，地形波就可能存在，你需要时刻准备着应付颠簸的情况。

如果你飞行在地形波中，不要对颠簸的程度感到惊讶。根据颠簸情况的报告，地形波内的颠簸可能从“无”到“严重”，严重到足以损坏飞机。但是大多数时候颠簸都是介于两者之间。

图 82（来自网络）

图 83（来自网络）

山区飞行

当你准备计划在山区飞行时，一定要尽可能地收集关于风速、风向、云、空气稳定性的报告。卫星图片可以帮你找到地形波。图 84 和图 85 是从太空拍摄的地形波云系照片。但是准确的信息并不是唾手可得，所以在飞行时需

要对空中的云保持警觉。我们需要在飞行前或飞行时关注哪些形态的云呢？

当风速在山顶的高度上超过 25 节时，就预示着颠簸。当风速超过 40 节时就需要注意了。层状云代表空气稳定。静止荚状云或/且气旋云代表地形波。在山的下风面会存在数英里的颠簸，上风面飞行相对平稳。在山区上风面的对流云代表空气不稳定。靠近对流云就会有颠簸，山的两面也都有颠簸。

当你遭遇到强风，又朝着山的下风面飞行，并意图飞越山峰时，你必须提前爬升。在遭遇地形波情况下至少山前 100 英里开始爬升，其他时候至少 30 至 50 英里开始爬升。爬升至山顶之上至少 3000 至 5000 英尺，然后再开始飞越山峰。最佳的方法是朝着山脊 45 度夹角的方向靠近山峰，使你在遭遇颠簸后，能够快速撤退到稳定的空气中。当你第一次无法飞越山峰，同时你的飞机还有能力爬高时，你可以掉头后退，在更高的高度重新试一次。其他一些时候，你别无选择只能选择回头，或者绕道而行。

强风情况下，飞行在山的关口或山谷并不安全。漏斗形的关口或山谷会加快风的流速并加剧颠簸。如果在山顶的风速已经很强了，你只能再飞得高一点，或者别的方向。

山区周围的山谷的地面风可能是比较平静的。所以，当你从这些山谷起飞后，在山谷范围获得足够高度后再飞出山谷区域。和山之间保持足够的水平间隔，间隔距离足够到可以应付突发的下降气流。

图 84

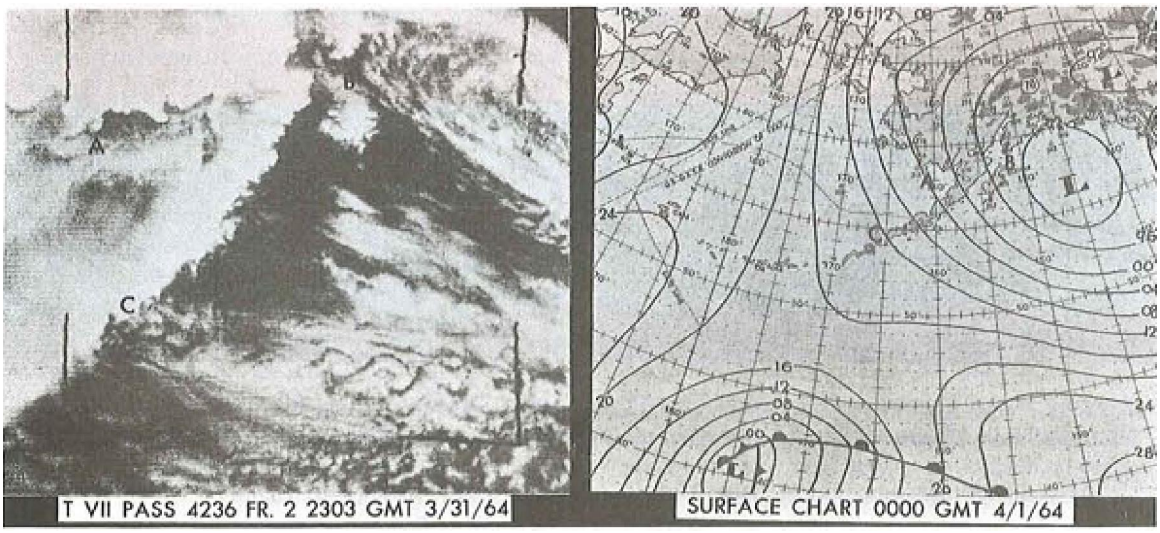

图 85

风切变

我们在第四章已经说过，风切变的产生是由于两股不同的风造成的。两股风可能风向不同，可能速度不同，也可以速度风向都不同。风切变可能伴随着风向转变或风速梯度变化，这可能出现在大气层内的任何高度。有三种情况是值得特别注意的：1）低空逆温层与风切边；2）锋面内的风切变；3）伴随着高空急流或强环流的晴空颠簸（CAT: clear air turbulence）。高空晴空颠簸将在第十三章“高空天气”中讨论。

风切变和低空逆温层

低空逆温层会在晴朗的夜晚，静风或风速较小的地面形成，我们在第二章已经了解过。在逆温层之上的风速可能相对较强。如图 86，风切变将在逆温层的边缘，静风和强风之间形成。在风切变区域的漩涡造成了经过这一区域飞机的空速波动。无论飞机是起飞后爬升或者是进近下降，都会穿过逆温层的风切变，因为此时空速接近失速速度，所以空速的波动会很危险，特别是在靠近地面的地方，空速波动到失速速度时非常危险。

因为地面为静风或风速很小，所以你可能从跑道的任意一头起飞落地。你起飞的方向可能正好就是逆温层上的风向，当你爬升到逆温层之上时，可能会遭受到突然的顺风，甚至可能失速。同样的，当你顶风飞入逆温层时，顶风会突然消失，也会造成飞机突然失去空速，可能造成失速。

当你在晴朗天气的日出前后几小时准备起飞或落地时，做好应付逆温层的准备。如果你从预报得知 2000 英尺至 4000 英尺之间的风速超过 25 节时，基本上可以肯定逆温层上存在风切变。你应该增加一点起飞爬升或近进的速度，从而减小颠簸或风速变化时失速的可能性。

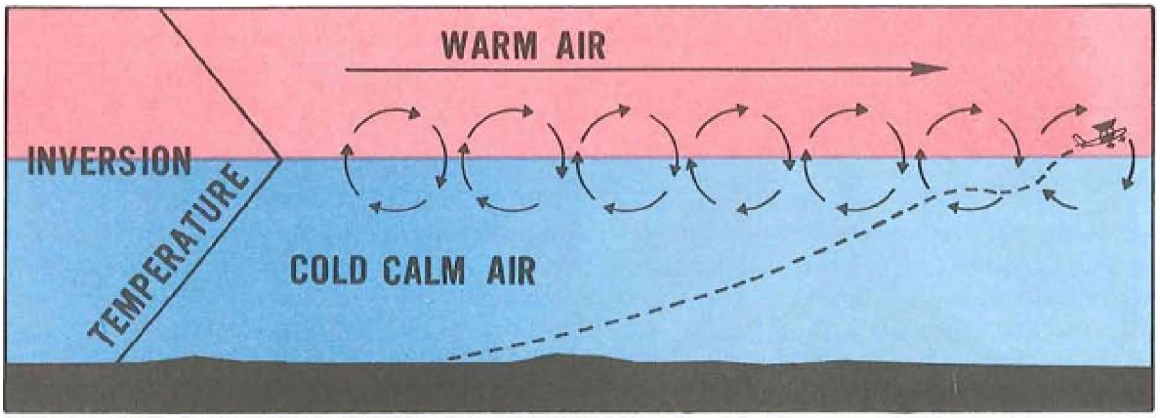

图 86

锋面内的风切变

你在第八章中已经学过，锋面带有很多危险天气。两个干燥的气团之间也可能产生锋面，这种锋面没有云。即使如此，锋面内的风也会突然改变，并产生风切变颠簸。颠簸的程度取决于风切变的程度。当飞过锋面内的颠簸时，按照你的飞机手册中关于应付颠簸的程序操作。

尾流颠簸

飞机的机翼通过使空气加速下降来产生升力。因此当机翼产生升力的同时，机翼划过的空气被向下推动，并产生旋转运动，在翼尖产生漩涡。当起落架承受所有重量时，翼尖就不会产生漩涡。一旦飞行员开始操纵飞机，漩涡就产生了。如果漩涡可以被看见的话，图 87 画的就是飞机离地后产生的漩涡。这些漩涡持续发生，直到飞机再次落地。

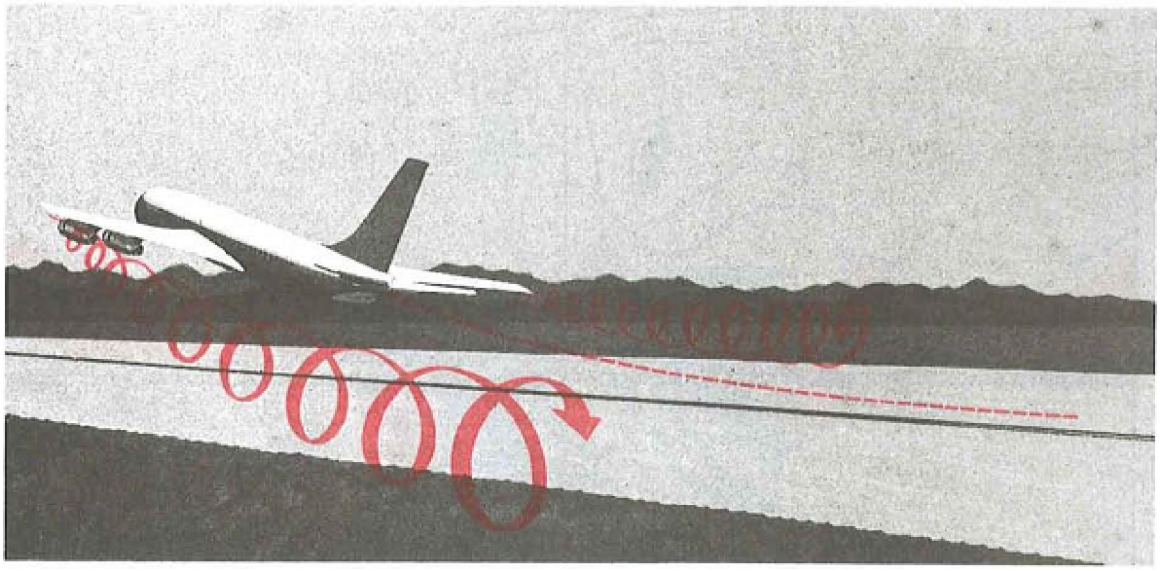

图 87

这些漩涡向后、向外延伸。同时，它们也会随着风向飘动。漩涡的强度和飞机重量成正比，以及和其他一些因素成比例。所以，尾流颠簸最容易发生在大型重型飞机的后面，而在轻型小飞机的后面不会有严重的颠簸。通常情况下，只有当你尾随着大型飞机后面才会有问题。

尾流颠簸可能会持续数分钟，甚至在飞机已经飞出视线后，依然徘徊在空中。在有管制的机场，管制员会警告那些在可能颠簸周围的飞行员。但是，当你没有管制员帮助时，你可以按以下几个方法操作。大多数的喷气飞机在起飞时，大约在起飞滑跑的一半距离开始抬轮。因此，漩涡也大约从滑跑的一半距离开始产生。螺旋桨飞机后的涡流会在飞机离地后的一小段距离内开始产生。当你跟随在落地的飞机后面，不论它是那种型别的飞机，前机产生的漩涡大约会在前起落架落地之后消失。当遇到重型机和你使用同一条跑道时你需要特别注意以下几点：

如果在一架落地的重型飞机后落地，你可以保持在它的进近路线之上进近，并在它前轮触地点之后落地。（图 88A）

如果在一架起飞的重型飞机后落地，你只能在它起飞滑跑的一半距离内的跑道上完全落地（图 88B）。

如果在一架起飞的重型飞机后起飞，你必须在它起飞滑跑的一半距离之前拉起来，并且保持足够的上升率，以便一直保持在重型飞机的起飞路径之上（图 88C）。

如果在一架落地的重型飞机后起飞，你只能滑行至重型飞机前轮触地的地方再起飞，并且你要认真考虑一下，剩下的跑道距离是否还足够安全起飞（图 88D）。

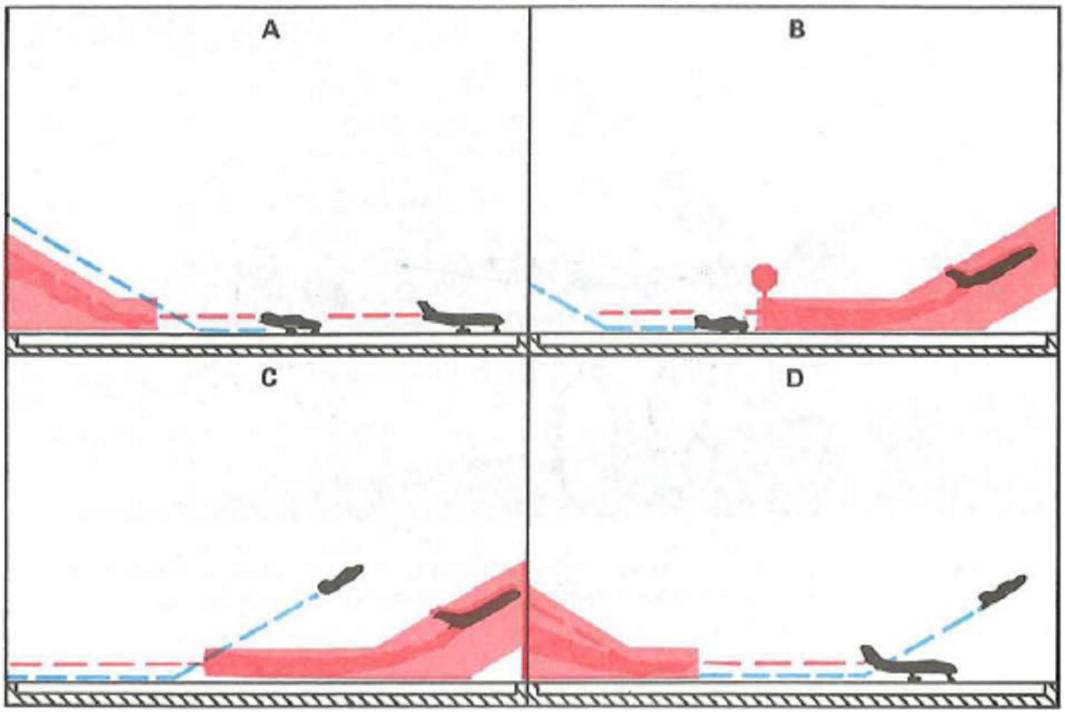

图 88

如果你使用的是平行跑道，并且存在侧风时，你在重型飞机的上风位置就可以不考虑尾流颠簸。不要在重型飞机的下风位置起降。当使用交叉跑道的时候，你可以安全地使用上风位置的那一半跑道。你可以在起飞飞机滑跑的一半距离点之后穿越它。你也可以在落地飞机前轮触地点之前穿越它。如果以上这两种方法都无法事先，你只能等 5 分钟左右，让漩涡消散或吹离跑道。

以上所说的流程都是很初级的。对付尾流颠簸主要是运行上的问题，而不是气象上的问题。FAA 会周期性地发布咨询通告。如果你飞往那些不经常飞的机场时，我们强烈建议你读一下最新的有关尾流颠簸的咨询通告。所有的咨询通告都在 FAA 网站“法规->咨询通告”目录下。

总结

我们已经讨论了颠簸的成因、分类，并且提供了几种避免或减小颠簸危险的办法。但是颠簸发生的强度和时间是相辅相成的。预报的颠簸空域与可用的飞行空域比起来很小，但是和局地的危险情况比起来面积却相对较大。因此，尽管目前看来颠簸范围的预报是准确的，但是精确的颠簸地点预报是不可能实现的。

通常情况下，当飞行员收到预报后，他可以计划着避开最可能发生颠簸的区域。然而，即使最细致的计划，也可能使你误入歧途，经历颠簸。因为目前没有任何仪器可以直接观测到颠簸。地面人员只能通过机组报告得知颠簸的存在与否。

帮助你的飞行员朋友和气象服务工作——飞行员报告

因为颠簸对于飞机和乘客的影响程度不同，为了使报告或预报更具实际意义，颠簸被分为不同强度。《航空气象服务（AVIATION VEATHER SERVICES）（AC-0045）》的十六章描述了颠簸的不同强度。你可以根据这个文件的描述来报告你的颠簸程度。