

文章编号: 1000-0585(2002)04-0434-08

# 无定河流域降雨量空间变异性研究

李丽娟, 王 娟, 李海滨

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 运用地质统计学中的普通 KRIGING 方法, 对 1990~1997 年无定河流域 67 个雨量站的年降雨量进行了插值及空间场变异分析。分析发现降雨量的频率分布符合对数正态分布, 采用对数克立格方法为计算工具进行分析, 结果显示实验半变异函数符合一般的球状模型。从获得的参数可知, 1990~1997 年期间, 变程各不相同, 甚至差异很大。1991 年最小, 为 20.17km, 1994 年最大, 为 68.65km, 说明了该年无定河流域的降雨量空间变化在所分析的时间序列中是最缓和的, 这与 1994 年的变异系数最小也相吻合。同时各个年份计算结果均显示有块金值, 说明在小于变程的空间尺度上仍然存在随机效应。最后运用克立格方法对该流域的部分区域降雨量进行了空间插值成图。

**关键词:** 克立格方法; 空间变异; 无定河流域; 降雨量

**中图分类号:** P332.1 **文献标识码:** A

地质统计学是以区域化变量等理论为基础, 以变异函数为基本工具来研究展布于空间并呈现一定结构性与随机性的自然现象的科学。发展到现今已不单单应用于地质找矿和矿产估量中, 它的使用范围由逐步涉及环境科学、水科学、海洋学、农田水利、土壤学、森林及渔业等领域, 发展成为用来研究自然界具有随机性和规律性双重特征变量的具有普遍意义的科学方法。在水科学中, 克立格方法已应用于土壤水、径流模数的估值, 并且在布设水文与气象站点时, 克立格也提供了强有力的理论依据<sup>[1~3]</sup>。降雨量是具有随机性与规律性双重特征的区域化变量, 本文以无定河流域 1990 年至 1997 年的年降雨量为对象, 运用克立格方法分析了该流域降雨量的空间变异特征。

## 1 克立格方法

克立格方法<sup>[4~6]</sup> (Kriging) 是由南非的地质学家、采矿工程师克立格 (D. G. Krige) 于 1951 年提出, 后来法国学者马特隆 (G. Matheon) 于 1962 年提出“区域化变量”的概念后, 得到不断发展和完善。它是一种特定的滑动加权平均法。这种方法假定采样点间的距离和方向可反映一定的空间关联, 并利用它们来解释空间的变异性。它主要是利用一定的数学函数对特定点或是给定搜索半径内的所有点进行拟合来估计每个点的值, 对处理含有距离和方向上的偏差的数据尤为适用。

**收稿日期:** 2002-01-30; **修订日期:** 2002-06-16

**基金项目:** 国家重大基础研究 (973) 项目 (G1999043602); 中国科学院地理科学与资源研究所创新主干项目 (CXIOG-E01-08-03); 中国科学院海外杰出青年专家合作项目

**作者简介:** 李丽娟 (1961-), 女, 吉林人, 研究员, 博士。研究方向为环境水文与水资源, 近年发表论著 40 余篇 (部)。E-mail: lilj@igsnr.ac.cn

要对 Kriging 方法中的区域化变量进行估值, 首先必须确定影响因素的范围, 即变程。而变程的确定, 必须通过半变异函数模型的计算得出, 这样才能排除随机因素的影响。同时, 对于 Kriging 方法中的协方差矩阵的计算, 也需要预先知道半变异函数值, 所以半变异函数是 Kriging 方法的基础之基础, 重中之重。可以说所有的 Kriging 计算都是基于半变异函数的分析而得出的。

### 1.1 半变异函数

克立格法的分析工具就是半变异函数。半变异函数  $r(h)$  来自于英文单词 (Semivariogram), 如果用  $P$  表示空间内一点, 用  $Z(P)$  表示空间内这点的函数, 那么在所研究范围内的空间协方差用  $r(h)$  表示, 其数学表达式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum (Z(X_i) - Z(X_i + h))^2 \quad (1)$$

式中,  $N(h)$  为相距  $h$  的数据对数,  $h$  是距离矢量。从上面的定义可知,  $r(h)$  仅仅是任意两点之间距离  $h$  的函数。根据  $r(h)$  和  $h$  点绘成图 (称为试验半变异函数图), 用数学公式拟合, 就可得到理想的半变异函数模型。

### 1.2 Kriging 的表达与计算

对任一变量在点  $x$  处的估计值  $Z_x^*$ , 可以通过该点影响范围内  $n$  个有效观测值  $Z(X_i)$  的线性组合得到, 即:

$$Z_x^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,  $\lambda_i$  是赋予观测值  $Z(X_i)$  的权重, 表示各个观测值  $Z(X_i)$  对估计值  $Z_x^*$  的贡献。

在进行点 Kriging 估值计算时, 信息样品就是点样品值。这时所有权系数的计算十分简单, 只需计算距离, 克立格矩阵  $[K]$  只依赖于样品  $X$ , 第二元矩阵  $[Ma]$  为信息样  $X_i$  与待估点  $X_0$  之间的协方差。本文中所处理的其实就是点 Kriging 估值。

在水科学中, 克立格方法已经涉及到地下水、地表水、土壤水等很多的领域。它不但有自己一套比较系统的数学、统计分析工具, 而且对于结论也有比较好的验证方式<sup>[1,2]</sup>。对于降雨量而言, 一方面它受到经纬度、高程等规律性因素的影响, 同时又受到许多复杂的随机性因素的影响, 刚好满足克立格的估值条件和要求。因此, 可以运用克立格方法对其进行插值分析和计算。

## 2 数据预处理和对数克立格方法

克立格插值是基于正态分布进行的。而在自然界中, 很多不能取负变量与对数正态分布有密切的关系。比如风速、人口密度、生物个体大小、大气气溶胶粒径、土壤和岩石中大多数微量元素等的频率分布, 都属于或者接近对数正态分布<sup>[7]</sup>, 降雨量也是其中的一例。因此, 在进行降雨量的插值时, 首先要对数值进行对数正态变换。本文以黄河中游无定河流域为研究对象, 选取其中 67 个雨量站 1990~1997 年的降雨量为数据源。同时克立格方程的矩阵形式或矩阵中的具体符号含义也有所变化:

$$\text{对于点的插值变为:} \quad \ln Z_x^* = C + \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln Z(X_i) \quad (5)$$

式中,  $C$ 、 $\lambda_i$  为待定系数,  $X_i$  为定义于信息支撑  $V_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 的  $n$  个信息样品观测值。

### 3 实际应用

降雨、径流、侵蚀产沙之间存在着紧密的关系，若能找出降雨与径流之间、径流与产沙之间的数量关系，就可以根据降雨的变化趋势预测径流、侵蚀产沙的变化趋势。这对研究区域的水土流失、环境变迁，尤其在黄土高原地区是很有现实意义的。无定河地处黄土高原区，是黄河中游最大的多沙支流。本文应用地质统计方法对无定河流域的降水进行了时空变异性分析。

无定河发源于陕西省靖边、定边、吴旗三县交界的白于山，是黄河中游河口—龙门区间最大的支流，由西向东经内蒙古伊克昭盟和陕西省榆林、延安地区，于清涧县河口村汇入黄河。无定河干流全长 491.1km，全河比降为 1.97‰，流域内总面积为 30261km<sup>2</sup>，其中水土流失面积达 23137 km<sup>2</sup>，占总面积的 76.5%，侵蚀模数达 8000t/km<sup>2</sup>·a。流域属温带大陆性干旱半干旱气候类型。按地形地貌及水土流失特点，可分为风沙区、河源梁涧区

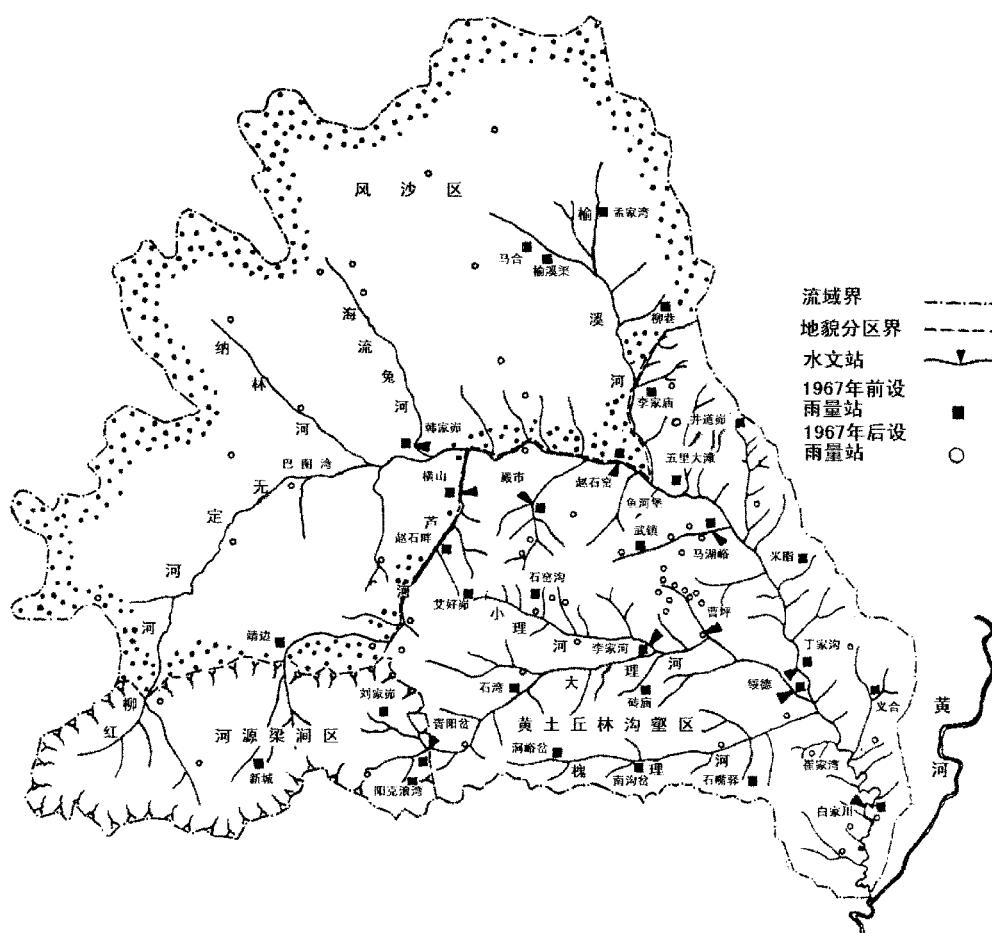


图 1 无定河流域主要雨量站示意图

Fig. 1 The sketch map of the main rainfall stations in Wuding River Basin

及丘陵沟壑区。该区降雨量具有量少、集中、强度大的特点。据 1957~1989 年白家川站的实测资料统计可知，无定河流域多年平均年降雨量 409mm，降水年内分配的特点是：降雨以汛期（6~9 月）为主，主要集中在 7、8 月份，而且这些雨量多由若干次高强度的暴雨、大暴雨构成。汛期降雨量约占全年雨量的 75%，极端最大月降雨量可达到年降雨量的 70% 以上。此外，年降雨量的变率也很大，最高年变率达 6~7<sup>①</sup>。流域内有雨量站 90 多个，其中近一半是 1975 年以后设立的。主要雨量站的位置分布如图 1 所示。表 1 中列举了韩家岭、靖边、横山、殿市、丁家沟、李家河等 6 个代表性雨量站 1990~1997 的降雨量数据。

表 1 部分雨量站降水数据 (1990~1997) (mm)  
Tab. 1 Precipitation in typical rainfall stations (1990 ~1997) (mm)

站名	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
韩家岭	401.90	279.90	374.90	159.40	259.40	243.40	267.90	394.40
靖边	432.80	436.90	431.60	325.10	514.00	261.60	527.80	406.20
横山	401.00	333.30	375.00	263.10	391.50	298.90	354.80	330.60
殿市	461.20	309.80	457.50	286.30	491.30	326.30	390.70	279.40
丁家沟	452.30	408.00	433.80	367.90	634.30	482.00	483.80	396.40
李家河	474.90	415.30	466.10	318.40	518.30	454.60	427.10	243.40

该流域年降雨量经对数化后的基本统计资料如表 2。变异系数最小 0.28，最大为 0.42，说明了降雨量在时间上分布的不均匀性。

表 2 基本统计资料  
Tab. 2 Basic statistical data

年份	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
均值	5.862131	5.79234	5.929431	5.668724	5.998442	5.822549	5.812261	5.502723
方差	0.050667	0.046585	0.061219	0.065488	0.042449	0.061638	0.06604	0.087671
变异系数	0.3143	0.305006	0.341561	0.369516	0.281147	0.349018	0.361907	0.420258

对样点按照公式 (1) 作出实验半变异函数图。根据图分析发现，试验半变异函数符合球状模型。对于较易识别的实验半变异函数图可用直接法对球状模型拟合，求出待定参数。对于用直接法难以得出模型参数值的情况，可以运用最小二乘法的原则，采取加权多项式回归法对变异曲线进行球状模型的最优拟合<sup>[6]</sup> (图 2)。

球状模型的一般形式：

$$r(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right] & h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (6)$$

① 戴明英，闫蕾. 无定河水沙变化的分析研究，黄河水沙变化研究论文集第四卷，黄河水沙变化研究基金会，1993。

确定理论变异函数模型的最终目的在于,定量地揭示降雨量区域化变量的空间变异规律,并将其结果直接用于降雨量的空间最优插值。因此,如果理论变异函数模型确定得好且较为符合实际,就应该最终体现在根据周围信息点对实测点的空间估计值与实测值之差的平方平均最小,我们把它作为拟合理论变异函数模型“最优性”检验的标准。

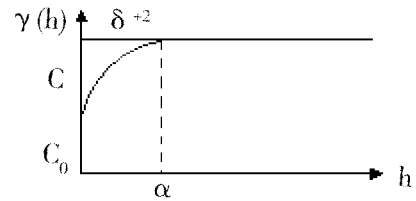


图 2 球状模型曲线图

Fig. 2 Curve map of spherical model

表 3 拟合结果参数一览

Tab. 3 Fit-in parameters in the model

参数值	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
$\alpha$ (km)	22.21	20.17	49.66	27.90	68.65	49.23	20.95	52.34
$C_0$ (mm <sup>2</sup> )	0.013	0.024	0.042	0.027	0.036	0.056	0.027	0.21
$C$ (mm <sup>2</sup> )	0.029	0.023	3.742M	0.052	1.02M	3.56M	0.06	1.41M
$r$ (km)	11	10	8	11	8	8	6	8
$\sigma_e^*$	0.18	0.21	0.18	0.22	0.19	0.26	0.18	0.35
样点数	67	67	67	60	60	56	67	60

注: M 为  $10^6$

计算半变异函数的几点认识和说明:

在实际计算半变异函数时,由于数据的间距不规则,通常的做法是按区间 $[k-\epsilon(h), k+\epsilon(h)]$ 将所有的距离组合成距离组,用距离在 $[k\pm\epsilon(h)]$ 内的所有数据对来计算 $r(kh)$ (其中 $\epsilon(h)$ 称为距离误差限),一般在计算时选择距离误差限 $\epsilon(h)\leq 2/h$ 。本文中定为 $2/h$ 。

对于一个特定的数据样点集,间距小,则意味着实验半变异函数曲线不平滑,落在每个距离段内的点对数相应也少,不利于分析。而间距的增加,意味着块金效应的增大,这说明在某种程度上半变异函数受到人为因素的影响,所以在计算和拟合时,分隔距离的选取就显得尤为重要。本文通过设置滑动杆的方法,在4km到20km这个距离范围搜索最佳分隔距离。同时,因为变异函数只有在最大间距的1/2内才有意义<sup>[8]</sup>,所以只采用间距小于或等于最大距离一半的点对参与实际计算。

在所分析的系列中,所有年份都存在块金效应。块金效应反映了随机变化,块金值通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,较大的块金方差值表明较小尺度上的某种过程不容忽视<sup>[9]</sup>。若块金效应为零,也并不表示数据无测量误差或随机特性,只是说明随机效应的尺度小于相关尺度——变程,设置的距离段太大而掩饰了或不足以表现出这种随机效应或测量误差。因此,将零块金效应理解为块金值很小更为合理<sup>[10,11]</sup>。在所研究的时间序列中,变程从20.17km到68.65km不等。变程反映的是空间点的自相关性,变程大则自相关的尺度广。在我们所研究的时段中,1994年的变程最大,1991年的变程最小,说明前者的降雨量变化比较缓和,而后者的降雨量空间变化相对较烈。

除了用 $\sigma_e^*$ 来检验拟合模型的好坏外,通常我们也可运用对比检验的方法来分析所选方法的适用性。

## 4 应用分析与结论

通过参数的求得,运用选定的模型可以对区域内的点或块段进行插值或是成图。对于降雨量而言,我们根据选定的克里格方法和拟合的模型,做出各个年份的降雨量等值线图,并基于此作出降雨量三维空间分布图(图3,图版4)。这样,对于降雨量的空间分布和时间变异特征,我们就能比较容易地识别出来。同时若能结合地形和高程图,运用数学统计方法,我们还能找出影响降雨量的主导因素。

特别是三维空间分布图,我们能够直观地获得降雨量的空间变异情况,同时对比不同年份的图幅,我们还能获得时间上的变化情况。选择分布较为集中的50个站点作为空间插值成图区,即图1中的虚线区域。对于选定的区域而言,其东北、西北部降雨量变化幅度较小,同时降雨量也比较少,在图上表现出比较平缓的趋势(1992年除外),流域的中南部变化较大,在图上表现为比较剧烈的起伏。而1997年的降雨量空间场变化和以往各年相比又有明显的不同,首先该年的南部,尤其是中南部降雨量较少(与以往年份相比),而中北部降雨量却明显偏大。若分析较长的时间序列,还可以获得降雨量在时间上的变异特征。

空间分析方法和插值手段是多种多样的,如何选择一种,适宜于实情分析并且能得到最佳应用的理论方法,仍然是一个值得探讨和深入研究的问题。我们此次应用对数kriging方法,对无定河流域1990~1997年的降雨量时空分异情况进行了定量分析和成图,是对水文变量时空分异规律探讨的一个新的尝试,从而使水文变量在时空分异规律方面的研究有了进一步的深入<sup>[12]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Liu S, Mo X, Li H, *et al.* Spatial variation of Chinese soil moisture: Geostatistics characteristics. *Journal of the Meteorology Society of Japan*, 2001, **79**(1B): 555~574.
- [2] 张征. 地下水资源与环境研究中空间变异性分析理论及其应用. 北京师范大学博士后研究报告, 1998.
- [3] 穆桂林, 曹百会, 等. 年径流模数的克里格插值. *水文*, 2000, (20): 41~44.
- [4] 侯景儒, 黄竞先. 地质统计学在矿产储量计算中的应用. 北京: 地质出版社, 1990.
- [5] 侯景儒, 尹镇南, 等. 实用地质统计学. 北京: 地质出版社, 1998.
- [6] 孙洪泉. 地质统计学及其应用. 北京: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [7] 陶涛. 应用数理统计方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [8] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄河丘陵小流域土壤水分的时空变异性——半变异函数. *地理学报*, 2000, **55**(4): 428~437.
- [9] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*, 2000, **11**(4): 557~563.
- [10] 李海滨, 林忠辉, 等. Kriging方法在区域土壤水分估值中的应用. *地理研究*, 2001, **20**(4): 446~452.
- [11] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值. *地理学报*, 2002, **57**(1): 47~56.
- [12] 刘苏峡, 张士锋, 刘昌明. 黄河流域水循环研究的进展和展望. *地理研究*, 2001, **20**(3): 257~265.

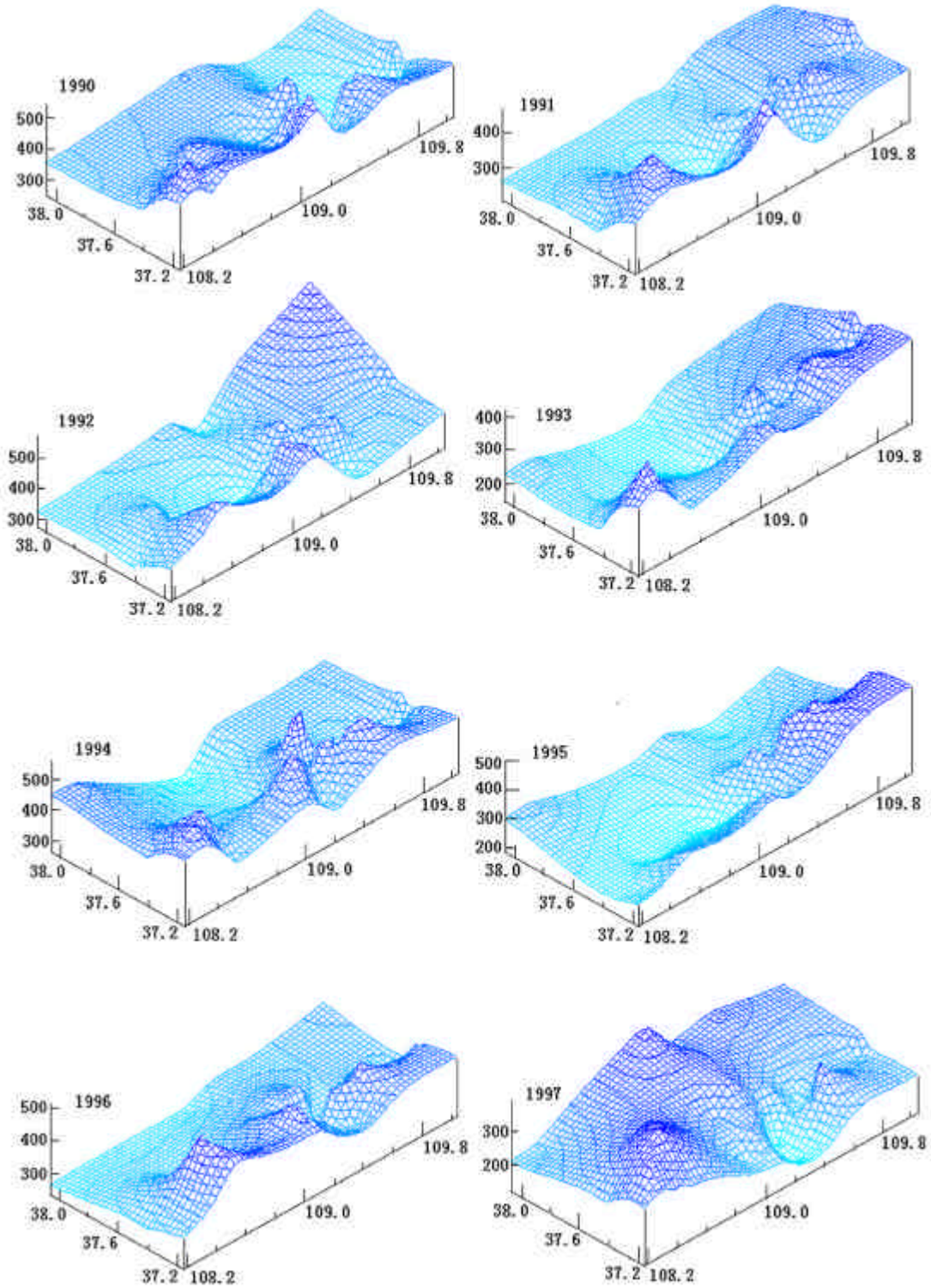
## Analysis of the spatial variability of rainfall in Wuding River Basin

LI Li-juan, WANG Juan, LI Hai-bin

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Wuding river basin lies in the middle reaches of the Yellow River, the typical area of the Loess Plateau which is characterized by serious soil erosion. So the analysis of hydrological factors such as precipitation is invaluable for understanding water cycle process and its impact on the watershed. Geostatistical methods, originating from geology in the 1950s, have been expanded to many other scientific fields for their unique statistical and interpolating advantages. In this paper, we tried and applied ordinary Kriging (OK) technique, one of the geostatistical methods, to analyze the spatial variability of annual precipitation at 67 rainfall stations for this watershed during the period from 1990 to 1997. Because of the attributes of the rainfall data of which the frequency distribution tallies with logarithmic normal distribution, the original data were processed by logarithmic transformation, corresponding the logarithmic Kriging technique was taken as the analyzing and interpolating method, which made the application of geostatistical technique more convenient and easier, also the analysis more reasonable. The result revealed that the semi-variograms of rainfall were best described by spherical variogram model, suitable to most natural variables, and subsequently it was chosen to fit in the needed parameters for interpolation. From the final parameters attained, it was indicated that the ranges of each year in the studied time series were not the same, even varied greatly. The range of 1991 was up to 20.17 km, which was the minimum, while that of 1994 appeared to be 68.65 km, with the coefficient of variability of the year being the minimal. This consequence can best explain that the period of 1994 was the most even period in the time series for the variability of rainfall in Wuding river basin. In the meantime, studies indicated the existence of the nugget effect in each year; which may be primarily caused by random factors at a spatial scale less than the range. After the analysis of rainfall data using Kriging technique, three-dimensional maps of different years were created for the further study and utilization, which made the spatial variation easy to be discerned. The northeast and northwest parts are characteristic of low variations with low rainfall compared with other regions, while the middle part of the south exhibits high fluctuation. If the statistical analysis is combined with other maps such as the relief map or DEM, some other meaningful information can also be acquired.

**Key words:** ordinary Kriging technique; spatial variability; Wuding river basin; rainfall



注：横坐标为经度，纵坐标为纬度，垂直坐标为降雨量(mm)

图 3 选择区域 1990~1997 年降雨量三维图

Fig.3 3D maps of rainfall in the selected area (1990~1997)