

# 喀斯特地区降水量空间插值方法对比

## ——以贵州省为例

莫跃爽, 索惠英, 焦树林, 赵宗权, 张洁, 赵梦, 刘炜, 李银久

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

**摘要:**利用贵州省 17 个气象站 1960—2018 年降水资料,采用反距离权重法(IDW)、普通克里金法(OK)、样条函数插值法(Spline)、趋势面插值法(Trend)4 种方法,按多年平均、月平均、最大 3 个月及最小 3 个月不同降水量指标进行分析,对贵州省降水量空间插值模拟结果进行了交叉检验。结果表明:4 种方法的年均降水插值精度和最大 3 个月降水插值精度为 Spline>OK>Trend>IDW;最小 3 个月降水量插值结果显示 OK 法的插值结果最好,IDW 法效果最差;月降水量插值结果的 MAE,MRE 和 RMSE 的变化都呈现出明显的季节性,平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)表现为秋冬两季误差低于春夏两季,平均相对误差(MRE)的值在春季和秋季较高,4 种插值方法误差值排序为 IDW>Trend>Spline>OK,OK 法的插值结果较好,随着降水量的增加,模拟的降水量插值情况变差。(3)贵州省年降水量在空间上变化较大,总体上由南向北减少,年降雨量最高区域主要位于西南部,毕节地区降水最少;采用 Spline 法对年均降水量进行插值,出现渐变平滑条带现象,其插值结果较为均匀准确,在空间分布上符合贵州省的实际情况,空间插值较好。

**关键词:**喀斯特山区;降水量;空间插值;贵州省

中图分类号:P426

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0164-07

## Comparison of Spatial Interpolation Methods of Precipitation — A Case of Karst Area in Guizhou Province

MO Yueshuang, SUO Huiying, JIAO Shulin, ZHAO Zongquan,  
ZHANG Jie, ZHAO Meng, LIU Wei, LI Yinjiu

(School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:**Based on precipitation data from 17 meteorological stations located at Guizhou, China, we used four interpolation methods such as reverse distance weight (IDW), Ordinary Kriging(OK), Spline, and Trend to simulate and cross-validate the average monthly precipitation from 1960 to 2018, in which the application involved yearly, monthly, the highest 3-month, and the lowest 3-month time scale. The results showed that the interpolation accuracies on yearly, monthly, the highest 3-month, and the lowest 3-month decreased in the order: Spline>OK>Trend>IDW, the OK was the best approach since it had the highest accuracy on the lowest 3-month time step, however, the result of the IDW method was unsatisfactory; the values of MAE (Mean Absolute Error), MRE (Mean Absolute Error), and RMSE (Root Mean Square Error) on the monthly precipitation interpolation changed over seasons; RMSE and MAE in the autumn and winter were lower than those in the spring and summer, and MRE in the spring and autumn was higher than ones in other seasons; the error accuracies decreased in the order: IDW>Trend>Spline>OK; the result of OK method was good, but the effect of simulated precipitation became worse over the change of raising rainfall; the spatial distribution of the average yearly rainfall was of significant difference in Guizhou Province; overall, the spatial change of annual precipitation was decreasing from the south to the north, and the area of the

收稿日期:2020-02-05

修回日期:2020-03-25

资助项目:贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”(黔教科研发[2017]85号);贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201602)

第一作者:莫跃爽(1995—),女,贵州平塘人,硕士研究生,研究方向为岩溶水资源与GIS方向。E-mail:1689757556@qq.com

通信作者:焦树林(1969—),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事喀斯特水文水资源与流域地表过程和环境变化。E-mail:jiaoshulin@gznu.edu.cn

annual highest rainfall took place in the southwest; the lowest rainfall happened in the Bijie region. The Spline method was used to interpolate the average annual precipitation and appeared a gradual smooth strip. The interpolation result of the Spline was accurate, and its spatial distribution was consistent with the actual rainfall situation through comparing with observations.

**Keywords:** karst mountains area; spatial interpolation; precipitation; Guizhou Province

降水是气象、水文模拟最重要的信息之一<sup>[1]</sup>,降水量是决定干湿的主要因子<sup>[2]</sup>,空间化的降雨信息对于对水资源管理、建立流域水文模型、以及生态环境治理和研究气候的变化都具有重要的意义。由于地形地貌、人力财力等因素的限制,气象观测站点的数量有限且空间分布不均衡,想要获取降水的空间分布情况,需要根据观测站降水数据进行空间插值。空间插值的方法有很多<sup>[3-5]</sup>,在降水量插值方法方面得到了广泛应用。卓静等<sup>[6]</sup>在秦岭主脊区分别采用反距离权重法、普通(泛)克里金法、样条函数法和趋势面法对多年气象要素进行空间插值分析,发现规则样条法的插值效果最优。朱芮芮等<sup>[7]</sup>对日降雨量的时空变化特异进行分析,得出普通克里金和反距离权重法整体效果较好。封志明等<sup>[8]</sup>认为降水与经纬度和海拔高程复相关系数偏小时,反距离权重法插值效果更理想。Bussires 等<sup>[9]</sup>在日累计降水量的插值研究中发现地统计学克里金法优于简单的泰森多边形法和反距离权重法。赵冰雪等<sup>[10]</sup>采用反距离权重法、径向基函数法、普通克里金法和协同克里金等内插方法对安徽省的逐月降水数据进行最优方法选取的探讨。林金煌等<sup>[11]</sup>对福建省的多年平均降水和月均降水的插值方法进行探究,得到克里金方法的插值精度更高。综合分析现有的研究成果发现:研究工作大多集中在其他研究区域,针对贵州省降水的空间插值方法的研究不多,贵州省是全国唯一没有平原支撑的省份,以往对贵州省降水的研究主要侧重于时空变化的特征规律、极端降水<sup>[12]</sup>、雨日数变化<sup>[13]</sup>和气候干旱等<sup>[14]</sup>方面,通常采用一种插值方法来简单模拟降水的空间变化情况,并没有对多种插值方法进行比较,从而得出最优的插值方法,即现阶段缺乏对贵州省喀斯特地区复杂地形下多年平均降水空间插值方法的讨论和研究。另一方面,贵州省喀斯特山区地形复杂多变<sup>[15]</sup>,地势起伏大,贵州省土壤侵蚀和土地荒漠化严重<sup>[16]</sup>,降水量时空分布不均,其空间降水信息是该区域的植被生产力、农业灾害及水文水资源涵养能力等研究的重要数据支撑。因此研究该地区的降水空间插值方法具有十分重要的意义。

本文利用贵州省 17 个气象站 1960—2018 年 59 a 的月值降水观测数据,将研究时段划分,在 ArcGIS

中采用最常见的反距离权重法、普通克里金法、样条函数及趋势面法共 4 种方法进行降水空间插值,利用留一法交叉验证比较每种方法的精度,通过分析验证,试图寻求最合适的降水插值方法,以期为利用有限气象观测点更有效地反映出喀斯特地区降水空间分布特征提供参考,并为相关研究提供借鉴<sup>[17]</sup>。

## 1 数据收集与分析

### 1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南部(103°36′—109°35′E, 24°37′—29°13′N),东接湖南,北邻四川,西连云南,南界广西,东西长 570 km,南北宽 510 km,总面积 17.61 万 km<sup>2</sup>,约占全国土地总面积的 1.8%,是一个隆起于四川盆地和广西丘陵之间的亚热带高原山地区。境内山峦起伏,地貌类型复杂,气候类型多样,自然景观独特,区域差异明显。贵州省由于海拔较高,纬度较低,故冬温较高,夏温较低,省内各地年均温在 8~20℃。全省云量多,日照较少,湿度较大,各地降雨日数一般在 180 d 左右,年变化较小,与江南广大地区相比,全省降雨日数约偏多 20 d。贵州离海洋近,处于冷暖空气经常交锋的地带,降水量较多,年降水量在 850~1 600 mm,西南部苗岭西段南坡,地处西南季风的迎风坡,是范围最大的多雨区,以晴隆县为代表年降水量约达 1 580 mm,威宁、毕节一带是全省的少雨地区,年降水量在 900 mm 左右。

### 1.2 数据来源及预处理

本文对贵州省数据较完整的 17 个气象站月值气象数据进行分析(图 1),数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。根据各站资料的代表性长度,本文的研究序列采用 1960—2018 年。同时,为了进一步验证降水量的大小对插值精度的影响<sup>[18]</sup>,本文选取多年平均降水量、月降水量,降水量最大的 3 个月(5—7 月)及年降水量最小的 3 个月(12 月至翌年 2 月)进行计算。错误或缺测的数据采用其他年份同期的平均值代替;空间插值时,若附近站点数据同时缺失,则采用该站多年平均值进行插补<sup>[19]</sup>。并对降水数据的准确性进行验证。

空间自相关是按照空间赋值状况测量各变量值之间的相关关系,若同一研究区内的观测数据在空

间上相互靠近,则可描述为相关;反之,则为独立或随机分布。空间临近区域单元的相似程度可根据来 Moran's  $I$  判断,来 Moran's  $I$  取值范围为  $-1 \sim 1$ , 值越接近  $-1$  代表单元间属性值差异越大,值越接近  $1$  代表单元间属性值关系越密切,相关性越高,性质越相近,值接近  $0$  代表单元间属性值不相关<sup>[20]</sup>。本文基于 ArcGIS 相关工具,采用反距离加权的欧几里得距离法(Euclidean Distance),算得 59 a 年均降水量 Moran's  $I$  值为 0.33,说明贵州省降水数据具有的空间自相关性。

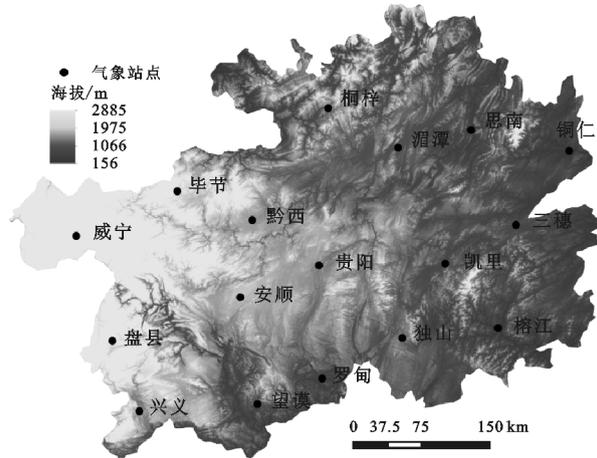


图 1 贵州省气象站分布

在数据分析之前,运用平方根、对数、立方根等变化对数据进行预处理,可使数据更趋于正态分布会提高气象数据的插值精度<sup>[21]</sup>。因此,本文对原始数据和对数、平方根、立方根 3 种数据变化进行标准偏度系数分析,偏相关系数结果见表 1:4 种数据的偏度系数均为负值,说明不对称部分的分布呈负偏态,且原始数据的偏相关系数更接近 0,即原始数据的偏相关系数比对数、平方根和立方根变化的数据更趋于正态分布,因此采用降水原始数据进行空间插值分析。

表 1 降水量偏相关系数

系数	原始	对数	平方根	立方根
偏相关系数	-0.149	-0.156	-0.152	-0.154

## 2 研究方法

### 2.1 反距离权重法

反距离权重法(IDW)是一种常见而简便的空间插值方法,根据插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大,IDW 通过对邻近区域的每个采样点值平均运算获得内插单元值,其表示公式为:

$$Z(X_0) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i)}{\sum_{i=1}^n (d_{i0})^p} \right] / \left[ \frac{\sum_{i=1}^n 1}{\sum_{i=1}^n (d_{i0})^p} \right] \quad (1)$$

式中: $Z(x_0)$ 为  $x_0$  处的估计值; $n$  为预测点周围参与

预测的站点数量; $z(x_i)$ 为  $x_i$  处实测值; $d_{i0}$ 为预测点  $x_0$  与已知样点  $x_i$  之间的距离; $p$  为距离的幂。在日常研究中,普遍采用的是令  $p=2$  的反距离平方加权法,在 ArcGIS 中; $p$  的值默认也为 2,故本文将空间插值时将  $p$  的值设为 2。

### 2.2 克里金插值法

克里金插值法(Kriging)又称空间局部插值法,它不同于反距离权重插值和样条函数插值,前两种插值是确定性的插值,克里金插值是基于统计学的插值方法,以变异函数理论和结构分析为基础<sup>[22]</sup>,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。这种方法不但能够量化已知点之间的空间自相关性,而且能够说明站点在预测区域范围的空间分布。本文采用普通克里金插值法(OK),其计算公式为:

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

式中: $Z(X_0)$ 为  $X_0$  处的估计值; $\lambda_i$  为权重系数; $n$  为雨量站点个数; $Z(x_i)$ 为  $x_i$  处的实测值。

### 2.3 样条函数插值法

样条函数插值法(Spline)的原理是采用函数逼近曲面,进而推算出整个研究区的降水量分布<sup>[23]</sup>,适用于非常平滑的表面,一般要求有连续的一阶和二阶导数,该方法的优点是保留了局部地形的细微特征,生成一个平滑、渐变的拟合曲面,具有较好的保凸性和逼真性<sup>[24-25]</sup>。本文采用基于 ArcGIS 的规则样条法进行插值,其计算公式如下:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} R(d_{i0}) + T(x, y) \quad (3)$$

式中: $Z(X_0)$ 为  $X_0$  处的估计值; $n$  为雨量站点个数; $\lambda_i$  为线性方程组求解确定的系数; $d_{i0}$  为预测点  $x_0$  与已知样点  $x_i$  之间的距离; $x, y$  分别为区域上的横、纵坐标数值; $R(d_{i0})$  是以  $d_{i0}$  为自变量的方程式; $T(x, y)$  是以  $x, y$  为自变量线性方程组; $d_{i0}$  与  $T(x, y)$  的公式见参考文献<sup>[26]</sup>。

### 2.4 趋势面插值法

趋势面插值法(Trend)是采用全局多项式回归方法,它可以作为长距离渐变特征的描述方法<sup>[11]</sup>,将由数学函数定义的平滑表面与输出采样点进行拟合,得到研究区域表面渐进趋势的平滑表面。使用的多项式越复杂,其赋予的物理意义也越复杂<sup>[22]</sup>。本文采用基于 ArcGIS 的线性趋势面插值法,其计算公式如下:

$$Z(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i(x_i, y_i) - Z'_i(x_i, y_i)]^2}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \quad (4)$$

式中: $Z(X_0)$ 为残差平方和; $n$  为雨量站点个数; $\epsilon_i$  为

残差值; $Z(x_i, y_i)$ 为实测数据; $Z'(x_i, y_i)$ 为趋势面拟合值。

## 2.5 精度检验

本文采用留一法交叉验证不同插值方法的精度, 研究中将 17 个站点随机排列, 依次假设其中一个站点的降水量未知, 用其余 16 个站点的降水量进行插值, 得到所有站点的降水量估计值, 最后计算每个站点观测值与估计值的误差。

本研究采用平均绝对误差(mean absolute error, MAE), 均方根误差(root mean squared error, RMSE)和平均相对误差(mean relative error, MRE)作为 4 种插值方法的评价指标。平均误差总体反映估计值误差的大小, MAE 可反映估计值可能的误差范围, RMSE 反映估计值的灵敏度和极值效应, MRE 能更直观地反映出测量值与计算值的差距。MAE, RMSE, MRE 值越小, 表示表面插值误差越小<sup>[10]</sup>, 精度越高, 模拟效果也越好。

$$\text{MAX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_x - Z_y| \quad (5)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z_x - Z_y}{Z_x} \right| \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_x - Z_y)^2} \quad (7)$$

式中: $Z_x$ 和 $Z_y$ 分别代表降水量实测值和预测值; $n$ 为测站数。

## 3 结果与分析

### 3.1 插值方法精度比较

通过交叉验证对 4 种方法插值的 MAE, MRE 和 RMSE 的对比分析(图 2), 结果表明:月降水量的 MAE 的排序为 IDW>Trend>Spline>OK, 其值依次为 13.59, 12.41, 11.83, 10.72。MRE 和 RMSE 的排序与 MAE 的排序一致, MRE 的值分别为 0.15, 0.13, 0.13, 0.12, RMSE 的值分布为 15.83, 15.12, 14.56, 13.50。4 种方法的 MAE, MRE 和 RMSE 的变化都呈现出明显的季节性, MAE 和 RMSE 整体表现为秋冬两季低于春夏两季, 从 1 月到 7 月, MAE 和 RMSE 的值呈上升趋势, 7 月至 12 月呈下降趋势。MRE 月值变化情况较为特殊, 表现为冬季和夏季较高, 春季和秋季较低。根据 MAE, MRE 和 RMSE 的结果可知, 4 种插值方法在贵州省普遍得到精度较高的空间降水信息, MAE 和 RMSE 的误差春夏两季低于秋冬两季, MRE 的误差在春季和秋季较低。总体来看, 4 种插值方法误差值排序为 IDW>Trend>Spline>OK, 即 OK 法的 3 项评价指标值最低, 可得贵州省月降水插值来说 OK

法的降水插值结果精度最高。故对这一结果作进一步的分析发现(表 2), 通过 4 种插值方法获得的贵州省近 59 a 的月平均降水量基本一致, 标准差、变差系数和偏差系数都是 OK 法插值数值最小, 充分说明普通克里金插值精度最好<sup>[27]</sup>。

贵州省近 59 a 的月均降水量为 96.27 mm, 春季、夏季、秋季、冬季的平均降水量分别为 101.14 mm, 182.90 mm, 77.87 mm, 23.17 mm, 从高到低排序为夏季>春季>秋季>冬季, 秋冬两季的降水量少, 4 种方法在秋冬两季的 MAE 和 RMSE 值均较小, 夏季降水起伏较大, 使得 MAE 和 RMSE 的值较大, 采用空间插值方法不能有效地模拟降水情况。可看出月降水量的变化趋势与 MAE 和 RMSE 的走向大致一样, 可推测随着降水量的增加, MAE 和 RMSE 值也会增加。

表 2 月降水 4 种插值效果的比较结果

插值方法	最小值/mm	最大值/mm	平均值/mm	标准差/mm	变差系数 $C_v$	偏差系数 $C_s$
IDW	22.106	217.936	96.375	68.866	0.716	0.520
OK	21.981	217.136	95.875	67.955	0.709	0.478
Spline	22.062	214.322	96.191	68.856	0.715	0.510
Trend	21.761	214.716	95.974	68.342	0.712	0.491

### 3.2 误差分析

从表 3 可以看出, 对于贵州省而言, 年均降水量插值精度最高的是 Spline 样条函数插样法, 其 MAE, MRE, RMSE 分别为 89.31 mm, 7.77%, 105.69 mm; 其次为普通克里金插值 OK 法, 其 MAE, MRE, RMSE 分别为 95.20 mm, 8.42%, 116.99 mm; 插值精度最低的是趋势面法, Trend 法的 MAE, MRE, RMSE 分别为 109.64 mm, 9.49%, 126.77 mm, 即对于年降水来说, 4 种方法在 MAE 上的排序为 Trend>IDW>OK>Spline, 在 MRE, RMSE 的排序为 IDW>Trend>OK>Spline; 最大 3 个月平均降水插值中, MAE 上的排序为 IDW>OK>Trend>Spline, MRE, RMSE 上的排序为 IDW>Trend>OK>Spline; 最小 3 个月平均降水量的插值中, MAE, RMSE 上的排序为 IDW>Spline>Trend>OK, MRE 上的排序为 IDW>Spline>OK>Trend。

综合 MAE, MRE, RMSE, 整体来说, 在贵州省年降水和最大 3 个月平均降水量的插值中, Spline 的 3 种评价指标值均最小, IDW 的指标值最大, 说明 Spline 法的插值效果最好, IDW 法的效果较差, 即 Spline>OK>Trend>IDW, 最小 3 个月平均降水量插值方法精度 OK>Trend>Spline>IDW。

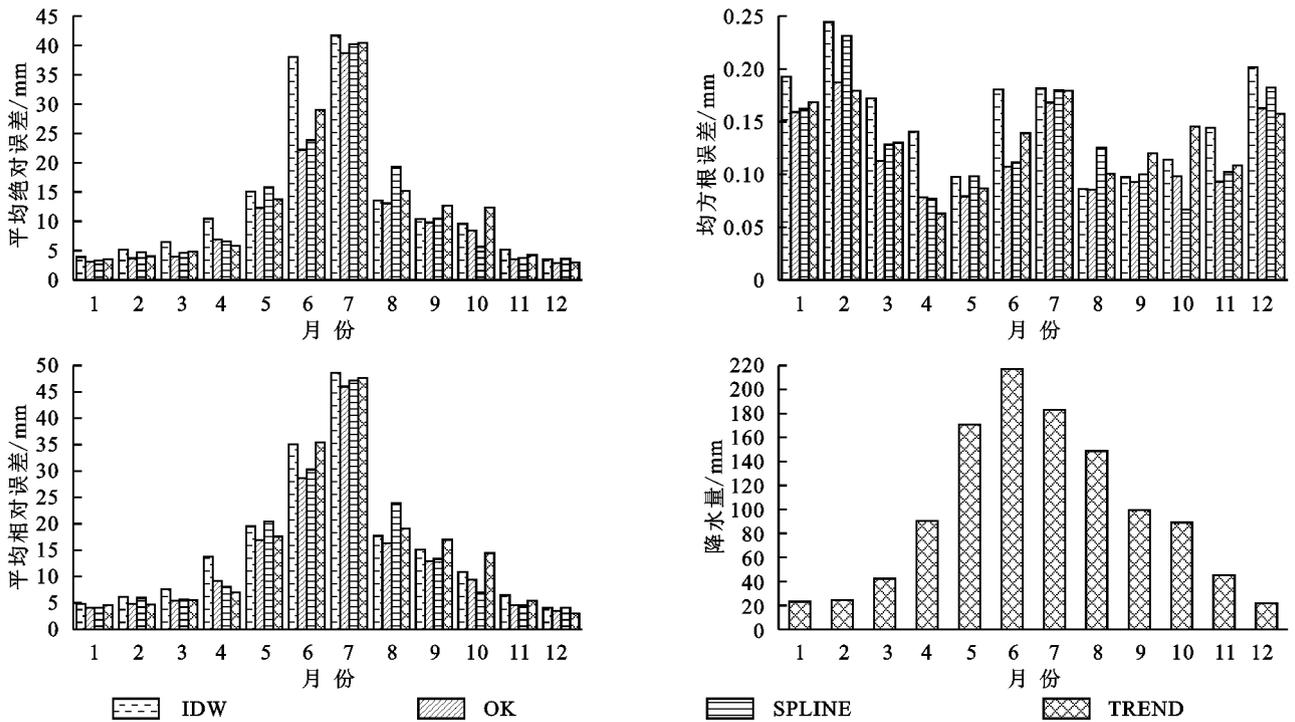


图 2 4 种插值方法对贵州省 1960—2018 年降水的 MAE, MRE 和 RMSE 对比分析

表 3 不同空间插值方法精度的比较

插值方法	多年平均降水量			最大 3 个月平均降水量			最小 3 个月平均降水量		
	MAE/mm	MRE/%	RMSE/mm	MAE/mm	MRE/%	RMSE/mm	MAE/mm	MRE/%	RMSE/mm
IDW	107.19	9.72	134.34	18.80	10.41	24.05	3.94	20.22	4.77
OK	95.20	8.42	116.99	17.25	9.31	21.67	3.06	16.18	3.93
Spline	89.31	7.77	105.69	13.90	7.37	19.34	3.64	17.80	4.28
Trend	109.64	9.49	126.77	17.06	9.36	22.10	3.17	15.07	4.06

### 3.3 降水插值结果空间分布特征

通过对 17 个站点的年均降水数据分别采用不同的插值方法生成降水表面栅格图(图 3),插值结果的参数均为系统默认参数。从图中可以看出:4 种插值方法整体上反映出,贵州省多年平均降水量的空间分布纬度地带性比较明显,大体呈自南向北递减的规律。贵州省年均降水量为 891~1 359 mm,降雨量最高区域主要位于西南部,水量在 1 250 mm 以上,安顺~盘县一带达到了最高值,为 1 358.85 mm。东北部的铜仁市是贵州省的次降水中心,年降水量在 1 200 mm 左右。中部的贵阳到湄潭、黔东南的三穗的降水量为 1 100~1 200 mm 之间。最低区位位于毕节地区,威宁—毕节一带降水量在 1 100 mm 以下,极易发生干旱现象<sup>[16]</sup>。

4 种方法的年降水量插值结果显示:Trend 法的插值效果最差,从南到北,降水量均匀递减,降水量等值线呈平行线,较为笼统,未能体现气象站降水分布的区域性特征。IDW,OK 和 Spline 法插值结果比较相似,降水低值中心位于毕节地区,降水区域主要在西南部的安顺—兴义—盘县、南部的独山、东北部的铜仁一带, IDW 法明显受到站点的影响<sup>[28]</sup>,OK 法的插值结果

不太均匀,存在突变异常值,Spline 法兼顾插值曲面的准确性与平滑度,其插值结果较为均匀,在空间分布上符合贵州省的实际情况,空间插值较好。

## 4 结论

(1) 贵州省月降水量插值结果的 MAE, MRE 和 RMSE 的变化都呈现出明显的季节性,降水量从高到低排序为夏季>春季>秋季>冬季,在秋冬两季降水量较少,MAE 和 RMSE 值均较小,夏季降水起伏较大,使得 MAE 和 RMSE 的值较大;MRE 月值变化情况较为特殊,表现为冬季、夏季较高。4 种插值方法误差值排序为 IDW>Trend>Spline>OK,OK 法的插值结果较好,随着降水量的增加,模拟的降水量插值情况越差。

(2) 综合 MAE, MRE, RMSE, 整体来说,在贵州省年降水和最大 3 个月平均降水量的插值中,Spline 的 3 种评价指标值均最小,IDW 的指标值最大,说明 Spline 法的插值效果最好,IDW 法的效果较差,即 Spline>OK>Trend>IDW,最小 3 个月平均降水量插值方法精度 OK>Trend>Spline>IDW。

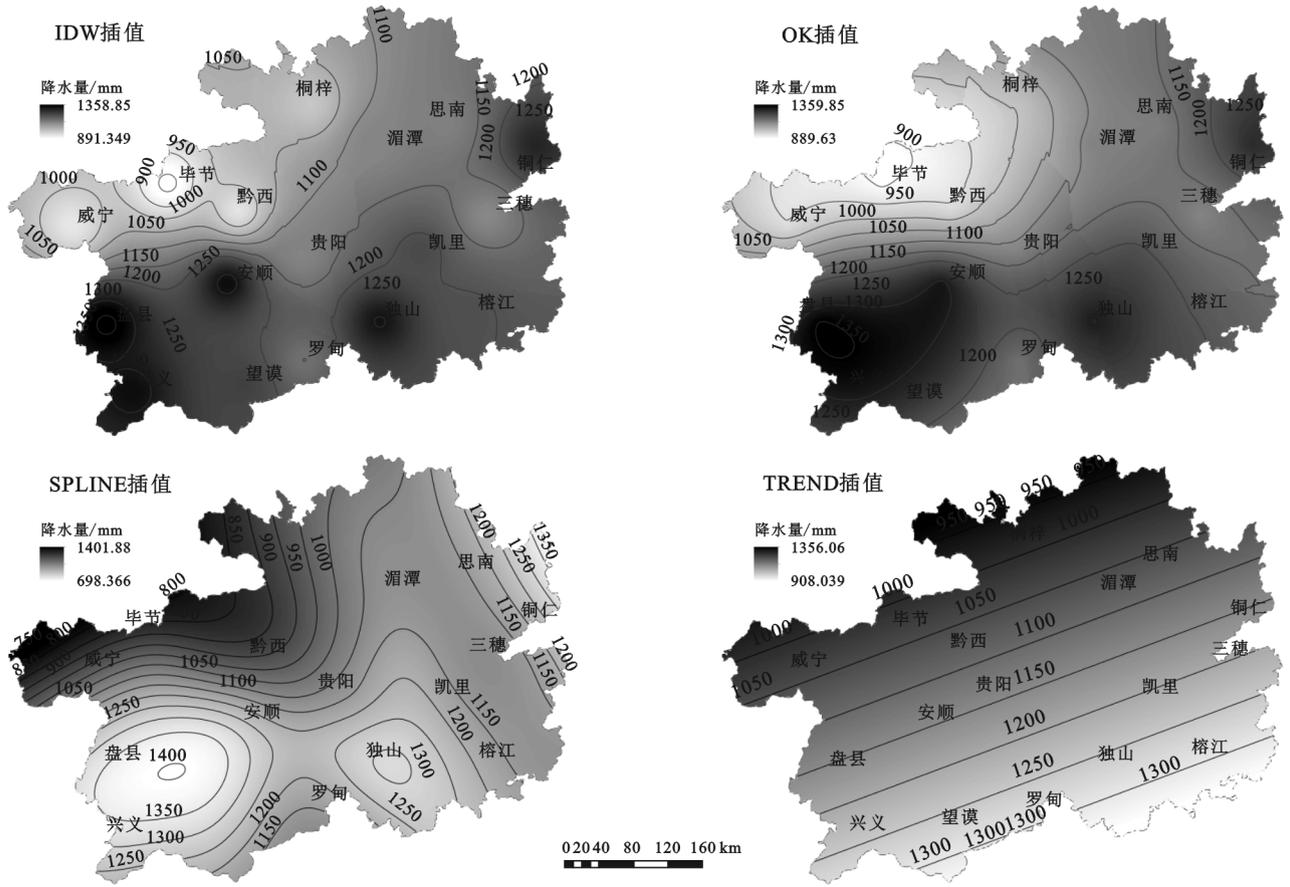


图 3 多年平均年降雨量空间分布插值结果

(3) 插值结果整体上反映了贵州省降水量由南向北减少的特点, IDW, OK 和 Spline 法插值结果的最大值和最小值情况基本一致, 年降雨量最高区域主要位于西南部, 东北部的铜仁市次之, 毕节地区降水最少。相比之下, 采用 Spline 时插值结果的降水量出现渐变平滑条带现象, 其插值结果较为均匀准确, 在空间分布上符合贵州省的实际情况, 空间插值较好。

4 种常见雨量插值模型误差呈现出不同的时空分布特性, 总体而言, 对于贵州省来说, Spline 方法适用于降水量较大的时期和区域, OK 方法则适用于降水量较小的时期和区域, 在选用时可以综合考虑。为取得更好的插值精度, 可进一步引入海拔、坡向、坡度等因子。另外, 插值软件本身的局限性在短时间内很难突破, 本文所用的气象台站不多, 为进一步提高插值精度可尽可能多的增加观测点的数量<sup>[29]</sup>, 如增加邻省或县市级台站等。在大尺度的研究中, 还可引入经度、纬度、海拔等因子进行模拟, 采用分区域插值法相结合进一步提高插值精度。

#### 参考文献:

[1] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究: 以 2009 年中国年降水为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818.

[2] 朱晖, 马孝义, 李忠娟, 等. 基于 GIS 的宝鸡峡降水量的空间插值方法分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(12): 45-48.

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

[4] Wheeler H S, Chandler R E, Onof C J, et al. Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation [J]. Stoch. Environ. Res. Risk Assess, 2005(19): 403-416.

[5] 原立峰, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 基于地统计学和 GIS 的鄱阳湖流域降雨空间差异分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 34-38, 43.

[6] 卓静, 朱延年. 秦岭主脊区年降水量空间插值最优方法研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(3): 555-563.

[7] 朱芮芮, 李兰, 王浩, 等. 降水量的空间变异性和空间插值方法的比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(7): 25-28.

[8] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素空间插值方法优化[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 357-364.

[9] Bussieres N, Hogg W. The objective analysis of daily rainfall by distance weighting schemes on a mesoscale grid[J]. Atmosphere-Ocean, 1989, 27(3): 521-541.

[10] 赵冰雪, 王雷, 程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 141-145.

[11] 林金煌, 林广发. 福建省降水空间插值方法比较与区域分布特征研究[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版,

- 2015, 28(1): 61-65.
- [12] 闫星光, 吴琳娜, 周涌, 等. 喀斯特地区月均降水协克里金插值方法研究: 以贵州省为例[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(3): 432-439.
- [13] 张波, 谷晓平, 古书鸿. 贵州省最大日降雨量时空分布及重现期估算[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 167-172.
- [14] 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(1): 10-14, 19.
- [15] 莫跃爽, 周秋文. 贵州省 1960—2014 年不同地貌类型的气温变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 166-170, 176.
- [16] 王涵, 刘琦, 任标, 等. 典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2019, 37(3): 6-12.
- [17] 邹伦, 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.
- [18] Marquinez J, Lastra J, Garcia P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(1/2): 1-11.
- [19] 刘稳, 刘国东, 夏菁. 近 57 年云南降水量时空格局及周期特性研究[J]. 人民长江, 2018, 49(S2): 80-85, 123.
- [20] 张余庆, 陈昌春, 尹义星, 等. 江西多年平均降水量空间插值模型的选取与比较[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 69-74.
- [21] 王国泰, 张守平, 杨清伟, 等. 基于空间插值方法的重庆降水信息展布[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 18-23.
- [22] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京, 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] 许雯, 董美莹, 陈锋. 基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 34-43.
- [24] 解恒燕, 张深远, 侯善策, 等. 降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 117-121.
- [25] 李军, 游松财, 黄敬峰. 中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 109-114.
- [26] 李巍, 范文义, 毛学刚, 等. 降雨量空间插值方法比较研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12): 3667-3669.
- [27] 白江涛, 白建军, 王磊, 等. 基于 GIS 的关中—陕南地区降雨量空间插值分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20872-20876.
- [28] 张仁平, 张云玲, 郭靖, 等. 新疆地区降水分布的空间插值方法比较[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 521-529.
- [29] 刘正佳, 于兴修, 王丝丝, 等. 薄盘光滑样条插值中 3 种协变量方法的降水量插值精度比较[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 56-62.

(上接第 163 页)

- [4] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960—2014 年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1900-1908.
- [5] 张万诚, 郑建萌, 马涛, 等. 1961—2012 年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学, 2015, 37(4): 710-722.
- [6] 蒋友严, 黄进. 基于 GIS 技术的甘肃省气温空间分布特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 206-211.
- [7] 何鹏, 张媛, 高文波, 等. 四川省多年平均气温数据空间插值方法与影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(9): 114-124.
- [8] 闫星光. 基于 GIS 的云贵高原典型地貌区极端降水时空分布规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [9] 徐翔, 许瑶, 孙青青, 等. 复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2018, 52(1): 122-129.
- [10] 赵冰雪, 王雷, 程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 141-145.
- [11] 周体鹏. 基于克里金插值法的昆明市 PM<sub>2.5</sub> 预测[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [12] Kang-tsung Chang. 地理信息系统导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [13] 解恒燕, 张深远, 侯善策, 等. 降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 117-121.
- [14] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100-106, 296.
- [15] 程东亚, 李旭东. 中国西南山地流域人口空间分布影响因素探究: 以贵州乌江流域为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2019, 49(5): 791-800.
- [16] 庞瑞秋, 腾飞, 魏冶. 基于地理加权回归的吉林省人口城镇化动力机制分析[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1210-1217.