第4章 地球表层的水分循环

第1节 地球上水圈的结构
第2节 蒸发过程与凝结过程
第3节 降水过程与入渗过程
第4节 地表径流与地下径流
第5节 水分循环与水量平衡

第1节 地球上水圈的结构

引子：水的行星

一、纯水的特性

二、水量的分布

引子：水的行星

1. 地球表层充满了水

- 海洋面积占71%;
- 陆地表面分布着湖泊、河流和大陆、高山冰川，生物体内含有大量的水;
- 地球内部含有地下水体;
- 大气圈中含有水汽，形成云的覆盖;
- 人体质量的60％是水。

2. 地球表层的水是在不断运动着的

- 调节能量平衡
- 控制天气和气候
- 决定水资源的分布
- 支撑人类社会经济的发展
- 塑造地表的形态
- 影响土壤的形成
- 影响生物群落的分布

一、纯水的特性

1.水分子的结构

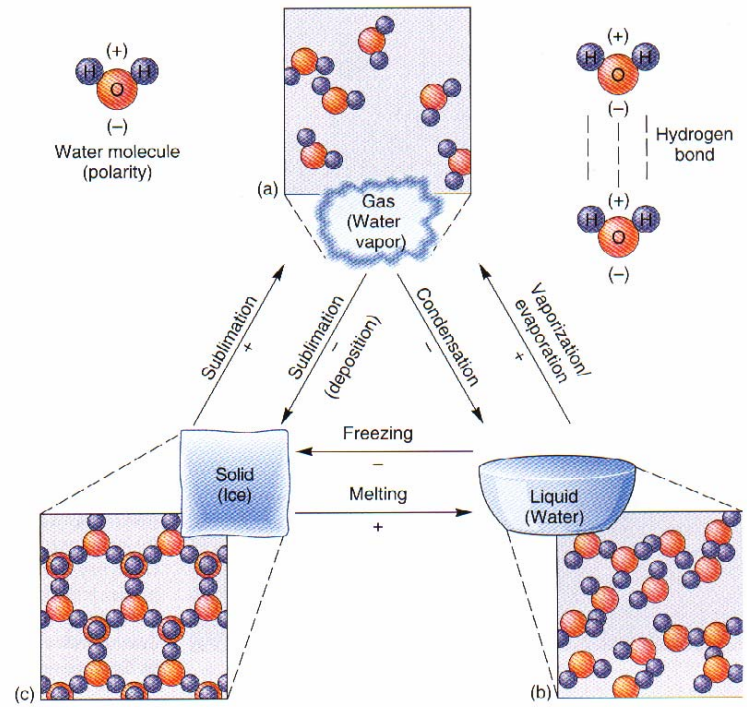
- 水是由氧原子和氢原子通过共价键结合在一起的产物。
- 水分子的极性：氢原子一端微显正电，氧原子一端微显负电。
- 氢键：极性使水分子之间相互吸引，键合在一起。

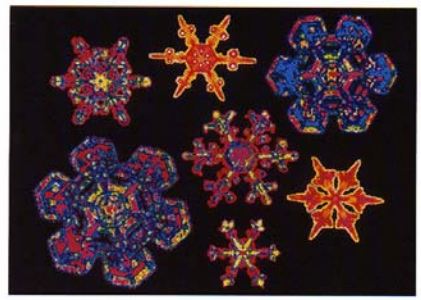
2.纯水的理化性质

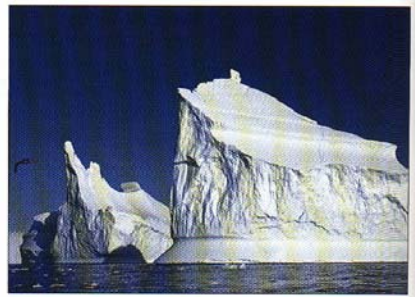
- 很强的溶解能力：57种元素溶于水。
- 表面张力：液体表面任何两部分间具有的相互牵引力。
- 毛细现象：水在细管中沿着管壁向上攀升的现象。

3. 纯水的相变

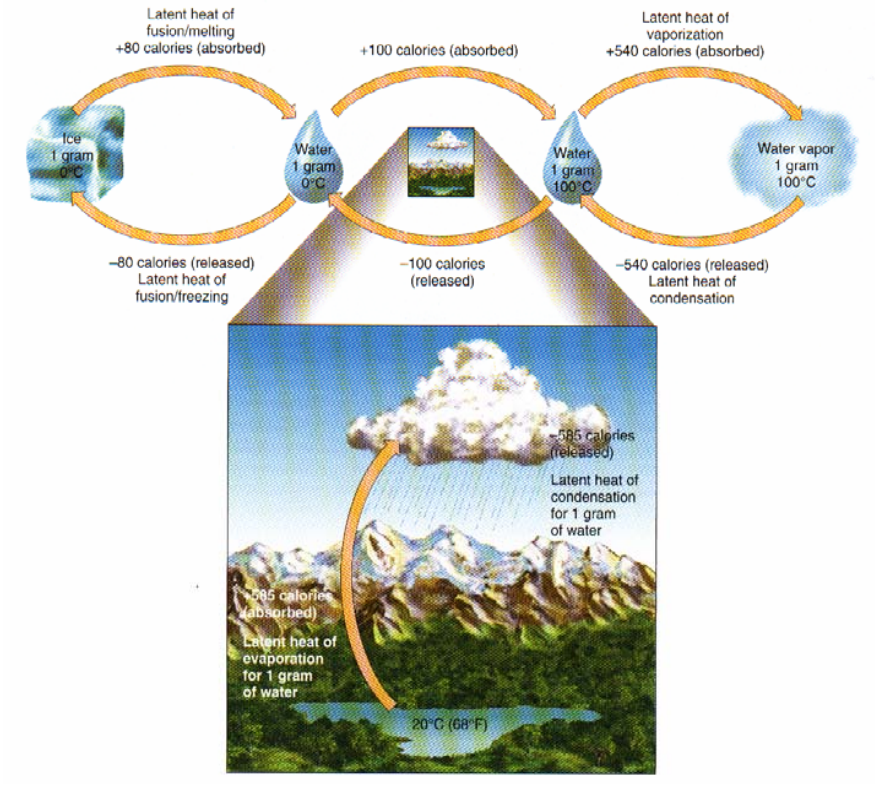
- 特点：水分子间相对吸引力的变化
- 本质：吸收热能和放出热能的过程
- 吸热-无序化过程：蒸发、融化和升华
- 放热-有序化过程：凝结、冻结和凝华







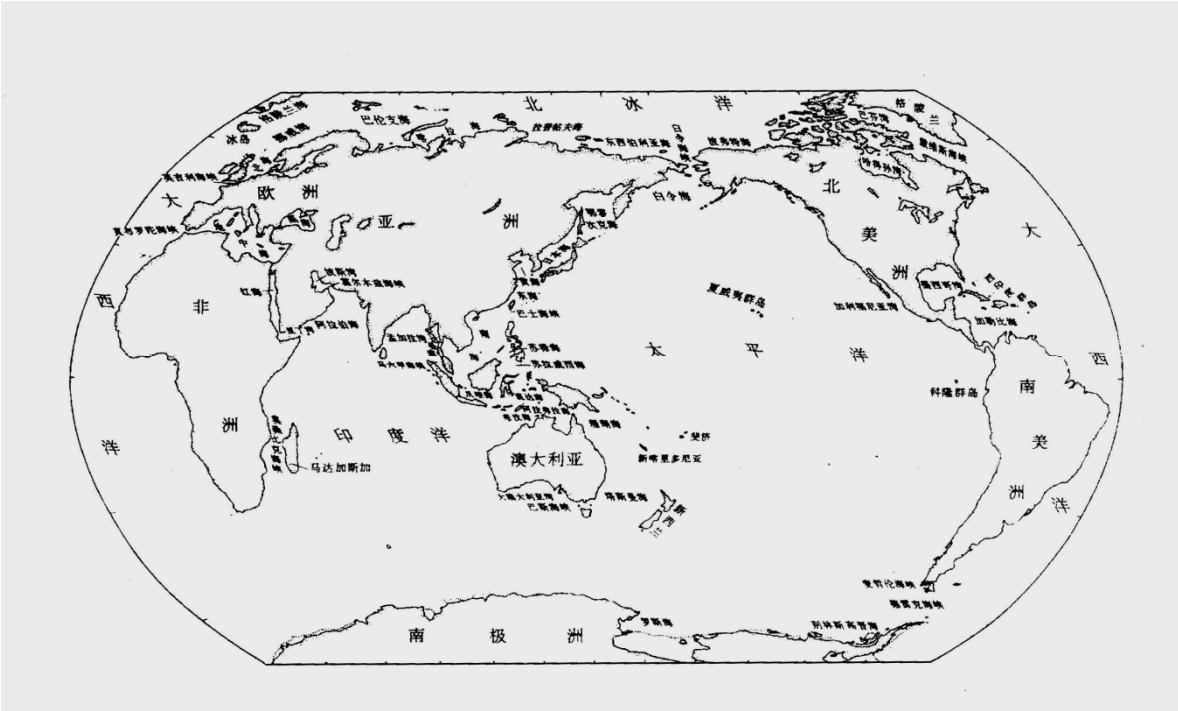
- 大气圈包含着巨大的潜热能量，水的潜热交换影响能量的传递和全球温度的分布，并驱动着全球天气系统的变化。



二、水量的分布

（一）海洋水

1. 洋是远离大陆的海洋主体部分，面积约占海洋总面积的90.3%，分为太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋。



2. 海是海洋的边缘部分，全世界共有54个海，面积占海洋总面积的**9.7%**。按照海所处的位置可将其分为陆间海、内海和边缘海。

3. 海湾是洋或海延伸进大陆且深度逐渐减小的水域。

4. 海峡是两端连接海洋的狭窄水道。

（二）陆地水

1.地表水

- 固态水：冰川与永久积雪、永冻层中冰。
- 液态水：湖泊水（咸水湖和淡水湖）、土壤水、沼泽水、河流水、生物水。

2.地下水

- 咸水和淡水

（三）大气水

地球上的水储量

水体	水储量		咸水		淡水	
	(×10^3 km^3)	(%)	(×10^3 km^3)	(%)	(×10^3 km^3)	(%)
海洋水	1 338 000.0	96.54	1 338 000	99.04		
冰川与永久积雪	24 064.1	1.74			24 064.1	68.70
地下水	23 400.0	1.69	12 870	0.95	10 530.0	30.06
永冻层中冰	300.0	0.02			300.0	0.86
湖泊水	176.4	0.013	85.4	0.006	91.0	0.26
土壤水	16.5	0.001			16.5	0.047
大气水	12.9	0.0009			12.9	0.037
沼泽水	11.5	0.0008			11.5	0.033
河流水	2.12	0.0002			2.12	0.006
生物水	1.12	0.0001			1.12	0.003
总计	1 385 984.6	100	1 350 955.4	100	35 029.2	100

结论：液态淡水是一种非常有限的自然资源

- 河流水占地球上淡水总量的0.006％！
- 湖泊淡水占地球上淡水总量的0.26％！
- 地下淡水占地球上淡水总量的30.06％！
- 三者合计占地球上总水量的0.0079%!

第2节 蒸发过程与凝结过程

一、蒸发及其影响因素

二、全球蒸发量的分布

三、凝结的条件

四、主要凝结物

一、蒸发及其影响因素

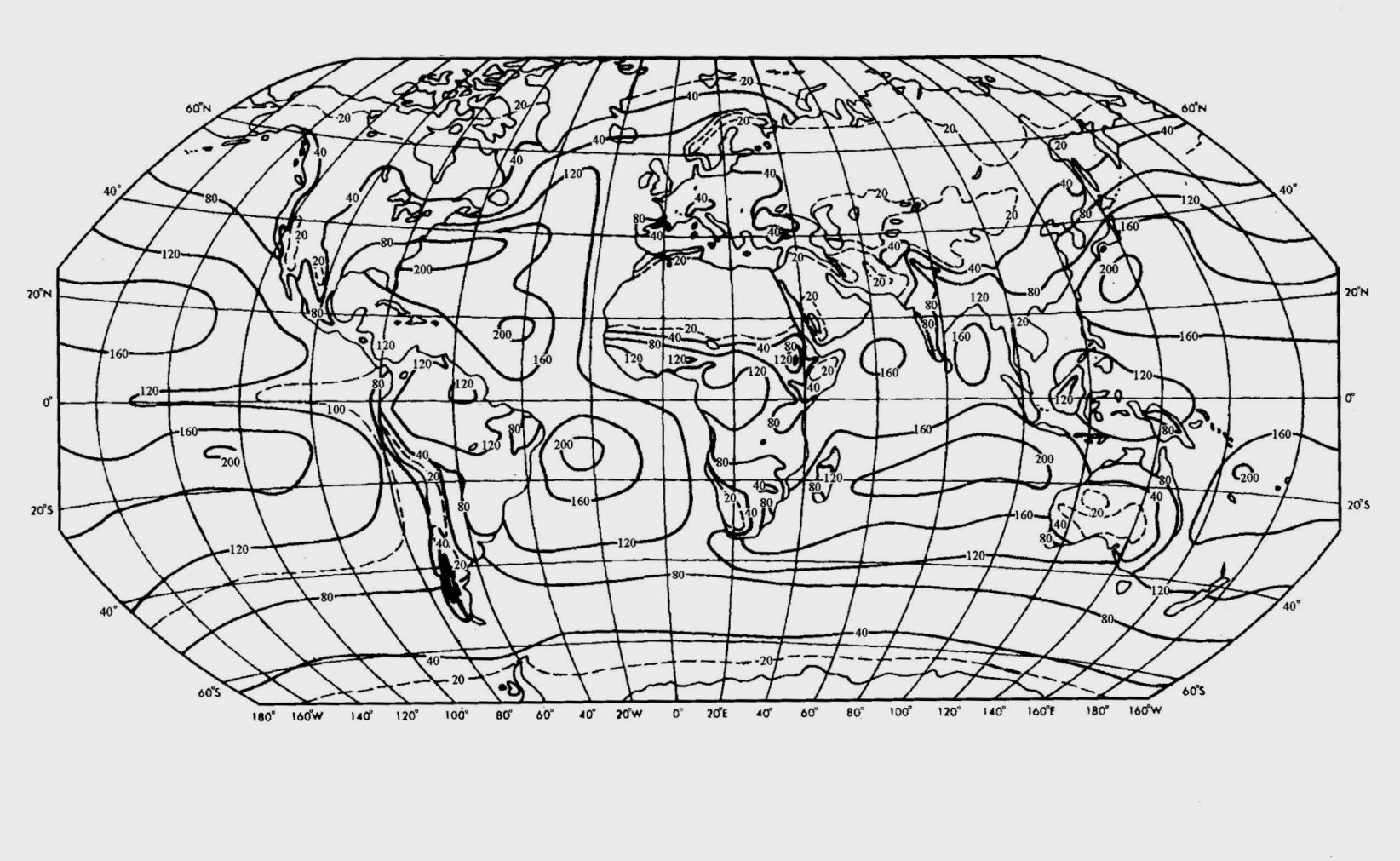
定义：水从海洋和陆地表面进入大气的输送过程。

（一）水面蒸发：蒸发面温度，风，空气湿度和蒸发面性质；

（二）土壤表面蒸发：土壤含水量，地下水埋藏深度，土壤孔隙的数量，以及气象因素；

（三）植物蒸腾：种类，生长期，土壤供水状况，以及气象因素。

二、全球蒸发量的分布


60°N
40°
20°N
0°
20°S
40°
60°S
180°
160°W
140°
120°
100°
80°
60°
40°
20°W
0°
20°E
40°
60°
80°
100°
120°
140°
160°E
180°
160°W

1. 海洋上

- 最大值位于副热带海洋，向高纬递减。
- 湾流和黑潮暖洋流上空有蒸发的极大值。
- 赤道海区蒸发相对较弱（无风，上升流）。

2. 陆地上

- 最大值出现在赤道地区，向高纬递减。
- 极小值出现在南、北极圈内，沙漠、戈壁和寒冷的大陆内部。

三、凝结的条件

定义：水由气态转化为液态的过程。

（一）凝结核：能促使水汽凝结的微粒，如尘埃、烟灰、污染物、海面上空的盐粒、冰晶。

（二）空气达到过饱和状态

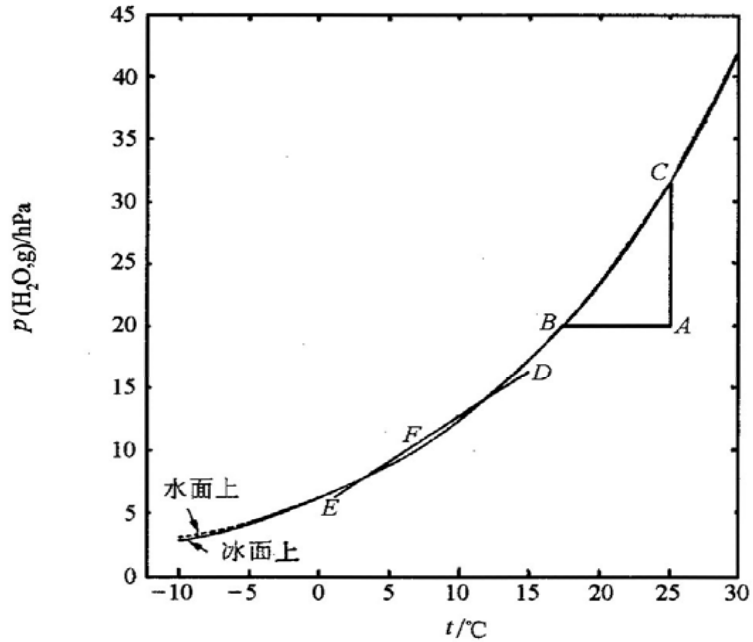
1. 暖水面的蒸发：冷空气流经暖水面，当蒸发使暖水面的水汽压逐渐接近于水面上的饱和水汽压时，其上的冷空气就会因达到过饱和状态而发生凝结。

2. 空气的冷却

- 绝热冷却：空气上升，温度降低，饱和水汽压减小，当空气上升到一定高度时便达到饱和，再上升就会达到过饱和而凝结。
- 辐射冷却：在近地面层，夜间空气和地面因散失热量而冷却，如空气中水汽比较充足，就会达到过饱和而发生凝结。
- 平流冷却：较暖的空气流经冷地面，暖空气显著降温，达到露点温度以下时，就有可能发生凝结。

3.空气的混合:

温度差别大又很潮湿的空气等量地充分混合，使空气达到过饱和，发生凝结。



图中纵坐标原为 mbar（1 bar＝10^5 Pa，1 mbar＝1 hPa）

四、主要凝结物

（一）地面凝结物——露和霜

- 露点温度在0℃以上，凝结物为微小的水滴，称为露;
- 露点温度在0℃以下，水汽直接凝华为白色的冰晶，称为霜。
- 霜冻是指日均温高于0℃的温暖时期，土壤和植物表面的温度骤降至0℃以下，使植物遭受冻害或死亡的现象。

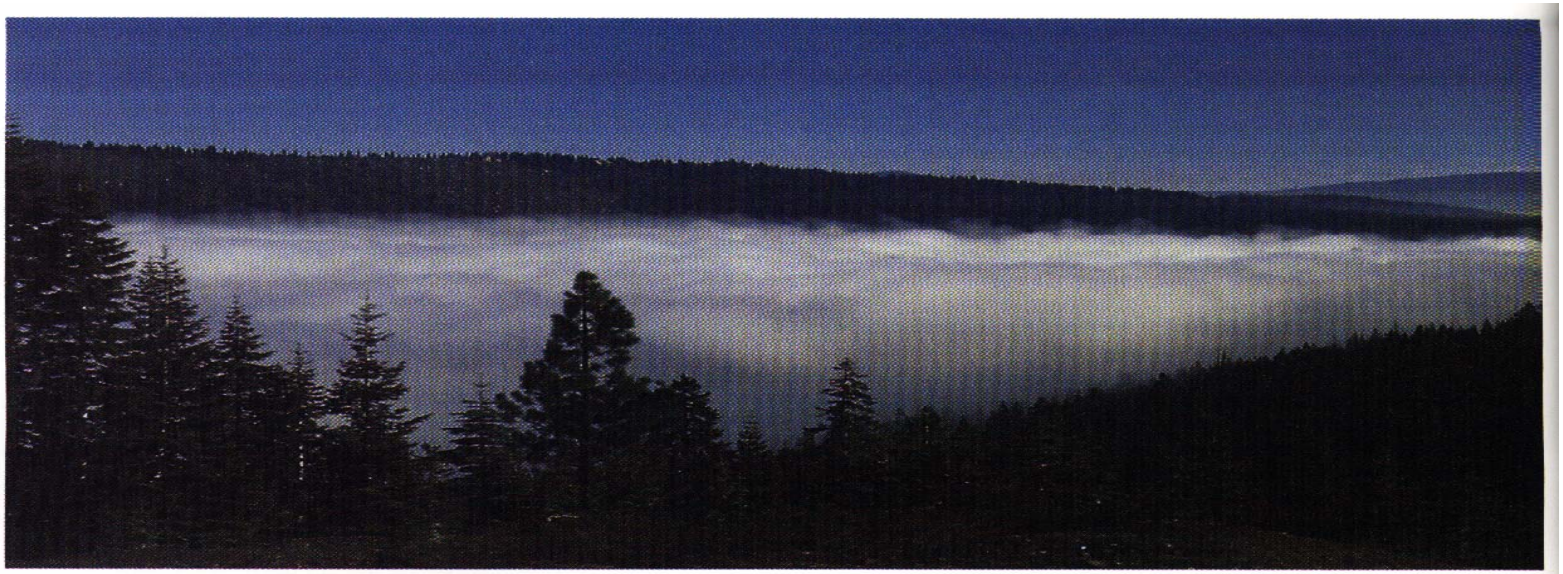
草叶上的露珠

针叶上的白霜

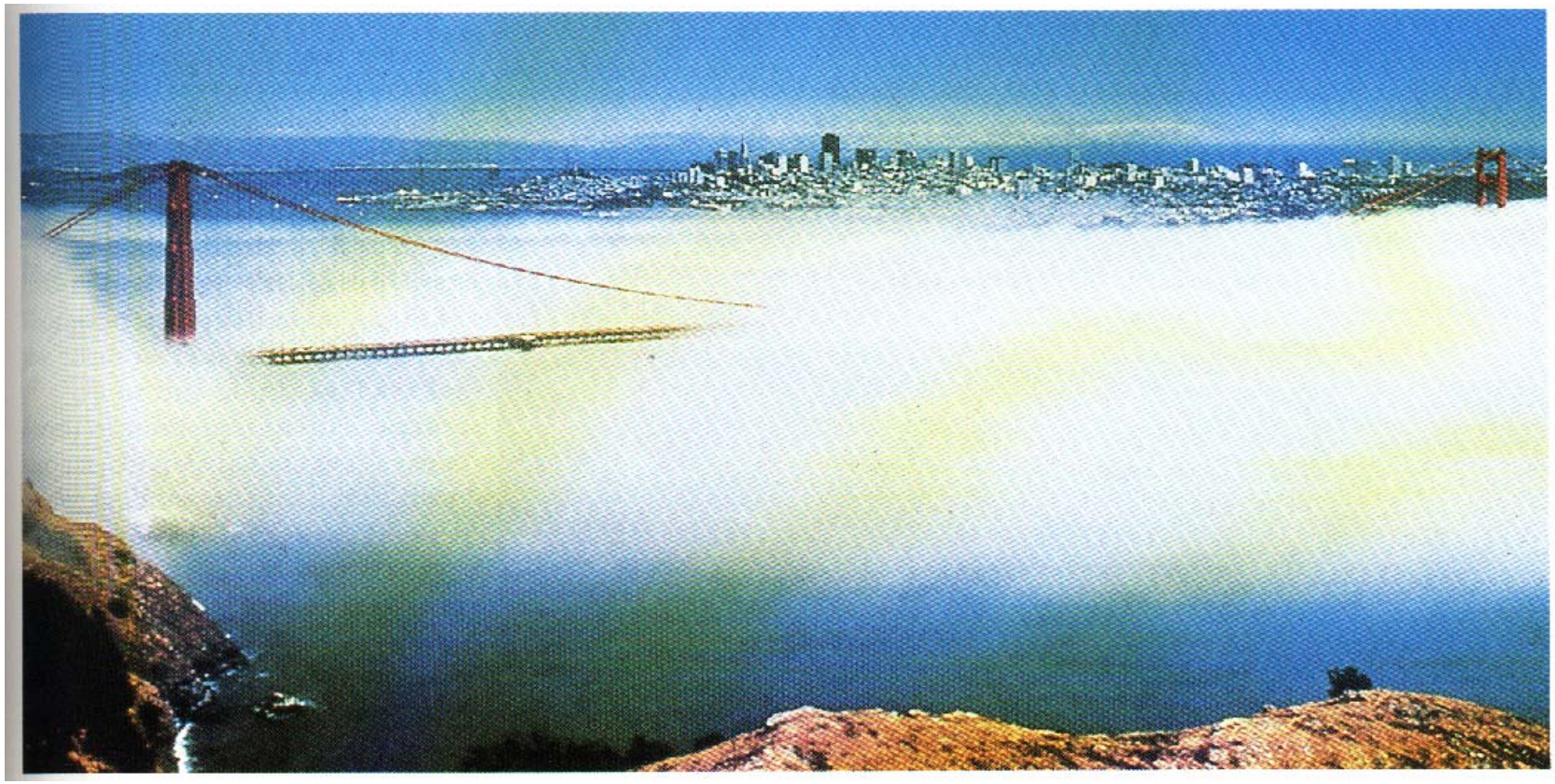
（二）低空大气凝结物——雾

定义：当大量的细小水滴或冰晶悬浮在近地面的空气层中，使能见度小于1km时，称为雾。

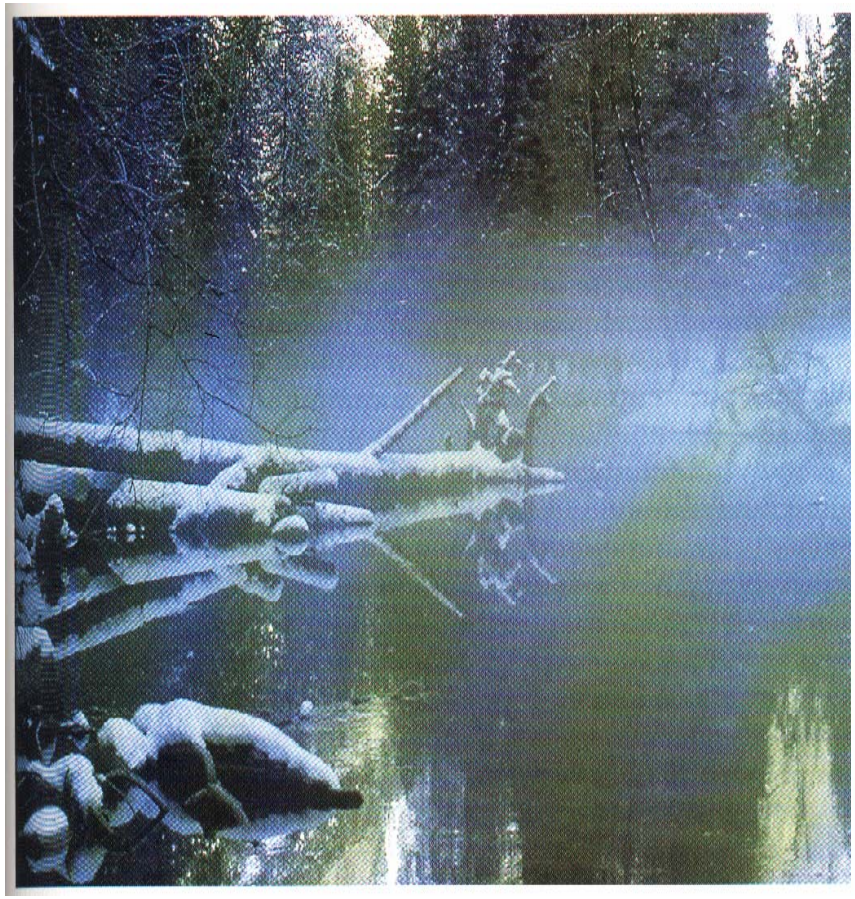
1.辐射雾：由地面辐射冷却形成，常伴有辐射逆温，厚度小，具有日变化。

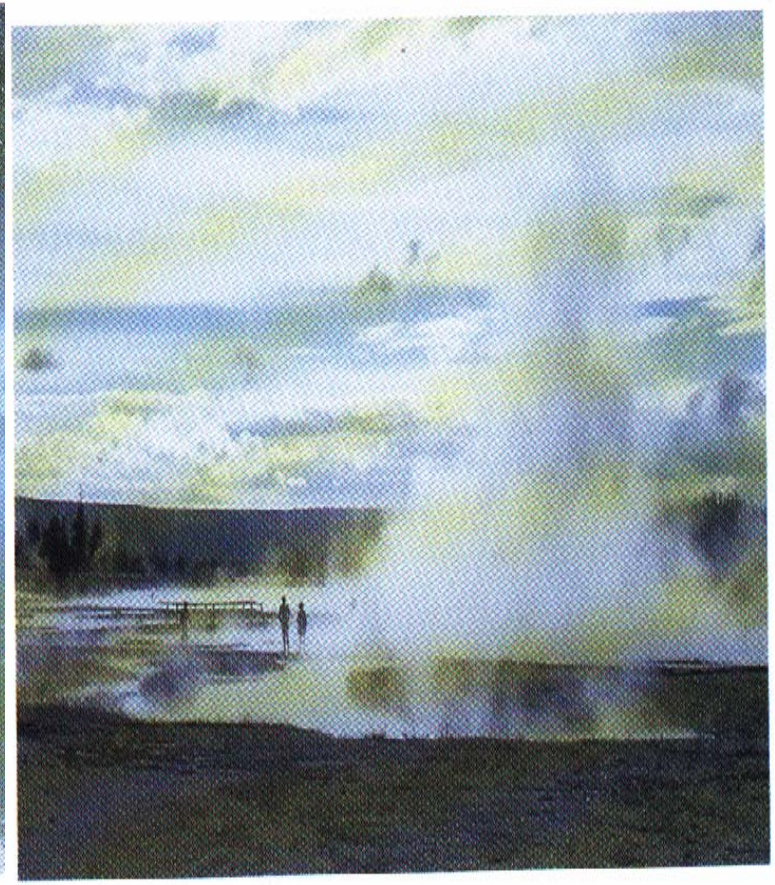


2.平流雾：由暖湿空气在流经冷的下垫面时逐渐冷却形成，伴有平流逆温，厚度可达200m。



3.蒸气雾：冷空气流经暖水面时，暖水面蒸发使其上空气达到过饱和而形成。





（三）高空大气凝结物——云

1.空气上升的形式

- 空气在水平方向上遇山丘阻挡而爬升;
- 空气水平辐合和沿锋面抬升;
- 近地面空气受热产生的对流上升。

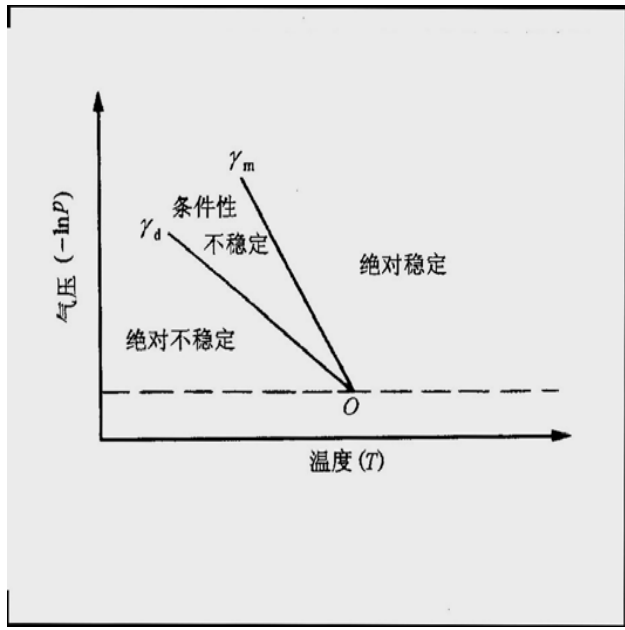
2.大气稳定度

定义：气块受到垂直方向扰动后，具有返回或远离原来平衡位置的趋势和程度。

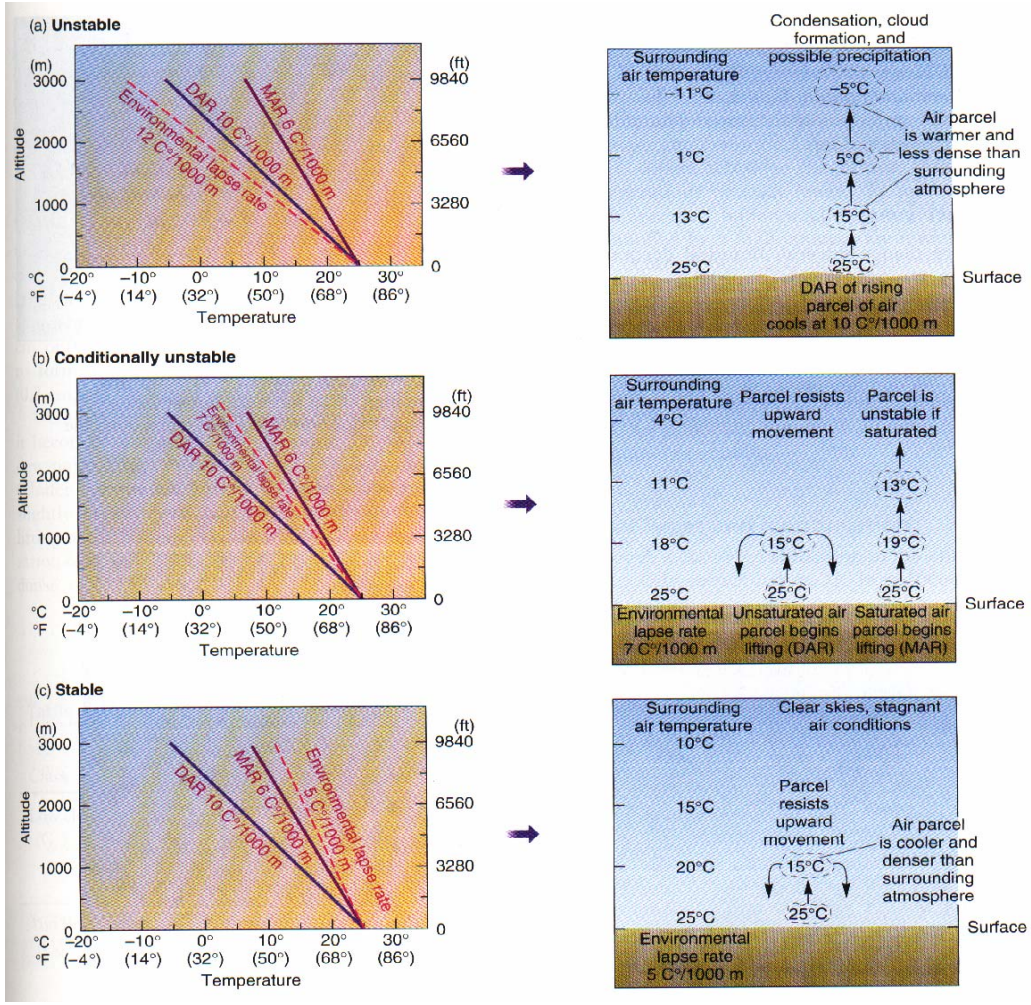
- 绝热垂直减温率 γ：气块绝热上升单位距离时的温度降低值。干绝热垂直减温率 γ_d > 湿绝热垂直减温率 γ_m。
- 某一气层是否稳定取决于运动着的空气团比周围空气是轻还是重。在气压相同的情况下，两团空气的相对轻重由气温决定。

大气稳定性判据:

- 当 $\gamma < \gamma_m$时，绝对稳定;
- 当 $\gamma > \gamma_d$时，绝对不稳定;
- 当 $\gamma_d > \gamma > \gamma_m$时，条件不稳定;
- 当 $\gamma < 0$时，称为逆温，形成对流发展的障碍。



大气稳定性图示


(a) Unstable
(m)
3000
2000
1000
0
Altitude
(ft)
9840
6560
3280
0
DAR 10 C°/1000 m
MAR 6 C°/1000 m
Environmental lapse rate
12 C°/1000 m
°C −20° −10° 0° 10° 20° 30°
°F (−4°) (14°) (32°) (50°) (68°) (86°)
Temperature
Condensation, cloud formation, and possible precipitation
Surrounding air temperature
−11°C
1°C
13°C
25°C
−5°C
5°C
15°C
25°C
Air parcel is warmer and less dense than surrounding atmosphere
Surface
DAR of rising parcel of air cools at 10 C°/1000 m
(b) Conditionally unstable
Environmental lapse rate
7 C°/1000 m
DAR 10 C°/1000 m
MAR 6 C°/1000 m
Surrounding air temperature
4°C
11°C
18°C
25°C
Parcel resists upward movement
Parcel is unstable if saturated
15°C
25°C
13°C
19°C
25°C
Environmental lapse rate 7 C°/1000 m
Unsaturated air parcel begins lifting (DAR)
Saturated air parcel begins lifting (MAR)
(c) Stable
DAR 10 C°/1000 m
MAR 6 C°/1000 m
5 C°/1000 m
Environmental lapse rate
Surrounding air temperature
10°C
15°C
20°C
25°C
Clear skies, stagnant air conditions
Parcel resists upward movement
15°C
25°C
Air parcel is cooler and denser than surrounding atmosphere
Environmental lapse rate 5 C°/1000 m

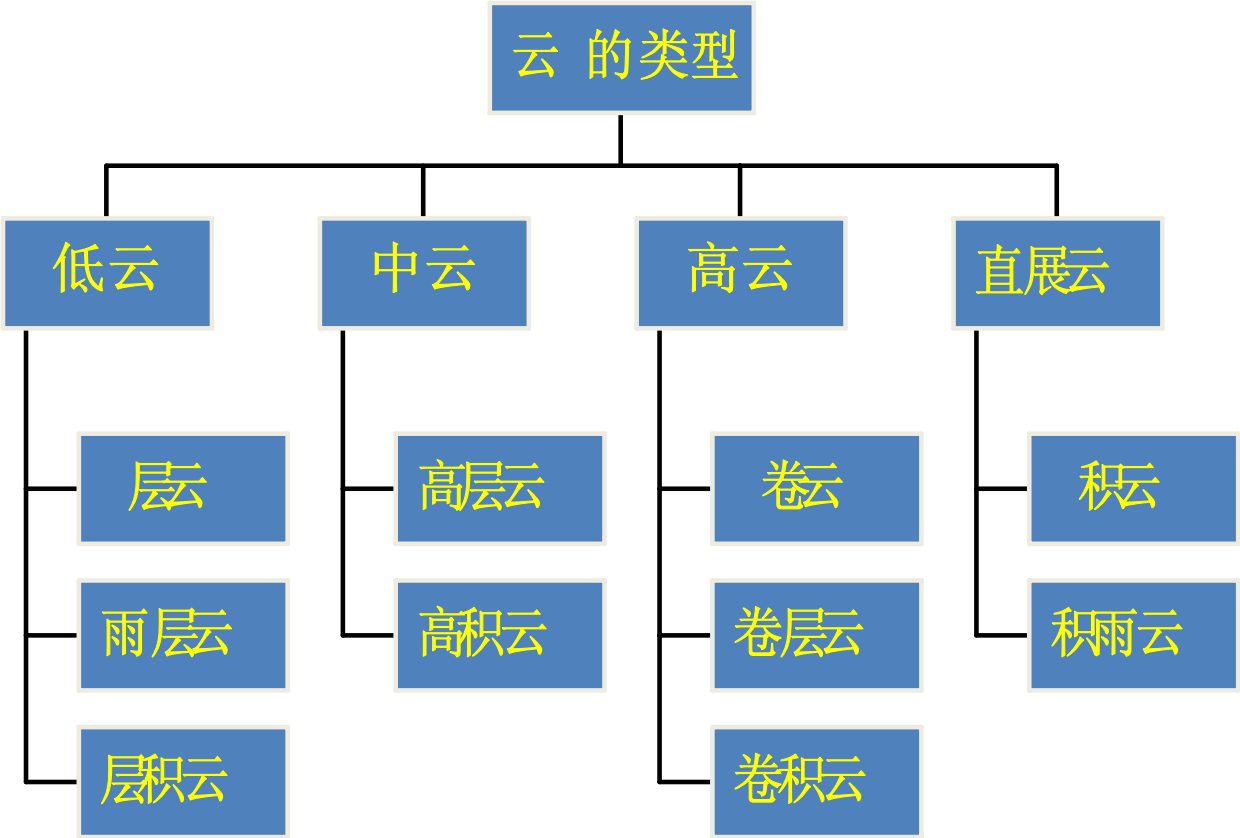
3.云的种类

（1）四个高度等级：低云、中云、高云和贯穿这些高度的直展云。

（2）三种基本形状

- 层状云：沿水平方向成层展布的云，是大范围空气稳定上升所形成的;
- 积状云：沿垂直方向膨胀发展的云，是空气不稳定对流上升，使水汽凝结的结果;
- 卷状云：由冰晶组成的、成束状的高云。

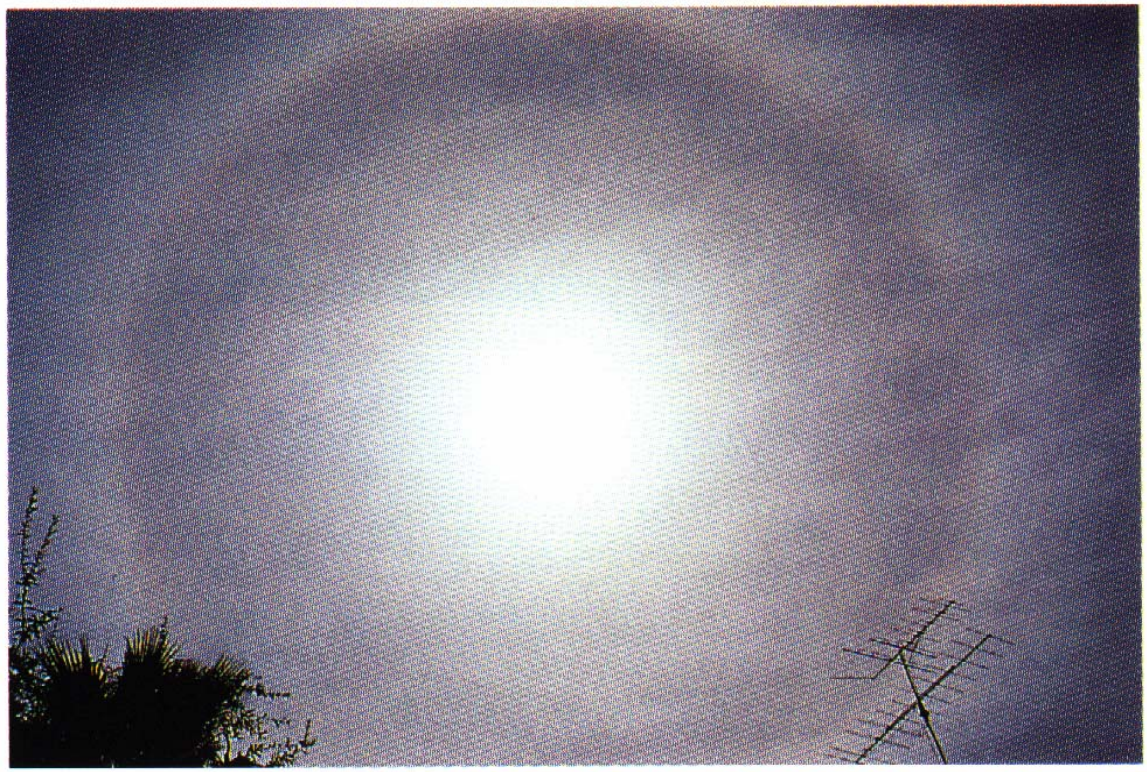
（3）十个基本云属



卷云

Cirrus High ice crystal clouds blown by the wind. Typically, they are observed at altitudes above about 6000 m (20,000 ft).

卷层云



Cirrostratus A wide-spread high cloud composed of ice crystals, that is normally white and usually covers a large portion of the sky. Sometimes halos around the sun or moon are the only indication of its presence.

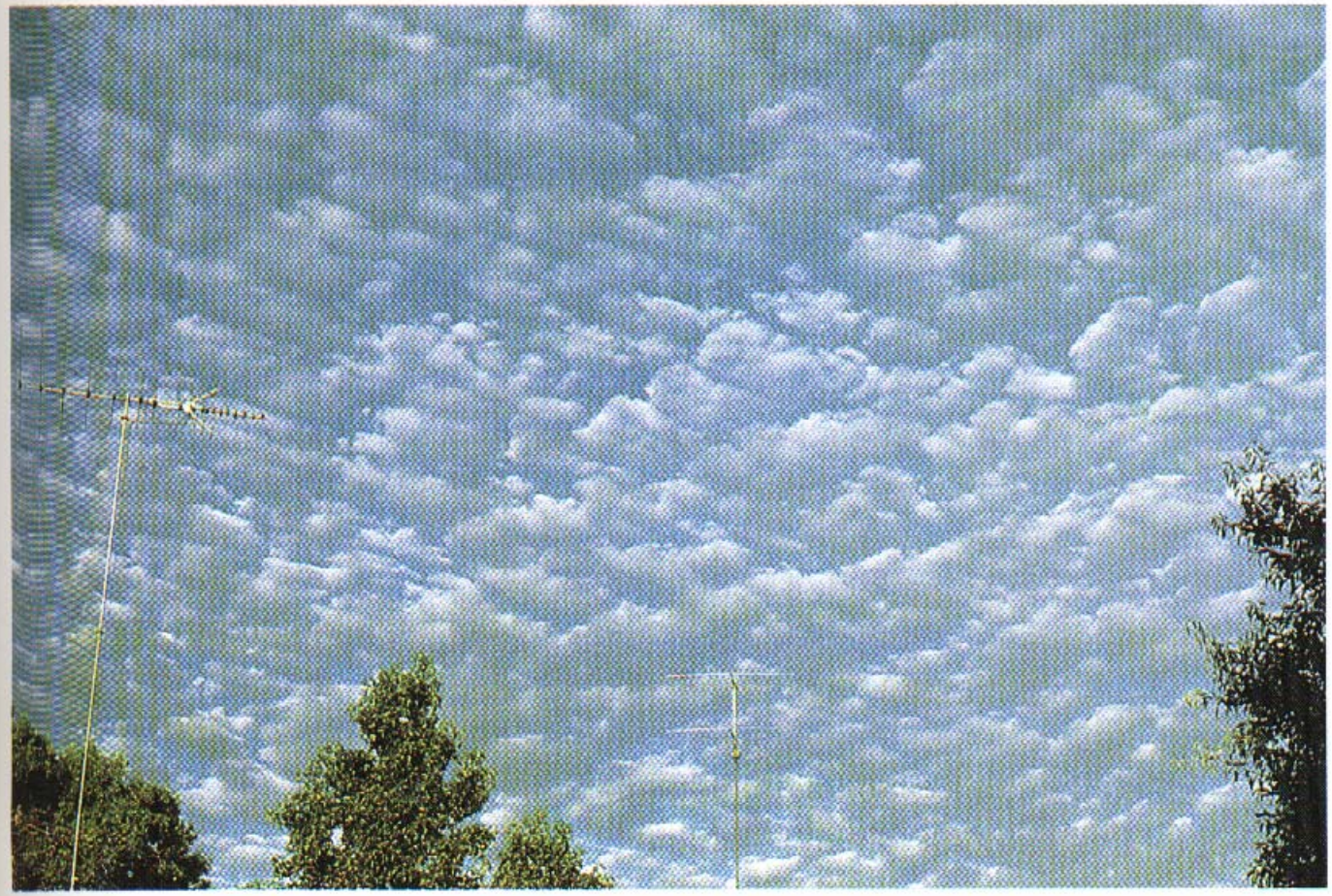
卷积云

Cirrocumulus These high clouds are small rounded white puffs composed of ice crystals. (The hole in the center may have been produced by a jet aircraft descending through the cloud deck.)

高层云

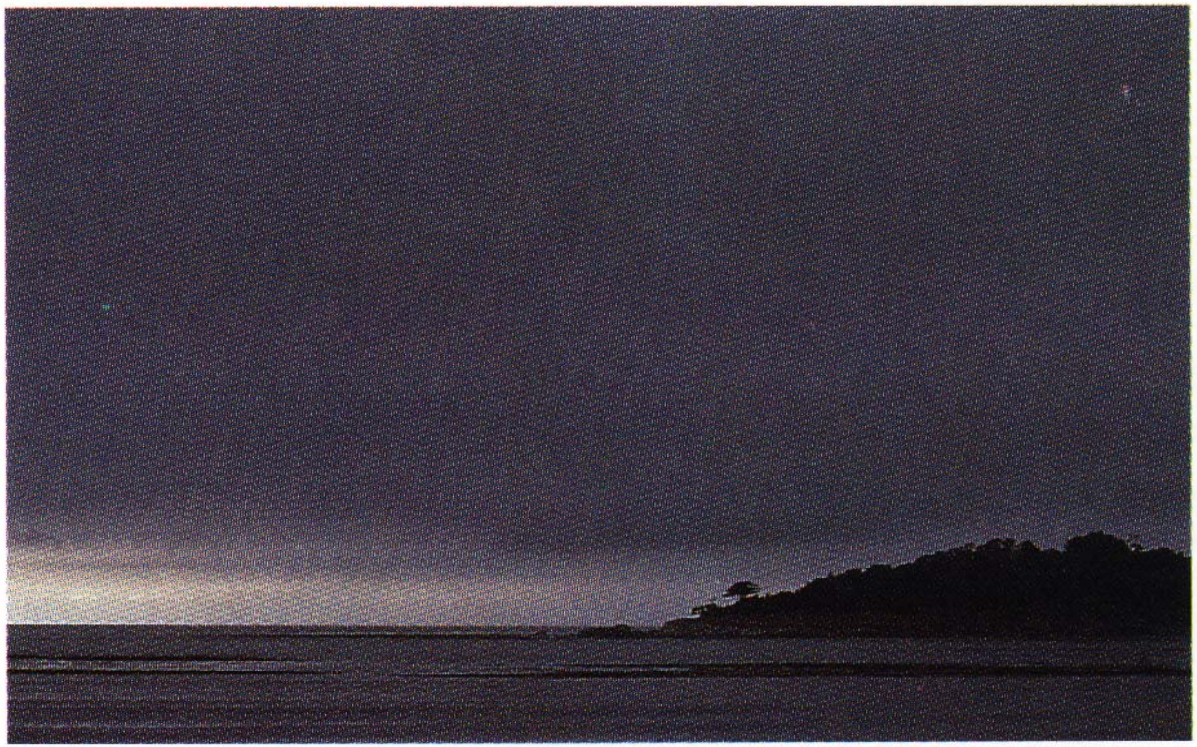
Altostratus This gray-looking water droplet and ice crystal middle cloud often blurs the sun, making it appear watery or "dimly visible".

高积云



荚状高积云

层云



Stratus This low, unifrom, grayish-looking cloud typically has a base below 2000 m (6500 ft). Drizzle may fall from its base. It is distinguished from altostratus in that the sun is not usually visible through stratus.

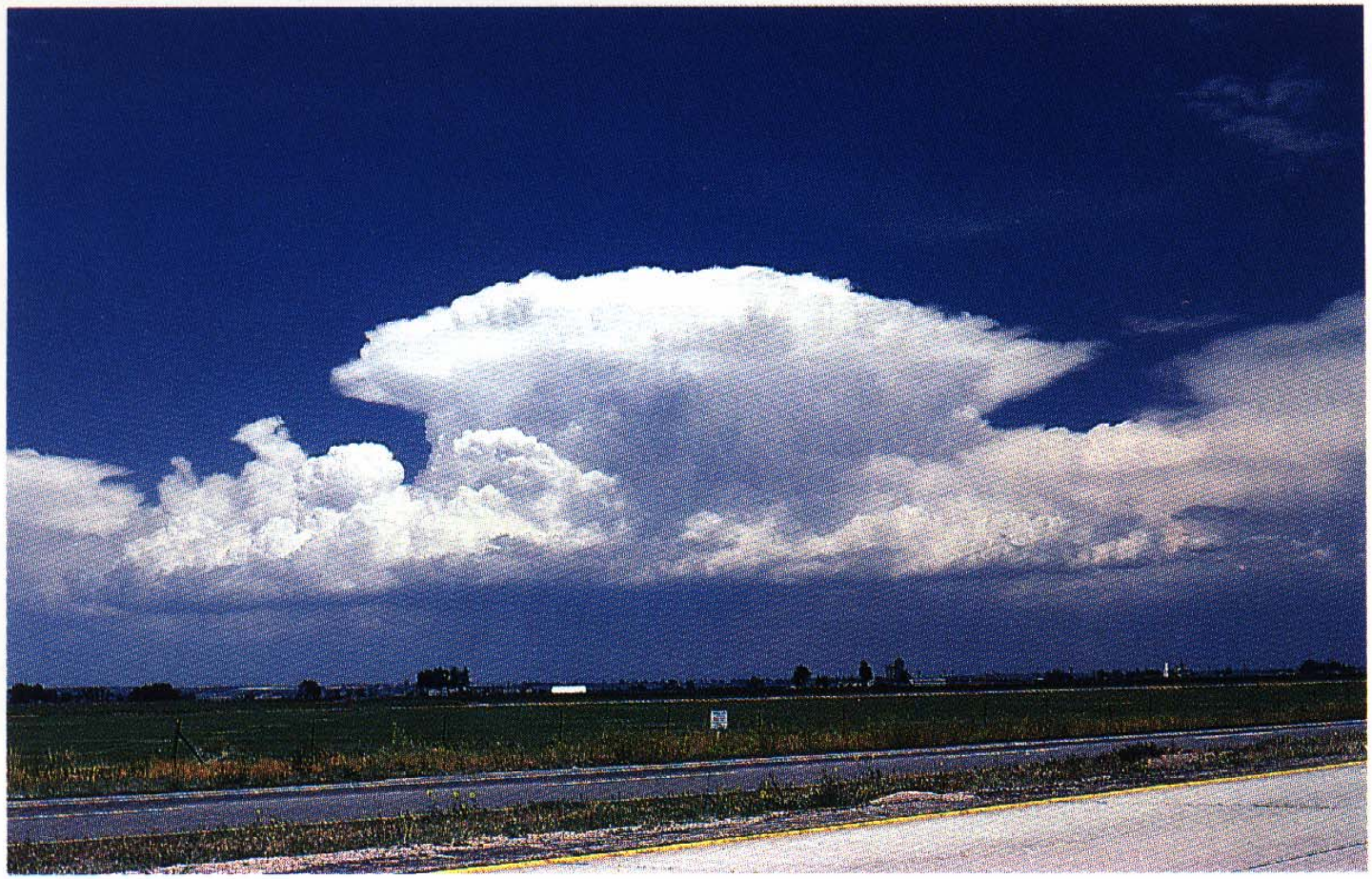
雨层云

Nimbostratus A dark gray-looking cloud that often covers the entire sky. Steady rain or snow falls from its base. The fragmented cloud beneath the nimbostratus is *Stratus Fractus*, or *scud*.

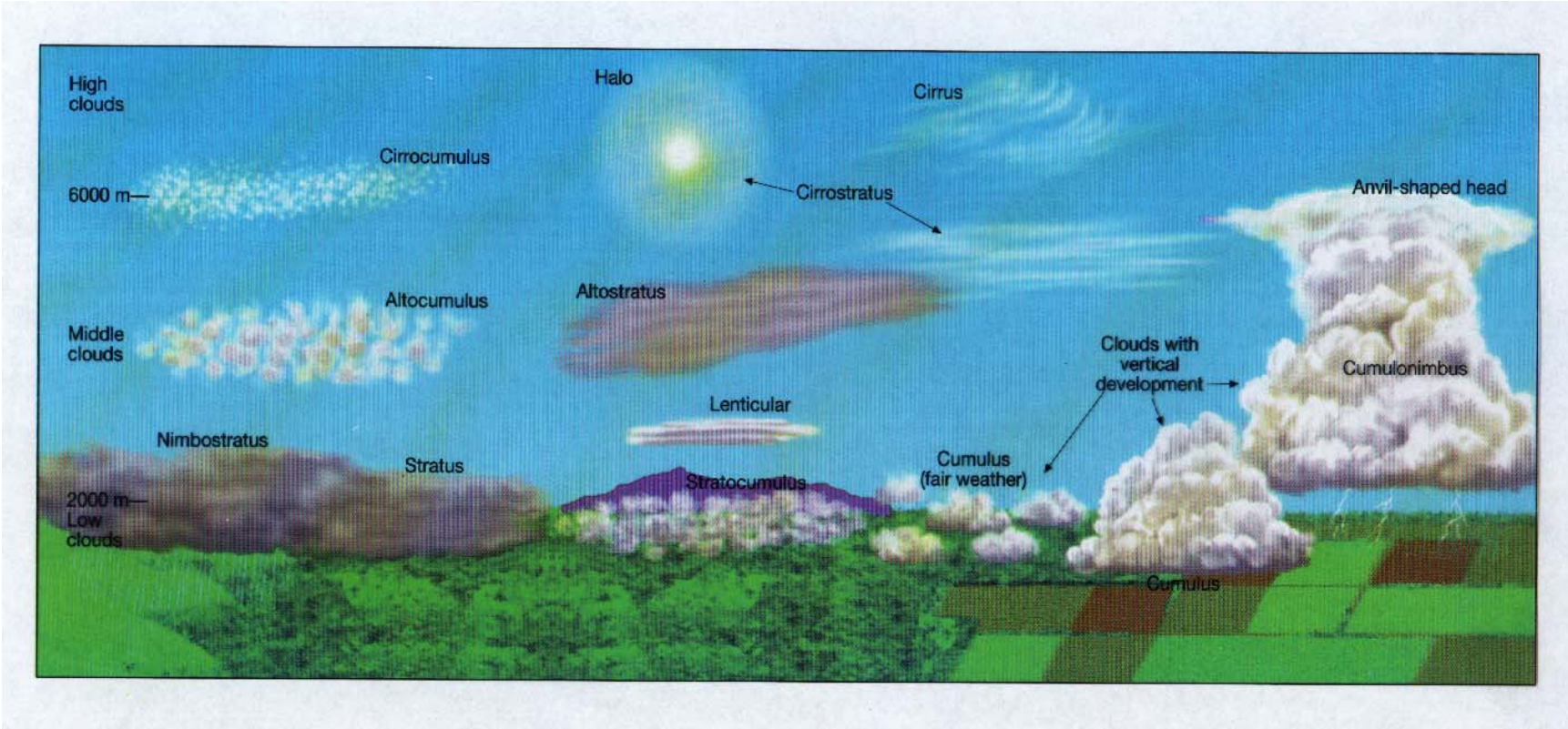
层积云

积云

积雨云



云属一览


High clouds
Halo
Cirrus
Cirrocumulus
6000 m—
Cirrostratus
Anvil-shaped head
Altocumulus
Altostratus
Middle clouds
Clouds with vertical development
Cumulonimbus
Lenticular
Nimbostratus
Stratus
Cumulus (fair weather)
Stratocumulus
2000 m—
Low clouds
Cumulus