引文格式：钟国雄,朱正平. 基于DEM的江西省气温空间插值方法比较[J]. 地理空间信息, 2023, 21(7): 53-56. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.07.013

基于DEM的江西省气温空间插值方法比较

钟国雄[1]，朱正平[1*]
（1. 长江大学 地球科学学院，湖北 武汉 430100）

摘　要：以江西省为研究区，基于区内85个气象台站1981—2010年的时间序列气温观测资料，对数据进行探索性分析。结合研究区的先验知识，分别采用反距离权重法、普通克里金法、基于数字高程模型（DEM）的多元线性回归插值法和梯度递减插值法进行空间插值，并通过交叉验证法对比分析了这些插值方法的精度。结果表明，基于DEM的插值方法精度均有一定程度的提高，且两种误差检验指标整体更小，优于传统方法。梯度递减插值法随月份变化平稳，插值结果能更精细地体现江西省气温的空间分布特征。

关键词：平均气温；空间插值；江西省；DEM
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）07-0053-04

Comparison of Spatial Interpolation Methods of Temperature in Jiangxi Province Based on DEM

ZHONG Guoxiong[1], ZHU Zhengping[1]
(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: Taking Jiangxi Province as the study area, based on the temperature observation data of 85 meteorological stations in the study area from 1981 to 2010, we analyzed the data in an exploratory way at first. Then, combining with the prior knowledge of study area, we used the traditional inverse distance weight method, the ordinary Kriging method, the multiple linear regression interpolation method and gradient descending interpolation(GDI) method based on DEM to carry out spatial interpolation. Finally, we compared the accuracy of these interpolation methods by cross validation method. The results show that the accuracy of interpolation methods based on DEM is improved to a certain extent, and the two error test indicators are smaller on the whole, which is better than the traditional method. The interpolation results of GDI method can accurately reflect the spatial distribution characteristics of temperature in Jiangxi Province.

Key words: average temperature, spatial interpolation, Jiangxi Province, DEM

气温体现了空气的冷热程度，是重要的气象要素参考指标之一。气温的空间分布则能反映一个地区的热量状况。江西省地处亚热带温暖湿润季风气候区，年均气温为17.1~19.1℃[1]。江西省是典型的农业省份，掌握气温空间分布特征对开展精细化农业气候区划和农作物种植适宜性区划格外重要，也可为开展农业生产和实施生态环境保护工作奠定基础。理论上，区域内精确的气温值可通过在该区域建立高密度的气象观测台站获取，但受经济成本、技术和外部条件的限制，不能对所有区域进行采样和测量，因此缺乏实施的可行性；实际上，研究区范围内的气象台站数量有限且离散分布，单个站点仅能代表有限范围大小。由于气温的空间分布具有连续性和空间相关性[2]，而空间插值法是研究区域变量空间分布特征的基本方法，因此可借助离散的气象站点数据，利用空间插值法得到区域内的连续栅格数据，从而获得连续的气温空间分布。

针对气温的早期研究是基于统计学原理方法来推算和模拟气温的空间分布，该方法误差较大，且工作繁琐。随着GIS技术的发展，各种优化的空间插值方法相继被提出，为进一步提高插值精度，引入了各种宏观地理因子和局部微观因子等强相关性因子，并整合到插值算法中进行研究。Ishida T[3]等认为若将气温看作分布在同一平面上的离散点，即使采用不同插值方法也难得到较高精度的插值结果，因而他们针对气温的分布特征（水平地带性和垂直地带性）进行了定

收稿日期：2022-02-09；修回日期：2022-04-29。
项目来源：国家科技重大专项资助项目（2016ZX05061-001-004）；国家自然科学基金资助项目（41804120）。
第一作者简介：钟国雄（1995—），硕士研究生，研究方向为GIS的开发与应用，E-mail：mayzgx@qq.com。
通信作者：朱正平（1980—），博士，讲师，研究方向为数字油田及油藏描述，E-mail：501096@yangtzeu.edu.cn。

量研究，结果表明气温的分布特征会对温度插值结果产生很大影响；Nalder I A[4]等在反距离权重法（IDW）的基础上，根据温度随海拔高度和经纬度产生的梯度变化，提出了梯度距离平方反比法（GDIS）；林忠辉[5]等利用GDIS对中国陆地区域范围内的气温进行了空间插值，通过对比发现，该方法既方便又能较细致地反映温度随海拔高度的变化；游松财[6]等研究表明在中国陆地区域内，海拔高度和地形条件对气温空间插值精度的影响显著。上述研究所用的方法不尽相同，应用目的和精度也各有差异，但都引入了各种相关性地理因子，插值效果和精度均有提高。世界气象组织认为30 a的时间序列长度足够消除年变化影响[7]。江西省地域狭长，东、南、西三面环山，北部为较平坦的鄱阳湖平原，中南部以山地丘陵为主，全省面积的70%为山地丘陵。本文以江西省为研究区，以区内85个气象台站30 a的时间序列数据为气温观测资料，采用基于数字高程模型（DEM）的插值方法进行插值，并与传统插值法进行对比分析。

1 数据来源与预处理

1.1 数据来源

本文采用的气温数据从国家气象科学数据中心网站（http://data.cma.cn）获取。该数据由时间序列为1981—2010年的中国地面累年/月值年值数据集，经逐一对比全国气象台站表，添加经纬度和海拔高度后整理编辑而得。原始数据集包括91个气象站点，通过控制和检查数据的完整性，剔除存在缺失和台站位置发生变化的6个站点数据。为方便后续检验，按4∶1的比例将数据分为试验集和验证集两部分，其中试验集包含67个站点数据，验证集包含18个站点数据。试验集用于插值建模和生成表面；验证集仅用作数据验证，但要求验证集中站点数据的分布特征与试验集中相似且具有代表性。

DEM是地表形态的数字化表达，蕴含了丰富的地形地貌信息，气温影响因子均可从DEM中快速提取[8]。本文采用的DEM数据为90 m空间分辨率的STRM v3.0数据，镶嵌裁剪后得到研究区范围DEM。

1.2 数据探索性分析

气温的空间分布受多种因素影响，既有宏观地理因子（经纬度、海拔高度），也有下垫面性质（土壤、植被）和地形（坡度、坡向）等局部微观因子，这些因素因地区不同而存在差异[9]。插值前需对数据进行探索性分析，得到这些影响因素对平均温度可能出现的影响，为后续插值提供定性分析。

相关分析是进行多元回归分析的前提，因为只有变量间存在相关性才能进行后续的回归分析。本文将85个气象站点1981—2010年的1月、4月、7月、10月月均气温、年均气温数据与各影响因子进行相关性分析，结果如表1所示，可以看出，平均气温与纬度、海拔和坡向呈显著负相关关系，其中除7月外，平均气温与纬度的相关系数较大，在−0.53~−0.81之间；与海拔的相关系数在−0.41~−0.57之间；与坡向的相关系数较小；与经度的相关性较小，仅在7月呈显著相关关系，其他月份没有明显相关性，原因可能是研究区地域狭长，经度变化小；与坡度的相关关系不明显；平均气温与多因子的相关系数明显高于单因子，可能受季节变化差异影响，1月、4月、10月和年均的多因子相关系数为0.85~0.98，存在极强的相关性。因此，平均气温与多影响因子的有效组合能很好地拟合气温值。

表1 平均气温与各种影响因子之间的相关系数

月份	经度	纬度	海拔	坡度	坡向	多因子
1月	−0.165 7	−0.809 6**	0.036 5	0.109 5	−0.037 5	0.853 3**
4月	−0.118 1	−0.733 0**	−0.410 1**	0.040 1	−0.282 5*	0.975 2**
7月	0.336 1**	0.218 3*	−0.423 1**	0.076 6	−0.370 0**	0.510 8
10月	0.050 0	−0.526 2**	−0.566 7**	0.033 8	−0.352 2**	0.930 9**
年均	−0.001 6	−0.571 3**	−0.571 8**	0.021 2	−0.355 3**	0.961 2**

注：**表示相关系数显著水平为0.01，*表示相关系数显著水平为0.05。

2 研究方法

Tobler的地理学第一定律：任何事物在空间上都是有联系的，空间上距离越近、联系越紧密，是空间插值法的理论依据[10]，而空间插值法的实质是基于已知样点的数据值利用数学方法来模拟未知点的数据值[11]。

2.1 传统空间插值方法

IDW方法和克里金插值法是传统空间插值方法。IDW方法遵循地理学第一定律，算法简单实用且快速，需要确定的模型参数较少，应用广泛[12]。克里金差值法要求数据具有空间自相关性的分布特征，对于连续的区域一般选择普通克里金法（OK）。

2.2 基于DEM的多元线性回归插值方法

2.2.1 回归插值模型的提出

由相关分析可知，加入多种地理影响因子可增加细节描述能力，但地理因子影响有强有弱，为了应用方便，需合理剔除一些影响因子，从而构建最优回归模型。多元线性回归法（MLR）基于气温与影响因子的相关系数，以平均气温为因变量，通过数学表达式

将这些相关系数显著的影响因子与平均气温进行多元线性回归分析，再利用统计的方法构建回归模型。该模型可表示为：

$$T=aX+bY+cH+dA+Z \quad (1)$$

式中，T 为气温；X、Y、H、A 分别为经度、纬度、海拔和坡向；a、b、c、d 分别为相应的回归系数；Z 为常数项。

2.2.2　回归插值模型的结果

基于上述回归模型，考虑到平均气温与各地理因子的相关性将随季节变化而出现差异，得出平均气温的插值模型如表2所示。回归系数 R^2 反映了模型的拟合程度和解释能力，越接近1说明效果越好，低于60%则需修正模型。由表2可知，1月、4月、10月和年均 R^2 在0.73~0.95之间，说明模型在这些月份拟合程度较好，插值模型可靠；将对应影响因子的栅格图代入上述插值模型中进行计算，可得到平均气温的栅格图；经度与平均气温的回归系数只是纬度与平均气温回归系数的30%~50%，说明研究区的气温空间分布具有纬度地带性强于经度地带性的特征；海拔每升高100 m各月份气温则下降0.14~0.55℃；气温随月份（季节）变化明显，最低值出现在1月，插值时若不考虑月份变化直接使用同一气温垂直递减率，将导致不同程度的误差；年均气温垂直递减率约为0.005 ℃·m^{-1}，一般对流层范围内气温的垂直递减率为0.006 5 ℃·m^{-1} [13]，由此可见气温的垂直递减率不是固定不变的，存在差异的原因可能是气温受地形、季节和地点等条件变化的综合影响。

表2　江西省平均气温回归插值模型

月份	气温回归方程	R^2
1月	T =1.164 2−0.915 2 Y	0.728 4
4月	T =19.446 5−0.847 8 Y −0.004 7 H +0.004 9 A	0.951 4
7月	T =2.595 8+0.213 9 X +0.059 7 Y −0.001 8 H −0.059 4 A	0.308 0
10月	T =8.107 1−0.715 5 Y −0.005 5 H +0.004 4 A	0.866 8
年均	T =12.729 6−0.675 2 Y −0.005 H +0.005 5 A	0.924 5

2.3　基于DEM的梯度递减插值方法

在同一水平面上，气温的变化可看作是连续的，而气象观测站点则是分布在不同海拔高度上。梯度递减插值法（GDI）根据气温垂直递减率将这些高度不同的气温数值转换到零海平面上，并利用IDW方法和OK方法对转换后的值进行插值，这样可以利用温度与海拔之间的关系，减少海拔高度对插值的影响，从而提高插值精度。

首先通过式（2）将85个站点平均气温对应的海拔和气温垂直递减率转换到零海平面上；再分别利用IDW方法和OK方法对转换到零海平面的气温进行插值，得到气温在零海平面上的空间分布；最后通过式（3）将该分布结合DEM数据，利用ArcGIS中的栅格计算器，得到研究区域的气温空间分布。

$$T_0=T_h+R_a\times h \quad (2)$$

$$T_{\mathrm{DEM}}=T_0-R_a\times H_{\mathrm{DEM}} \quad (3)$$

式中，T_0 为某站点转换到零海平面上的气温；T_h 为某站点的实际气温，单位为℃；R_a 为气温垂直递减率；h 为气象站的海拔，单位为m；T_{DEM} 为结合DEM后某站点的气温；H_{DEM} 为某站点对应的海拔，单位为m。

2.4　插值精度检验方法

通常采用验证集验证和交叉验证法对上述插值方法进行精度评价。本文采用平均绝对误差（MAE）和均方根误差（RMSE）两个指标作为检验插值方法精度的标准，这两个指标受极值的影响较小[14]。

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|T_{oi}-T_{ei}\right| \quad (4)$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_{oi}-T_{ei}\right)^2} \quad (5)$$

式中，T_{oi} 和 T_{ei} 分别为第 i 个站点的气温实际观测值和气温预测值；n 为参与检验的气象站点数。

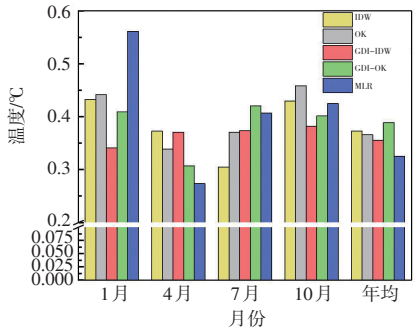
3　研究结果与讨论

3.1　插值精度对比

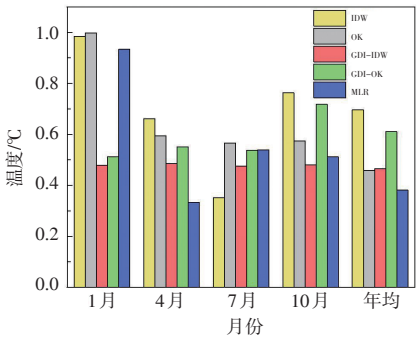
本文选取1981—2010年中具有代表性的1月、4月、7月、10月的月均气温以及年均气温数据，分别采用传统的IDW方法、OK方法以及基于DEM的GDI方法和MLR方法进行插值，并以MAE和RMSE作为精度评价指标，得到插值误差对比柱状图（图1），可以看出，基于DEM的插值方法精度均有一定程度提高，其中MLR方法个别月份误差最小，但与传统方法一样，误差温度波动明显，能明显感到误差的季节性变化，整体优于传统方法；而GDI方法的两种误差指标整体更小，且随月份变化平稳、波动小，优于其他方法。GDI–IDW方法的MAE在0.34~0.38之间，RMSE在0.46~0.49之间，为最优方法。

3.2　插值效果对比

为进一步对比插值效果，且让插值方法之间具有可比性，以30 a的年均气温为指标，采用上述插值方法进行插值成图，并采用分层设色法让图例区间保持一致，结果如图2所示，可以看出，采用传统方法的江西省年均气温空间分布具有明显的南高北低的纬度

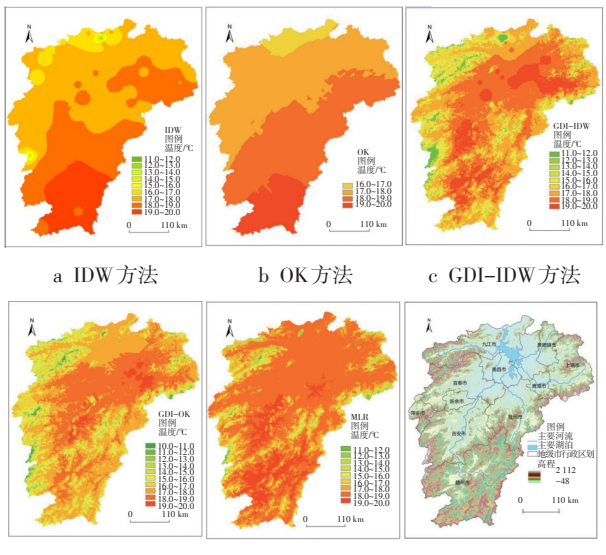


a MAE对比图（为使差异明显，截断部分）



b RMSE对比图

图1　不同插值方法的误差对比图



a IDW方法　b OK方法　c GDI-IDW方法

d GDI-OK方法　e MLR方法　f DEM晕渲图

图2　不同插值方法的江西省年均气温插值结果

地带性特征；地形起伏较大区域的气温空间分布变化幅度大；基于DEM的插值法具有随海拔升高而降低的垂直地带性。IDW方法、OK方法能粗略反映江西省30 a年均气温的空间分布状况，但未反映地形特征对平均气温空间分布的影响，而基于DEM的插值法更精确地反映了地形因子对气温空间分布的综合影响，插值结果更接近于实际情况。究其原因，传统方法是基于属性平面分布的插值方法，未考虑地形因子对气温的影响，并不能精确反映这些因子对年均气温的影响；而基于DEM的插值方法可把外部相关性形因素考虑进来，在地形复杂区域更好地反映气温的分布特征，进而提高插值精度。MLR方法从DEM中提取的海拔等因子均为重要的影响因子，根据气温影响因子构建回归模型，使其插值结果能更好地体现地形因素对气温的影响，最后结合DEM计算研究区内的气温。GDI法则是根据气温垂直递减率将高度不同的气温数值转换到同一平面上，减少不同海拔对插值的影响，从而提高插值精度，使插值结果的空间分布更合理、更符合现实情况。

结合插值精度和插值效果两个方面比较，江西省年/月均气温的插值优劣排序为GDI-IDW方法>GDI-OK方法>MLR方法>IDW方法>OK方法。总体而言，GDI-IDW方法是更适合江西省这种复杂地形的气温空间插值方法。

4　结　语

本文分别采用IDW方法、OK方法、MLR方法和GDI方法对江西省平均气温进行了插值，并对插值精度和年均气温的插值效果进行了对比和分析，得到以下结论：

1）经过探索性分析发现，江西省年/月均气温与纬度、海拔和坡向存在较高相关性，与经度的相关性随季节变化而变化，与坡度的相关性不明显；平均气温与多因子的相关系数明显高于单因子，有效组合经纬度、海拔和坡度坡向等多因子能很好地拟合气温值。

2）相较于传统方法，基于DEM的插值方法精度均有提高，其中GDI-IDW方法的MAE和RMSE最优，是更适合江西省的气温空间插值方法。其插值结果能精细体现江西省的气温空间分布特征。

3）江西省的年均气温空间分布总体上呈明显的由南向北递减的纬度地带性，结合DEM晕渲图可知，还具有随海拔升高而降低的垂直地带性，研究区内年均气温垂直递减率约为0.005 ℃·m^{-1}。

参考文献

[1] 李柏贞，孔萍，占明锦，等. 1961—2015年江西省气温变化特征分析[J]. 气象与减灾研究，2017，40(3)：184-192

[2] 朱会义，刘述林，贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究，2004，23(4)：425-432

[3] Ishida T，Kawashima K. Use of Cokriging to Estimate Surface Air Temperature from Elevation[J]. Theoretical and Applied Climatology，1993，47(3)：147-157

[4] Nalder I A，Wein R W. Spatial Interpolation of Climatic

（下转第85页）