

基于GIS空间插值的云南省年降水分布模拟方法比较研究

何林蒨

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年1月14日; 录用日期: 2026年2月18日; 发布日期: 2026年2月24日

摘要

为揭示复杂地形条件下云南省年降水量的空间分布特征, 并筛选适用于区域尺度研究的最优空间插值方法, 本文基于云南省27个气象站点2022年年降水观测数据, 采用反距离加权法(Inverse Distance Weighting, IDW)、普通克里金法(Ordinary Kriging, OK)、径向基函数法(Radial Basis Function, RBF)和趋势面插值法(Trend Surface Interpolation, Trend)对年降水量进行空间插值模拟。通过对不同插值结果空间分布特征的对比分析, 并结合交叉验证方法对插值精度进行定量评价, 系统评估各方法的适用性。结果表明, 不同插值方法在宏观尺度上均呈现出“滇西南高、滇东北低”的降水空间分异特征, 但在空间连续性和平滑性方面存在显著差异。其中, RBF方法在保持区域地带性特征的同时, 能够有效避免局地异常值对插值结果的过度影响, 插值结果空间分布最为合理。综合精度指标与空间表达效果, RBF插值方法在云南省复杂地形条件下表现出最佳的综合适用性。

关键词

年降水量, GIS空间插值, Arc GIS, 云南省

Comparative Study and Applicability Analysis of Spatial Interpolation Methods for Annual Precipitation in Yunnan Province

Linshuo He

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: January 14, 2026; accepted: February 18, 2026; published: February 24, 2026

Abstract

To reveal the spatial distribution characteristics of annual precipitation in Yunnan Province under complex topographic conditions and screen the optimal spatial interpolation method suitable for regional-scale research, this study employs four interpolation methods—Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging (OK), Radial Basis Function (RBF), and Trend Surface Interpolation (Trend)—to simulate the spatial distribution of annual precipitation based on the 2022 annual precipitation observation data from 27 meteorological stations in Yunnan Province. The applicability of each method is systematically evaluated through comparative analysis of the spatial distribution characteristics of different interpolation results and quantitative assessment of interpolation accuracy using cross-validation. The results indicate that all interpolation methods consistently exhibit the spatial differentiation feature of “high precipitation in southwestern Yunnan and low precipitation in north-eastern Yunnan” on a macro scale, but significant differences exist in terms of spatial continuity and smoothness. Among them, the RBF method not only maintains the regional zonal characteristics but also effectively avoids the excessive impact of local outliers on the interpolation results, yielding the most reasonable spatial distribution. Considering both the accuracy indicators and spatial expression effects, the RBF interpolation method demonstrates the best comprehensive applicability under the complex topographic conditions of Yunnan Province.

Keywords

Annual Precipitation, GIS Spatial Interpolation, Arc GIS, Yunnan Province

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气降水不仅是驱动全球水分循环的关键气候要素，也为诊断气候变化、揭示不同尺度生态系统的响应机制提供了重要的分析依据[1][2]。降水量在时间和空间上的非均匀分布，很大程度上决定了洪涝、干旱和暴雨等气象灾害的强度，导致区域干旱事件的频繁发生[3]，地区水资源的严重短缺[4]，以及洪涝和地质灾害的加剧[5]。因此，解析降水量的时空演变与潜在规律，能为预测区域未来趋势、改善水资源管理和强化灾害预警提供直接的科学依据，并为保护生态环境和维系区域生态系统服务功能提供重要依据[6][7]。

随着全球气候变化影响不断加深，探究降水量的空间分布与变化规律愈发重要。云南省地处中国西南边陲，属典型山地高原地形，整体地势自西北向东南倾斜，海拔落差显著。作为西南地区的代表性省份，准确把握该区域的降水特征，对优化水资源调配、提升防洪减灾能力具有突出的现实意义[8][9]。传统线性插值方法未充分考虑空间异质性和气候系统等非线性特征，所以在复杂地形的降水预测中存在显著偏差。近年来，地统计学插值算法在降水量预测中得到广泛应用，该方法考虑了空间相关性，能够更好地刻画降水场的结构特征，进一步提高了区域估计精度[10]-[12]。值得注意的是，插值方法本质上都依赖已知站点数据对空间分布进行拟合推断，但是不同插值方法在理论基础、数据需求及实现条件上均存在差异，导致其应用效果不尽相同[12]。线性插值操作简单，但在地形复杂、降水变率大的区域往往误差显著[13]。地统计方法通过考虑空间相关性提升了预测精度，但其模型构建与参数优化过程复杂，对数据量和专业经验均有较高要求[14]。因此，在实际研究中，应结合区域自然特征、数据基础及应用目标，对插值方法进行审慎选择。

鉴于地理条件限制,地面气象站点往往难以在区域内实现均匀、密集布设,因此空间插值成为推演大范围降水空间分布的重要技术手段[15]。目前常用的插值方法包括克里金法、反距离权重法、样条函数法、趋势面法及局部多项式法等,其核心原理均是基于离散站点观测数据,通过数学模型重建连续的空间降水场[16]。然而,不同方法在具体区域的适用性与精度表现存在明显差异。近年来,许多研究利用已有观测资料,通过交叉验证等误差分析方法,致力于获取区域最优插值方案。例如,已有研究通过对反距离权重法与普通克里金法进行对比分析,指出在空间自相关性较为显著的区域,克里金方法往往能够获得更为稳定的插值结果[17]。也有学者将 OK、Spline 及 IDW 等方法应用于气温与降水等气象要素的空间插值比较,发现普通克里金法在年尺度气候变量插值中表现出相对较高的精度[18]-[21]。此外,一些研究引入改进型插值算法开展对比试验,结果表明在复杂地形或样点分布不均匀条件下,不同方法之间的精度差异更加明显[22]。

综上,结合区域实际对比不同插值方法的模拟精度,筛选适合区域的插值方法,进而模拟降水空间分布信息,对于区域生态系统管理以及生态安全等有重要意义[23]。本文旨在比较和分析 IDW、OK、RBF 和 Trend 等插值方法对云南省 2022 年年均降水进行空间插值实验降水量预测中的应用效果,探讨在降水量预测中的适用性和优势。

2. 研究区域与数据来源

2.1. 研究区域

本研究以云南省为研究区域,该省位于中国西南边陲,地理范围介于北纬 21°8′至 29°15′、东经 97°31′至 106°11′之间,总面积约 39.41 万平方千米。地形以山地高原为主,地势总体自西北向东南倾斜,海拔高差相对较大。气候类型方面,受印度季风、东亚季风的共同影响,区域内立体气候特征显著,兼具寒、温、热(含亚热带)三带气候类型,干湿季分明。值得注意的是,自 20 世纪 60 年代以来,云南省极端干旱事件频发,持续时间与强度均呈增加趋势,干旱化态势日趋严峻。

2.2. 数据来源

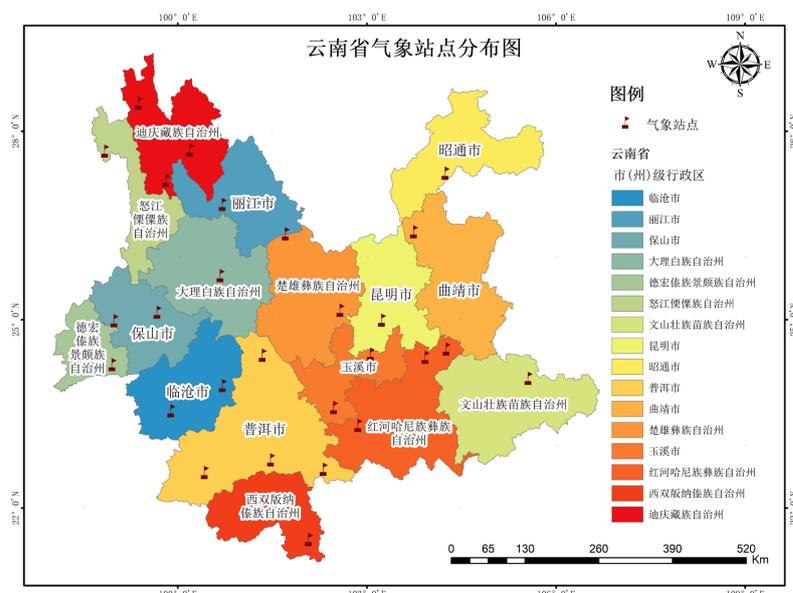


Figure 1. Distribution map of meteorological stations in Yunnan Province

图 1. 云南省气象站点分布图

为平衡数据可获取性与站点空间分布的代表性,本研究选用气象数据共享平台提供的 2022 年云南省 27 个标准气象站点降水量观测数据,站点分布情况见图 1。所用数据已完成的质量控制(精度为 0.1 mm),无异常噪声。

3. 研究方法

3.1. 反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)

IDW 以地理学第一定律为核心理论支撑,该方法实现插值的逻辑是空间上相邻的数据点对预测点属性值的贡献度显著高于远距离数据点。IDW 通过量化预测点与已知观测站点的空间距离来动态分配权重,距离越近的站点赋予的权重系数越大,最终通过加权求和实现未知区域降水值的估算。该方法计算简便、无需先验假设,但对异常值较为敏感,且易导致结果过度平滑[3]。IDW 的数学表达式优化为:

$$Z(\hat{x}_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad w_i = \frac{1}{d_i^p} \quad (1)$$

式中, $Z(\hat{x}_0)$ 为预测点 x_0 的降水量估算值; $Z(x_i)$ 为第 i 个站点的实测降水量; w_i 为第 i 个站点的最优权重系数。

3.2. 普通克里金插值(Ordinary Kriging, OK)

普通克里金法是一种基于地统计学原理的空间插值方法,其核心在于采用最优线性无偏估计对未知区域的数值进行预测。该方法能够有效刻画数据的空间相关性,并能同时提供预测误差的估计。然而,普通克里金法的应用需预先明确数据的协方差结构,而这在实际研究中往往较难准确获取[2]。该方法通过构建半方差函数量化区域化变量的空间相关性,进而求解最优权重系数,实现对未知区域的无偏估计。其预测模型表达式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中, $Z(x_0)$ 为其他空间位置上降水量残差 x_0 的预测值; x_i 为第 i 个气象站点观测降水量的拟合残差; λ_i 为点 x_0 的空间权重。

3.3. 径向基函数插值(Radial Basis Function, RBF)

径向基函数插值是一种基于径向基函数逼近理论的非参数化空间插值方法。其核心思路是通过径向基函数拟合观测数据,再将其推广至未知区域以完成预测。该方法中的基函数具有随距离增大而衰减的径向对称性,常用形式包括高斯函数、多项式函数等[14]。RBF 插值的特点是可以生成非常光滑的插值表面,对复杂数据域适应性强,可在保留原始数据特征的同时实现空间平滑,并对噪声具有一定鲁棒性[24]。其属性公式一般为:

$$Z(s^*) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \varphi(d_i) \quad (3)$$

式中: $\varphi(d_i)$ 为径向基函数; c_i 为待求解的系数; d_i 为 s_i 到 s^* 的距离。

在具体实现过程中,本文选用薄板样条函数(Thin Plate Spline)作为径向基函数类型。该函数在二维空间中具有良好的平滑性和稳定性,能够有效模拟降水等连续自然变量的空间变化特征,在气象与水文空间分析中得到广泛应用。而 RBF 插值中的平滑参数通过 ArcGIS 内置的交叉验证(Cross-validation)机制自动确定,从而在避免过度平滑与过拟合之间取得平衡,保证插值结果的客观性和稳定性。

3.4. 趋势面法(Trend)

趋势面法基于多项式回归原理,通过拟合地理要素的空间分布构建平滑数学曲面,并依据该曲面方程估算预测点的属性值[13]。计算公式如下:

$$Z(x, y) = \sum_{k=0}^{n_0} \sum_i^k a_{k,i} j k x^{k-i} y^i + \varepsilon \quad (4)$$

式中: $Z(x, y)$ 为降雨量预测值; n_0 为多项式阶数; ε 为随机误差; x 和 y 分别为平面直角坐标系的横坐标和纵坐标值。

4. 研究结果

4.1. 不同插值模型下云南省降水量可见分布特征

基于云南省 27 个国家级气象站 2022 年年降水量数据,采用 IDW、OK、RBF 和趋 Trend 对研究区年降水量进行空间插值,获得不同模型下的降水量空间分布结果(如图 2)。

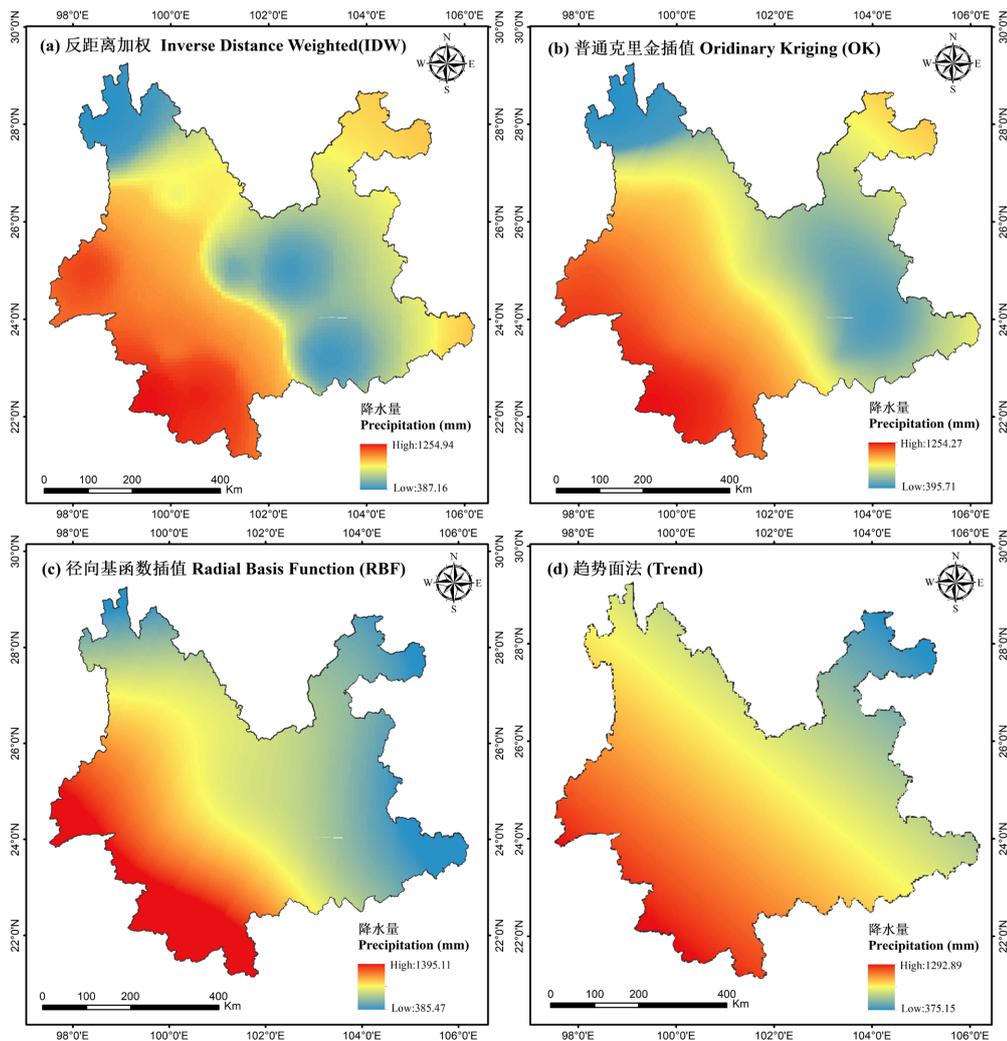


Figure 2. Spatial distribution of precipitation in Yunnan Province under different interpolation models
图 2. 不同插值模型下云南省降水量空间分布图

由结果可见,从整体数值范围来看,四种插值方法生成的降水量栅格结果具有较好的一致性,降水量主要分布在约 300 mm~1350 mm 之间,与站点观测数据的数值范围相符,表明各插值结果在整体尺度上均符合原始观测数据的统计特征。从空间分布格局来看,不同插值方法均揭示出云南省年降水量明显的空间梯度变化特征,总体表现为滇西南地区降水量较高,滇东北地区降水量较低,降水量由西南向东北方向逐渐减小,呈现出较为稳定的带状分异格局。

在不同插值方法之间,降水空间分布细节存在明显差异。在 IDW 插值结果中,降水量高值区集中分布于滇西南,低值区则主要出现在滇中和滇东北。值得注意的是,在滇中区域形成了较为明显的局地低值“洼地”特征,表现出一定的环状或斑块状分布形态,局部极值特征较为突出。OK 插值结果整体空间过渡较为平滑,高值区与低值区分布连续性较好,但在滇东北区域形成了范围相对集中的低值区,局部降水梯度变化相较 IDW 更为缓和。RBF 结果表现出较强的整体平滑特征,降水量空间变化以大尺度梯度为主,高值区主要分布于滇西南地区,低值区位于滇东北区域,在保持区域尺度降水梯度变化特征的同时,能够较好地平衡空间平滑性与局地变化特征。Trend 结果则以区域整体变化趋势为主,降水量呈现出明显的由西南向东北递减的连续梯度分布,空间格局较为单一,难以反映复杂地形条件下局地降水差异。

综上所述,四种插值方法在云南省年降水量宏观空间格局刻画上具有较好一致性,但在局地降水差异表达能力方面存在差异。其中, IDW 和 OK 能够较好地反映局地极值和空间异质性特征, RBF 方法更强调整体连续性和平滑性,而 Trend 方法主要适用于描述区域尺度的总体变化趋势。

4.2. 插值精度验证与不确定性分析

为定量评估不同空间插值方法对云南省年降水量模拟结果的可靠性,采用交叉验证(Cross-validation)方法对 IDW、OK、RBF 和 Trend 进行精度检验(如表 1)。具体评估操作为:采用逐一剔除的方法。每次排除一个气象站点,利用其余站点进行空间插值,再将插值结果与该站点的实测降水量进行对比分析。

为评价插值精度,本文选取均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和平均误差(Mean Error, ME)三项指标[24],其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (6)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (7)$$

式中, n 为气象站点数量; O_i 为第 i 个气象站点的实测年降水量; P_i 为对应站点的插值预测值。RMSE 和 MAE 用于衡量预测误差的大小,其中 RMSE 对较大误差更为敏感,MAE 反映整体平均误差水平;ME 用于判断插值结果是否存在系统性偏差。

Table 1. Accuracy comparison of different interpolation methods

表 1. 不同插值方法年降水量预测精度对比

插值方法	RMSE (mm)	MAE (mm)	ME (mm)
IDW	118.6	92.4	3.7
OK	124.9	96.8	-6.2
RBF	110.3	86.8	3.1
Trend	156.8	128.1	-12.6

从表 1 可以看出,不同插值方法的预测精度存在差异。其中,从 RMSE 与 MAE 指标来看,RBF 插值方法在两项指标上均取得最小值,表明其在整体误差控制和平均误差水平方面均优于 IDW、OK 和 Trend 方法。Trend 由于过度强调区域整体变化趋势,忽略了降水空间分布的局地异质性,所以导致其误差水平最高。从 ME 指标来看,RBF 插值方法的平均误差最接近 0,表明其在预测过程中系统性高估或低估现象较弱;IDW 方法存在一定程度的正偏差,而 OK 与 Trend 方法表现出不同程度的负偏差,说明其在部分区域存在低估降水量的情况。

结合精度评价结果与降水空间分布图(见图 2)可知,RBF 插值方法在保持云南省年降水量宏观地带性特征的同时,能够有效降低系统性偏差和随机误差,综合插值性能最优,适用于复杂地形条件下的区域尺度降水空间模拟研究。值得注意的是,降水空间分布特征及其空间异质性在不同降水型年(丰水年、平水年和枯水年)条件下可能存在差异,从而影响不同空间插值方法的稳定性与适用性。本文基于 2022 年单一年景的年降水数据,对不同插值方法在典型年条件下的空间表现和精度进行了对比分析,其结论主要反映各方法在该类年景下的相对性能。

5. 结论

降水预测对农业生产、水资源调配及防洪减灾等工作具有重要指导意义。受地理环境复杂性和气候系统非线性影响,传统线性插值方法在降水空间推演中存在明显局限。

本文基于年降水量综合插值结果得出,云南省年均降水量为 300 mm~1300 mm 之间,降水量中心高值位于滇西南一带,低值区位于滇东北地区。基于 2022 年云南省 27 个气象站点资料,采用 IDW、OK、RBF 和 Trend 四种方法对研究区年均降水量进行空间插值分析,主要结论如下:

(1) 不同空间插值方法对云南省年降水量的模拟结果在整体空间格局上具有一致性,均表现出“滇西南高、滇东北低”的带状分异特征,反映了区域降水分布受地形条件和大尺度气候背景的共同影响。

(2) 不同插值方法在空间连续性和局地变化刻画方面存在明显差异。IDW 在站点邻域内易产生局部极值现象,Trend 法则过度平滑,难以反映区域降水的局地差异;OK 对样本数量和变差函数假设较为敏感,在站点分布不均条件下存在一定不稳定性。

(3) 综合空间分布合理性、连续性和平滑性等特征,RBF 插值方法能够较好地刻画云南省复杂地形条件下年降水量的空间分异格局,插值结果最符合区域气候特征,在四种方法中表现出较优的综合适用性。但本文结论主要适用于单一年景条件,不同降水型年(丰、平、枯)条件下插值方法稳定性的系统比较仍有待进一步研究。

基金项目

本课题由云南师范大学研究生科研创新基金资助(项目号: YJSJJ25-B146)。

参考文献

- [1] 程建刚,解明恩.近 50 年云南区域气候变化特征分析[J].地理科学进展,2008,27(5):19-26.
- [2] Fu, C.B., Wu, J. and Dan, L. (2011) Climatic Changes of Rainfall and Rain Days in Yunnan Province. *Plateau Meteorology*, **30**, 1027-1033.
- [3] 高西宁,蒋姗姗,王耸,等.东北地区 1961-2014 年降水量变化分区及其区域特征[J].生态学杂志,2016,35(5):1301-1307.
- [4] Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., et al. (2013) Global Warming and Changes in Drought. *Nature Climate Change*, **4**, 17-22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- [5] 周长艳,岑思弦,李跃清,等.四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J].地理学报,2011,66(5):619-630.
- [6] 贺伟,布仁仓,熊在平,等.1961-2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J].生态学报,2013,33(2):519-531.

- [7] Gocic, M. and Trajkovic, S. (2013) Analysis of Precipitation and Drought Data in Serbia over the Period 1980-2010. *Journal of Hydrology*, **494**, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.044>
- [8] 杨春华, 郑莉, 黄河清, 等. 重庆山地区域气象要素空间插值方法对比[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(4): 57-66.
- [9] 曾广建. 粤东地区降水量空间插值方法研究[J]. 广东水利水电, 2022(4): 27-32.
- [10] 宋敬茹, 胡尹, 仝梓晨, 等. 新疆降水量空间插值方法对比研究[J]. 延边大学农学学报, 2021, 43(4): 41-46.
- [11] 占龙飞, 陈佳义, 李婕, 等. 江西省降水空间插值方法适用性分析[J]. 气象与减灾研究, 2021, 44(3): 215-221.
- [12] 张孟丹, 余钟波, 谷黄河, 等. 无定河流域降水量空间插值方法比较研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 30-37, 99.
- [13] 符静, 易臻照, 赵莎. 基于 GIS 空间插值的降水分布模拟方法比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(1): 94-97, 104.
- [14] 莫跃爽, 索惠英, 焦树林, 等. 喀斯特地区降水量空间插值方法对比——以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 164-170.
- [15] Huang, H., Liang, Z., Li, B. and Wang, D. (2019) A New Spatial Precipitation Interpolation Method Based on the Information Diffusion Principle. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **33**, 765-777. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01658-2>
- [16] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [17] 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2003(3): 53-57.
- [18] 李军龙, 张剑, 张丛, 等. 气象要素空间插值方法的比较分析[J]. 草业科学, 2006(8): 6-11.
- [19] 张莉莉, 陶忠良, 张京红. 基于 GIS 海南岛气象要素空间插值法比较分析[J]. 热带农业科学, 2012, 32(4): 57-61+66.
- [20] 仲嘉亮. 基于 GIS 的新疆年降水量空间插值精度比较研究[J]. 干旱环境监测, 2010, 24(1): 43-46+57.
- [21] 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.
- [22] Garcia, M., Peters-Lidard, C.D. and Goodrich, D.C. (2008) Spatial Interpolation of Precipitation in a Dense Gauge Network for Monsoon Storm Events in the Southwestern United States. *Water Resources Research*, **44**, 387-400. <https://doi.org/10.1029/2006wr005788>
- [23] 王姣妍. 气候变化影响下的新疆降水量演变规律[J]. 水利规划与设计, 2022(7): 25-30.
- [24] 李彦伟. 基于 GIS 的江西省降水量空间插值比较研究[J]. 陕西水利, 2024(5): 35-37.