

# 基于多元线性回归模型和 Anusplin 的秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间模拟比较

张善红<sup>1,2,3</sup>, 白红英<sup>1,3</sup>, 齐贵增<sup>1,3</sup>, 梁佳<sup>4</sup>, 赵婷<sup>1,3</sup>

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.商洛学院 城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000;

3.西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 4.陕西省气象服务中心, 西安 710014)

**摘 要:**为获取山区准确的高精度空间积温数据,采用高精度的气象插值软件 Anusplin 和多元线性回归模型两种方法,模拟山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布,为山区积温空间模拟提供解决方法。以地形起伏较大的秦巴山区作为研究区,选用研究区内 69 个气象站点及其周边 22 个气象站点 1960—2019 年的逐日平均气温实测数据,采用 Anusplin 和多元线性回归模型两种方法,模拟了秦巴山区 30 m 分辨率 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布。通过对预留气象站点实测数据进行验证,评价了两种方法在山区积温空间分布模拟复杂性问题中的适用性。结果表明:基于 Anusplin 的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间模拟方法较多元线性回归模型插值精度略高。即基于 Anusplin 的空间模拟方法能更真实地反映山区积温的空间分布情况,体现了海拔、经纬度对积温的影响,能更好地模拟复杂山区高精度的积温数据,为山区积温空间模拟提供了新的选择方法。

**关键词:**Anusplin; 活动积温; 多元线性回归模型; 空间模拟; 秦巴山区

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0184-06

## Spatial Simulation of Active Accumulated Temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in Qinling-Daba Mountains Based on Anusplin and Multiple Linear Regression Model

ZHANG Shanhong<sup>1,2,3</sup>, BAI Hongying<sup>1,3</sup>, QI Guizeng<sup>1,3</sup>, LIANG Jia<sup>4</sup>, ZHAO Ting<sup>1,3</sup>

(1.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2.College of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo,

Shaanxi 726000, China; 3.Key Laboratory of Shaanxi Surface System and Environmental Carrying Capacity,

Northwest University, Xi'an 710127, China; 4.Shaanxi Meteorological Service Center, Xi'an 710014, China)

**Abstract:**To obtain accurate and fast spatial accumulated temperature data in mountainous regions, two methods, high-precision meteorological interpolation software Anusplin and multiple linear regression model, were used to simulate the spatial distribution of accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in mountainous areas in order to provide solutions for the spatial distribution of accumulated temperature in mountainous areas. The Qinling-Daba Mountains with large topographic relief was taken as the study area. Based on Anusplin and multiple linear regression interpolation methods separately, 30 m resolution spatial distribution of actively accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (AAT10) was simulated by combining with DEM and the daily meteorological observation data from 69 meteorological stations in the research and surrounding 22 meteorological stations during 1960—2019. The interpolation accuracy of Anusplin and multiple linear regression were compared, and the applicability of the two methods in complex mountainous areas is evaluated through verifying the measured data of reserved meteorological stations. The results show that both two interpolation methods are suitable for spatial simulation of active accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  (AAT10) in Qinling-

收稿日期:2020-12-16

修回日期:2021-02-16

资助项目:国家自然科学基金(31570440);商洛市气候适应型城市重点实验室开放研究(SLSYS2019019)

第一作者:张善红(1983—),女,山东日照人,博士,研究方向为植被变化与水土保持研究。E-mail:feiyang84120@126.com

通信作者:白红英(1962—),女,陕西宝鸡人,博士,教授,主要从事全球变化及自然地理学等方面的研究。E-mail:hongyingbai@163.com

Daba mountains, but the Anusplin has slightly higher accuracy than the multiple linear regression interpolation methods. In other words, the spatial interpolation method based on Anusplin can more realistically reflect the spatial distribution of the accumulated temperature, and can better simulate the high-precision accumulated temperature data of complex mountainous areas, which provides a new method for the spatial simulation of active accumulated temperature in the mountainous area.

**Keywords:** Anusplin; active accumulated temperature; multiple linear regression model; spatial simulation; Qinling-Daba Mountains

政府间气候变化委员会(IPCC)第五次评估报告指出,19 世纪 80 年代到 2012 年,地球平均温度升高了  $0.85^{\circ}\text{C}$  (IPCC, 2014 年)。在过去的 30 a 里,每 10 a 的地表平均气温都高于人类有记录以来的任何 10 a,且 2000 年以来的十几年气温是有史以来人类记录中最高(IPCC, 2013 年)。以全球变暖为特征的气候变化及其有可能产生的负面影响正在成为国际社会普遍关注的问题<sup>[1]</sup>。特别是近些年来,随着自然因素和人类活动对气候变化的双重影响<sup>[2]</sup>。气候变化已经严重威胁到农业安全、能源安全、生态安全、水资源安全、公共卫生安全等各方面<sup>[3]</sup>。气候变化会改变农业气候资源的分布,特别是热量资源的分布。随着热量资源的变化,一个地区的农业种植制度、农业结构和农作物产量都会随着热量资源的变化而产生深刻的影响<sup>[4]</sup>。积温是衡量一个地区的热量资源极为重要的一个指标,也是衡量作物生长发育过程中所需热量条件的一种指标<sup>[5-7]</sup>。 $10^{\circ}\text{C}$  是喜温植物适宜生长的起始温度,日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的积温体现喜温作物所需热量资源的高低<sup>[8]</sup>,是进行农业区划的重要依据。准确了解地形起伏的山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的空间分布,对山区农业规划和农业布局具有十分重要的意义。但在现实中各气象站点往往受地理条件、技术条件及经济条件等多种因子的限制,各地区的气象站点的空间分布并不均匀,一般以县为单位作为采集点。而气象站点的实时观测数据只能代表其所在位置的气象状况,无法表征整个区域的气象状况,因此寻找适合山区气象要素的空间插值方法,准确快速地获取山区高精度空间气象数据是近年来地理科学的重要任务之一<sup>[9]</sup>。

对于积温的研究,国内外各学者相继提出一些研究模型和方法<sup>[10-13]</sup>,自 20 世纪 90 年代,随着 GIS 技术的高速发展,气温精细空间化研究在国外得到很大发展,国内的学者开始应用 GIS 技术研究积温的精细空间分布。刘新安等<sup>[14]</sup>采用空间插值与三维二次趋势面分析相结合的方法,对中国陆地 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$  积温进行空间化研究(空间分辨率  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ),且空间的精度基本达到实用要求;尹洪涛

等<sup>[15]</sup>利用 GIS 和数学模拟技术,通过小网格推算模型模拟了辽西地区的热量资源,并通过小地形进行订正,生成了辽西地区  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的热量资源空间分布图;戴声佩等<sup>[16]</sup>采用多元线性回归模型的积温空间模拟方法,模拟并研究了华南地区 1960—2011 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的时空变化特征,认为多元线性回归模型适合于较大范围的积温数据空间模拟;高蓓等<sup>[17]</sup>基于多元线性回归模型的空间模拟认为秦岭南北近 50 年来 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的空间变化整体呈增加趋势。也有一些学者通过多系统气候模式预测较大尺度地区 21 世纪植被的生长季和活动积温的变化<sup>[18]</sup>。目前,国内外学者使用 Anusplin 专业气候空间插值软件等新方法形成了一系列较为权威的气温空间化数据集<sup>[19]</sup>。此方法逐步成为空间插值的主要手段之一,该方法可考虑多个地理因子作为线性协变量,其插值精度优于传统的插值方法,被广泛应用于气候要素的空间插值研究中。

多元线性回归模型模拟积温方法,较传统的插值方法在复杂的空间插值中有着较高的准确度,因此被广泛应用积温的空间插值<sup>[16-22]</sup>。国内外学者在积温插值方法方面多考虑多元线性回归模型与 Kriging, IDW, Spline 这些传统的插值方法对比,证明多元线性回归模型较传统的插值方法精度要高。目前,国内外学者运用 Anusplin 方法对气温插值的研究较多,但运用该方法对积温插值的研究较少。本文选取地形起伏较大的秦巴山区作为研究区,利用研究区内和周边 91 个气象站点,采用 Anusplin 插值和多元线性回归模型两种方法,实现研究区内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的空间模拟,并对预留气象站点实测数据进行检验,分析 Anusplin 和多元线性回归模型方法效果的优劣,评估更适合我国秦巴山区的气象数据插值方法,为复杂山区积温模拟方法的选择提供科学依据,优化插值效果。

## 1 研究区概况

秦巴山区位于我国中部( $102^{\circ}54' - 112^{\circ}40'\text{E}$ ,  $30^{\circ}50' - 34^{\circ}59'\text{N}$ ),总面积约为  $22.35\text{ 万 km}^2$ ,地跨陕、甘、蜀、豫、鄂、渝 5 省 1 市<sup>[23]</sup>(图 1),地势西高东低,海拔

高度悬殊。地貌类型多以山地丘陵为主,间有盆地,形成“三山夹两川”格局。全区受季风气候影响,兼有暖温带和亚热带特征,水资源丰富,是汉江、嘉陵江、丹江等主要河流的发源地,年均降水量 450~1 300 mm,年均温度 12~16℃。植被类型多样且地带特征明显,秦岭主体为暖温带落叶阔叶林为优势的植被类型,秦岭以南的大巴山区为北亚热带常绿—落叶阔叶混交林,是我国人文、地理、气候、生物等南北过渡区,也是气候变化的敏感区和生态环境的脆弱区<sup>[24]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文选取研究区及周边 91 个气象站点 1960—2019 年逐日平均气温观测数据,来源于陕西省气象局、中国气象局和中国气象科学数据共享服务网。为保证研究数据的完整性和连续性,部分站点缺测数据,

通过站点已有数据与邻近站点实测数据的一致性检验进行插补,结果见图 2。由图 2 可以看出,缺测数据站点与临近站点的数据一致性良好, $R^2$  均大于 0.97 以上,说明采用临近站点的插补方法是可行的。数字高程(DEM)数据分辨率为 30 m×30 m,来源于国家基础地理信息中心。

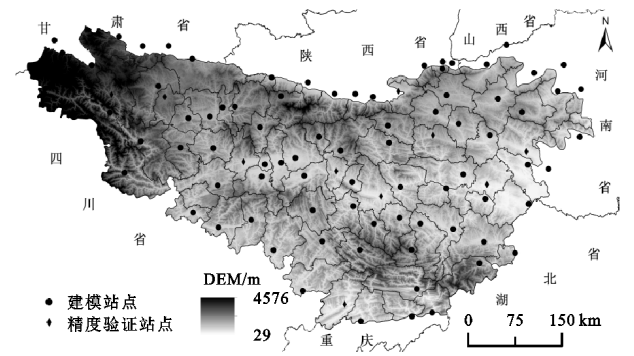
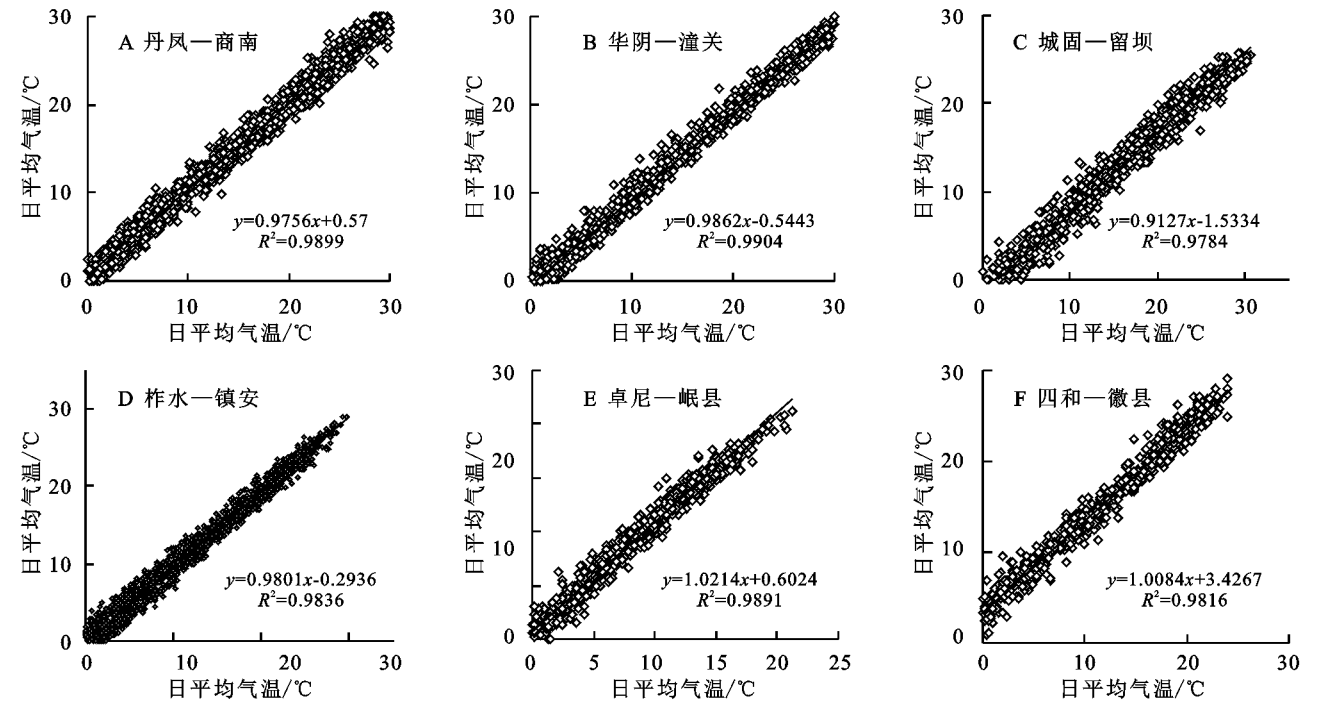


图 1 研究区气象站点分布



注:前边站点为所缺数据站点名称,后面站点为临近站点。

图 2 部分所缺数据站点与临近站点的数据一致性检验

### 2.2 研究方法

2.2.1  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的计算 本文的界限温度确定为  $10^{\circ}\text{C}$ ,采用 5 日滑动平均法确定日平均气温稳定  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  起止日期,其初日定义为 5 日滑动平均气温  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的日期,终日定义为 5 日滑动平均气温  $< 10^{\circ}\text{C}$  的日期<sup>[25]</sup>。初日和终日之间的日平均气温总和即为日平均气温稳定  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  期间积温<sup>[16]</sup>。

2.2.2 基于多元回归模型的积温模拟 以各站点的经度、纬度、海拔这三要素为自变量,运用多元回归模型模拟秦巴山区积温的小网格空间模型,得到秦巴山区积温的空间分布。针对秦巴山区地形地貌复杂的

特点,为提高积温的拟合精度,必须计算积温的残差部分。气候资源要素的残差部分,通常代表着该气候要素受微观地形因素影响所产生微小波动<sup>[26]</sup>。

本研究方法  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的空间分布地表现形式为:

$$Y = F(\lambda, \varphi, h) + \sigma \quad (1)$$

式中: $F(\lambda, \varphi, h)$  表示受经度、纬度、海拔影响的  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温; $\sigma$  为残差项,即小地形因子对  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温的影响和随机误差。将建模站点  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的积温及其经度、纬度、海拔代入上式,在 SPSS 22.0 进行建模,得出回归方程如下:

$$Y = 22309.374 - 88.891\lambda - 215.718\varphi - 1.584h \quad (2)$$



该模型的置信水平  $\alpha$  为 0.001,复相关系数为 0.971, $R^2$  为 0.943,达到建模的精度要求。

2.2.3 Anusplin 插值方法 Anusplin 是基于一般薄盘和局部薄盘样条函数插值理论。局部薄盘光滑样条是对薄盘光滑样条原型的扩展<sup>[27-28]</sup>,它除通常的样条自变量外,允许引入线性协变量子模型,如海岸线距离、海拔等多个地理因子作为线性协变量<sup>[29]</sup>。局部薄盘光滑样条的理论统计模型为:

$$Z_i=f(x_i)+bTy_i+e_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \quad (3)$$

式中: $Z_i$ 为位于空间  $i$  点的因变量; $f(x_i)$ 为关于  $x_i$  的未知光滑函数; $x_i$ 是独立变量; $y_i$ 为  $p$  维独立协变量; $b$  为独立协变量  $y_i$  的  $p$  维系数; $e_i$ 为具有期望值为 0 的自变量随机误差。当公式(3)中缺少第 2 项,即协变量( $p=0$ )时,模型简化为普通薄盘光滑样条;当缺少第 1 项独立自变量时,模型变为多元线性回归(Anusplin 中不允许这种情况出现<sup>[30-31]</sup>)。Anusplin 在独立变量、协变量和样条次数方面有多种组合,共有 18 种模型。经多次试验,本文在对≥10℃ 积温插值的最优空间插值模型以经度、纬度为自变量,海拔为协变量的三变量局部薄盘光滑样条函数,样条次数设为 2,能够保证精度达到最高。

2.2.4 模型验证方法 为检验两种方法对气象数据插值的优势,通过 81 个建模站点进行积温的空间模拟,获取预留未参加建模的 10 个气象站点(蓝田、勉县、石泉、安康、山阳、宕昌、西和、西峡、郧县、开县)的模拟值,对 10 个预留气象站点的模拟值与实测值在 SPSS 中进行回归分析,进行误差检验,运用表征估计值可能的误差范围的平均绝对误差(MAE)、反映利用数据估值的灵敏度和极值效应的均方根误差(RMSE)、反映插值相对精确性的平均相对误差(MRE)3 个参数<sup>[28,32]</sup>评估基于多元回归模型的空间积温模拟和 Anusplin 插值方法模拟秦巴山区≥10℃ 积温插值的效果。具体公式为(4—6)。

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|Z_i-Z'_i| \quad (4)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(Z_i-Z'_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$MRE=\frac{n}{\sum_{i=1}^n|Z_i|}\times MAE \quad (6)$$

式中: $Z_i$ 为第  $i$  个站点的实际观测值; $Z'_i$ 为第  $i$  个站点的估计值; $Z'_i$ 为第  $i$  个站点的估计值; $n$  为参与检验的站点的个数。参数值越小,说明插值方法的准确度越高。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于多元回归模型的≥10℃ 积温空间模拟

(1) 参数获取:利用研究区 DEM 数据在 ArcGIS 10.2 软件上获取模拟所需的研究区经度、纬度、海拔栅格数据。

(2) 获取预测栅格图:利用获取的 3 个模拟参数和回归模型公式(2)求得研究区 1960—2019 年日平均气温稳定≥10℃ 积温期间积温的预测栅格图。

(3) 模拟≥10℃ 积温空间分布图:利用回归模型模拟的建模站点的残差进行反距离权重(IDW)插值,获得模拟残差空间分布图;根据公式(1)模拟计算,获得研究区 1960—2019 年≥10℃ 积温空间分布图(图 3A)。

(4) 插值验证:10 个未参与建模站点的实测数据与模拟结果的数据进行回归分析验证,经检验,在  $p=0.001$  水平上, $R^2$  为 0.959 7,实测值与模拟值的线性一致性较强,满足模拟结果的精度要求,说明基于多元回归模型方法模拟秦巴山区≥10℃ 的空间积温可行。

#### 3.2 基于 Anusplin 插值≥10℃ 积温空间模拟过程

3.2.1 数据处理 应用 Anusplin 软件,首先需要将≥10℃ 积温数据通过 SPSS 软件处理成程序要求的标准格式,包括站点代码、经度、纬度、高程信息和积温等数据集,在变量视图中修改数据名称、类型、宽度等,数据格式详见表 1,以研究区内 5 个气象站点的数据为例。Anusplin 软件所需要的 DEM 数据需要转换成 ASCII 形式,利用 ArcGIS 软件对 DEM 数据投影变换为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_47N 投影,然后利用转换工具将 DEM 转为 ASCII 格式文件。

表 1 1960—2019 年均≥10℃ 积温数据格式(AAT10℃.dat)

站点	X	Y	DEM/m	AAT10/℃
57057	1530771.554327	3831030.173168	963.4	3621.7
57231	1398280.238950	3643030.569247	503.8	4798.1
57008	1070200.265984	3799810.125650	1404.6	2850.6
57251	1569370.334569	3709780.345696	252.5	4904.5
57339	1427000.332589	3464590.646984	297.2	6066.4

注:数据集投影与 DEM 投影一致。

##### 3.2.2 编写运行脚本,反复检验,确定最优模型

Anusplin 插值软件调用 splina.exe 和 lapgrd.exe 程序,首先将插值数据和 DEM 数据转成 ASCII 格式文件,然后编写运行需要的两个 cmd 文件脚本(lapgrd 和 splina),并运行脚本形成空间插值结果(.grd),然后对空间插值结果进行投影。

Anusplin 在独立变量、协变量和样条次数方面有多种组合,共有 18 种模型。本文对日均温≥10℃ 积温插值的最优空间插值模型以经度、纬度为自变

量,海拔为协变量的三变量局部薄盘光滑样条函数,样条次数设置为 2,保证精度达到最高。

3.2.3 获得研究区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间分布图 最优模型的空间插值投影后,以研究区为掩膜进行裁剪,获得秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间分布图,见图 3。

3.2.4 插值验证 10 个未参与建模站点的实测数据与模拟结果的数据进行回归分析验证,经检验,在  $p=0.001$  水平上, $R^2$  为 0.983 2,实测值与模拟值的线性一致性较强,满足模拟结果的精度要求,说明基于 Anusplin 方法模拟秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的空间积温可行。

### 3.3 两种插值结果比较

3.3.1 两种插值方法误差对比分析 利用预留的 10 个站点的实测数据对两种方法的模拟结果进行精度验证,见图 3 中精度检验。根据验证点两种方法的模拟值和观测值的散点分布可以看出,多元线性回归模型的  $R^2$  为 0.959 7( $p=0.000$ ),Anusplin  $R^2$  为 0.983 2

( $p=0.000$ ),表明模拟结果符合要求,说明基于多元线性回归模型的积温空间插值方法和 Anusplin 插值方法可行,适合于秦巴山区的积温数据空间化模拟。但 Anusplin  $R^2$  略大于多元线性回归模型  $R^2$ ,表明基于 Anusplin 的插值方法模拟积温与实测积温的线性一致性更强。

对两种方法的模拟结果精度进行对比(表 2),结果表明,研究区域 Anusplin  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温插值的 RMSE,MRE 和 MAE 均小于多元线性回归模型,表明 Anusplin 模拟的精度高,误差更小,更适于山区积温空间数据的模拟。

表 2 两种模拟方法精度对比

插值方法	$R^2$	$p$	RMSE/ $^{\circ}\text{C}$	MRE/%	MAE/ $^{\circ}\text{C}$
多元线性回归模型	0.9597	0.000	201.443	3.79	168.91
Anusplin	0.9832	0.000	158.362	2.99	133.32

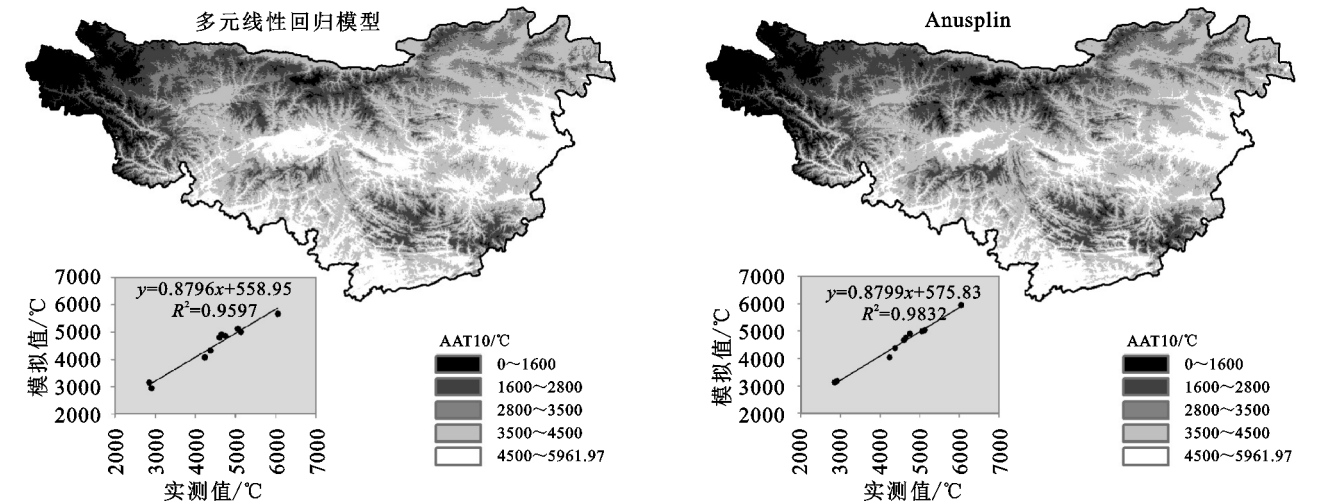


图 3 秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间模拟结果分布

3.3.2 插值结果的空间分析 由图 3 可以看出,基于 Anusplin 方法获得的秦巴山区 1960—2019 年日均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布可以真实地反映积温的空间分布状况,即 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温分布整体呈现出“南多北少”“东多西少”的分布特征。南北方向表现出自北向南随纬度变化的地带性分布变化的阶梯状分布,即随着纬度的减小而增加,但在秦岭北坡地势平坦海拔较低的地方出现了 $>4\,500^{\circ}\text{C}$ 的温度带;大巴山地区由于海拔的缘故,致使 $>4\,500^{\circ}\text{C}$ 的温度带中间出现其他的温度带。随经度的变化幅度较大, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温分布随着海拔的增加而降低。其最高值出现在重庆云阳,其值在 $6\,000^{\circ}\text{C}$ 以上,最小值分布在研究区西北部以及太白山等高海拔处。

为了解 Anusplin 插值方法模拟的积温与海拔高程的关系,以秦巴山区 100 m 高程为间隔,统计秦巴山区

$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温均值,得到整个秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温随海拔变化情况,见图 4。1960—2019 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温均值与海拔高度的线性方程为  $y = -1.445x + 5462$ ,即海拔每升高 100 m, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温降低  $144.5^{\circ}\text{C}$ ,秦巴山区 1960—2019 年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温随高程的增加呈直线下降趋势。

结合图 3 和图 4 可以得出,Anusplin 插值方法获得的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温插值表面细节突出,可以反映局部地形特征,使 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温随海拔梯度变化直观,体现了海拔、经纬度对积温的影响,能真实地反映积温的空间分布状况。

## 4 结论

(1) 基于 Anusplin 插值方法的秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温数据空间模拟较多元线性回归模型插值方法的精度更高。其中  $R^2$  为 0.983 2 大于多元线性回归模

型(0.959 7)插值方法的模拟结果。并且该方法的模拟结果随经纬度、海拔变化趋势明显,精细度也更加明显,体现了经纬度、海拔对积温的空间影响。

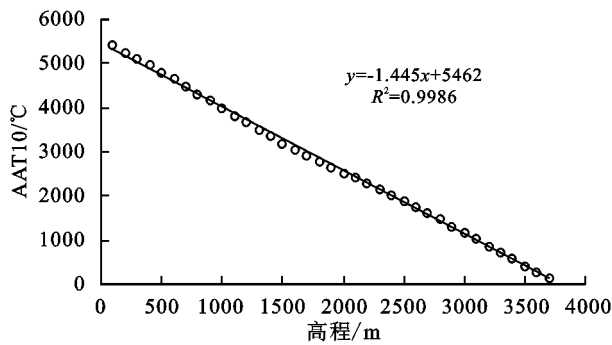


图 4 秦巴山区 AAT10 值与高程的关系

有学者<sup>[20]</sup>认为基于多元线性回归模型的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间模拟方法较 Kriging, IDW, Spline 等插值方法的精度较优。而本文通过多元线性回归模型与 Anusplin 插值结果对比,表明基于 Anusplin 的空间模拟方法能更好地获取山区高精度的空间积温模拟,为复杂山区高精度的积温空间数据的模拟提供了一个新的方法。

(2) 通过分析 1960—2019 年秦巴山区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间分布情况,可以看出研究区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温最高值出现在重庆云阳,最低值出现在西北、太白山等海拔比较高的地区;并且 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温随纬度的增大而减小,随经度的变化规律性较差,但随海拔的升高呈直线下降趋势。

(3) 在进行 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间模拟时,因为气象站一般设置在相对平坦开阔地区,插值模型引进坡度、坡向等因子没有通过检验,因此仅考虑了海拔、经度和纬度的影响。该插值模型没有考虑太阳辐射、坡度、坡向、地形以及天气过程等因子对积温的影响,但这些因素的存在对模拟结果存在一些误差。在以后的研究中,应该改进模型,考虑多个影响因子,也要考虑卫星遥感影像在积温研究中的应用,以提高模拟的精度,优化插值效果。

#### 参考文献:

- [1] 秦大河.气候变化:区域应对与防灾减灾—气候变化背景下极端事件相关灾害影响及应对策略[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 宋佃星,延军平,马莉.近 50 年来秦岭南北气候分异研究[J].干旱区研究,2011,28(3):492-498.
- [3] 柏秦凤,霍治国,李世奎,等.1978 年前、后中国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温对比[J].应用生态学报,2008,19(8):1810-1816.
- [4] 赵俊芳,郭建平,马玉平,等.气候变化背景下我国农业热量资源的变化趋势及适应对策[J].应用生态学报,

2010,21(11):2922-2930.

- [5] 李元华,刘学锋,刘莉,等.河北省近 50 年 $0^{\circ}\text{C}$ 界限温度积温变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(4):12-15.
- [6] 王锡稳,王毅荣.黄土高原积温变化的敏感性研究[J].干旱区地理,2006,29(6):817-822.
- [7] 毛恒青,万晖.华北、东北地区积温的变化[J].中国农业气象,2000,21(3):1-5.
- [8] 邱新法,王喆,曾燕,等.1960—2013 年中国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温时空变化特征及其主导因素分析[J].江苏农业科学,2017,45(2):220-225.
- [9] 袁淑杰,谷晓平,向红琼,等.基于 GIS 的贵州高原复杂地形下积温的精细空间分布[J].资源科学,2010,32(12):2427-2432.
- [10] 梁敬,朱家龙.山区热量资源的估算方法[J].气象,1981(10):26-27.
- [11] 傅抱璞.山地气候[M].北京:科学出版社,1983.
- [12] 卢其尧,傅抱璞,虞静明.山区农业气候资源空间分布的推算方法及小地形的气候效应[J].自然资源学报,1988,3(2):101-112.
- [13] 邹立尧,赵秀兰.细网格点农业气象资源推算原理和方法[J].黑龙江气象,1996,2(3):3-5.
- [14] 刘新安,于贵瑞,范辽生,等.中国陆地生态信息空间化技术研究(Ⅲ)[J].自然资源报,2004,19(6):818-825.
- [15] 尹洪涛,刘新安,刘寿东,等.辽西地区热量资源分析与栅格化[J].资源科学,2006,28(1):169-173.
- [16] 戴声佩,李海亮,罗红霞,等.1960—2011 年华南地区界限温度 $10^{\circ}\text{C}$ 积温时空变化分析[J].地理学报,2014,69(5):650-660.
- [17] 高蓓,邹继业,刘瑞芳.气候变暖背景下秦岭地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 热量的时空变化[J].中国农学通报,2016,32(2):155-162.
- [18] 陈嘉哲,赵彩杉,张学珍.21 世纪气候变化情景下环北极地区植被生长季与活动积温变化[J].气候与环境研究,2020,25(5):543-554.
- [19] 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,2014,33(8):1019-1028.
- [20] 戴声佩,李海亮,罗红霞,等.基于多元线性回归模型的华南地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温空间模拟研究[J].热带农业科学,2014,34(6):54-59.
- [21] 时光训,丁明军.近 40 a 来长江流域 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的时空变化特征[J].热带地理,2016,36(4):682-691.
- [22] 李帅,张勃,马彬,等.基于格点数据的中国 1961—2016 年 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变[J].自然资源学报,2020,35(5):1216-1227.
- [23] 白红英.秦巴山区森林植被对环境变化的响应[M].北京:科学出版社,2014.
- [24] 章金城,周文佐.2006—2015 年秦巴山区植被光合有效辐射吸引比例的时空变化特征[J].生态学杂志,2019,38(5):1453-1463.



- 及其与降水的关系[J].植物生态学报,2009,33(2):246-253.
- [13] 李娟,高建恩,张元星,邵辉.泾河流域梯田措施对河道径流影响的模拟研究[C]//2014年海峡两岸水土保持学术研讨会论文集.中国水土保持学会、台湾中华水土保持学会:中国水土保持学会,2014:11.
- [14] 刘玉安,黄波,易成功,等.基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析[J].农业工程学报,2013,29(13):130-141.
- [15] 刘洁,孟宝平,葛静,等.基于CASA模型和MODIS数据的甘南草地NPP时空动态变化研究[J].草业学报,2019,28(6):19-32.
- [16] 戚鹏程.基于GIS的陇西黄土高原落叶阔叶林潜在分布及潜在净初级生产力的模拟研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [17] 俞静芳.基于CASA模型的浙江省植被净初级生产力估算[D].杭州:浙江农林大学,2012.
- [18] 杜红.基于CASA模型的呼伦贝尔地区NPP估算研究[D].石家庄:河北师范大学,2010.
- [19] 张海龙.近五年来中国陆地植被净第一性生产力时空变化特征分析[D].南京:南京师范大学,2006.
- [20] 尹锴,田亦陈,袁超,等.基于CASA模型的北京植被NPP时空格局及其因子解释[J].国土资源遥感,2015,27(1):133-139.
- [21] Blanco L J, Paruelo J M, Oesterheld M, et al. Spatial and temporal patterns of herbaceous primary production in semi-arid shrublands: a remote sensing approach[J]. Journal of Vegetation Science, 2016,27(4):716-727.
- [22] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 1977, 281(980):277-294.
- [23] 赵永华,王晓峰.泾河源头区农林景观变化研究[J].人民黄河,2010,32(12):160-162.
- [24] 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.
- [25] 姜君宜.基于遥感反演CASA模型的通辽市开鲁县植被净初级生产力研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [26] 韩王亚,张超,曾源,等.2000—2015年拉萨河流域NPP时空变化及驱动因子[J].生态学报,2018,38(24):8787-8798.
- [27] 余东洋.渭河流域植被动态变化遥感时序分析及生态安全评价[D].西安:长安大学,2019.
- [28] 李亚飞,刘高焕.澜沧江流域植被覆盖变化特征及其与气候因子的关系[J].资源科学,2012,34(7):1214-1221.
- [29] 黄登成.基于CASA模型的蒙古高原植被净初级生产力遥感估算[D].辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2014.
- [30] 周珺.基于遥感数据的重庆市净初级生产力(NPP)时空特征研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [31] 李惠民.中国森林生态系统碳汇潜力评估[D].北京:北京师范大学,2006.
- [32] 程志庆.基于高光谱信息的杨树人工林生产力遥感估算模型的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.
- [33] 于成龙,刘丹.基于MODIS的东北地区自然植被生产力对干旱的响应[J].生态学报,2019,39(11):3978-3990.
- [34] 刘鹏.2000—2012年三江源植被生产力遥感估算及其时空格局分析[D].西宁:青海师范大学,2016.
- [35] 焦伟,陈亚宁,李稚,等.基于多种回归分析方法的西北干旱区植被NPP遥感反演研究[J].资源科学,2017,39(3):545-556.
- [36] 焦伟,陈亚宁,李稚.西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J].生态学报,2017,36(1):181-189.

~~~~~

(上接第189页)

- [25] 张雪芹,孙杨,郑度,等.中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应[J].地理学报,2011,66(9):1166-1178.
- [26] 史本岩.辽宁省东部山区农业气候资源精细化模拟研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [27] Bates D, Lindstrom M, Wahba G, et al. Gcvpack-routines for generalized cross validation[J]. Communications in Statistics B-Simulation and Computation, 1987,16(1):263-297.
- [28] 刘志红, Tim R McVicar, Li Lingtao, 等.基于ANUSPLIN的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(10):227-234.
- [29] 刘正佳,于兴修,王丝丝,等.薄盘光滑样条插值中3种协变量方法的降水量插值精度比较[J].地理科学进展,2012,31(1):56-62.
- [30] Hutchinson M F. ANUSPLIN version 4.2 user guide [Z]. Canberra: Australian National University, 2001.
- [31] 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(2):206-212.
- [32] 熊秋芬,黄玫,熊敏谔,等.基于国家气象观测站逐日降水格点数据的交叉检验误差分析[J].高原气象,2011,30(6):1615-1625.