

# 亚热带山地丘陵区气象要素空间化方法分析

陈晓玲<sup>1 2 3</sup> , 曾永年<sup>1 2</sup> , 柳文杰<sup>1 2</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院 湖南 长沙 410083;

2. 中南大学 空间信息技术与可持续发展研究中心 湖南 长沙 410083; 3. 福建省测绘院 福建 福州 350003)

**摘要:** 空间连续的气象要素是区域环境、生态系统模拟的重要参数,空间插值是实现气象观测站点数据空间化的主要方法。由于不同区域气候要素时空分布的复杂性,研究适用于特定区域的空间化方法具有重要意义。本文以湖南省为研究区,分析长江中游亚热带丘陵区气象要素的空间化方法。基于湖南省及其毗邻地区的46个气象站点14年(2000—2013年)的气象观测数据(月降水量、月均温)和DEM数据,对普通克里金法(OK)、反距离加权法(IDW)、样条法(SPLINE)和基于DEM的多元线性回归插值法(MLR)进行比较分析研究。研究结果表明:1)月降水量和月均温的MRE和RMSE值排序分别为:SPLINE > IDW > MLR > OK和SPLIN > OK > IDW > MLR;年平均降水量和年均温插值的MRE和RMSE值排序分别为:SPLINE > IDW > OK > MLR和SPLIN > OK > IDW > MLR;2)MLR法不仅插值误差小,而且能从细节上反映出气象变化的空间变异性;3)对多变量进行数据探索分析表明,MLR插值法中,经度、坡度与年降水量空间分布存在空间的一致性;纬度、高程和坡度对年均温的空间分布具有很强的解释力。

**关键词:** 气象要素;空间插值;精度验证;数据探索;湖南省

中图分类号: P25; P458. 1<sup>+</sup> 1 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 5867(2017)12 - 0051 - 06

## A Comparative Study of Spatial Interpolation Methods for Meteorological Elements in Subtropical Mountainous and Hilly Regions of China

CHEN Xiao - ling<sup>1 2 3</sup> , ZENG Yong - nian<sup>1 2</sup> , LIU Wen - jie<sup>1 2</sup>

(1. School of Geosciences and Info - Physics , Central South University , Changsha 410083 , China;

2. Center for Geomatics and Regional Sustainable Development Research , Central South University , Changsha 410083 , China;

3. Surveying and Mapping Institute of Fujian Province , Fuzhou 350003 , China)

**Abstract:** Spatial interpolation of climate data is frequently required to provide input for regional ecological models. Interpolation is a main method of spatialization of observation station data. Due to complexity of distribution of climatic elements on different regions , the research of spatialization method applied on specific region is significant. This paper is spatial analysis of meteorological elements in subtropical hilly regions of the Middle of Yangtze River , based on climatic observation data ( monthly total precipitation , monthly mean temperature) and DEM data of Hunan Province , compared and analyzed Ordinary Kriging ( OK ) , Inverse Distance Weight tension ( IDW ) , SPLINE and MLR , and results indicated that: 1) Mean Relative Error ( MRE) and Root Mean Squared Interpolation Error ( RMSIE) of monthly total precipitation and monthly mean temperature calculated by methods above can be ranked respectively as: SPLINE > IDW > MLR > OK and SPLIN > OK > IDW > MLR; MRE and RMSIE for annual mean precipitation and annual mean temperature can be ranked as: SPLINE > IDW > OK > MLR and SPLIN > OK > IDW > MLR. 2) The interpolation error of MLR is relatively less , and spatial variability can be indicated in detail by MLR. 3) Based on data mining analysis of multivariate , there was spatial consistency of longitude , gradient and distribution of precipitation in MLR interpolation method , in which the spatial distribution of annual mean temperature could be well explained by latitude , elevation and gradient.

**Key words:** climatic element; spatial interpolation; precision validation; data mining; Hunan Province

收稿日期: 2017 - 01 - 22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171326, 41201386); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2015zzts254)资助

作者简介: 陈晓玲(1991 - ) , 女, 福建漳州人, 测绘工程专业硕士研究生, 主要研究方向为遥感与地理信息系统及其环境变化。

通讯作者: 曾永年(1959 - ) , 男, 青海西宁人, 教授, 博士生导师, 博士, 2003年毕业于兰州大学遥感与GIS专业, 主要从事遥感与地理信息系统及其环境变化研究工作。

## 0 引言

在众多的全球环境问题中,包括温室效应、极端天气等在内的气候变化问题越来越受到科研工作者的重视<sup>[1-3]</sup>。已有研究表明,生态系统对于气候变化的响应非常敏感<sup>[4]</sup>,并且随着现代生态学、地球科学及交叉学科的发展,用生态模型来模拟并评价区域甚至全球尺度的生态系统可持续发展问题成为热点<sup>[5-8]</sup>,而高精度的气象数据是各类生态系统模型的主要驱动因素之一。目前精确气象数据获取的主要途径是地面气象站点的观测。然而,由于受经济和人力资源的限制,现有的气象观测站点空间分布及其数量有限,而且地面站点观测数据仅能代表局部区域的气象信息。获得区域甚至全球尺度的空间连续的气象数据,可采用空间内插和外推的空间化方法<sup>[9]</sup>。因此,选取适合区域气象要素的插值模型是进行气象要素时空变化特征分析的关键,同时也对降低各种生态模型的不确定性具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕气象要素的空间化问题进行了一系列的研究,主要方法有统计回归模型、空间插值法以及两者相结合的综合法等<sup>[10-13]</sup>。蔡迪花等<sup>[10]</sup>在对甘肃河东地区月平均气温进行研究时,考虑了经纬度、海拔、坡度和坡向等地形要素的影响;徐超等<sup>[14]</sup>以山东省的年平均降水和温度为源数据,分别建立了其与海拔、经纬度和植被指数之间的回归方程。而空间插值法的实质是利用局部已知点的信息实现对未知区域的预测,将空间上离散的气象数据转换为连续的曲面数据<sup>[15]</sup>。根据插值数学模型的不同,目前常见的插值方法有普通克里金法(Ordinary Kriging, OK)、协同克里金法(Ordinary Cokriging)、反距离加权法(Inverse Distance Weight tension, IDW)、样条插值法(SPLINE)、多项式插值法(Interpolating polynomials)以及综合法等<sup>[16-17]</sup>。

由于气候要素时空分布的复杂多变,任何一种气象要素插值模型都难以适用于所有区域。位居长江中游的湖南省是典型的亚热带山地丘陵区,是研究我国亚热带山地丘陵区环境变化与气候响应的重要区域。在人类活动的影响下,环境敏感性及承灾脆弱性日渐显现。因此,研究这一区域的气象要素的时空变化对区域的生态环境建设具有重要意义。然而,当前针对湖南省气象要素空间插值方法的适用性探讨尚未见报道。因此,本文以湖南省及其毗邻地区的46个气象站点14年(2000—2013年)的气象数据(月降水量和月平均温度)和DEM数据为基础,采用普通克里金法、反距离加权法、样条法和基于DEM的多元线性回归法(MLR)分别对年降水量、年均温、月降水量和月均温数据进行插值,比较不同插值方法运用于该实验区气象要素空间化的精度,得出了适用于湖南省气象要素插值的优选方法,进而利用数据探索方法确定了各个环境因子对不同的气象要素空间分布的影响度,以期为湖南省的植被生产力模型和其他生态系统模

拟提供高精度的空间化气候要素数据,为合理开发山地丘陵地区的自然资源和保护环境平衡提供科学依据。

## 1 空间插值模型

空间插值的理论依据是“地学第一定律”的假设<sup>[18]</sup>。目前空间插值的方法很多,本文主要探讨普通克里金插值法、反距离加权法、样条法和多元线性回归插值方法(MLR)对区域气象信息空间模拟的效果。其中,普通克里金插值法、反距离加权法和样条法的具体算法参考文献<sup>[18-21]</sup>。

### 1.1 多元线性回归插值方法(MLR)

已有研究表明,气候分布的水平地带性和垂直地带性特征会对气象的插值结果产生影响<sup>[10]</sup>,这些影响因素主要有经纬度、海拔、坡度、坡向等。基于DEM的多元线性回归法,就是综合考虑地形和地理要素对气候数据的空间分布的影响。本文以湖南省及其周围地区46个气象站点的月均温和降水数据为因变量,以站点相应的经纬度、海拔高度以及从DEM采集得到的坡度、坡向信息为自变量分别进行多元线性回归,以分析多因子对气象要素的综合影响。该模型公式如下:

$$Z = f(L, B, H, S, A) = a_0 + a_1 \times L + a_2 \times B + a_3 \times H + a_4 \times S + a_5 \times A \quad (1)$$

式中 $Z$ 为待插值点的估计值,此处表示气候因子(月平均温度,月总降水量)的线性回归值; $L, B, H, S, A$ 分别为经度、纬度、高程、坡度和坡向数据; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 是回归系数, $a_0$ 是残差项。

### 1.2 插值精度评价方法

#### 1.2.1 插值精度评价指标

定量化评价不同空间插值方法的插值精度,一般有“交叉验证”和“实际验证”2种方法<sup>[19]</sup>。具体的验证过程参考文献<sup>[10, 19]</sup>。本文选择“实际验证”法进行插值精度比较,即从湖南省及其周边的46个站点中选出7个站点作为气象要素插值精度的检验站点,插值则以其余的39个站点为基础。根据插值结果,对比分析观测值与估算值的差异,插值精度由平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)和平方根误差(Root Mean Squared Interpolation Error, RMSIE)的大小来决定。其中,MRE主要评估可能的误差范围,RMSIE可以反映插值结果的灵敏度和极值效应,两者的值越小,表明模拟的精度越高<sup>[13, 19]</sup>。

#### 1.2.2 因子决定力指数

地理探测器是由王劲峰等<sup>[22]</sup>提出的,它是利用空间方差分析来对疾病与危险因素的关系做出定量描述,最早运用于健康风险评估领域。近几年,该模型也被广泛应用于其他领域<sup>[23-25]</sup>。其中,模型的因子探测器模块(Factor Detector)的思想是:若某环境因素与地理事物的变化在空间上具有显著的一致性,则说明该环境因素对地理事物的发生和发展具有决定意义<sup>[22, 26]</sup>。借鉴该思

想 本文采用因子探测器来验证某种环境因子是否会对实验区气象要素空间分异产生影响的主要原因。

假设实验区域为  $C$ , 疑似影响因素为  $D$ , 其中,  $D = \{D_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ , 是  $D$  因素各自的空间类型分区), 此处代表地理或地形因子, 当  $i$  取不同的值时,  $D_i$  分别代表不同的影响因子。其中, 探测气象要素空间分布影响因素的计算模型如下:

$$P_{D,C} = 1 - \frac{1}{n\sigma_C^2} \sum_{i=1}^m n_{D_i} \sigma_{C_{D_i}}^2 \quad (2)$$

$$n = \sum_{i=1}^m n_{D_i} \quad (3)$$

式中  $P_{D,C}$  即区域气象要素空间分布格局影响因子探测力指标, 定义为风险因子  $D$  对区域气象要素空间分布  $G$  的决定力大小;  $n$  为整个实验区域内的样本数;  $n_{D_i}$  代表在风险因子  $D$  的子区域  $i$  内的样本数;  $n_{D_j}$  代表在风险因子  $D$  的子区域  $j$  内的样本数;  $\sigma_C^2$  代表整个区域的离散方差;  $\sigma_{C_{D_i}}^2$  代表在风险因子  $D$  的分区空间区域内  $G$  的离散方差。若  $P_{D,C}$  取值区间为  $[0, 1]$  说明该潜在因素对区域气象要素空间分布问题有影响, 值越大说明其相关性越强; 若  $P_{D,C} \in (-\infty, 0]$  说明该潜在因素与气象要素在空间分布上不存在一致性。

## 2 实验区与数据资料

### 2.1 实验区概况

湖南省位于长江中游南部,  $108^{\circ}47' - 114^{\circ}15'E$ ,  $24^{\circ}38' - 30^{\circ}08'N$  之间, 年平均气温  $16 - 18^{\circ}C$ , 降水量  $1200 - 1500\text{ mm}$ 。该区域地形地貌大体上形成了东、南、西三面环山, 中部丘陵起伏, 北部洞庭湖平原展布, 南高北低, 东、西高而中部低的朝东北开口、不对称的马蹄形盆地, 湘、资、沅、澧四水分别贯穿境内<sup>[27]</sup>。可见湖南地形复杂, 且处于我国东西和南北两个方向的地形转折和过渡带上, 海拔相差较大, 存在明显的垂直分异性; 再者东西部气候差异明显, 相比之下, 东部年气温变化较大, 屡有干旱发生。

### 2.2 数据来源与处理

湖南省行政边界数据来自中国基础地理信息矢量图 (<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)。采用的 DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为  $30\text{ m}$ , 对地理信息文件进行相应的处理后, 提取出覆盖本实验区的 DEM、经度、纬度、坡度和坡向图层数据。

气象数据来源于中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.nmic.cn/>)。选取湖南省及周边地区的 46 个气象站点 (其中湖南境内的气象站点为 34 个) 的月降水量和月均温度数据, 时间为 2000—2013 年。其中, 多年平均降水量和温度数据是分别根据各月降水量和温度数据进行处理得到的。在 ArcGIS 环境下, 将收集到的带有经纬度信息的测站点数据处理成点 shape 文件, 并展点显示。气象站点空间分布如图 1 所示。

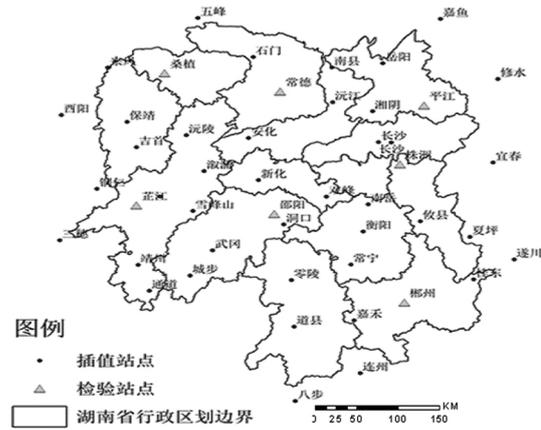


图 1 实验区及气象站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of meteorology stations

## 3 实验结果与分析

### 3.1 插值方法精度分析

本文使用 OK、IDW、SPLINE 和 MLR 4 种方法对湖南省 14 年 (2000—2013 年) 的气象资料 (年降水量、年均温、月降水量和月均温数据) 分别进行插值实现空间化, 并采用“实际验证”的方法对插值结果进行精度检验, 以 MRE 和 RMSIE 为衡量指标, 验证结果如图 2 所示。

从图 2 可知, 对于各月的降水量空间插值结果, OK 法的 MAR 与 RMISE 的值总体上最小; 其次为 MLR 法; 之后为 IDW 法; 而各月降水量的观测值与估算值的最大误差出现在 SPLINE 法。即逐月降水量插值精度显示为 OK 法最优, 其次为 MLR 法, 然后是 IDW 法, 最后为 SPLINE 法。

同理, 对于逐月平均温度的插值精度而言, MLR 法最优, 次之为 IDW 法, 接着是 OK 法, SPLINE 法最差。

对于年平均降水量插值的 MRE、RMISE 值的排序为  $SPLINE > IDW > OK > MLR$ ; 对于年平均温度插值的误差排序则为  $SPLINE > OK > IDW > MLR$ 。

就 4 种插值方法而言, 误差都有明显的季节性变化 (如图 3 所示)。就降水而言, 4 种方法都表现出春、冬季低, 夏、秋季高些的趋势, 其中 OK 法和 MLR 法在四季的误差趋势线较为平缓。而对于平均温度, 4 种方法都表现出冬季误差增大, 其他季节误差较为平缓的趋势, 这可能与冬季站点之间的温差较大有关, 相比之下, 样条法在冬季的插值误差表现最明显, 而 MLR 插值法的误差在四季变化上均最小。综上所述, 根据不同插值方法的精度验证数据来探讨适用于湖南省气象要素空间化的方法, 结果显示, 各月降水量插值方法的优劣排序为  $OK > MLR > IDW > SPLINE$ ; 年平均降水量插值方法的优劣排序则为  $MLR > OK > IDW > SPLINE$ ; 各月及年平均温度的插值方法的优劣排序为  $MLR > IDW > OK > SPLINE$ 。并且从插值方法的季节性误差变化 (如图 3 所示) 可知, 整体上

MLR 方法的效果最好 主要原因是 MLR 法对与气象要素 最好的。相关的地理、地形影响因子考虑较为全面,所以插值效果

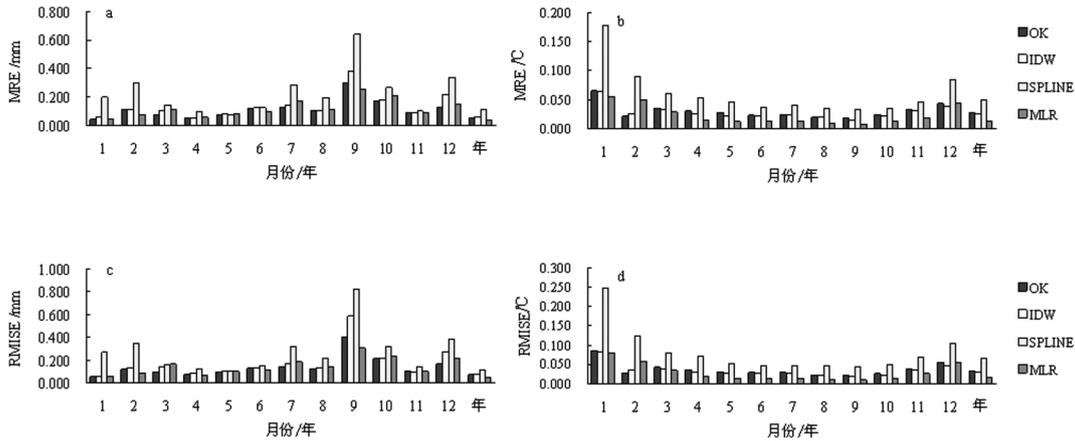


图2 检验站点各月(年)的精度验证结果

Fig. 2 The validation results of four interpolation methods for the validation stations with MRE for monthly or yearly precipitation

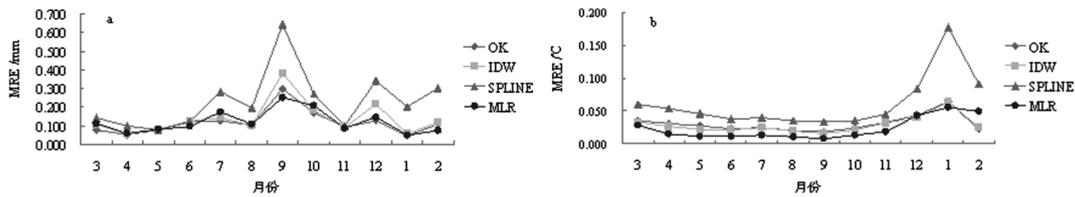


图3 4种插值方法的平均相对误差的季节性变化

Fig. 3 MRE for monthly precipitation for the four interpolation methods

### 3.2 4种插值方法效果比较

分别利用4种插值方法对湖南省2000—2013年的年均温和年降水量进行空间化,结果如图4、图5所示。

从图4中可以看出,湖南省的年均气温在7—21℃左右,4种插值方法均可以反映年均温的梯度性变化,实验区年均温的高值区主要集中在环洞庭湖区和湘中南部地区,而低值区则分布在西北地区,以及南部地区的一些零星像元群。图4显示,OK插值法的条带现象明显,而IDW插值法和SPLINE插值法产生的图像均较为平滑,三者都能很好地表示出区域年均温的变化趋势,但是受气象台站空间分布不均匀的影响,OK法、IDW法和SPLINE法很容易出现极值区域和极值中心偏差的现象,特别是IDW插值法生成的年均温分布图像存在明显较多的“牛眼”。同理,MLR法相比于其他3种空间插值法更能从细节上体现区域年均温与地理以及地形因子的关系。

4种方法插值结果均显示出实验区年降水量在空间上呈现出明显的梯度变化,图5显示,实验区年降水量由东北向西南逐渐增加,而南部地区是省内降水最多的地区。从插值结果看,湖南省的年降水量在910—2800mm左右,前3种插值法的数值区间较为一致,而MLR插值法

由于受回归变量的影响较大,使得模拟结果在海拔较高的地区空间变异过大,即线性方程会在很大程度上造成数据出现不符合实际的极值;而MLR插值法可以更精确地表现出年降水量随环境因素等的变化所带来的细节差异。因此,就插值效果而言,MLR插值法比其他3种插值方法更能从细节和空间分辨率精度上反映本实验区年降水量的空间变化。

### 3.3 数据探索性计算与分析

从插值精度以及插值效果来看,相比于其他3种空间插值法,MLR插值法更适用于实验区的气象要素空间化,因此,本文对MLR插值法的多变量进行数据探索,以确定多变量对气象要素空间分布格局的影响度。文中借助王劲峰等<sup>[22]</sup>提出的地理探测器模型中的因子探测器分别对MLR插值法中的多因子的决定力进行探索,其中以站点相应的经纬度、海拔高度、坡度和坡向信息为自变量。需要说明的是,温度本身与高程有直接的物理推导关系,并且存在温度的垂直递减特征,因此在确定温度的高程效应之前,需要考虑高程对温度的影响,本文利用平均环境温度垂直递减率(取常数0.0065℃/m)和DEM数据,求得研究区任一点的平均温度。

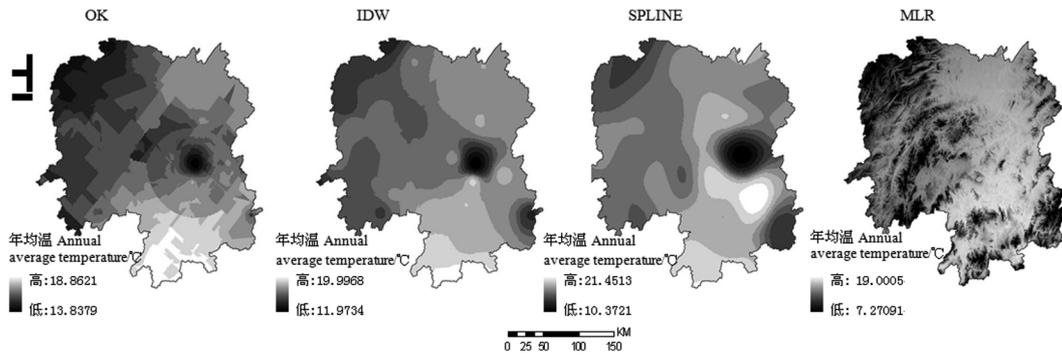


图 4 基于 4 种不同插值方法的湖南省年均温空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual temperature by different interpolation methods in Hunan Province

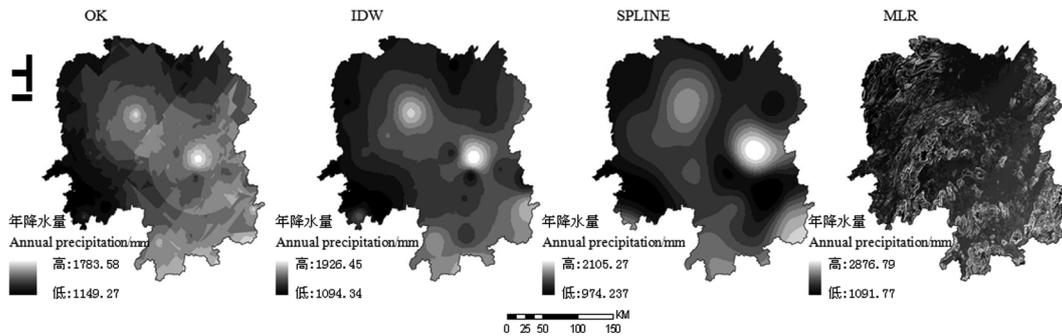


图 5 基于 4 种不同插值方法的湖南省年降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual precipitation by different interpolation methods in Hunan Province

根据因子探测器可以筛选出相关性较大的疑似影响因子,由因子决定力指数计算得到经度、纬度、高程、坡度和坡向对年降水和年均温的影响(Power 值)分别如下,年降水量:经度(22.49%)>坡度(19.11%)>纬度(9.44%)>高程(4.85%)>坡向(2.81%);年均温:纬度(55.27%)>高程(33.22%)>坡度(10.40%)>坡向(4.53%)>经度(4.25%)。

根据结果显示,湖南省年降水量的空间分布与经度、坡度在不同的区域差异很小,说明这些因素能够较好地解释区域年降水量的空间变异性在很大程度上与降水量的空间分布存在一致性。研究区在地形上呈现西高东低,并且由于经度的差异,研究区的东、西部在气候上也有明显的差异,西部与东部虽然降水量相差不大,但相比而言,西部分配较均匀,特别是西部的武陵山地区多地形雨,无伏旱发生,而东部的丘陵盆地春夏时节暴雨多,常有伏旱发生。纬度、高程和坡度能够很好地解释区域年均温的空间变异性,表明这些因素对区域年均温的空间分布的影响较大,特别是纬度对年均温的空间分布具有很强的解释力,达到了 55.27%。相反,年均温与坡向和经度在不同的区域内差异相对较大,表明这两个因素对年均温的空间分布的影响相对较小。由于纬度的影响,使得研究区南、北部的热量存在显著差异;再者,由于地形的影响,西部地势高且山地纵横,以及山地逆温层的影响,造成西部虽然年平均温度偏低但年变幅较小,而东部年温度变幅较大,特别是丘陵盆地夏时酷暑,冬有严寒。

说明利用因子探测器能够筛选出相关性较大的疑似影响因子,并且数据探索结果能够较好地解释研究区气候变化的原因。

#### 4 结束语

1) 利用 4 种空间插值方法分别对研究区的月降水量、月均温和年降水量、年均温进行空间化,结果表明,逐月降水量的插值精度依次为 OK 法、MLR 法、IDW 法、SPLINE 法;逐月平均温度的插值精度依次为 MLR 法、IDW 法、OK 法、SPLINE 法;而对于年平均降水量插值的 MRE、RMSE 值的排序为 SPLINE > IDW > OK > MLR;年平均温度插值的排序则为 SPLINE > OK > IDW > MLR。

2) 从插值效果来看,MLR 插值法因对变量考虑比较全面,不仅插值误差小,而且更能从细节上体现出气象要素与环境因子的相关性,反映出气象变化的空间变异性。

3) 对多变量进行数据探索分析表明,MLR 插值法中,经度、坡度与年降水量空间分布存在空间的一致性;纬度、高程和坡度对年均温的空间分布具有很强的解释力。

本文只选择了较为常用的 4 种插值方法进行湖南的月降水量、月均温和年降水量、年均温的空间化方法的适用性探索,而相关研究显示,以 ANUSPLIN 为代表的气候插值专业软件不仅能够平稳地处理二维以上的样条并且能同时进行多个表面的空间插值,已在国际上得到广泛使用<sup>[28]</sup>。因此,在下一步的研究工作中,将充分考虑其他插值方法对实验区域的适用性,并对区域的气象要素时

空分布特征做进一步的模拟与分析, 以期为湖南省的植被生产力模型和其他生态系统模拟提供高精度的空间化气候要素数据输入, 为合理开发山地丘陵地区的自然资源和保护生态平衡和区域的可持续发展提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 王丽, 王培法, 刘爱利, 等. 基于 DEM 的江苏气温空间插值研究[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2015, 7(1): 79-85.
- [2] 彭少麟. 全球变化现象及其效应[J]. 生态科学, 1997, 16(2): 1-8.
- [3] 彭少麟. 全球变化与可持续发展[J]. 生态学杂志, 1998, 7(2): 32-37.
- [4] 徐婷, 邵华, 张驰. 近 32a 中亚地区气温时空格局分析[J]. 干旱区地理, 2015, 3(1): 25-35.
- [5] 嵇涛, 刘睿, 杨华, 等. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究——以川渝地区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 108-117.
- [6] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [7] 李忠武, 蔡国强, 唐政洪, 等. 作物生产力模型及其应用研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1174-1178.
- [8] 王倩倩. 基于 RS 和 GIS 的农区气象数据重建方法研究——以河南省为例[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [9] 陈冬花, 邹陈, 王苏颖, 等. 基于 DEM 的伊犁河谷气温空间插值研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1925-1929.
- [10] 蔡迪花, 郭妮, 李崇伟. 基于 DEM 的气温插值方法研究[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 10-17.
- [11] 彭彬, 周艳莲, 高萃, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539-548.
- [12] 朱蕾, 黄敬峰. 山区县域尺度降水量空间插值方法比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 80-85.
- [13] 潘耀忠, 龚道溢, 邓磊, 等. 基于 DEM 的中国陆地多年平均温度插值方法[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 366-374.
- [14] 徐超, 吴大千, 张治国. 山东省多年气象要素空间插值方法比较研究[J]. 山东大学学报: 理学版, 2008, 43(3): 1-5.
- [15] Lam N S. Fractal Analysis[J]. International Encyclopedia of Human Geography 2009.
- [16] 周锁铨, 薛根元, 周丽峰, 等. 基于 GIS 降水空间分析的逐步插值方法[J]. 气象学报, 2006, 64(1): 100-111.
- [17] 李萌, 王秀丽, 丁媛媛. 几种逐日气温插值方法的比较[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(25): 8670-8674, 8684.
- [18] 邹伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [19] 王丽娜. 气象要素空间插值算法的研究及其应用[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2014.
- [20] 彭思岭. 气象要素时空插值方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [21] Vicente - Serrano S M, Saz - Sánchez M A, Cuadrat J M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature [J]. Climate Research, 2003, 24(2): 161-180.
- [22] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [23] 丁悦, 蔡建明, 任周鹏, 等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素[J]. 地理科学进展, 2014, 33(5): 657-666.
- [24] 毕硕本, 计晗, 陈昌春, 等. 地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析[J]. 地理科学进展, 2015, 34(1): 118-127.
- [25] 刘彦随, 杨忍. 中国县城城镇化的空间特征与形成机理[J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1011-1020.
- [26] 赵豫. 法定传染病漏报区域的发病率空间分布统计插值[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [27] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 基于 GIS 的湖南省耕地利用效益时空变异研究[J]. 经济地理, 2013, 33(9): 142-147.
- [28] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1965-1978.

[编辑: 任亚茹]

(上接第 50 页)

无论从定性方面还是定量方面, 都在一定程度上证明了本文提出匀光方法的优越性和可行性。

#### 4 结束语

针对传统 MASK 匀光算法的不足, 本文提出的基于距离权重的分块 MASK 匀光方法, 获得的背景影像, 与经典的 MASK 匀光方法对比, 剔除了更多的影像细节信息, 使得影像的各个局部有更好的匀光效果; 反差一致性拉伸处理后, 反差分布一致, 影像细节更加丰富, 目视效果更好, 具有一定的优越性和可行性。

背景影像的获取过程中, 影像的分块和截止频率范围的设定对匀光效果有较大的影响。因此, 如何更好地确定影像的分块和截止频率范围是需要进一步考虑的问题。

#### 参考文献:

- [1] 张振, 朱宝山, 朱数龙. 反差一致性改进的 MASK 匀光算法[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(1): 54-56.
- [2] 王密, 潘俊. 一种数字航空影像的匀光方法[J]. 中国影像图形学报, 2004, 9(6): 744-748.
- [3] 姚芳, 万幼川, 胡晗. 基于 Mask 原理的改进匀光算法研究[J]. 遥感信息, 2013, 28(3): 8-13.
- [4] 史宁. 基于 Mask 方法的无人机航拍影像匀光处理[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [5] Robert, Theodore. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems [J]. Society of Photo - Optical Instrumentation Engineers, 2001, 40(4): 574-585.
- [6] 王文远. 基于影像信噪比选择优化高斯滤波尺度[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2483-2487.
- [7] 曹彬才, 朱宝山, 李润生, 等. 用于单幅影像匀光的 Wallis 算法[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(5): 373-377.

[编辑: 刘莉鑫]