

# 基于 GIS 的降雨空间插值研究

## ——以湖南省为例

阳宽达<sup>1,3</sup>, 谢红霞<sup>1</sup>, 隋兵<sup>2</sup>, 周清<sup>1</sup>, 刘沛<sup>1</sup>, 王海涛<sup>1</sup>

(1.湖南农业大学 资源环境学院, 长沙 410128; 2.气象防灾减灾湖南省重点实验室,  
长沙 410007; 3.中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘 要:**降水数据是区域水文模拟、水资源分析和管理及地质灾害预警等方面的基础数据,提高降雨数据的插值精度具有重要的理论和现实意义。以湖南省为研究区,结合站点观测降雨数据、TRMM 雷达降雨数据及 DEM 数据,采用克里金插值和协同克里金插值两种方法进行了降雨插值,通过对比研究降雨插值精度。结果表明:(1)引入与降雨空间信息相关的 TRMM、DEM 数据的协同克里金插值能够提高插值精度,以 TRMM、DEM 为辅助变量的协同克里金插值的平均相对误差较克里金插值降低了 0.02%,0.23%;(2)降雨观测数据插值结果对于 TRMM、DEM 这两种协变量表现出不同的灵敏度,以 DEM 为协变量的克里金插值的插值精度要高于以 TRMM 为协变量的克里金插值,研究区的降雨量与地形因素有更高的相关性。

**关键词:**普通克里金插值;协同克里金插值;降雨;插值精度

**中图分类号:**P426.6; P426.62<sup>+</sup>2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2020)03-0134-05

## Research on Spatial Interpolation of Rainfall Based on GIS

### — A Case Study of Hunan Province

YANG Kuanda<sup>1,3</sup>, XIE Hongxia<sup>1</sup>, SUI Bing<sup>2</sup>, ZHOU Qing<sup>1</sup>, LIU Pei<sup>1</sup>, WANG Haitao<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University,

Changsha 410128, China; 2.Hunan Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction,

Changsha 410007, China; 3.School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Rainfall data are the basic for regional hydrological simulation, water resources analysis and management, geological hazard warning, etc. It is of great theoretical and practical significance to improve the interpolation accuracy of rainfall data. Hunan Province is taken as the research area. The station data, TRMM data and DEM data are used for rainfall interpolation by the ways of Kriging and CoKriging. The interpolation results are compared to study the accuracy of rainfall interpolation. The results show that: (1) CoKriging interpolation using the TRMM and DEM as data source which is related to rainfall spatial information can improve interpolation accuracy; the average relative errors of CoKriging interpolation with TRMM and DEM as auxiliary variable are 0.02% and 0.23% lower than Kriging interpolation, respectively; (2) The interpolation results of station data show different sensitivity to the auxiliary variables of TRMM data and DEM data; The interpolation accuracy of CoKriging with DEM as auxiliary variable is higher than CoKriging with TRMM as auxiliary variable. The rainfall in the study area has a higher correlation with the topographic factors.

**Keywords:** ordinary Kriging interpolation; CoKriging interpolation; rainfall; interpolation accuracy

降雨是影响水循环最为活跃的因素之一,其时空分布的不均匀性对流域产汇流的形成起着决定性的作用<sup>[1]</sup>。建立高密度气象观测站是获取区域降雨信

息的关键,但受控于人力物力和地形等条件限制,气象观测站点的布设仍然十分有限,因此为了获取研究区内各处的降水量,通常根据有限的雨量站降雨数据

收稿日期:2019-01-14

修回日期:2019-04-10

资助项目:湖南省水利科技项目(湘水科计[2017]230-34);国家自然科学基金(41371184);湖南省大学生研究性学习和创新性试验计划项目(SCX1816)

第一作者:阳宽达(1993—),男,湖南省郴州市人,硕士研究生,专业为地理信息系统 kobelovexz@qq.com

通信作者:谢红霞(1973—),女,湖南岳阳人,副教授,研究方向为区域水土保持、环境遥感与 GIS。E-mail: xiehongxia136@sina.com

隋兵(1975—),男,湖南岳阳人,副研究员,研究方向为气象科学。E-mail: 2565711@qq.com

进行空间插值模拟来获得<sup>[2-3]</sup>。

随着 GIS 的广泛应用以及降水量空间信息需求的日益增加,降水量的空间插值应用越来越广泛,现在用于降水资料空间插值的方法有多种<sup>[4]</sup>,主要有克里金插值法、协同克里金插值法、径向基函数插值法、样条函数插值法及反距离加权法等<sup>[5-8]</sup>。克里金插值法采用半变异函数来定量研究区域化变量的变异特性<sup>[9]</sup>,能够分析和处理数据中存在的趋势和各向异性,并且能够选取最优的拟合函数<sup>[10]</sup>,因此得到广泛应用。但是在观测数据较少时或抽样点比较分散时,变异函数的拟合效果较差,无法获得良好的拟合效果,目前主要通过增加与降雨相关的辅助地理信息来改进插值的精度,如 Adhikary<sup>[11]</sup>等人使用普通克里金、协同克里金及外部漂移克里金法等 5 种方法,结果表明协同克里金插值法在月降雨量插值上的预测误差最小,是该地区空间降雨分布的最佳插值方法,此外 Teng 等<sup>[12]</sup>发现 TRMM 降雨数据与气象观测数据之间具有良好的相关性,并且将 TRMM 降雨数据和高程数据引入协同克里金插值中,取得了良好的插值效果。

基于前人的研究结果,本文以 ArcGIS 为平台,以湖南省 2002—2011 年观测站点降雨数据、TRMM 降雨数据以及 DEM 数据为数据源,选择克里金插值法、基于不同协同区域化变量的协同克里金法,并对插值结果进行验证,旨在选择适合研究区最优的空间插值方法。

## 1 研究区概况

湖南省地处长江中游南部,位于东经 108°47′—114°15′,北纬 24°39′—30°08′。全省土地面积 21.18 万 km<sup>2</sup>,是连接东部沿海省与西部内陆省的桥梁地带。地貌以山地、丘陵为主,全省三面环山,形成一个从东南西三面向北倾斜开口的马蹄形盆地。全省属于典型的亚热带季风气候,冬季受西伯利亚和蒙古高原南下的冷气团控制,气候干冷,夏季为低纬度海洋暖湿气团所盘踞,高温多雨,春秋季节气候温和。研究区域年平均降水量在 1 200~1 700 mm,年平均温度在 16~18℃,雨量充沛,热量充足。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据选取

本文选取了湖南省 96 个气象站点(图 1)和 TRMM 降雨数据的 2002—2011 年的逐日降雨资料,计算得到 2002—2011 年的平均降雨量,并匹配各气象站点以及 TRMM 降雨的经纬度坐标,建立 GIS 数据库,该数据库包括:气象站点矢量图、TRMM 降雨矢量图、DEM 栅格图和湖南省行政区划矢量图。

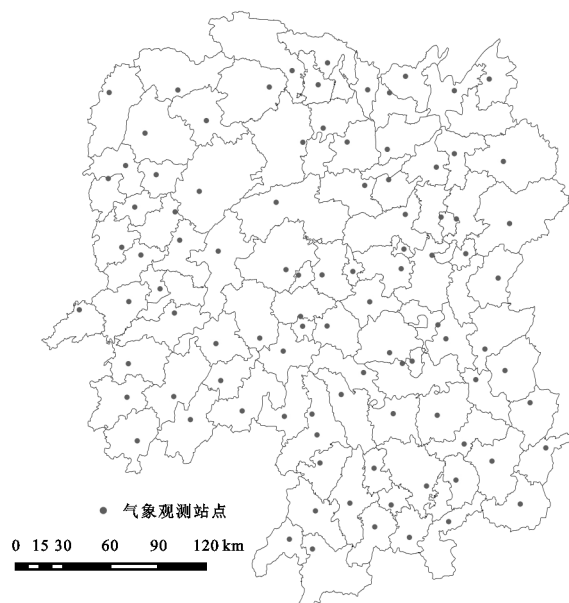


图 1 湖南省气象站点分布

### 2.2 数据处理和分析

利用 ArcGIS 对观测站点的矢量图、TRMM 降雨数据的矢量图以及 DEM 栅格图以省域行政区矢量图层相一致的投影坐标系统为基准进行投影变换,利用 ArcGIS 10.2 软件中的地统计分析模块中 Explore Data 提供的正态 QQ 图工具对年平均降雨数据进行检验和探索并剔除离群值,在 GIS 软件中进行克里金和协同克里金插值获得不同空间插值方法的插值结果。

由于本文采用的普通克里金的插值,所以要求数据满足正态分布,如果数据不满足正态分布,则需要通过 log 或 box-cox 进行数据变换使得数据满足正态分布。本文选取正态 QQ 图作为检验数据是否符合正态分布的工具(图 2 和图 3)。气象观测数据和 TRMM 降雨数据仅有少量的离群点没有落在正态分布的参考线上,故可以考虑选中离群值进行删除,以提高克里金插值的精度。

### 2.3 研究方法

2.3.1 克里金插值(Kriging) 该方法最早是由南非矿山工程师 Krige 提出,后由法国地理数学家 Matheron 优化的插值方法<sup>[13]</sup>。克里金插值是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法<sup>[14-15]</sup>,是地统计学的主要内容之一<sup>[16]</sup>。

在克里金方法中,普通克里金法由于假设条件较少和需求参数比较简单,是最为常用的一种方法,公式为:

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中: $Z^*(X_0)$ 为估算点降水的预测值; $\lambda_i$ 为参与插值的站点对估算点降水量的权重; $X_i$ 表示实测气象站点的位置; $Z(X_i)$ 表示气象站点的实测值。

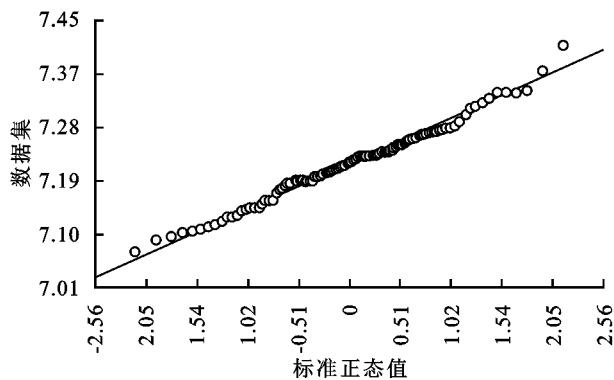


图 2 气象观测数据的正态 QQ 图

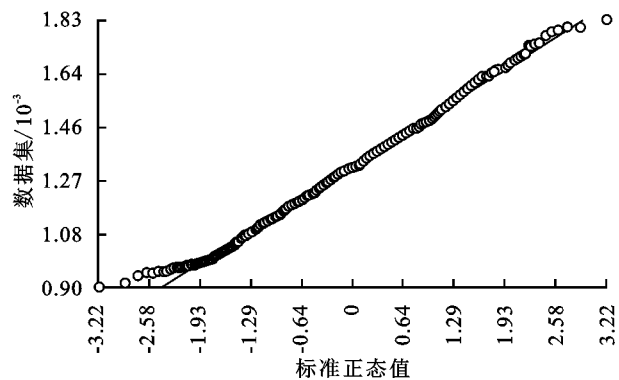


图 3 TRMM 数据的正态 QQ 图

2.3.2 协同克里金插值(CoKriging) 协同克里金插值是指除了主变量之外,还引入协同区域化变量的一种多变量的插值模型。协同区域化变量又称为协变量或者辅助变量,它是指在同一空间范围中,具有空间相关性和统计相关性的变量<sup>[17]</sup>。其实质是克里金法的扩展,把插值模型从单一属性发展到 2 个以及 2 个以上的协同区域化属性<sup>[18]</sup>。协变量与主变量之间通常存在一定的相关关系,并且假设这种相关关系能够提高插值的精度。本文以 TRMM 数据以及 DEM 降雨作为辅助变量进行降雨插值,两个变量的协同区域化克里金插值公式如下<sup>[19]</sup>:

$$Z_{2,ck}^*(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_{1i}Z_1(x_{1i})+\sum_{j=1}^n\lambda_{2j}Z_2(x_{2j}) \quad (3)$$

式中: $Z_{2,ck}^*(x_0)$ 为估算点降水的预测值; $\lambda_{1i}$ 为参与插值的站点对估算点降水量的权重; $Z_1(x_{1i})$ 为气象站点的实测值; $\lambda_{2j}$ 为参与插值的 TRMM 降雨或者高程对估算点降水量的权重; $Z_2(x_{2j})$ 为 TRMM 降雨或者高程的实测值。

3 个变量的协同区域化克里金插值公式如下:

$$Z_{3,ck}^*(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_{1i}Z_1(x_{1i})+\sum_{j=1}^n\lambda_{2j}Z_2(x_{2j})+\sum_{k=1}^n\lambda_{3k}Z_3(x_{3k}) \quad (4)$$

式中: $Z_{3,ck}^*(x_0)$ 为估算点降水的预测值; $\lambda_{1i}$ 为参与插值的站点对估算点降水量的权重; $Z_1(x_{1i})$ 为气象站点的实测值; $\lambda_{2j}$ 为参与插值的 TRMM 降雨对估算点降水量的权重; $Z_2(x_{2j})$ 为 TRMM 降雨站点的实测值; $\lambda_{3k}$ 为参与插值的 DEM 对估算点降水量的权重; $Z_3(x_{3k})$ 为高程的实测值。

2.3.3 不同模型计算精度评价 为了对不同插值方法的结果进行验证和对比,本文选用交叉验证法来判断各插值结果的好坏。交叉验证法的原理是利用每个实测点周围的点对该实测值进行预测,将预测值与该实测值本身进行比较<sup>[20]</sup>。本文通过平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MAE)及均方根误差(RMSE)等指标来评定插值结果的精度。

设测定点的实测值为  $Z(x_i)$ ,预测值为  $Z'(x_i)$ ,

则它们的平均误差 ME、平均绝对误差 MAE、平均相对误差 MRE 和均方根误差 RMSE 可分别表示为:

$$ME=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n[Z(x_i)-Z'(x_i)] \quad (5)$$

$$MAE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N|Z(x_i)-Z'(x_i)| \quad (6)$$

$$MRE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N\left|\frac{Z(x_i)-Z'(x_i)}{Z(x_i)}\right| \quad (7)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N[Z(x_i)-Z'(x_i)]^2} \quad (8)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 插值结果

利用 GIS 软件对不同插值方法下的插值结果进行制图,采用自然间断点分级法将降雨量分成 10 个等级来比较插值结果(图 4—7)。从整体上看,克里金以及协同克里金插值的插值趋势大致相同,均能大致反映出湖南省的空间降雨分布特征<sup>[21]</sup>。湖南省降雨空间分布大致呈现出东南向西北方向递减,湘西自治州西北部、怀化西部、邵阳东南部、常德东部、益阳北部以及岳阳西北部与其他地区相比,降雨量较少,而益阳安化由于受地形的影响成为湖南省中西部地区的一个高降雨地带,雨量充沛,多年的年降雨量达 1 600 mm 以上。

#### 3.2 插值结果精度分析

以湖南省气象站点数据、TRMM 降雨数据、DEM 数据作为基础,基于普通克里金插值、以 TRMM 为协变量的协同克里金插值、以 DEM 为协变量的协同克里金插值以及以 TRMM 和 DEM 为协变量的协同克里金插值,对插值结果运用交叉验证法进行分析(表 1)。通过比较可知:(1) 各个插值方法的平均误差均较小,说明各插值方法的估值误差的都较小;(2) 将 TRMM 数据和 DEM 数据作为协变量进行协同克里金插值时,能够在一定程度上减少克里金插值的误差,从而使结果更为准确,此外以 DEM 作为协变量的协同克里金插值的误差要小于以

TRMM 为协变量的协同克里金插值,说明主变量对各个协变量的敏感度不一;(3) 将 TRMM 和 DEM

作为协变量的协同克里金插值将减少一定的插值误差,但是缩小的幅度比较小。

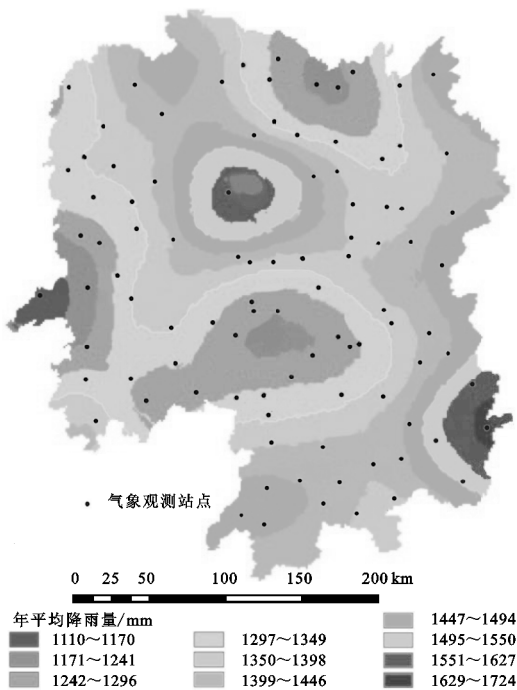


图 4 观测数据的插值结果

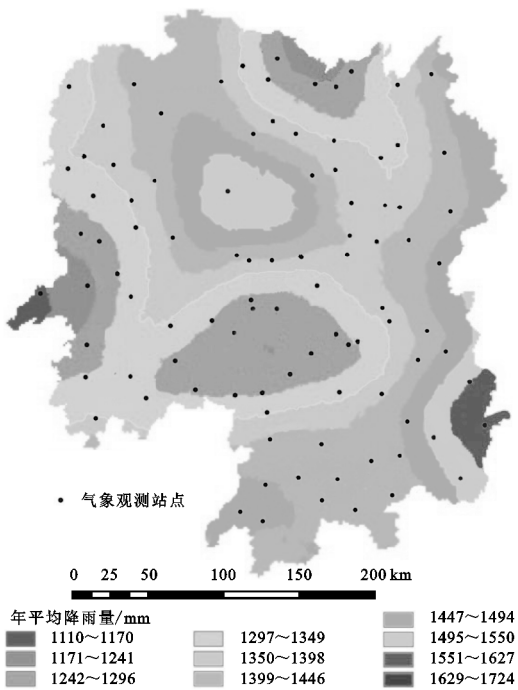


图 5 以 TRMM 降雨数据为协变量的插值结果

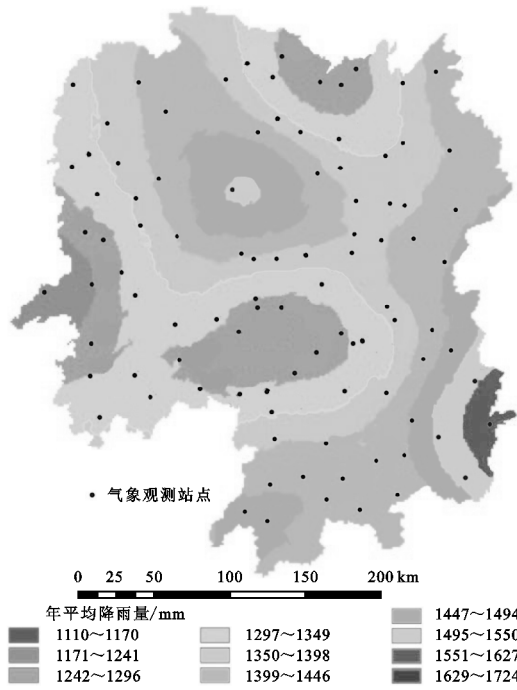


图 6 以 DEM 数据为协变量的插值结果

利用 SPSS 软件统计对不同插值方法获得的统计指标(表 2)进行分析。从插值后数据的最大、最小以及平均值来看,以 TRMM 和 DEM 数据作为协变量的协同克里金插值法插值的最大最小值更接近于原始实测值;克里金插值法插值后的降雨数据与原始实测数据的相关系数为 0.686,以 TRMM 为协变量的协同克里金插值法为 0.703,以 DEM 为协变量的协同克里金插值法为 0.719,以 TRMM 和 DEM 数据为协变量的协同克里金

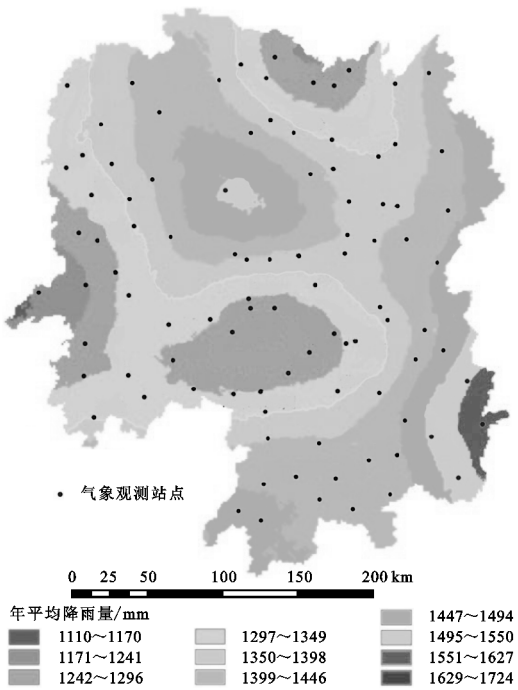


图 7 以 TRMM 降雨数据、DEM 数据为协变量的插值结果  
插值法为 0.726,与其他插值结果相比,以 TRMM 和 DEM 作为辅助变量的空间插值在各项指标上表现出一定的优越性,因此其插值结果最佳。

由分析可知,在湖南省有限的气象观测站点的基础上,相比于其他插值方法,以 TRMM 和 DEM 作为协同区域化变量的协同克里金插值的误差最小,而且其相关系数是最高的,因此其插值精度是 4 种方法中最高;以 TRMM、以 DEM 为协变量的协同克里金



插值能够在一定程度上提高插值精度,而以 DEM 作为协变量时的精度要高于以 TRMM 为协变量的协同克里金插值;这说明了 DEM 对于降雨观测数据的影响要高于 TRMM 对于降雨观测数据的影响。

表 1 克里金、协同克里金交叉验证结果统计

| 验证指标插值方法               | 平均误差  | 平均绝对误差 | 平均相对误差/% | 均方根误差 |
|------------------------|-------|--------|----------|-------|
| 克里金插值法(观测数据)           | -2.28 | 56.00  | 4.06     | 73.97 |
| 协同克里金插值(观测数据+TRMM)     | -1.81 | 55.28  | 4.04     | 72.25 |
| 协同克里金插值(观测数据+DEM)      | -1.30 | 52.85  | 3.83     | 70.82 |
| 协同克里金插值(观测数据+TRMM+DEM) | -0.60 | 52.31  | 3.79     | 70.09 |

表 2 不同插值方法的统计结果

| 统计指标插值方法               | 最大值/mm  | 最小值/mm  | 平均值/mm  | 相关系数  |
|------------------------|---------|---------|---------|-------|
| 原始数据                   | 1726.30 | 1110.08 | 1365.10 |       |
| 克里金插值法(观测数据)           | 1589.02 | 1228.61 | 1363.13 | 0.686 |
| 协同克里金插值(观测数据+TRMM)     | 1588.71 | 1216.16 | 1363.35 | 0.703 |
| 协同克里金插值(观测数据+DEM)      | 1604.27 | 1113.29 | 1367.30 | 0.719 |
| 协同克里金插值(观测数据+TRMM+DEM) | 1605.67 | 1109.26 | 1366.67 | 0.726 |

4 结论

空间插值方法是研究区域变量空间分布的基本方法,本文以湖南省为研究区,以省内 96 个气象站点的 2002—2011 年降雨观测数据和 TRMM 降雨数据及 DEM 数据为数据源,选用克里金插值和基于不同协变量的协同克里金插值来比较插值精度。结果表明:(1) 上述 4 种插值方法均能反映湖南省年均降水量的分布特征,而以 TRMM,DEM 作为协变量的协同克里金插值在各项指标上表现出优越性,更能反映出湖南省年均降水量的空间分布情况;(2) 通过对不同克里金插值的比较,表明主变量对不同的协变量具有不同的灵敏度;(3) 由于 21.18 万 km<sup>2</sup> 只有 96 个站点,上述几种插值方法的相关系数均不是很高,加上目前所选用的插值方法在湖南年均降水量的空间插值中并不是最理想的,因此还需要考虑更多的因素,如增加观测站点密度、提高研究区站点布设的合理性、建立更合理的地形参数及结合遥感信息综合定量分析等方面,这些都有待今后更加深入地研究。

参考文献:

[1] 周祖昊,贾仰文,王浩,等.大尺度流域基于站点的降雨时空展布[J].水文,2006,26(1):11-16.

[2] Lloyd C D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain[J]. Journal of Hydrology, 2005,308(1): 128-150.

[3] 邬伦,吴小娟,肖晨超,等.5 种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究:以深圳市为例[J].地理与地理信息科学,2010,26(3):19-24.

[4] Lam N. Spatial interpolation methods;a review[J]. the American Cartographer, 1983,10(2):129-150.

[5] Das M, Hazra A, Sarkar A, et al. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India[J]. Mausam, 2017,68(1):41-50.

[6] 卢克.基于玉环市降雨资料的空间插值方法适用性研究[J].浙江水利水电学院学报,2018,30(2):25-28.

[7] Pellicone G, Caloiero T, Modica G, et al. Application of several spatial interpolation techniques to monthly rainfall data in the Calabria region (southern Italy) [J]. International Journal of Climatology, 2018,38(9):3651-3666.

[8] 张超,孙绩华,段玮.云南区域站降水资料利用 Furfer 软件实现 Cressman 插值的研究[J].成都信息工程学院学报,2018,33(1):84-90.

[9] 白军红,余国营,张玉霞.湿地土壤养分的空间异质性研究方法构想[J].水土保持学报,2001,15(5):68-71.

[10] 李璐,姜小三,孙永远.基于地统计学的降雨侵蚀力插值方法研究:以江苏省为例[J].生态与农村环境学报,2011,27(1):88-92.

[11] Adhikary S K, Muttill N, Yilmaz A G. Cokriging for enhanced spatial interpolation of rainfall in two Australian catchments[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(12):2143-2161.

[12] Teng H, Shi Z, Ma Z, et al. Estimating spatially down-scaled rainfall by regression kriging using TRMM precipitation and elevation in Zhejiang Province, southeast China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014,35 (22):7775-7794.

[13] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963,58(8):1246-1266.

- (D17):D17115.
- [5] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 71-95.
- [6] Costa A C, Santos J A, Pinto J G. Climate change scenarios for precipitation extremes in Portugal[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 108(1/2): 217-234.
- [7] Karl T R, Knight R W, Plummer N. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century[J]. *Nature*, 1995, 377(6546): 217-220.
- [8] Zhang X, Hogg W D, Mekis, et al. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1923-1936.
- [9] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 中国年和季节极端降水时空特征及极值分布函数上尾部性质[J]. *地理科学*, 2017, 37(6): 929-937.
- [10] Shi Y F, Shen Y P, Kang E S, et al. Recent and future climate change in Northwest China [J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [11] Zhu S J, Chang Z F. Temperature and precipitation trends in minqin Desert during the period of 1961—2007 [J]. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(3): 214-219.
- [12] 辛志远, 史激光, 刘雅琴, 等. 锡林郭勒地区降水时空分布特征及变化趋势[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 312-316.
- [13] 贺俊杰. 锡林浩特市 50 年降水量变化特征分析[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(29): 278-285.
- [14] 陆桂荣, 郑美琴, 周秀君, 等. 近 55 年的日照市极端降水事件分析[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 137-141.
- [15] 姜燕敏, 李松平, 张勇, 等. 丽水不同等级降水日数多时间尺度变化特征[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(35): 275-279.
- [16] 杨东, 程军奇. 甘肃黄土高原近 52 年四季极端降水变化特征[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(11): 180-187.
- [17] Zolina O, Simmer C, Gulev S K, et al. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(6): L06704.
- [18] Santos M, Fragoso M. Precipitation variability in Northern Portugal: Data homogeneity assessment and trends in extreme precipitation indices [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 131: 34-45.
- [19] 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 312-320.
- [20] Meng X J, Zhang S F, Zhang Y Y, et al. Temporal and spatial changes of temperature and precipitation in Hexi Corridor during 1955—2011[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(4): 653-667.
- [21] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 67(11): 1482-1492.
- [22] 李小亚, 张勃. 河西地区最大连续降水事件的时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 43-48.
- [23] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [24] 虞敏, 曹广超, 曹生奎, 等. 近 30 年祁连山南坡降水量变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 241-248.
- [25] 林婧婧, 王大为, 方锋. 1961—2015 年河西走廊强降水的时空演变及其对植被的影响[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1010-1017.
- [26] 谢五三, 田红, 王胜. 安徽省近 50 年汛期极端强降水量特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2010(S2): 226-230.
- [27] 李红英, 高振荣, 白松竹. 近 51 年河西走廊西部极端强降水事件变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(10): 100-106.

~~~~~

(上接第 138 页)

- [14] 史舟, 金辉明, 李艳, 等. 地统计软件包的开发及在土壤空间变异中的应用[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 170-173.
- [15] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 163-174.
- [16] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. *测绘通报*, 2013(9): 87-90.
- [17] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于 Kriging 和 Cokriging 方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 321-327.
- [18] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. *高原气象*, 2005, 24(6): 974-980.
- [19] 胡丹桂, 舒红, 刘艳. 基于地统计方法的新疆北部雪深空间插值研究[C]. *全国数学地质与地学信息学术研讨会*, 2013.
- [20] 李艳, 史舟, 王人潮, 等. 海涂土壤剖面电导率的协同克里格法估值及不同取样数目的比较研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 434-443.
- [21] 张剑明, 黎祖贤, 章新平, 等. 湖南省近 46 年来降水时空分布特征及趋势分析[J]. *水文*, 2009, 29(4): 73-78.