

地理因素辅助的黄土高原典型流域面雨量制图效果比较与评价

马 晶^{1,2}, 陈锡云^{1,2}, 刘晓燕³

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 北京师范大学环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 黄河水利委员会, 郑州 450003)

摘要: 为了获取适宜的黄土高原流域面雨量计算方法, 选择算术平均(Am)、泰森多边形(Tsn)、普通克里金(OK)、泛克里金(UK)、反距离权重(IDW)、简单克里金(SK)、考虑海拔的简单克里金(SK_EL)以及将海拔和空间坐标信息作为辅助因子的简单克里金(SK_EXY)和地形插补法(Tr)等 9 种方法计算了环江下游流域 2006—2011 年面雨量。结果表明: (1) 各年面雨量 Am 法全流域只有 1 个数值, 无空间分布, Tsn 法呈斑块状分布, IDW 法在站点周围空间趋势表达不连续, 其余 6 种基于克里金方法的面雨量空间变化趋势基本一致, 均是从东南向西北连续递减的等值带, 其中 OK 的插值曲面最平滑, Tr 与 SK 法的结果更加符合降雨随地形的变化趋势; (2) 24 站测值为基础的单年和多年交叉验证结果均表明各种方法插值所得面雨量的精度以考虑高程和站点空间信息的 Tr 法最高, SK_EXY 其次, 并没有一种插值方法在所有的精度检验指标中都最差; (3) 当只考虑面雨量值不考虑其空间分布时, 可以选择 Am 与 Tsn 法相结合, 其值接近各种方法的均值, 而当综合考虑面雨量值及其空间分布时, 则宜选择 Tr 和 SK_EXY 法。

关键词: 面雨量; 空间插值; 效果对比; 环江下游流域; 黄土高原

中图分类号: P414. 9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0174-07

DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcbx. 2016. 06. 030

Comparison and Evaluation of Areal Precipitation Mapping Effectiveness with Consideration of Geographic Factors in the Loess Plateau

MA Jing^{1,2}, CHEN Xiyun^{1,2}, LIU Xiaoyan³

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Beijing Key Laboratory of

Environmental Remote Sensing and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875;

3. Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003)

Abstract: In order to obtain optimal areal rainfall calculating method of watershed in Loess Plateau, methods of Arithmetic mean (Am), Thiessen (Tsn), Ordinary Kriging (OK), Universal Kriging (UK), Inverse Distance Weighting (IDW), Simple Kriging (SK), Simple Kriging with elevation auxiliary (SK_EL), Simple Kriging with elevation and spatial coordinate of rain gauge auxiliary (SK_EXY), as well as Topography Regression (Tr) were employed to estimate areal rainfall of Huanjiang watershed in Loess Plateau from 2006 to 2011. Efficiencies of 9 methods were tested. Results showed that: (1) Areal precipitation from Am method was a value each year without spatial information. Tsn method generated patchy distribution, and IDW resulted in discontinuous trend around the site. Areal precipitation from the other 6 kriging based methods showed similar spatial pattern. All of them were equivalent band decreasing from the southeast to the northwest. Interpolation surface from OK was the smoothest and results from TR and SK expressed the changing trend of precipitation along terrain. (2) Both single-year and multi-year cross-validation based on the 24 rain gauges revealed that Tr and SK_EXY had the higher and SK had the lowest interpolation accuracy. (3) It is suggested that the combination of Am and Tsn method had the advantage when spatial distribution was not necessary, and the value of precipitation were close to the mean value of all methods, but Tr and SK_EXY had obvious advantage when both distribution and value of precipitation were necessary.

Keywords: areal rainfall; spatial interpolation; efficiency comparison; lower reaches of Huanjiang watershed; Loess Plateau

收稿日期: 2016-07-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41171360); 中央高校基本科研业务专项(2015); 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAB02B05)

第一作者: 马晶(1993—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: jingmabnu@163. com

通信作者: 陈锡云(1972—), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文与环境地理研究。E-mail: chen. xiyun@bnu. edu. cn

区域面雨量^[1]是研究和预测水循环状况的重要环节,利用站点观测数据估算面雨量的方法众多,而估算的准确性却是一个挑战。气象与雨量站网观测到的降雨量只代表较小范围的降雨量,由站点降雨量推求区域面雨量是水文气象和洪水预报及水利工程设计中的重要工作。估算所得面雨量的精度不仅直接关系到降雨数据的准确性,而且对以降雨为输入的分布式水文模型的结果产生影响,因而是长期以来备受重视的一项工作,目前仍是一个挑战性难题。

利用常规站点观测雨量估算面雨量的常用方法包括加权平均法^[2]、函数插值法^[3]、地理统计方法^[4]等,这些方法大都没有考虑局部地形的影响,在地形复杂地区插值精度有限。针对高程、坡度和坡向等地形因子及风向、风速等气象条件与降雨量之间定量关系的研究与认识不断加深^[5-7],利用影响降雨的因素构建的多变量回归模型来提高面雨量估算精度的工作渐次增多^[8-10]。尤其是近年来地理信息系统(GIS)空间分析方法与技术在水文水资源领域的应用日趋加强,借助 GIS 的地统计功能,以数字高程模型为基础,构建高程、坡度、坡向等地形因子及站点经度、纬度与降水量之间的定量关系,形成辅助因子,极大的提高了面雨量估算的精度^[11-12],而且使得以有限的降水资料推求无资料地区的面雨量状况成为可能。

黄土高原地区地形复杂,其对降雨空间分布的影响亦比较明显,但是考虑地形因子进行流域面雨量估算的相关工作还比较薄弱。孟庆香等^[13]运用多种插值方法对黄土高原降水量进行空间插值,发现地统计方法优于反距离插值、多项式插值和径向基函数插值;曹晓敏等^[14]研究结果与此类似;赵传燕等^[15]通过比较多元回归法、反距离加权插值、克里金插值、样条法和趋势面法对黄土高原祖厉河流域降雨的影响,发现趋势面法精度最高;万龙等^[16]利用克里金和薄板光滑样条方法对黄土高原龙区区间多年平均、年和月降雨进行插值,发现这两种方法插值精度并无显著区别。本文以 GIS 技术为支撑,结合数字高程模型,引入地形辅助因子,对地处黄土高原区的马莲河环江下游面雨量进行了空间插值,并将插值结果与算术平均法、泰森多边形法、克里金插值法、泛克里金法、反距离权重法、简单克里金法做了全面系统的对比分析,为该区域选择适宜的面雨量算法提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况及数据来源

研究区位于洪德水文站和庆阳水文站之间的环江下游流域,地理坐标为 106°30′—108°E,35°50′—36°50′N。该流域面积为 5 938 km²,流域内设有 24 个雨量站,庆阳水文站为唯一的水位与水量控制站

(图 1)。流域内分布有残塬发育的梁峁沟壑,梁峁相间,沟壑纵横,海拔 1 045~1 966 m,平均海拔 1 520 m,地形起伏较大。

研究区土壤类型主要有黄绵土、黑垆土、红粘土、淤积土等,其中黄绵土分布面积最大。本区气候为中温带大陆性季风气候,降雨受东亚季风的影响,多年平均降雨量 459.60 mm,多集中在夏秋两季(5—9 月),约占全年降雨的 50%~60%,且以大雨、暴雨为主,降雨年际变化大。受当地气候的影响,流域内植被主要以干旱、半干旱植被类型为主,植被覆盖稀疏,森林和草地植被覆盖度小且多不连片,是陇东水土流失严重的区域。

本研究降雨数据来自中华人民共和国水文年鉴第 4 卷第 8 册《黄河流域水文资料》,以及黄委会水文局和中科院水利部水土保持研究所整编的数据,主要包括庆阳水文站及流域内 24 个雨量站 1961—2011 年的逐月降雨数据。1961—2005 年各个雨量站数据均有不同程度的缺失,为了使分析具有对比性,舍弃了降雨资料不完整的年份,在研究中只采用了 2006—2011 年降雨数据。所用的 DEM 数据来自美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的最新的地球电子地形数据 ASTER GDEM(<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>),空间分辨率 30 m,在此基础上提取了各站点的高程数据与经纬度坐标数据。

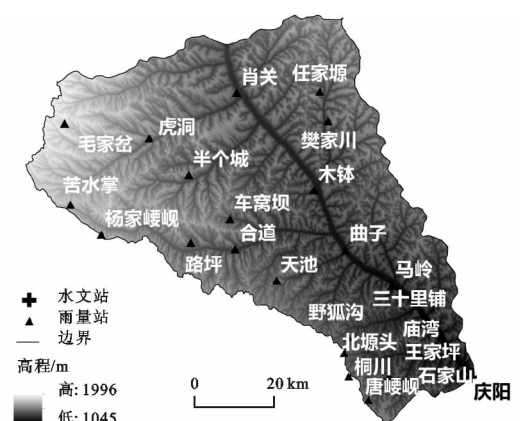


图 1 环江下游流域地形和雨量站分布

1.2 研究方法

1.2.1 面雨量计算方法 面雨量是指某一时段内一定面积上的平均雨量,可以表示为^[1]:

$$R=\frac{1}{A}\int APdA \tag{1}$$

式中:R 为面雨量;A 为指定区域面积;P 为有限元区域 dA 上的雨量。

本文使用目前已经应用较多的算术平均法、泰森多边形法、等雨量线法计算流域面雨量,进而与考虑高程和空间坐标的地形插补法估算结果进行比较。

算术平均法(Arithmetic Mean, Am)是将流域内各个雨量站测得的同期雨量相加后除以雨量站个数,得到流域面雨量。

泰森多边形法(Thiessen, Tsn)又称垂直平均法或加权平分法,是通过构建各雨量站泰森多边形得到控制面积,然后用面积为权重与各站点雨量加权平均得到流域面雨量。本研究中首先利用 ArcGIS 建立泰森多边形面积划分图,得到研究区(庆阳水文站控制区)各雨量站所控制的泰森多边形面积,然后利用泰森多边形法计算规则计算得到流域面雨量。

等雨量线法是通过绘制等雨量图,求出各条等雨量线之间的面积,再乘以相邻等雨量线间的平均雨深,得到相邻等雨量线间的平均降雨量。本文采用确定性插值和地统计插值中常用的普通克里金法(Ordinary Kriging, OK)、泛克里金法(Universal Kriging, UK)、反距离加权插值(Inverse Distance Weighting, IDW)、简单克里金(Simple Kriging, SK)、考虑高程因素的协同克里金(Simple Kriging consideration of Elevation, SK_EL)以及考虑高程和站点位置信息的协同克里金(Simple Kriging consideration of Elevation and Spatial Coordinate, SK_EXY)等 6 种不同等雨量线插值方法得到等雨量线,并计算流域面雨量。前 4 种插值方法较常见,具体介绍见文献[14,17]。

协同克里金^[18-19]是普通克里金的扩展,要用到 2 个或 2 个以上变量。考虑高程和站点位置信息的协同克里金估值方法(SK_EL 和 SK_EXY)是通过计算主变量(降雨)与辅助变量(高程、经纬度)的半方差函数和交叉半方差函数确定权重系数,对邻近点进行预测插值。其中 SK_EL 只考虑高程因素,可表示为^[20]:

$$Z_{x_0}^p = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} + \lambda [Y_{x_0} - Y + Z] \quad (2)$$

式中: $Z_{x_0}^p$ 是 x_0 点处插值得到的降雨量; Z_{x_i} 为 i 站实测降雨量; Y_{x_0} 为 x_0 处高程; Y 、 Z 为高程和降雨的全局平均值; N 为雨量站个数; λ_i 和 λ 为协同克里金权重系数。

SK_EXY^[20]是同时考虑高程及站点经度和纬度等因素的协同插值方法,插值公式为:

$$Z_k(x_0) = X_k \beta_k + ek(s) \quad (3)$$

$$\text{Cov}(ek(s)) = V_k, K=1, \dots, q \quad (4)$$

式中: $Z_k(x_0)$ 是 k 个变量下 x_0 处插值得到的降雨量; q 为变量个数; V_k 是 $ek(s)$ 的协方差矩阵。

地形插补法^[21](Topographic Regression, Tr)是将影响降雨量的地形因素作为辅助因子,构建回归模型插补无测值处降雨量,从而进行区域降雨估算。一般应用观测站的经度、纬度、高程、坡度、坡向等对降雨有影响较大的因素构建函数关系,表述为^[22]:

$$P = f(\lambda, \varphi, h, \alpha, \beta) \quad (5)$$

式中: P 是降雨量; λ 、 φ 、 h 、 α 、 β 分别代表测站的经度、纬度、高程、坡度和坡向。

基于 24 个雨量站点对研究流域年降雨量和地理要素间的分析表明,降雨量与经度呈正相关($r=0.63$, $p=0.001$),与纬度和高程呈负相关($r=-0.71$, $p=0.000$; $r=-0.22$, $p=0.299$),而坡度、坡向与年降雨之间的相关性均不显著($r=0.13$, $p=0.553$; $r=0.16$, $p=0.942$)。由此,选取测站的高程、经度和纬度 3 个因子,构建雨量与其之间的回归方程式为:

$$P = -17641.624 + 229.03 \times \lambda - 188.99 \times \varphi + 0.272 \times h \quad (6)$$

式中: λ 、 φ 、 h 的含义与上文相同。回归方程的相关系数 R^2 为 0.82,调整 R^2 为 0.67。回归平方和为 135 371.63,残差平方和为 65 334.60,回归平方和通过了 0.05 显著性水平的 F 检验。对方程中经度、纬度、高程和常数的系数的 t 检验结果显示,各项变量系数的显著性水平分别为 0.005, 0.012, 0.015, 0.074。说明模型的相关性较好,模型能很好的解释自变量和因变量之间的相互关系。

1.2.2 不同方法的效果对比与检验 插值后,利用了交叉检验方法^[23]检验不同方法的效果。具体做法是依次假设某一观测站的降水量未知,利用剩下的观测站(23 个)进行空间插值,得到此观测站的插值降雨量,将插值结果与实测数据进行对比,分析插值方法的效果。

另外,还计算了研究流域 24 个站点不同插值方法预测降雨量和实际降雨量之间的平均误差(Mean Error, ME)^[24]、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)^[24]、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)^[25]、相关系数(r)^[8]和 Nash-Sutcliffe 效率系数(E_{ms})^[8]等几项指标,定量检验插值精度。各指标计算公式为:

$$ME = \frac{1}{N} (Z_i^0 - Z_i^p) \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Z_i^0 - Z_i^p) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^0 - Z_i^p)^2}{N}} \quad (9)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^0 - \bar{Z}^0)(Z_i^p - \bar{Z}^p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i^0 - \bar{Z}^0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i^p - \bar{Z}^p)^2}} \quad (10)$$

$$E_{ms} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^p - Z_i^0)^2}{\sum_{i=1}^n (Z_i^0 - \bar{Z}^0)^2} \quad (11)$$

ME 可以总体反映误差的大小,MAE 反映误差

的范围, RMSE 可以反映估值的灵敏度和极值效应。 r 的取值范围是 $[-1, 1]$, 其绝对值越大, 表明预测值和实测值相关性越强, 模型预测效果越好。Nash-Sutcliffe 系数给出了观测值与预测值和 $1:1$ 线的拟合程度, 其变化范围为 $-\infty \sim 1$, E_{ns} 和 r 越接近于 1 表示模型质量越好, 模型可信度越高。

为了检验各种面雨量计算方法之间的差异情况, 采用单因素方差分析^[26] (one-way ANOVA) 分析了各种方法对 2006—2011 年该流域面降雨量的估算结果。将同一种面雨量计算方法得到的多年面雨量值之间误差视为组内误差, 不同方法得到的面雨量值误差视为组间误差, 选择显著性水平 $\alpha=0.05$, 对各种不同面雨量计算方法求得的流域多年面雨量值做单因素方差分析, 检验不同方法得到的面雨量之间的差异是否显著。

2 结果与分析

2.1 不同方法计算的年面雨量空间分布特征

基于环江下游流域(庆阳水文站控制区)24 个雨量站 2011 年降雨量资料, 利用不同面雨量计算方法得到流域面雨量值及其空间分布图。其中算术平均法(Am)无空间分布, 全流域只有一个值为 466.58 mm, 其余 8 种方法(Tsn、OK、UK、IDW、SK、SK_EL、SK_EXY、Tr)得到的面雨量空间分布情况见图 2。

从图 2 可知, 不同插值方法所得到的面雨量空间分布表现出一定的差异, 其中泰森多边形法(Tsn)因流域内站点分布不均匀, 在 24 站基础上所得到的各

站控制面积以北塬头站最小为 9.6 km², 肖关站最大为 634.6 km², 面积相差很大。由此得到的面雨量呈斑块状分布, 且泰森多边形法得到的站点降雨量控制范围明显大于其余几种方法, 这与泰森多边形法只考虑站点的距离权重, 未考虑站点雨量信息有关。其余的 7 种空间插值方法得到的降雨量空间分布大体相似, 均呈现出从东南向西北递减的趋势, 与于洋等^[27]、田凤霞等^[28]对黄土高原降雨空间分布研究结果一致。流域 DEM 图显示东南区梁峁相间, 沟壑纵横, 相对高程较低, 向西北方向高程逐步升高。各种方法得到的东南高值区的降雨量在 510 mm 以上, 西北低值区的降雨量在 300~400 mm 之间, 其中考虑高程和站点经纬度信息的 SK_EXY、Tr 得到的降雨高值区(540 mm 以上)范围明显大于其他方法。

各种等雨量线插值方法所得年降雨等值线形状与分布也存在一定的特征。反距离加权插值(IDW)得到的面雨量在孤立站点周围出现“牛眼”特征的多圈闭合等雨量线, 造成空间趋势表达不连续。其余 5 种基于克里金的插值方法(OK、UK、SK、SK_EL、SK_EXY)和 Tr 法的插值结果均是从流域东南向西北连续递减的等值带, 其中普通克里金法(OK)的插值曲面最平滑, 对较高降雨量估计不足, 对较低降雨估计过高, 仅仅能反映降雨的空间变化趋势, 地形插补法(Tr)与简单克里金(SK)得到的等值线整体从西北向东南凸出, 流域中部高程较低区, 面雨量相对要低, 更加符合前面所述的降雨随地形的变化趋势。

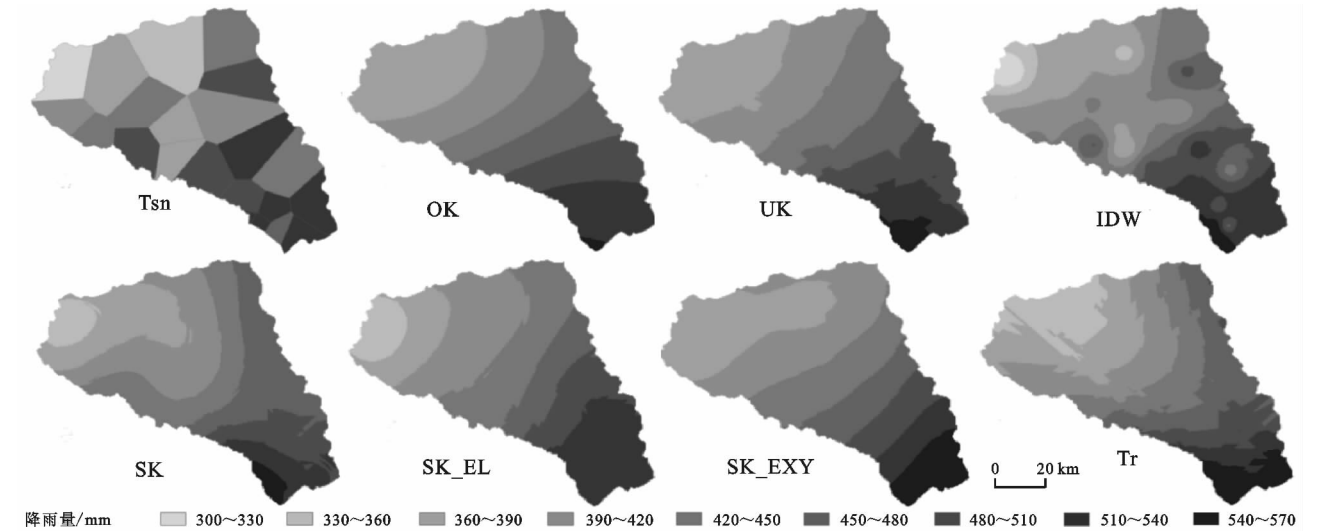


图 2 不同面雨量计算方法对环江下游流域 2011 年降水量插值结果空间分布

2.2 不同方法插值效果比较

从表 1 可以看出, OK、UK、IDW、SK、SK_EL、SK_EXY、Tr 等 7 种插值方法得到的预测降雨量与实际降雨量的相对误差范围分别在 0.35%~32.22%, 0.40%~33.09%, 0.04%~31.76%, 1.19%~38.40%, 1.01%~34.00%, 0.38%~29.99%, 0.70%~23.99% 之间。其中

Tr 的最大相对误差最小为 23.99%, 其次是 SK_EXY (29.99%)。如果将预测降雨和观测降雨之间相对误差 <20% 视为合格的话, Tr 和 SK_EXY 的合格率最高为 91.67%, 其余几种方法得到的降雨合格率为 87.50%。

进一步分析可知, SK 得到的平均误差最大 (ME=4.61 mm), IDW、SK_EL 的平均误差其次 (3.80 mm 左

右),Tr 平均误差最低(0.00 mm),其余各种插值方法平均误差在 0~1 mm 之间。

平均绝对误差和平均误差得到的结果类似,SK>SK_EL>IDW>UK>OK>SK_EXY>Tr,Tr 平均绝对误差最低为 36.46 mm,SK 方法得到的平均绝对误差最高(56.50 mm)。Tr 方法的 RMSE 最低,为 52.17

mm,SK、SK_EL 的均方根误差最高(RMSE=75 mm)。相关系数得到的结果与 ME、MAE、RMSE 正好相反,SK、SK_EL 相关系数最低(0.57),Tr 的相关系数最高(0.82)。Nash 效率系数(E_{ns})得到的结果和相关系数一致,Tr 的 Nash 效率系数最高($E_{ns}=0.67$),SK_EL 最低($E_{ns}=0.31$)。

表 1 基于 24 站 2011 年降雨量观测值的不同方法交叉插值结果

序号	站名	实际降雨量/mm	预测降雨量/mm						
			OK	UK	IDW	SK	SK_EL	SK_EXY	Tr
1	虎洞	375.30	376.63	380.99	396.37	388.14	386.27	384.46	339.68
2	肖关	353.40	412.70	417.20	421.73	441.20	445.77	385.88	357.93
3	任家塬	438.10	425.55	418.15	460.54	452.68	433.69	406.68	458.01
4	樊家川	487.70	418.76	416.28	426.87	429.50	430.45	419.87	466.85
5	木钵	399.70	450.05	454.26	451.62	463.65	483.76	439.85	411.30
6	车窝坝	383.80	434.27	435.72	410.51	418.26	439.06	428.70	399.19
7	半个城	424.10	396.26	399.64	396.72	391.29	402.88	405.10	382.71
8	苦水掌	393.70	388.76	378.04	402.44	398.37	366.57	386.93	382.76
9	毛家岔	303.00	392.96	382.71	398.83	419.34	378.51	359.70	372.28
10	曲子	522.30	468.45	472.38	467.82	429.96	483.40	475.61	439.24
11	马岭	438.90	503.18	512.45	530.52	526.79	559.23	512.96	484.12
12	天池	488.40	478.14	476.58	456.19	435.57	458.47	462.68	495.65
13	三十里铺	539.20	497.79	505.79	521.45	482.20	537.39	563.37	519.85
14	唐峡峁	575.80	546.54	546.11	566.08	555.73	522.82	552.31	612.63
15	石家山	529.30	544.41	547.52	517.48	529.89	536.40	567.22	554.70
16	王家坪	476.00	550.68	550.70	551.59	556.31	546.36	553.36	548.43
17	路坪	480.60	411.15	408.23	395.29	409.12	409.14	429.85	440.14
18	合道	360.10	462.90	460.16	431.36	449.83	455.66	440.85	401.12
19	柏树庄	514.30	537.22	535.52	567.28	552.95	533.68	529.10	523.79
20	杨家峡峁	426.40	396.59	387.46	397.98	434.15	390.33	405.34	431.01
21	北塬头	515.10	534.88	530.96	544.36	553.28	527.15	518.77	561.66
22	桐川	759.40	514.74	508.12	518.2	521.49	501.18	531.66	577.21
23	庙湾	526.60	519.05	524.84	533.77	541.09	528.37	513.37	522.94
24	野狐沟	486.80	530.32	528.71	526.38	527.98	533.31	528.61	514.81

利用 2006—2011 年 24 个站点年降雨量数据基于不同插值方法得到不同年份流域面雨量值,并根据各年的结果计算了不同的评价指标并形成了不同插值方法评价系数的箱式图(图 3)。图 3a 显示,Tr 和 SK_EXY 法 ME 最小,其中位数和平均数为 0 mm;其余 5 种插值方法平均误差中位数和平均数在 0~±2 mm 之间,其中 IDW 平均误差变化范围最大(-6~4 mm)。图 3b 显示,不同插值方法得到的 MAE 从小到大排列为:Tr<SK_EXY<OK<UK<SK<SK_EL<IDW。图 3c 显示,各种插值方法的 RMSE 得到的结果和 MAE 类似,Tr 和 SK_EXY 均方根误差(RMSE)中位数在 45 mm 左右,RMSE 变化范围分别为 35~54 mm 和 40~62 mm;其余 5 种方法 RMSE 的平均值和中位数都在 55 mm 左右变化,其中 SK 和 SK_EL 的 RMSE 变化幅度最大(43~75 mm)。图 3d 显示,Tr 和 SK_EXY 法相关系数平均

值和中位数最高(0.6),SK_EL 其次(0.5),其余各种插值方法相关系数为 0.3,且相关系数变化范围较大,并有负值出现。图 3e 显示,不同插值方法得到的 E_{ns} 趋势和相关系数得到的结果类似,就 E_{ns} 值的中位数和平均值而言,IDW<SK<SK_EL<UK<OK<SK_EXY<Tr;Tr 方法 E_{ns} 值整体较高,在 0~0.6 之间变化,其次是 SK_EXY(-0.1~0.5),OK、UK、IDW 的 E_{ns} 值最不稳定, E_{ns} 变化范围较大(-0.4~0.4)。

综合图中各种评价指标的变化特征可见,对于该流域多年降雨插值效果的精度而言,地形插补法(Tr)的 ME、MAE、RMSE 的平均值和中位数以及误差整体水平都远远低于其余 6 种方法,而相关系数 r 和 Nash 效率系数 E_{ns} 则在整体上都高于其余几种插值方法。考虑高程和空间坐标的 SK_EXY 次之。其余几种方法插值精度要低于 Tr 和 SK_EXY,在各个

精度指标下的表现并不完全相同,并没有一种方法在各种精度检验中都最差。

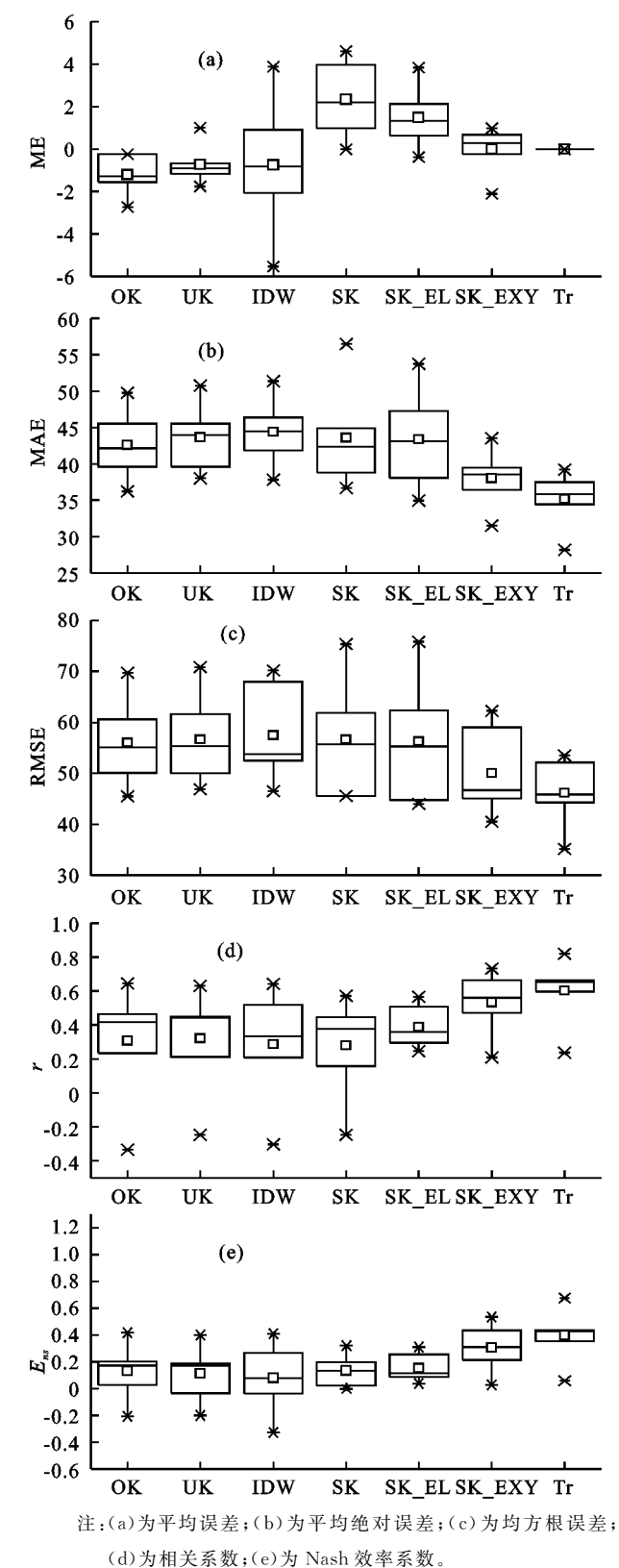


图 3 不同方法 2006—2011 年逐年降雨插值效果

2.3 不同方法计算的面雨量值差异

实际工作中,有时往往需要流域的面雨量值,而非面雨量分布,因此需要明确不同方法所得到的面雨量值的差异情况。前面基于 2011 年 24 站数据得到

流域年面雨量值算术平均法(Am)为 466.58 mm, Tsn、OK、UK、IDW、SK、SK_EL 和 SK_EXY、Tr 等方法面雨量值分别为 429.92,438.55,436.49,437.90,434.55,442.29,436.84,445.95 mm,数值变化在 429.92~466.58 mm 之间,均值为 441.01 mm,大多数方法的估算结果在 435.00 mm 左右。估值存在一定的差异,因此对不同方法所得结果差异状况的分析很有必要。

对各种方法估算得到的 2006—2011 年的多年的面雨量值的方差分析结果表明,不同面雨量计算方法得到组间平方和为 2 733.81,均方为 341.73,远远小于同种面雨量计算方法得到的组内平方和(1 267 969.17,均方为 2 717.10), $F=0.121$ 。根据显著性水平 $\alpha=0.05$,相应的临界值 $F_{\alpha}(45,8)=2.152$ 。由于 $F=0.121<2.152(P=0.998>0.05)$,表明不同方法得到的面雨量值之间无显著差异。由此可见,对各种方法而言重点的差别在于降雨空间分布状况的表达上,对全流域的面雨量值估算结果并无显著差别。基于此,在不考虑面雨量空间分布特征时,可以选择简单易用的算术平均法(Am)和泰森多边形法(Tsn)相结合估算面雨量,其值接近各种方法得到的均值。而当综合考虑面雨量值和面雨量空间分布时,则宜选择考虑高程和站点空间坐标的地形插补法(Tr)和简单克里金法(SK_EXY)。

3 结论

(1)通过对环江下游流域降雨量与各个地理要素进行相关分析,得到降雨量和纬度、经度、高程、坡度、坡向的相关系数分别为 0.63, -0.71, -0.22, 0.13, 0.16。Tr 法中构建得到流域面雨量的回归方程为: $P=-17641.624+229.03\times\lambda-188.99\times\varphi+0.272\times h$ 。模型的相关系数 R^2 为 0.82,调整 R^2 为 0.67。调整 R^2 越高,表明模型的模拟效果越好。

(2)不同面雨量计算方法得到的面雨量空间分布特征表明,Am 法无空间分布,Tsn 法得到的降雨量呈斑块状分布,其余 7 种空间插值方法(OK、UK、IDW、SK、SK_EL、SK_EXY、Tr)得到的降雨量空间分布大体相似,均呈现出从东南向西北递减的趋势。不同降雨插值方法多年交叉验证结果表明考虑高程和站点空间坐标信息 Tr 方法降雨插值精度最高,SK_EXY 其次。

(3)各种面雨量计算方法的单因素方差分析结果表明,不同方法得到的多年面雨量之间并无显著差异。在不考虑面雨量空间分布特征时,可以选择将算术平均法和泰森多边形法相结合估算面雨量,当要综合考虑面雨量值和面雨量空间分布特征时可以选择 Tr 和 SK_EXY 法。

参考文献:

- [1] 徐晶,姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象, 2007,33(7):15-21.
- [2] 龙胤慧,廖梓龙. 基于泰森多边形法的庆阳市面雨量计算[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2012,29(3):64-67.
- [3] Andrew T,Roddy H,Richard T,et al. Thin plate smoothing spline interpolation of daily rainfall for New Zealand using a climatological rainfall surface[J]. International Journal of Climatology,2006,26(14):2097-2115.
- [4] Chappell A,Renzullo L J,Raupach T H,et al. Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia[J]. Journal of Hydrology,2013,493(11):105-114.
- [5] Hession S L,Moore N. A spatial regression analysis of the influence of topography on monthly rainfall in East Africa[J]. International Journal of Climatology,2011,31(10):1440-1456.
- [6] 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.
- [7] 杨森,孙国钧,何文莹,等. 西北旱寒区地理、地形因素与降雨量及平均温度的相关性:以甘肃省为例[J]. 生态学报,2011,31(9):2414-2420.
- [8] Zhang X,Srinivasan R. GIS-Based spatial precipitation estimation: A comparison of geostatistical approaches [J]. Journal of the American Water Resources Association,2009,45(4):894-906.
- [9] 虎雄岗,谈树成,金艳珠,等. 基于地形高程的云南省降雨量空间插值方法研究[J]. 热带地理,2012,32(4):370-377.
- [10] Bostan P A,Heuvelink G B M,Akyurek S Z. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2012,19(1):115-126.
- [11] 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(1/4):128-150.
- [12] Harris P,Fotheringham A S,Crespo R,et al. The use of geographically weighted regression for spatial prediction: An evaluation of models using simulated data sets[J]. Mathematical Geosciences,2010,42(6):657-680.
- [13] 孟庆香,刘国彬,杨勤科. 黄土高原降水量的空间插值方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006,34(3):83-88.
- [14] 曹晓敏,刘志红,张晓萍. 黄土高原中游降雨量的空间插值方法研究[J]. 水土保持研究,2010,17(4):217-221.
- [15] 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.
- [16] 万龙,马芹,张建军,等. 黄土高原降雨量空间插值精度比较:KRIGING 与 TPS 法[J]. 中国水土保持科学, 2011,9(3):79-87.
- [17] 许民,王雁,周兆叶,等. 长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(3):327-334.
- [18] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河,等. 基于 GIS 和统计模型的黄土丘陵沟壑区土壤水分插值方法[J]. 水土保持学报, 2013,27(6):93-96.
- [19] Hengl T,Heuvelink G B M,Rossiter D G. About regression-kriging:From equations to case studies [J]. Computers and Geosciences,2007,33(10):1301-1315.
- [20] 刘胤雯,赖格英,陈元增,等. 梅江河流域年均降雨量空间插值方法研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2007,2(3):29-34.
- [21] 张阳,包为民,刘京一,等. 基于地形影响因子的相关插补方法研究及应用[J]. 贵州气象,2006,30(5):18-21.
- [22] 田景环,于超杰. 加入地形因素的流域面雨量研究[J]. 水利科技与经济,2011,17(12):8-10.
- [23] 吴昌广,林德生,周志翔,等. 三峡库区降水量的空间插值方法及时空分布[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(7):752-758.
- [24] Daly C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets[J]. International Journal of Climatology,2006,26(6):707-721.
- [25] 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[J]. 地理学报,2002,57(1):47-56.
- [26] 贾俊平. 统计学[M]. 第5版. 北京:中国人民大学出版社,2015:241-250.
- [27] 于洋,卫伟,陈利顶,等. 黄土高原年均降水量空间插值及其方法比较[J]. 应用生态学报,2015,26(4):999-1006.
- [28] 田风霞,赵传燕,冯兆东. 黄土高原地区降水的空间分布[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(5):1-5.