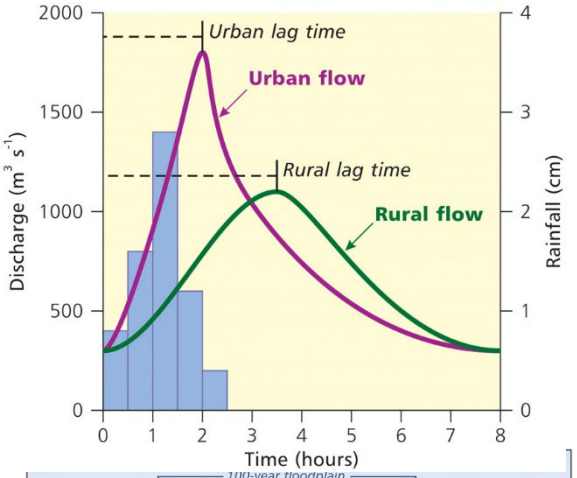
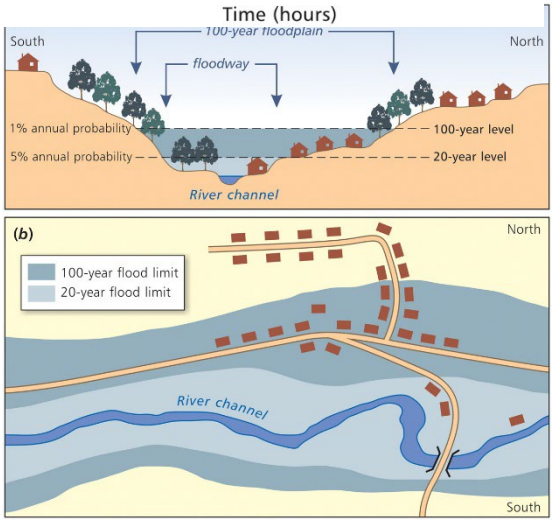
國立臺北大學自然資源與環境管理研究所
115 學年度第一學期『環境工程科學概論』

課程講義(06)：水文學概要
Introduction to Hydrology

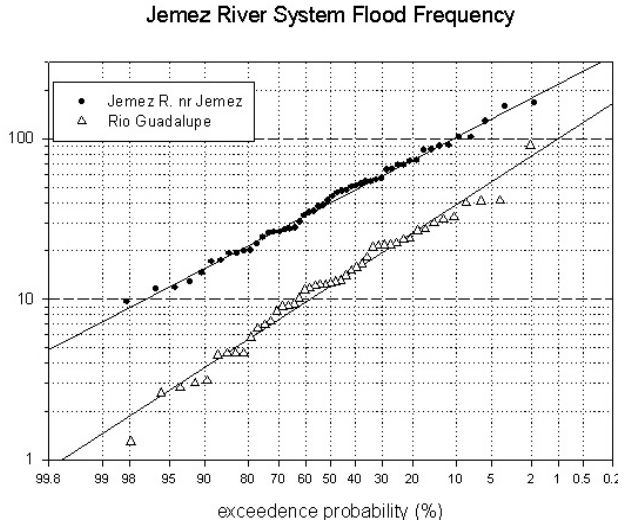
- FUNDAMENTALS OF HYDROLOGY
  - □ The Hydrologic Cycle
    ⇒ 台大開放式課程：水的科學
  - □ Hydrologic Phenomena
    ⇒ Precipitation：雨(Rain)、雪(Snow)、雹(Hail)、霰(Sleet)、濛(Drizzle)、冰雨(Glaze)等 =>霜(Frost)、露(Dew)
    ⇒ Evaporation and Evapotranspiration
    ⇒ Infiltration => Groundwater
    ⇒ Surface runoff 地表逕流=>Streamflow
    ⇒ Rational method $Q = CIA$



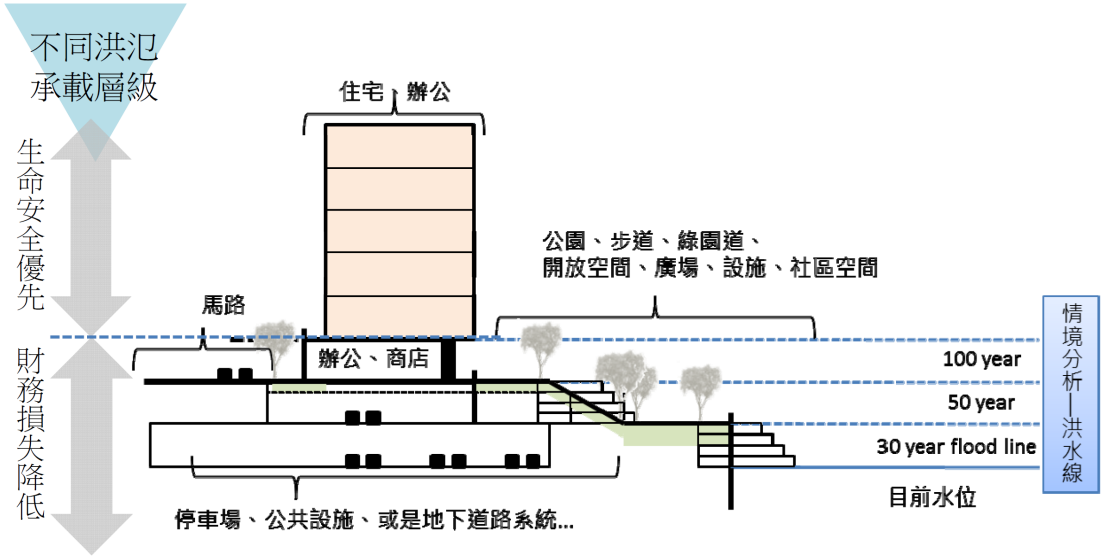
- HYDROLOGICAL HAZARDS
  - □ Measurement of Precipitation…
  - □ Return Period and Frequency Year
  - □ Flood Plain and Hazard Zone
  - □ Flood Control/Mitigation Measures
    蓄洪（蓄水庫/池）、滯洪（滯洪池、游水池）、疏洪（水道疏浚）、分洪（分水道或疏洪道）、束洪（河堤）、抗洪（水閘、插板、墊高）及避洪（疏散）。
  - □ Stormwater Management
    ⇒ Low Impact Development
    ⇒ Green Infrastructure
  - □ More Readings
    ⇒ 台灣豪雨洪水 => Google Gemini 報告
    ⇒ 臺北市工務局水利工程處-社子島地區
    ⇒ 臺北捷運系統防洪設計標準
    ⇒ 水環境低衝擊開發設施操作手冊 v.2



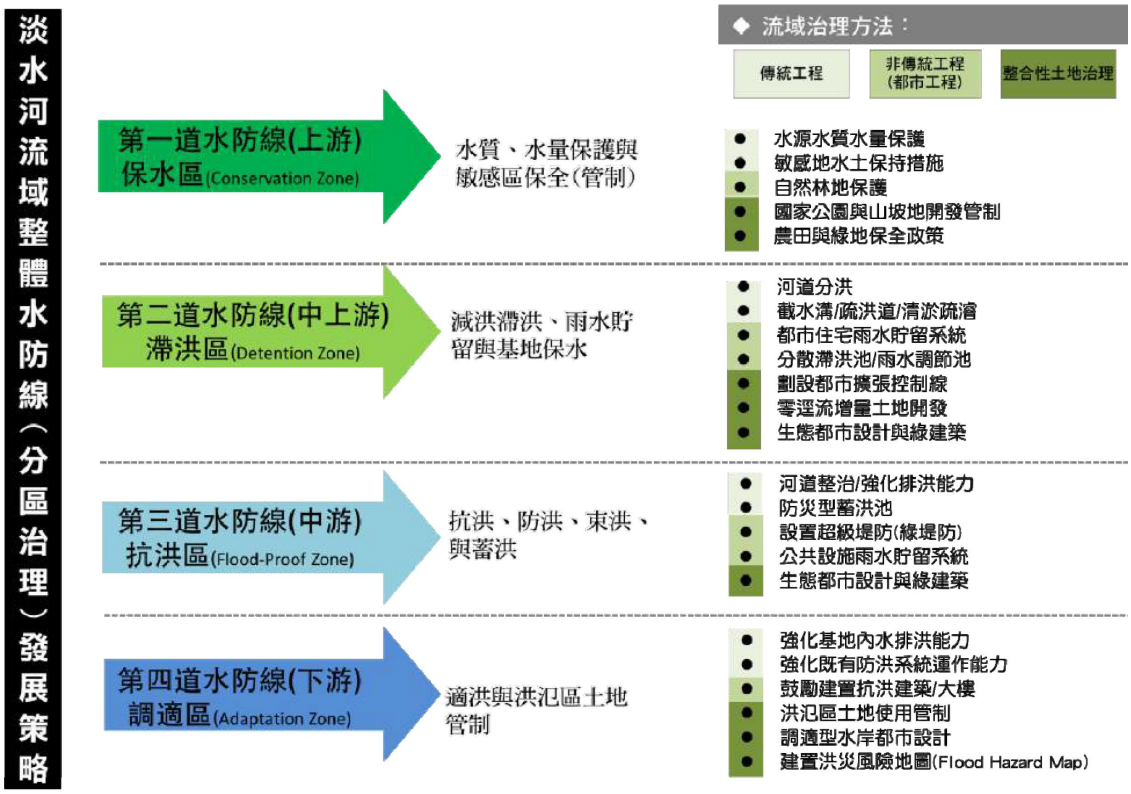
- STOCHASTIC HYDROLOGY
  - □ Extremes, Statistics of Extremes
  - □ 水文分析系統觀念與暴雨頻率分析概說
  - □ 臺灣水文頻率分析之規範標準研究
  - □ 莫拉克颱風與 2009 年全球暴雨 (*)



- HOMEWORK ASSIGNMENT #4
  (併入期中考試)：「洪水頻率年」



堤線調整概念示意圖



水防線分區治理原則圖

1. 保水區(Conservation Zone)－水質、水量保護與敏感區保全(管制)
2. 滯洪區(Detention Zone)－減洪滯洪、雨水貯留與基地保水
3. 抗洪區(Flood-Proof Zone)－防洪、蓄洪、防災與還地於河
4. 調適區(Adaptation Zone)－調適、與水共存與洪氾區土地管制

禾拓規劃設計顧問公司（2012），「因應全球暖化及氣候異常研擬淡水河流域都市發展與流域防災整合委託案總結報告書」，臺北市政府都市發展局委託計畫。

台灣豪雨洪水災害成因與防洪管理綜合報告

一、前言

台灣因地理位置、特殊地形與極端氣候條件，豪雨引發的洪水災害具有高頻率、高強度且匯流迅速之特徵。隨著全球氣候變遷加劇，短延時強降雨頻率顯著增加，傳統依賴單一工程手段的防洪模式已面臨挑戰。本報告針對台灣水文致災成因、不同洪水分型進行系統性剖析，並檢視近年防洪管理策略之演進與轉型。

二、水文與致災成因

台灣防洪面臨之核心威脅，主要源於自然環境特性與高度開發交織而成的四大致災因子：

1. 極端氣象系統交會
   主要包括梅雨鋒面（5–6 月）、颱風及其引進之西南氣流（7–10 月），以及夏季高溫對流發展的短延時強降雨。極端降雨常於短時間內注入極大雨量，對防洪設施造成極大壓力。
2. 山高水急與短集水時間
   中央山脈地勢陡峭，河川坡降極大、流路短，暴雨降落後洪峰到達時間（Time of Concentration）僅數小時至半天，水頭暴漲極為迅速，大幅壓縮預警與應變時間。
3. 高不透水率與逕流係數提升
   高度都市化致使地表大幅鋪封，大幅削減自然入滲能力，使逕流係數顯著增加。大量雨水快速匯集至排水系統，超越雨水下水道防護標準（多數地區設計上限：時降雨量 50–78 mm），引發都會區嚴重內澇。
4. 感潮與外水頂托
   沿海低窪平原區遇天文大潮或暴潮時，外水（河川或海洋）水位高漲，導致內水無法順暢重力出海，常形成外水溢淹與內水回壅交織之複合式災情。

三、主要洪水分型比較

為有效因應不同災害機制，實務上將台灣洪水災害劃分為四大主要類型：

洪水分型	主要成因與機制	影響特徵與受災區域
都市內澇	短延時極端暴雨超出雨水下水道設計上限，側溝阻塞或排水不及，地表漫淹。	都會低窪區、地下道、地下室及密集住宅商圈。
河川洪氾（外水溢淹）	集水區長時間累積大豪雨，河川水位暴漲超越堤頂溢淹，或因洪流淘刷導致堤防破口。	主要河川中下游兩岸、沖積平原及堤外高灘地。
沿海感潮回壅	暴雨疊加天文大潮或暴潮，重力排水失靈，需依賴抽水機組，容量飽和即發生回壅。	西南沿海低窪區、河口三角洲及低高程養殖區。
土石山洪（堰塞湖潰決）	上游崩塌土石阻塞河道形成堰塞湖後瞬間潰決，夾帶大量泥沙與巨石形成泥流。	山區聚落、野溪匯流口、橋脊區域及公路邊坡。

四、治水與洪災管理策略演進

為因應極端氣候之不確定性，台灣防洪治理已由過去的「束水抵擋」傳統工程手段，逐漸轉型為「與水共存」之整體韌性管理：

- 出流管制與逕流分擔
  落實《水利法》相關法規，要求土地開發者承擔開發後增加之逕流（出流管制），並由公私部門共同分擔流域逕流量，實現由單一工程思維向空間承洪轉型。
- 在地滯洪與韌性承洪
  廣設多功能滯洪池、景觀滯洪公園，並在非都市計畫區規劃農田與魚塭之溢淹補償機制，增加流域整體調蓄空間。
- 海綿城市與自然解方（NbS）
  積極推動綠地入滲、植生溝、雨水花園與透水鋪面等低衝擊開發（LID）設施，有效削減地表逕流峰值並延遲洪峰到達時間。
- 智慧監測與即時預警
  結合高解析度氣象雷達預警系統、物聯網（IoT）淹水感測器、河川水位監測站，並導入移動式抽水機動態調度平台，建立智慧化與應變迅速的防災聯防體系。

台灣水利新思維：逕流分擔、海綿城市與水庫防洪防淤技術分析報告

本報告針對台灣近年面對極端氣候威脅下，水利治理觀念由傳統「快速排除」轉型為「與水共存」之綜合治理策略進行深度技術剖析。內容涵蓋法令架構、計算模型、綠灰工程效益比較及水庫防洪防淤之運轉實務。

一、逕流分擔與出流管制之法令架構與工程計算法則

1. 法制架構與職責劃分

為建立韌性承洪流域，經濟部於《水利法》增訂第 83 條之 2 至第 83 條之 8，確立「逕流分擔」與「出流管制」雙軌機制，打破傳統單一由水利機關負擔防洪責任之模式，實施全流域土地整體耐淹規劃。

- **逕流分擔（流域尺度，公領域主導）：**
  - **主導單位：** 各級水利主管機關（中央水利署、直轄市及縣市政府水利局）。
  - **劃定機制：** 針對特定淹水潛勢流域，公告指定「逕流分擔實施範圍」。
  - **跨領域整合：** 結合都市計畫變更，要求公有土地兼作滯洪使用（如公園、體育場、學校滯洪化），並推動農地、魚塭等在地滯洪之補償獎勵機制，由政府與在地社群共同負擔流域流出量。
- **出流管制（基地尺度，私領域義務）：**
  - **管制對象：** 土地開發達一定規模者（如開發面積達 2 公頃以上之開發案、非都市土地變更編定等）。
  - **開發者義務：** 開發單位須提送「出流管制計畫書」，設置私有滯洪設施或增設透水入滲設施。
  - **核心原則：** 遵循「削峰填谷」觀念，確保「開發後排入區外之下游逕流量，不得超過開發前之自然洪峰流量」。

2. 水文水理計算方法與設計規範

出流管制與逕流分擔計畫之量化評估，依據嚴謹之水文水理推導，以保障 downstream 下游管線與河川之承載力。

- **洪峰流量評估：**
  採用合理化公式（Rational Method）進行開發前後洪峰流量推算：

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A$$

其中 C 為逕流係數，I 為降雨強度（mm/hr），A 為集水面積（km²）。開發後地表不透水面積增加導致綜合逕流係數 $C_{後} > C_{前}$，衍生出額外洪峰量 ΔQ。開發單位必須透過實體工程設施將 ΔQ 完全削減。

- **目標防護標準與設計雨型：**
  依據受納水體（河川或區域排水）之防洪標準，採用 10 年至 50 年重現期距（Return Period）之極端降雨事件。配合當地氣象站之降雨強度-延時-頻率（IDF）曲線，使用恰當之降雨分配（如 Chicago 雨型或 SCS 設計雨型）推導設計歷線。

- **滯洪量體與出流孔口設計：**
  利用 HEC-HMS（水文模式）或 SWMM（雨水管網水理模式）模擬集水區之水文歷線。滯洪池之蓄水與排洪過程則使用「蓄水演算法」（Modified Puls Method / Level Pool Routing）進行演算：

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t}$$

透過流量調節孔口（Orifice）或溢流堰（Weir）之孔徑與高程控制，限制開發後之最大放流量（O_{peak}）不高於開發前洪峰值（Q_{pre}），差額必須完全透過地下雨水貯留槽、乾式滯洪池、滲透陰井或透水鋪面予以暫存蓄留。

二、都市防洪：綠色基盤（NbS）與傳統灰色工程效益比較

都市化過程帶來大量不透水鋪面，面對極端氣候，單靠工程手段已達邊際效益瓶頸。引進以自然為本的解決方案（NbS）與傳統灰色工程搭配，為現代都市防洪之核心策略。

1. 手段與思維轉變

比較項目	綠色基盤（NbS / 海綿城市）	傳統灰色工程
核心思維	源頭減量、入滲、滯留、滯洪，與水共存	末端快速排除、築高堤防阻擋、集壓集中
代表設施	透水鋪面、雨水花園、植生溝、生態滯洪池、綠屋頂	堤防、抽水站、雨水下水道箱涵、分洪道
空間利用	多功能整合（休閒、景觀、生物多樣性、微氣候調節）	單一功能（排洪），易造成都市空間割裂
維護需求	需定期清理淤泥、拔草及維護植物通透性	需高額機電維修費、定期抽水機組保養與堤防檢修

2. 應對極端性與效能限制

- **中小強度常態降雨（降雨強度 < 50 mm/hr）：**
  - **綠色基盤效益：** 表現極佳。能吸收大部分降雨，延長地表匯流時間（Time of Concentration），顯著減少逕流總量與峰值。
  - **限制：** 當連續降雨導致土壤飽和度達到 100% 後，入滲率將驟降至接近零（依據 Horton 入滲模型），此時綠色基盤即失去續接蓄留能力。
- **高強度極端暴雨（降雨強度 > 70-100 mm/hr）：**
  - **灰色工程效益：** 為都市防禦不可或缺之骨幹底線，透過大容量箱涵與抽水機組迅速移轉大量洪水。
  - **限制：** 當降雨強度超越設計重現期上限（如超大豪雨致使排水管網滿管溢流），灰色系統容易發生階梯式潰敗（Catastrophic Failure），引發嚴重都市淹水。

- **綠灰協同（Hybrid Blue-Green Infrastructure）：**
  現代防洪強調綠灰結合。綠色基盤作為前置防線，在降雨初期執行「削峰緩流」，爭取管網與排水道之空間與時間容裕；灰色工程則於後端維持「底線防禦」，共同提高整體都市防洪韌性。

三、氣候變遷下水庫防洪與防淤運轉策略

水庫為台灣重要之水資源與防洪樞紐。然而，極端氣候導致極端洪水與大量泥砂入庫，傳統單一水庫運轉規程必須轉變為動態防洪與動態水力排砂。

1. 動態防洪調控

- **預先調節性放水（Pre-storm Drawdown）：**
  - **QPF 預報應用：** 降雨前 24 至 72 小時，參考中央氣象署定量降水預報（QPF）與集水區逕流預估模型，研判降雨趨勢。
  - **操作時機：** 在洪峰抵達壩前 6 至 12 小時，啟動預先調節性放水，預降水庫水位，提前騰出「防洪庫容」。
  - **運轉原則：** 預先放水量需受限於下游河川安全採集水位，且放水量嚴格遵循「最高放流量不得超過水庫最大入流量」之原則，防止人工加劇下游水患。
- **洪峰削減操作（Peak Shaving）：**
  - 當洪峰抵達水庫時，操作閘門蓄留洪峰流量之 30% 至 60%。透過水庫延緩與平穩釋放洪水，降低下游河川水位維持在警戒線以下，保護下游城鄉安全。

2. 異重流水力排砂與「蓄清排渾」

高強度降雨帶來的山崩與土石流會產生極高濁度之入庫洪水，水庫需透過水力排砂技術延長使用壽命。

- **異重流（Density Current）監測與底孔排砂：**
  - **物理機制：** 高含砂水流密度高於庫區清澈水體，入庫後會下沉至舊河道底部並沿床面持續向下游流動，形成「異重流」。
  - **排砂操作：** 於壩前裝設多層次超音波與濁度監測儀，當異重流波頭（Density Current Head）抵達壩前時，及時開啟水庫最底層之排砂底孔（如永久置底放水口），利用高水頭壓力將高濃度泥砂水流直接排出。
- **防淤隧道（Sediment Bypass Tunnel, SBT）分流：**
  - **工程應用：** 如石門水庫阿姆坪防淤隧道、曾文水庫防淤隧道。
  - **運轉機制：** 於洪峰期開啟防淤隧道，將高濃度含砂水流於庫區中游或壩前直接繞道排至大壩下游河道。此舉不僅具備極高之排砂效率（排砂率可達 30% – 50% 以上），亦能同時進行大流量防洪排洪，並恢復下游河道之輸砂平衡。
- **蓄清排渾（Storing Clean and Discharging Turbid）與尾水回蓄：**
  - **操作時程：** 洪水前段與頂峰期維持高強度排砂排濁，盡可能減少泥砂沉降庫底；待洪水後期（Hydrograph Receding Limb），入庫水流濁度大幅下降時，立即關閉排砂底孔與防淤隧道。
  - **尾水蓄升：** 把握洪水末期流量尚豐但濁度降低之尾水，迅速回蓄水庫至滿水位，確保後續枯水期之供水穩定，實現防洪、防淤與水源調度之三重目標。

極值統計學（Statistics of Extremes / Extreme Value Theory, EVT）是機率論與統計學的一個分支，專門研究隨機變數在分佈尾端（極大值或極小值）的極限行為。相較於以「平均值」為核心的中央極限定理（CLT），EVT 聚焦於「罕見但衝擊巨大（Low-probability, high-impact）」的極端事件，在水文學（如百年一遇洪水）、氣象學、金融風險管理（如 VaR 與 ES）及結構可靠度工程中扮演核心角色。

一、 核心理論架構

極值統計分析主要建立在兩大基本漸近定理與取樣架構之上：

1. 區塊最大值法（Block Maxima Approach, BMA）與 GEV 分佈

此方法對應 **Fisher-Tippett-Gnedenko 定理**（極值領域的中央極限定理）。若將獨立同分佈（i.i.d.）的觀測序列劃分為等長的時間區塊（如年最大值），其最大值 $M_n = \max(X_1, \ldots, X_n)$ 經適當線性標準化後的漸近分佈必收斂至**廣義極值分佈（Generalized Extreme Value Distribution, GEV）**：

$$G(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\}$$

定義域滿足 $1 + \xi(x-\mu)/\sigma > 0$，其中 $\mu \in \mathbb{R}$ 為位置參數，$\sigma > 0$ 為尺度參數，$\xi \in \mathbb{R}$ 為關鍵的**形狀參數（Shape Parameter）**：

- $\xi = 0$（**Gumbel 分佈，Type I / 輕尾**）：尾端呈指數衰減（取極限 $\xi \to 0$）。水文分析中常作為降雨極值的基礎模型。
- $\xi > 0$（**Fréchet 分佈，Type II / 重尾**）：尾端呈冪律衰減（$P(X > x) \sim x^{-1/\xi}$），具備厚尾特徵（如極端降雨破紀錄暴雨、金融黑天鵝事件）。
- $\xi < 0$（**Weibull 分佈，Type III / 短尾**）：具有理論上限邊界 $x_{max} = \mu - \sigma/\xi$（如材料疲勞極限、人體最高壽命上限）。

2. 超額峰值法（Peaks-Over-Threshold, POT）與 GPD 分佈

當樣本資料有限時，一年僅取一個最大值（Block Maxima）會忽略次大但依然極端的事件。POT 法轉而關注**超越某一高門檻值 u 的超額量 $Y = X - u$（條件 $X > u$）**。依據 **Pickands-Balkema-de Haan 定理**，當門檻值 u 趨於母體上限時，條件超越分佈漸近收斂至**廣義帕雷托分佈（Generalized Pareto Distribution, GPD）**：

$$H(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}}\right)^{-1/\xi}$$

POT 方法能大幅提高極端樣本的資訊利用率，但需面臨門檻值選定（Threshold Selection）的偏誤-變異數權衡（Bias-Variance Tradeoff），實務上常輔以 Mean Residual Life Plot（MRLP）或參數穩定度檢定判定 u。

二、 重現期與設計水文應用

在環境與水利系統分析中，EVT 是推求「設計暴雨量」或「設計洪峰流量」的核心工具：

- **重現期距（Return Period, T）**：定義為極端事件發生機率的倒數：
$$T = \frac{1}{1 - F(x_T)} = \frac{1}{P(X > x_T)}$$
- **分位數（Return Level, x_T）**：若採用 GEV 分佈，可解析求得對應 T 年重現期距之設計值：
$$x_T = \mu - \frac{\sigma}{\xi}\left[1 - \left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)^{-\xi}\right]$$

此即為水利法出流管制、雨水下水道 5 年或 10 年設計標準，以及大型水庫（如 200 年至萬年重現期洪水量）計算之數理來源。