

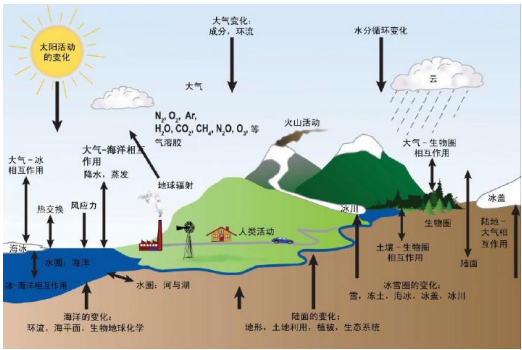
# 第二章 气候系统

## 2.1 气候系统的概念及组成

### 2.1.1 气候系统概念

**气候系统** 气候系统是大气圈、水圈、陆圈、冰雪圈和生物圈组成的受地球外宇宙（主要为太阳辐射）的强迫作用、能够决定气候形成和变化的相互作用的整体。各子系统在空间上相对独立，但同时相互接触渗透、相互影响。

- 具体解释**
- ① 气候系统是一个物理系统，由五个子系统构成，分别是**大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈**。
  - ② 气候系统不是孤立系统，受地球外宇宙的强迫作用：主要为**太阳辐射的热力作用**，是地球气候形成的基础。同时这个强迫作用与地球在宇宙空间的**位置**以及地球本身的**参数**（如地球大小）有关。物质交换很少（电离层、陨石）
  - ③ 最为重要的是：五个子系统相互作用，体现为系统间**能量、动量和物质的交换**，表现为大气与其它四个子系统间的垂直方向交换。**海-气、陆-气、冰-气、生物圈-大气圈**的相互作用是气候系统各圈层间相互作用的最基本过程。



大气—（海洋—冰—陆面—生物）耦合气候系统示意图

### 2.1.2 气候系统组成

#### 2.1.2.1 大气圈

**概念** 大气圈是包裹着固体地球的大气层，是人类赖以生存最重要的环境，是气候系统的**主体部分**，也是气候系统中**最为活跃、变化最大的部分**。

**组成** 主要成分有**干洁空气**( $CO_2, O_3, CH_4$  可变)、**水汽**、**固态和液态微粒**（气溶胶粒子）

**温室效应** 大气中的温室气体对太阳辐射的吸收很少，但却能**强烈地吸收地面放射辐射**，同时又向地面放射长波辐射，补偿地面因放射辐射而损失的能量，使地面气温升高的效应

**臭氧层空洞** 南极地区上空大气臭氧总含量大幅度异常下降的一种现象。

大气层臭氧春季最大，最高值在**80°N**左右，赤道附近季节变化不大。由于夏季强紫外线分解。臭氧层空洞位于南极主要由于南极环境气温冷，有冷平流层云，氯原子活性强，更容易分解臭氧。1987 年：《蒙特利尔协议》 目前臭氧在逐步恢复，2050s 恢复至 1980s 水平，本世纪末空洞消失主要来源于**地表蒸发与植被蒸腾**。由于水汽正反馈存在，可使温室效应增温翻倍。

**水汽** 固态颗粒主要来源于工厂、地表、植物、火山灰等；液态颗粒如水滴、冰晶等。

**微粒** 气溶胶对太阳辐射的**散射和吸收**，使得到达地表的**太阳辐射减弱**，引起地面气温下降。

**阳伞效应** **热惯性和动力惯性小**。维持原有状态的能力很小，给予强迫立刻变化。

**性质** **特征时间尺** **一个月左右**  $T = C_{\text{热容量}} / F_{\text{更新一次的通量}}$  **时间尺度**：完成某一种物理过程所花费时间的平均度量。即大气圈受到外部强迫，调整到近似平衡状态需要的时间在一个月左右。

由于大气热容量较小，且更新速度快，所以特征时间尺度较小。

**天气系统(气旋、反气旋等)的平均生命史**作为该系统的时间尺度

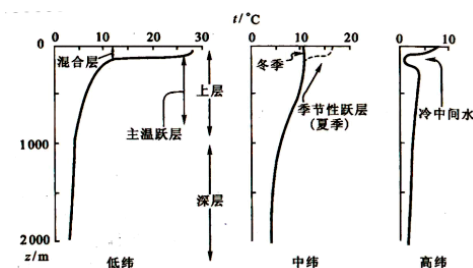
如定常 Rossby 波传播一圈的时间在 16.4 天左右。

气候上也常用其周期表示时间尺度，如 2-7 年为年际时间尺度。

流体系统取决于对外界强迫的响应，固体系统取决于自身性质的变化。

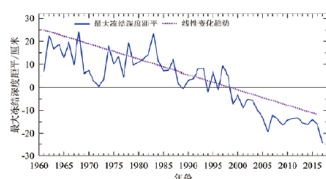
### 2.1.2.2 水圈

组成	海洋、河流、湖泊、地下水和地表及 <b>大气中的一切液态水</b> 。其 <b>三相变化</b> 是气候系统最重要的过程之一。
性质	<b>反射率最小、热容量最大、流速小、动力、热力惯性大。</b>
特征时间尺	<b>几年~几十年</b> (上层海洋) <b>世纪尺度</b> (深层海洋) 如 ENSO 循环(5 年左右), 温盐环流(千年尺度)
海洋结构	大洋平均温度典型垂直分布(右图) 海洋上层 <b>平均厚度240m</b> 的水温有季节变化, 称 <b>海洋活动层</b> <b>混合层</b> : 风应力导致的海水混合, 阳光穿透, <b>温度几乎一致</b> 。 <b>温跃层</b> : 温度变化最大的一层, 在热带最明显。 <b>冷中间水</b> : 高纬度冷海水密度增大下沉而形成
气候影响	海洋不存在对流, 主要研究上层活动层 海气相互作用、对温度的调节作用(二氧化碳的汇(海洋酸化)、吸热等)、水汽源地等

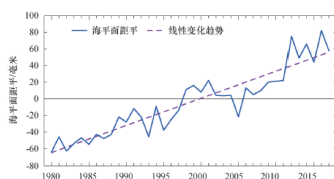


### 2.1.2.3 冰冻圈

组成	大陆 <b>冰原</b> 、高山 <b>冰川</b> 和 <b>永冻层</b> 、 <b>海冰</b> 和地面 <b>雪盖</b> 、 <b>冰盖</b> 。
热力性质	<b>反射率最大</b>
时间尺度	<b>陆地雪盖: 季节~年际变化</b> (青藏高原年际变化, 季节消退) <b>海冰: 季节~几十年际变化</b> (北极海冰变化) <b>大陆冰原、高山冰川和永冻层: 几百年~几百万年</b>
气候影响	<b>冰雪面-大气正反馈效应</b> (北极放大效应)、冰盖和冰川等冰雪圈冰量变化可影响海平面的升降



西藏最大冻结深度距平序列



中国大陆沿海海平面距平序列

### 2.1.2.4 岩石圈

组成	地球表层的固体表面, 由 <b>岩石、土壤和沉积物</b> 组成。包括高原、平原、山地、丘陵、盆地等。
热力性质	<b>热容量小, 热惯性小</b> 陆地上层 <b>平均厚度10m</b> 有季节变化, 称为 <b>陆地活动层</b>
时间尺度	山脉形成: $10^5 - 10^8$ 年 大陆漂移: $10^6 - 10^9$ 年 陆块位置和高度变化: $10^9$ 年以上 岩石圈时间尺度相当大 <b>土壤湿度: 季节与年际变化</b>
气候影响	地形的动力作用、地表热力热性的差异及陆面水分循环。

	大气	海洋活动层	陆地活动层
质量比	1	10.4	0.55
热容量	1	68.5	0.45

陆地质量、热容量均最小

### 2.1.2.5 生物圈

组成	陆地和海洋中的 <b>植物</b> , 空气、海洋和陆地生活的 <b>动物</b> , 包括人类本身。
性质	反射率、粗糙度、蒸发、蒸腾、渗透、水份循环、 $CO_2$ 平衡等各种因素随植被有区别。 主要由下垫面性质参与影响气候。
时间尺度	<b>季节~千年</b>
气候影响	人类活动通过改变地表特性和大气成分对气候产生影响。 植被的直接效应与生理效应(云南桉树抽取地下水蒸腾散发) 不良适应: 例如在不适宜种树的区域植树造林, 会对当地生态造成影响。 物质循环: 生物圈与大气圈存在物质循环, 主要是碳氮循环、二氧化碳循环、水循环

2.2 气候系统的基本特性

2.2.1 气候系统的物理属性

2.2.1.1 系统的概念

**定义** 许多**物体**(成分)和**属性**(变量、要素)组成的**结构群**，这些物体和属性之间通过一定的**物理过程**(动量、能量、物质守恒)而**相互联系**，并按**某种观测的型**作为一个复杂的整体而起作用。

海洋洋流的特征与大气环流有关 如状态方程 $P = \rho RT$

**注意** 气候系统满足能量守恒、动量守恒和物质守恒，对观测到的型有约束作用

2.2.1.2 系统的分类

- 开放系统** 有**能量和物质**与系统外交换  
如气候系统中的大气系统、海洋系统等子系统
- 封闭系统** 有**能量**，无物质与系统外交换  
**气候系统整体是封闭系统**（物质交换不足以改变属性）
- 孤立系统** 无**能量**，无物质与系统外交换

圈层和代表物质	大气圈空气	水圈水	冰雪圈冰(纯)、雪(新鲜)	岩石圈粘土(干)	生物圈森林
密度 (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	0.0012	1.00	0.92	0.10	1.60
比热容 (10 <sup>3</sup> J/kg·K)	1.00	4.19	2.10	2.09	0.89
热容量(10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> ·K)	0.0012	4.19	1.93	0.21	1.42
热传导 (W/m·K)	0.026	0.58	2.24	0.08	0.25
反射率(%)	~27	2~10	~70	84~95	>20
					<20

气候系统各圈层代表物质的物理性质对比

2.2.1.3 气候系统的属性

- 热力属性** 空气、水、陆地表面和冰雪面的**温度**
- 动力属性** **风、洋流**及其垂直运动和冰体运动
- 水分属性** 空气湿度、云量、降水量、土壤湿度、河湖水位、冰雪等
- 静力属性** 大气和海水的密度、压强、大气的组成、海水盐度及气候系统的**几何边界和物理常数**等
- 性质对比**
  - ① **干粘土比热容最小**（粒子间碰撞），**水比热容最大**（氢键）
  - ② 热容量可理解为密度乘以比热容，由于大气圈密度非常小，**大气热容量最小**。
  - ③ 空气是热的不良导体(依靠湍流传导)，**冰的热传导最大**(晶格结构排列紧密，容易传导，与雪不同)
  - ④ **水的反射率是最低的**。

2.2.2 气候系统的反馈性

**反馈** 气候系统不同属性(变量)之间的**相互作用**，引起气候属性的变化，称为反馈。  
某一属性发生变化，经过一系列相互作用后，又使得某一属性进一步发生变化。

2.2.2.1 正反馈

- 正反馈** 反馈过程造成的气候变化**与原变化同号**，使气候变化加剧，**产生气候不稳定**称为正反馈。
- 案例** 高云-逸出辐射-温度、植物-反射率-稳定、土壤温度-蒸散发-地表温度等
  - ① **冰雪面-反射率-温度**：温室气体 → **温度升高** → 冰雪融化 → 反照率降低 → 吸收更多热量 → **温度**
  - ② **水汽-红外逸出辐射-温度**：  
全球变暖 → **水汽增加** → 红外辐射逸出减少 → 地温升高 → 蒸发增强 → **水汽**
  - ③ **CO<sub>2</sub>-海温**：CO<sub>2</sub>增加 → 温度增加 → CO<sub>2</sub>溶解能力下降 → CO<sub>2</sub>进一步增多

2.2.2.2 负反馈

- 负反馈** 反馈过程造成的气候变化**与原变化反号**，抑制气候的变化和异常，**使气候趋于稳定**，称为负反馈。
- 案例**
  - ① **赤道、极地温差-热量输送**：  
经向热量输送减少 → 赤道极地温差增大 → 经向热量输送增加 → 赤道极地温差减小
  - ② **中低云量-稳定度**：  
中低云量增多 → 到达地面太阳辐射减少 → 稳定度增大 → 中低云量减少 → 到达地面太阳辐射增加
  - ③ **蒸发量-水面温度**：蒸发量大 → 水面温度低 → 蒸发量小

2.2.2.3 气候地球系统反馈

- 定义** 物理反馈、生物地球物理反馈(植被变化(植被-反照率-温度))、生物地球化学反馈(CO<sub>2</sub>反馈)
- 普朗克反馈** 温度增加 → 地面长波辐射增加 → 地表温度降低 非常重要的负反馈，几乎所有反馈都基于此

## 2.2.3 气候系统的敏感性

- 定义** 控制气候系统的外参数改变所引起的气候属性（如温度）相应的改变量，称为气候敏感性。  
可表示为  $\lambda = dT/dx$ ，该数值大，表示气候敏感性强。  
如  $T_s$  为地表气温，参数  $x$  为辐射强迫，即研究地表气温对辐射强迫的敏感性问题  
 $\lambda = dT_s/dF$  辐射强度变化一单位，会使得温度变化多少单位。
- 注意** 气候敏感性与许多相关变量  $y_i$ （如水汽含量、冰雪覆盖面积、云量等）的存在与变化对气候属性的影响有关；物理反馈、生物地球反馈、生物地球化学反馈等都有影响。下面我们举例来量化它。

### 2.2.3.1 地表温度 $T_s$ 的变化

**公式推导**  $\lambda = \frac{dT_s}{dF} = \frac{\partial T_s}{\partial F} + \sum_i \left( \frac{\partial T_s}{\partial y_i} \times \frac{dy_i}{dF} \right)$

- ①  $\lambda_0 = \frac{\partial T_s}{\partial F}$  不存在相关变量影响情况下的气候敏感性，根据斯蒂芬玻尔兹曼定律推导：

$$\lambda_0 = 0.266 \text{ K}(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$$

- ②  $\frac{dy_i}{dF} = \frac{dy_i}{dT_s} \frac{dT_s}{dF}$  相关变量与辐射强迫的关系取决于这些变量与气温的关系

- ③  $f_i = \frac{\partial T_s}{\partial y_i} \frac{dy_i}{dT_s}$   $f_i$  各种反馈过程相关的无量纲化反射因子  $f_i > 0$  表示正反馈

$T_s$  增加使得水汽含量增加，进一步使得温度增加，两项都是正值，正反馈

$T_s$  增加使得低云增加，反射短波辐射，反过来是温度降低，负反馈

- ④  $f = \sum_i f_i$  将所有反馈因子相加得到总反馈因子

**增益公式**  $\lambda = \lambda_0 + \lambda f \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + \frac{\lambda}{\lambda_0} f \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{1-f}$

- ①  $f < 0$  气候反馈的存在使得气候敏感性变小

- ②  $0 < f < 1$  气候反馈的存在使得气候敏感性变大

- ③  $f > 1$  气候敏感性为无穷大，导致系统非常不稳定，系统无法继续存在。

**实例** 水汽反馈： $f \approx 0.4 \sim 0.5$  正反馈：水汽随温度增加增强温室效应 增强两倍

冰雪反照率反馈： $f \approx 0.2 \sim 0.3$  正反馈：融冰降低反照率

云反馈：不确定，但净效应通常为正

## 2.2.4 气候系统的可预报性

**基本概念** 人类能在多大程度上预报未来气候状态，称为气候的可预报性。

**第一类** 对将来某一具体时段气候状态的预报，其可预报性取决于作用于气候系统的外力和气候系统各子系统相互作用对气候状态影响的程度。如预报今年汛期的降水(主要是内部的相互作用)、本世纪末温度情况(主要是外力强迫)。

即时间意义上的可预报性：初始误差扰动随时间增长的问题，直接与大气统计性质的预报有关。表现为按时间顺序预报气候状态的可能程度。

**第二类** 与时间无关，预测气候对某一影响因素变化的响应。

即外强迫发生变化后，气候变化的模拟和预报能力。

**外力** 周期性外力：太阳辐射年际变化、米氏周期、银河周期

非周期性外力：火山爆发、地震、深层海温、深层地温活动等

**内力** 准周期性：系统内部各因子之间相互耦合而成的自持震荡（如地气耦合、ENSO、南方涛动等）

随机性内部因子