

西北干旱地区暴雨洪水学术讨论会会议文件之二

陕北黄土地地区小流域 设计暴雨时深关系分析

顾文燕 李 琪

水利部南京水文研究所

一九八〇年八月

西北干旱地区暴雨洪水学术讨论会会议文件之二

陕北黄土地区小流域 设计暴雨时深关系分析

水利部南京水文研究所

一九八〇年八月

陕北黄土地区设计暴雨时深关系分析

顾文燕 李琪

为研究陕北地区小流域暴雨洪水计算方法 and 探讨西北地区暴雨特性，我们着重分析了陕北子洲县流吴镇站黄河流域的暴雨资料，并扩大分析了无定河流域以及西北地区部分实测和调查的大暴雨资料，以作比较和检验。

一、本次研究地区气候、水文特征的一般概况：

无定河流域位于陕北黄土高原，属于典型的大陆性季风气候。冬季受蒙古冷高压控制，因而少雨；夏季太平洋热带高压深入内陆，来自西南侧的东南气流带来大量水汽，因而湿度大，湿度高；并且又受河间区副热带高压的影响，致使大气储存大量的潜热和存在不稳定能量，当它具备足够的条件时，便形成强烈的对流及暴雨天气。暴雨多出现在盛夏，据统计约一半以上的暴雨集中在7、8两月。同时在陕北，由于地势位置变化较大，冷空气移动速度快，暖空气较弱，容易造成短时强降雨及小面积的大暴雨。例如“77.8”陕蒙交界地区马市旗大暴雨，暴雨中心调查点雨量从小时达1400mm，1小时雨量大于500mm，[1]的超过世界实测雨量历时关系的外包线。（见图6）

本地区年平均雨量为500mm，年最大24小时雨量均值为60mm，其变差系数 C_v 为0.65，可能最大24小时雨量为600mm。

二、几种选择统计方法：

西北地区的大暴雨具有历时短，强度大，面积小，亦即暴雨时空分佈极不均匀的特点，因而形成的洪水大多为陡涨陡落型，流域内的产流往往以部分面积超渗产流为主，可是一般小

完成又缺乏实测流量资料，因此设计洪水需要利用暴雨间接推求。无论从小面积推求公式或中等流域单位线计算洪水，都要求给出时段雨量或汇流时段内的雨量，即要求提供设计暴雨雨量历时关系，可以用暴雨公式中递减指数 n 表示。

本次分析采用了以下几种选择和统计方法：

1. 起算量同次雨平均雨量历时关系：

(1) 选择标准：晋冀鲁巴河流域各站历年日雨量资料。统计日雨量量级发生的频次，其一般规模为30~60mm的日雨量约每年平均有3~4次，日雨量超过60mm每年发生次数较少，在20年系列中（1950~75）只有12次。为避免混淆统计大小不同降雨性质的弊病，确定以日雨量超过60mm作为起定量同次雨的选择标准。作为分析同次暴雨的雨量历时关系，用以代表该地较大暴雨的平均强度衰减特性。

(2) 次暴雨的时空分布：从鲁巴河流域历年最大日雨量的中心分布位置图（图1）来看，暴雨中心出现位置没有明显的规律，是属于随机性的。同时亦表明，流域内由于高程变化不大（约900~1200M），因而地形对降雨的影响也不十分显著。

一般次暴雨的降雨过程短促，大多数一次降雨历时为6小时左右，少数长历时降雨也可达24小时。降雨量的时程分配很集中，约一次雨的60%以上可集中在3~6小时内。并且暴雨中心地区各站的降雨历时短延时间相仿，但较短历时（1小时以下）最大雨量很难同步时程发生。

(3) 雨量历时关系：选择自记雨量记录精度较高测站的雨量资料，在统计短历时雨量时，注意雨量值不能按平均强度折减，以免统计值偏小。每次大雨要求流域上同时有3~5个单站的雨量资料，用长矩统计方法，统计同次雨中最大10分、20分、30分、1小时、2小时、3小时、24小时雨量值，并在双对数纸上累绘各站同次雨的雨量历时关系，求出各站的递减指数 n 值。

再求各站同次的平均 $\bar{n}$ 值，为流域同一次暴雨的平均 $\bar{n}$ 值，然后综合历次递减指数求得平均值，作为流域的平均雨量历时关系。

经过用12次大雨分析，该地区雨量历时关系线的转折点大多在1小时和6小时二个时段上，因而确定雨量历时关系用三个折线即用三个递减指数表示。（见成果表1）

综合成果时采用三种方法，第一，求大平均递减指数，即把12次超定量各次的指数，分段加以平均求得 $\bar{n}$ 值，如下表：

$\bar{n}_1$ (10分 ~ 60分) 0.2 ~ 0.5 采用0.4

$\bar{n}_2$ (1小时 ~ 6小时) 0.2 ~ 0.8 采用0.5

$\bar{n}_3$ (6小时 ~ 24小时) 0.3 ~ 1.0 采用0.8

第二，按降雨历时长短不同分别求 $\bar{n}$ 值。因为在分析资料时发现，降雨历时较长的暴雨，其雨量分配均匀，指数相对较小；反之，降雨历时短的暴雨强度就集中，指数为较大。因此分类求平均指数。如下表：

长历时降雨 $\bar{n}_2 = 0.5$ $\bar{n}_3 = 0.6$

短历时降雨 $\bar{n}_2 = 0.6$ $\bar{n}_3 = 0.87$

第三，由于西北地区往往是一次大雨决定其雨量历时关系的外包线，其偶然性较大，因此这次不采用雨量绝对值外包的方法。

2. 定距频率统计同频率雨量历时关系：

以永定河流域为气候一致区，选择自记雨量记录中系列较长代表性较好的曹坪、绥德、米脂、赵石窑等四个单站，作为定点分析。采用定时段年最大值选样法，统计各时段最大雨量，按求距去统计统计参数。（成果表2）鉴于各站的统计参数变幅较大，如 C_v 从0.25 ~ 0.55之间。为了消除随机因素的影响，采用较大范围的地域综合法，亦即将四站同一时段雨量经城频

率值点绘一起，综合平均求参数并进行各时段雨量平衡曲线，以此综合平衡的统计参数和频率线作为本地区的综合定点频率曲线。（频率线见图 51~4）

从综合平衡得出定点频率线看出，统计参数 C_v 不随历时变化，因此点绘同频率的雨量历时关系时，其递减指数 n 也不随频率而变化，亦即不同频率的 n 值为常数。（见图 2）另外雨量历时关系线的转折点仍可定在 6 小时，其相应的递减指数为：

$$n_2 \quad (1 \text{ 小时} \sim 6 \text{ 小时}) \quad 0.70$$

$$n_3 \quad (6 \text{ 小时} \sim 24 \text{ 小时}) \quad 0.74$$

3. 列表频率计算同频率雨量历时关系：

鉴于包西流域较小，实测系列中未出现过大的暴雨资料，为了解决外推问题，采用了动点选择法。也以无定河流域为统计区，从所有测站中独立选取各时段最大雨量值，组成动点各时段最大雨量系列，据此进行频率计算。虽然动点各时段雨量量级较大，但由于西北地区雨量测站稀少，尤其缺乏有记录，因而暴雨中心淹没的可能性很大，有时即使统计到短历时雨量值，也很可能不一定是最大值。有的大暴雨资料，由于记录为 2 段制或 4 段制，无法统计到短历时雨量值，使用一次暴雨的长短历时资料不全，所以在频率曲线时，应考虑长短历时雨量系列的排位问题，以此平衡长短历时雨量的经验频率和统计参数值。经合理性检查，雨量随历时和频率不可发生交叉现象。

例如动点系列中 6 小时雨量最大值为 1971 年石湾站，其 $H_{12} = 213.6 \text{ mm}$ ， $H_6 = 205.3 \text{ mm}$ ；次大值为 1970 年韩家营站，其 $H_{12} = 185.2 \text{ mm}$ ， $H_6 = 178 \text{ mm}$ ，都缺测短历时 1.5 小时雨量，要插补雨量是困难的。如利用实测 1.5 小时系列中最大三值的比值 $K_1 = H_1/H_6$ 为 0.6~0.9，若用最小 K_1 值 0.6 估计，则插补文 1 小时雨量为 127 mm 和 106 mm，仍然是 1 小时系列中的最大值，

因此在处理1、3小时雨量频率曲线时，将系列中最大，次大两项经验频率定位，其它年份依次排列，并且将长短期雨量系列点绘一张图上，从纵横两方面平衡合理连接，得到动态各时段雨量频率曲线。（见图4）从频率线上可看出短历时雨量 C_n 稍比长历时雨量 C_m 为大。各种频率的雨量历时关系线的转折点均为6小时。递减指数 n （1—24小时）有随频率稀遇而加大，这说明随频率稀遇24小时雨量更为集中于6小时之内。而 n （1—6小时）不随频率而变化，可用常数表示。（见图5）

4. 西北地区实测和调查值雨量历时关系：

将黄河流域以北的西北地区作为一个大气候区，以实测和调查的雨量资料中统计各种转折时段的最大雨量值，点绘雨量—历时关系作出外包线，经与全国雨量历时外包关系线比较，可以看出短时最大雨量大都发生在西北地区，尤其调查雨量，其量级更见全国首位，有的甚至超过世界记录。（见图6）

这种外包的雨量历时关系线，可作为西北地区在RMP情况下确定时段雨量的参攷。

5. 时段雨量相关法确定雨量历时关系：

时段雨量相关是雨量历时关系的又一种表达形式。从暴雨公式可以得知，时段雨量比值与时段雨量递减指数具有下述数学转换关系：

$$\therefore H = St^{1-n}$$

$$\therefore n = 1 - 1.29 \lg H_0 / H_1 \quad \text{或}$$

$$n = 1 - 1.67 \lg H_{24} / H_6$$

时段雨量相关法，概念直观，方法简便，还可以考虑递减指数 n 随雨量量级的变化。理论上可以证明，年最大值同频率时段雨量相关线相当于上述同次雨时段雨量相关的平均情况，因此，可用同频率时段雨量相关线作为外区同次雨时段雨量相关外包线的参攷〔〕。鉴于本次研究地区雨量量级较小，次数不

多，就用一般的同次雨的雨量历时关系线确定平均的递减指数就可以了。

从点绘筑巴河历年同次时段雨量相关图中看出，较长历时 H_4 与 H_6 相关比短历时 H_6 与 H_1 相关的点据关系为好。（见图 7-2）并将定点和动点同频率时段雨量相关线点绘，相当于同次时段相关的平均线，起到了外延作用。

三、各种方法的比较

1. 方法的评述：同次雨选择满足洪水计算对于暴雨的要求，保持了各时段雨量和一次总雨量之间的内在关系，其规律性能够代表暴雨特性；但是由于各次暴雨变化复杂，即使用一次暴雨各站之间变化也大，致使递减指数 n 变幅很大，只能求得平均指数或分别长短历时两种类型平均指数作为地区综合成果。据此外延推求设计暴雨比较困难。

4. 最大法选择符合设计暴雨要求，其中长短历时雨量为各自独立选出的最大雨量值，不反映同次雨长短短时雨量的内在关系。如果研究地区选择的测站有代表性，资料系列精度又高，则分析求得的结果有实用意义。同时还可以分析动点频率，据此来扩大雨量量级，能够起到外延作用。

2. 成果分析：

(1) 雨量历时关系的转折点问题：无论是采用那种选择统计方法，其雨量历时关系都比较明显地在 1 小时和 6 小时两个位置上转折。这与西北地区的暴雨特性相吻合。因为该地区降雨历时一般为 6 小时左右，即使是长历时暴雨，其雨量的 60% 也大都集中在 6 小时内，所以转折点确定在 6 小时是适宜的。至于另一个 1 小时转折点，由于资料较少，目前尚难准确地确定。

(2) 递减指数 n 随频率变化的问题：指数 n 反映了降雨强度随历时增长而递减的程度；也就是雨量随着历时增长而加大的程度。指数 n 与频率是否有关系，取以长短短时雨量频率统计

参按 C_v 的变化规律。从永定河定点频率曲线看长短历时雨量的 C_v 几无变化，但动点长短历时雨量的 C_v 则有随历时减小而略有增大的趋势，所以定点选择可以认为指数 n 不随频率而变化，动点选择在短历时部分（1~6小时）指数 n 受频率影响很小，可长历时部分（6~24小时）指数 n 有随变现期的增大而增大的趋势。这可能是因为动点系列中特大值的雨量集中在6小时以内的缘故。

13) 年最大值法与同次雨次历时法的比较：年最大值法与同次雨法由于选择原则不同，代表的概念不同，其成果当然不同。同次雨法中又可分出不同主历时的选择，例如主历时选1、6、24小时三种类型。现仍用定点四个单站系列中最大三项的平均雨量，可以点绘雨量历时关系线；以主历时为某一历时为主的相对雨量相对历时关系线；以及各时段雨量占24小时雨量的百分比与历时等三种关系图。（见图8）

从雨量历时关系图上可看出成果为：第一，年最大选择法是各种主历时选择法的外包值；第二，当主历时相差愈大则同一历时的雨量差值也愈大；第三，当主历时愈短，其雨量更集中，则指数 n 较大，反之，主历时愈长，降雨较均匀，其指数 n 愈小。

为了便于使用不同主历时雨量推求其它历时雨量，可采用相对雨量和相对历时关系。从图上可看出，各种方法的纵横坐标都通过原点，同样年最大值法是各种主历时法的外包值；原点的右侧是主历时为短历时时推求相应的长历时雨量，不论主历时大小其相对雨量随相对历时的增长速度相仿；原点左侧是主历时为长历时推求相应的短历时雨量，其关系为主历时小比主历时大的相对雨量随相对历时递减的速度快，这现象与商之分析结果一致。

同时还可以用各时段雨量占24小时雨量的百分比来表示

由图可知，其历时愈短，各历时的雨量百分比愈集中；主历时愈长，则各历时的雨量百分比均匀；而以年最大值法为平均情况。

因此用以说明各种选择方法的结果差别较大，在应用时，应请注意往返一致的原则。各种选择成果列表比较，（见表5）

（4）各种选择法的成果比较：

方 法	$\bar{H}_1$ (< 1 小时)	$\bar{H}_2$ ($1 \sim 6$ 小时)	$\bar{H}_3$ ($6 \sim 24$ 小时)	$H_n / \bar{H}_n$ 年最大	$H_n / \bar{H}_n$ 年最大
同次雨综合平均	0.4	0.5	0.8	20	77
动点同频率	$\begin{cases} P=1\% \\ P=10\% \end{cases}$	0.66	0.94	52	80
		0.66	0.88	47	85
定点同频率	$\begin{cases} P=1\% \\ P=10\% \end{cases}$	0.70	0.70	41	70
		0.70	0.70	41	70
无定河流域外包		0.54	0.95		
无定河流域以外的外包		0.74	0.65		
武巴沟流域外包		0.75	0.95		

由上表可知，用绝对值雨量外包得出的成果，因地区范围不同，指数几值相差很大，这是由于资料样本往往取决于个别典型大暴雨，所以认为成果的偶然性较大。同频率法，包括定点、动点不同选择，其 $\bar{H}_1$ 值（ $1 \sim 6$ 小时）二者相差甚小，但长历时指数 $\bar{H}_3$ （ $6 \sim 24$ 小时），动点与定点不同选择的结果相差较大。这与资料系列的代表性有关，（主要受系列中特大值影响）有待进一步分析论证。

将各种方法求得的结果，以雨量历时关系点绘在同一张图上（见图2），可以看出，无定河流域实测外包值线位于动点 $P=1\%$ 和 10% = 频率线之间；又反映出动点频率 $P=10\%$ 雨量比定点频率 $P=1\%$ 雨量大，而武巴沟实测雨量外包值线则在上述二者之间。

又从雨量量级来比较，无定河流域已发生大雨的量级不大，日雨量约200mm，但在较大地区范围内已数次出现日雨量>

400mm的记录。例如：

年 份	中心位置	雨 量			注
		站 址	站 址	站 址	
1971.7.25	杨寨坪				测
1977.7.5	延 安		408	408	调查值
1977.8.1	乌审旗	73000	1400	1400	调查值
1977.8.5	平 遥		25256.582	358.6	实测

四、建议采用的方法和初步成果：

1. 通过曹坪、绥德、米脂、赵石窑等站点的历年各时段最大雨量发生于同次的机圈统计结果来看，（见表4）本地区各时段最大雨量发生于同一次降雨机圈很少。其中相对长历时（6、12、24小时）最大雨量发生于同次的机会约占总年数的40%左右，并且长历时雨量系列中的最大三项大都发生于同次降雨，而短历时（1、3、6小时）最大雨量发生于同次的机圈就较少。这说明在一般降雨情况下，短历时最大雨量大都单独发生。但是，当发生特大暴雨时，往往由降雨强度大且持续时间又较长的暴雨组成，因此长短历时最大雨量发生于同次的可能性就较大。不过同次暴雨中各时段雨量在系列中的经验频率是不会相同的。

根据上述各种方法的比较分析，建议采用年最大同频率统计方法较为合适。理由如下：第一该方法简便，有频率概念，对工程设计较为安全。因为至今未能解决次暴雨中不同时段最大雨量的组合频率问题。而另一方面则可以从数学上证明年最大同频率法的结果相当于同次雨选样的平均情况，因此在设计条件下，采用年最大同频率法，既满足数学期望又比较符合统计概念。

第二同次雨选样的绝对值外包，往往受某次典型暴雨控制，尤其在北方干旱地区不宜采用。而采用长历时雨选样，从道理上说比较合理，但限于资料，不容易合理地给出各种长历时的相应时深关系。且从实用观点上来看，采用年最大值法选样

也是比较合适的。例如，某一水工建筑物，以水量作控制（或库容控制）则设计流量不是主要的，也就是说，即使加大短历时雨量，也不会影响水量的设计标准，反之，如以最大流量作控制，则其泄流设备必然受短历时雨量控制，只要最大雨强相应的流量可以通过，那么降雨历时越长雨量再大也都解下泄。又如水工建筑物既要水量又要流量作控制，那设计暴雨更应采用年最大值用频率法，才能满足设计洪水所需长短期雨量同时为最大引成的水量和流量的要求。也并不会提高控制时段雨量和建筑物的设计标准。

2. 通过上述比较分析，提出初步成果，可以采取定点和动点年最大用频率法求得综合平均的递减指数作为设计暴雨指标的参数。成果如下：

频率 (重现期)	η_2 (1~6小时)	η_3 (6~24小时)	H_1/H_{24} %	H_6/H_{24} %
$P=1\%$ 百年一遇	0.68	0.90	48	87
$P=10\%$ 十年一遇	0.68	0.80	43	77

五、存在问题：

1. 这次对于1小时以下的短历时指数 η_2 值，因有记雨量资料少未列短，未很好进行分析。

2. 西北干旱地区，存在着暴雨时空分布不均和测站稀少的矛盾，分析工作不能局限于单站资料，而应尽可能借助于较大范围地区的资料，采用多种方法合理分析。但这必带来了频率指标中点与面频率转换的困难。

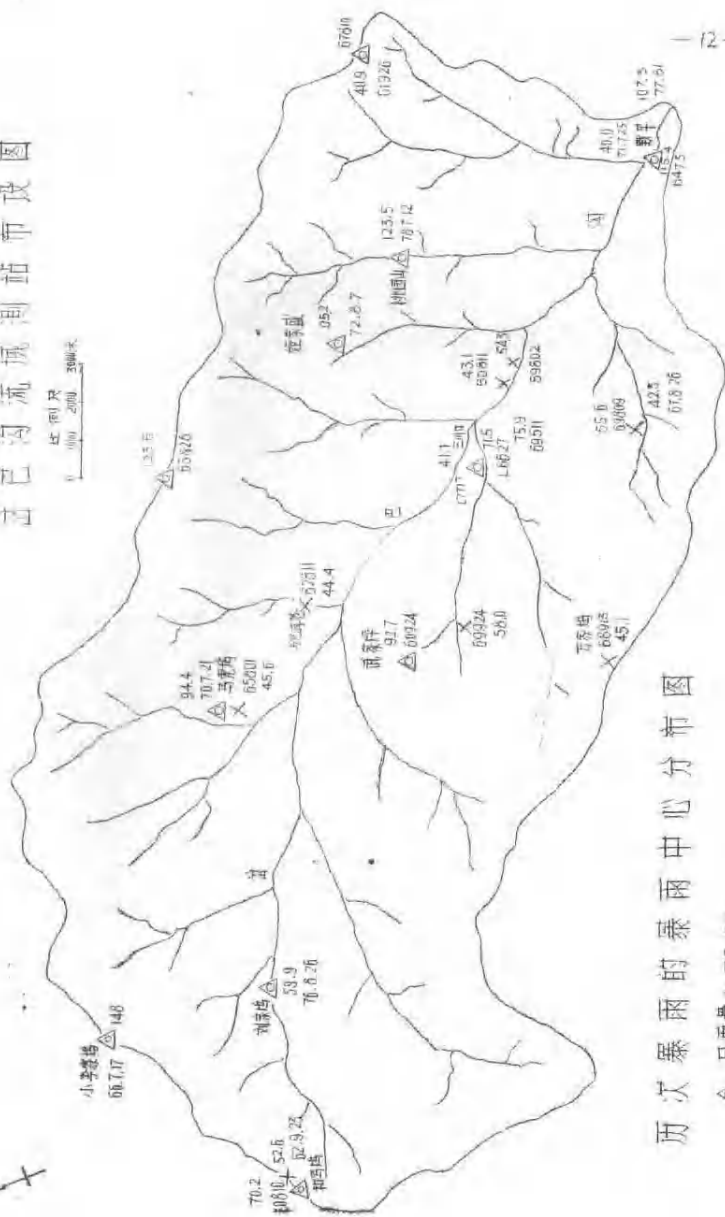
3. 由于该地区自记雨量资料缺乏，影响了推求短历时雨量的精度。即使是目前已搜集到的动点短历时最大雨量，也很可能漏测暴雨中心而不是真正的最大雨量值。另一方面，自雨量资料的测站相对密集记录年限较长精度较为可靠，所以采用长短期雨量关系采用日雨量借助于递减指数 η 推求短历时雨量是比

较合理的。指数 n 是暴雨公式中的关键参数，它随着资料的积累和分析工作的深度而不断提高精度。

4. 西北暴雨年际变化大，（即 r 大），但已出现的暴雨量级不大。有待与南方地区暴雨比较，研究南北方暴雨的共性，以进一步揭示西北地区暴雨的统计参数变化规律。

吐巴沟流域测站布设图

比例尺
0 1000 2000 3000米



历次暴雨的暴雨中心分布图

△ 日雨量 > 70 mm
× 日雨量 40 ~ 70 mm

同次雨指数成果 (日雨量 > 50)

日期	H ₂₄ mm	I ₂₁ (0-20)	I ₂₂ (20-40)	I ₂₃ (40-60)	一次雨 有时	集中雨 的有时 (2.5-10.0)	站数		
1960.9.24	70	0.20	0.87	0.71	10	6	3		
1961.9.26	100	0.38	0.43	0.24	24	12	4		
1963.8.26	65	0.31	0.80	0.97	6	3	5		
1964.7.5	85	0.43	0.30	0.75	12	6	5		
1966.6.27	60	0.35	0.70	1.0	6	3	4		
1966.7.17	100	0.51	0.69	0.94	6	3	3		
1969.5.11	70	0.49	1.0	0.87	3	1	3		
1970.7.31	65		0.49	0.79	12	3	5		
1972.8.17	80		0.23	0.69	24	6	4		
1976.8.25	50		0.18	0.45	24	6	3		
1977.8.4	70		0.49	0.65	24	6	4		
1978.7.12	100		0.31	0.92	11	3	5		
大平均(12次)		0.38	0.52	0.75	I ₂₂ 11.8-53 10.2-49	I ₂₃ 0.80 0.79	未考虑 59.5.11	1961.9.26 59.5.11	
长历时雨平均(4次)			0.55	0.51	3.5-1.2 3.2-5.2	0.60 0.87	未考虑	1961.9.26 1967.5.11	
短历时雨平均(2次)			0.22	0.87					
採用	H ₂₄ H ₂₄	0.4	0.5	0.8	长历时 短历时	H ₂₄ H ₂₄	1小时 1.8 4.0	6小时 60 83	

<表一>

矩法频率计算成果 (年最大值选样)

站名	参数	时			段			量		
		0.5	1	3	6	12	24	三天		
曹坪	年极值	16	19	20	20	20	20	20		
	均值 $\bar{H}$	22.6	28.1	37.0	45.8	54.0	64.1	76.9		
	变差系数 C_v	0.55	0.47	0.40	0.40	0.38	0.45	0.35		
赵石窑	n		28	29	30	30	30	30		
	$\bar{H}$		20.7	29.2	36.4	44.9	51.6	63.6		
	C_v		0.47	0.38	0.37	0.36	0.36	0.36		
米脂	n		14	19	30	50	30	30		
	$\bar{H}$		16.5	25.6	33.7	45.0	56.7	75.4		
	C_v		0.54	0.46	0.40	0.38	0.37	0.35		
绥德	n		19	22	23	23	23	23		
	$\bar{H}$		31.2	32.1	39.3	41.0	56.1	70.7		
	C_v		0.43	0.37	0.36	0.37	0.40	0.37		
无定河 动点	n		24	19	23	25	28	25		
	$\bar{H}$		47.6	66.1	71.3	104.7	115.1	136.2		
	C_v		0.39	0.36	0.44	0.32	0.32	0.26		

各种选样计标法雨量历时关系

项 目	主 功 时 雨 量			1 小 时			6 小 时			24 小 时		
	H_1	H_6	H_{24}	H_1	H_6	H_{24}	H_1	H_6	H_{24}	H_1	H_6	H_{24}
相对雨时比	1	6	24	0.17	1	4	0.04	0.25	1			
年最大雨量 H_0	42.5				67.7							103.4
主功时法最大雨量 H	42.5	54.5	67.7	29.7	67.7	85.4	22.8	54.0	103.4			
年最大相对雨量 H_0/H_0	1	1.24	2.43	0.61	1	1.48	0.41	0.67	1			
主功时法相对雨量 H_0/H	1	1.28	1.53	0.43	1	1.23	0.22	0.62	1			
年最大雨量比值 H_0/H_{24}		0.41			0.67							1
主功时法雨量比值 H/H_{24}	0.65	0.84	1	0.35	0.82	1	0.22	0.62	1			
同种历时比较 b	1			0.70			0.54					
H/H_0 24		0.78			1			0.92				
			0.23			0.83						1

此表系根据曹坪、绥德、米脂、赵县等四站年最大三项平均计标求得。(相当十年一遇)

<表 3>