

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.002

基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较

谈灿灿¹, 张润润¹, 邓志民², 宁玮^{3,4}, 布庆月¹, 章阳¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051;
3. 抚河水文水资源监测中心, 江西 抚州 344000; 4. 鄱阳湖水文生态监测研究重点实验室, 江西 南昌 330002)

摘要: 为研究空间自相关性对暴雨事件降水量空间插值精度的影响, 以乌江流域 2009—2018 年 102 个雨量站点的日降水量数据为基础, 筛选出 88 场暴雨事件, 分别采用反距离权重法(IDW)、径向基函数法(RBF)、普通克里金法(OK)、协同克里金法(CoK)对流域日降水量进行空间插值, 利用莫兰指数(Moran's I)定量分析了 102 个雨量站各场暴雨事件降水量的空间自相关性, 对比分析了不同插值方法对不同空间自相关性暴雨事件降水量的插值精度。结果表明: 随着暴雨事件降水量空间自相关性的增强, 莫兰指数增大, 4 种插值方法精度均有不同程度提升, OK 法和 CoK 法的精度提升效果更为明显; 对于流域平均而言, 莫兰指数小于 0.28 时推荐使用 RBF 法, 莫兰指数大于或等于 0.28 时推荐使用 OK 法; 对于暴雨中心而言, 莫兰指数小于 0.4 时推荐使用 RBF 法, 莫兰指数大于或等于 0.4 时推荐使用 OK 法或 CoK 法。

关键词: 暴雨事件; 降水量; 空间自相关性; 莫兰指数; 空间插值; 插值精度; 乌江流域

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0008-07

Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation

TAN Cancan¹, ZHANG Runrun¹, DENG Zhimin², NING Wei^{3,4}, BU Qingyue¹, ZHANG Yang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China;

3. Fuhe River Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Fuzhou 344000, China;

4. Poyang Lake Key Laboratory of Hydroecological Monitoring, Nanchang 330002, China)

Abstract: To investigate the impact of spatial autocorrelation on the accuracy of spatial interpolation for the precipitation of rainstorm events, based on the daily precipitation data from 102 rainfall stations in the Wujiang River Basin from 2009 to 2018, 88 rainstorm events were screened out. These events were interpolated using the inverse distance weighting(IDW), radial basis function(RBF), ordinary Kriging(OK), and co-Kriging(CoK) methods. Moran's I was employed to quantitatively analyze the spatial autocorrelation of each rainstorm event precipitation at the 102 rainfall stations, and this study compared the interpolation accuracy of different methods for rainstorm event precipitation with varying spatial autocorrelation. The results show that with the increase of spatial autocorrelation of rainstorm event precipitation, indicated by the Moran's I index, the accuracy of all four interpolation methods improves to varying degrees, and the accuracy improvement of OK method and CoK method is more obvious. For the average basin, when the Moran's I is less than 0.28, the RBF method is recommended, whereas when the Moran's I is greater than or equal to 0.28, OK is recommended. For the rainstorm center, when the Moran's I is less than 0.4, RBF is recommended, when it is greater than or equal to 0.4, OK or CoK is recommended.

Key words: rainstorm event; precipitation; spatial autocorrelation; Moran's I ; spatial interpolation; interpolation accuracy; Wujiang River Basin

空间插值是获得高分辨率降水量空间分布信息的有效途径^[1], 对于水文模型的率定和洪水预报具有非常重要的作用^[2-3]。空间插值方法种类繁多, 适用性各不相同^[4], 选择最优插值方法对于提高降水量空间插

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B220202035); 国家自然科学基金项目(41701016)

作者简介: 谈灿灿(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1343774392@qq.com

通信作者: 张润润(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事流域水文循环及模拟研究。E-mail: zhang_rr@hhu.edu.cn

引用本文: 谈灿灿, 张润润, 邓志民, 等. 基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 8-14.

TAN Cancan, ZHANG Runrun, DENG Zhimin, et al. Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 8-14.

值精度至关重要^[5-6]。

空间插值方法分为确定性插值方法和地统计插值方法两类^[7]。确定性插值方法根据区域内部的相似性进行空间插值,例如反距离权重(inverse distance weight, IDW)法是在未知点和已知点之间的相似性和距离成反比的基础上进行空间插值^[8];径向基函数法(radial basis function, RBF)法是根据实测数据选择基函数创建多条函数曲线来估计未知点的值^[9]。地统计插值方法是利用已知样点的统计特性^[10]进行空间插值,例如普通克里金(ordinary Kriging, OK)法利用测量点的统计属性拟合半变异函数来建立未知点和已知点之间的联系^[11];协同克里金(co-Kriging, CoK)法在OK法的基础上考虑了其他变量和主变量的相关性来建立未知点和已知点之间的联系。Guler等^[12]采用IDW、OK、CoK等多种插值方法对土耳其北部月降雨进行空间插值,发现各插值方法并没有显著差异。李想等^[13]以四川省夏季降水量为研究对象,比较了RBF、OK、CoK等多种插值方法的插值精度,发现RBF法和CoK法插值效果较佳。邬伦等^[14]采用IDW、RBF、OK等多种插值方法对深圳市百年一遇强降水过程进行空间插值,比较了它们在不同时段和区域的插值精度,结果表明OK法适用于降水量较大的时段和区域, IDW法适用于降水量较小的时段和区域。现有研究大多集中在比较不同插值方法的算法本身上^[15],对影响插值精度的其他因素考虑较少,研究结果一般仅适用于某个研究区的单次降雨事件,迁移性较差。

确定性插值方法和地统计插值方法都建立在样点数据具有显著空间自相关性的基础上^[16]。仇知雨等^[17]基于屯溪区域场次降雨的插值方法精度比较结果,发现时间尺度越大的场次降雨,其空间自相关性越强,插值精度越高。雨量站降水量之间的空间自相关性是影响降水量插值精度的一个重要因素^[18],但目前关于降水量空间自相关性和插值精度之间的定量关系研究较少。为此,本文以乌江流域为例,采用IDW、RBF、OK、CoK 4种空间插值方法,对该流域2009—2018年88场暴雨事件降水量进行空间插值,利用莫兰指数(Moran's I)量化暴雨事件降水量的空间自相关性,比较不同空间自相关性暴雨事件降水量的插值精度,解析空间自相关性对暴雨事件降水量空间插值精度的影响,为区域暴雨降水量插值方法优选提供参考。

1 研究区概况及数据来源

乌江流域处于云贵高原向湘西丘陵过渡的斜坡带^[19],地势西高东低^[20],地形复杂。乌江流域大部分地区属于中亚热带季风气候,气候季节性明显。流域多年平均降水量为1061 mm,降水充沛但年内分配不均,有显著旱季和雨季之分^[21],降雨多集中在夏季。

本文以乌江流域内及周围102个雨量站点2009—2018年(2012年资料缺失)共9年逐日降雨数据为基础资料进行暴雨事件筛选,DEM数据来源于计算机网络信息中心地理空间数据云平台,雨量站点分布相对均匀(图1)。

根据GB/T 28592—2012《降水量等级》,将日降水量大于50 mm的雨量站定义为暴雨站点^[22],当某日暴雨站点数目占流域总雨量站点数目的10%及以上时,即构成一场流域暴雨事件。其中每场流域暴雨事件中雨量排名前10%的站点(共10个)视为暴雨中心。据此标准共识别出88场流域暴雨事件。针对筛选出暴雨事件的降水量,分别从流域平均和暴雨中心两个层面对比不同方法的插值精度。

2 研究方法

2.1 空间自相关性

采用莫兰指数(I)量化降水的空间相关性,其取值在-1~1之间^[23]。当 $I > 0$ 时,降水量在空间上呈正相关关系,其值越大降水量空间聚集分布越明显;当 $I < 0$ 时,降水量在空间上呈负相关关系,其值越小降水量空间离散分布越明显;当 $I = 0$ 时,降水量在空间上随机分布或无空间依赖性。

2.2 空间插值方法

针对乌江流域不同空间自相关性暴雨事件,使用两种确定性插值方法(IDW、RBF)和两种地统计插值方

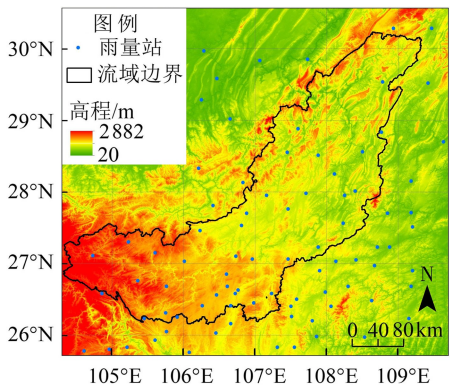


图1 乌江流域雨量站分布
Fig. 1 Distribution of rainfall stations in Wujiang River Basin

法(OK、CoK),利用区域内已知雨量站点降水量数据进行空间插值。鉴于降水量和高程之间的相关性^[24],CoK法引入高程作为协变量进行降水量的空间插值。

2.3 插值结果评价

采用留一交叉验证法比较4种插值方法的精度,每次假定其中一个站点实测值未知,利用其余站点的实测值进行空间插值,将该站点的插值估计值和实测值进行比较,重复以上过程直到研究区域内每个站点都被验证一次且仅被验证一次。各方法对每场降雨插值所采用的参数均是以交叉验证结果的最小均方根误差为指标优选获得,确保证验证结果的准确性和可靠性^[25]。具体的评价指标为实测值和插值估计值的均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、Kling-Gupta效率(KGE)^[26]。RMSE反映极端异常值及灵敏度,MAE反映平均绝对误差范围,KGE反映估计值和预测值的拟合程度。RMSE和MAE为绝对误差指标,数值越小表明插值精度越高;KGE为相对误差指标,取值为 $-\infty \sim 1$,值越接近于1表明插值精度越高^[27]。

2.4 暴雨事件降水量空间自相关性和插值精度关系分析

为分析暴雨事件降水量空间自相关性和插值精度关系,比较使用不同插值方法对不同空间自相关性暴雨事件降水量进行空间插值的精度,本文基于现有降雨资料,筛选出流域暴雨事件,计算流域暴雨事件降水量的莫兰指数以及空间插值精度。为避免局部异常点对降水量空间自相关性和插值精度的影响,采用高斯核密度函数估计莫兰指数的概率密度函数曲线,并据此进一步将莫兰指数划分为等概率区间。具体处理步骤如下:①基于流域日降雨数据,识别流域暴雨事件;②计算各场暴雨事件降水量的莫兰指数值,从流域平均和暴雨中心两个层面分别计算各插值方法交叉验证的精度评价指标值;③使用高斯核密度函数估计研究区莫兰指数的概率密度函数曲线;④依据莫兰指数的概率密度函数曲线,将莫兰指数划分10个相等的概率区间;⑤以莫兰指数各个概率区间为统计单元,分别统计相应莫兰指数区间的平均值及指定评估站点相应场次降雨的精度评价指标的平均值;⑥根据不同插值方法的10组莫兰指数及相应精度评价指标的平均值,采用直线拟合莫兰指数和精度评价指标的关系线;⑦从流域平均和暴雨中心两个层面分别比较各莫兰指数区间降水量插值方法的精度,推荐适用于不同空间自相关性暴雨事件降水量的插值方法。

3 结果与分析

3.1 暴雨事件空间自相关性分析

图2为识别出的88场暴雨事件莫兰指数频数分布直方图及概率密度函数曲线,根据概率密度函数曲线将莫兰指数取值范围按10%等概率划分区间,对应的分界点分别为0.28、0.34、0.39、0.44、0.49、0.54、0.59、0.64、0.71。由图2可见暴雨事件莫兰指数均大于0,主要集中在0.3~0.7之间,最大为0.84,最小为0.07,均值为0.49,标准差为0.15。由莫兰指数的概率密度函数曲线可知, $I < 0.39$ 的概率为30%, $0.39 \leq I < 1$ 的概率为70%,表明研究区雨量站日降水量具有很好的空间自相关性,具备开展空间插值计算的前提。

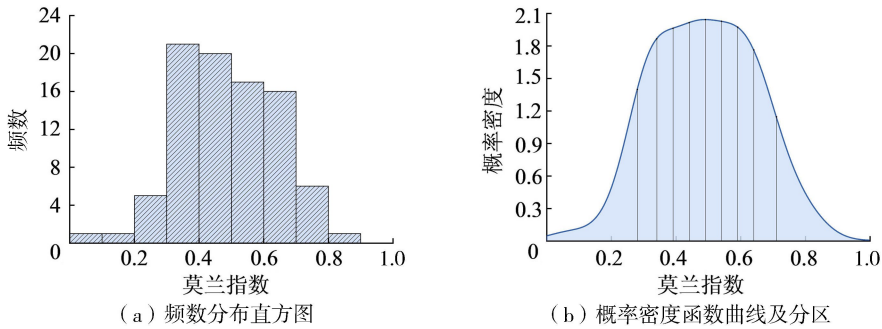


图2 88场流域暴雨事件的莫兰指数频数分布直方图和概率密度函数曲线
Fig.2 Frequency distribution histogram and probability density function of Moran's *I* based on selected 88 rainstorm events

3.2 面向流域平均的插值结果比较

图3为依据概率分区结果的莫兰指数区间均值和流域所有站点相应场次降水量的插值精度评价指标均值的拟合关系线,其中竖虚线为概率分区线,暗点为用于各概率区间取均值的原始数据点。由图3可知,4种插值方法的精度评价指标均随着莫兰指数的增大而减小,表明对于暴雨事件空间插值来说,不论使用哪

种空间插值方法,随着降水量空间正相关程度的增强,插值方法精度均有不同程度的提升,相较而言 CoK 法和 OK 法的精度提升效果更为明显。

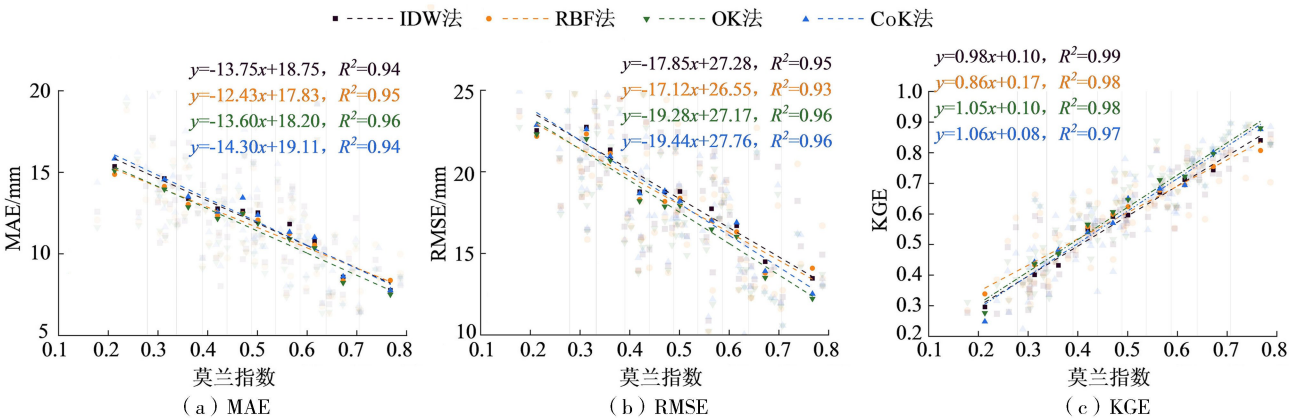


图3 4种插值方法的流域平均插值精度与莫兰指数的关系

Fig.3 Relationship between catchment average interpolation accuracy of four interpolation methods and Moran's *I*

由图3可以看出,4种插值方法拟合线有交叉,说明不同莫兰指数区间各插值方法插值精度排序不一。以绝对误差评价指标MAE和RMSE为例,当 $I < 0.28$ 时,4种插值方法的MAE和RMSE从大到小的排序均为RBF法、OK法、IDW法、CoK法,不同方法之间MAE的极差为0.97 mm, RMSE的极差为0.69 mm;当 $0.28 \leq I < 0.71$ 时,4种插值方法MAE和RMSE从大到小的排序均为OK法、RBF法、CoK法、IDW法,各方法之间MAE极差为0.66 mm, RMSE的极差为0.82 mm;当 $0.71 \leq I < 1$ 时,4种插值方法的MAE从大到小排序均为OK法、CoK法、IDW法、RBF法,不同方法之间MAE的极差为0.87 mm, RMSE的极差为1.86 mm。

从相对误差评价指标KGE来看,当 $I < 0.28$ 时,4种插值方法的KGE从大到小排序均为RBF法、IDW法、OK法、CoK法,不同方法之间KGE的差异较大,KGE的极差为0.1;当 $0.28 \leq I < 0.71$ 时,4种插值方法KGE从大到小排序均为OK法、RBF法、IDW法、CoK法,不同方法之间KGE极差为0.04;当 $0.71 \leq I < 1$ 时,4种插值方法的KGE从大到小排序均为OK法、CoK法、IDW法、RBF法,不同方法之间KGE的极差为0.07(表1)。

可见,就流域平均而言,当暴雨事件降水量空间自相关性较低时,RBF法的插值精度更高;当暴雨事件降水量空间自相关性较高时,OK法和CoK法的插值精度更高。相比之下,当莫兰指数较高(≥ 0.71)或者较低(< 0.28)时,4种插值方法的精度评价指标值差异较大,说明暴雨事件降水量空间自相关性较低及较高时,由插值方法产生的不确定性均会增大,不同插值方法的插值精度差异随之增大。

3.3 面向暴雨中心的插值结果比较

图4为依据概率分区结果的莫兰指数区间均值与暴雨中心相应场次降水量的插值精度评价指标均值的拟合关系线。4种插值方法的误差均表现出随莫兰指数增大而减小的趋势。由图4比较莫兰指数与插值方法精度评价指标关系线的斜率,可以看出莫兰指数与MAE关系线的斜率从大到小排序为OK法(0.88)、CoK法(0.85)、IDW法(0.82)、RBF法(0.79),比较4种插值方法莫兰指数与RMSE和KGE关系线的斜率,结果与MAE排序一致。这说明对于暴雨中心来说,随着暴雨事件降水量空间自相关性变高,OK法和CoK法的精度提升效果更为明显。

对于暴雨中心,由图4可知莫兰指数与4种插值方法精度评价指标的关系线在莫兰指数为0.4时出现

表1 4种插值方法的流域平均插值精度

Table 1 Catchment average interpolation accuracy of four interpolation methods

插值方法	莫兰指数	MAE/mm	RMSE/mm	KGE
IDW 法	<0.28	15.36	22.54	0.30
	0.28 ~ <0.71	12.34	18.95	0.58
	0.71 ~ <1	7.79	13.47	0.84
RBF 法	<0.28	14.87	22.18	0.34
	0.28 ~ <0.71	11.86	18.46	0.6
	0.71 ~ <1	8.38	14.09	0.81
OK 法	<0.28	15.10	22.3	0.28
	0.28 ~ <0.71	11.68	18.13	0.62
	0.71 ~ <1	7.51	12.23	0.88
CoK 法	<0.28	15.84	22.87	0.24
	0.28 ~ <0.71	12.24	18.67	0.61
	0.71 ~ <1	7.77	12.52	0.88

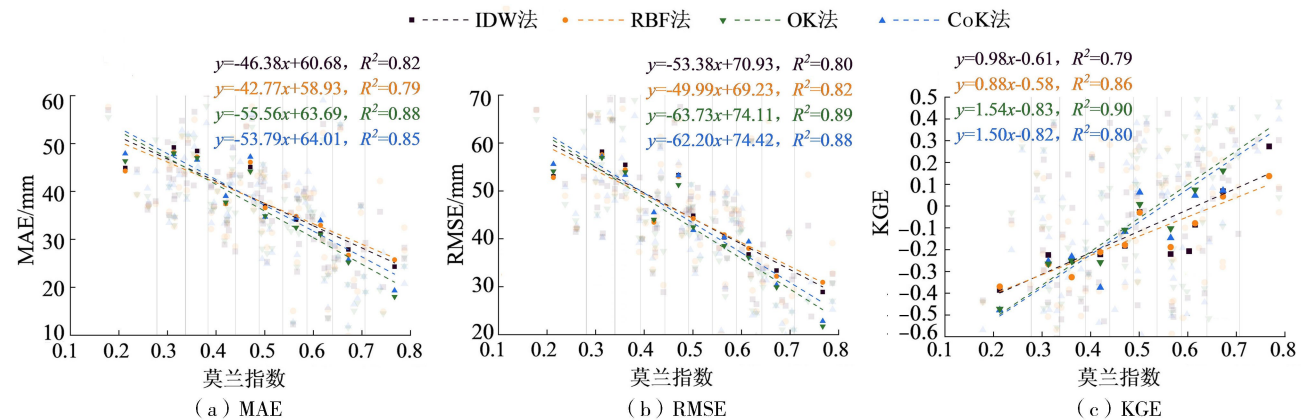


图4 4种插值方法的暴雨中心插值精度与莫兰指数的关系

Fig.4 Relationship between interpolation accuracy of four interpolation methods in storm center and Moran's *I*

明显分叉,说明在不同莫兰指数区间4种插值方法精度差异较为明显。当 $I<0.4$ 时,RBF法的MAE和RMSE最小,KGE最大,插值精度最高,其次为IDW法,OK法和CoK法插值精度较低;当 $0.4\leq I<1$ 时,OK法的插值精度最高,其次为CoK法,IDW法和RBF法精度较低,且随着莫兰指数的增大,OK法和CoK法的优势越来越明显(表2)。说明对于暴雨中心来说,在暴雨事件降水量空间自相关性较低时,RBF法和IDW法插值精度高于CoK法和OK法,在暴雨事件降水量空间自相关性较高时CoK法和OK法的插值精度高于IDW法和RBF法。

表2 4种插值方法的暴雨中心插值精度

Table 2 Interpolation accuracy of four interpolation methods in storm center

插值方法	莫兰指数	MAE/mm	RMSE/mm	KGE
IDW 法	<0.4	47.51	55.56	-0.32
	0.4 ~ <1	33.87	40.18	-0.06
RBF 法	<0.4	46.53	54.92	-0.29
	0.4 ~ <1	34.33	40.39	-0.07
OK 法	<0.4	47.1	54.98	-0.33
	0.4 ~ <1	31.93	37.72	0.04
CoK 法	<0.4	47.43	55.37	-0.32
	0.4 ~ <1	33.48	39.07	0.01

综上所述,对于暴雨中心来说,随暴雨事件降水量空间自相关性的增强,莫兰指数增大,4种插值方法对暴雨中心的插值精度均有提升,OK法和CoK法的插值精度提升效果更为明显。当 $I<0.4$ 时,RBF法精度最高;当 $0.4\leq I<1$ 时,OK法和CoK法插值精度最高,且随着莫兰指数增大,CoK法和OK法的优势越来越明显。

4 讨 论

本文比较了4种常用的插值方法对不同空间自相关性暴雨事件降水量的插值精度,优选了适用于不同空间自相关性暴雨事件降水量的插值方法。前人的研究多考虑类似于站点密度、高程等因素对降水量空间插值精度的影响,如蒋育昊等^[28]比较了多种插值方法在不同雨量站点密度下的适用性,发现在一定的变化范围内,站点密度越大插值方法的插值精度越高,在站点密度较低时推荐使用IDW法,在站点密度较高时推荐使用坡面回归方程法(PRISM法);鞠琴等^[29]引入了一种考虑高程变量的降水量插值方法应用于巴河流域,对流域多年平均降水量进行空间插值,发现其精度明显高于传统空间插值方法。可见影响空间插值方法优选的因素众多,不同站点密度下的降水量插值方法优选结果不同,特定流域高程条件下插值方法精度不一,空间自相关性作为影响降水量空间插值精度的重要影响因素,考虑空间自相关性的插值精度评价为插值方法优选提供了新的方向。李金洁等^[16]计算了西南山区台站月降水量的莫兰指数,确定了样本数据均具有显著的空间自相关性后再比较插值方法的精度,得出OK法优于IDW法的结论;仇知雨等^[17]对屯溪流域不同量级降雨进行插值方法优选,计算了不同量级降雨的莫兰指数,结果表明量级越大的降雨空间自相关性越强,插值精度越高,CoK法的精度高于其他插值方法,更适用于屯溪这类山丘流域。已有研究多将降雨数据具有显著空间自相关性作为进行降雨空间插值的前提条件,针对某个区域其他特定条件的暴雨事件降水量进行插值方法优选,对降水量空间自相关性和插值方法精度之间具体联系探究较少。本文将空间自相关性作为暴雨事件降水量的一个数据特征,以莫兰指数量化暴雨事件降水量的空间自相关性,能推荐适用于不同莫兰指数暴雨事件降水量的插值方法,可为实时洪水预报中降水量插值方法的优选提供参考。

针对流域平均和暴雨中心进行不同空间插值方法精度的比较结果表明,当暴雨事件降水量空间自相关性较强、莫兰指数较大时,流域平均和暴雨中心都表现出两种地统计插值方法(OK 法和 CoK 法)精度显著高于两种确定性插值方法(IDW 法和 RBF 法);当暴雨事件降水量空间自相关性较弱、莫兰指数较小时,RBF 法的插值精度较高,其原因和不同插值方法的插值机理有关。

IDW 法是一种根据样本点和待插值点之间的距离确定权重的插值方法,距离待插值点越近的样本点权重越大。RBF 法利用径向基函数创建多条函数曲线来对未知点进行空间插值,它以待插值点与样本点之间的欧氏距离来确定各样本点的权重。虽然 IDW 法和 RBF 法在一定程度上考虑了样本点和待插值点的距离关系,但它们都不直接对样本点降水量本身的空间自相关性建模。OK 法和 CoK 法依据样本点降水量之间的空间自相关性建立半变异函数模型,半变异函数衡量了样本点降水量在不同距离和方向上的变异程度,通过拟合半变异函数可以了解样本点降水量在空间上的相似性,再根据待插值点与样本点之间的距离关系结合半变异函数来确定各样本点的权重。OK 法和 CoK 法更看重样本点降水量本身的空间自相关性,根据样本点降水量的空间自相关性建立半变异函数模型来对未知点进行空间插值,而 IDW 法和 RBF 法直接根据待插值点和样本点之间的距离关系建立相应模型来对待插值点的降水量进行估计,与样本点降水量本身的空间自相关性没有直接联系。

针对流域平均而言,当 $I < 0.28$ 时,样本点降水量的空间自相关性较低,RBF 法能利用待插值点和样本点降水量之间的距离关系建立基函数模型进行空间插值,插值精度最高;当 $0.28 \leq I < 0.71$ 时,样本点降水量的空间自相关性适中,不同插值方法之间差异较小;当 $0.71 \leq I < 1$ 时,样本点的空间自相关性较高,OK 法和 CoK 法能更好地利用样本点降水量之间的高度空间自相关性拟合半变异函数进行空间插值,插值精度较高。针对暴雨中心而言,暴雨中心周围站点的降水量差异较大,分布不均^[30],整体样本点降水量空间自相关性受暴雨中心周围雨量分布情况的影响较大,所以随着暴雨事件降水量空间自相关性的变化,在暴雨中心 4 种插值方法精度的差异更为明显。

5 结 论

a. 4 种插值方法的精度均表现出随莫兰指数增大而提升的趋势,说明对于暴雨事件降水量空间插值来说,随着降水量空间自相关性增强,不同插值方法精度均有不同程度提升,OK 法和 CoK 法的精度提升效果更为明显。

b. 对于流域平均而言,当 $I < 0.28$ 时,RBF 法精度最高,其次为 OK 法,IDW 法和 CoK 法精度较低,推荐使用 RBF 法;当 $0.28 \leq I < 1$ 时,OK 法精度最高,推荐使用 OK 法。另外,当莫兰指数较高或较低时 4 种插值方法之间精度差异较大,说明当莫兰指数较高或较低时更需要进行插值方法的优选。

c. 对于暴雨中心而言,4 种插值方法精度也表现出随莫兰指数增大而提升的趋势,OK 法和 CoK 法精度受莫兰指数影响更大。当 $I < 0.4$ 时,RBF 法精度最高,推荐使用 RBF 法;当 $0.4 \leq I < 1$ 时,OK 法和 CoK 法精度更高,且随着莫兰指数增大,OK 法和 CoK 法的优势越来越明显,推荐使用 OK 法或 CoK 法。

参考文献:

[1] 陈华,盛晟,夏润亮,等. 基于矩阵分解的降水时空插值方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):35-41. (CHEN Hua,SHENG Sheng,XIA Runliang,et al. Spatiotemporal interpolation method of rainfall based on matrix decomposition [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(1):35-41. (in Chinese))

[2] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):1-8. (WU Yongtuo,LI Zhijia,QI Zhenya,et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(6):1-8. (in Chinese))

[3] 石朋,芮孝芳. 降雨空间插值方法的比较与改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):361-365. (SHI Peng,RUI Xiaofang. Comparison and improvement of spatial rainfall interpolation methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2005,33(4):361-365. (in Chinese))

[4] 张连成,胡列群,李帅,等. 基于 GIS 的新疆地区两种气温插值方法对比研究[J]. 干旱气象,2017,35(2):330-336. (ZHANG Liancheng,HU Liqun,LI Shuai,et al. Comparison of two temperature interpolation methods in Xinjiang based on GIS [J]. Journal of Arid Meteorology,2017,35(2):330-336. (in Chinese))

- [5] 黄志珍,楼峰青,丁伯良,等. 浙江省降水特征及其参数空间变化分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):117-123. (HUANG Zhizhen,LOU Fengqing,DING Boliang,et al. Spatial variation analysis of precipitation characteristics and statistical parameters in Zhejiang Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):117-123. (in Chinese))
- [6] 张继国,管耀宗,朱永忠. 降雨空间分布的模糊熵聚类分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):353-357. (ZHANG Jiguo,GUAN Yaozong,ZHU Yongzhong. Fuzzy entropy clustering analysis of spatial distribution of precipitation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(4):353-357. (in Chinese))
- [7] 张海平,周星星,代文. 空间插值方法的适用性分析初探[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(6):14-18. (ZHANG Haiping,ZHOU Xingxing,DAI Wen. A preliminary on applicability analysis of spatial interpolation method[J]. Geography and Geo-Information Science,2017,33(6):14-18. (in Chinese))
- [8] CHANG C L,LO S L,YU S L. The parameter optimization in the inverse distance method by genetic algorithm for estimating precipitation[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2006,117(1/2/3):145-155.
- [9] 魏义坤,杨威,刘静. 关于径向基函数插值方法及其应用[J]. 沈阳大学学报,2008,20(1):7-9. (WEI Yikun,YANG Wei,LIU Jing. Interpolation method of radial basis function and its application[J]. Journal of Shenyang University,2008,20(1):7-9. (in Chinese))
- [10] 董晓华,薄会娟,邓霞,等. 降雨空间插值方法及在清江流域的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2009,31(6):6-10. (DONG Xiaohua,BO Huijuan,DENG Xia,et al. Rainfall spatial interpolation methods and their applications to Qingjiang River Basin[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences),2009,31(6):6-10. (in Chinese))
- [11] DUBRULE O. Cross validation of Kriging in a unique neighborhood[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology,1983,15(6):687-699.
- [12] GULER M,KARA T. A comparison of different interpolation techniques used in mapping monthly precipitation in northern Turkey [J]. Fresenius Environmental Bulletin,2014,23(2):341-347.
- [13] 李想,李国平. 四川夏季降水量空间插值方法的比较[J]. 干旱气象,2022,40(5):897-907. (LI Xiang,LI Guoping. Comparative study on spatial interpolation methods of summer precipitation in Sichuan[J]. Journal of Arid Meteorology,2022,40(5):897-907. (in Chinese))
- [14] 邬伦,吴小娟,肖晨超,等. 五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. (WU Lun,WU Xiaojuan,XIAO Chenchao,et al. On temporal and spatial error distributions of five precipitation interpolation models:a case of Shenzhen[J]. Geography and Geo-Information Science,2010,26(3):19-24. (in Chinese))
- [15] 蒋好忱,雷宝佳,李昕. 降水信息空间插值模拟的不确定性分析[J]. 地理空间信息,2022,20(9):86-89. (JIANG Haochen,LEI Baojia,LI Xin. Uncertainty analysis of spatial interpolation simulation of precipitation information [J]. Geospatial Information,2022,20(9):86-89. (in Chinese))
- [16] 李金洁,王爱慧. 基于西南地区台站降雨资料空间插值方法的比较[J]. 气候与环境研究,2019,24(1):50-60. (LI Jinjie,WANG Aihui. Comparison of spatial interpolation methods based on monthly precipitation obsevation data of station in Southwest China[J]. Climatic and Environmental Research,2019,24(1):50-60. (in Chinese))
- [17] 仇知雨,梁忠民,赵建飞,等. 场次降雨空间插值方法对比研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(11):60-68. (QIU Zhiyu,LIANG Zhongmin,ZHAO Jianfei,et al. Comparative study on spatial interpolation methods of rainfall events[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(11):60-68. (in Chinese))
- [18] SOKAL R R, THOMSON J D. Applications of spatial autocorrelation in ecology [M]//LEGENDRE P, LEGENDRE L. Delovelments in Numerical Ecology. Berlin:Springer,1987:431-466.
- [19] 高英,苏华英,于洁,等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):56-64. (GAO Ying,SU Huaying,YU Jie,et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(5):56-64. (in Chinese))
- [20] 李程. 乌江流域径流演变规律分析及径流预报模型研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.
- [21] 邬玉琴,何太蓉,钟博星. 乌江流域 1956—2014 年降雨特征及输沙效应[J]. 水土保持通报,2018,38(1):1-7. (WU Yuqin,HE Tairong,ZHONG Boxing. Characteristics of precipitation and sediment effect in Wujiang River Basin during 1956-2014 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(1):1-7. (in Chinese))
- [22] 刘家宏,骆卓然,张永祥,等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护,2022,38(1):100-105. (LIU Jiahong,LUO Zhuoran,ZHANG Yongxiang,et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):100-105. (in Chinese))

[23] DIERSCH H J G. FEFLOW:finite element modeling of flow,mass and heat transport in porous and fractured media[M]. Berlin: Springer,2014.

[24] XIN Pei,WANG S S J,ROBINSON C,et al. Memory of past random wave conditions in submarine groundwater discharge[J]. Geophysical Research Letters,2014,41(7):2401-2410.

[25] WALTHER M,GRAF T,KOLDITZ O,et al. How significant is the slope of the sea-side boundary for modelling seawater intrusion in coastal aquifers? [J]. Journal of Hydrology,2017,551:648-659.

[26] ZHENG Tianyuan,ZHENG Xilai,CHANG Qinpeng,et al. Timescale and effectiveness of residual saltwater desalinization behind subsurface dams in an unconfined aquifer[J]. Water Resources Research,2021,57(2):e2020WR028493.

[27] 武雅洁,杨自良,程从敏,等. 潮汐波动对潜水含水层海水入侵规律的影响研究[J]. 中国海洋大学学报,2020,50(10):91-98. (WU Yajie,YANG Ziliang,CHENG Congmin,et al. The influence of tidal oscillations on the behaviors of seawater intrusion in unconfined coastal aquifers[J]. Periodical of Ocean University of China,2020,50(10):91-98. (in Chinese))

[28] KUAN W K,XIN Pei,JIN Guangqiu,et al. Combined effect of tides and varying inland groundwater input on flow and salinity distribution in unconfined coastal aquifers[J]. Water Resources Research,2019,55(11):8864-8880.

[29] SHI Wenlong,LU Chunhui,YE Yu,et al. Assessment of the impact of sea-level rise on steady-state seawater intrusion in a layered coastal aquifer[J]. Journal of Hydrology,2018,563:851-862.

[30] ABDOLHALIK A,AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: experimental and numerical study[J]. Journal of Environmental Management,2017,199:62-73.

[31] GLOVER E R. The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer[J]. Journal of Geophysical Research,1959,64(4):457-459.

[32] FANG Yunhai,ZHENG Tianyuan,WANG Huan,et al. Influence of dynamically stable-unstable flow on seawater intrusion and submarine groundwater discharge over tidal and seasonal cycles[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans,2022,127(4):e2021JC018209.

(收稿日期:2024-02-21 编辑:刘晓艳)

(上接第 14 页)

[23] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):195-204. (SHANG Shouwei,WANG Leizhi,WANG Yintang,et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019[J]. Water Resources Protection,2019,39(3):195-204. (in Chinese))

[24] HEVESI J A,ISTOK J D,FLINT A L. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics(Part I): structural analysis[J]. Journal of Applied Meteorology,1992,31(7):661-676.

[25] 顾春雷,杨漾,朱志春. 几种建立 DEM 模型插值方法精度的交叉验证[J]. 测绘与空间地理信息,2011,34(5):99-102. (GU Chunlei,YANG Yang,ZHU Zhichun. Accuracy cross-validation of several interpolation methods of DEM[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2011,34(5):99-102. (in Chinese))

[26] KLING H,FUCHS M,PAULIN M. Runoff conditions in the upper Danube Basin under an ensemble of climate change scenarios [J]. Journal of Hydrology,2012,424-425:264-277.

[27] 冯平,张立斌,李建柱,等. 目标函数对滦河流域 SWAT 模型径流模拟不确定性的影响[J]. 水资源保护,2023,39(2):17-24. (FENG Ping,ZHANG Libin,LI Jianzhu,et al. Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin[J]. Water Resources Protection,2019,39(2):17-24. (in Chinese))

[28] 蒋育昊,刘鹏举,夏智武,等. 站点密度对复杂地形 PRISM 月降雨空间插值精度的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(4):115-120. (JIANG Yuhao,LIU Pengju,XIA Zhiwu,et al. Effects of spatial station density on accuracy of spatial interpolation of monthly rainfall over complex terrain base on PRISM[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition),2017,41(4):115-120. (in Chinese))

[29] 鞠琴,刘小妮,连子旭,等. 考虑高程的降水空间插值方法研究:以巴河流域为例[J]. 中国农村水利水电,2023(8):18-24. (JU Qin,LIU Xiaoni,LIAN Zixu,et al. Research on the spatial interpolation method of precipitation considering elevation: a case study of Bahe River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(8):18-24. (in Chinese))

[30] 张君霞,黄武斌,王一丞,等. 河西走廊西部一次暴雨过程降水特征及极端性分析[J]. 高原气象,2024,43(1):156-165. (ZHANG Junxia,HUANG Wubin,WANG Yicheng,et al. Analysis on precipitation extremes and characteristics of the rainstorm event in the West of Hexi Corredor[J]. Plateau Meteorology,2024,43(1):156-165. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-11 编辑:熊水斌)