

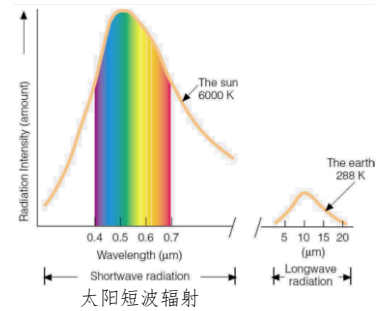
第三章 气候系统的能量平衡

3.1 太阳短波辐射

3.1.1 天文辐射

3.1.1.1 太阳辐射光谱

太阳物理 表面温度6000K，中心温度 $1.5 \times 10^7 K$ ，太阳黑子4500K
辐射光谱 太阳辐射通量密度随波长的分布，称为太阳辐射光谱。
辐射波段 0.15 – 4 μm 最强波长为0.457 μm 包含部分紫外+可见光+近红外波段



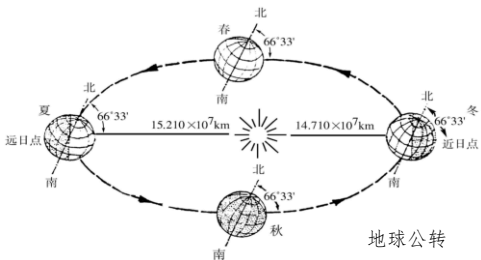
3.1.1.2 太阳常数 I_0

天文辐射 大气上界与地球表面同心球面单位面积上接收到的太阳辐射。
或者说不考虑大气圈影响，地表面单位面积接收到的太阳辐射。
太阳辐射 在大气上界，日地平均距离处，垂直于太阳光单位时间，单位面积所接收的所有波长的太阳辐射能，称为太阳常数 $I_0 = 1367 \pm 7 W/m^2$
注意 ① 太阳辐射通过星际空间到达地球表面，首先到达大气上界。
② 太阳常数存在周期性变化 1%~2%

3.1.1.3 日地距离

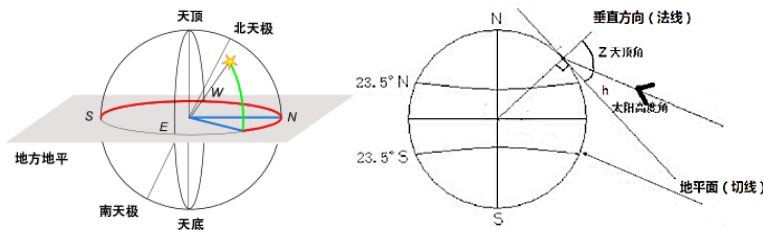
表达式 $D = \frac{r}{r_0} \Rightarrow I_0 = \frac{I_0}{D^2}$ 日地平均距离: $r_0 = 1.496 \times 10^8 km$

地球通过近日点单位面积所获得的太阳辐射能比远日点多7%
大气上界、任意日地距离处、单位时间垂直太阳光单位面积上通过对全部太阳辐射能量。
近日点 位于秋冬之间， $14.710 \times 10^7 km$
远日点 位于春夏之间， $15.210 \times 10^7 km$



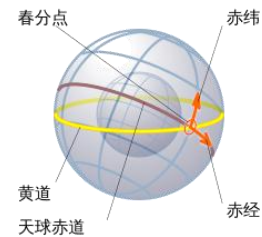
3.1.1.4 地平坐标系

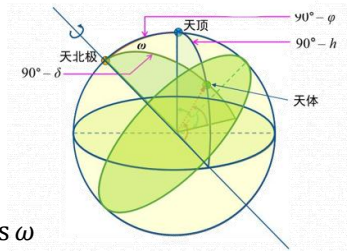
基本圈 真地平（每个观测者的地平坐标均不同）
基本要素 地平纬圈、地平经圈
坐标 地平经度(经过天顶和南点的圈为零地平经圈)、A方位角(正北为0°)、地平纬度（地平高度h）
太阳高度角 即sin h 指太阳光的入射方向和地平面之间的夹角 赤道90°
太阳高度角越大，能量越集中；高度角越小，能量越分散
天顶角 指入射光线与当地天顶方向（地面法线）的夹角



3.1.1.5 时角坐标系(赤道坐标系)

基本圈 天球赤道(地球的赤道在天球上的投影)
基本要素 赤纬圈(与天赤道平行)、赤经圈(时圈)
坐标 赤经度(时角t)、赤纬 δ 不同地区的观测值，观测同一天体，赤道坐标相同。
时角 ω ω 是用角度表示的时间，每15°为1小时
 $\omega = 15 \times (t - 12)$ 正午为零赤经圈
赤纬角 δ 太阳和地球中心连线与地球赤道平面之间的夹角 即太阳直射点的地理纬度
 δ 取值范围: $-23^\circ 27' \sim 23^\circ 27'$ 春分、秋分 $\delta = 0^\circ$





3.1.1.6 太阳高度角

计算公式

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

推导

如右图, $\cos(90 - h) = \cos(90 - \delta) \cos(90 - \varphi) + \sin(90 - \delta) \sin(90 - \varphi) \cos \omega$

球面三角形任意边的余弦等于其他两边余弦的乘积加上这两边的正弦及其夹角余弦的连乘积

正午时刻

此时 $\omega = 0^\circ$, 有 $\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta = \cos(\varphi - \delta)$ 即 $h + |\varphi - \delta| = 90^\circ$

空间变化

春秋分: 赤道最大, 极地最小。

夏至: 北回归线最大, 由此向北、向南递减。

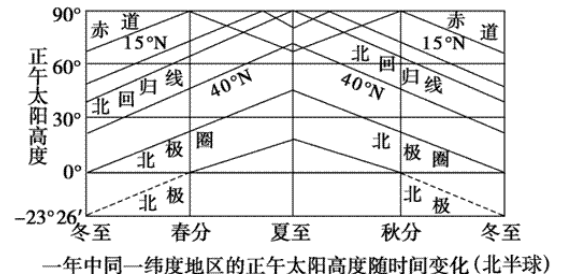
冬至: 南回归线最大, 由此向北、向南递减。

时间变化

北回归线及以南: 高度角在夏至最大, 冬至最小。

北回归线与赤道之间: 有两个极大值 (直射该纬度, 春分到夏至一次, 夏至到秋分一次), 冬至最小。

赤道: 春分和秋分最大, 夏至和冬至最小



3.1.1.7 日照时间

日照时间

日出到日落的时间间隔

日出时刻

即 $\sin h = 0$ 的时刻, 此时 $\cos \omega = -\tan \varphi \tan \delta \Rightarrow \omega = \mp \omega_0$

其中负号为日出时角, 正号为日落时角

时角 ω

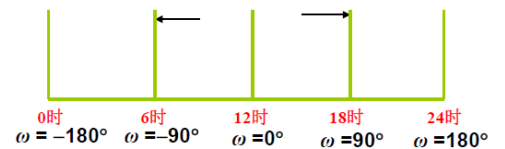
ω 是用角度表示的时间, 每 15° 为 1 小时

$\omega = 15 \times (t - 12)$ 正午为零 向下午方向到地方时 24 时: $\omega = 180^\circ$, 反之向上午方向为 -180°

日照时长

$\omega_0 = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$ 当 $|\varphi| + |\delta| > 90^\circ$ 时无解, 代表极夜 ($\varphi \delta < 0$) 或极昼 ($\varphi \delta > 0$)

总时长 = $(\omega_0 / 15) \times 2$



3.1.1.8 太阳辐射能量

太阳辐射能

任意时刻, 大气上界单位时间、单位面积接收到的太阳辐射能为: $I = I_0 \sin h = \frac{I_0}{D^2} \sin h$

辐射强度

即瞬时天文辐射: 任意日地距离(某天)某个时刻(瞬时), 即无大气影响, 单位时间、地球水平面的单位面积接收到的全部波长的太阳辐射能

$$I = \frac{I_0}{D^2} \sin h = \frac{I_0}{D^2} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)$$

受到日地距离 D 、太阳高度角 (太阳赤纬角、纬度、时间) 的影响

日辐射总量

即天文辐射日总量: 未考虑大气影响, 地球表面上单位面积一天内接收到全部波长的太阳辐射能量

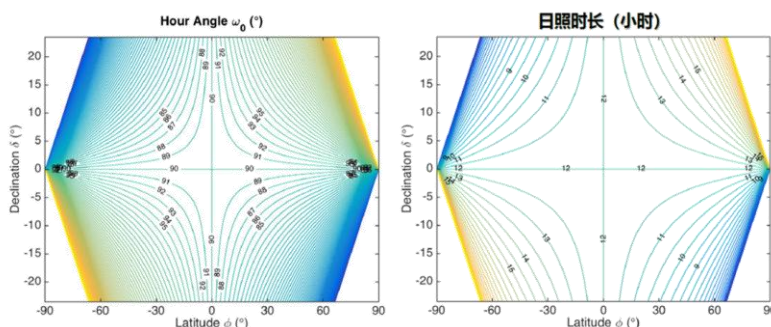
$$S_{\text{日}} = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I dt = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} \frac{I_0}{D^2} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \frac{T}{2\pi} d\omega$$

其中 $dt = \frac{T}{2\pi} d\omega$, $T = 1 \text{ 天} = 24 \text{ 小时} = 86400 \text{ s}$ $-\omega_0$ 为日出时角, ω_0 为日落时角

$$S_{\text{日}} = \frac{I_0 T}{\pi D^2} (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0) \quad D = \frac{r_{\text{当天日地距离}}}{r_0 \text{ 日地平均距离}} \quad \text{式中值全部为弧度}$$

影响因素

日地距离、太阳高度角、日照时长 夏季我国南北温度差异小 (高度角减小、时长增加, 相互抵消)



纵轴为赤纬, 横轴为纬度

3.1.1.9 天文辐射的时空分布特征

季节变化 具有以一年为周期的季节性变化特点，但不同纬度具有不同的变化幅度，**中高纬度的年变化显著，低纬度的年变化小**

① **赤道上**: $\varphi = 0$, 不同时间 $\omega_0 = \pi/2$ $S_{\text{日}} = \frac{I_0 T}{\pi D^2} \cos \delta$

② **极点**: $\varphi = \pm\pi/2$, 夏半年极昼 $\omega_0 = \pi$ $S_{\text{日}} = \frac{I_0 T}{D^2} \sin \delta$

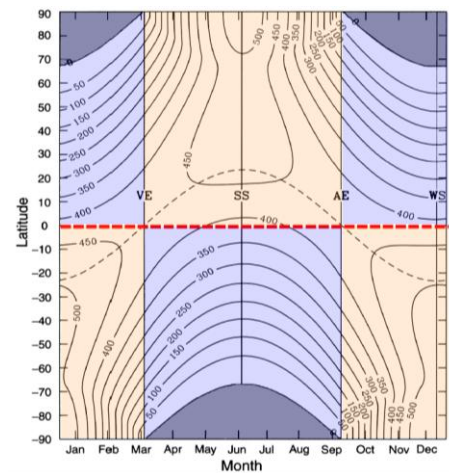
③ **其他纬度**: 春秋分时赤纬 $\delta = 0$, $\omega_0 = \frac{\pi}{2}$ $S_{\text{日}} = \frac{I_0 T}{\pi D^2} \cos \varphi$

空间变化 年平均具有**随纬度增高而减小**的趋势。不同季节或不同区域这种趋势有强弱差异。**冬季随纬度增高减小的趋势强，夏季弱**，甚至相反。

① 由于 1 月地球处于近日点，接收到的天文辐射量多于 7 月，因此**冬、夏季南北半球天文辐射日总量的分布不对称，南半球多**。

天文辐射日总量最大值出现在极点的夏至，这与此时日照时长(极昼)有关。

② **低纬年(季节)变化小于高纬，低纬年总量大于高纬**。



天文辐射日总量的季节变化-经向分布

实例 1. 夏半年的夏至, $\delta = 23.5^\circ$: 极地 $\omega_0 = \pi$, 天文日辐射总量为 $S_{\text{日}} = \frac{I_0 T}{D^2} \sin 23.45^\circ$

2. 赤道上 $\varphi = 0$, $\omega_0 = \pi/2$, 天文日辐射总量为 $S_{\text{日}} = \frac{I_0 T}{\pi D^2} \cos 23.45^\circ$

3. 夏至: 极地的天文辐射日总量与赤道的天文辐射日总量的比值: $\pi \cdot \tan 23.45^\circ = 1.36$ 倍

3.1.2 太阳辐射在大气中的减弱

3.1.2.1 大气中太阳辐射传输过程

总述 大气对太阳辐射的减弱由吸收、散射和反射构成

减弱效果 ① 总辐射减弱, 透射到大气上界的太阳辐射不能完全到达地面

② 辐射能随波长的分布变得极不规则

③ 波长较短的辐射能减弱得更为显著

总体特征 大气对太阳辐射的减弱, 依次为: 反射 > 散射 > 吸收

从全球平均状况来看, 太阳辐射被散射和反射回宇宙空间的占 30%, 大气直接吸收的太阳辐射占 20%, 50%到达地面被吸收。

单色光强度 I_λ 单位时间、**垂直于太阳光线方向**的单位面积上、**单位波长的辐射能**

若经过路径 dl , 则**强度变化** $dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda dl$ k_λ 称为大气对太阳辐射的**质量削弱系数** m^2/g

影响因素 ① 沿着光线方向在一点的**辐射强度** I_λ ② 吸收散射的气体/或粒子的**局地浓度** ρ 或 $N\sigma$

③ 吸收体或散射体的**效率** k_λ ④ 沿着光线方向穿过的**路径长度** ds

考虑整段大气: 从大气顶到 Z 高度积分 $\int_0^l \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = \int_0^l -k_\lambda \rho dl$, 得 $I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\int_0^l k_\lambda \rho dl}$

$I_{0\lambda}$ 为大气上界入射的波长为 λ 的单色光辐射强度 I_λ 为 Z 高度上波长为 λ 的单色光辐射强度

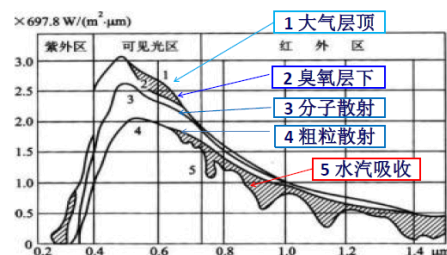
$\int_0^l \rho dl$ 为太阳辐射通过大气介质的**质量**, 称为**光学路径** (只与大气有关) 该项很难计算, 密度未知

大气质量 太阳光投射到**地面**所经路程中, 单位截面积空气柱的质量, 即为 $\int \rho dz$

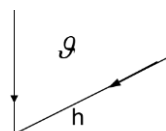
大气质量数 **实际投射条件**(有角度)下的大气质量与**垂直投射**下的大气质量的**比值** $m = \frac{\int \rho dl}{\int \rho dz}$

引入均质大气高度 H_0 和密度恒量 ρ_0 , 则 $\int \rho dz = \rho_0 H_0$, 则大气质量数为 $m = \frac{\int \rho dl}{\rho_0 H_0}$

$m \approx \frac{dl}{dz} (h > 30^\circ) = \sec \theta_{\text{天顶距}}$ $h = 0 \rightarrow m = 35.4$ $h = 10 \rightarrow m = 5.6$



各个不同吸收情况辐射分布



大气透明度 描述与太阳高度角无关，大气对太阳辐射衰减的程度，常用**透明系数**表示 如高原平原的区别
如果介质的光学性质是均匀的， k_λ 仅与 λ 有关（与高度无关），与 l 无关，则

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\int_0^l k_\lambda \rho dl} = I_{0\lambda} e^{-k_\lambda \int_0^l \rho dl} = I_{0\lambda} e^{-k_\lambda m \rho_0 H_0} \quad \text{其中 } m = \frac{\int \rho dl}{\rho_0 H_0} \quad \text{则令: } P_\lambda = e^{-k_\lambda \rho_0 H_0} < 1$$

P_λ 即为大气对**单波 λ 辐射的透明系数**（与强度、局地均值大气质量有关）

$$\text{到达地面的太阳单色辐射强度为: } I_\lambda = I_{0\lambda} P_\lambda^m \quad \text{对所有波长积分: } \int_0^\infty I_\lambda d\lambda = \int_0^\infty I_{0\lambda} P_\lambda^m d\lambda$$

$$\text{到达地面辐射 } I' = \int_0^\infty I_\lambda d\lambda \quad \text{入射天文辐射 } I'_0 = \int_0^\infty I_{0\lambda} d\lambda \quad I' = I'_0 P^m = \frac{I_0}{D^2} P^m \quad P = \sqrt[m]{\frac{I'}{I'_0}}$$

$P(<1)$ 即为描述与太阳高度角无关的大气对所有波段太阳辐射的衰减程度的参数，简称**大气透明系数**
 I' 为经过大气到达地面**垂直于**太阳光线方向的单位面积上，单位时间(瞬时)所有波长的太阳辐射能 ($\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

光学厚度 $\tau = \int_0^l k_\lambda \rho dl$ 称为光学厚度(无量纲)，未考虑均质大气 则 $I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\tau}$

$\tau \ll 1$ 表明光学厚度很小，辐射几乎不衰减； $\tau \gg 1$ 表示光学厚度很大，辐射被完全吸收

$$\text{光谱透过率 } e^{-\tau} = \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}} \quad \text{光谱吸收率 } 1 - e^{-\tau} = 1 - \frac{I_\lambda}{I_{0\lambda}} = \frac{I_{0\lambda} - I_\lambda}{I_{0\lambda}} \quad \text{光谱吸收函数 } \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_{0\lambda} - I_\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0\lambda} d\lambda}$$

3.1.2.2 大气对太阳辐射的吸收

吸收 大气分子被入射太阳辐射激发，由低能级跃迁到高能级的过程称为吸收。两能级的差就是大气吸收的辐射能量值。**吸收具有选择性。**

主要气体 **不同分子具有不同的光学厚度。**

氧(O_2): 发生在高层大气,波长小于 $0.26\mu\text{m}$ 远紫外波段: $0.175 - 0.2026\mu\text{m}$, $0.242 - 0.26\mu\text{m}$

臭氧(O_3): 主要集中在 25km 的臭氧层, $0.22 - 0.34\mu\text{m}$, $0.32 - 0.36\mu\text{m}$

$$\text{在紫外光区的吸收可表示为 } A_{ou}(x) = \frac{1.082x}{(1+138.6x)^{0.805}} + \frac{0.0658}{1+(103.6x)^3}$$

$$\text{在可见光区: } A_{ov}(x) = \frac{0.02118x}{1+0.042x+0.000323x^2} \quad x \text{ 为臭氧的光学厚度 } x = Um$$

$$U \text{ 为单位面积垂直气柱内的臭氧含量 } m = \frac{35\mu_0}{(1224\mu_0^2+1)^{0.5}} \quad \mu_0 \text{ 为天顶距的余旋 } \mu_0 = \cos \vartheta$$

$$\text{水汽(H}_2\text{O): 主要集中于红外光 } A_w(y) = \frac{2.9y}{(1+141.5y)^{0.635}+5.295y} \quad y \text{ 是水汽的光学厚度 } y = \int_0^l k_{\lambda w} \rho_w dl$$