

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

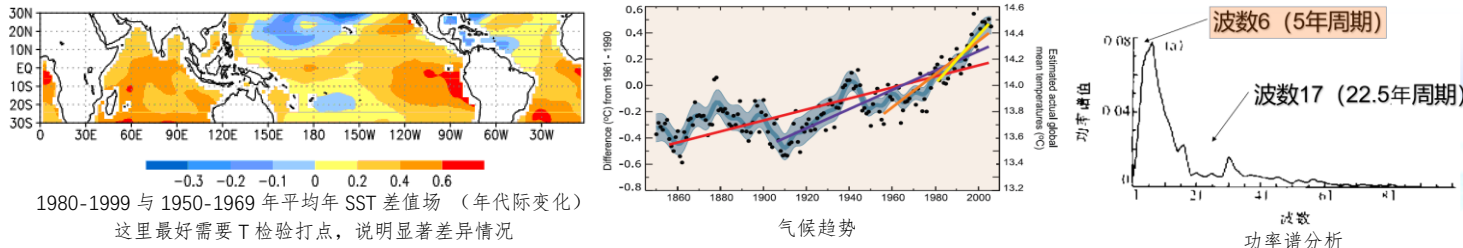
**气候变化** 气候变化时间序列的**演变**(变化形式)或**气候状态的变化**统称为**气候变化(Climatic variation)**。  
时间序列不是一条单调的直线，其受到多个因素的年代季调控，其形式复杂多样。

**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。

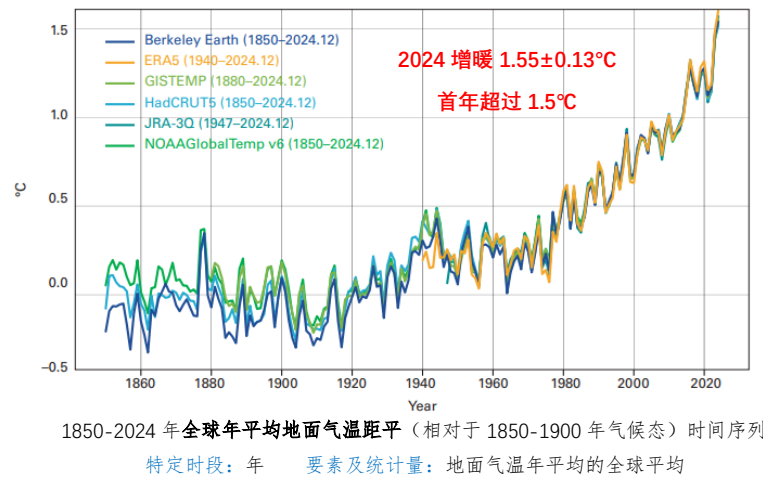
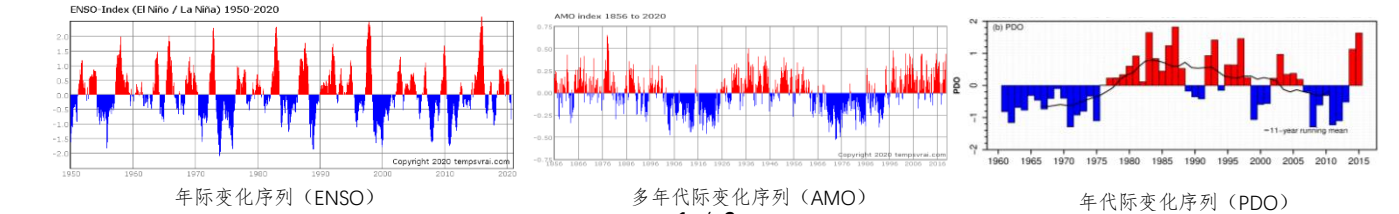
公式:  $S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2$       $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$       $N$ 是序列长度,  $n$ 是气候态的长度,  $S$ 为序列方差,

$T_i$ 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)

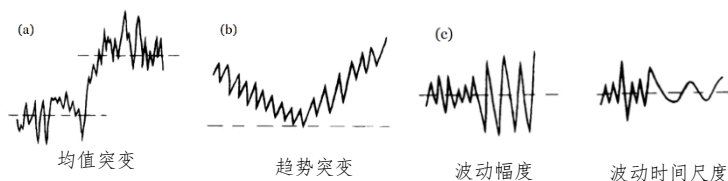
**气候波动** **气候状态围绕气候态** (或**气候距平**)的**波动式变化**,表现为准周期性振荡特征,有年际、年代际等时间尺度。常常通过功率谱分析得到波动周期信息及其强度。



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

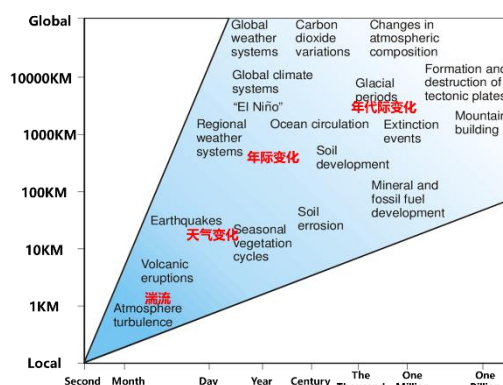
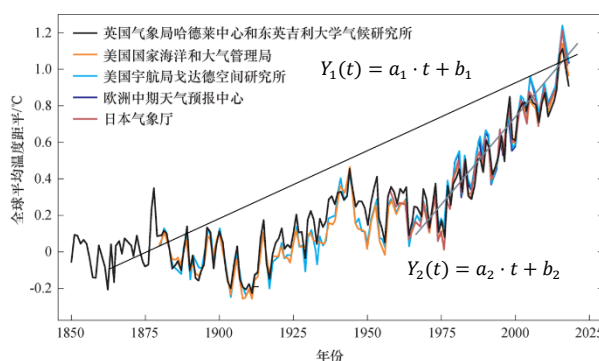
### 9.1.2.1 单个气候变化时间序列

#### 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。



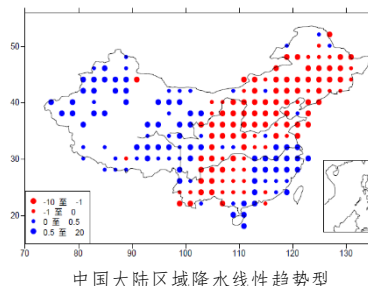
### 9.1.2.2 气候波动的尺度

#### 时间尺度

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

#### 空间尺度

全球、半球、海洋、陆地、区域尺度。



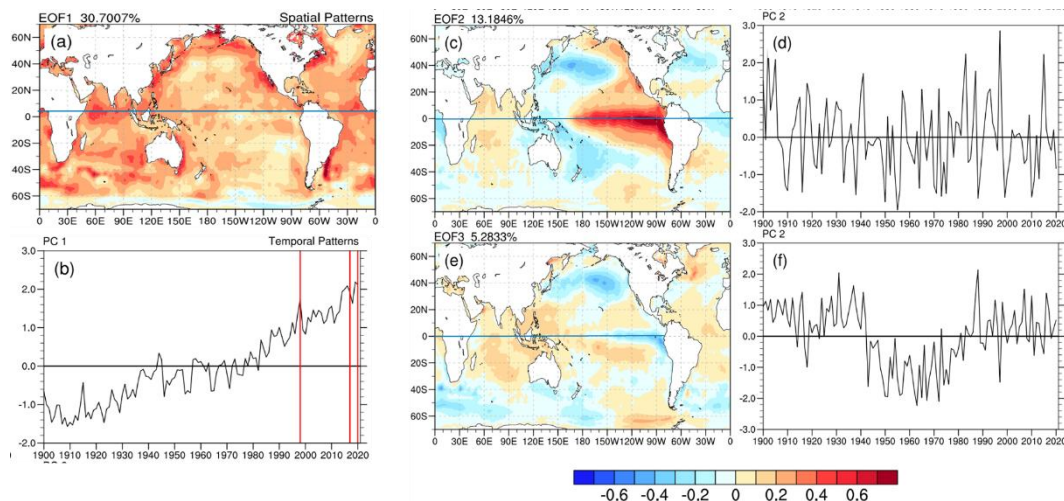
## 9.1.3 气候变化的空间分布

#### 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。

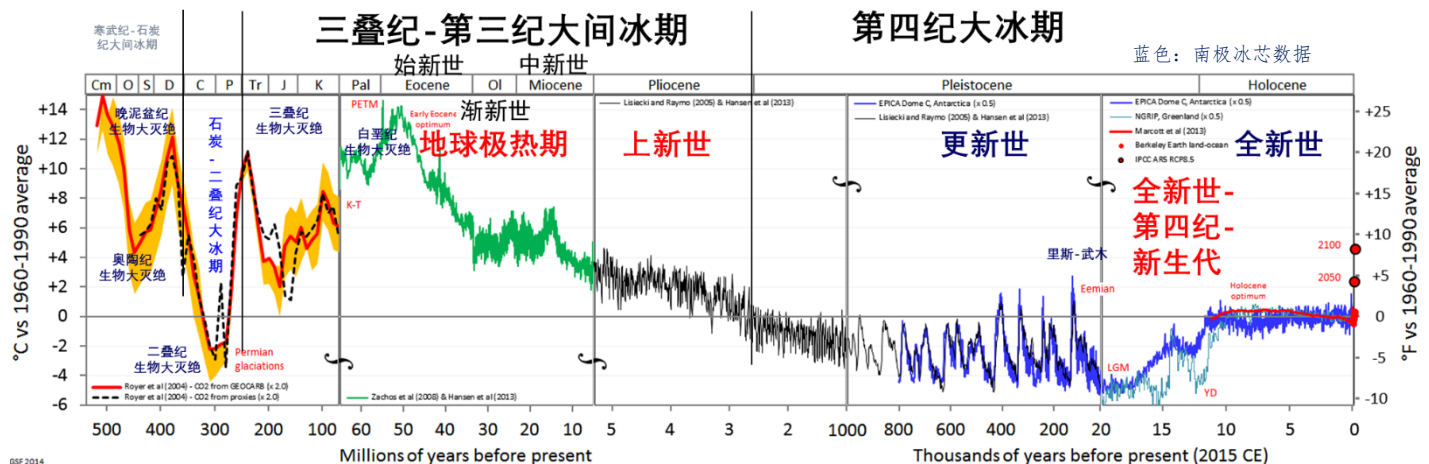


夏季 SST 异常的 EOF 展开

## 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

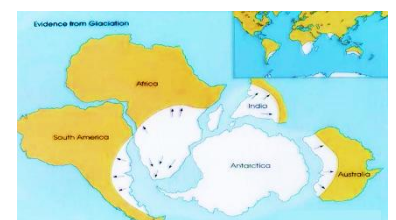
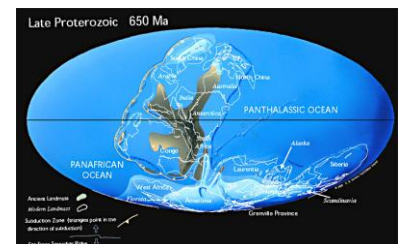
**发生时间** 在早古生代，距今约 6 亿年前。

**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

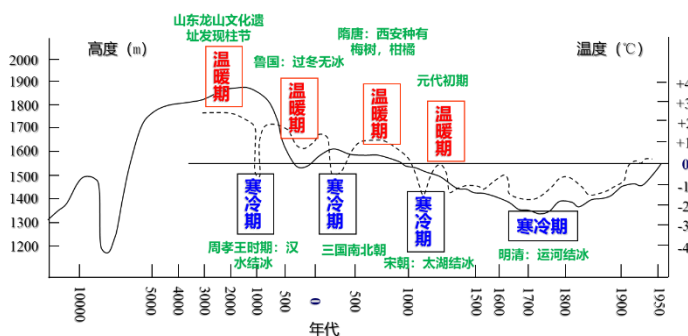
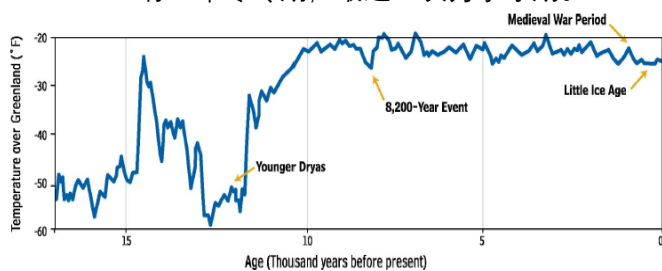
#### 9.2.3.1 近 2 万年以来的气候变化

**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** 中国近五千年內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。

9.3 极端天气气候

9.3.1 基本概念

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。

9.3.2 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

9.3.3 概率描述

- 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： $P(X \leq x) = F(x) = 1 - \left[1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right]^{-(1/\xi)}$

$\sigma$  尺度参数（描述极值分布的变率） $u$  位置参数-阈值，形状参数  $\xi$  描述极值的分布情况