

## 长江流域降水极值时间序列的分布特征\*

苏布达<sup>1,2</sup>, 姜彤<sup>1,2</sup>

(1: 中国气象局气候研究开放实验室国家气候中心, 北京 100081)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:** 在 1960–2005 年长江流域 147 气象观测站汛期 4–9 月逐日降水资料基础上, 通过计算逐站大于 95th 强降水及其间隔天数、小于 1.27mm/d 的持续天数, 分析长江流域降水极值时间序列的时空分布特征, 并建立概率分布模式。研究发现, 长江上游四川盆地附近及中下游鄱阳湖流域东南部是汛期强降水中心, 也是长江流域强降水最集中发生的地区。汛期降水强度小于 1.27mm/d 的天数, 在上游干流、岷沱江流域、乌江上游地区为多。但此处干旱持续天数最短, 干旱形式并不严重。而在金沙江上、下游, 洞庭湖流域, 鄱阳湖流域东南部支流及下游干流区干旱持续天数较长。长江流域大于 95th 强降水的间隔天数与小于 1.27mm/d 的干旱持续天数服从 Weibull-II 型分布。分布参数变化的模式较准确的反映降水极值时间序列的时空变化特征。

**关键词:** 降水极值; Weibull 分布; 长江流域

## Distribution feature of time series of extreme precipitation over the Yangtze River Basin

SU Buda<sup>1,2</sup> & JIANG Tong<sup>1,2</sup>

(1: *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, P. R. China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

**Abstract:** Based on daily precipitation data of 147 stations in the Yangtze River Basin during the flood season (April to September) for 1960–2005, extreme high precipitation (percentile > 95th) and its time gap, days with precipitation < 1.27mm/d and its duration were calculated. Accordingly, spatial distributions and temporal sequences of extreme precipitation events had been analyzed, and the probability model was established. Research results showed that Sichuan Basin in the upper reaches and southeastern Lake Poyang Catchment in the mid-lower reaches were the high precipitation center of the Yangtze River Basin with centralized extreme event. Total number of days with precipitation < 1.27mm/d is more in the mainstream section, Minjiang-Tuojiang Catchment and upper Wujiang Catchment than any other area of the Yangtze River Basin. However, due to shorter lasting period of events with < 1.27mm/d, it did not create serious drought situation in these areas. Whereas, areas in the upper and lower Jinshajiang (upper reaches of the Yangtze River) Catchment, Lake Dongting Catchment, southeastern Lake Poyang Catchment, and lower main stream section, were more likely to be stricken by prolonged events with < 1.27mm/d and droughts caused. By applying Weibull model with the method of maximum likelihood estimator on the time gap of extreme high precipitation and lasting period of < 1.27mm/d, it was proved that Weibull-II can simulate well the probability distribution of timing of extreme precipitation events over the Yangtze River Basin. Changes of Weibull-II parameter can reflect well the spatial and temporal variation of timing of extreme precipitation events.

**Keywords:** Extreme precipitation; Weibull distribution; Yangtze River Basin

自 1860 年以来全球地面平均气温呈上升趋势, 全球正在经历一次以变暖为主要特征的气候变化, 预测结果进一步表明, 21 世纪气候继续向变暖的方向发展<sup>[1-3]</sup>。世界气象组织认为, 全球变暖引起的气候变化可能会使极端气候的出现频率和强度不断增加。而事实也证明了近年极端天气事件及其导致的灾害频率

---

\* 中国气象局气候变化专项(CCSF2006-31)、国家自然科学基金项目(40601017)和中国科学院院长奖励基金联合资助。  
2007-01-20 收稿; 2007-04-10 收修改稿。苏布达, 女, 1972 年生, 博士; E-mail: sbd@niglas.ac.cn.

呈现出增加的趋势, 上世纪 90 年代重大气象灾害造成的损失就比 50 年代高出了 10 倍<sup>[1]</sup>. 进入 21 世纪以来天气反常现象接连发生, 2003 年 6 月席卷欧洲的热浪, 2005 年 6 月席卷南亚的热浪, 2006 年我国重庆、四川遭受的罕见高温热浪和特大伏旱等越来越多的极端天气事件, 使极值事件一词在媒体上出现的频率超过了以往任何时候.

目前, 虽然难以定量预报气象要素的极值, 但可以通过归纳已经发生的极值事件的分布特点, 揭示其内在规律. 统计极值的理论与应用研究最早开始于 20 世纪 30 年代, 由 Fisher 和 Tippett 证明了极值极限分布的三大类型定理, Gumbel 将极值概率模型应用到统计实践中, 研究了变量的极值分布特征<sup>[4,5]</sup>. 几十年来, 一维极值理论与多元极值分布理论研究, 及其在自然科学与社会科学领域的应用得到迅速的发展, 解决了工程规划与管理方面的很多问题<sup>[6]</sup>. 由于极端降水的模拟研究对水利工程设计、农业经济发展、气候变化检测等方面至关重要<sup>[7]</sup>, 近年涌现出大量相关研究, 如采用 GEV(Generalized extreme value), GPD(Generalized pareto distribution), Gamma 分布等不同模型, 验证对降水极值事件的拟合能力<sup>[8-11]</sup>. 但上述统计计算, 一般侧重频率计算与参数估计, 以及外延和内插各种频率的特征设计值, 而对降水极值事件的时间序列, 也就是降水极值事件的步长研究, 涉及甚少. 长江是中国的第一大河, 流域内众多大中小城市组成的经济带、资源带和产业带, 对我国社会经济的可持续发展起着举足轻重的作用. 然而气候、地理位置和地形等自然因素和人类活动的共同影响下, 长江流域的洪涝灾害与干旱缺水问题十分突出, 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 长江流域遭受了数次的旱涝灾害. 为减轻旱涝灾害的损失, 开展极值事件长期变化趋势的预测研究, 有着十分重要的意义.

## 1 资料和方法

本文选取长江流域内 1960–2005 年逐日降水观测资料完整的 147 站(73 测站位于上游、74 测站位于中下游)的气象数据, 分别统计了汛期(4–9 月)逐站大于 95<sup>th</sup> 分位点(1960–2005 年观测资料的 95<sup>th</sup> 分位点)的强降水间隔天数与日降水小于 1.27mm 的持续天数(根据 Mungler 指数<sup>[12]</sup>), 并采用韦伯尔(Weibull)极值分布函数进行拟合分析.

Weibull 分布是可靠性评价使用最广泛的概率函数, 尤其适用于能见度、风速等气象随机变量的概率特征<sup>[13]</sup>. Weibull 分布的形状参数  $\alpha$  和尺度参数  $\beta$  决定数据序列的概率分布.  $\alpha > 1$  时分布为一个单峰曲线, 趋于 1 时, 接近指数分布, 随着  $\alpha$  减小, 概率密度函数的曲线越来越接近  $x=0$ .  $\beta$  参数是与  $x$  变量同单位的矢量数据, 它的增加会使  $x$  值域扩大, 分布峰度降低. 位置参数  $\mu$  是分布的下界, 取  $\mu=0$ , 三参数 Weibull-III 分布变为两参数 Weibull-II 分布.

Weibull 分布函数定义为:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1)$$

(1) 式中 Weibull 函数的参数估计, 借助了极大似然估计法(MLE)<sup>[14]</sup>. 似然函数为:

$$L(\alpha, \beta, \mu) = \prod_{i=1}^n \frac{\alpha}{\beta} \left[\frac{x_i - \mu}{\beta}\right]^{\alpha-1} \times \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \left[\frac{x_i - \mu}{\beta}\right]^\alpha\right\} \quad (2)$$

若取目标函数为式(3), 则参数  $\alpha, \beta, \mu$  的极大似然估计为式(4)的最优解.

$$f(\alpha, \beta, \mu) = -\ln L(\alpha, \beta, \mu) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \min f(\alpha, \beta, \mu) \\ \alpha > 0, \beta > 0 \\ \mu \geq \min(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

理论分布与经验分布的偏离程度(优度检验), 文中采用了柯尔莫洛夫-斯米尔诺夫(KS)检验法<sup>[14]</sup>. 对于所有的  $x$  值, 当经验分布函数  $F_n(x)$  与理论分布函数  $F(x)$  的最大差值  $D_n < D_{n,\alpha}$  (显著水平为  $\alpha$ , 容量为  $n$  的 KS 检验临界值), 则认为原假设的理论分布函数与样本序列的经验分布拟合较好, 无显著差异. KS 检

验的临界值在  $n = 46, a = 0.05$  时为 0.196。当样本  $n$  趋于无穷，拟合无法满足  $D_n < D_{n,a}$  条件时， $D_n$  最小的模型为最优分布函数。

## 2 降水极值的时空分布特征

### 2.1 95<sup>th</sup>分位点强降水

本文应用 1960–2005 年汛期日降水资料，首先计算了长江流域逐站 46 年观测资料的 95<sup>th</sup> 分位点降水量，并将单站计算值绘制成空间分布图(图 1a)。长江流域 95<sup>th</sup> 分位点降水量自西北向东南逐步递增，除四川盆地(干流区及岷沱江中下游)以外，上游其它地区数值均小于 25mm。最低值出现在金沙江流域上游，不足 20mm。中下游除了汉江流域上游和中游外，95<sup>th</sup> 分位点降水量大于 25mm。其中，大于 30mm 的区域集中在干流区、洞庭湖流域与鄱阳湖流域，尤其在东南部鄱阳湖流域超过 35mm。用过去 46 年逐站相邻事件的间隔为 1–5d 的大于 95<sup>th</sup> 分位点降水的累积出现频数来反映极端强降水集中分散程度(图 1b)。长江中部 1–5d 间隔的极端强降水频数最少，在上游和中游干流区与乌江流域累积频数小于 120d/46a。1–5d 间隔的极端强降水在金沙江上游与中游、岷沱江中下游、鄱阳湖东南部支流等地区大于 140d/46a(图 1b)。长江流域强降水中心的形成主要受夏季风和地形的共同作用。而且在夏季风进退活动的影响下，强降水在上游地区集中发生在 6–8 月，中下游地区集中发生在 4–7 月。

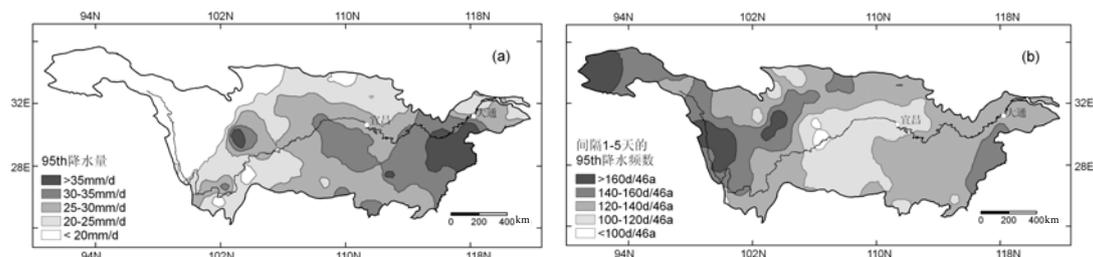


图 1 长江流域强降水阈值与间隔 1–5d 强降水累积出现天数(1960–2005 年)  
Fig. 1 Threshold of extreme heavy precipitation and accumulated frequency of heavy precipitation with time gaps of 1–5 day

### 2.2 小于 1.27mm/d 天数

汛期日降水量不足 1.27mm 的天数，中下游地区少于上游地区。中下游普遍少于 28d/a，在下游干流区与汉江流域下游小于 26d/a。而上游除金沙江上、下游以外，大部分地区多于 30d/a。尤其在岷沱江流域、乌江上游及干流区大于 32d/a(图 2a)。长时期缺乏降水或降水明显短缺将导致干旱。长江流域降水量小于 1.27mm/d 持续大于 15d、大于 20d、大于 30d 等事件在 1960–2005 年的累积频数统计表明，干旱等级空

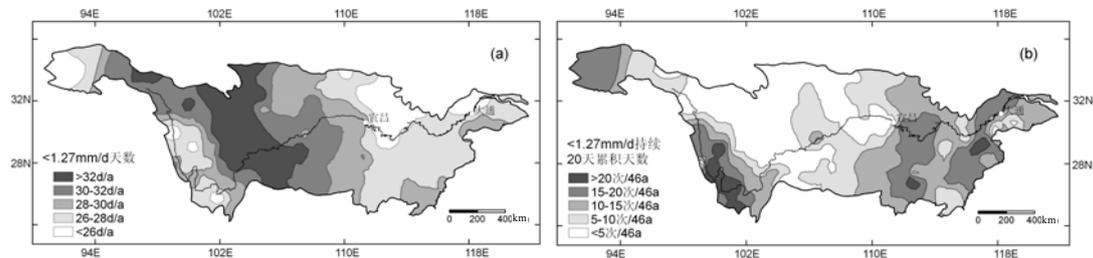


图 2 长江流域小于 1.27mm/d 的年均天数及其持续日数超过 20d 的累积发生频数(1960–2005 年)  
Fig. 2 Annual frequency of precipitation < 1.27mm/d and accumulated frequency of precipitation < 1.27mm/d with lasting period exceeds 20 day

间分布大致相同. 过去 46 年持续 20d 降水小于 1.27mm/d 的累积发生频数(图 2b)与图 2a 所表示的小于 1.27mm/d 年均天数空间分布呈截然不同的形式. 长江上游岷沱江流域、乌江流域及干流区是小于 1.27mm/d 天数最多的地区, 却也是 1960–2005 年持续 20d 以上降水小于 1.27mm/d 事件发生最少的地区(小于 5 次/46a). 金沙江上、下游, 下游, 洞庭湖流域, 鄱阳湖流域东南部支流及下游干流区等小于 1.27mm/d 天数较少的地区, 持续 20d 以上降水小于 1.27mm/d 事件发生较频繁(大于 15 次/46a). 长江流域的干旱事件在上游多发生于春季 4–5 月, 中下游则多发生于 7–9 月的伏旱期.

### 3 降水极值分布模式的拟合

#### 3.1 分布拟合检验

通过极大似然估计法(MLE)对 1960–2005 年长江流域 147 站降水极值事件的时间序列采用 Weibull-II 与 Weibull-III 分布函数进行拟合, 得出参数估计值, 计算拟合检验统计量  $D_n$ . 表 1 所示为  $F_n(x)$  与  $F(x)$  最大差异程度(检验统计量  $D_n$ ) 小于显著性水平为 0.05 的 KS 临界值( $D_{n,\alpha}$ ) 的气象站个数(表 1). 由强降雨间隔天数与干旱持续天数两套序列的 KS 统计量  $D_n$  计算结果来看, Weibull-II 对长江流域各站降水极值的分布特征拟合程度较高, 97% 气象观测站理论分布与经验分布无显著差异的原假设通过优度检验. Weibull-III 的拟合程度低一些, 30% 气象观测站强降雨间隔天数序列和 40% 气象观测干旱持续天数序列的分布模拟未能通过假设检验. 说明用 Weibull-II 型来拟合长江流域降水极值的时间序列概率分布是适宜的. 通常, 参数的增多会使分布函数的拟合效果随之提高. 如 5 参数的 Wakeby 分布由于可以模拟 2 参数与 3 参数分布函数的各类形状, 因而具有很强的适应灵活性<sup>[15]</sup>. 因而, 本研究计算得出 Weibull-II 比 Weibull-III 能更有效的拟合长江流域降水极值事件的时间序列, 可能是 MLE 方法对多参数分布函数参数估计不足的一种表征.

表 1 长江流域 147 站强降雨间隔天数与干旱持续天数 Weibull 分布拟合 KS 检验结果  
Tab. 1 KS statistics for Weibull distribution computed from extreme precipitation time series in the Yangtze River Basin

KS 统计量		0.06–0.1	0.1–0.14	0.14–0.18	0.18–0.196	>0.196
强降雨间隔天数	Weibull-II	90	52	5		
拟合结果(站数)	Weibull-III	17	33	44	10	43
干旱持续天数	Weibull-II		45	75	22	5
拟合结果(站数)	Weibull-III		12	30	17	59

#### 3.2 分布参数估计

为了直观描述参数变化对降水极值事件概率分布的影响, 绘制了间隔 1–5d 强降雨事件的概率随参数变化的曲线(图 3a)与小于 1.27mm/d 天数超过 20d 事件的概率随参数变化的曲线(图 3b). 长江流域强降雨间隔天数概率分布  $\alpha$  参数变化幅度在 0.75–1.22,  $\beta$  参数变化幅度在 9.8–16.1. 上游地区的  $\alpha$  参数普遍大于中下游, 而  $\beta$  参数取值范围大于中下游地区. 间隔 1–5d 强降雨事件在上游地区发生的概率为 24%–40%, 在中下游地区为 24%–36%. 说明上游强降雨事件的发生比中下游地区集中(图 3a); 干旱持续天数概率分布  $\alpha$  参数变化幅度在 1.2–1.75,  $\beta$  参数变化幅度在 2.5–5.8. 上游地区的  $\alpha$  参数范围较中下游地区广,  $\beta$  参数普遍小于中下游. 小于 1.27mm/d 天数超过 20d 事件的概率在上游地区为 0.025%–1%, 在中下游地区为 0.1%–2%, 说明中下游干旱事件的发生率高于上游地区(图 3b).

#### 3.3 Weibull-II 型分布模式的应用

上述研究表明, Weibull-II 型分布能较准确的反映长江流域降水极值时间序列的概率特征. 对观测资料的参数估计建立的分布模式, 有助于从理论上揭示降水极值时间序列的统计规律. 根据模式, 既可以计算各站强降雨的集中程度和少雨期的最长持续概率, 也可以回答强降雨是否更集中、少雨持续天数是

否延长等问题. 长江强降水中心之一的上游雅安站(图 4a)与中下游黄山站(图 4b)1960-1989 年与 1976-2005 年两期不同时段의强降水出现时间序列的概率分布表明, 1960-1989 年雅安站与黄山站 1-5d 间隔的极端强降水概率分别为 39%和 32%, 到 1976-2005 年时, 雅安站概率减少为 34.5%, 黄山站概率增加为 37.7% .

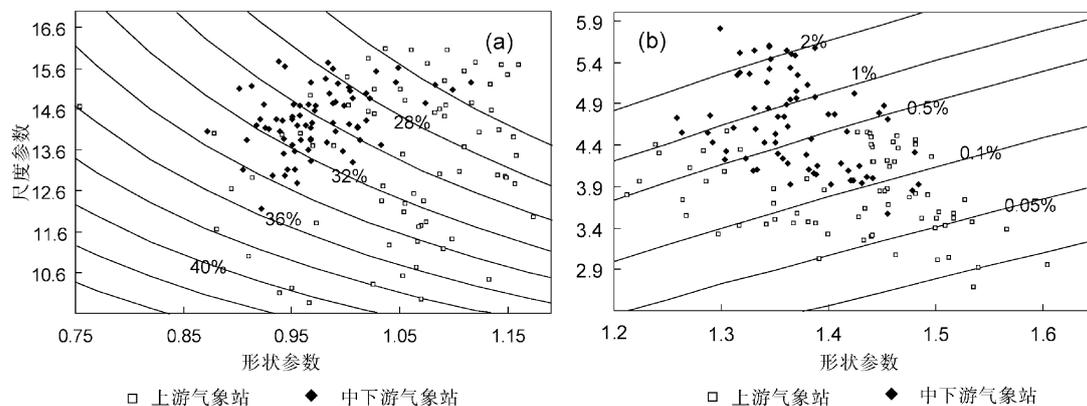


图 3 长江流域 147 站极端降水 Weibull 分布形状和尺度参数

(a: 强降水间隔天数; b: 干旱持续天数)

Fig.3 Shape and scale parameter of Weibull distribution for extreme precipitation

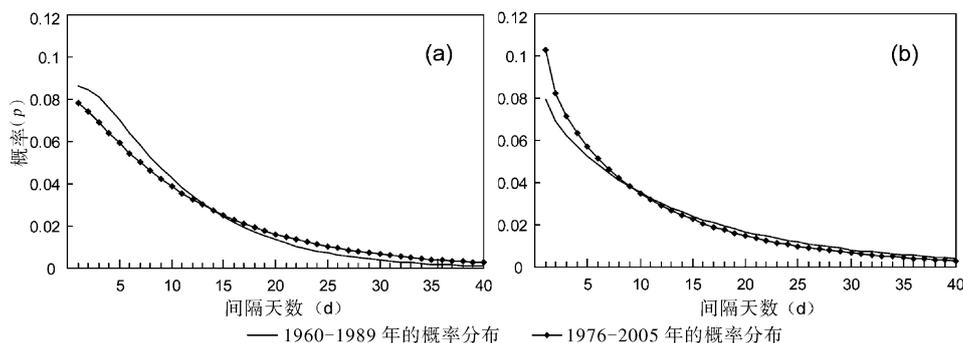


图 4 长江流域极端强降水间隔天数概率分布(a: 雅安站; b: 黄山站)

Fig.4 Probability of extreme precipitation with different time gaps (a: Yaan; b: Huangshan)

#### 4 结论

本文采用统计极值分布的理论和方法, 分析长江流域 147 站汛期逐日降水极值时间序列的时空分布特征, 得出下列结论:

(1) 长江流域汛期最大强降水中心位于上游四川盆地附近及中下游鄱阳湖流域东南部, 强度大于 35mm/a. 这里也是长江流域 1-5d 间隔的强降水最集中发生的地区.

(2) 长江流域汛期降水强度小于 1.27mm/d 的天数, 在上游干流、岷沱江流域、乌江上游地区为多, 但此处干旱持续天数最短, 干旱形式并不严重. 在金沙江上、下游, 洞庭湖流域, 鄱阳湖流域东南部支流及下游干流区干旱持续天数较长.

(3) 长江流域强降水的间隔天数与小于 1.27mm/d 的持续天数服从 Weibull-II 型分布. 采用不同时段의样本资料, 分布参数有所变化, 反映强降水集中程度的变化与少雨期持续天数的变化.

由于现有的观测资料只是总体中的一个小样本, 难以真实反映突发的偶然事件, 加上只选取了 1960-2005 年有连续观测资料的气象台站, 空间插值结果或许遗漏了流域局部信息, 使得理论值与实测

值差异可能较大, 概率模式的不确定性需要进一步研究.

致谢: 本研究项目数据来源于中国气象局气候信息中心, 特此致谢.

## 5 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2001: the scientific basis. Cambridge: Cambridge Press, 2001.
- [2] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策. 中国科学基金, 2003, **1**: 1-3.
- [3] 秦大河, 陈振林, 罗勇等. 气候变化科学的最新认知. 气候变化进展, 2007, **3**(2): 63-73.
- [4] Reiss RD, Thomas MM. Statistical analysis of extreme value with applications to insurance, finance, hydrology and other field. Berlin: Birkhauser, 2001.
- [5] Gumbel. Statistics of extremes. New York: Columbia University Press, 1958.
- [6] 柳会珍. 统计极值理论及其应用研究进展. 统计与决策, 2006, **8**: 150-153.
- [7] Park JS, Jung HS, Kim RS *et al.* Modelling summer extreme rainfall over the Korean peninsula using Wakeby distribution. *International Journal of Climatology*, 2001, **21**: 1371-1384.
- [8] Groisman PY, Karl TR, Easterling DR *et al.* Changes in the probability of heavy precipitation: important indicator of climate change. *Climate Change*, 1999, **42**: 243-285.
- [9] Katz RW. Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change. *Advance in Water Resources*, 1999, **23**: 133-139.
- [10] Mohapl J. A precipitation occurrence model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2002, **16**: 143-154.
- [11] 邹波. 强降水的 GP 分布拟合. 成都信息工程学院学报, 2002, **17**(2): 101-104.
- [12] Richard R, Heim J, 周跃武等. 美国 20 世纪干旱指数评述. 干旱气象, 2006, **24**(1): 79-89.
- [13] 张军, 葛军, 田俊杰等. 概率天气预报及其应用. 北京: 气象出版社, 1998.
- [14] 茆诗松, 王静龙, 史定华等. 统计手册. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] Park JS, Jung HS, Kim RS *et al.* Modelling summer extreme rainfall over the Korean Peninsula using Wakeby distribution. *International Journal of Climatology*, 2002, **21**: 1371-1384.