

第九章 气候变化

9.1 气候变化的概念

9.1.1 基本概念

9.1.1.1 气候状态等基本概念

气候状态 在太阳辐射强迫和气候系统各子系统相互作用下，地球上某一区域的天气或气候要素在**特定时段内的统计特征**，可以取平均、总量、方差等 例如 1998 年长江中下游梅雨期降水总量称为一个气候状态

气候态 **气候态**或**气候标准态**可简称为**同类气候状态**（要素及其统计量、每年特定时段都一样）**30 年的平均**。例如 30 年长江中下游梅雨期降水总量气候状态的平均就是一个气候态。科研常用气候态的空间分布。

气候距平 **气候状态相对于其气候态的偏差**，称为**气候距平**。具体使用中，气候距平、气候异常不加以区分。

气候异常 当气候距平这种**偏差超过一定程度**（如一倍标准差）称为**气候异常(Climatic anomaly)**。

时间序列 由**气候状态**或**气候距平**按年份先后顺序组成的序列即为气候变化时间序列。有连续型和离散型。

9.1.1.2 气候变化

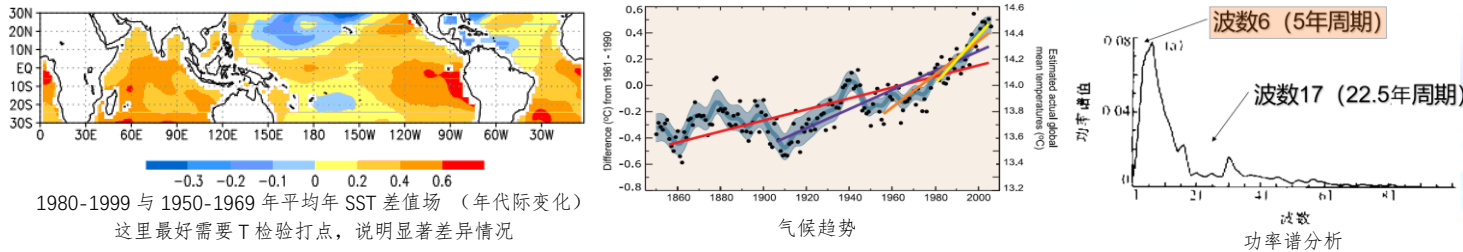
气候变化 气候变化时间序列的**演变**(变化形式)或**气候状态的变化**统称为**气候变化(Climatic variation)**。
时间序列不是一条单调的直线，其受到多个因素的年代季调控，其形式复杂多样。

概念辨析

① **联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 定义**的气候变化：气候变化是**指可识别的（如统计检验显著）持续较长一段时间**（典型的为几十年或更长）的气候状态的变化，包括气候平均值和变率的变化。必须要进行统计显著检验，即必须与原来的状态具有显著差别，避免随机变化、总体特征的情况。

② **联合国气候变化框架公约 UNFCCC 定义**的气候变化：在可比时期内所观测到的在自然变率之外的直接或间接**归因与人类活动**改变全球大气成分所导致的气候变化。（狭义的气候变化）

③ **本课程给出的气候变化概念**：是**广义的气候变化**，包含较长时段气候状态的变化、由气候距平或气候状态组成的时间序列的演变，涵盖 IPCC、UNFCCC 给出的气候变化信息，对书上的概念有所扩展。



气候变率 大量同类气候状态间的**方差**，也经常用来专指年际及年代际（与自然因素有关）的气候变化。

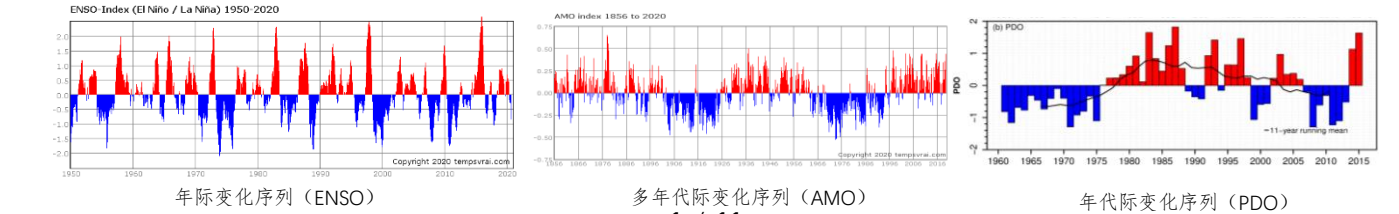
公式: $S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2$ $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ N 是序列长度, n 是气候态的长度, S 为序列方差,

T_i 为气候要素 T 的气候状态, \bar{T} 为气候态, $T_i - \bar{T}$ 即为气候距平或气候异常

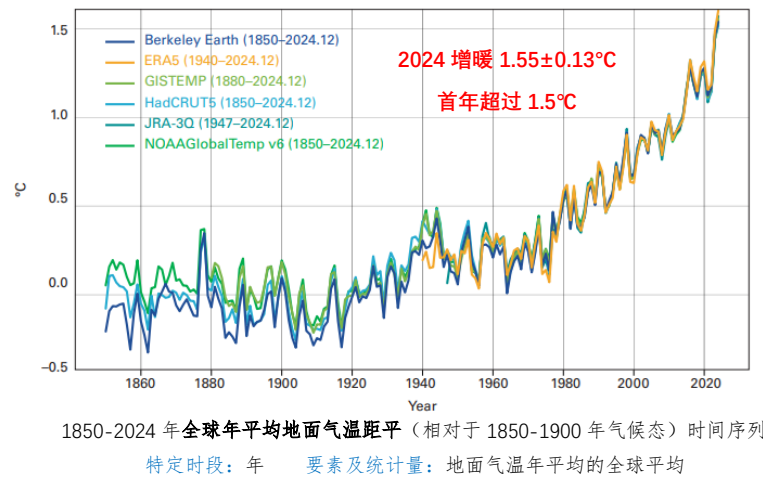
变率不局限于年的变率,可以扩展到季节、月尺度等,由研究对象决定。

气候趋势 **气候变化倾向**,即在记录时期(特定期)具有**单调地上升或下降特点**的气候变化(**线性和非线性趋势**)
该直线的斜率称为**倾向率**,越倾斜说明变化越明显。也有非线性的拟合方式(样条、二次等)

气候波动 **气候状态围绕气候态** (或**气候距平**)的**波动式变化**,表现为准周期性振荡特征,有年际、年代际等时间尺度。常常通过功率谱分析得到波动周期信息及其强度。



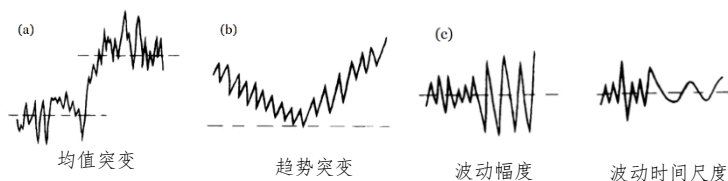
年际变化序列 (ENSO) 多年代际变化序列 (AMO) 年代际变化序列 (PDO)



1850-2024 年全球年平均地面气温距平 (相对于 1850-1900 年气候态) 时间序列
特定时段: 年 要素及统计量: 地面气温年平均的全球平均

气候突变

从一种气候状态（如稳定持续的变化趋势或气候波动）**跳跃式地转变**到另一种气候状态的现象。气候突变分为均值突变、趋势突变、变率突变(方差突变)、振荡周期突变(时间尺度突变)等。注意：突变可能与再分析资料的更新等有关（1979 卫星资料更新等）



9.1.2 气候变化的表现形式

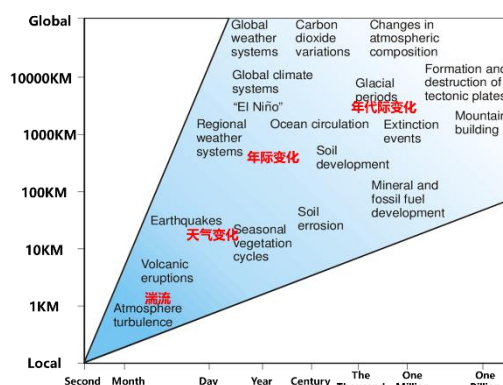
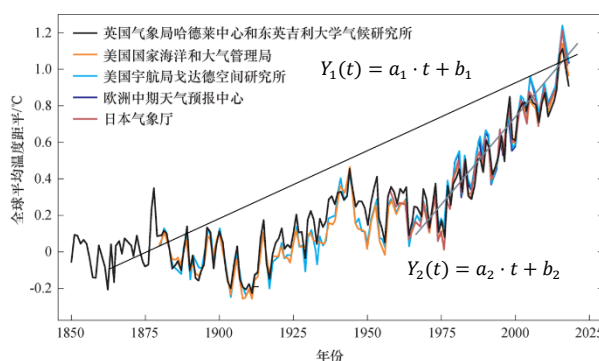
9.1.2.1 单个气候变化时间序列

表现形式

气候趋势、气候波动(年际、年代季等尺度波动)、气候突变、随机变化。最终的时间序列与这些因素都有关系。

具体案例

趋势、波动或突变融合在时间序列中：研究时，**可以将线性趋势和波动，以及不同时间尺度的振荡进行分离**。例如关注波动研究时，需要将趋势去除。



9.1.2.2 气候波动的尺度

时间尺度

百万-几亿年 大冰期与大间冰期，振幅10°C，主要由天文、地质因素决定。
十万年 亚冰期与亚间冰期，振幅8-9°C
几万年 副冰期与副间冰期，振幅5-7°C
百千年 寒冷期（小冰期）与温暖期（小间冰期），振幅2°C
数十年 世纪及世纪内的气候波动，振幅0.5°C

空间尺度

全球、半球、海洋、陆地、区域尺度。

气候变化的尺度：时间越大，范围越大

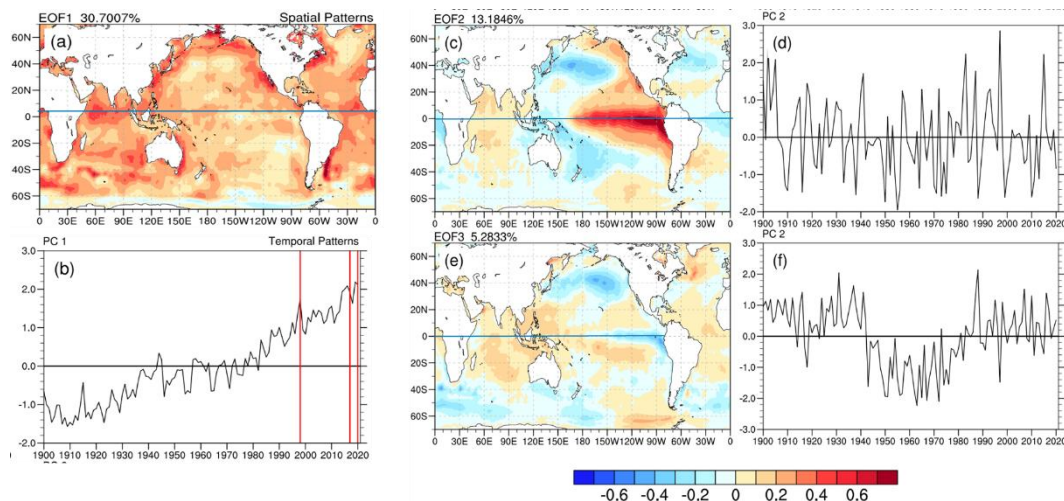
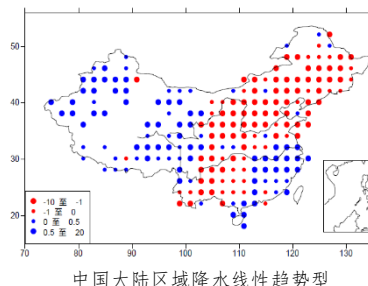
9.1.3 气候变化的空间分布

线性趋势

空间上每个格点都有一个时间序列及其对应的变化趋势。

EOF 展开

时空数据中找出最明显的异常特征，和主成分分析类似。

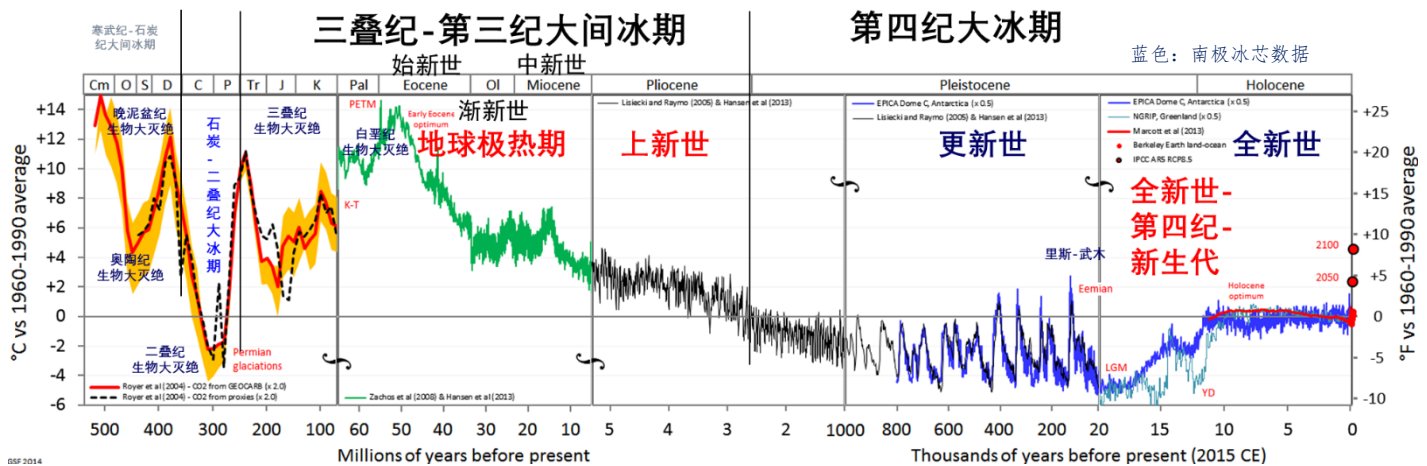


夏季 SST 异常的 EOF 展开

9.2 气候变化史实

9.2.1 气候变化时期划分

9.2.1.1 地质历史温度变化情况



总体情况 当前温度处于较低的温度，处于第四季大冰期。整个地质时期没有哪个时期像现在这样增温幅度剧烈。

LGM 末次冰期冰盛期（距今 2 万年）目前处于冰期回暖阶段。

YD 新仙女木事件（距今 1.2 万年）由于温盐环流减弱导致。Holocene optimum: 全新世适宜期

PETM 古新世-始新世极热事件（距今 5000 万年）：回暖过程中急剧增加的现象。

K-T 白垩纪-第三纪界线（恐龙灭绝）

9.2.1.2 具体时期的划分

划分依据 变化的时间尺度、主要特征、形成原因、资料来源、分析和研究方法

划分情况 地质时期气候变化（利用冰芯等推测干湿冷暖情况）、历史时期气候变化、现代气候变化

9.2.2 地质时期气候变化

定义 时间尺度在几万年以上的气候变化。

地质年代 代→纪→世（世：时间尺度万年以上）我们目前处于全新世-第四纪-新生代的大冰期中。

历史冰期 存在三次大冰期和两次大间冰期。大冰期和大间冰期交替出现。变温幅度平均约为 10 度。

资料来源 地壳构造(化石、沉积岩层等)、生物演变

特点 大冰期与大间冰期旋回。

9.2.2.1 冰期-间冰期

旋回因子

- ① 大气层组成： CO_2 、 CH_4 等浓度
- ② 地球轨道的变化：米兰科维奇循环(地轴变化)或银河旋臂(银河尘埃粒子等)
- ③ 板块运动：板块运动影响风(尤其是季风)、山脉情况(有山易成冰)、洋流、气流
- ④ 太阳输出能量的变动：太阳活动周期性变动
- ⑤ 大陨石的撞击：造成大气层种的尘埃增加(恐龙灭绝)
- ⑥ 火山爆发：特别是超级火山的喷发

9.2.2.2 震旦纪大冰期

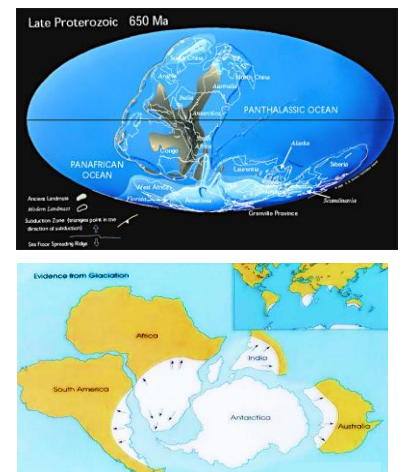
发生时间 在早古生代，距今约 6 亿年前。

主要特点 这次冰期的影响范围几乎遍及世界五大洲，我国长江中下游地区都有震旦纪冰碛层（吕梁运动）

9.2.2.3 石炭-二迭纪大冰期

发生时间 距今 2.5~3 亿年（海西运动），南极大陆向北推进。

气候特点 冰期气候影响的主要在南半球（冈瓦纳大陆）



9.2.2.4 第四纪大冰期

发生时间 距今 240 万年前开始直到现在
主要特征 存在亚冰期与亚间冰期的冷暖反复交替（喜马拉雅运动）
亚冰期 大冰期中存在着很多亚冰期与亚间冰期的交替

9.2.2.5 寒武纪-石炭纪大间冰期

发生时间 距今约 3~6 亿年。
基本特征 雪线升高，冰川后退，气候显著变暖。石炭纪在地质史上又称为成煤纪。我国都处于热带气候。氧气非常充足，植被十分茂盛，动物体型巨大(节肢动物等)。

9.2.2.6 三迭纪-第三纪大间冰期

发生时间 距今约 2.5 亿年-200 万年，包括三迭纪、侏罗纪、白垩纪和新生代的第三纪。
主要特征 三迭纪时气候炎热而干燥，其后侏罗纪的气候由干热转为湿热，有利于植物生长，造成继石炭纪之后的第二个成煤时期。出现恐龙等大型动物。

9.2.3 历史时期气候变化

定义 从第四纪大冰期中的武木(大理)亚冰期的最近一次副冰期之后的 1 万年至有器测资料的冰后期气候。从地质年代来看，该时期也称为全新世气候。

资料来源 冰芯、树木年轮、珊瑚、花粉、孢粉(同位素判断)、湖泊沉积、历史文献等

特点 温暖期与寒冷期交替出现

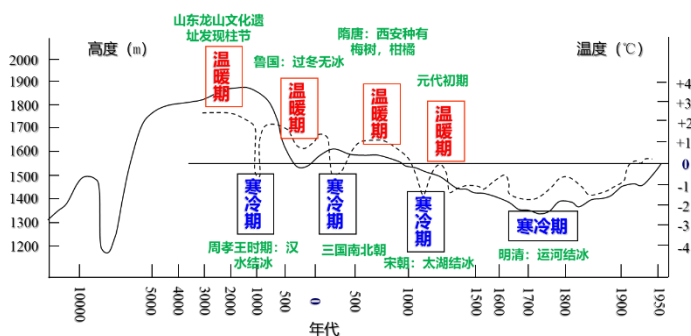
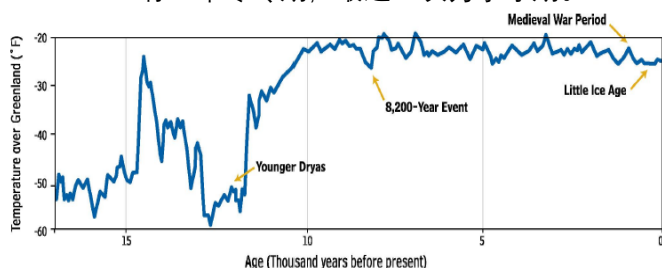
9.2.3.1 近 2 万年以来的气候变化

近代情况 大暖期 (8.5-3.0kaBP) → 8.2kaBP 冷事件 → 中世纪暖期 (AD 900-1300) → 小冰期 (AD 1320-1920) → 现代增暖 (20 世纪)

发生事件 新仙女木事件: 12.2-10.5kaBP 全球冰川消退、气候回暖过程中发生的气候突变事件，新仙女木事件结束后即进入温暖湿润的全新世。

全新世大暖期: 8.5-3.0kaBP 间冰期中最暖阶段，该阶段时限较宽，包含一些气候波动。总体上暖于现代，降水多于现代。

全新世千年尺度气候波动与气候事件: 全新世存在千年尺度气候波动平均周期 1.45ka。11kaBP 以来有 9 个寒冷期，最近一次为小冰期。



一万年來挪威雪線高度(實線)與五千年來我國溫度(虛線)變遷

9.2.3.2 我国历史时期气候变迁 (近数千年的气候史)

总体情况 中国近五千年内可以相对地分出四个温暖期与四个寒冷期 (上图)

9.2.4 近代气候变化

9.2.4.1 全球增暖 (Global Warming)

具体情况 ① 波动阶段性上升 (不是直接线性增加)
② 不同区域增暖幅度不同: 高纬强于低纬，陆地强于海洋等。
③ 不同季节增暖幅度不同: 冬季增暖大于夏季

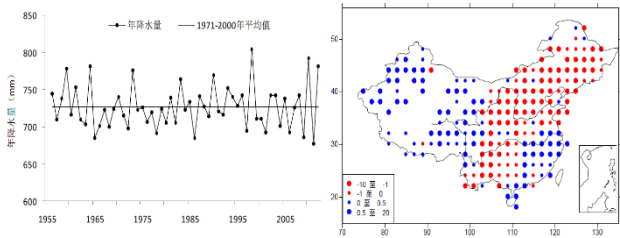
定量表征 全球地表温度(海表温度或陆地表面温度 SST,GMST) 或全球地表气温(GSAT) 相对于一个基态(最早有足够全球及区域观测阶段-人类活动影响忽略不计阶段)的变化，如 2011-2020 阶段全球平均地表温度相对于 1850-1900 年平均增加 1.09[0.95~1.20]°C

增暖震荡 从 1900 年开始: 冷期→增暖期(I)→冷期(2)→增暖期(II)→冷期(3)→增暖期(III) [当前阶段]

- 控制协议2015 年的巴黎气候大会《联合国气候变化框架公约》第 21 次缔约方会议：全球平均地表温度增加控制在1.5~2℃ 范围。（已经超过 1.5℃了）
- 现有预测根据研究（观测、数值模式的模拟、评估及预估），2030 年全球平均地表温度增加很可能超过 1.5 C，2041-2060 年可能达到2℃。
- 增暖特点
 - ① 陆地增暖显著强于海洋，高纬强于低纬(反馈循环)。
 - ② 对流层低层增暖，平流层低层降温（对流层吸收更多辐射，提供给平流层的辐射减少）。
 - ③ 中国区域的增暖超过全球平均情况，冬季增暖幅度更大。

9.2.4.2 降水变化

- 总体趋势
 - ① 近百年来，全球陆地平均降水无显著趋势变化（受到能量、潜热等制约，不受到辐射直接影响）
 - ② 1951-2005 年间降水下降趋势是7－2mm/10a。
 - ③ 1979-2005 年 GPCP，下降趋势16－13mm/10a。
 - ④ 不同数据集趋势间有明显差异，同时降水也有较大时空变率。
 - ⑤ 高纬度地区降水增加，全球降水呈现震荡现象。
- 中国情况
 - ① 没有明显趋势，呈现波动震荡。
 - ② 西北逐渐变得暖湿，中部、东北地区降水减少。



中国 1956-2012 降水序列和线性趋势

9.3 极端天气气候

9.3.1 基本概念

9.3.1.1 极端天气的定义

极端定义统计意义上极少发生的天气事件、气候状态，一般指发生概率低于 10%或不发生概率高于 90%(两倍标准差)的天气事件、气候状态。

9.3.1.2 描述极端天气的事件指标

常用指标	代码	名称	定义	类型	单位
	TXx	日最高温最高值	年内日最高气温的最大值	绝对指数	℃
	TNn	日最低温最低值	年内日最低气温的最小值	绝对指数	℃
	TN10p	冷夜日数	最低气温小于 10%分位值的天数百分比	阈值指数	%
	TX10p	冷昼日数	最高气温小于 10%分位值的天数百分比	阈值指数	%
	TN90p	暖夜日数	最低气温大于 90%分位值的天数百分比	阈值指数	%
	TX90p	暖昼日数	最高气温大于 90%分位值的天数百分比	阈值指数	%
	DTR	气温日较差	年平均日最高气温和最低气温之差	绝对指数	℃
	WSDI	热持续日数	连续 6 日最高温大于 90%分位值日数	持续指数	天
	CSDI	冷持续日数	连续 6 日最低温低于 10%分位值日数	持续指数	天
	R10mm	大雨日数	每年日降水量 ≥10mm 的总日数	绝对指数	天
	R95p	强降水量	日降水量>95%分位值的年累积降水量	阈值指数	mm
	CDD	持续干燥指数	日降水量<1mm 的最长连续日数	持续指数	天

9.3.2 极端天气的概率描述及变化

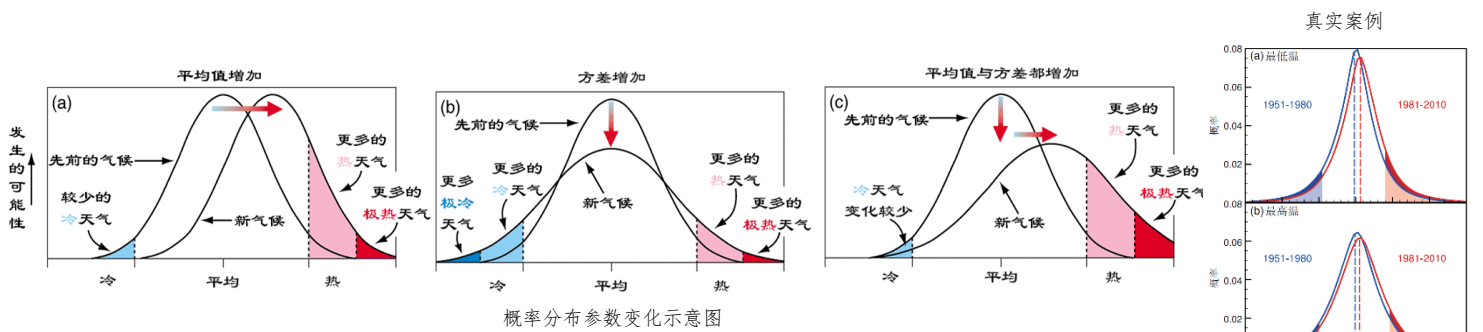
9.3.2.1 广义帕累托概率分布

案例 郑州暴雨是千年一遇（即每年发生的概率是1/1000，通过理论分布： 广义极值分布）

GPD 概率 广义 Pareto(GPD)的概率分布函数： $P(X \leq x) = F(x) = 1 - \left[1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right]^{-1/\xi}$
σ 尺度参数(描述极值分布的变率) u 位置参数-阈值 ξ 形状参数(描述极值的分布情况)

9.3.2.2 概率分布的参数变化

变化类型 ① 均值（位置参数）的变化 ② 方差（尺度参数）的变化 ③ 均值和方差的变化



9.3.2.3 重现期 T 的变化

重现水平 重现水平的估算： $x_T(t) = u(t) + \frac{\sigma(t)}{\xi} [(T\rho)^\xi - 1]$ ρ 是每年超过阈值的平均样本数

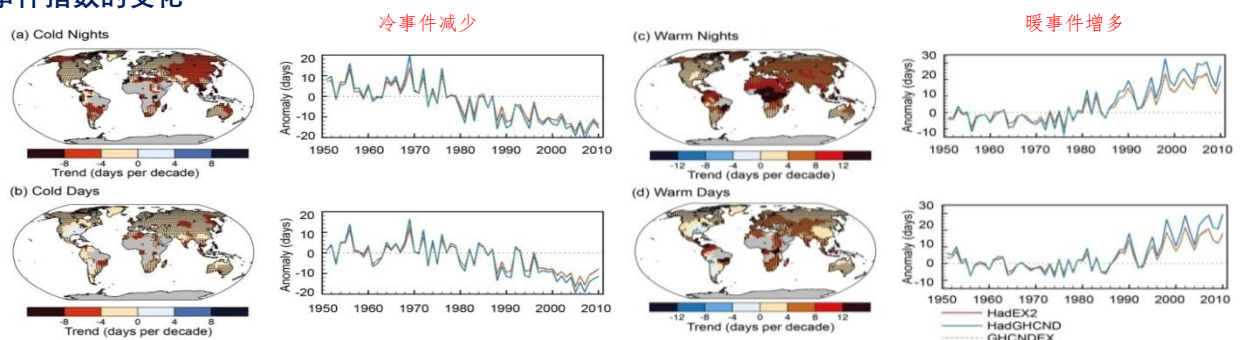
可以通过概率计算具体值，例如判断二十年一遇的天气的具体数值。

已知重现水平则其重现期的估计： $T(t) = \left\{ [x_T - u(t)] * \frac{\xi}{\sigma(t)} + 1 \right\}^{1/\xi} / \rho$ 输入数值，给出时间

固定重现期内至少出现一次大于重现水平的降水概率为： $P(t) = 1 - \left\{ 1 - \left[1 + \xi \frac{x_T - u(t)}{\sigma(t)} \right]^{-(1/\xi)} \right\}^{\rho T}$

9.3.2.4 极端事件指数的变化

案例分析



9.4 气候变化因素

根本原因 气候变化(狭义的气候变化)的**根本原因是气候系统辐射平衡被打破**，IPCC-AR6 报告提到：人类活动在 2019 年引起的净辐射强迫相对于 1750 年是 $2.72 [1.96 \text{ to } 3.48] \text{ W m}^{-2}$ 。2006-2018 年相对于 1971-2006 年，观测到气候系统的加热率从 0.50 W m^{-2} 增加到 0.79 W m^{-2}

重要原因 **反馈**会导致温度增加的幅度更大，往往占据了温度增加的主要原因。

9.4.1 气候变化因素分类

9.4.1.1 分类思路：自然与人为

- 自然原因**
- ① 银河系变化、太阳演化、太阳活动 改变短波辐射
 - ② 地球轨道参数（轴倾、岁差、偏心率） 同样改变短波辐射
 - ③ 大陆漂移、造山运动、火山活动
 - ④ 海洋(大气)环流与海-冰-气-陆相互作用

- 人为原因**
- ① 温室气体、气溶胶排放
 - ② 土地使用、热带雨林破坏
 - ③ 城市化

9.4.1.2 分类思路：外部强迫因子与气候系统内部因素

外部强迫 **自然因素**：银河系变化、太阳演化、太阳活动；地球轨道参数(轴倾、岁差、偏心率)；大陆漂移、造山运动、火山活动。 这些因素改变了温度，但温度不会反作用于这些因子，在模式中以参数表示。

人为因素：大气成分及下垫面性质改变等。

内部因素 海洋(大气)环流和大气与海-冰-陆-生相互作用。

其是气候系统的内部变量，例如其改变了温度，温度还会存在反馈交换等，反作用于这些因素。

9.4.2 [自] 太阳辐射的变化

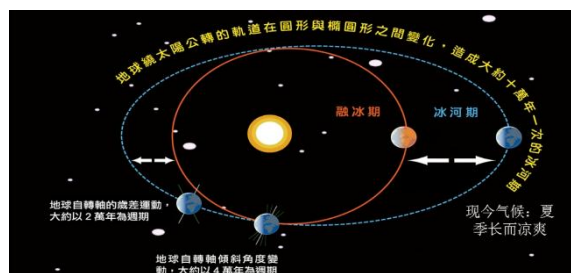
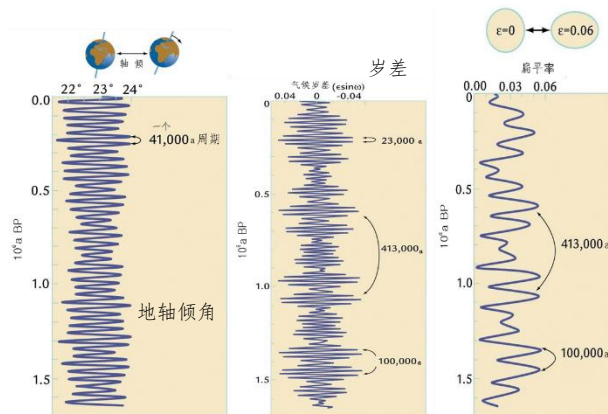
9.4.2.1 总体概述

地球轨道 **米兰科维奇理论 (冰期天文理论)**: 由于天体间引力的影响, 地球轨道**偏心率**、**地轴倾斜度**和**岁差**等地球轨道参数发生变化, 使地球**接收到的太阳辐射产生差异**, 从而引起**数十万年间**的气候变迁。

即地球轨道参数的周期变动是造成**更新世亚冰期-亚间冰期循环**的主要机制。

冰期循环 冰期-间冰期循环(万年尺度)的形成机制: **米兰科维奇理论(Milankovitch, 1941)**

参数周期 ① **地轴倾角**: 4.1 万年周期 ② **岁差**: 2.2 万年周期 ③ **偏心率**: 9.58 万年周期



轨道偏心率的影响

9.4.2.2 地球轨道偏心率的变化

偏心率 描述地球绕太阳运动轨道的圆扁程度, **值越大越扁, 值越小越圆**。
$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

变化情况 ① 0.00048~0.068, 现在 $e = 0.0167$ 。
② **每隔 10 万年**, 地球公转轨道的偏心率变化一个周期。

当前情况 目前, **北半球冬季位于近日点附近**, 地球获得的天文辐射量比夏季约大 7%, 冬半年较短。

北半球有暖而短的冬季, 长而凉爽的夏季, 适合冰期。 冬季降雪可以在夏季保留。

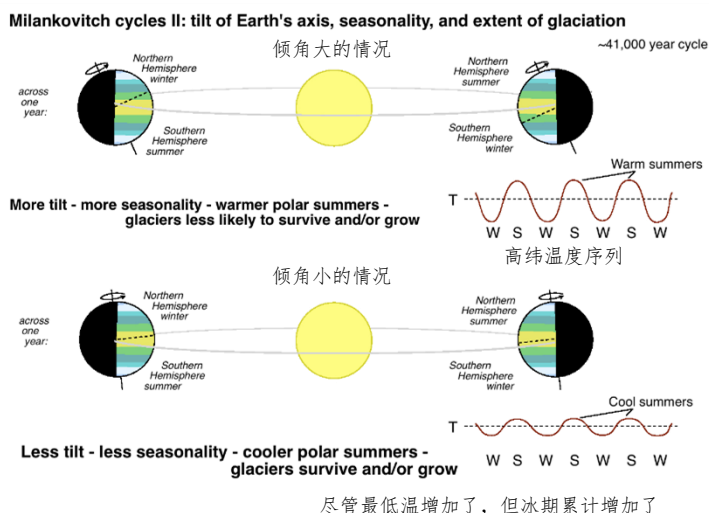
影响 偏心率很小时, 地球公转轨道接近圆形, 冬夏长度相近, 接收到的太阳辐射量也相接近, 不利于冰期。偏心率变大时, 则地球公转轨道变为椭圆形, 冬夏半径长短不等, 偏心率越大, 两者长度差异越大, 越利于冰期产生。

9.4.2.3 地轴倾斜度(黄赤交角)的变化

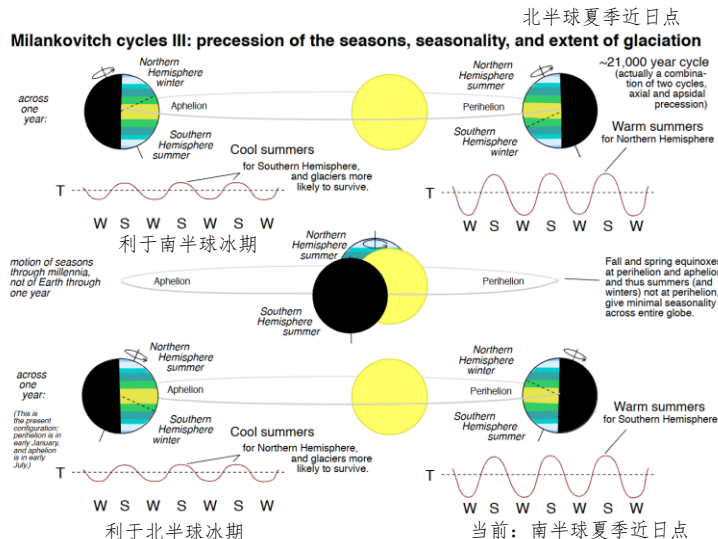
变化情况 **22.1°~24.24°**, 现在为 **23.45°**, **变动周期 4.1 万年**

影响因子 地轴倾斜度(黄赤交角)的改变**不会改变全球接收到的太阳辐射总量**, 但它可使**各纬度接收到的太阳辐射量发生变化**。(变化的是太阳辐射的纬度分配)

① **倾斜角度变小**, 高纬度地区季节温度差异变小, 且高纬度分配热量少, **有助于冰期形成**。
② 倾斜大, 季节性变强, 直射纬度偏向高纬, 高纬地区夏季很暖, 不利于冰川增长。



尽管最低温增加了, 但冰期累计增加了



9.4.2.4 岁差

岁差的概念 岁差指一个天体的自转轴指向因为重力作用导致在空间中缓慢且连续的变化。例如，地球自转轴的方向逐渐漂移，追踪它摇摆的顶部，以大约 2.3 万年的周期扫掠出一个圆锥。

影响因子 ① 岁差同样不会改变全球接收的太阳辐射总量，但它可使各季节接收的太阳辐射量发生变化，变化的是季节分配。
② 岁差引起地球近日点和远日点所在的季节发生变化。1 万年前，北半球冬季处于远日点，冬季比现在长而酷寒，夏季则更短更热(不利于冰川发展)，年变化加大。南半球相反。

9.4.2.5 太阳活动

活动表征 太阳黑子：太阳黑子多，太阳活动强，太阳光斑增加，太阳辐射增加。

变化情况 太阳活动的周期性特征：11 年（太阳活动周）、22 年（海尔周期）、80-100 年（世纪尺度）。

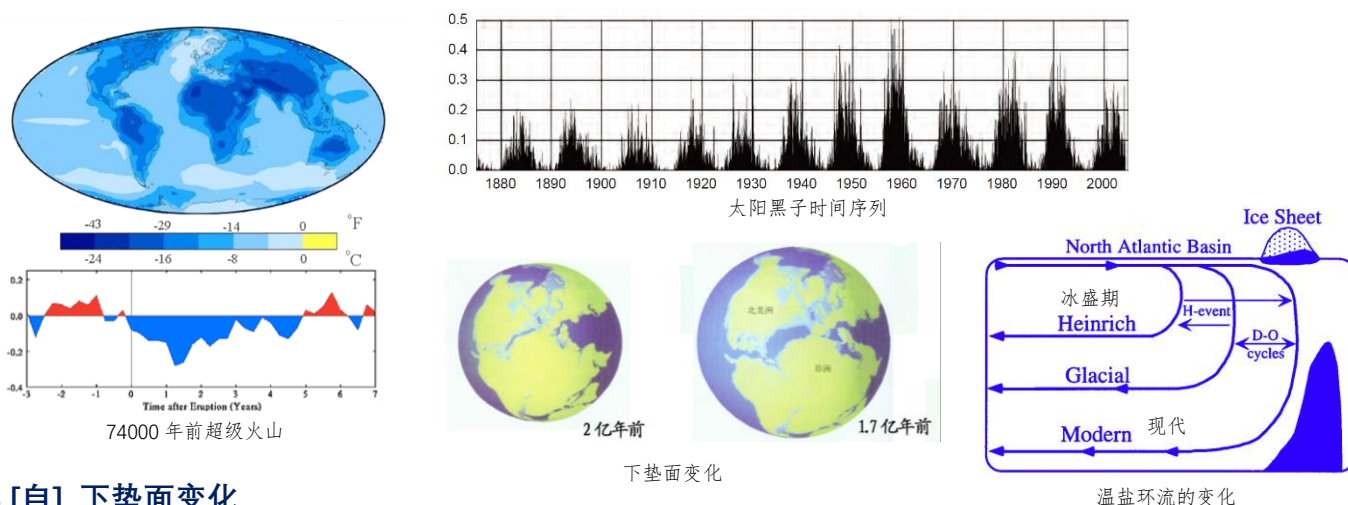
影响情况 ① 11 年周期里，地球气候表现单的和双振动现象：如地球上雷暴频数、大气环流特征、气温等存在双振动现象（5-6 年周期）。
② 地球气候表现出与太阳活动 22 年周期一致的海尔周期现象，如气压、气温、降水、阻塞高压频率、大气活动中心位置等。
③ 太阳活动世纪周期与气候振动具有密切的联系，环流强度、台风频数等。

9.4.3 [自] 火山活动

活动影响 增加大气气溶胶。使地面气温下降：火山活动的阳伞效应。

活动情况 火山灰停留时间短(几个月)，硫酸气溶胶可停留数年，可长时间对地面产生净冷却效应。
火山活动呈现周期性变化。

活动指数 即尘幕指数： $DVI = 0.97 \times R \times E \times t$ 其中 R 表示直射量的减少， E 描述覆盖面积， t 表示持续时间。其只考虑了火山灰，忽略了平流层更重要的气溶胶体。



9.4.4 [自] 下垫面变化

大陆漂移 ① 板块漂移改变海陆分布（盘古大陆与超级季风）
② 影响海流和洋流，造成地球能量收支改变。大陆阻挡能够改变冷暖洋流的方向。
③ 造山运动，板块分裂挤压，形成冰川，岩石风化侵蚀消耗 CO_2

地形变化 典型的案例是印度板块俯冲进入亚欧板块，形成青藏高原，利于冰期产生。

9.4.5 [自] 环流变化

海洋环流 属于内强迫参数，典型案例是温盐环流导致的千年尺度气候变化（新仙女木事件）。

大气环流 年际和年代际尺度，大气环流是气候变化或气候异常最直接的影响因素。

大气遥相关 通过海气耦合产生：太平洋北美型(PNA)、北太平洋涛动(NPO)、北大西洋涛动(NAO)、南半球环状模(SAM, AAO)和北半球环状模(NAM, AO)

9.4.6 [自] 各圈层相互作用

9.4.6.1 大气与海洋-冰雪-陆面-植被相互作用

典型案例 ENSO、太平洋年代际振荡 PDO(北太平洋)IPO(整个太平洋)、热带副热带太平洋、大西洋经向模

9.4.7 [人] 温室气体、气溶胶的排放

9.4.7.1 温室气体增加的气候效应

研究课题 CO₂ 浓度与全球平均地表气温异常演变的关系以及人类活动对 CO₂ 浓度的影响

当前情况 目前的 CO₂ 浓度是 42 万年来的最大值，且 83 万年来仍是最大值。

数值实验 有无人活动强迫的数值试验对比：增加人为因素后，明显气温有所上升，和观测一致。

归因研究 主要由人为外强迫导致：二氧化碳主导了温度变化。

9.4.7.2 增暖机理：全球尺度

辐射强迫 辐射强迫是对某个因子或一组因子对气候变化贡献大小的物理量。

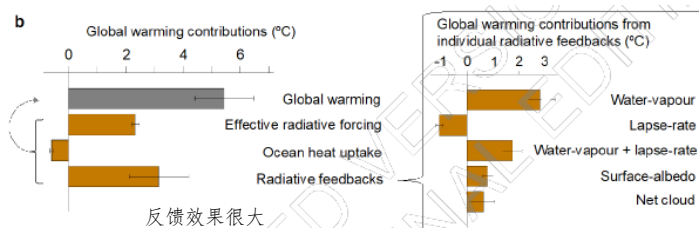
定义：大气顶部单位面积上的能量变化率 (W/m^2)。影响气候变化的因子改变的时候，地球-大气系统摄入和逸出能量平衡也发生改变。

正强迫：地气系统能量增加，地球表明增温。

气候系统的敏感性：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。

正反馈过程 ① 冰雪面-反射率-温度正反馈 ② 水汽含量-红外逸出辐射-温度正反馈

递减率负反馈：地面增温，不稳定性增大，容易产生对流，潜热释放，高空增温强，地面增温弱。



北极放大 放大的冰雪减少的正反馈过程、放大的递减率正反馈、向极大气和海洋的热量(潜热)输送增加地面增温，高空增温弱，热量积聚在低层。