

基于 DEM 的榆林市降水空间插值方法分析

刘智勇^a, 张 鑫^a, 方睿红^b

(西北农林科技大学 a 水利与建筑工程学院, b 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**比较 4 种空间插值方法的插值效果,为分析榆林市降水空间分布特征奠定基础。**【方法】**采用榆林市 45 个水文及雨量站点 35 年(1970—2004 年)的降水量观测资料,结合 GIS 技术,以榆林市 1 km×1 km 网格 DEM(Digital Elevation Model)数据为基础,建立 35 年各月平均、年平均降水量与站点坐标、高程之间的回归方程。选取反距离加权法、张力样条函数法、普通克里金法及协同克里金法等 4 种空间插值方法,对榆林市 35 个站点的多年平均降水量进行空间插值计算,采用 10 个站点的降水量数据对插值结果进行验证,并进行对比误差分析,根据插值结果,进一步分析榆林市降水空间分布特征。**【结果】**考虑了地形因素的协同克里金法插值效果最好,且较为真实地反映了榆林市降水空间分布特征,普通克里金法次之,反距离加权法和张力样条函数法较差。总体而言,4 种插值方法均达到了较高的分析精度。插值结果表明,榆林市降水呈现明显的纬度地带性分布特征,且降水受地形、地貌以及季节因素影响较大。**【结论】**应用 GIS 空间插值技术,综合考虑地形因素,可以提高研究区域降水空间插值结果的精度,并可为分析该区域降水时空结构特征提供更为精细的数据。

[关键词] 降水;DEM;空间插值;地形因素;榆林市

[中图分类号] P332.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)07-0227-08

Analysis of spatial interpolation methods to precipitation in Yulin based on DEM

LIU Zhi-yong^a, ZHANG Xin^a, FANG Rui-hong^b

(a College of Water Resources and Architectural Engineering, b College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Comparing the results of the four kinds of spatial interpolation methods, this paper makes a basis to analyze the temporal and spatial distribution of regional precipitation in Yulin. **【Method】** Combined with the geographic information system (GIS) technology, the annual precipitation data of 45 hydrometric and precipitation stations in Yulin from 1970 to 2004 based on the DEM(Digital Elevation Model) of 1 km×1 km spatial resolution are used to establish the regression equation among the precipitation, the coordinate and elevation of the 45 stations. Average annual precipitation (from 1970 to 2004) data of the 35 stations in Yulin are interpolated and analyzed by inverse distance weight tension (IDW), Spline with tension, Ordinary Kriging, CoKriging methods. The precipitation data of the last 10 stations are used to analyze the comparative error and validate the results of the interpolation. Based on the interpolation results, the spatial distribution of precipitation in Yulin is analyzed. **【Result】** The results indicate that the four interpolators have all achieved high precision in reflecting the spatial distribution of average annual precipitation in Yulin, among which CoKriging method having dealt with topography factor proves to be the

* [收稿日期] 2009-12-28

[基金项目] 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(14110209);国家重大科技支撑计划项目(10712);西北农林科技大学博士科研启动基金项目(01140504);西北农林科技大学科研专项(08080230)

[作者简介] 刘智勇(1985—),男,湖南岳阳人,在读硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail: economicchina@163.com

[通信作者] 张 鑫(1968—),男,河南淅川人,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。

most effective, followed by Ordinary Kriging, IDW and Spline with tension method. Interpolation results show that the precipitation distribution in Yulin is clearly latitude zonal, and is greatly affected by topography, physiognomy and seasonal factors. 【Conclusion】 Considering the topography factor in the study area, the GIS spatial interpolation techniques can improve the accuracy of interpolation of precipitation, and refine the data of analyzing the temporal and spatial distribution of regional precipitation.

Key words: precipitation; DEM; spatial interpolation; topography factor; Yulin

降水数据作为研究区域水文、水资源的基础数据资料^[1], 是农林、生态、地理、全球变化等学科研究的重要数据来源, 也是水文分析模型的重要输入因子^[2-5]。由于降水量观测站点的空间分布具有不均匀性, 采用有限的站点观测数据来研究区域降水的空间整体分布具有重要意义^[6-7]。利用 GIS 技术, 对地面离散的降水量观测资料进行空间插值, 得出整个研究区域的降水空间分布结果, 已成为国内外地理、生态及水文等学科研究的热点^[8]。目前的研究中, 常见的空间插值方法有反距离加权法 (Inverse distance weight tension, IDW)、张力样条函数法 (Spline with tension)、趋势面法 (Trend)、普通克里金法 (Ordinary kriging, O-Kriging)、协同克里金法 (CoKriging) 等^[9]。Hutchinson^[10] 利用薄平滑样条分析法 (Thin plate smoothing splines) 研究了 5 种不同参数设置情况下的样条模型插值结果, 改进了样条函数插值法模型。庄立伟等^[11] 利用东北日降水数据进行空间插值方法比较, 认为 IDW 插值方法优于克里金插值法。周锁铨等^[12] 在对长江流域降水数据进行插值研究中, 运用了逐步插值法 (SIA), 并结合 GIS 技术和多元逐步回归方法, 提高了降水空间插值结果的精度。

由于研究区域和时间尺度的差异, 不同插值方法的适应性不同, 插值结果和精度也存在较大差异。研究区域越大, 地形结构越复杂, 涉及的气象类型也就越多, 在研究其降水空间插值时, 就应该充分考虑插值过程中对降水有重要影响的因子 (如地形、风速等)^[13]。地形因子不仅是降水重要的下垫面因子, 也是局部气候形成的主要因子^[14-16], 对区域降水有较大影响。我国陕北地区地形起伏较大且沟壑分明, 研究该地区降水空间插值时考虑地形因素的影响很有必要。本研究以陕西榆林市 45 个水文及雨量站点 1970—2004 年间逐月降水量观测数据为基础, 结合 GIS 技术, 分析研究区域降水与海拔、经纬度之间的相关性, 选用 IDW 法、张力样条函数法、普通克里金插值法及考虑地形因子的协同克里金插值方法, 对该区域降水数据进行空间插值计算, 分析 4 种方法插

值结果的误差精度, 以期筛选出最适合该区域的空间插值方法, 为更进一步研究该区域水文特征及生态与环境关系奠定基础, 同时也为改进降水插值方法提供新思路。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 区域概况

榆林市地处陕西省最北部, 位于东经 $107^{\circ}28' \sim 111^{\circ}15'$, 北纬 $36^{\circ}57' \sim 39^{\circ}34'$, 地势由西向东倾斜, 西南部平均海拔 1 600~1 800 m, 其他各地平均海拔 1 000~1 200 m。试区最高点为定边南部的魏梁, 海拔 1 907 m, 最低点为清涧无定河入黄河口, 海拔 560 m, 平均海拔 1 300 m; 地貌主要有风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区、梁状低山丘陵区 3 大类。该区域气候属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候, 四季分明, 无霜期短, 年平均气温 10°C , 年平均降水量 400 mm 左右。

1.2 降水量资料及地形数据

收集整理榆林及附近地区 45 个水文及雨量站点 35 年 (1970—2004 年) 的逐月降水量资料及降水量观测站的坐标及高程值, 通过对降水资料原始数据的统计处理, 计算各站点 35 年各月平均降水量及各年平均降水量, 并对其准确性进行验证。本研究选取其中 35 个站点进行统计分析和插值计算, 用另外 10 个站点进行插值结果验证。地理数据选用分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的榆林市数字高程模型 (DEM) 数据, 并将其作为地形因子参数数据 (图 1)。

2 研究方法

2.1 多元统计分析

分析区域特别是山区的降水特征时, 应充分考虑地形因子与降水的关系。本研究采用多元统计方法, 结合降水量站点的多年逐月降水量数据及站点对应的地理坐标和高程数据, 建立地形要素与降水量的回归方程, 以确定地形与降水在统计意义上的关系。用该方法估算降水量不依赖于估算点周围区域站点的密集程度, 可以直接根据地形要素求出降

水量,其回归方程可表示为:

$$P=a_0+a_1\lambda+a_2\varphi+a_3H.$$
 (1)

式中: P 为降水量, λ 、 φ 分别为站点经、纬度, H 为站点的海拔, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为回归系数。

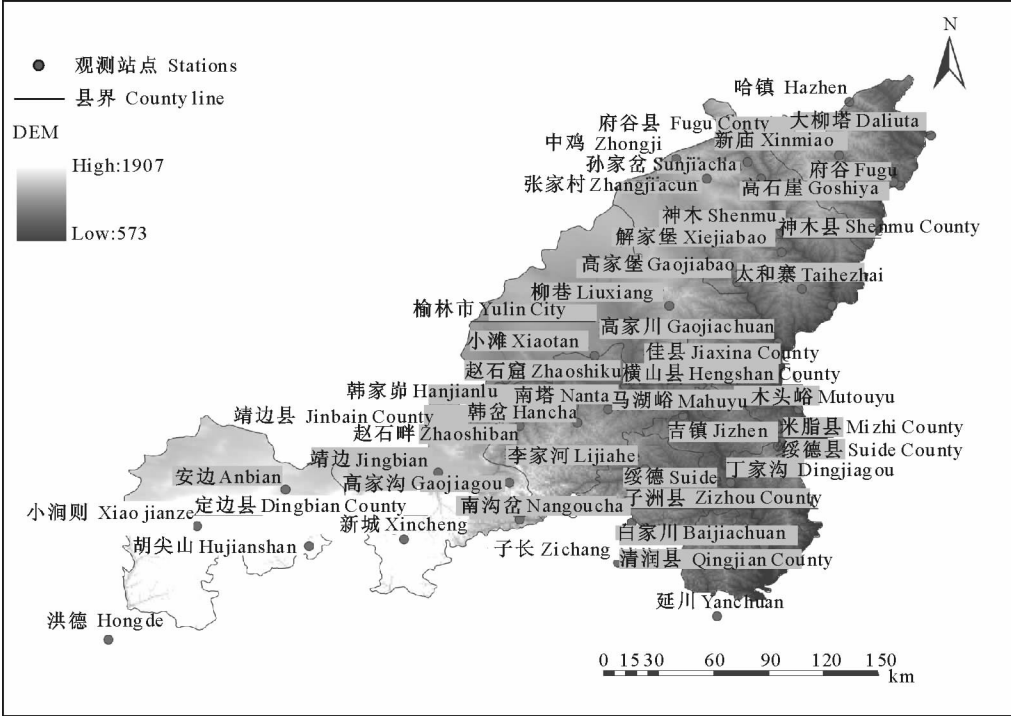


图 1 榆林市水文、雨量站点分布及 DEM 图

Fig. 1 Map of locations of the hydrological and precipitation stations and the DEM in Yulin

本研究从 45 个站点中选取 35 个站点 1970—2004 年共 35 年的逐月降水量平均数据,与其地理坐标、海拔数据建立多元回归方程,各月的方程系数如表 1 所示。表 1 表明,大多月份降水量与经度呈

正相关,与纬度呈负相关,基本符合水平地带性规律,大部分月份和全年平均降水量与海拔呈正相关,即降水随着海拔高度的增加而增大,说明研究区域的降水量与海拔高程存在较为明显的相关关系。

表 1 榆林市 35 个降水观测站点多年及各月降水量与经、纬度和海拔高程的回归方程系数以及多元相关系数的平方值
Table 1 Regression coefficients of monthly mean precipitation and mean annual precipitation of the equation and the correlation coefficients (R^2) of the 35 stations in Yulin

月份 Month	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2
1	27.339	-0.075	-0.336	-0.004	0.874
2	55.519	-0.147	-0.808	-0.004	0.958
3	-121.255	1.868	-1.984	0.003	0.955
4	-268.923	3.367	-0.243	0.011	0.626
5	-317.500	4.201	-3.660	0.026	0.771
6	-832.350	9.278	-4.113	0.023	0.639
7	-1 428.254	10.071	10.071	0.010	0.551
8	-2 496.244	20.358	7.178	0.080	0.357
9	-315.037	5.926	-7.127	0.009	0.733
10	75.163	3.829	-11.874	0.017	0.532
11	583.293	-0.293	-12.948	0.044	0.386
12	545.452	0.035	-13.125	0.041	0.311
全年 Whole year	-4 894.626	59.365	-33.194	0.046	0.863

2.2 插值方法

本研究采用 ArcGIS 软件中的 IDW 法、样条函数法、普通克里金插值法、协同克里金插值法等 4 种

不同的插值方法,对 35 个降水量观测站点 35 年(1970—2004 年)的多年平均降水量进行插值,结果见图 2。

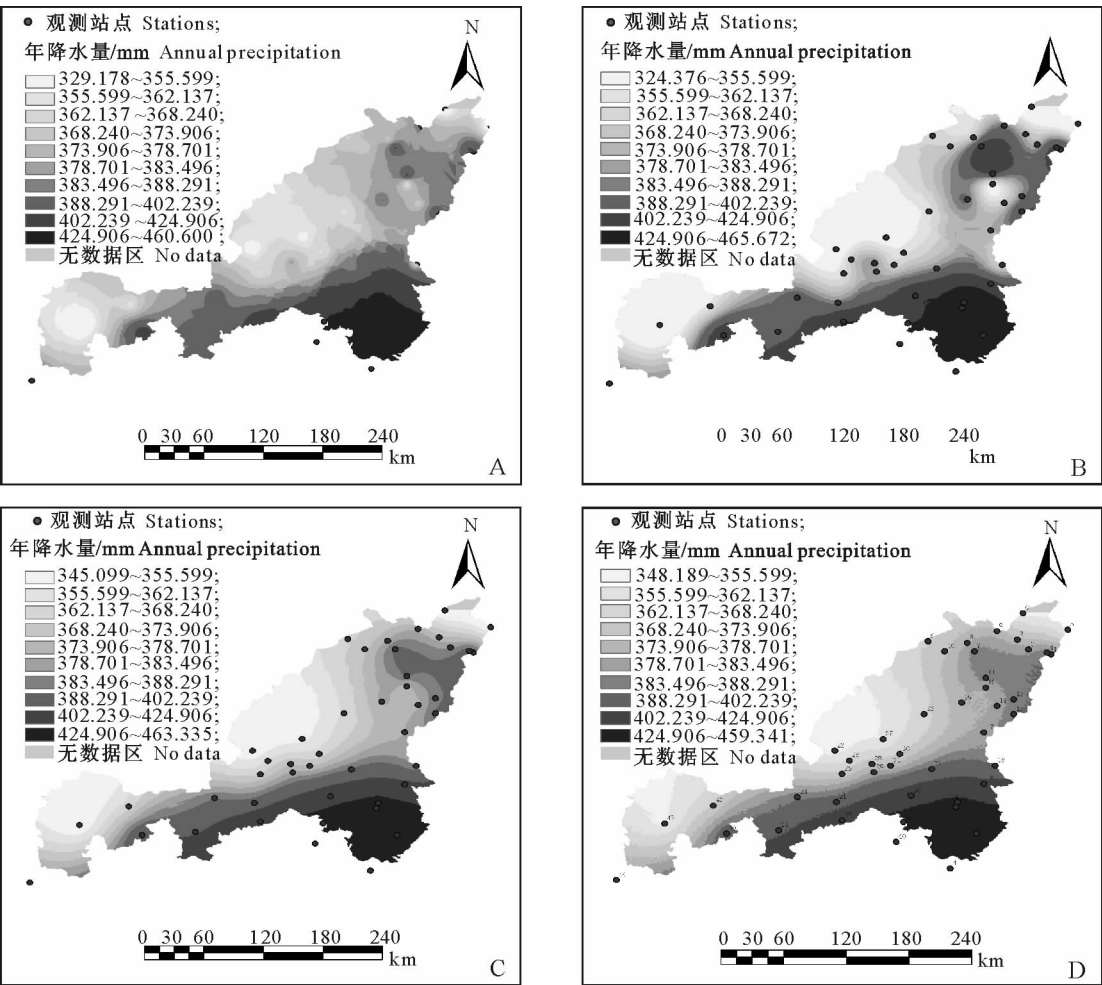


图 2 4 种插值方法插值效果的比较

A. IDW 法; B. 样条函数法; C. 普通克里金插值法; D. 协同克里金插值法

Fig. 2 Four precipitation estimations for Yulin

A. IDW; B. Spline with tension; C. Ordinary kriging; D. CoKriging

2.2.1 IDW 法 IDW 法以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,认为与插值点距离越近的若干个样本点的权重越大,其贡献与距离成反比^[17]。该方法简单易行,但容易出现因极值产生的“牛眼”现象^[8]。其表达式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n (Z_i W_i) / \sum_{i=1}^n (W_i) \quad (2)$$

式中: Z 为待估栅格点的降水要素值; n 为用于插值的降水量观测站点个数; Z_i 为第 i 个站点的降水实测值; W_i 为第 i 个站点的权重系数,通常以待估栅格点到观测点的大圆半径的平方反比作为权重系数。

2.2.2 样条函数法 样条函数法主要利用空间实测的降水量值,通过控制估计方差,用多项式拟合出平滑的插值曲线^[18],并依据这条曲线来估算每个定点的属性数值,在计算时采用最小曲率的概念来进

行,该方法具有易操作、计算量小等优点,缺点是要求的样本数据较多,且难以对误差进行估计。其表达式为:

$$Z = \sum_{i=1}^n A_i d_i^2 \lg d_i + a + bx + cy \quad (3)$$

式中: $\sum_{i=1}^n A_i d_i^2 \lg d_i$ 为一个基本函数,其中 A_i 、 a 、 b 和 c 为方程系数; d_i 为插值点到第 i 个降水站点的距离; $a + bx + cy$ 为降水要素的局部趋势函数,其中 x 和 y 为插值点的坐标。本研究选用张力样条函数法对榆林市降水进行插值估算。

2.2.3 普通克里金插值法 普通克里金插值法以空间统计学作为理论基础,克服了内插中误差难以分析的问题,能对空间分布数据进行最优、线性、无偏内插估计,缺点是计算量大且过程复杂^[19]。其计算表达式为:

$$Z=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i)。$$
(3)

式中: λ_i 为参与插值的站点对估算点降水要素的权重, x_i 表示降水站的位置。在克里金插值中,权重不仅建立在已知点和预测点距离的基础上,而且还要依据已知点的位置和已知点值的整体空间分布和排列特征。因此,运用普通克里金插值方法时,权重取决于已知点与预测点之间的距离及空间关系^[20]。

2.2.4 协同克里金插值法 协同克里金插值法将区域化变量的最佳估值方法从单一属性发展到 2 个以上的协同区域化属性。协同克里金插值法比普通克里金插值法有 2 方面的改进:一是在理论上,假设两个随机变量是相关的,通过比较两种估算方法所得的方差可知,前者在估算精度上比后者有明显提高;二是在采样方面,协同克里金插值法可以通过较为容易采测的变量对难以采测的变量进行估算,所

以该方法不仅可以提高估算精度,而且可以提高采样的效率。本研究根据上文统计分析结果,即降水量和研究区域地形之间的关系,采用研究区域的 DEM 作为降水插值的协同区域化属性的输入因子,对区域降水进行空间插值。

3 结果与分析

3.1 4 种插值方法插值结果的检验

本研究选用空间分布均匀的 10 个站点的多年平均逐月降水量数据(未参与插值运算),对 4 种插值结果进行精度检验。从表 2 可以看出,总体而言,4 种插值方法都有较高的插值精度,但协同克里金插值法的插值结果与实测值差值的绝对值最小,普通克里金插值法次之,这主要是由于协同克里金插值法在插值过程中充分考虑了地形因素。

表 2 10 个检验站点不同插值方法所得降水量预测值与实测值的比较

Table 2 Comparison of the differences between the predicted results of the interpolation methods and the actual precipitation of the 10 stations in Yulin						mm
检验站点 Station	实测值 Actual precipitation	预测值 Predicted value				
		IDW	样条函数法 Spline with tension	普通克里金插值法 Ordinary kriging	协同克里金 插值法 CoKriging	
孙家岔 Sunjiacha	369.519	385.614	392.163	384.722	381.849	
神木 Shenmu	407.867	373.214	368.915	375.840	377.210	
解家堡 Xiejiabao	354.762	391.029	393.846	391.320	389.197	
吉镇 Jizhen	409.041	403.347	401.339	403.874	406.504	
新城 Xincheng	394.809	383.742	410.921	407.955	402.510	
靖边 Jingbian	393.818	382.250	374.158	378.854	380.826	
韩岔 Hancha	379.068	372.975	385.806	379.388	379.532	
青阳岔 Qingyangcha	421.829	396.532	408.186	411.012	409.599	
李家河 Lijiahe	421.417	401.790	395.546	408.627	409.334	
白家川 Baijiachuan	461.237	428.356	438.757	443.052	441.450	

同时,本研究采用 t 检验方法对空间插值结果的精度和误差进行了进一步统计分析,即对 10 个检验站点的实测值和不同插值方法的预测值进行误差分析,结果见表 3。

表 3 10 个检验站点不同插值方法所得降水量预测值与实测值的误差分析(t 检验)

Table 3 Error analysis between the results of the interpolation methods and the actual precipitation of the 10 stations in Yulin (t test)							
插值方法 Interpolation method	平均数差值/mm Difference in means	标准差/mm Std. deviation	平均数差异 标准误差 Std. error mean	95% 置信区间 95% confidence interval of the difference		t 检验 t test	P
				下限 Lower	上限 Upper		
IDW	9.452	21.894	6.923	-6.210	25.113	1.365	0.205
Spline	4.373	24.671	7.802	-13.276	22.022	0.561	0.589
O-Kriging	2.872	19.848	6.277	-11.326	17.071	0.458	0.658
CoKriging	3.535	18.483	5.845	-9.686	16.757	0.605	0.560

由表 3 可知,4 种插值方法插值结果与实测值平均数间差值的大小顺序为:普通克里金插值法<协同克里金插值法<张力样条函数法<反距离加权法。标准差和平均数差异的标准误差为标准差除以样本值的开方,其大小顺序为:协同克里金插值法<普通克里金插值法<反距离加权法<张力样条函数法。IDW 法、张力样条函数法、普通克里金插值法和协同克里金插值法 4 种插值方法 t 检验值分别为

1.365,0.561,0.458 和 0.605,其 P 值均大于 0.05,未达到显著差异水平,表明插值估算的降水结果值与实测值不存在显著差异,说明 4 种插值结果均具有较高的精度。从表 4 可知,通过 4 种插值方法求得的榆林市多年平均降水值基本一致。整体而言,考虑地形因素的协同克里金插值方法计算效果较好,普通克里金插值法次之,反距离加权和张力样条函数法较差。根据协同克里金插值方法的结果,统

表 4 4 种插值方法插值效果的比较(区域网格个数均为:445×295)
Table 4 Statistic results of four interpolation methods (Grid : 445×295)

插值方法 Interpolation method	最小值/mm Minimum	最大值/mm Maximum	平均值/mm Mean	标准偏差/mm Std. deviation	变差系数 C_v	偏态系数 C_s
IDW	329.178	460.600	383.45	22.151	0.058	0.002
Spline	324.376	465.672	381.07	30.603	0.080	0.001
O-Kriging	345.099	463.335	382.17	27.219	0.071	0.630
CoKriging	348.189	459.341	383.09	24.984	0.065	1.126

表 5 基于协同克里金插值法结果的榆林市降水量统计数据
Table 5 Basic statistical data on precipitation in the northern, eastern and western regions of Yulin based on CoKriging interpolation method

区域 Region	最小值/mm Minimum	最大值/mm Maximum	平均值/mm Mean	变差系数 C_v	偏态系数 C_s
北部区域 Northern region	348.188 6	410.692 4	371.943	0.033	-0.132
东部区域 Eastern region	354.626 1	459.341 4	409.032	0.073	-0.067
西部区域 Western region	353.141 9	419.817 4	377.181	0.045	0.367

3.2 基于 4 种方法插值结果的榆林市降水分布特征分析

(1)榆林市降水呈明显的纬度地带性分布规律,就整个区域而言,降水自东南向西北明显减少,区域内最大降水差约 110 mm,存在明显的南北分界,只在东北部分地区存在小块降水增加区域,分析认为这是由于当地沟壑地形因素影响所致。

(2)榆林市降水分布受地形、地貌影响较大,在南部黄土丘陵沟壑区(白家川、绥德、李家河等站)和东北部沟壑明显区域(大柳塔、府谷、孤山等站),降水量在 370 mm 以上,而在西北风沙草滩及沙漠区(小滩、柳巷等站),降水稀少。

(3)各种插值方法的结果表现出一定差异性,大体而言,协同克里金插值法和普通克里金插值法的插值结果总体趋势平滑且相近,均具有较高的精度;张力样条函数法与协同克里金插值法在南部区域插值结果表现基本一致,但在东北部表现出明显的差异性;IDW 法插值结果的“锯齿”和“牛眼”现象^[8]较为明显。

(4)以 1,4,7 和 10 月分别代表冬、春、夏和秋 4 个季节,对榆林市降水季节分布特征进行分析,并以 45 个观测站点 35 年(1970—2004 年)的 1,4,7 和 10 月的月平均降水数据为基础,分别采用协同克里

金插值法进行插值,结果见图 3。图 3 表明,榆林市在夏季(7 月)降水最多,呈现东部和北部降水相对较多,西部降水较少的现象,春季(4 月)和秋季(10 月)全市南部降水要多于北部地区,冬季(1 月)全市降水稀少。

4 结论与讨论

(1)利用榆林市 45 个水文及雨量站点 35 年(1970—2004 年)的降水量观测数据资料,采用多元统计分析方法,计算了降水量与观测站点地理坐标及海拔之间的回归方程系数。分析显示,降水量基本符合水平地带性规律,降水与海拔之间存在较为明显的相关关系。

(2)选取 35 个站点多年平均降水量值进行 4 种方法插值计算,并对其插值结果进行验证和误差分析。结果表明,考虑了地形因素的协同克里金方法插值效果最好,且较为真实地反映了榆林市降水的空间分布规律,普通克里金法次之,IDW 法和张力样条函数法较差,但总体而言,4 种插值方法均达到了较高的精度。此外,本研究结果表明,榆林市降水分布特征与该区域地形、地貌及季节有较大的相关关系且具有较为明显的纬度地带性。

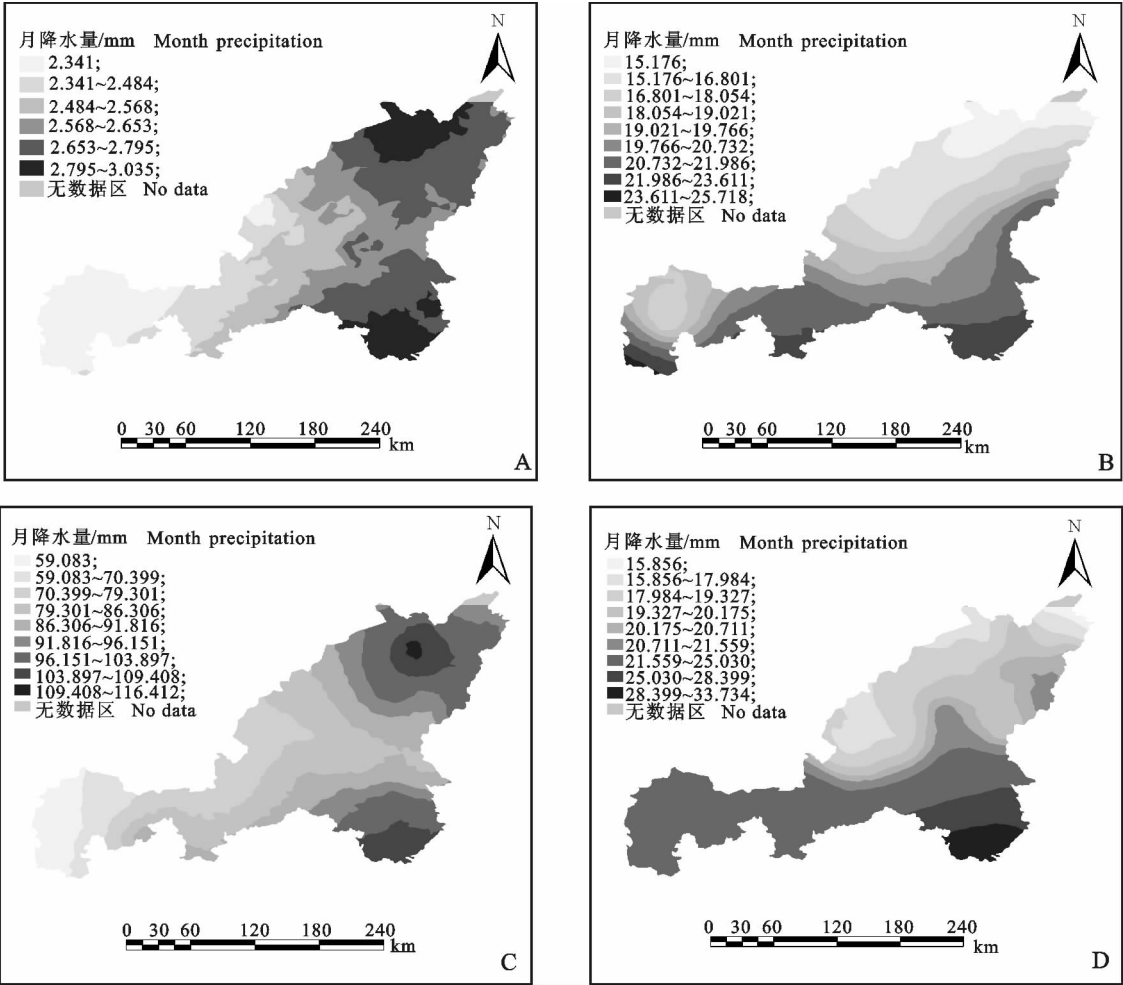


图 3 基于协同克里金插值法的榆林市不同季节(代表月)平均降水的空间分布
A. 1 月;B. 4 月;C. 7 月;D. 10 月

Fig. 3 The spatial distribution of monthly precipitation in different seasons (on behalf of month), Yulin
A. January; B. April; C. July; D. October

空间插值的精度与插值过程中观测站点的数量、插值方法中参数配置等因素有关,许多外界因素(如高程、坐标位置、下垫面状况、风速等)也会对降水插值结果产生重要影响,详细考虑研究区域的地形特征(如坡度、坡向等),可以明显提高插值结果的精度。因而在实际工作中,收集整理具有较高分辨率的 DEM 数据、气象数据以及地形特征数据十分必要。另外,研究区域降水特征时,还应充分结合研究的时间尺度特点。所以在研究区域降水空间插值时,应更为全面地考虑以上因素,以便找到最适合特定研究区域的最优插值方法。此外,随着插值研究的不断深入,在以后的研究工作中还应考虑将人工神经网络技术和数学建模方法引用到降水插值分析中,以期不断地提高插值精度。

[参考文献]

[1] 陈 贺,李原园,杨志峰,等. 地形因素对降水分布影响的研究 [J]. 水土保持研究,2007,14(1):119-122.
Chen H, Li Y Y, Yang Z F, et al. Research on the relationship between terrain factors and precipitation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 119-122. (in Chinese)

[2] 赵传燕,冯兆东,南忠仁. 陇西祖厉河流域降水插值方法的对比分析 [J]. 高原气象,2008,27(1):208-214.
Zhao C Y, Feng Z D, Nan Z R. Modelling the temporal and spatial variabilities of precipitation in Zulihe River basin of the Western Loess Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(1): 208-214. (in Chinese)

[3] 储少林,周兆叶,袁 雷,等. 降水空间插值方法应用研究:以甘肃省为例 [J]. 草业科学,2008,25(6):19-23.
Chu S L, Zhou Z Y, Yuan L, et al. Study on spatial precipitation interpolation methods: A case of Gansu province [J]. Pratacul-tural Science, 2008, 25(6): 19-23. (in Chinese)

[4] 何 葵,傅德平,赵志敏,等. 基于 GIS 的新疆降水空间插值方

- 法分析 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 35-37.
- He Y, Fu D P, Zhao Z M, et al. Analysis of spatial interpolation methods to precipitation based on GIS in Xinjiang [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 35-37. (in Chinese)
- [5] 陆忠艳, 李长青, 袁子鹏, 等. 基于 GIS 的辽宁气温和降水空间扩展方法 [J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 90-93, 14.
- Lu Z Y, Li C Q, Yuan Z P, et al. Extend methods of spatial distribution of temperature and precipitation based on GIS in Liaoning province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(1): 90-93, 14. (in Chinese)
- [6] Daly C, Gibson W P, Taylor G H, et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate [J]. Climate Research, 2002, 22: 99-113.
- [7] Zhou S Q, Xue G Y, Gong P, et al. The SIA method for spatial analysis of precipitation in the upper-middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(2): 223-238.
- [8] 蔡 福, 于贵瑞, 祝青林, 等. 气象要素空间化方法精度的比较研究: 以平均气温为例 [J]. 资源科学, 2005, 27(5): 173-179.
- Cai F, Yu G R, Zhu Q L, et al. Comparison of precisions between spatial methods of climatic factors: A case study on mean air temperature [J]. Resources Science, 2005, 27(5): 173-179. (in Chinese)
- [9] 谭继强, 丁明柱. 空间数据插值方法的评价 [J]. 测绘与空间地理信息, 2004, 27(4): 11-13.
- Tan J Q, Ding M Z. An evaluation of spatial data interpolation methods [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2004, 27(4): 11-13. (in Chinese)
- [10] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines; Part I. Two dimensional smoothing of data with short range correlation [J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1998, 2(2): 139-151.
- [11] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 605-616.
- Zhuang L W, Wang S L. Spatial interpolation methods of daily weather data in northeast China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2003, 14(5): 605-616. (in Chinese)
- [12] 周锁铨, 孙 琪, 肖桐松, 等. 长江中上游区基于 GIS 的不同时间尺度降水插值方法探讨 [J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1021-1034.
- Zhou S Q, Sun Q, Xiao T S, et al. The successive interpolation approach of precipitation space in the mid-and upper-reaches of the Yangtze River under different time scales based on GIS [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1021-1034. (in Chinese)
- [13] 甄计国, 陈全功, 韩 涛. 甘肃省各流域降水量的 GIS 模块插值估计与改进 [J]. 气象科学, 2009, 29(4): 467-474.
- Zhen J G, Chen Q G, Han T. Catchment precipitation estimation with GIS modules and its improvements in Gansu province [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(4): 467-474. (in Chinese)
- [14] Steffen P. Geographic information systems in urban storm-water management [J]. Journal Water Resources Planning and Management, 1993, 119(2): 206-228.
- [15] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响 [J]. 地理学报, 1992, 47(4): 302-314.
- Fu B P. The effects of topography and elevation on precipitation [J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(4): 302-314. (in Chinese)
- [16] 张连强, 赵有中, 欧阳宗继, 等. 运用地理因子推算山区局地降水量的研究 [J]. 中国农业气象, 1996, 17(2): 6-10.
- Zhang L Q, Zhao Y Z, Ouyang Z J, et al. Studies on local distribution of precipitation in mountainous areas calculated with geographic factors [J]. Agricultural Meteorology, 1996, 17(2): 6-10. (in Chinese)
- [17] 何红艳, 郭志华, 肖文发. 降水空间插值技术的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1187-1191.
- He H Y, Guo Z H, Xiao W F. Review on spatial interpolation techniques of rainfall [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(10): 1187-1191. (in Chinese)
- [18] 陆忠艳, 袁子鹏, 蔡 福, 等. 基于 GIS 的气温和降水推算方法研究 [J]. 气象科技, 2008, 36(4): 389-395.
- Lu Z Y, Yuan Z P, Cai F, et al. Method for calculating temperature and precipitation based on GIS data in Liaoning province [J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 36(4): 389-395. (in Chinese)
- [19] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较 [J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261-277.
- Feng J M, Zhao T B, Zhang Y J. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data [J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(2): 261-277. (in Chinese)
- [20] 邵晓梅, 严昌荣, 魏红兵. 基于 Kriging 插值的黄河流域降水时空分布格局 [J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 65-69.
- Shao X M, Yan C R, Wei H B. Spatial and temporal structure of precipitation in the Yellow River basin based on Kriging method [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(2): 65-69. (in Chinese)