

第3节 辐射平衡

- 一、到达地表的太阳辐射
- 二、地球表层的长波辐射
- 三、地球表层的辐射平衡

一、到达地表的太阳辐射

(一) 太阳总辐射 (global radiation)

1. 太阳直接辐射

通过大气圈直接到达地面的太阳辐射。它随太阳高度的增大而增强；在太阳高度一定时，随大气透明度的增大而增强。

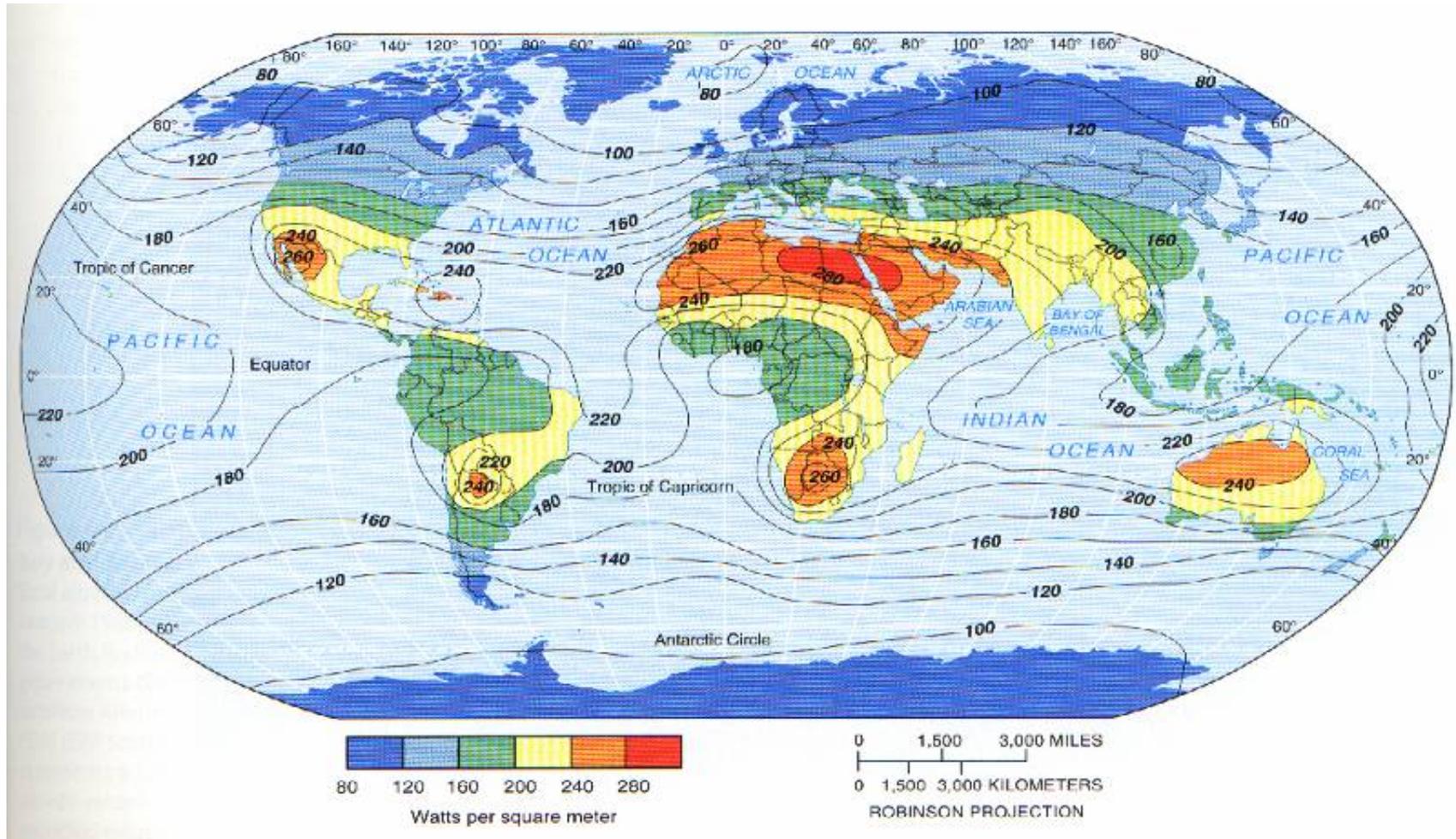
其日变化、年变化和随纬度的变化主要由太阳高度角决定。

2. 太阳散射辐射

由大气中的空气分子和悬浮物所散射的、来自天穹各个方向的太阳辐射。它随太阳高度的增大而增强；随大气透明度的增大而减弱。

其日变化、年变化和随纬度的变化也主要由太阳高度角决定。

3. 太阳总辐射的分布



(二) 地面反射率 (albedo)

1. 概念: 地面反射辐射量与入射辐射量之比。

- 反射率越大, 地面吸收太阳辐射量越少;
- 反射率越小, 地面吸收太阳辐射量越多。

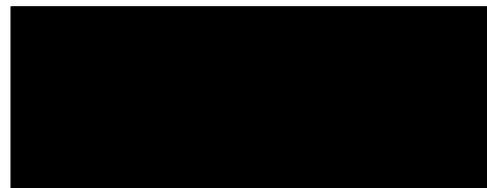
2. 影响因素

(1) 下垫面性质: 颜色、干湿状况、粗糙程度

原理: 在可见光波段, 黑体反射率近于零, 白体反射率近于1。

(2) 入射辐射的波长: 绿色植被强烈吸收紫外线和可见光; 强烈反射近红外线。

遥感归一化差值植被指数:

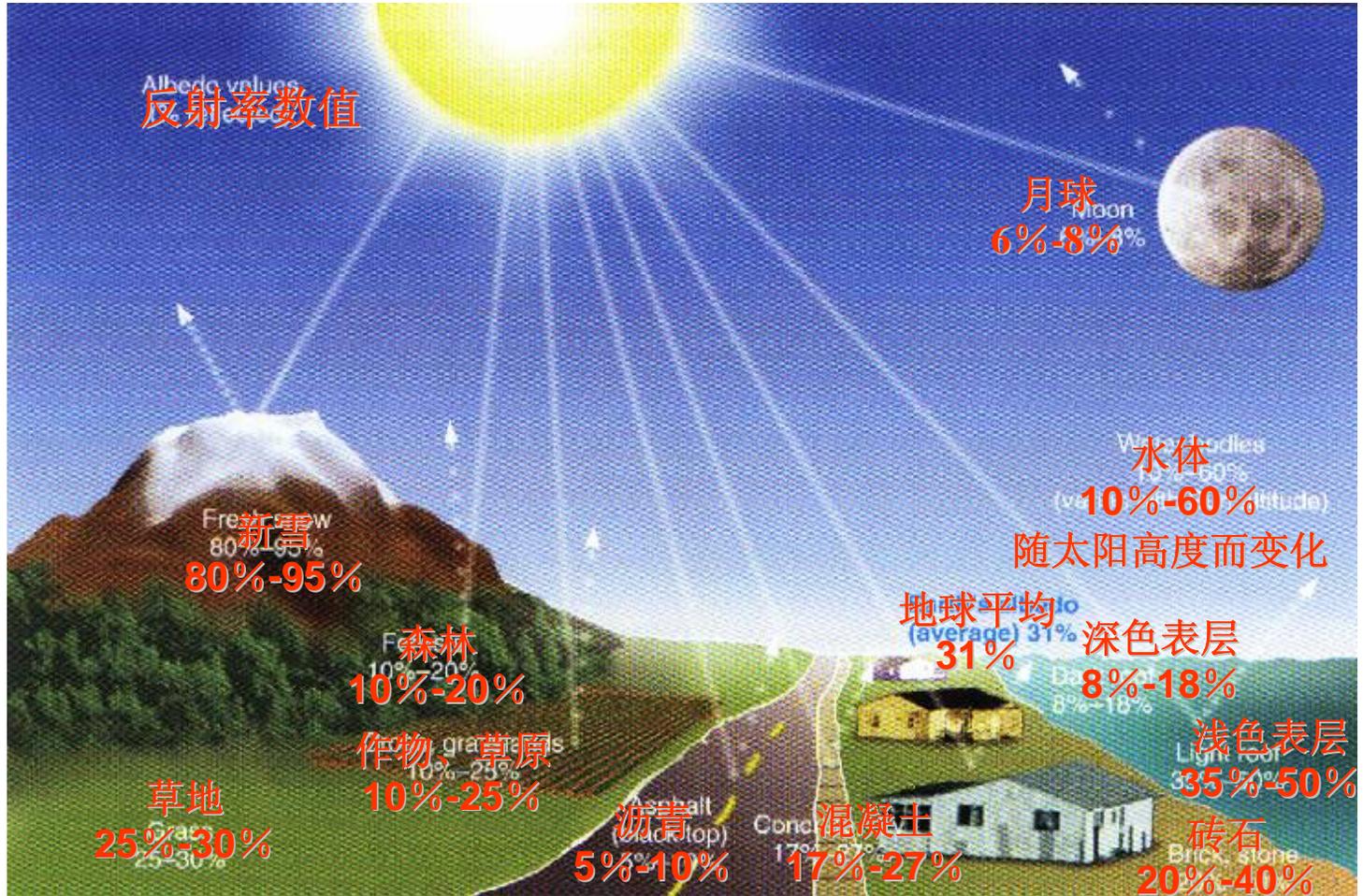


云、水、雪对可见光的反射辐射大于对近红外的反射辐射, $NDVI < 0$

岩石、裸土对二者反射辐射相当, $NDVI \approx 0$

植被对近红外的反射辐射大于对可见光的反射辐射, $NDVI > 0$, 一般覆盖度越高, 数值越大

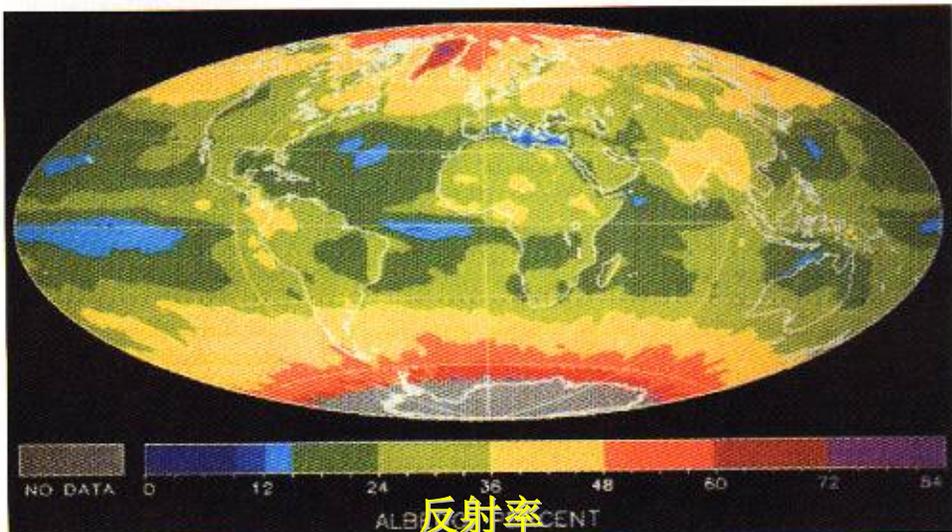
不同下垫面的反射率



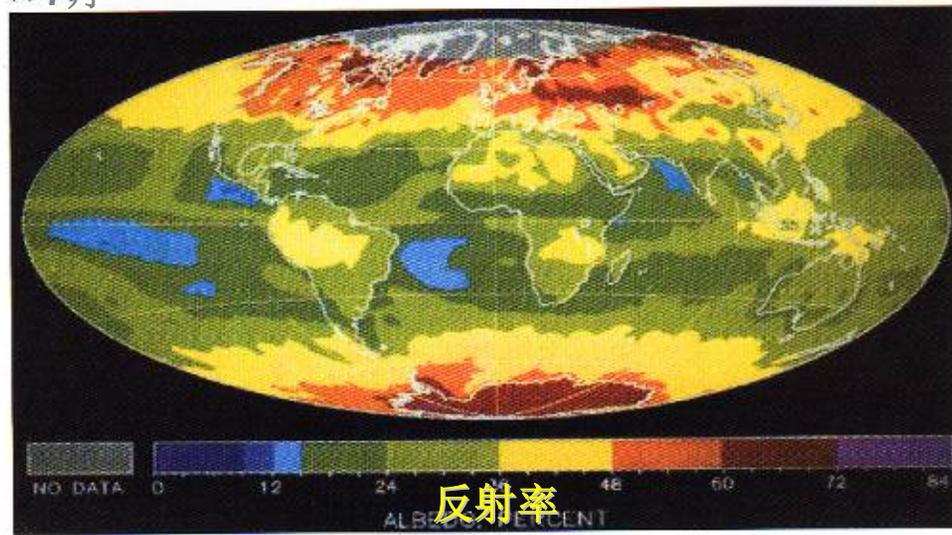
不同下垫面对可见光的反射率

深色土壤	5%~15 %
浅色、沙性土壤	25%~45 %
草地	15%~25 %
干草地	20%~30 %
阔叶林	15%~20%
天然水	6%~10 %
干洁新雪	80%~95 %
污浊的雪	40%~50 %
混凝土（干）	17%~27 %
沥青	5%~10 %

地面总反射率的分布



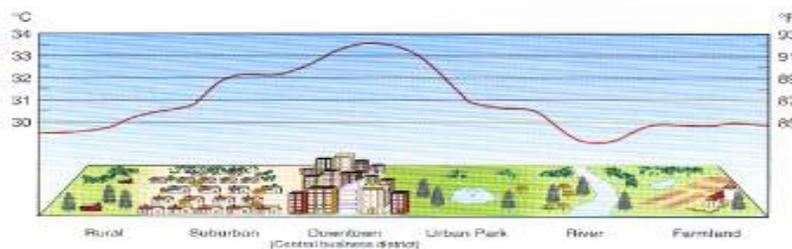
(a) 7月



(b) 1月

3. 城市热岛效应 (urban heat island)

(1) 概念: 城区气温高于郊区, 类似孤岛。



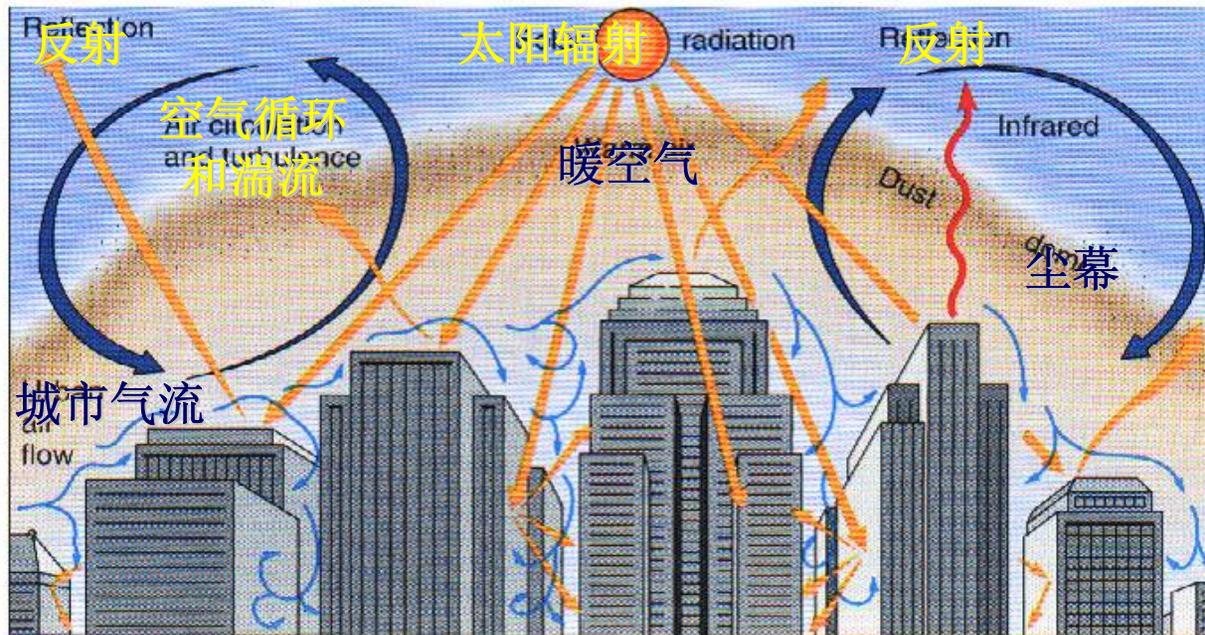
1998.6.29,
13点,
Sacramento,
加利福尼亚



(2) 成因:

- 城市地表粗糙和柏油地面，反射率低，吸热性和导热性强。
- 水面和植被少，地表湿度低，类似荒漠。
- 高耗能工业、汽车、取暖设备排出废热。
- 建筑物稠密，不利于通风和散热。

- 空气中污染物含量高，阻碍地面与高空的热交换。
- 人口密度大。



(3) 北京的热岛效应

- 热岛区：市中心、石景山、门头沟、昌平
- 热岛强度（市区与郊区温度差）

1999.7.23, 20点: 2.2°C

2001.7.1, 20点: 3.0°C

1997年最大热岛强度: 9.0°C

(4) 缓解措施

- 减少黑色、暗色地面（提高反射辐射）
- 疏散工业企业，减少汽车流量（减少排热）
- 增加植被和水面面积（降温）
- 科学地规划城市建设（优化布局）
- 改变能源结构（减少化石燃料使用和大气污染）

二、地球表层的长波辐射

(一) 地面辐射

1. **概念**: 地面以长波辐射的形式发射的辐射。
2. **方向**: 由地表返回太空。
3. **大小**: 地面对于长波辐射的吸收率接近于1, 可近似地视为黑体。黑体的辐射能力与其绝对温度的四次方成正比:



4. **连续发射**——充分开放系统

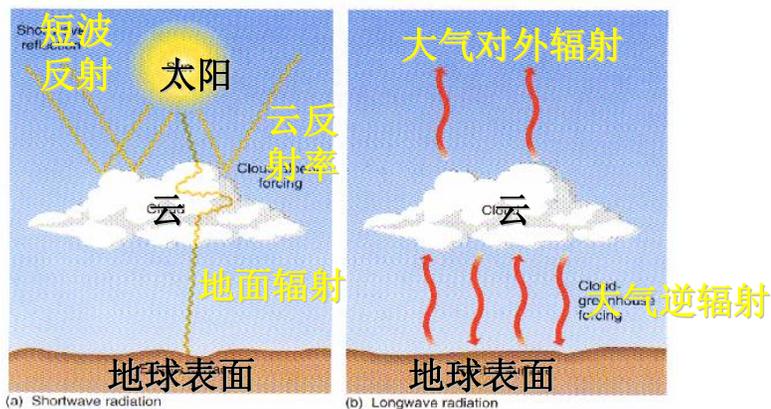
(二) 大气辐射

1. **概念**: 大气吸收了来自地面和太阳的辐射之后, 以长波辐射的形式发射的辐射。

2. **方向**:

向太空方向: 大气对外辐射

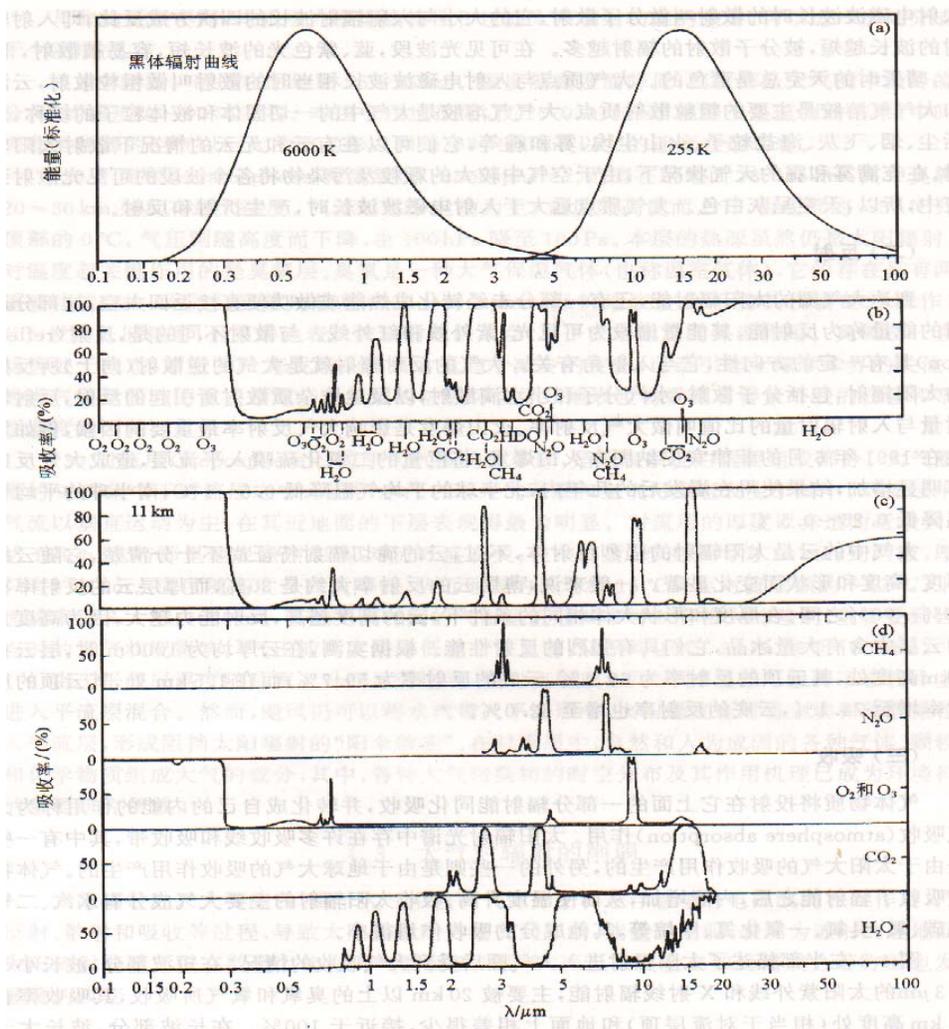
向地球方向: 大气逆辐射



3.大气对地面辐射的吸收谱

- 对地面辐射的吸收能力大于对太阳辐射的吸收能力。可见，大气主要是由地面加热的。
- 主要温室气体为对流层水汽 (H_2O)、 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 和 O_3 ，它们对长波辐射具有拦截作用。
- 温室效应：由于温室气体和大气逆辐射的存在，使底层大气保温的效应。

地球辐射的大气吸收谱 (右半部)



(三) 有效辐射

1.概念：地面辐射与地面吸收的大气逆辐射之差。

- 有效辐射为正，地面净损失能量；
- 有效辐射为负，地面净获得能量。

3.影响因素

- 地面温度：正向作用（空气湿度和云量等条件不变）。
- 大气温度、湿度、云量和温室气体含量：负向作用（地面温度条件不变）。

三、地球表层的辐射平衡

净辐射的概念（net radiation, R ）：在某段时间内，物体单位面积上能量收支的差值。

- $R=0$ ：物体收支的辐射能量相等，温度保持不变；
- $R \neq 0$ ：物体收支的辐射能量不平衡，温度将上升（ $R > 0$ ）或下降（ $R < 0$ ）。

(一) 地面辐射平衡

1. 辐射平衡方程

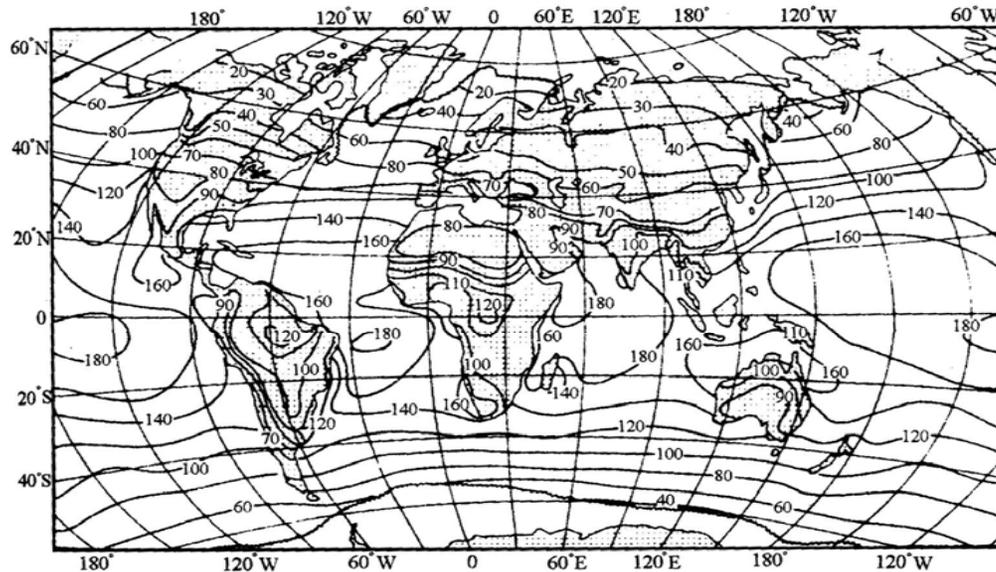


2. 地面净辐射的日变化和年变化

- 通常在白昼净辐射为正值，夜晚为负值；
- 在中、高纬地区，夏季净辐射增大，冬季减小，甚至出现负值；
- 从全球多年平均来看，地面处于能量收入与支出的大致平衡状态。

3.地面净辐射的分布特征

- 净辐射随纬度的增加而减少，在全球大部分地区为正值，冬季极区为负值 (Q_e 小, α 大)



(单位: $W \cdot m^{-2}$)

- 相同的纬度，海洋上净辐射大于陆地，最大值出现在热带的海洋（ α 小，收入短波辐射多， G_a 大， E 小）；
- 陆地上极大值出现在近赤道的南美、非洲和印度尼西亚的热带雨林区（ α 小，收入短波辐射多， G_a 大， E 小）；
- 极小值出现在副热带的沙漠地区（ α 大，收入短波辐射少， G_a 小， E 大）。

(二) 大气辐射平衡

1. 辐射平衡方程

大气吸收的地面辐射: $U_a = (1-P) U_e$

大气支出的逆辐射: $G_a = U_e - E$

地-气逸出的辐射: $E_\infty = PU_e + U_\infty$, $U_\infty = E_\infty - PU_e$

代入方程, 得

2.大气净辐射的决定因素

因为：大气吸收的太阳辐射量 (Q_a) 较小

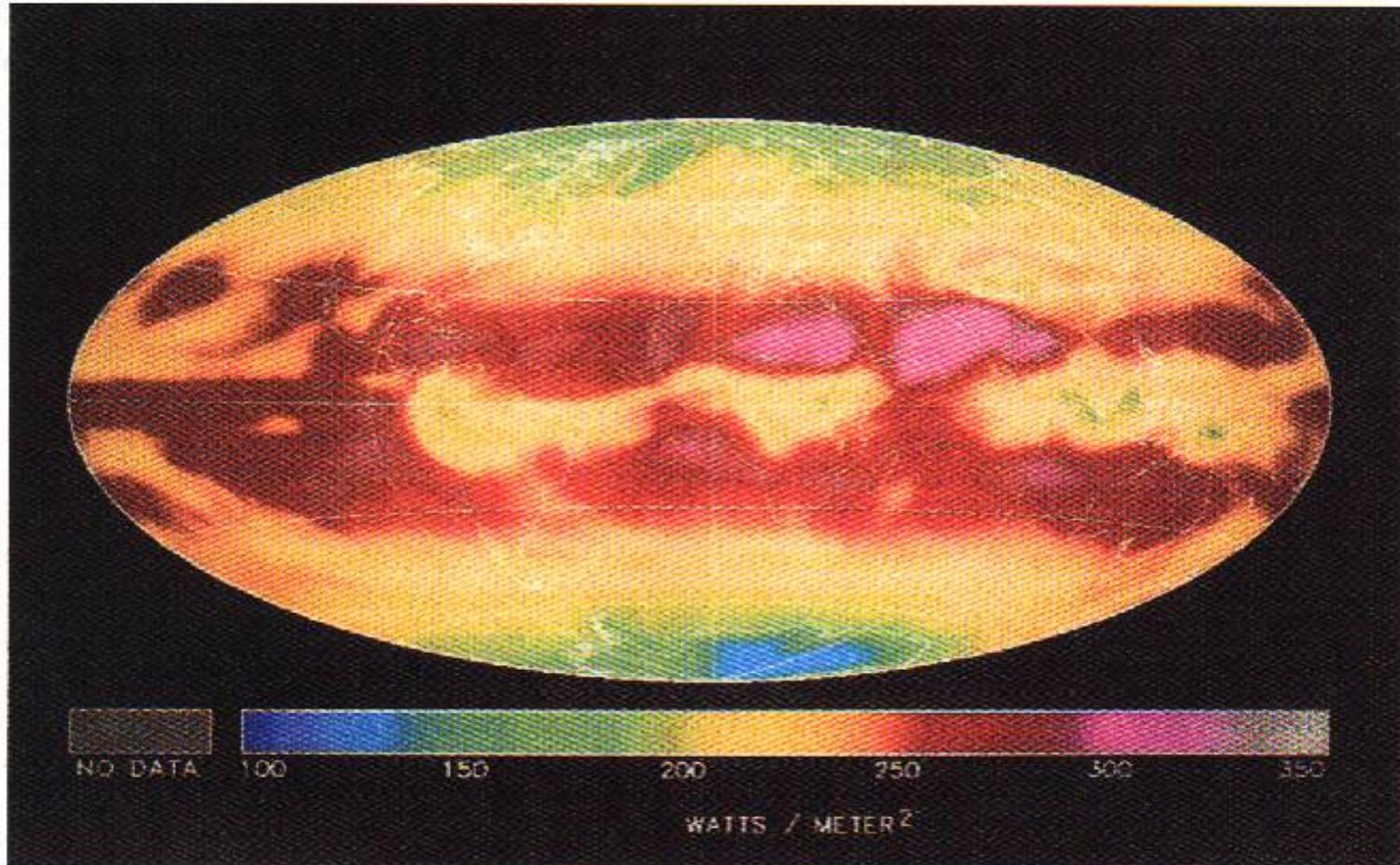
所以： R_a 主要由 ($E_\infty - E$) 决定

又因为： $E_\infty > E$

所以： $R_a < 0$

结论：大气净辐射总是负值，它通过地面的潜热和感热输送得到补偿。

地球 - 大气系统长波辐射 (E_{∞}) 输出: 1985.4

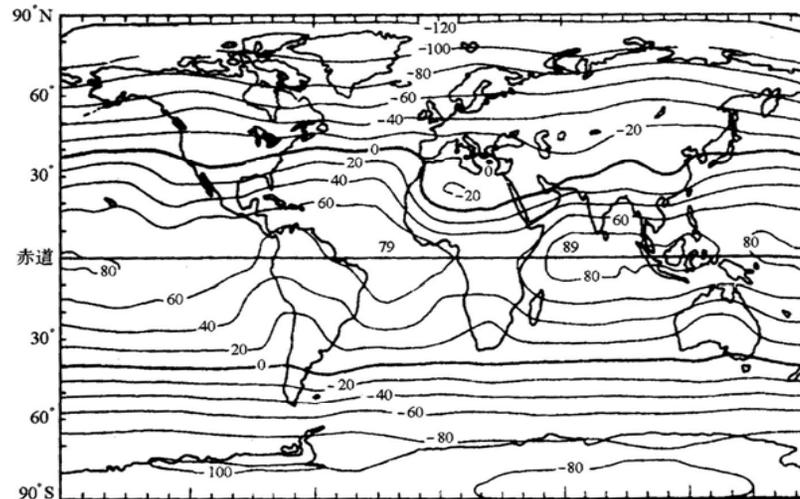


(三) 地—气系统辐射平衡

1. 方程



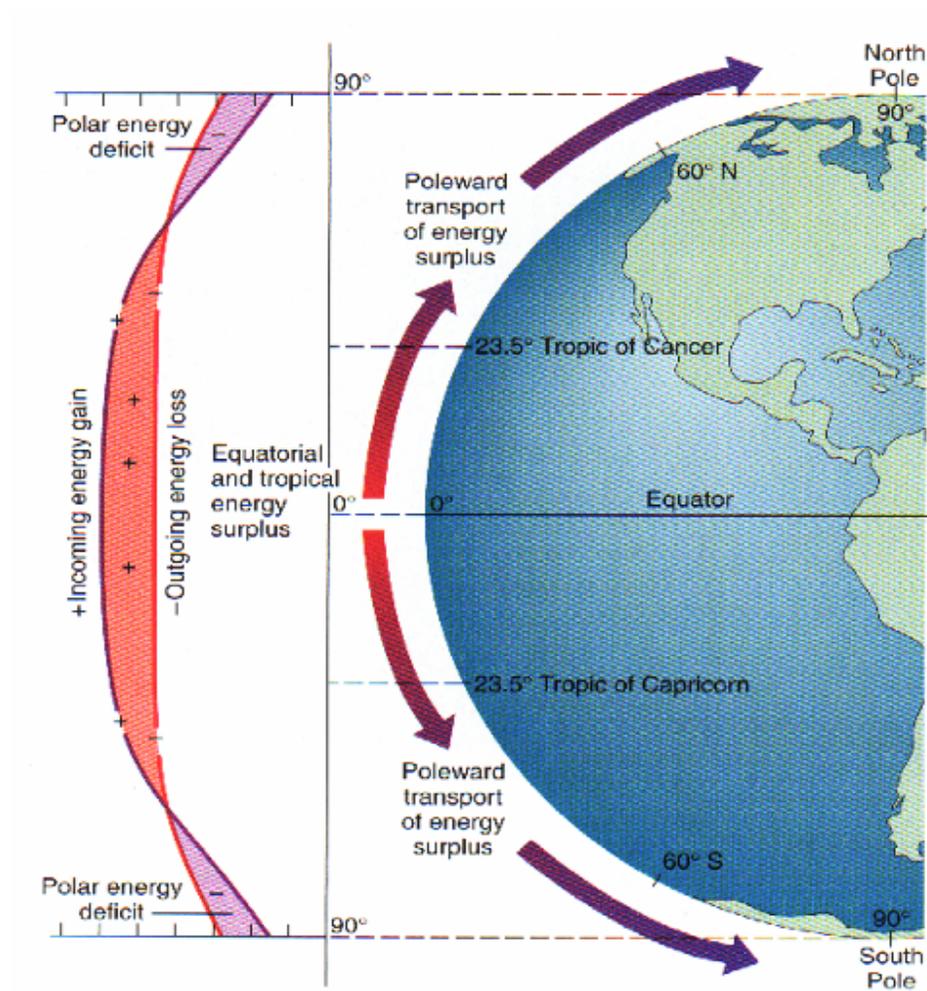
2. 分布



(单位: $W \cdot m^{-2}$)

- 南、北纬 36° 大体处于能量输入和输出的平衡点，净辐射为零；
- 在赤道附近的低纬地区，能量的输入大于输出，年平均净辐射为正，为热源；
- 在极地附近的高纬地区，能量的输入小于输出，年平均净辐射为负，为热汇；
- 海洋区域吸收的能量比陆地多，海洋是热源，陆地是热汇；
- 北非沙漠地区有很强的负值。

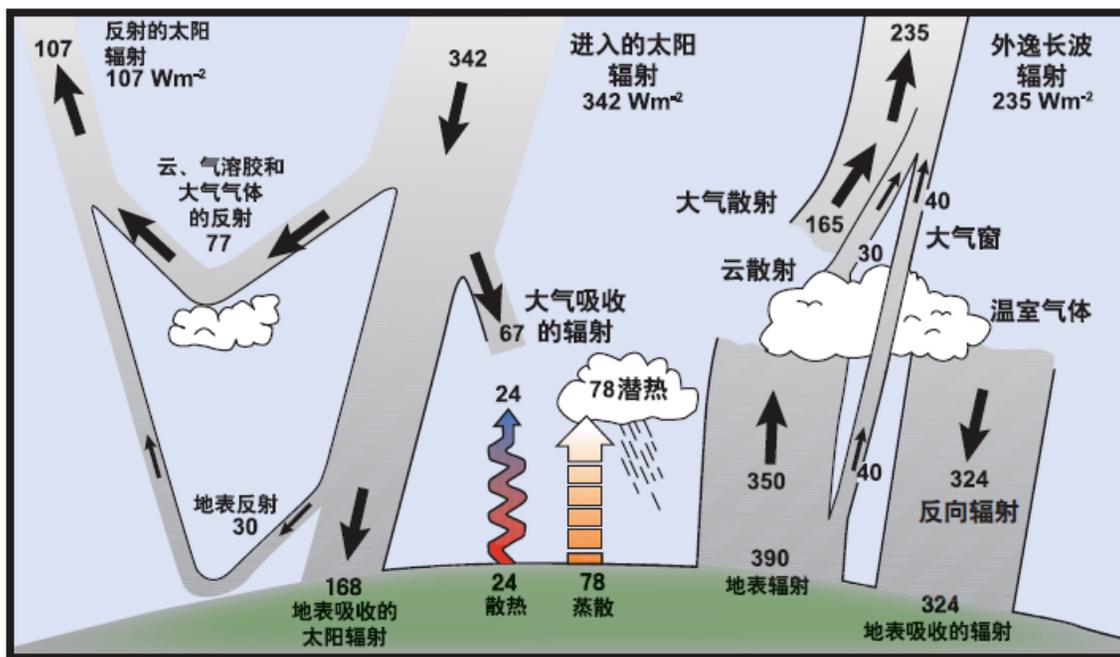
大气上界的能量收支与能量输送



(四) 辐射平衡的总体特征

1. 太阳辐射输入

- 大气上界: 342
- 大气吸收: 67
- 大气反射: 77
- 地面反射: 30
- 到达地表: 168

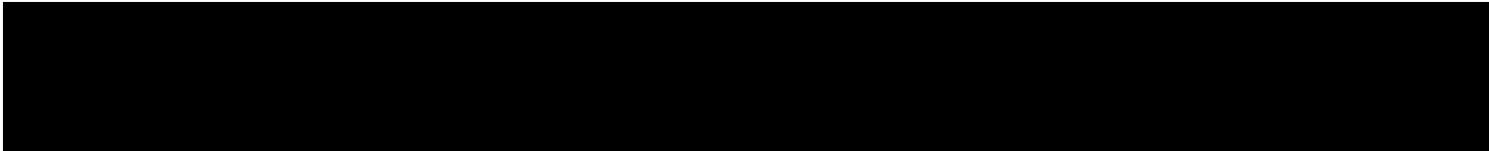


2. 地面辐射与能量平衡

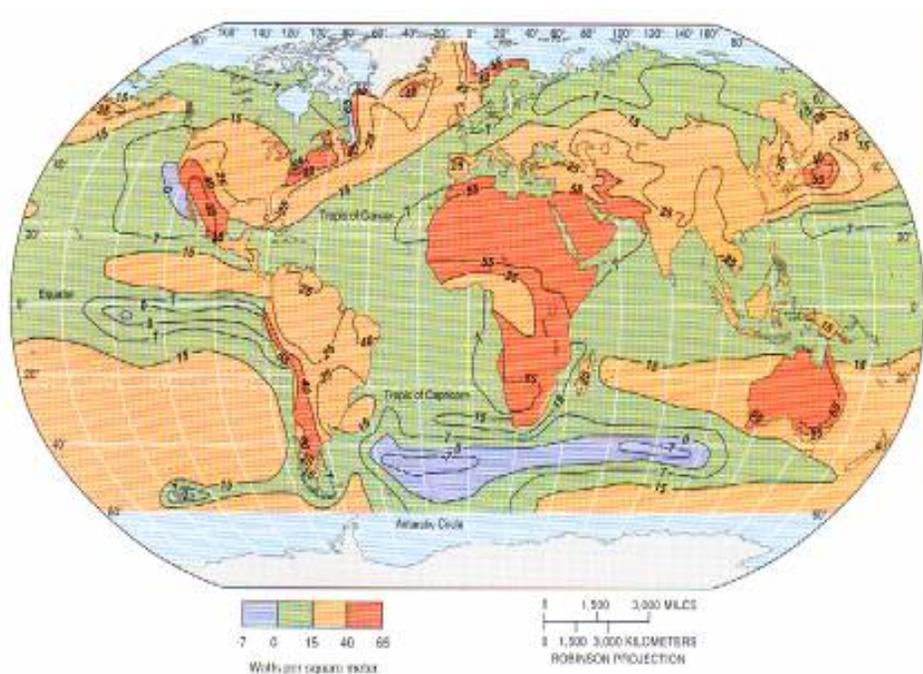
- 辐射平衡



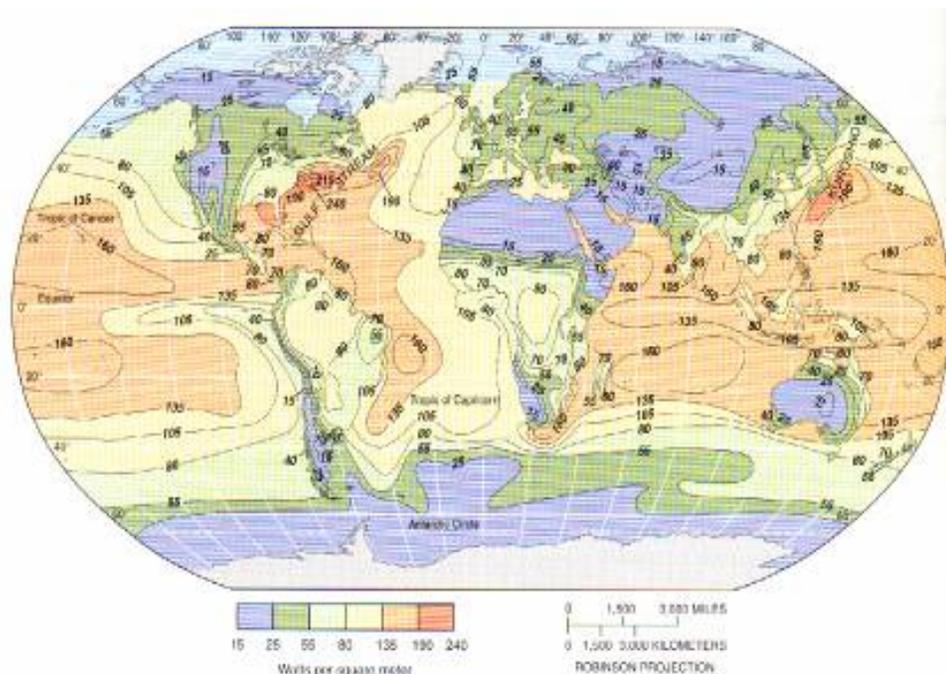
- 能量平衡



全球地面年感热 (P) 输送



全球地面年潜热 (LB) 输送



3.大气辐射与能量平衡

- 辐射平衡



- 能量平衡



4.地-气系统辐射平衡

5.小结

长期平均而言：

- 地面能量收支相等，达到平衡；
- 大气能量收支相等，达到平衡；
- 地-气系统能量收支相等，达到平衡。

拓展视野：大气温室效应的证实

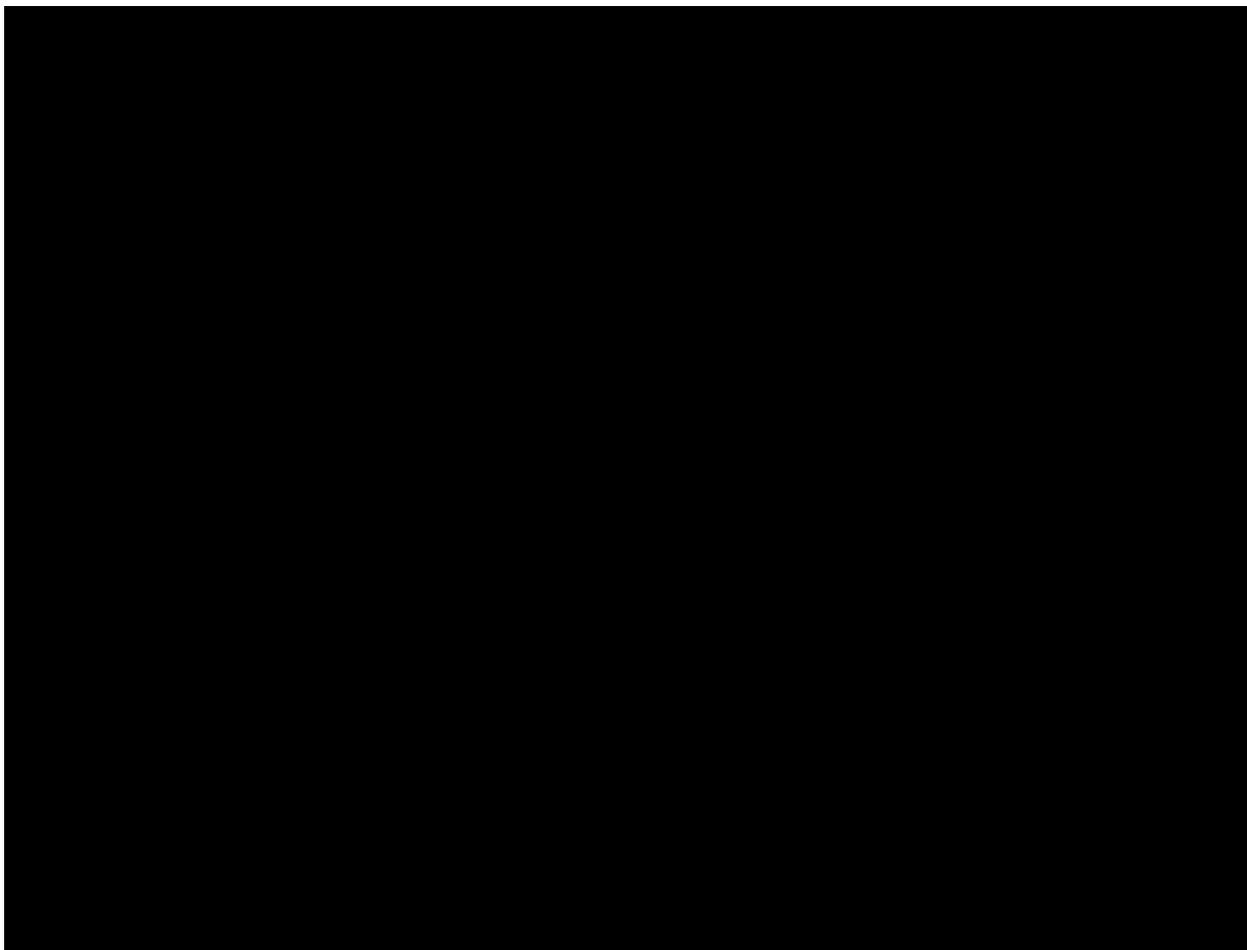
假设：不考虑大气圈的存在 ($G_a=0$)

地球为绝对黑体

条件：地面处于辐射平衡状态 ($R_e=0$)



则有：

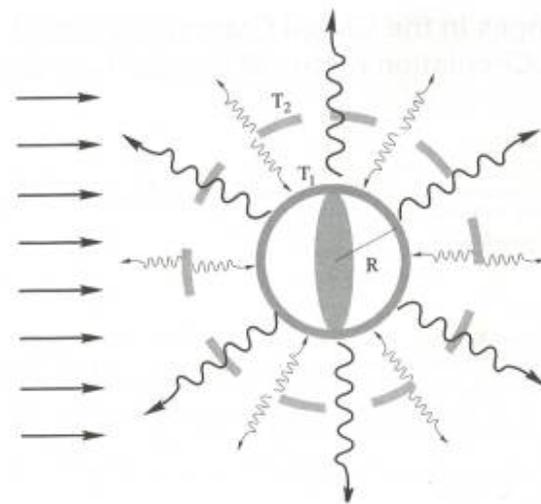


如果考虑大气圈的存在，不考虑大气对于太阳辐射的反射和吸收，且地球和大气均为黑体。当地面处于辐射平衡状态时，地面和大气温度的估计值是多少？（设云量为 $c=0.77$ ）

地面辐射平衡方程为



令 $R_e=0$ ，则有



设地面温度为 T_1 ，大气圈温度为 T_2 ，则有：

