

地形因素对降水分布影响的研究

陈 贺¹, 李原园², 杨志峰¹, 沈珍瑶¹

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011)

摘 要:在有限降水资料的基础上, 研究影响降水的因素, 建立降水量与各因素之间的关系, 为流域内的水资源和水环境研究提供了良好的基础。以数字高程模型(DEM, Digital Elevation Model)为出发点, 计算出高程、坡度、坡向, 直接或间接用 DEM 和有限的降水资料来推求无资料地区的降水状况。将该方法和系统应用于石羊河流域, 用该区域内的 20 个雨量站的降水资料建立模型, 另外 6 个站点的降水资料做校核, 并用模型模拟该区域内均匀分布的 230 个点的降水量, 结果表明所建立的模型取得了理想的模拟效果。

关键词: GIS; 降水; 地形; 高程; 坡度; 坡向; 石羊河

中图分类号: P461.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)01-0119-04

Research on the Relationship Between Terrain Factors and Precipitation

CHEN He¹, LI Yuan-yuan², YANG Zhi-feng¹, SHEN Zhen-yao¹

(1. State Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: Using multiple regression and Geographic Information System techniques, the authors modeled the spatial distribution of daily precipitation for a rain process in a mountainous region, located in the Northwest China. The precipitation data measured at 26 stations were used, using 20 stations for function development and reserving 6 for validation tests. The best model developed used five topographic descriptors as independent variables: longitude, latitude, elevation, slope, aspect. The model accounted for most of the spatial variability in daily precipitation and enabled us to estimate precipitation in areas where there are no nearby stations and where topography has a major influence on precipitation.

Key words: GIS; precipitation; terrain; altitude; slope; aspect; Shiyang River

1 引 言

降水是陆上水资源的直接来源和水循环的首要环节, 降水量数据是研究流域内水资源和水环境的首要基础资料之一, 因而研究降水的空间分布具有重要的意义。但是由于气象站点的限制, 在某些地区往往存在无降水资料或少降水资料的情况, 严重影响了科研和实际工作的进行。精确的降水数据只存在于雨量站点, 其余点的降水数据只能从相近站点或者其它气象参数求得。如果能在有限降水资料的基础上, 研究影响降水的因素, 建立降水量与各因素之间的关系, 可以为流域内的水资源和水环境研究提供良好的基础。

地形对局地气候的影响, 在程度上常常可以与大气环流、太阳辐射的作用相比拟。山脉常常成为气候带(冷、暖)和气候区(干、湿)的分界线。地形不仅是形成大气候的重要的下垫面因子, 而且也是局地气候形成的一个主要因子(Stephan, 2003)。世界上年降水量超过 10 000 mm 的极值记录都是由于地形的影响。世界各大洲以至各国的最大雨量纪录也大都是由地形所决定的。最典型的例子是夏威夷群岛, 在面向东北信风的考爱东北坡上, 地形抬升使那里的年降水量高达 11 684 mm, 可是在周围广大洋面上年降水量只有 500 mm 左右, 夏威夷岛的背风海岸年降水量仅有 200

mm 左右(林之光, 1995)。在我国西北的石羊河流域, 降水在很大程度上受地形的影响, 在该流域的南部山区由于山脉阻挡了气流而在该区域形成了大于 600 mm 的年降水量, 而在石羊河北部的平坦区域年降水量则在 150 mm 以下, 出现了沙漠景观。

关于气象参数的空间离散, 前人已经进行了大量的研究(Kurtzman and Kadmon, 1999; Oliver and Webster, 1990)。但是他们仅仅通过研究有限点的数据之间的空间关系, 并不考虑下垫面的影响因素。通常降水随着高程的增加而增加, 因而许多学者将高程的因素融合到地统计里面, 建立了表示降水量和经纬度、坡度、坡向等因素之间关系的模型(Wotling et al., 2000; Weisse and Bois, 2001; Marquez et al., 2003)。但是对于降水量和地形因素之间精确关系的研究还比较罕见。

2 计算方法

地形对于降水的作用之所以重要, 是因为地形的起伏可作为水汽对流活动的触发机制, 在大范围的天气背景下, 当低层水汽比较充沛时, 地形起到暴雨中心的定位以及维持强烈持续上升运动的作用, 形成可观的降水(文迁, 1997)。

地形是影响降水的主要因素之一, 地形对降水的影响主

* 收稿日期: 2006-03-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50239020)

作者简介: 陈 贺(1978 -), 男, 河南滑县人, 博士生, 主要从事水资源水环境研究。

要有两条途径,一是直接影响;二是间接影响。其中直接影响又称为动力影响,这种作用造成的降水主要发生在迎风坡面。间接影响主要是指由于地形的存在,影响局地大气环流,从而影响局地降水的过程(范广州,1999)。因此,在 DEM 的基础上,提取高程、坡度、坡向、经纬度等地形因子,研究各因子同降水之间的相关关系,并建立可靠的模型,将有助于对无资料地区降水资料的补充以及点状降水资料的离散化。

假设降水量和高程、坡度、坡向等地形因素有一定的相关性,可以利用地形因子来推算降水量。高程、坡度、坡向可以用 DEM 计算出来,因此可以用 DEM 和有限的降水资料来推求无资料地区降水状况。将所有变量视为无量纲变量,并使变量与降水量处于同一个量级,以减少系数截断误差造成的影响,最终建立下面的模型来表示降水和地形之间的关系。

$$p(x) = a_1(alt - 2000) + a_2(alt - 2000)^2 + a_3(alt - 2000)^3 + b_1[\cos(asp)] + b_2[\cos(asp)]^2 + b_3[\cos(asp)]^3 + c_1[\tan(slp)] + b_2[\tan(slp)]^2 + c_3[\tan(slp)]^3 + d_1(lon - 100) + d_2(lon - 100)^2 + d_3(lon - 100)^3 + e_1(lat - 30) + e_2(lat - 30)^2 + e_3(lat - 30)^3 + const \tag{1}$$

式中: $p(x)$ ——所求解点的降水量; $a_1 \dots e_3$ ——各变量的系数; alt, asp, slp, lon, lat ——高程、坡向、坡度、经度和纬度; $const$ ——常量。

根据最小二乘法确定以上各式的系数。

3 实例研究

本文选取石羊河流域祁连山北麓,东经 $102^\circ \sim 104^\circ$,北纬 $37^\circ \sim 38^\circ$,面积为 $7\,260\text{ km}^2$ 的研究区域(如图 1 所示)。该区域的高程由北向南从 $1\,000\text{ m}$ 逐渐过渡为 $4\,000\text{ m}$ 多,降水在很大程度上受地形的影响。研究区域内有 26 个雨量站,集中在几个区域,分布不均(如图 1 所示),不能满足对该区域内水环境进行研究的的数据要求。图 2、3、4 分别是该区域的 DEM 图、坡度图、坡向图。其中,DEM 图是研究地形与降水之间关系的最基础的图层,在 DEM 图层的基础上,在地理信息系统(GIS, Geographic Information System)中生

成坡度图和坡向图。

在该区域内共有雨量站 26 个,本文用其中任意挑选的 20 个雨量站建立降水量与诸因素之间的关系,用剩下的 6 个雨量站校核方程的适用性。用 Avenue 语言编写 Arcview 的扩展模块 Query1.0,用以读取各个雨量站的地形参数,得到如表 1 所示的地形参数。

表 1 各雨量站地形参数

雨量站	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	高程/ m	坡度/ $^\circ$	坡向/ $^\circ$
黄娘娘台站	105.5	37.40	2773	162	74
磨台子站	106.5	37.37	2700	0.00	-1
南泥沟站	105.5	37.45	2612	18.18	23
黄羊河水库	107.2	37.57	2126	5.55	62
沙金台站	106.0	37.47	2400	0.00	-1
毛藏寺站	104.3	37.52	2700	0.00	-1
上格岔沟站	105.3	37.55	3000	9.25	294
马家台站	108.3	37.32	2721	17.08	289
峡门台	105.7	37.42	2600	1.39	83
孔家庄	106.0	37.40	2607	7.96	17
杂木寺	105.7	37.70	2100	0.00	-1
细水	103.3	37.73	2600	0.00	-1
下寺	104.2	37.78	2200	1.10	315
洪沟	103.2	37.78	2500	0.00	-1
杏树	103.2	37.70	2856	31.61	179
宽沟	104.2	37.68	2468	19.04	138
南营水库	105.2	37.80	2000	0.00	-1
牛圈沟	109.8	37.23	2800	0.00	-1
崖头	109.5	37.27	2783	6.11	291
头道沟	109.3	37.28	2680	18.21	212
天祝	108.5	37.25	2700	0.00	-1
龙沟	109.0	37.30	2480	7.87	1
张家墩	103.07	37.38	2471	6.64	297
古浪	109.0	37.45	2200	0.00	-1
土门	103.07	37.62	1767	0.88	11
横梁	102.0	37.38	2688	8.98	62

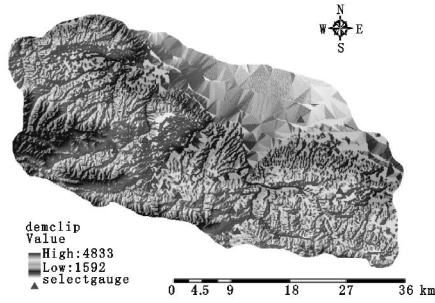


图 1 研究区域地形及雨量站

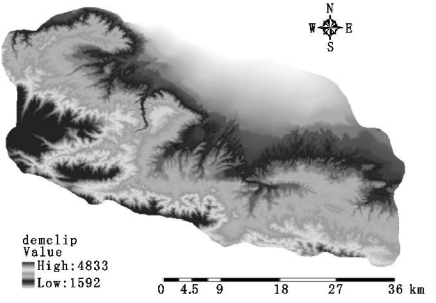


图 2 研究区域数字高程模型

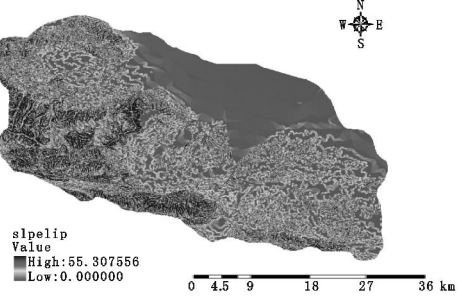


图 3 研究区域坡度图

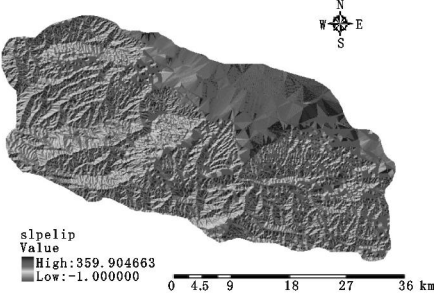


图 4 研究区域坡向图

1987 年 6 月 7 日 - 17 日该区域有一次降水过程,该次降水在局部地区的分布主要受地形因素的影响,降水量如图 5 所示。经过因子筛选和曲线拟合,分别建立有降水日的降水量和地形因素之间的方程,方程如表 2 所示(方程只具有

数学意义,不具物理意义)。经过因子筛选后影响降水的各因子包括:经度、经度 3、纬度、纬度 3、高程、高程 2、高程 3、坡度、坡度 2、坡度 3、坡向、坡向、2 坡向 3。

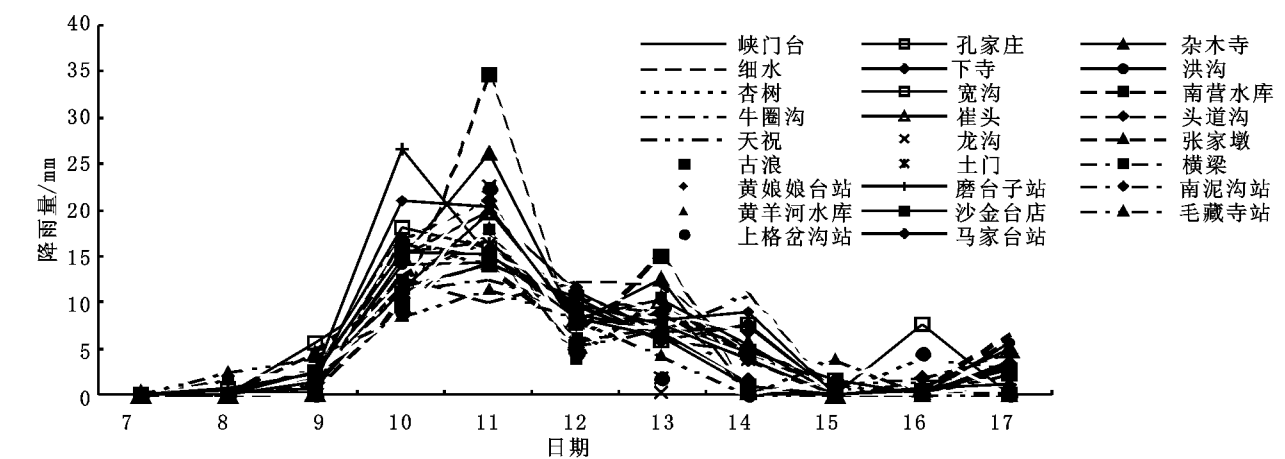


图 5 研究区内各雨量站 1987 年 6 月 7 日 ~ 17 日逐日降水量

表 2 有降水日拟合方程的各项系数							
系数	9 日	10 日	11 日	12 日	13 日	14 日	7 - 17 日
常数	- 715.7669	- 1440.2528	1661.8212	620.3544	408903	1204.2525	2660.9764
经度	9348	400.3573	191.5115	- 49.0554	163.0285	71.5661	667.4635
经度 3	- 0.1802	- 16.2533	- 7.6505	1.5962	- 6.3312	- 1002	- 27.5647
纬度	149652	100.0525	- 417.8105	- 95.0025	- 161796	- 270.4206	- 833987
纬度 3	- 0.8494	- 0.1627	6672	0.4757	1.2010	1.6384	5.6123
高程	- 0.0015	0.0287	0.0071	- 0.0034	0.0195	0.0028	0.0473
高程 2	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
高程 3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
坡度	4.9411	- 20.4386	58.5035	- 21680	- 57.5625	- 0.5894	- 66.2963
坡度 2	- 29.6651	44.4933	- 213431	119.1407	257.3500	42694	386.8872
坡度 3	20.4948	15.0870	249.1141	- 154.3933	- 256.0545	- 30081	- 362056
坡向	- 1.2064	0.7872	- 6.4949	4.7863	6.5798	0.1654	3949
坡向 2	1.2790	- 1.2229	- 6.1331	8563	- 0.9126	- 3008	- 7.1596
坡向 3	- 1.2735	1.8927	9.1175	- 6.1613	- 6.9190	1.7477	0.0728

*注:某些项系数较小,系数已被截断,显示为 0。

用 20 个雨量站建立的如表 2 所示的方程预测其它 6 个站的降水量,得到如表 3 所示的降水量。通过统计分析,得到表 4 和表 5 所示的结果,可以看出,模拟所得的降水量与

实测的降水量相关性较强,误差在允许范围之内,从而验证了所用方法的正确性和所建方程的可用性。

表 3 模拟降水与实测降水对比															mm
雨量站	9 日		10 日		11 日		12 日		13 日		14 日		7 ~ 17 日总降水量		
	实测	预测	实测	预测	实测	预测	实测	预测	实测	预测	实测	预测	实测	预测	
黄娘娘台站	2	1.9	16.9	13	15.0	15.4	11.6	9.8	9.0	5.0	6.7	5.8	66.4	57.1	
磨台子站	2	5	26.5	20.5	14.9	14.7	9.8	8.6	7.7	8.5	7	5.6	68.6	64.1	
南泥沟站	0.2	1.2	16.6	18.0	14.4	16	10.5	11.1	8.7	7.2	5.2	6.6	69	65	
黄羊河水库	5	2	8.8	11.8	18.0	27	7.7	6.9	7.2	6.9	1.6	0.8	46.9	51.5	
沙金台站	4	3.0	15.5	14.5	15.2	15.5	8.3	8.7	6.3	6.9	1.0	2	51.9	54.8	
毛藏寺站	4.1	9	8.5	19	11.3	9.1	8.2	10.1	4.3	5.2	0.0	3	46	50.1	

表 4 实测与预测降水量统计分析								
比较日期	相关系数	标准差	均值标准误差	95 % 置信区间		t 检验	相伴概率	
				下限	上限			
9 日	0.826	0.781	0.319	- 0.843	0.795	- 0.075	0.943	
10 日	0.873	4.016	1.64	- 925	4.505	0.177	0.866	
11 日	0.973	687	1.097	- 352	287	- 0.486	0.648	
12 日	0.575	1.372	0.56	- 1.278	1.601	0.288	0.785	
13 日	0.24	1.903	0.777	- 1.402	593	0.766	0.478	
14 日	0.763	1.694	0.692	- 961	0.595	- 1.71	0.148	
7 ~ 17 日	0.892	6.221	54	- 6.846	6.212	- 0.125	0.905	

表 5 各站累计实测与预测降水量统计分析						
相关系数	标准差	均值标准误差	95 % 置信区间		t 检验	相伴概率
			下限	上限		
0.986	995	0.462	- 1.078	0.789	- 0.312	0.757

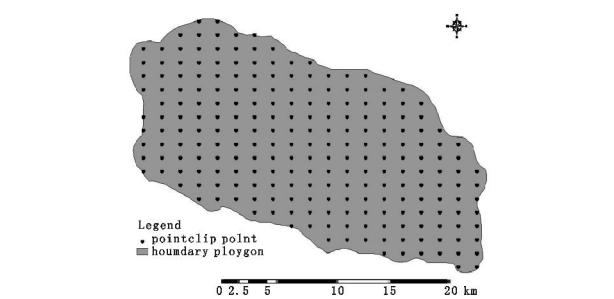


图 6 计算选取的站点

选取如图 6 所示的计算点,用以上各方程计算 230 个点的降水量。在 GIS 中描绘出降水量等值线,如图 8、10、12 所示。图 7、9、11 是用 26 个站点的实测雨量描绘出的等值线。可以看出,本文所建立的方程扩展了降水资料,将其延伸到整个流域(可以计算任何点的降水量)。

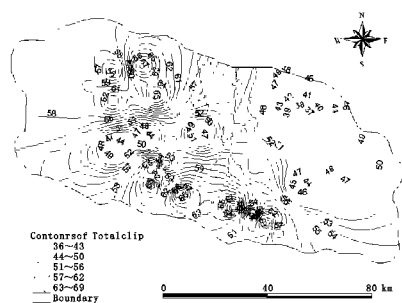


图 7 7~17 日实测降水量等值线图

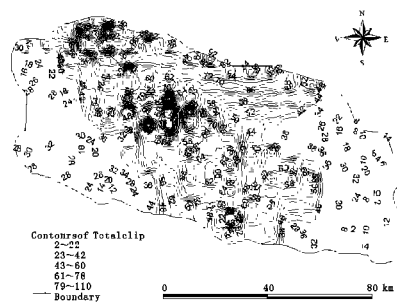


图 8 7~17 日模拟降水量等值线图

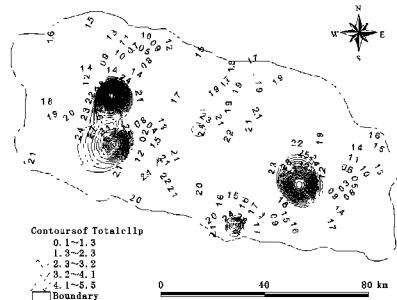


图 9 9 日实测降水量等值线图

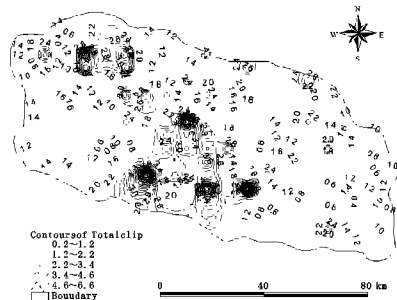


图 10 9 日模拟降水量等值线图

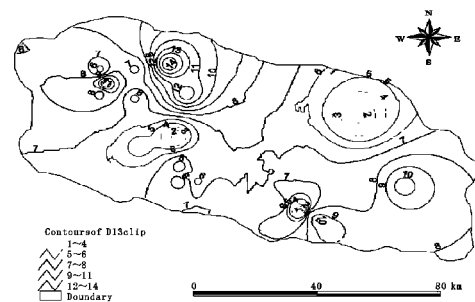


图 11 13 日实测降水量等值线图

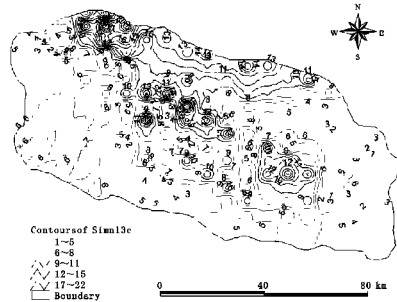


图 12 13 日模拟降水量等值线图

4 结 论

通常,水资源水环境研究主要集中在水资源水环境过程的下游环节,而对于上游环节(基础数据等)的研究在很大程度上被忽略了。充分发挥基础数据的作用,克服水资源水环境研究的制约因素,成了一个有重要意义的研究课题。本文的研究表明,降水量和高程、坡度、坡向等地形因子之间有一定的相关关系,从数学意义上,可以用多元回归方程表示二者之间的关系。以 GIS 为工具,在 DEM 的基础上提取坡度、坡向等地形信息,进而建立表示二者之间关系的模型,可参考文献:

以计算研究区域内任何点的降水量,从而扩展有限数据的作用。该模型在西北内陆的石羊河流域南部山区取得了良好的应用效果。因为将各变量无量纲化,不考虑物理意义,模型又具有普适性,可以在降水受地形影响的广泛区域内使用,为水资源水环境研究和实际工作提供详实、可靠的基础数据。但是,因为并没有考虑影响降雨的天气系统,因此该方法只适用于小范围地形雨的模拟。同时,本文的研究也为水资源水环境研究提供了一个新的思路——加强对降水、蒸发、风速和日照强度等基础数据的研究,扩展基础数据的作用,为水资源水环境的研究提供坚实的基础。

- [1] Marquez J, Lastra J, Garca P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003, (270): 1 - 11.
- [2] Kurtzman D, Kadmon R. Mapping of temperature variables in Israel: a comparison of different interpolation methods [J]. Climate Research, 1999, (13): 33 - 43.
- [3] Oliver M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems[J]. International Journal of Geographical Information System, 1990, 4(3): 313 - 332.
- [4] Steffen P. Geographic Information Systems in Urban Storm - Water Management[J]. Journal Water Resources Planning and Management, 1993, (2): 206 - 228.
- [5] Weisse A K, Bois P. Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(4): 720 - 740.
- [6] Wotling G, Bouvier Ch, Danloux J, et al. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment[J]. Journal of Hydrology, 2000, (233): 86 - 101.
- [7] 范广洲,吕世华.地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J].高原气象,1999,18(4): 659 - 667.
- [8] 林之光.地形降水气候学[M].北京:科学出版社,1995.
- [9] 文迁,谭国良,罗嗣林.降水分布受地形影响的分析[J].水文,1997,(增刊): 63 - 65.