

# 降雨时间尺度上的降尺度分析研究

叶爱中<sup>1</sup>, 戴永久<sup>1</sup>, 夏 军<sup>2</sup>

(1.北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2.中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 针对现在的降雨资料严重不足问题, 基于对我国南方湿润地区的沅江流域与半干旱地区的岔巴沟流域的实测资料分析, 以及前人的研究成果, 本文尝试提出了一种由日降雨资料时间降尺度生成小时降雨资料的方法。该方法的优点是计算简单, 能保证模拟的日降雨的总量同实际的完全一致, 模拟的雨强同实际的基本一致。是解决缺资料或无资料地区降雨资料不足问题的一种简单适用的方法。

**关键词:** 降雨; 时间; 降尺度; 卡方分布

中图分类号: P333.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0852(2007)05-0016-05

水文气象的观测资料的严重不足已经成为限制水文学发展的一个瓶颈问题, 严重限制了水文学的发展。针对资料不足问题, 国内外已经开展了大量的工作。2003年7月在日本札幌召开的第23届国际地球物理和大地测量大会上, 正式启动了一个简称为PUB (Prediction in Ungauged Basins) 的国际水文计划<sup>[1]</sup>。由该计划引起了很多的研究, 尤其在降尺度 (downscaling) 的研究上。降雨的空间尺度上的降尺度研究主要基于卫星与雷达数据的研究, 已经发展出很多成熟的方法<sup>[2-3]</sup>。降雨在时间的尺度上降尺度研究相对不是很多, 尤其是日降雨到小时尺度的降尺度, 几乎没有成熟的方法。但降雨的不同时间分布对水文模型的影响非常大, 如: 苏凤阁曾研究过将月降雨降尺度到月的每日中, 然后建立月水文模型, 发现降尺度后的模拟明显改善了模拟结果, 并且不同的降尺度方法结果不一样<sup>[4]</sup>。通过文献, 可以得到以下几个日降雨降尺度到小时的经验方法:

Kondo, J(1997年)曾提出一个简单的将日降雨转换为小时降雨的方法<sup>[5]</sup>, 他认为日雨强的分布是服从正弦分布的, 日最大雨强以及日降雨历时与实测日降雨量的开方成线性相关。给出的计算公式如下:

$$\gamma = \gamma_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad \tau = 6000 \cdot \sqrt{P},$$
$$\gamma_{\max} = \frac{\pi}{12000} \cdot \sqrt{P} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为实时雨强(mm/s);  $\gamma_{\max}$  为最大雨强(mm/s);  $P$  为实测日降雨(mm);  $\tau$  为日降雨历时(s)。

周祖昊, 王浩(2005年)也提出一个转换方法<sup>[6-7]</sup>。该方法中采用了一个衰退的公式计算雨强的分布, 从而得到每小时的雨量。

$$i = \frac{\pi}{12000}, \quad \gamma_{\max} = a \cdot P + b, \quad P = i \tau = \frac{\gamma_{\max}}{\tau^{n-1}} \quad (2)$$

式中:  $i$  为  $t$  时段内平均雨强;  $n$  为暴雨衰减系数;  $a, b$  为参数;  $\epsilon$  为白噪声。

以上方法的不足: 降雨在不同的季节不同的区域其时间分布显然是不同的, 以上方法中均没有给出不同的分布; 降雨的分布上给出的经验公式存在不足, 如正弦分布是对称的, 不是很合理。

存在这些的不足需要系统的去分析研究日降雨的时间分布及降水历时。本文通过统计分析的结果, 给出一套系统的适用的方法, 该法能够将实测日降雨资料同化到该日的24小时中去, 为陆面模式或水文模型提供数据服务。

收稿日期: 2006-10-20

基金项目: 北京师范大学“985工程”二期科技创新: 地球表层过程与综合减灾科技平台; 国家自然科学基金项目(NO.40671035)

作者简介: 叶爱中(1978-), 男, 安徽安庆人, 讲师, 研究方向为分布式水文模型。

### 1 关键问题

如何将一个长时间的降雨总量分配到这个时间段中至少需要解决如下四个问题(见图 1): 降雨的开始时间; 降雨的历时; 降雨的最大雨强; 降雨的时间分布。由于降雨的时空差异性,在不同的区域,不同的季节这些特征值都是不同的,这就需要从实测资料与理论分析中去总结规律,来解决这些问题。

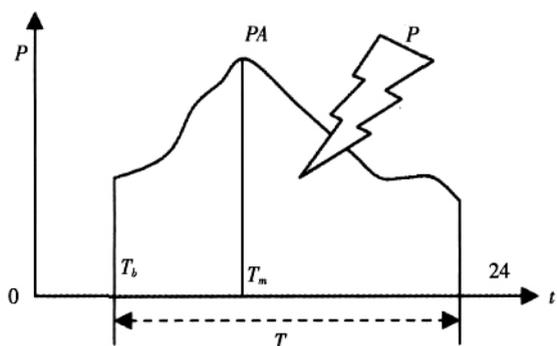


图 1 日降雨时间分布示意图

### 2 实测资料统计

此处选择两个典型流域进行资料统计分析, 分别是我国南方长江上的支流沅江流域与黄河上的岔巴沟流域。沅江流域属于洞庭湖水系, 年降水在 1200mm 左右, 是湿润地区。其中五强溪水库以上控制流域面积达到 83800km<sup>2</sup>, 此处选择了 1996~2004 年间五强溪水库建成后的详细的小时降雨观测资料。岔巴沟流域是无定河上一条支流, 流域面积仅仅 205km<sup>2</sup>, 多年平均降雨 400mm 左右, 属于半干旱半湿润地区。1960~1969 年间在该流域曾组织过大规模的降雨径流试验, 此处选取了 1960~1969 年实测的小时降雨资料。

通过实测资料的点图发现, 见图 2, 降雨历时同日降雨总量存在如下关系:

$$T = a + b \cdot \ln(P) \tag{3}$$

式中: T 为日降雨历时(h); P 为日降雨总量(mm); a, b 为参数。

最大雨强时同日降雨总量存在如下关系, 见图 3:

$$P_A = a + b \cdot P \tag{4}$$

式中: P<sub>A</sub> 为最大雨强(mm/h); P 为日降雨总量(mm); a, b 为参数。

不同的季节, 降雨的开始时间与最大雨强出现的时刻都是不同的, 所以此处分析按照每个月给出不同的统计规律。降雨开始时间与雨强最大时刻分别用下

式计算:

$$t_{bi} = \frac{t_{bj}}{n}, i=1\sim 12, j=1\sim n \tag{5}$$

$$t_{mi} = \frac{t_{mj}}{n}, i=1\sim 12, j=1\sim n \tag{6}$$

式中: t<sub>b</sub> 为不同月的降雨开始时间; t<sub>m</sub> 为最大降雨时间; n 为统计的天数; i 为月; j 为天。

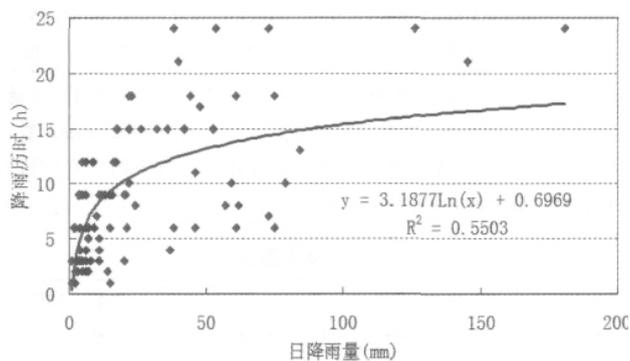


图 2 1996~2004 年五强溪 6 月降雨历时与日降雨的关系图

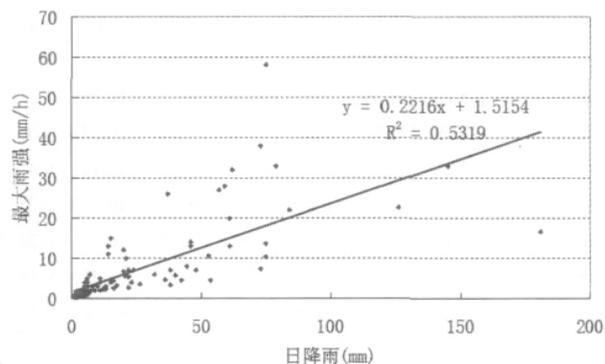


图 3 1996~2004 年五强溪 6 月最大雨强与日降雨的关系图

以下几个测站给出的是日降雨量同降雨历时的关系、日降雨量同最大雨强的关系, 以及关系式的参数值。从表 1 到表 4 中的参数值可以看出, 同一地区(沅江流域的五强溪与安江、岔巴沟的曹坪与和民焉)同一月的参数值非常接近, 而不同地区的参数就差异较大。这一点说明了气候相对一致的区域参数可以相互移植, 不同的气候地区必须采用不同的参数。

为了统计降雨的分布, 此处将多年的数据按照 12 个月分类, 将每个月的数据按照 24 小时分类汇总。汇总后数据的如图 4 所示。从图中可以看出, 在 6、7 月降雨量较大, 降雨集中于 8 时左右; 在 1、2 月降雨量叫小, 基本平均分布在 24 小时当中。图中 24 小时的分布显然是不对称的, 所以采取正弦分布或者采取正态分布来拟合都不是很适合。相对更适合用卡方分布来拟合, 见图 5。

表1 曹坪测站

Month			TR	a	B	AR	AMAT	AMBT
4	4.00	2.79	0.88	0.51	0.06	0.77	14.75	13.50
5	6.51	1.89	0.57	0.62	0.28	0.77	10.00	6.00
6	4.24	1.05	0.44	0.36	0.37	0.72	13.73	12.06
7	4.54	1.27	0.47	0.62	0.35	0.80	11.84	10.27
8	4.52	1.44	0.53	0.05	0.48	0.78	11.05	9.47
9	6.82	1.78	0.57	0.87	0.11	0.68	10.38	7.65
10	4.53	1.50	0.33	-4.11	0.84	0.76	7.75	5.25

注: Month 表示月; , 为降雨历时参数; TR 为降雨历时同日降雨总量相关系数; a, b 为大雨强参数; AR 为最大雨强同日总降雨的相关系数; AMAT 为多年不同月平均雨峰出现时间; AMBT 为多年不同月平均降雨开始时间。后文表中参数意义与此一致。

表3 五强溪测站

Month			TR	a	B	AR	AMAT	AMBT
1	1.96	3.49	0.65	0.08	0.28	0.62	10.00	8.09
2	1.44	2.94	0.69	0.83	0.15	0.71	9.97	8.39
3	1.46	3.03	0.74	0.78	0.15	0.71	8.67	7.58
4	1.06	2.41	0.69	1.83	0.18	0.69	9.34	7.55
5	1.13	2.69	0.72	1.57	0.19	0.76	10.95	8.13
6	0.70	3.19	0.74	1.52	0.22	0.73	10.25	7.81
7	0.53	3.09	0.71	2.51	0.14	0.72	10.87	8.03
8	1.23	2.26	0.66	0.10	0.37	0.74	12.48	9.85
9	1.23	2.73	0.71	0.46	0.31	0.75	10.05	8.25
10	0.97	3.42	0.78	0.60	0.18	0.73	8.37	6.78
11	1.68	2.84	0.75	0.76	0.18	0.66	11.31	9.18
12	1.13	3.26	0.73	0.65	0.17	0.82	10.14	9.16

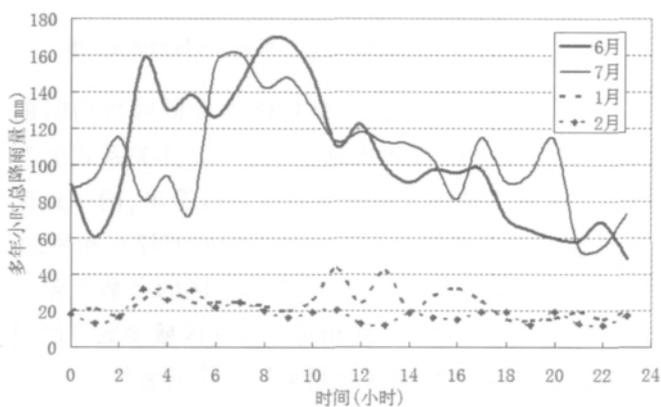


图4 1996~2004年五强溪小时总雨量日(24h)分布图

### 3 一种降尺度研究的新方法

基于以上的实测资料分析, 给出以下时间降尺度方法。

为了方法的计算简单与可行性, 此处假设日降雨的时间分布是单峰的, 这同实际有一定的差距, 但影响

表2 和民焉测站

Month			TR	a	b	AR	AMAT	AMBT
4	-13.27	11.62	0.98	1.12	0.00	0.01	11.00	9.33
5	4.78	1.10	0.33	0.56	0.30	0.60	12.36	10.18
6	4.07	1.10	0.49	0.70	0.16	0.72	13.45	12.11
7	4.55	1.38	0.44	0.23	0.32	0.78	12.47	10.51
8	4.44	1.65	0.51	1.16	0.16	0.62	11.47	10.00
9	6.69	2.03	0.51	0.65	0.09	0.66	10.58	7.71
10	4.20	6.44	0.95	0.42	0.04	0.92	4.33	1.33

表4 安江测站

Month			TR	a	B	AR	AMAT	AMBT
1	2.15	3.23	0.70	0.34	0.20	0.79	10.01	8.91
2	1.69	3.20	0.62	0.44	0.27	0.74	8.95	8.26
3	1.12	3.04	0.72	1.31	0.13	0.57	9.04	6.74
4	1.50	2.17	0.71	1.60	0.20	0.76	9.38	7.44
5	1.27	2.51	0.71	1.36	0.17	0.86	10.81	7.38
6	0.40	2.67	0.71	2.27	0.25	0.84	13.18	8.52
7	0.33	2.81	0.55	1.55	0.18	0.76	12.31	9.48
8	1.18	1.66	0.69	0.85	0.28	0.79	11.77	11.12
9	0.86	3.31	0.77	0.94	0.21	0.81	10.33	10.65
10	1.32	2.90	0.64	0.58	0.16	0.86	9.51	8.09
11	1.84	2.62	0.68	0.42	0.25	0.77	10.52	8.00
12	0.40	3.28	0.68	0.42	0.26	0.75	10.52	9.11

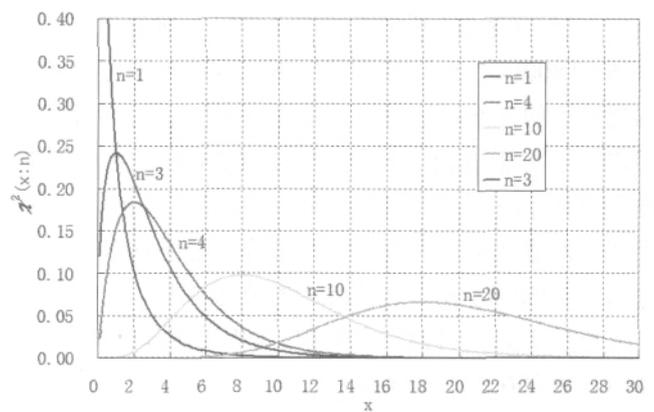


图5 卡方分布图

不是很大。

#### 3.1 必要的特征值

该法首先得到降雨降尺度的几个必要的特征值:

##### (1) 降雨的历时 T

降雨的历时采用式(3)计算, 可式(3)中的参数、是未知的, 可以用相邻的有资料的测站统计值得到这两个参数, 或者同该区域具有一致或者相似的降雨特性的测站的统计值, 或者采用优化算法与专家经

验得到该参数值。当得到  $t_b$ 、 $n$  后, 就可以根据实测的日降雨量, 采用式 (3) 得到当日的降雨历时。

(2) 降雨的最大雨强

最大雨强采用式 (4) 计算, 获得参数  $a, b$  的方法同雷同。

(3) 降雨的开始时间

降雨的开始时间同日降雨量并没有明显的相关性, 基本是分布在 1 天的 24 小时中的, 只是降雨历时越长降雨开始时间显然是越早的, 并且不同的季节降雨开始时间有一定的差异。所以此处计算降雨开始时间采用式 (7) 计算。

$$t_b = \text{rand}() \cdot (24 - T) + \Delta t_b \quad (7)$$

式中:  $t_b$  是不同月的降雨开始时间;  $T$  是日降雨历时(小时);  $\text{rand}()$  是 0-1 的随机数;  $\Delta t_b$  是不同月的降雨开始时间差, 可以根据实测资料或者专家经验统计得到。

(4) 降雨的分布函数

$$\chi^2(x; n) = \begin{cases} \frac{x^{0.5n-1} e^{-0.5x}}{2^{0.5n} \Gamma(0.5n)}, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\Gamma(s) = \int_0^{\infty} t^{s-1} e^{-t} dt \quad (s > 0) \quad (9)$$

由实测数据统计得到的降雨分布关系非常接近卡方分布, 所以此处就采用卡方分布来模拟日降雨的 24 小时分布, 由于卡方分布的参数  $n$  给不同的值时其分布是不一样的, 见图 5; 所以此处根据不同的降雨历时给出不同的卡方分布, 见表 5。

表5 不同历时卡方分布参数表

T/小时	(1,8]	(8,11]	(11,14]	(14,16]	(16,18]	(18,14]
n	3	4	5	6	7	8

显然降雨历时小于等于 1 小时降雨就等于日降雨。

3.2 具体实现步骤

在得到以上的几个降尺度的降雨特征值后, 就非常容易实现降雨的降尺度计算; 以下给出降雨降尺度的具体实现步骤:

(1) 确定所有参数值

所需要确定的参数有  $a, b$ 、 $n$  与  $\Delta t_b$ 。需要注意的是这些参数在 12 个月中是不同的, 每个参数是一组数据, 而不是单值。如果有实测的小时降雨资料, 可以直接用小时降雨资料统计后放入数据库或文本中, 在日

降雨降尺度计算时可以直接读入。如果没有实测小时降雨, 就只有根据相似流域或者专家的经验确定该组参数。

(2) 计算不同降雨历时的各个时段分配权重  $w_{ij}$

由于不同的降雨历时给出的是不同的卡方分布, 所以需要根据不同的降雨历时首先确定好各个时段的分配权重。

$$w_{ij} = \int_{j-1}^j \chi^2(x; n) dx \quad (10)$$

式中:  $w$  为初始权重;  $i$  为降雨历时 (1-24 小时);  $j$  为降雨时间(1- $i$  小时)。

规一化处理, 即可得到每个时段的不同权重:

$$W_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^i w_{ij}} \quad (11)$$

(3) 计算降雨的历时

在得到日降雨数据与参数后直接用式 (3) 计算即可。

(4) 计算降雨开始时间

由式 (7) 即可确定小时降雨的开始时间  $t_b$ 。

(5) 计算降雨峰值, 修正时段分配权重  $w$

在有降雨历时与各个小时的分配权重后, 就可以将日降雨降尺度到小时尺度的。可这样直接分配就很难保证雨强的同实测一致。所以此处需根据式 (4) 确定一最大雨强  $P_A$ 。根据降雨历时找到对应用的分配权重函数  $w$ 。让  $w = w$ , 并用  $P_A/P$  代替权重数组中最大权重。  $w$  然后将其它的权重按比例缩小, 让  $w = 1$ 。

(6) 确定每小时的降雨量  $P_t$

$$P_t = \begin{cases} 0, & t < t_b \text{ 或 } t > (t_b + T) \\ P \cdot w, & t_b < t < (t_b + T) \end{cases} \quad (12)$$

4 新方法的验证分析

对于沅江流域与岔巴沟, 分别用上述方法通过日降雨还原了小时降雨。将计算的小时降雨与实测的小时降雨进行了对比, 过程线见图 6 和图 7。实测的小时降雨与模拟的降雨在每日降雨的总量上显然是完全一致的, 雨强上也基本合理, 个别超大雨强未完全模拟出来。从过程线图中发现, 大部分的降雨时间还是能同实测吻合上, 但也存在很多降雨时间不一致的现象, 显然随机生成降雨时间存在不足。

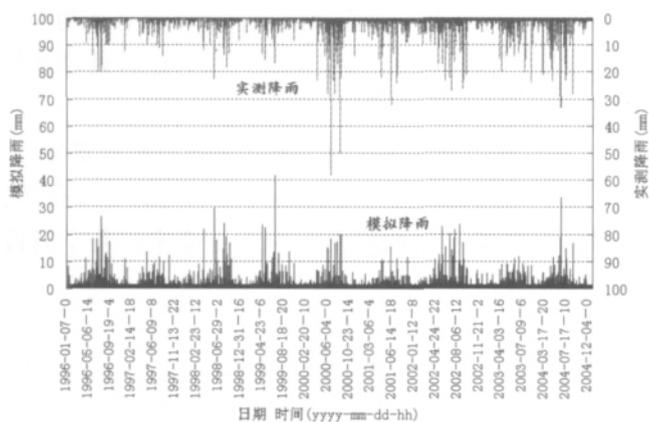


图6 沅水五强溪站实测与模拟小时降雨的对比图

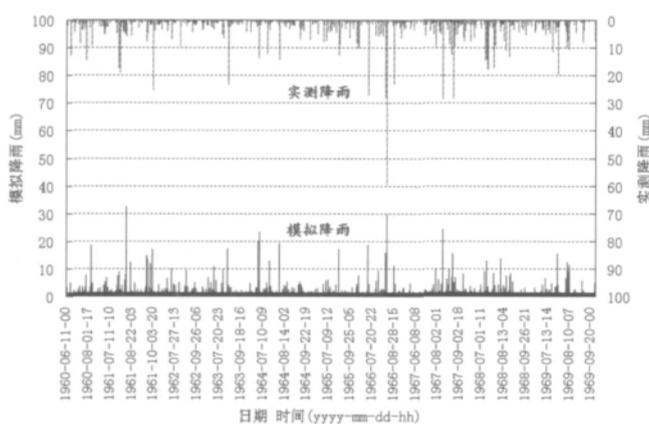


图7 岔巴沟曹坪站实测与模拟小时降雨的对比图

## 5 结语

降雨的时间降尺度是一非常难的科学问题，源

于实测资料的不足。只所以要开展降尺度的研究是解决无资料或缺资料地区科学问题。本文基于前人的研究基础上，通过对实测资料的统计分析，给出了一种非常简单实用的降雨时间降尺度方法。该方法的优点是保证了日降雨总量不变，同时能模拟出与实测基本一致的雨强，这一点能够很好的满足水文循环研究的需要。该方法的不足是在降雨的时间上与实测部分不一致，需要以后继续研究、完善。

### 参考文献:

- [1] 刘苏峡,夏军,莫兴国. 无资料流域水文预报(PUB计划)研究进展[J]. 水利水电技术,2005,(2): 9-12.
- [2] Troch, P. A., Paniconi, C., McLaughlin, D. Catchment - scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*, 2003, (2):131-135.
- [3] 李璐,夏军,叶爱中,等. 基于雷达测雨的降水数据同化研究[J]. 人民长江, 2006,(9): 95-97.
- [4] 苏凤阁,郝振纯. 水文模型中雨量资料的解集分析及应用[J]. 气候与环境研究,2001,6(2):261-266.
- [5] Kondo, J., Xu, J., Seasonal variations in the heat and water balances for nonvegetated surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36:1676-1696.
- [6] 周祖昊,王浩,贾仰文,等. 缺资料地区日降雨时间上向下尺度化方法探讨——以黄河流域为例[J]. 资源科学, 2005,(1): 92-96.
- [7] 周祖昊,贾仰文,王浩,等. 大尺度流域基于站点的降雨时空展布[J]. 水文,2006,(1): 6-11.

## SL/XR Comparative Test and Precision Analysis

YE Ai-zhong<sup>1</sup>, DAI Yong-jiu<sup>1</sup>, XIA Jun<sup>2</sup>

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** According to scarcity of the observed precipitation, this paper proposed a precipitation downscaling method in temporal scale based on the statistical analysis of the river basins of Yuanjiang and Chabagou. The Yuanjiang Basin is in the humid zone of the South China, and the Chabagou Basin is in the semi-arid zone of the Northwest China. The proposed method can insure that there is not only an consistency between observed and simulated precipitation data, but also between the rainfall intensities. The application results indicate that this method is simple and practical.

**Key words:** precipitation; time; downscaling;  $\chi^2$  distribution