

黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系

王万忠 焦菊英 郝小品

中国科学院
水利部水土保持研究所 陕西杨陵 712100

摘要 根据黄土高原13个中小流域的448场暴雨的统计分析,对这一地区不同类型暴雨空间分布的不均匀性进行了系统研究,内容包括流域面雨量离差系数、降雨不均匀系数、最大点与最小点的比值系数、点面关系以及降雨量的空间相关特性等。

关键词 黄土高原 降雨 分布 点面关系

分类号 P 426. 613

众所周知,黄土高原降雨空间分布的不均匀性是十分显著的,特别是在中北部丘陵沟壑地区,局地性暴雨的笼罩面积只有几十平方公里,而且面衰减很快。即使在 1 km^2 范围内,雨量的面分布也不均匀。由于黄土高原降雨空间分布的复杂性,用一二个流域或几场典型暴雨资料来说明这一地区降雨空间分布的规律性显然是不够的,只有通过较多的样点和样本分析,才能得到带有普遍性和规律性的认识。为此,在黄土高原选择了13个中小流域($50\sim 300\text{ km}^2$)的448场暴雨,从降雨空间分布的不均匀系数、面雨量离差系数、点面关系、降雨量的空间相关特性等方面进行了综合分析。

1 降雨空间分布的不均匀性

考虑到暴雨雨型对降雨空间分布不均匀性的显著影响,及本区不同类型暴雨的降雨特点,将这一地区的暴雨分作三种类型,并选择用最大 60 min 雨量(P_{60})占次降雨总雨量(P)的比例(%)作为划分这三种暴雨的数量指标,分别进行分析。三种暴雨类型为:A型暴雨是指局地雷暴雨($\frac{P_{60}}{P} > 80\%$);B型暴雨是指锋面性降雨夹有雷暴性质的降雨($20\% < \frac{P_{60}}{P} < 80\%$);C型暴雨是指锋面性降水的暴雨($\frac{P_{60}}{P} < 20\%$)。

关于降雨空间分布的不均匀性,用流域面雨量离差系数 C_v 、流域降雨不均匀系数 η 和流域最大点与最小点降雨量比值系数(称为流域空间极端降雨比值系数) α 表示:

$$C_v = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{H}{H_o} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{H_o}{H_m} \quad (3)$$

式中 K_i (变率) 为 H_i 与 H 的比值; H_i 为流域内某一站的降雨量(mm); H 为流域平均雨量(mm); H_o 为流域最大点降雨量(mm); H_m 为流域最小点降雨量(mm); n 为雨量站数。

表 1 黄土高原次降雨量空间分布不均匀性特征值

Table 1. Nonuniform characteristics of spatial distribution of individual rainfall on the Loess Plateau

流域	面积 /km ²	雨量 站数	单站 控制 面积 /km ²	综 合				A 型				B 型				C 型			
				n	C_V	η	α												
脱家沟	34.4	3	11.5	19	0.27	0.83	2.46	4	0.37	0.75	2.88	12	0.26	0.84	2.49	3	0.19	0.89	1.80
张家土塬沟	52.6	4	13.1	23	0.25	0.80	2.67	5	0.54	0.70	4.13	12	0.21	0.78	2.80	6	0.09	0.93	1.22
店则沟	56.4	6	9.4	19	0.34	0.72	4.59	13	0.46	0.63	6.11	5	0.09	0.91	1.34	1	0.03	0.96	1.08
招贤沟	57.2	6	9.5	18	0.33	0.70	13.79	7	0.40	0.64	9.32	10	0.30	0.72	18.15	1	0.16	0.87	1.41
田沟门	58.0	3	19.3	20	0.19	0.86	1.63	4	0.24	0.82	1.65	9	0.17	0.86	1.50	7	0.19	0.88	1.78
韭园沟	70.1	12	5.8	130	0.38	0.64	12.57	48	0.61	0.50	24.17	24	0.33	0.64	13.83	58	0.20	0.75	2.46
店房台沟	87.0	3	29.0	27	0.48	0.75	6.94	13	0.66	0.66	12.44	13	0.33	0.82	1.89	1	0.07	0.98	1.16
贾家沟	93.4	4	23.3	34	0.33	0.74	4.04	13	0.46	0.70	7.24	17	0.25	0.76	2.15	4	0.19	0.85	1.67
洞川沟	140.0	4	35.0	26	0.44	0.70	20.07	11	0.67	0.62	44.44	13	0.29	0.75	2.31	2	0.15	0.79	1.51
岔巴沟	187.0	24	7.8	61	0.66	0.48	80.33	32	0.97	0.35	134.69	19	0.40	0.55	30.02	10	0.15	0.77	1.94
文安驿川	303.0	13	23.3	18	0.43	0.60	25.00	6	0.62	0.47	10.46	11	0.36	0.65	35.05	1	0.16	0.78	1.68
砚瓦川	330.0	11	30.0	31	0.48	0.59	58.47	7	1.03	0.31	100.82	17	0.36	0.65	62.27	7	0.23	0.73	6.88
南小河口	336.0	8	42.0	22	0.50	0.62	34.14	6	1.11	0.36	117.62	12	0.32	0.68	3.23	4	0.15	0.82	1.66
平均				448	0.39	0.69	20.52	169	0.63	0.58	36.61	174	0.28	0.74	13.62	105	0.15	0.85	2.02

* 表中 n 为统计的雨次数。

表 1 是根据 13 条流域的 448 场降雨统计得出的有关不同类型暴雨次降雨雨量空间分布不均匀性的特征值, 可以看出:

(1) 13 条流域次雨量面离差系数 C_V 值平均为 0.39, 最大为 0.66。其中 A 型降雨 C_V 值平均为 0.63, 最大为 1.11; B 型降雨平均为 0.28, 最大为 0.40; C 型降雨平均为 0.15, 最大为 0.23。

(2) 13 条流域降雨不均匀系数 η 值平均为 0.69, 最小为 0.48。三种雨型的 η 值分别为: A 型降雨平均为 0.58, 最小为 0.31; B 型降雨平均为 0.74, 最小为 0.55; C 型降雨平均为 0.85, 最小为 0.73。

(3) 13 条流域降雨最大点与最小点的比值系数 α 平均为 20.52, 最大为 80.33, 其中 A 型降雨 α 值平均为 36.61, 最大为 134.69; B 型降雨平均为 13.62, 最大为 62.27; C 型降雨平均为 2.02, 最大为 6.88。

(4) 上述结果表明, A 型暴雨面雨量空间分布的不均匀程度要比 B、C 型两种类型暴雨大得多。另外, 流域面积、布站数目和降雨类型三种因素是影响 C_V 、 η 、 α 三种参数值的主要因素, 其中影响最大的是 α , 次之是 η 和 C_V 。关于流域面积和布站数目的影响, 本文未作进一步讨论。

表 1 的结果仅就平均统计而言, 因此, 其结论也只能就普遍或总体情况而谈, 实际上在黄土高原确实存在着一些降雨 (主要是 A 型降雨), 其空间分布的不均匀程度远比平均情况大得多。例如: 脱家沟 (34.4 km²), 1980 年 8 月 18 日一次历时 289 min 降雨, 面平均雨量 37.7 mm,

最大点梧桐站降雨量为 54.2 mm, 而距之最大点 3.5 km 的吕家新庄降雨量只有 5.1 mm; 岔巴沟 (187 km²), 1963 年 8 月 26 日一次历时 360 min 的降雨, 面雨量 31.4 mm, 最大点 (鸳鸯山) 降雨量 123.6 mm, 距离最大点 2 km 的杜家山降雨量为 24.7 mm; 文安驿川 (303.0 km²), 1988 年 8 月 11 日一次 382 min 的降雨面雨量为 30.9 mm, 最大点 (前袁家沟) 降雨量 106.4 mm, 距离最大点 4.2 km 的小禹居站降雨量只有 8.3 mm。

2 不同类型降雨的点面关系

流域雨量的点面折减系数 η 用下式计算:

$$\eta = \frac{H}{H_0} \quad (4)$$

式中 H_0 为点最大降雨量 (mm), \bar{H} 为面平均降雨量 (mm)

已有研究表明: η 值由降雨中心随等雨量面积增大而递减, 对 η 值起主要作用的是降雨本身的分布, 流域形状影响很小; 另外 $\eta \sim F$ (面积) 的关系呈抛物线函数递减, 降雨历时愈短, 递减愈快; 反之, 递减愈慢。

单场暴雨的 $(1-\eta) / (\eta \sim F)$ 曲线为一族较为规则的幂函数曲线, 其函数式为:

$$(1-\eta) / \eta = aF^b \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1}{1+aF^b} \quad (6)$$

式中 F 为等雨量面积 (km²), b 、 a 为系数。

对岔巴沟流域 24 场降雨点面折减系数 η 值与面积 F 的关系进行了回归分析, 从所得的结果可以看出:

(1) $\eta \sim F$ 的关系可用指数函数 $y = de^{bx}$ 表示, 而且同一类型降雨, 系数 d 、 b 很相接近, 对于 A 型 (局地性暴雨) 降雨, 系数 d 一般在 0.70 ~ 0.85 之间, 指数 b 为 -0.002 ~ -0.005; 对于 B 型和 C 型降雨 (区域性暴雨或长历时锋面雨) 系数 d 一般在 0.80 ~ 0.90 之间, 指数 b 为 -0.0003 ~ -0.0008。

(2) 用 $(1-\eta) / \eta \sim F$ 的关系曲线 (幂函数) 表示 $\eta \sim F$ 的关系比用指数函数 $y = de^{bx}$ 模型的相关性要好一些, 在 $\eta = 1 / (1+aF^b)$ 回归方程中, 系数 a 值无明显的规律和区界, 指数 b 一般在 0.3 ~ 0.7 之间。

通过 η 与 F 及 $(1-\eta) / \eta$ 与 F 的关系曲线 (图略), 得到黄土高原 η 与 F 的拟合方程:

① 用指数方程表示的 η 与 F 关系:

$$\text{局地性暴雨: } \eta = 0.745e^{-0.0026F}; \quad \text{区域性暴雨: } \eta = 0.922e^{-0.0007F}$$

② 用幂函数方程表示的 $(1-\eta) / \eta$ 与 F 的关系:

$$\text{局地性暴雨: } (1-\eta) / \eta = 0.072F^{0.623}; \quad \text{区域性暴雨: } (1-\eta) / \eta = 0.031F^{0.462}$$

按照 $(1-\eta) / \eta \sim F$ 的通用形式, 得到黄土高原次降雨点面折减系数 η 与 F 的关系式:

$$\text{局地性暴雨: } \eta = \frac{1}{1+0.072F^{0.623}}; \quad \text{区域性暴雨: } \eta = \frac{1}{1+0.031F^{0.462}}$$

3 降雨量的空间相关性

把降雨过程可看作空间坐标和时间坐标的多维随机过程，相关函数可分离为空间相关函数和时间相关函数。将一般空间相关函数看作随距离增加的衰减函数，常用指数函数和一阶二类贝塞尔函数表示：

$$\text{指数函数型 } r(L) = e^{-nL}; \text{贝塞尔函数型 } r(L) = bLK_1(bL)$$

式中 L 为区域内任意两点间的距离， n 和 b 分别为指数函数型和贝塞尔函数型相关函数的参数， K_1 为一阶第二类修正的贝塞尔函数。

在黄土高原选择了三个面积在 300 km^2 左右的流域，进行降雨量的空间相关性分析。其中文安驿川流域在清涧河，面积 303 km^2 ，用于相关分析的雨量站 13 个，雨次样本 18 个；南小沟流域位于泾河，面积 336.0 km^2 ，用于相关分析的雨量站 8 个，雨次样本 22 个；砚瓦川流域也在泾河，面积 330 km^2 ，用于相关分析的雨量站 11 个，雨次样本 31 个。

三个流域两站间降雨相关系数 r 与距离 L 的关系见表 2。表中 1 以上的右上方为相关系数，左下方为距离 (km)，根据表中的数据，点绘了相关系数 r 与距离 L 关系图 (略)。

表 2 黄土高原三个典型流域次降雨空间相关系数 r 与距离 L 的关系

Table 2. Relationship between individual rainfall spatial correlation coefficient (r) and distance (L) of three typical watersheds on the Loess Plateau

文安驿川流域 (303 km ²)													
站名	高家坪	党家沟	小禹居	老庄河	蒿岔峪	郝家河	依洛河	文安驿	张家屯	后马沟	南家沟	东圪塔	马家店
高家坪	1	0.878	0.801	0.825	0.923	0.796	0.690	0.547	0.918	0.771	0.890	0.912	0.804
党家沟	5.6	1	0.888	0.854	0.906	0.846	0.745	0.650	0.981	0.786	0.938	0.958	0.771
小禹居	14.6	9.2	1	0.960	0.930	0.919	0.886	0.730	0.925	0.764	0.942	0.921	0.781
老庄河	14	10.8	9.2	1	0.960	0.910	0.909	0.727	0.914	0.766	0.957	0.911	0.791
蒿岔峪	11.2	8.2	8.8	3.0	1	0.912	0.858	0.711	0.948	0.822	0.971	0.968	0.853
郝家河	13.2	8.4	4.0	5.4	5.0	1	0.896	0.783	0.882	0.706	0.911	0.891	0.781
依洛河	18.4	13.8	7.0	6.6	8.4	5.6	1	0.853	0.809	0.754	0.883	0.842	0.856
文安驿	18.4	13	4.2	12.6	12.6	7.6	8.0	1	0.650	0.748	0.743	0.767	0.793
张家屯	7.0	2.2	7.8	9.0	6.2	6.4	11.8	11.8	1	0.796	0.974	0.966	0.815
后马沟	21.2	15.6	6.6	13.0	14.0	9.0	7.4	3.4	14.2	1	0.829	0.865	0.869
南家沟	8.4	4.4	7.4	6.6	4.0	5.0	10.2	11.4	2.4	13.4	1	0.973	0.872
东圪塔	11.6	6.0	3.6	10.0	8.6	5.0	9.8	7.0	5.0	9.8	5.6	1	0.873
马家店	25.2	19.6	11.0	18.4	19.0	14.2	12.6	6.8	18.4	5.4	18.2	13.6	1
砚瓦川流域 (330 km ²)													
站名	砚瓦川	吴家川	朱寨	吴家庄	武家城	胡同赵	毛家	十里湾	齐家楼	永丰	文浅沟		
砚瓦川	1	0.965	0.893	0.846	0.720	0.832	0.879	0.806	0.651	0.937	0.906		
吴家川	4.7	1	0.887	0.902	0.716	0.842	0.836	0.787	0.624	0.957	0.902		
朱寨	11.6	8.9	1	0.863	0.704	0.866	0.901	0.764	0.747	0.87	0.842		
吴家庄	11.1	6.5	6.6	1	0.766	0.894	0.795	0.768	0.674	0.914	0.876		
武家城	15.8	11.2	8.7	4.7	1	0.820	0.724	0.746	0.716	0.783	0.781		
胡同赵	16.6	12.0	13.8	7.4	6.3	1	0.885	0.883	0.727	0.874	0.898		
毛家	19.4	15.1	18.4	11.8	11.0	4.8	1	0.851	0.820	0.845	0.853		
十里湾	23.8	19.4	21.5	15.3	13.2	7.9	4.6	1	0.590	0.815	0.898		
齐家楼	15.4	12.1	18.4	12.0	13.7	8.2	6.6	10.8	1	0.657	0.662		
永丰	6.9	5.0	13.7	9.6	13.7	11.9	13.5	18.0	8.6	1	0.893		
文浅沟	11.3	7.8	14.5	8.5	11.3	7.7	8.6	13.1	4.3	4.9	1		
南小沟流域 (336 km ²)													
站名	中山镇	兴丰镇	杨家老湾	全家寨	运门镇	云山镇	王伊川	贾川					
中山镇	1	0.718	0.833	0.892	0.880	0.871	0.793	0.815					
兴丰镇	8.7	1	0.653	0.798	0.730	0.700	0.645	0.705					
杨家老湾	10.8	9.3	1	0.757	0.831	0.796	0.815	0.900					
全家寨	10.2	9.6	17.7	1	0.922	0.918	0.787	0.803					
运门镇	14.4	8.6	17.7	7.2	1	0.891	0.892	0.895					
云山镇	20.9	12.3	18.3	17.3	10.5	1	0.835	0.837					
王伊川	18.3	10.2	12.6	18.6	13.7	7.1	1	0.888					
贾川	16.7	10.2	8.7	19.7	16.4	12.0	5.0	1					

根据散点的分布情况, 分别绘出了散点的下包线和平均线, 并给出了空间相关系数 r 与距离 L 的曲线方程:

$$\text{南小河口: 平均线 } r = 1.001 - 0.017L + 0.0004L^2 \quad (7)$$

$$\text{下包线 } r = 0.994 - 0.040L + 0.0012L^2 \quad (8)$$

$$\text{砚瓦川: 平均线 } r = 1.001 - 0.18L + 0.0004L^2 \quad (9)$$

$$\text{下包线 } r = 0.980 - 0.037L + 0.0009L^2 \quad (10)$$

$$\text{文安驿川: 平均线 } r = 1.003 - 0.015L + 0.0002L^2 \quad (11)$$

$$\text{下包线 } r = 0.987 - 0.035L + 0.0007L^2 \quad (12)$$

以下包线为最大衰减幅度, 由式 (8)、(10) 和 (12) 计算得出在 0.7 的相关水平下 (按照常规水文计算中统计相关分析要求) 三个流域的相关域 (两站间距离) 分别为: 南小河口 11.0 km, 文安驿川 10.2 km, 砚瓦川 10.4 km, 三个流域很接近, 因此, 可以认为在 0.7 的相关水平下, 黄土高原次降雨的相关域为 10 km。

参 考 文 献

- 1 李长兴等. 黄土地区小流域降雨空间变化特征分析. 水科学进展. 1995, 6 (2): 127 ~ 132
- 2 钱学伟. 降雨量的相关特性与雨量站网规划. 黑龙江水专学报. 1987 (2)
- 3 小流域暴雨径流研究组. 小流域暴雨洪峰流量计算. 北京: 科学出版社, 1978
- 4 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙. 北京: 科学出版社, 1996

Nonuniformity of Spatial Distribution of Rainfall and Relationship Between Point Rainfall and Areal Rainfall of Different Patterns of Rainstorm on the Loess Plateau

Wang Wanzhong, Jiao Juying, and Hao Xiaoping

(*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources Yangling, Shaanxi Province 712100*)

Abstract: Based on the statistical analysis of 448 times rainstorm in 13 medium and small watersheds on the Loess plateau, the nonuniformity of spatial distributions of different patterns of rainstorm in this area were systematically studied, including deviation coefficient of areal rainfall of watershed, non-uniform coefficient of rainfall, ratio of maximum point and minimum point rainfall, relationship between point rainfall and areal rainfall, and spatial correlation characteristics of rainfall amount, ect.

Key words: Loess Plateau; rainfall; distribution; relationship between point rainfall and areal rainfall.