

我国 1 小时雨强的时空分布特征

姚 莉 李小泉 张立梅

(国家气象中心,北京 100081)

提 要: 基于我国 1991—2005 年 485 站高时间分辨率的雨强资料,利用概率分布与统计检验等方法,分析了其时空分布特征,并将雨强分为 $>1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $>2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $>4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $>8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 四个级别,探讨了各级别雨强的年平均发生频率、日变化和极端降水等问题。结果表明:雨强的日变化具有明显的地区差异,其中西南和华南地区日变化最为明显。1 小时最大雨强 50 年和 100 年重现期初步估算值的空间分布形态具有一致性,高值区主要在东南沿海一带,其中百年一遇的 1 小时雨强达 $100\sim 150\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

关键词: 1 小时雨强 概率分布 日变化 重现期

Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Hourly Rain Intensity in China

Yao Li Li Xiaoquan Zhang Limei

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: Based on the hourly rain intensity data in 485 stations of China during 1991 to 2005, the Spatial-Temporal distribution features of hourly rain intensity are analyzed with probability distribution analyses and statistical test. The hourly rain intensity was divided into four levels, more than 1 mm, 2 mm, 4mm and 8mm per hour. The hourly rain intensity distribution character in different levels was analyzed for the whole year and the distribution of the maximum of hourly rain intensity. Then, the daily variation of rain intensity was investigated. The results showed that the features of daily variation were different in different areas and obvious in the West South and the South China. Furthermore, the recurrence periods of 50, 100 years of the maximum of hourly rain intensity were estimated primarily. It seemed that their distribution trends were consistent. The maximum area can be found in the southeast coastal range. The maximum of hourly rain intensity in 100 years can reach 100—150 mm/h in these regions.

Key Words: hourly rain intensity probability distribution daily variation recurrent period

资助项目: 中国气象局多轨道业务建设项目“精细化气象要素预报业务系统建设”和“灾害性天气个例数据库”资助

收稿日期: 2008 年 3 月 14 日; 修定稿日期: 2008 年 10 月 9 日

引言

近年来,气候变化及其引发的自然灾害已引起人们的普遍关注,其中暴雨、洪涝、连阴雨、滑坡、泥石流等灾害性天气不仅与降水量有关系,还与降水强度有密切的关系。以往对降水量变化的研究和所产生的自然灾害仅限于年、月、日的时限,对小于24小时或更短的雨强特征及变化分析研究很少。特别是出现洪涝灾害以后,政府部门需要重新规划城市和农村的抗灾防灾工作,迫切要求了解各地雨强的时空分布特点以及不同重现期的最大降雨强度值,这些数据对组织防洪抗灾,兴修水利工程有重要参考价值。此外,在我国降水概率预报业务^[1-2]和区域性暴雨研究^[3]工作中也需要把雨强作为一项较为重要的影响因子。

在国内外已发表的有关雨强的研究工作不多,国外多为雨强的探测和估算等问题的讨论^[4-6]。郭化文等^[7]在1997年应用改进的特征系数法求算了2~24小时泰安地区各县市100年、200年一遇的最大概率降雨强度。2005年,汪青春等^[8]利用青海省1961—2002年26个代表站逐日雨量资料和青海省东部地区10个站降水自记资料,分析了近40年来青海省雨日、雨强气候变化。孙修贵等^[9]应用国际电联降雨衰减计算模型计算出的降雨衰减值,分析了这些气象台站雨强资料的可靠性。这里意在利用现有的1991—2005年雨强资料,对各地区1小时雨强的发生频率、日变化特征等进行多角度的探讨,并揭示了我国1小时雨强时空分布的特征及最大雨强长年代重现期。

1 资料与方法

高时间分辨率雨强资料来自国家气象信

息中心业务系统数据库,基于迁站、变站和资料残缺的客观事实,经过系统分析和筛选后,在我国季风区选定了485个观测站,时间为1991—2005年。同时按参考文献^[10]的规定,雨量计观测的液态和随降随化的固态降水,雨量自记所得的1小时降水量记录,即为1小时的雨强。因此,所统计的1小时雨强,不包括固体降雹(降雪等)。当测站进入降雪季节,雨量计停止观测时,雨强资料按缺测处理,不参加统计。若无特殊说明,文中的雨强均指1小时雨强。

为考察雨强资料的可用性,又进行了抽样检验,以确认数据库中的24小时定时雨量器的降水量观测记录的可靠性。按不同的气候条件和地理位置,从东西南北中各区域分别选取沈阳、济南、西安、郑州、福州5个站,将各站历年逐日1小时雨强值加起来,与同期地面定时观测的降水量值进行比较,以此作为1小时雨强资料可用性的一个判据。表1给出5个代表站在日雨量为中雨、大雨、暴雨时,相对误差的统计结果。由表1可以看出,对于日降雨量为中雨和大雨的情况,两者

表1 5个代表站数据检查结果

站名	降雨情况/mm	相对误差30%的百分率	相对误差20%的百分率	相对误差10%的百分率
沈阳	$10 \leq R < 25$	99.3	97.9	92.3
	$25 \leq R < 50$	100	96.3	95.1
	$R \geq 50$	100	100	82
济南	$10 \leq R < 25$	96.7	95.0	91.7
	$25 \leq R < 50$	97.4	97.4	89.7
	$R \geq 50$	100	100	93
西安	$10 \leq R < 25$	98.6	98.6	92.1
	$25 \leq R < 50$	100	100	100
	$R \geq 50$	100	86	86
郑州	$10 \leq R < 25$	100	100	99.3
	$25 \leq R < 50$	100	100	100
	$R \geq 50$	100	100	100
福州	$10 \leq R < 25$	99.7	99.1	97.1
	$25 \leq R < 50$	99.3	99.3	94.5
	$R \geq 50$	98	98	94

相对误差小于 30%、20%、10% 的比例分别在 97%、95%、90% 以上。对于日雨量为暴雨时,除福州为 98% 外,其余各站相对误差小于 30% 的比例均为 100%。沈阳和西安相对误差小于 20% 和 10% 的比例分别为 82% 和 86%,其它站则在 90% 以上甚至达 100%。表明上述 1 小时雨强的资料是基本可用的。

2 我国 1 小时雨强的空间分布特征

参照文献[9],采用大于一定界值的雨强进行分类的办法进行统计和分析处理。考虑降水的基本特征及地域差异和实际业务的需要,分别按 1 小时雨强为 $>1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $>2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $>4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $>8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 四种情况来统计不同级别雨强的出现频数,并讨论它们的时空分布特征。

2.1 1 小时雨强空间分布特征

图 1 给出了 $>4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强的年平均出现频数的空间分布。由图 1 可见,降水频数等值线由北向南逐渐密集,等值线的数值也由北向南逐渐增大。全国以秦岭—淮河为明显的分界线:在秦岭—淮河以北, $>4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的出现频数在 40 次/年以下;只有吉林东南部和辽宁东部的少部分地区在 40 次/年以上,而华北北部和西北地区最少,在 20 次/年以下。秦岭—淮河以南,则 $>4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强出现频数都在 40 次/年以上。对南方地区而言,在安徽南部与江西北部部和两广南部沿海及海南有明显的大范围的高值区存在,其数值达到 100 次/年以上;此外,在广西北部、云南南部也有小范围的高值区,其数值也可达 100 次/年以上。

对比发现,其它级别雨强的年平均频次分布(图略)也大体相似,这里不再赘述。同时,各级雨强年平均出现频数的分布与年总

降水量的分布(图略)大体相似,即一般来说,年降水量大的地区,各级雨强出现频次也较大。



图 1 1991—2005 年雨强 $>4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的年平均出现频数分布图

2.2 1 小时雨强季节分布特征

以上讨论的是全年不同级别雨强的出现频数分布情况。我国处于东亚季风区,不同季节的降雨情况是很不相同的。为进一步了解不同季节各种级别雨强出现频数的分布情况,按春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—2 月),分别对大于 $1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨强出现频数进行统计(图略)。

春季,长江以北我国大部地区各级雨强的出现频次都很小,这是由于我国春季北方普遍降水稀少造成的。而各级雨强频数的大值区则分布在江南一带,这是江南春雨较多的反映。春季,北方冷空气逐渐减少,南方暖空气逐步增强,南支槽开始活跃,冷暖空气多在江南地区交汇,从而在江南地区产生很多降雨。在安徽南部与江西北部一带频数最大,该地区春季大于 $1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、大于 $8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的出现频数分别达到 150 次以上、80 次以上、40 次以上和 15 次以上。由于江南春雨以连绵细雨为主,降雨强度不大,因而 $8\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$

以上的强降雨机会不多,仅为大于 $1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强出现频次的十分之一左右。其次,我国华南北部也有雨强频数的大值区,对应大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的出现频数可达 35 次、15 次以上。这正是春季华南前汛期雨季到来的反映。

夏季是我国降雨最多季节,各级雨强出现频次均明显大于春季。与春季不同的是,各级雨强频数最大值区多分布在两广南部、云南南部一带,这里夏季大于 $1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的出现频数分别达到 150 次、100 次、60 次、30 次以上。这是由于夏季华南沿海容易遭受台风和热带风暴的袭击,台风暴雨和强烈的夏季不稳定性降雨是导致这里大雨强出现频次明显增多的重要原因。各级雨强频次的次大值区出现在安徽南部与江西北部一带,对应大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 级别的出现频数为 80 次、40 次、20 次以上。

秋季,随着西太平洋副热带高压明显减弱东退,我国东部大部地区的水汽来源减少,形成秋高气爽的天气,因而各级雨强的出现天数也随之明显减小。与春夏两季不同的是,秋季最大值区出现在海南岛,对应大于 $1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 级别的出现频数达到 80 次、50 次、40 次、12 次以上,这是由于海南岛 9 月份仍是台风和热带风暴盛行的季节。

冬季,我国受极地干冷气团控制,来自海洋的暖湿气流和水汽供应明显减少,降水稀少,是我国降水量最少的季节;加上北方不少地区由降雨转为降雪,因而各级雨强的出现频次均明显减少。在整个冬季,全国出现大雨强的天数很少。包括华南和西南在内大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强的年平均出现天数均为零或接近于零。

综上所述,对于大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 8mm

$\cdot \text{h}^{-1}$ 的较强雨强来说,我国夏季出现大雨强频数最多的地区主要在我国南部沿海地区。春季,出现大雨强频数最多的地区是安徽南部与江西北部,秋季,出现大雨强频数最多的地区是海南岛和云南南部,我国冬季是出现大雨强最少的季节,全国范围内极少会出现 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降雨强度。

3 我国 1 小时雨强的极值分布特征

从各站 1991—2005 年 1 小时雨强最大值中,挑选出其中最大的雨强值,便可得到 15 年中各地实际观测到的最大 1 小时雨强(图 2)。



图2 1991—2005年1小时雨强最大值($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

由图 2 可见,从现有的 15 年 485 站雨强统计看,即使在极度干旱的甘肃西部和新疆地区,也曾经出现过 $10 \sim 15\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的最大雨强。华北北部、西北东部的 1 小时雨强最大值有 $40 \sim 50\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,华北平原和黄河下游的个别地区甚至达到 $80 \sim 90\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,这往往是盛夏时节局部地区强烈发展的中小尺度天气系统造成的。长江以南大部地区 1 小时雨强的最大值一般都在 $60 \sim 80\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,沿海地区受台风和热带风暴等天气系统的影响,1 小时雨强的最大值可以达到 $80 \sim 90\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,甚至 $100\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。

表 2 全国 1991—2005 年前 5 位 1 小时雨强的最大值

序号	地点	出现日期和时间	雨强/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	当日 24 小时雨强合计/ mm	地面观测日降水量/ mm	相对误差/%
1	湛江	2000 年 5 月 10 日 00—01 时	157.7	285.1	297.5	4.2
2	玉环	1997 年 9 月 9 日 17—18 时	131.9	249.5	260.7	4.3
3	海口	1998 年 8 月 22 日 13—14 时	128.7	323.3	326.7	1.0
4	开封	1992 年 8 月 11 日 6—7 时	124.1	218.2	217.8	0.2
5	上川岛	1997 年 6 月 14 日 3—4 时	122.5	237.2	237.4	0.1

表 2 列出了前 5 位最大 1 小时雨强的出现地点、时间。为便于比较,还同时给出了当日的 24 小时雨强合计值、定时地面观测的日降水量及相对误差。由此可见,前 5 位 1 小时雨强的最大值来看,均超过了 $120\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当日 24 小时雨强合计值与同日地面观测的日降水量比较,相对误差不大,均 $< 4.5\%$,因而认为可以接受。同时注意到,1 小时雨强极值在同日的 24 小时雨量中所占的比重很高,这就是说,某日的大暴雨或特大暴雨有可能集中出现在其中很短的时段内,从而造成了极强的雨强。15 年中,全国最大的 1 小时雨强出现在 2000 年 5 月 10 日的湛江,午夜 00—01 时的 1 小时雨量达到 157.7mm ,当日 24 小时的雨强合计值为 285.1mm ,同日本站地面观测的日降水量为 297.5mm ,相对误差为 4.2% 。

4 我国雨强的日变化特征

4.1 平均雨强的日变化

这里统计 15 年中各站一日中每个时次 $> 1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $> 2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $> 4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $> 8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强出现频次,进而得到各级雨强每个时次平均出现的频次以及它们的日变化,以宜宾、广州站为例(见图 3 和图 4)。

由图 3 可见,在宜宾,上述 4 个级别的雨强多出现在夜里,尤其是从 23 时至凌晨 5 时频次最高。以大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为例,从 23 时至凌晨 4 时各时次年平均的出现频次都在 6 次以上。而到了白天,出现的次数就明显减

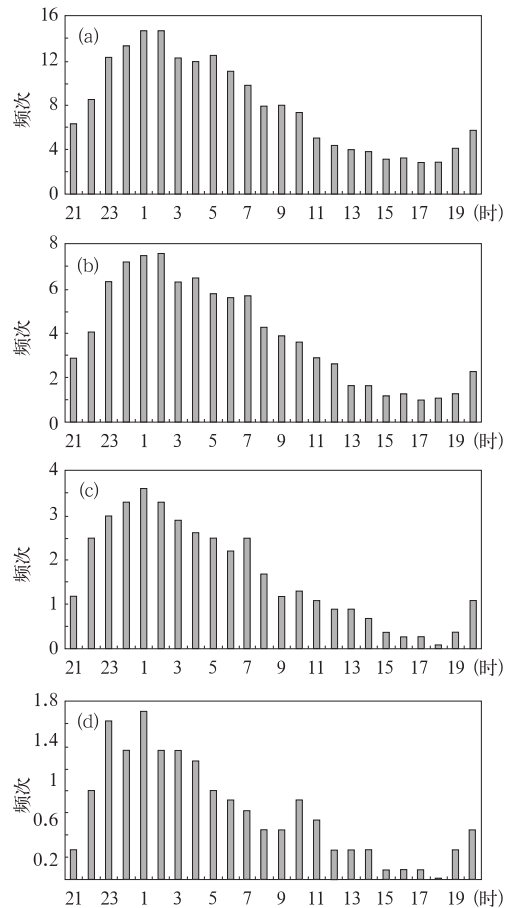


图 3 宜宾 24 小时逐时各级别雨强年平均出现频次分布图

(a) 大于 $1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) 大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,
(c) 大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (d) 大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$

少,大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强年出现频次几乎全都在 4 次以下;尤其是在 15—19 时,各时次年平均出现频次均在 1.5 次以下。并且,随着雨强级别的增大,相应雨强的出现频次逐渐减少。

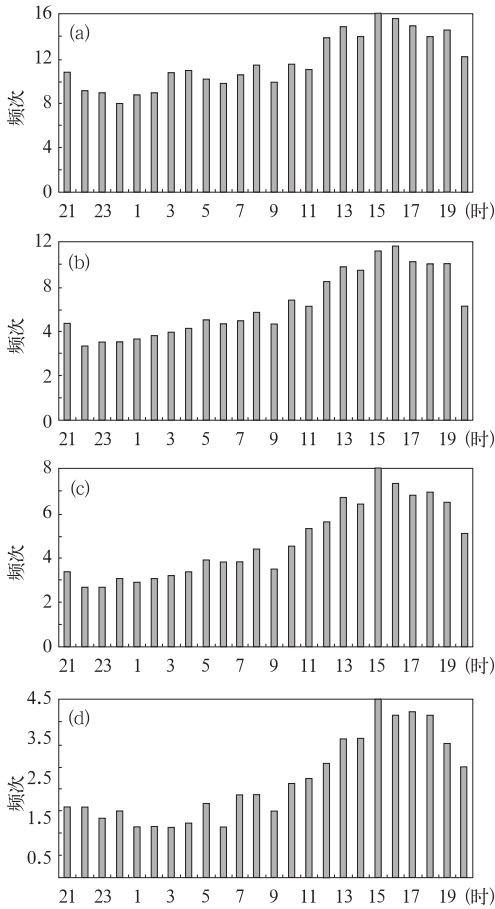


图 4 广州 24 小时各级别雨强年平均出现频次分布图

(a) 大于 $1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) 大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,
(c) 大于 $4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (d) 大于 $8\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$

从图 4 中看出,广州与宜宾的情况明显不同,各级别的雨强最大值多出现在下午,尤其是从 12—19 时的出现机会很大。以大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为例,12 点至 19 点,各时次大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强年平均出现频次在 8 次以上。而到了午夜以后的夜间,出现的次数就明显偏少,大多在 6 次以下。

由此看出,不同地区雨强出现频数的日变化是不同的,在此不可能一一进行讨论,仅从下面的变差系数和分时段方差分析两方面进行讨论和分析。

均方差是描述样本中资料与平均值差异状况的一种统计量,可以用来反映样本资料相对于平均值总体变动的程度^[11],均方差的数量级与样本本身的数量级有关。为了消除变量本身量级的影响,通常可取相对值作为比较的参数,按文献[12],定义变差系数:

$$\text{变差系数 } C = \frac{S_x}{x_m}$$

其中, C 为雨强年平均出现频次的日变化变差系数,变差系数的大小,能够反映各级雨强出现频数日变化的总体分布特征, S_x 为雨强年平均出现频次的均方差, x_m 为雨强年平均出现频次的多年平均值。

由此得到,各类雨强年平均出现频次日变化的变差系数,因各级雨强分布特征大体类似,故以 $>4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强日变化变差系数分布为例(图 5)。



图 5 $>4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强年平均出现频次的日变化变差系数

雨强的变差系数都是东部小于西部,北方大于南方。长江中下游和江南地区的各级雨强出现频数的变差系数都是最小的,一般为 $0.1 \sim 0.2$,说明这里是雨强出现频率日变化最小的地区;而西部地区,特别是四川盆地附近和西北地区东部,变差系数则在 0.5 以上,甚至达到 $0.8 \sim 0.9$ 。说明这里一天 24 小时的不同时段雨强出现的几率是很不相同的,同类级别雨强出现几率的日变化很大。

4.2 各时段雨强的日变化

为了进一步分析雨强日变化特征,将每日 24 小时分成 4 个时段,即:上午(7—12 时)、下午(13—18 时)、前半夜(19—24 时)、后半夜(1—6 时)。

并将四个时段中平均频次最高时段标出,以反映最容易出现该级别雨强的时段。分析表明各级雨强在 4 个时段的分布情况大体类似,故以 $>4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强为例,讨论在一天 4 个时段中出现频次最高时段的分布情况(图 6)。

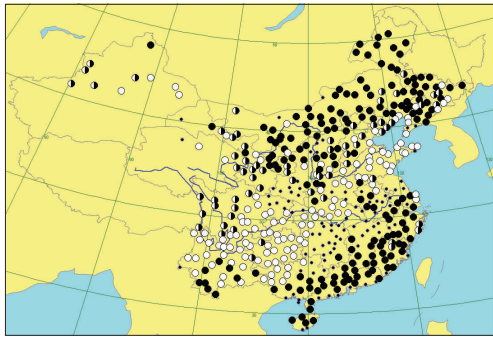


图 6 一天 4 个时段中 $>4\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强平均出现频次最高的时段
○: 上午; ●: 下午; ◐: 前半夜; ○: 后半夜

总体来说,在一天 4 个时段中雨强出现频数最高的时段在各地是很不相同的,但不同级别雨强的变化却不大。北方地区除了山东大部、河南北部、安徽北部日雨强频率最高的时段在后半夜外。其它大部地区多出现在下午和前半夜。南方地区雨强频数最大值的时段分布也很明显,云南、贵州、广西西部、四川南部多为后半夜,而在我国东南沿海、海南岛则多出现在下午,长江中游的湖南、江西北部则多出现在上午。

5 1 小时雨强重现期的估算试验

按水文学的理论^[13],重现期指的是某种

事件在长时间的试验里重复出现的时间间隔平均数,即平均的重现间隔期,常表述为多少年出现一次(多少年一遇)。当然,所谓重现期为百年一遇,并不是说正好一百年中出现一次,只是说每个年份出现的可能性为 1%,只有长时期平均而论才是正确的。参照文献[7]、[13], T 年一遇的 1 小时最大雨强可按下式计算:

$$R_{T_{\max}} = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]$$

其中 u 和 α 分别为分布的位置参数和尺度参数,参数与样本的均值 μ 和标准差 σ 的关系按文献[7]、[13]中公式。

通过上式计算得到了我国 50 年、100 年一遇的最大 1 小时雨强分布的估计值(图 7)。

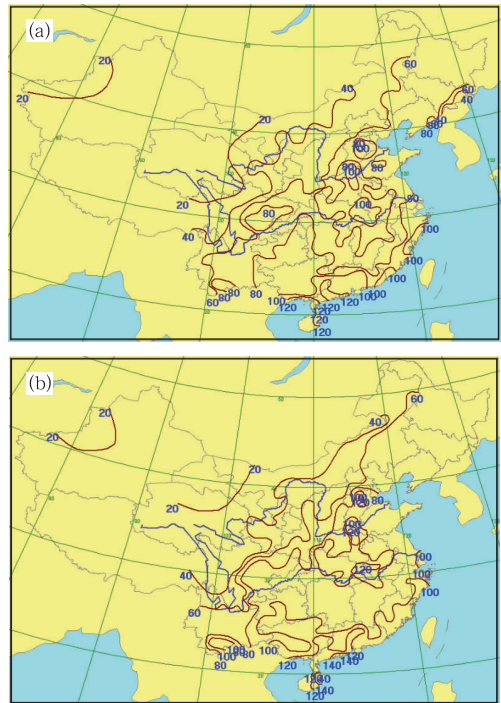


图 7 我国不同重现期的雨强空间分布。
(a) 50 年一遇; (b) 100 年一遇

由图可见,我国 50、100 年一遇最大 1 小时雨强的分布趋势是一致的,最大的高值区在东南沿海一带,其次是长江中下游和淮河流域,50 年一遇的 1 小时雨强为 80~120mm

$\cdot h^{-1}$ 左右,百年一遇的一小时雨强可达 $100 \sim 150 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 左右。黄河中下游和华北平原的部分地区也较高,百年一遇的一小时雨强为 $80 \sim 100 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 左右。干旱的内蒙古西部和新疆、甘肃西部等地区为雨强的低值区,百年一遇的一小时最大雨强为 $15 \sim 20 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 。

6 结论

对于大于 $4 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 和 $8 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 的较强雨强而言,出现大雨强频数最多的地区夏季主要在我国南部沿海地区,春季是安徽南部与江西北部,秋季则是海南岛和云南南部,冬季是出现大雨强的机会最少的季节。从现有的15年485站雨强统计看,实际观测到的1小时雨强极大值并不小,就是干旱的甘肃西部和新疆地区,也曾经出现过 $10 \sim 15 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 的最大雨强。华北北部、西北东部的1小时雨强极大值有 $40 \sim 50 \text{mm} \cdot h^{-1}$,华北平原和黄河下游的个别地区甚至达到 $80 \sim 90 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 。长江以南大部地区1小时雨强的极大值一般都在 $60 \sim 80 \text{mm} \cdot h^{-1}$,沿海地区1小时雨强的极大值可以达到 $80 \sim 90 \text{mm} \cdot h^{-1}$,甚至 $100 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 以上。

在一天4个时段中,雨强出现频数的日变化在各地区是很不相同的,以西南和华南地区最为明显,但不同级别雨强的差别却不大。经过雨强重现期的估算,结果表明,我国50、100年一遇最大1小时雨强的分布趋势是一致的,最大的高值区在东南沿海一带,其次是长江中下游和淮河流域,50年一遇的最

大雨强为 $80 \sim 120 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 左右,百年一遇的1小时雨强为 $100 \sim 150 \text{mm} \cdot h^{-1}$ 左右。

参考文献

- [1] 周兵,雷振发.北京降水概率预报业务实验[J].大气科学,1998,22(3):336-338.
- [2] 周兵,陆晨.北京地区夏季降水概率预报业务应用研究[J].气象,1996,22(1):3-5.
- [3] 刘还珠,王维国,邵明轩,等.西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,2007,31(4):727-729.
- [4] Wim Klaassen. Determination of Rain Intensity from Doppler Spectra of Vertically Scanning Radar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1989,6(4):552-562.
- [5] J. G. Hosking and C. D. Stow. Ground-Based, High-Resolution Measurements of the Spatial and Temporal Distribution of Rainfall [J]. Journal of Applied Meteorology. 1987,26(11):1530-1539.
- [6] Frank D. Marks Jr. Evolution of the Structure of Precipitation in Hurricane Allen [J]. Monthly Weather Review. 1985,113(6):909-930.
- [7] 郭化文,魏息生,陈建昌.应用特征系数法求算长时段最大概率降雨强度[J].气象,1997,23(4):9-12.
- [8] 汪青春,李林,刘蓓,等.青海省近40年雨日、雨强气候变化特征[J].气象,2005,31(3):69-72.
- [9] 孙修贵.中国主要城市降雨雨强分布和Ku波段的降雨衰减[M].北京:气象出版社,2004:1-5.
- [10] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003:54-59.
- [11] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,2004:5-7.
- [12] 屠其璞.气象应用概率统计[M].北京:气象出版社,1984.
- [13] 金光炎.水文统计原理与方法[M].北京:中国工业出版社,1964.