

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2021.02-06

# 基于 ANUSPLIN 模型的不同分辨率 DEM 场景下 江西省降雨量插值对比分析

刘 林<sup>1</sup>, 李国文<sup>2</sup>, 冻芳芳<sup>2</sup>, 刘 贡<sup>2</sup>, 程雪蓉<sup>3</sup>, 曾宪隆<sup>1</sup>

(1. 赣江上游水文水资源监测中心, 江西 赣州, 341000; 2. 江西省水文监测中心, 江西 南昌, 330002;  
3. 信江饶河水文水资源监测中心, 江西 上饶, 334000)

**摘 要:** 本文用 2014~2019 年主要降雨过程基本雨量站数据, 分 500mDEM、1kmDEM、2kmDEM 三种场景, 将 ANUSPLIN 模型应用到江西省各地形代表区(山丘区: 赣州市; 丘陵区: 吉安市; 平原区: 南昌市)降雨量插值中. 结果显示, ANUSPLIN 模型对江西省降雨量插值有较好的适应性, 插值精度能达到良好及以上; 在相同 DEM 分辨率的模拟场景下, ANUSPLIN 模型降雨量插值精度排序为平原区>丘陵区>山丘区; 1kmDEM 场景较为适合江西省降雨量插值.

**关键词:** ANUSPLIN 模型; 江西; 降雨量插值

**中图分类号:** P332.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4701(2021)02-0116-06

## 0 引 言

江西省是全国多雨的省区之一, 省内暴雨区属长江流域五大暴雨区之首. 境内地势南高北低, 边缘群山环绕, 中部丘陵起伏, 北部平原坦荡, 四周渐次向鄱阳湖区倾斜. 全省多年平均降雨量为 1638mm, 降雨时空分布不均, 汛期(4~9 月)降雨量占全年总降雨量的 68%, 其中主汛期(4~6 月)占整个汛期的 67%; 由于地形的差异和距离海洋远近的不同, 省内怀玉山区、武夷山区、九岭山区、罗霄山区等 4 个多雨区. 雨量站观测是降雨量观测的主要手段, 据统计, 至 2015 年 6 月, 全省有雨量观测项目 4 545 站, 平均雨量站网密度 36.7km<sup>2</sup>/站, 基本能满足应用要求, 但对于中小河流和山洪灾害防治, 需要更高的站网密度, 降雨量插值是经济可行的解决方法. 空间内插就是基于某种数理方法采用已知的气象点数据来推求未知的气象点数据, 从而把矢量数据转换成栅格数据, 气象上常用的插值方

法有克里金插值法(Kriging)、反距离加权法(Inverse Distance Weighting, IDW)和样条函数法(Spline)等<sup>[1]</sup>.

ANUSPLIN 模型是澳大利亚科学家 Hutchinson 基于薄盘样条理论编写的针对气候数据曲面拟合的专用气象插值软件, 对于时间序列的气象数据尤其适合<sup>[2]</sup>. 刘志红等<sup>[3]</sup>2008 年详细介绍了 ANUSPLIN 模型及其插值应用. 钱永兰等<sup>[4]</sup>2010 年用 ANUSPLIN 模型对 1961~2006 年逐日气温、降雨数据进行插值, 并与反向距离权重法和普通克吕格法的结果进行对比, 结果表明 ANUSPLIN 模型的插值误差最小. 王军邦等<sup>[5]</sup>2017 年用 2000~2012 年全国日均温、日降雨数据由 ANUSPLIN 模型插值生成了全国温度与降雨的 1km 网格数据集. 孟清等<sup>[6]</sup>2019 年用 1959~2015 年秦岭地区 31 个气象站降雨资料由 ANUSPLIN 模型生成降雨栅格数据, 研究降雨时空变化.

地形对降雨的产生与分布具有重要影响, 如迎风坡具有强迫气流抬升的作用, 暖湿气流受动力冷却而成云致雨, 从而使降雨量增加<sup>[7]</sup>. 许多学者研究表明, 在

收稿日期: 2021-01-15

项目来源: 江西省水利厅科技项目(KT201725).

作者简介: 刘 林(1991- ), 男, 硕士.

ANUSPLIN 模型中考虑高程因素影响,有利于提高降雨插值精度。朱求安等<sup>[8]</sup>2009 年采用反距离加权、普通克里格、ANUSPLIN 模型 3 种方法进行酸雨空间插值模拟,结果显示,前两种方法仅能反映酸雨水平方向上的分布特点,而 ANUSPLIN 法将地形作为协变量因子,插值结果更合理地体现了酸雨时空分布特征。钱永兰等<sup>[9]</sup>2010 年用 ANUSPLIN 模型对 1961~2006 年逐日气温、降雨量进行插值,认为适当增加站点数量和提高 DEM 精度可进一步提高其插值精度。李月晨等<sup>[9]</sup>2014 年探讨了多种插值方法的适用性和不足之处,认为考虑地形等更多的相关因子以提高模拟精度是未来发展趋势。赵冠华等<sup>[10]</sup>2016 年研究了 DEM 的不确定性对温度插值精度的影响。陆福志等<sup>[11]</sup>2019 年采用 ANUSPLIN 模型,以经度、纬度、海拔为独立变量,通过空间插值,建立秦岭一大巴山气候与降雨格点数据集,结果与流行的 WorldClim 2.0 气候格点数据集具有一致性,且比其更精确、分辨率更高、细节更突出。

研究<sup>[4,8,9,10,11,12]</sup>表明,ANUSPLIN 模型在降雨量插值上具有优势,但选择不同分辨率数字高程模型(DEM)数据会影响其插值精度,因此,本文选择 ANUSPLIN 模型应用到江西省降雨量插值中,主要探究不同分辨率 DEM 场景下 ANUSPLIN 模型降雨量插值精度。

## 1 研究内容及数据情况

本文把 ANUSPLIN 模型应用到江西省降雨量插值

中,分别选用 500mDEM、1kmDEM、2kmDEM 三种高程数据分辨率场景,根据江西省南高北低渐次倾斜的地形特点,将赣州市归为山丘区,吉安市归为丘陵区,南昌市归为平原区,采用均方根误差、确定性系数两个评价指标,对比分析三种分辨率 DEM 数据场景下三种地形代表区降雨量插值的精度,选择适合江西省降雨量插值的 DEM 数据,为江西省雨情自动测报系统雨量质量提升工作奠定基础。

目前可从相关机构免费获取 30mDEM 高程数据,综合考虑目前气象上精细化降雨产品网格尺度,本文选取由 30mDEM 重采样得到的 500mDEM、1kmDEM、2kmDEM 三种地形分辨率场景进行分析。

江西省通过雨量密度研究和面雨量精度比较,选择了分布均匀、资料系列可靠完整的 1 085 个基本雨量站统一计算省、市、县三级行政区面雨量。1 085 雨量站中,赣州、吉安、南昌市雨量站数如表 1 所示,从表中可以看出三地市基本站密度差不多,均为 155km<sup>2</sup>/站左右,用以进行降雨表面分析。按照 2 000km<sup>2</sup>/站,并结合均匀分布的原则,分别在赣州、吉安、南昌市抽取 20、13、4 站,用以对比模型分析结果。选择 2014 年至 2019 年三地市同期降雨资料,其中赣州市选择了 30 场降雨,吉安市选择了 30 场降雨,南昌市选择了 29 场降雨,受篇幅所限,在此不列出。本文基于此进行分析计算,并将 ANUSPLIN 模型分析得到的雨量数据与实测雨量数据进行误差对比,确定误差程度小的 DEM 场景分辨率,作为适合江西省的数字高程分辨率。

表 1 抽取站点数量统计表

地市名称	地市面积/km <sup>2</sup>	计算时段有效基本站数/站	基本站密度/(km <sup>2</sup> /站)	基本站抽取数/站
赣州市(山丘区)	39 400	250	158	20
吉安市(丘陵区)	25 271	160	158	13
南昌市(平原区)	7 400	48	154	4

## 2 研究方法

### 2.1 ANUSPLIN 模型基本原理

ANUSPLIN 基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论。局部薄盘光滑样条法是对薄盘光滑样条原型

的扩展<sup>[2]</sup>,除普通的样条自变量外允许引入线性协变量子模型,如温度与海拔、降雨与海岸线之间的相关关系。

局部薄盘光滑样条的理论统计模型为:

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i \quad (i=1, \dots, N) \quad (1)$$

式中: $Z_i$  是位于空间  $i$  点的因变量; $x_i$  为  $d$  维样条

独立变量,  $f$  为需要估算的关于  $x_i$  的未知光滑函数;  $y_i$  为  $p$  维独立协变量;  $b$  为  $y_i$  的  $p$  维系数;  $e_i$  为具有期望值为 0 且方差为  $w_i\sigma^2$  的自变量随机误差, 其中  $w_i$  为作为权重的已知局部相对变异系数,  $\sigma^2$  为误差方差, 在所有数据点上为常数, 但通常未知。

刘志红等<sup>[3]</sup>阐述了 SPLINA 模块中 18 个待选薄盘光滑样条函数。本模型计算分析过程中, 采用三变量薄盘光滑样条函数 TVPTPS2, 即将经度、纬度、高程作为独立变量, 数量为 3, 协变量为 0, 样条次数为默认值 2, 调整经纬度范围值, 其他模型参数均为默认值, 进行模型运算。

## 2.2 降雨量插值精度评价指标

### 2.2.1 均方根误差

为了验证不同分辨率的 DEM 高程对降雨数据分析值的影响, 通过对雨量站点观测数据进行验证, 通过计算均方根误差 (RMSE) 来评价不同 DEM 高程分辨率下的降雨预测值的精度, 公式为:

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

式中:  $Z_x$  和  $Z_y$  分别代表降雨量实测值, mm 和预测值, mm;  $n$  为计算序列长度。RMSE 的值 (mm) 越小代表降雨预测值的精度越高。

### 2.2.2 确定性系数

在此次研究中将观测值与预测值进行相关性分析, 确定性系数  $R^2$  表示一元多项式回归方程拟合度的高低。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [P_{obs,i} - P_{sim,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [P_{obs,i} - \bar{P}_{obs}]^2} \quad (3)$$

式中:  $\bar{P}_{obs}$  为实测数值均值, mm;  $P_{obs,i}$  为  $i$  时刻实测降雨值, mm;  $P_{sim,i}$  为  $i$  时刻模拟降雨值, mm。

关于确定性系数  $R^2$  的评价标准如表 2 所示。  $R^2$  的整体取值分布在 0~1 之间, 当它的值越大, 表示模拟程度越好。当它达到 0.9 以上时, 便认为模拟的程度属于优秀程度。

表 2 确定性系数评价标准

等级	优秀	良好	一般	较差
标准	>0.9	0.7~0.9	0.5~0.69	<0.5

## 3 结果对比与分析

500mDEM、1kmDEM、2kmDEM 三种分辨率场景下, 赣州(山丘区)、吉安(丘陵区)、南昌(平原区)三市所抽基本雨量站各同期场次降雨的模型分析雨量值与实测值散点图如图 1~9 所示, 其统计特征如表 3~5 所示。对比图、表中数据可得:

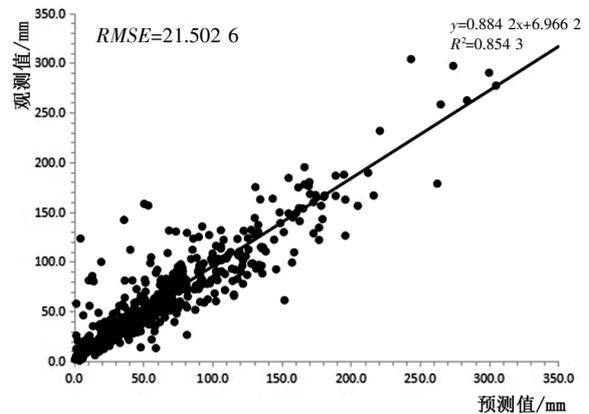


图 1 500mDEM 赣州市抽站雨量分析值与实测值散点图

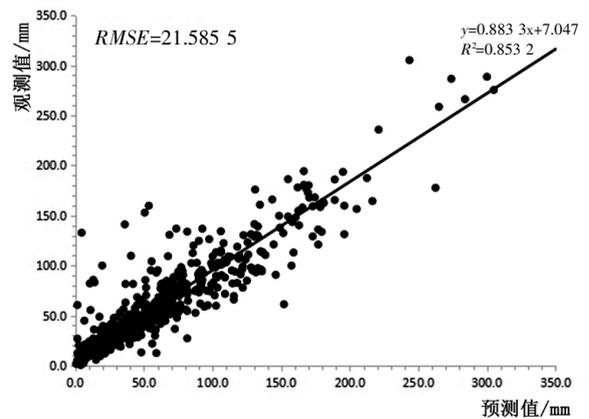


图 2 1kmDEM 赣州市抽站雨量分析值与实测值散点图

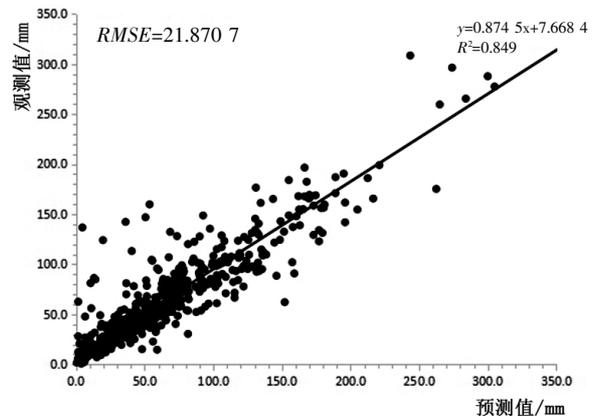


图 3 2kmDEM 赣州市抽站雨量分析值与实测值散点图

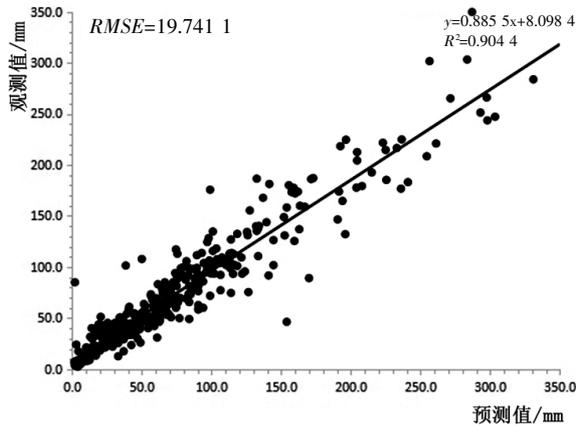


图 4 500mDEM 吉安市抽站雨量分析值与实测值散点图

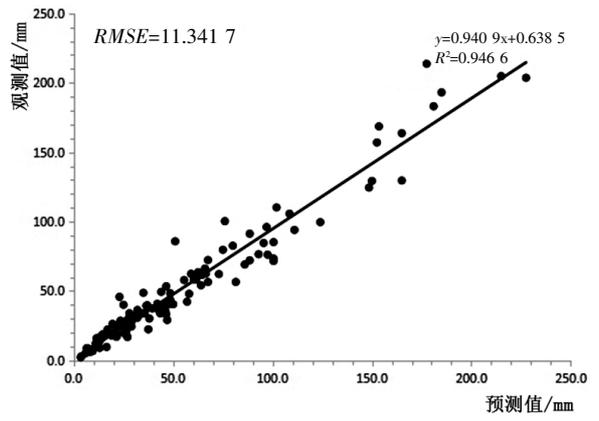


图 7 500mDEM 南昌市抽站雨量分析值与实测值散点图

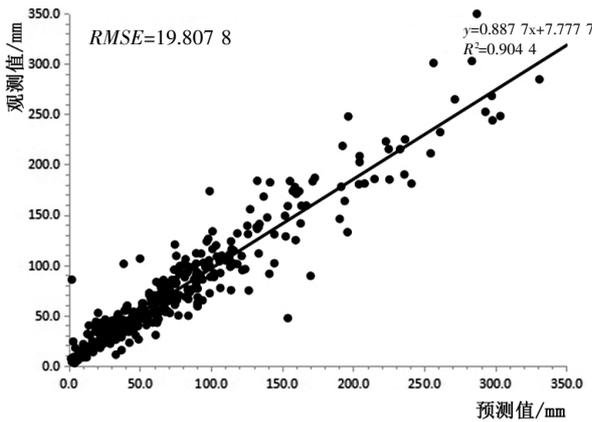


图 5 1kmDEM 吉安市抽站雨量分析值与实测值散点图

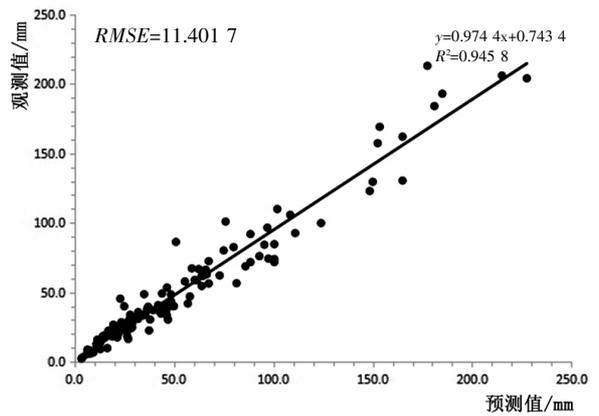


图 8 1kmDEM 南昌市抽站雨量分析值与实测值散点图

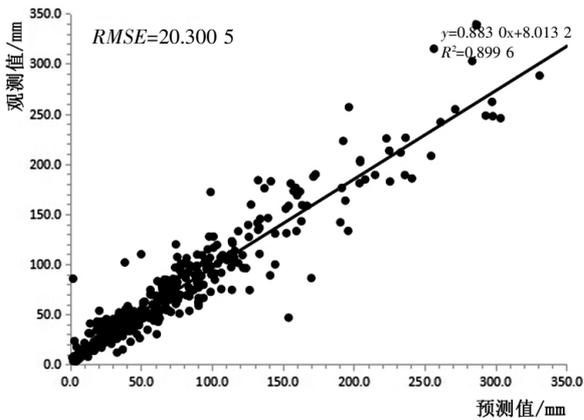


图 6 2kmDEM 吉安市抽站雨量分析值与实测值散点图

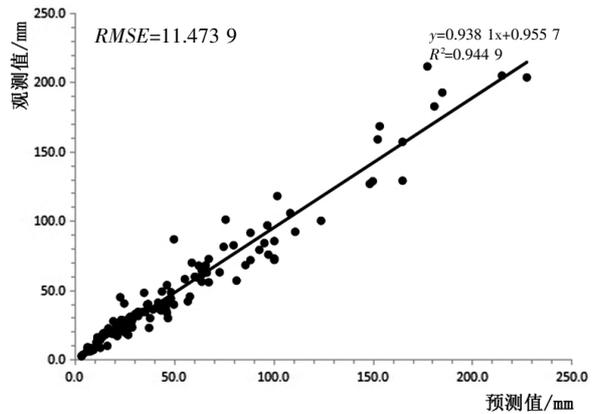


图 9 2kmDEM 南昌市抽站雨量分析值与实测值散点图

表 3 不同地区不同 DEM 分辨率场景下降雨量插值的均方根误差 RMSE 对比表

序号	地区	500mDEM	1kmDEM	2kmDEM
1	山丘区(赣州市)	21.50	21.59	21.87
2	丘陵区(吉安市)	19.74	19.81	20.30
3	平原区(南昌市)	11.34	11.40	11.47

mm

表4 不同地区不同DEM分辨率场景下降雨量插值的确定性系数 $R^2$ 对比表

序号	地区	mm		
		500mDEM	1kmDEM	2kmDEM
1	山丘区(赣州市)	0.854 3	0.853 2	0.849 0
2	丘陵区(吉安市)	0.904 4	0.904 4	0.899 6
3	平原区(南昌市)	0.946 6	0.945 8	0.944 9

表5 不同地区不同DEM分辨率场景下降雨量插值的计算时间 $t$ 对比表

序号	地区	min		
		500mDEM	1kmDEM	2kmDEM
1	山丘区(赣州市)	15	13	13
2	丘陵区(吉安市)	13	11	11
3	平原区(南昌市)	12	10	10

注:处理器 IntelXeonE5;安装内存 11.0GB。

ANUSPLIN 模型在江西省降雨量插值应用中取得了较好效果。三种场景下降雨量插值的均方根误差在 11.3~21.9mm 之间;确定性系数在 0.85~0.95 之间,山丘区为良好水平,丘陵区和平原区为优秀水平。

在相同 DEM 分辨率下的不同地区中:均方根误差(RMSE)精度方面,平原区的插值数据精度较好,丘陵区插值数据精度其次,山丘区插值数据精度较差。在确定性系数( $R^2$ )方面,平原区拟合效果较好,丘陵区拟合效果其次,山丘区拟合效果稍差。综上,在相同 DEM 分辨率的模拟场景下,模拟精度排序为平原区>丘陵区>山丘区。

在相同地区的不同 DEM 分辨率中:均方根误差(RMSE)精度方面,在所有地区中,分辨率为 500m 的 DEM 作为高程输入数据计算的降雨量插值精度较高,但试验时间为 12 至 15min,明显长于 1km 分辨率和 2km 分辨率的场景;分辨率为 1km 的 DEM 作为高程输入数据计算的降雨量插值精度略低于 500m 分辨率的插值精度,计算时间较短,为 10 至 13min;分辨率为 2km 的 DEM 作为高程输入数据计算的降雨量插值精度较差,计算时间与 1km 分辨率场景的计算时间相近。确定性系数( $R^2$ )方面,在所有地区中,500m 分辨率的 DEM 高程应用场景和 1km 分辨率的 DEM 高程应用场景下,两者的拟合程度相近,500m 分辨率的 DEM 高程应用场景的模拟数值拟合程度稍好于 1km 分辨率的拟合程度;2km 分辨率的 DEM 高程应用场景的模拟数值

拟合程度稍差。综上,在相同地区的不同 DEM 分辨率中,模拟精度排序为 500m 分辨率 $\geq$ 1km 分辨率>2km 分辨率。

综合上述分析,在计算江西省整个省份的雨量插值的实际应用过程中,应当在保证数据质量的同时,还需满足计算时长较短以提高工作效率的前提下,结合地形影响和实际计算时长影响的综合因素,选用分辨率为 1km 的 DEM 高程值的应用场景最为适合。

## 4 结 论

本文利用 ANUSPLIN 模型,在 500m、1km、2km 三种分辨率 DEM 场景下分别对赣州市(山丘区)、吉安市(丘陵区)、南昌市(平原区)进行了降雨插值分析,对比分析了三种场景不同地形代表区降雨插值的精度,得出以下结论:

(1) ANUSPLIN 模型对江西省降雨量插值有较好的适应性。三种场景下降雨量插值的均方根误差在 11.3~21.9mm 之间;确定性系数在 0.85~0.95 之间,均为良好以上水平。

(2) 在相同 DEM 分辨率的模拟场景下,ANUSPLIN 模型降雨量插值精度排序为平原区>丘陵区>山丘区。在相同地区的不同 DEM 分辨率模拟场景下,ANUSPLIN 模型降雨量插值精度排序为 500m 分辨率 $\geq$ 1km 分辨率>2km 分辨率。

(3) 在江西省降雨量插值的实际应用过程中, 综合考虑地形影响和模型计算效率等因素, 选用分辨率为 1km 的 DEM 高程值的应用场景较为合适。

本文将 ANUSPLIN 模型应用到江西省降雨量插值中, 确定了合适分辨率的 DEM 应用场景。下一步可以将 ANUSPLIN 模型应用到江西省雨量遥测站点数据质量提升工作中。

#### 参考文献:

- [1] 孟清, 白红英, 郭少壮. 基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(02): 206-212.
- [2] Hutchinson MF. The application of thin plate splines to continent-wide data assimilation, Data Assimilation Systems, BMRC Research Report NO.27 [M]. Mel-bourne: Bureau of Meteorology, 1991: 104-113.
- [3] 刘志红, Tim R. McVicar, Van Niel, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008(02): 92-100.
- [4] 钱永兰, 吕厚荃, 张艳红. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估 [J]. 气象与环境学报, 2010, 26(02): 7-15.
- [5] 王军邦, 王居午, 叶辉, 等. 2000-2012 年全国气温和降水 1km 网格空间插值数据集 [J]. 中国科学数据 (中英文网络版), 2017, 2(01): 73-80+205-212.
- [6] 孟清, 白红英, 郭少壮. 基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(02): 206-212.
- [7] 沈冰, 黄红虎, 薛淼森. 水文学原理[M]. 中国水利水电出版社, 2008.
- [8] 朱求安, 江洪, 宋晓东. 基于空间插值方法的中国南方酸雨时空分布格局模拟及分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(11): 1237-1244.
- [9] 李月臣, 何志明, 刘春霞. 基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J]. 地理科学进展, 2014(08): 1019-1028.
- [10] 赵冠华, 刘正佳, 胡云锋, 等. DEM 的不确定性对温度插值精度的影响 [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(02): 21-26.
- [11] 陆福志, 鹿化煜. 秦岭——大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示 [J]. 地理学报. 2019, 74(05) 875-888.
- [12] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析 [J]. 高原气象, 2016, 35(4): 875-886.

编辑: 张绍付

## Contrastive analysis of precipitation interpolation in Jiangxi province under different resolution DEM scenes based on Anusplin model

LIU Lin<sup>1</sup>, LI Guowen<sup>2</sup>, DONG Fangfang<sup>2</sup>, LIU Gong<sup>2</sup>, CHENG Xuerong<sup>3</sup>, ZENG Xianlong<sup>1</sup>

(1. Hydrology and Water Resources Monitoring Center in the Upstream Reach of Ganjiang, Ganzhou, 341000, China;

2. Jiangxi Hydrological Monitoring Center, Nanchang 330002, China;

3. Hydrology and Water Resources Monitoring Center of Xinjiang-Raohe, Shangrao, 334000, China)

**Abstract:** In this paper, the Anusplin model is applied to interpolate precipitation data in different terrain representative area (Mountain area: Ganzhou city; Hilly area: Ji'an city; Plain area: Nanchang city) according to precipitation data of main rainfall process from 2014 to 2019 under three scenarios of 500m dem, 1km dem and 2km dem. Results show that the ANUSPLIN model is suitable for precipitation interpolation in Jiangxi province, and the interpolation accuracy can reach high level. In the same DEM Resolution simulation scenario, the descending order of precipitation interpolation accuracy of anusplin model is plain area, hilly area, mountain area. The 1 km resolution dem is more suitable for precipitation interpolation in Jiangxi province.

**Key words:** Anusplinmodel; Jiangxi; Precipitation interpolation

翻译: 刘 林