

引用格式:何志明,李月臣,金贤锋,等.考虑太阳辐射修正的重庆山地气温空间化模拟[J].资源科学,2019,41(6):1131-1140.
[He Z M, Li Y C, Jin X F, et al. Spatial interpolation of mean temperature of Chongqing Municipality considering solar radiation correction[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1131-1140.] DOI :10.18402/resci.2019.06.12

考虑太阳辐射修正的重庆山地气温空间化模拟

何志明^{1,2},李月臣^{3,4},金贤锋^{1,2},刘 贤^{1,2},何小波^{1,2}

(1. 重庆市地理信息中心,重庆 401147; 2. 时空大数据技术研究与应用重庆市工程实验室,重庆 401147; 3. 重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331; 4. GIS应用研究重庆市高校重点实验室,重庆 401331)

摘 要:为实现重庆多山、多云雾、少日照等典型地理环境特征下气温的空间分布精细化模拟,本文提出了一套局部回归加地形影响修正的适宜性模型方法。该方法综合地理加权回归模型、Solar Analyst模型、改进的Angstrom-Prescott方程以及多元线性回归,基于气象站观测的气温、相对湿度、日照百分率参数以及辐射站太阳总辐射参数,结合100 m×100 m DEM数据,进行山地起伏地形下气温空间化模拟。其中,气温的地形影响修正通过起伏地形下太阳总辐射的拟合而实现。模型具有较好的模拟精度和稳定性,局部回归项的模拟精度远高于反距离权重插值(IDW)、克里金插值(Kriging),也总体优于传统的基于纬度、经度、海拔高度、日照百分率、相对湿度因子构建的全局多元回归模型;采用55个区域气象站进行单一年份夏季气温模拟精度验证,平均绝对误差为0.59℃,地形影响修正后有38个站误差降低。模型具有较好的时空维度模拟能力,能反映坡度、坡向、地形遮蔽等局地地形因子对气温的影响,具有较强的物理意义。模型与商业化的ArcGIS软件工具相结合,便于推广应用,特别适用于重庆及其周边西南山地太阳辐射低值区。

关键词:气温插值;太阳辐射修正;DEM;山地气温;重庆

DOI :10.18402/resci.2019.06.12

1 引言

气温是重要的气象要素和气候资源,有着重要的生态学意义,不仅是参与自然地域系统界限划分的关键指标,而且也是陆面环境过程模型的重要参数^[1,2]。气温空间分布的精准识别对于农业气候资源以及避暑休闲气候资源的开发利用等均具有重要意义^[3]。现有的基于气象站观测获取的气温数据只能代表其所在位置,广大无站区域的气温只能通过模拟计算得出^[4]。常用的气温空间化方法,包括反距离权重法、样条函数法、克里金插值法、趋势面法等^[5-7],以上方法偏重于经典空间统计模型的直接引入,通常在山地环境下模拟效果差;多元线性回归作为传

统的统计学方法,通过引入海拔,一定程度上能够拟合山地气温空间差异,但常受变量多重共线性制约。为适应越来越高的生产、科研要求,20世纪90年代以来气温精细空间化研究在国内外得以空前发展。基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论的ANUSPLIN,已成为专用气象要素插值工具,据此编制了一系列气温空间化数据集,服务全球变化研究及区域气候特征研究^[8]。Daly等^[9]提出的基于地理空间特征的回归统计方法(PRISM)和潘耀忠等^[10]提出的基于DEM和智能搜索距离的气温插值方法(SS1),以海拔为主要控制因子,利用开窗技术进行局部回归,虽能反映区域气温差异,但未考虑山地环境下地形遮挡对中微观尺度气温的影

收稿日期:2018-11-21 修订日期:2018-12-24

基金项目:重庆市技术创新与应用示范专项社会民生类重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0067);国家自然科学基金项目(41571419);国家重点研发计划(2018YFB0505400)。

作者简介:何志明,男,山东德州人,硕士,工程师,主要研究方向为遥感与GIS应用研究。E-mail: hzm@dl023.net

通讯作者:李月臣,男,山东德州人,博士,教授,主要研究方向为资源环境遥感与GIS研究。E-mail: liyuechen2008@qq.com

响。在海拔恒定情况下,太阳辐射的多寡决定了气温空间分布,宏观尺度上表现为纬度地带性,中微观尺度上则表现为地形遮挡的影响。国内相关研究^[11-13]以分布式坡面太阳辐射和海拔作为自变量,进行多元线性回归及残差内插,应用效果较好,但分布式坡面太阳辐射的计算较为复杂^[14],需要借助专用工具,且在以重庆为代表的太阳辐射低值区模拟年及季节平均气温时,受整体地势西低东高影响,太阳总辐射与气温的回归系数易出现负值^[15]。另有研究^[16]以模拟的坡面与水平面天文辐射比值为地形调节因子,对传统多元线性回归模型进行了改进,使得模拟精度有较大的提高,但模型采用天文辐射,忽略了实际太阳辐射的空间差异性,且在地形遮挡明显的阴影区易得出奇异值。本文在国内研究的基础上,结合重庆市的具体实际,提出了考虑实际太阳辐射、局部回归加地形影响修正的山地气温空间模拟模型,以期对西南山地太阳辐射低值区气温的高精度空间模拟提供一种解决方案。

2 实验区与数据源

受青藏高原、四川盆地、秦巴山地等地貌单元

控制以及不同季风环流的交替影响,重庆所在的西南山地区具有多云、多雾、少日照、湿润、多阴、少风等气候特点,地域特征明显。因此,本文将重庆作为实验区进行气温空间化模型构建。采用的重庆市33个常规气象站(奉节站由于迁站影响较大,予以剔除)及周边9个辐射台站数据由中国气象数据网提供(图1)。其中常规气象站包括气温、相对湿度、日照百分率(亦可通过实际日照时数/天文日照时数计算得出)等常规观测数据;辐射台站除常规观测数据外,还包括太阳总辐射数据。常规气象站数据时段全部为1960—2010年。受建站时间、迁站及数据可获取性影响,各辐射台站数据时段不一致,分别为:重庆沙坪坝1988—2010年,安康1990—2010年、宜昌1961—2010年、泸州1984—2002年、纳溪2003—2010年、吉首1992—2010年、绵阳1978—2010年、成都1961—2003年、温江2004—2007年。采用的重庆市100 m×100 m DEM数据由国家基础科学数据共享服务平台提供。其他数据还包括:重庆市气象局网站发布的33个常规气象站2018年6至8月气温、相对湿度、日照时数数据;重

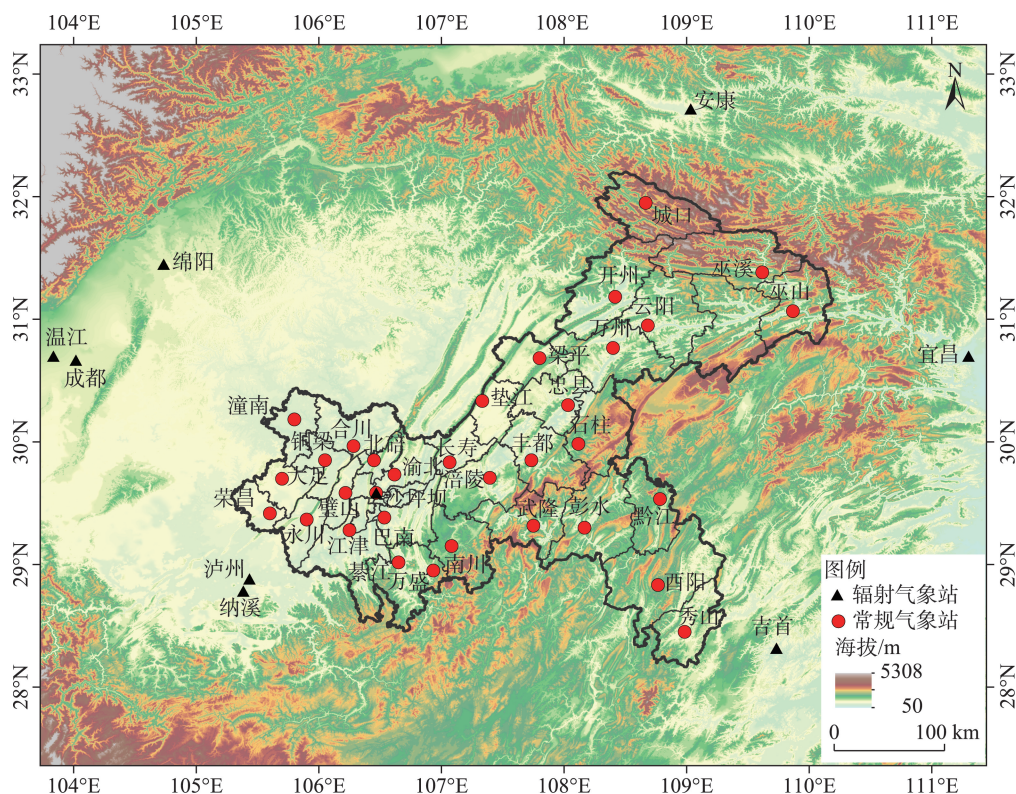


图1 重庆市及周边常规气象站、辐射气象站分布图

Figure 1 Spatial distribution of meteorological stations in and around Chongqing Municipality

2019年6月

庆市气象局共享提供的市域范围内104个区域气象站2018年6至8月气温数据。

3 山地气温空间化模拟方法

本文采用局部回归加地形影响修正的方法进行气温空间化模拟。

$$T' = T + \Delta T \quad (1)$$

式中: T' 为地形影响修正后的气温, T 为平地气温,主要受海拔、经度、纬度等宏观地理因子控制,在局地空间下主要受海拔控制; ΔT 为地形影响修正项,即坡地与平地的气温差,主要受坡向、地形遮蔽等微地形环境影响。首先,计算平地状态下的气温 T ,然后对地形影响进行修正,模拟得出山地起伏地形下的气温。下文分别对 T 和 ΔT 计算过程进行阐释。

3.1 基于局部回归的平地气温模拟方法

在经纬度表征的空间位置相近的情况下,海拔是影响气温空间分布的主要因素,表现为气温直减率。选择重庆市33个常规气象站1960—2010年多年平均气温与海拔进行相关分析,两者呈负相关, R 为0.93,达到0.01以上的显著性水平。本文选择局部回归,以海拔因子为自变量,进行平地气温空间模拟。与传统的多元线性回归基于普通最小二乘法(OLS)进行全局拟合不同,局部回归融合了地理学相近相似原理,通过搜索窗口,用一定空间临近范围内的观测值进行拟合,得到回归系数,有效顾及了现实普遍存在的回归关系空间非平稳性^[17,18]。本文中,逐一选择气象站及其相邻一定范围内的气象站进行局部回归,并计算得到各站气温直减率。对于空间位置 x_0 的气象站,平地气温 T 的局部回归模型表达式为^[19]:

$$T(x_0) = a_0(x_0) + \sum_{k=1}^p b_k(x_0) E_k(x_0) \quad (2)$$

式中: $T(x_0)$ 为位置 x_0 处的气温变量; $a_0(x_0)$ 为回归常数项; $E_k(x_0)$ 为参与 x_0 处气温模拟的第 k 个临近气象站的高程变量, $b_k(x_0)$ 为第 k 个临近气象站高程变量的系数; p 为参与局部回归的临近气象站个数。

本文中,局部回归具体通过ArcGIS提供的地理加权回归模型工具(Geographically Weighted Regression, GWR)实现。为适应不同区域的气象站分布密度,用自适应带宽选择策略和校正Akaike信息量准则(Corrected Akaike Information Criterion, AICc)确定局部回归最佳距离或者近邻数,进而得到每个待估气象站点的局部回归系数,即气温直减率。

根据气象站已知气温及气温直减率估算结果,

推算出站点处海平面(海拔为0 m)气温。进一步利用IDW插值方法,得到空间化气温直减率及空间化海平面气温;再根据DEM高程数据反推,可得到实际海拔高程下的空间化平地气温(图2)。

3.2 基于太阳辐射的地形影响修正项计算方法

基于上述局部回归模型仅能得到平地无遮蔽状态下的气温,但实际情况下,坡向、地形遮蔽等地理因子通过控制太阳辐射的局地分布,导致中微观尺度气温空间分布差异。对太阳辐射分布的细化考量,有利于提高山地实际地形遮蔽环境下气温(即坡地气温)模拟的精度。对重庆沙坪坝站1988—2010年历年各月平均气温与日均太阳总辐射量进行相关分析(共276组样本数据),两者呈正相关, R 为0.90,达到0.01以上的显著性水平。利用气温与太阳总辐射的正相关关系,坡地与平地的气温差 ΔT 可构建公式如下:

$$\Delta T = k \times Q_{\text{差}} = k \times (Q_{\text{坡地}} - Q_{\text{平地}}) \quad (3)$$

式中: k 为实际太阳总辐射与气温之间的回归系数,为正值; $Q_{\text{差}}$ 表示坡地与平地的太阳总辐射差值, $Q_{\text{坡地}}$ 表示实际起伏地形下地表(坡地)太阳总辐射, $Q_{\text{平地}}$ 表示假设平地条件下地表太阳总辐射。通常,气象站要求布设于平坦开阔地,可以认为 $Q_{\text{差}}$ 为0, ΔT 为0;背阴坡 $Q_{\text{坡地}}$ 小于 $Q_{\text{平地}}$, ΔT 小于0;向阳坡则相反, ΔT 大于0。

由于全国太阳辐射站仅100多个,样本量不足,

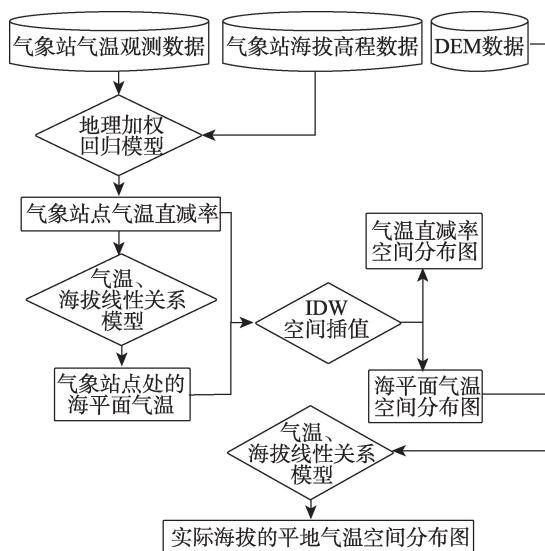


图2 基于局部回归的平地气温模拟流程

Figure 2 Flow chart of flat ground temperature simulation based on local regression

中微观尺度上,直接采用IDW、Kriging等进行空间插值通常精度较低。实际太阳总辐射与晴天状态下太阳总辐射之比,同日照百分率呈线性关系。基于此,本文引入一种利用晴天太阳总辐射和日照百分率计算实际太阳总辐射的气候学方法,即Angstrom-Prescott方程^[20],公式如下:

$$\text{辐射比} = Q_{\text{实测}}/Q_{\text{晴天}} = a + b \times S \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{实测}}$ 为实测太阳总辐射, $Q_{\text{晴天}}$ 为晴天状态下的太阳总辐射; S 为日照百分率, a 和 b 为经验参数。该公式没有考虑大气透明度或水汽含量的影响,而重庆所处的西南山地区具有高湿的气候特征。本文基于重庆市及周边9个辐射站历年平均数据,对太阳总辐射与日照百分率、相对湿度的相关关系进行探讨(共220组样本数据),得出辐射比与日照百分率呈正相关、与相对湿度呈负相关,相关系数 R 分别为0.80、0.53,均达到0.01以上的显著性水平。故对Angstrom-Prescott方程进行改进,增加相对湿度因子,如公式(5):

$$\text{辐射比} = Q_{\text{实测}}/Q_{\text{晴天}} = a + b \times S + c \times H \quad (5)$$

基于上式,通过辐射站的辐射比、日照百分率(S)、相对湿度(H)观测资料回归得出经验系数 a 、 b 和 c 。进一步对常规气象站的 S 和 H 进行IDW空间插值,获得空间化的 S 和 H 。采用ArcGIS提供的Solar Analyst模型,结合DEM模拟空间化 $Q_{\text{晴天}}$ 。该模型综合考虑坡度、坡向、地形遮蔽,能模拟坡地晴天状态下的太阳总辐射 $Q_{\text{坡地晴天}}$;通过调整参数,亦可获得平地晴天太阳总辐射 $Q_{\text{平地晴天}}$ ^[21]。

综合公式(3)和公式(5),可以得到公式(6):

$$\Delta T = k \times Q_{\text{差}} = k(Q_{\text{坡地}} - Q_{\text{平地}}) = k(Q_{\text{坡地晴天}} - Q_{\text{平地晴天}})(a + b \times S + c \times H) \quad (6)$$

式中:参数 k 表示实际太阳总辐射每增加一个单位,相应的气温的增加量,可通过辐射站点的气温与实测太阳总辐射线性回归计算得出,如公式(7)所示。

$$T_{\text{实测}} = g + k \times Q_{\text{实测}} \quad (7)$$

式中: $T_{\text{实测}}$ 为辐射站的实测气温, $Q_{\text{实测}}$ 为辐射站实测太阳总辐射, g 为回归常数项。

综上,山地起伏地形下气温空间反演模型公式(1)可最终表达如下式:

$$T' = T + \Delta T = T + k \times Q_{\text{差}} = T + k(Q_{\text{坡地晴天}} - Q_{\text{平地晴天}})(a + b \times S + c \times H) \quad (8)$$

4 重庆市气温空间模拟及验证

4.1 平地气温计算与验证

以3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—次年2月为冬季,将重庆市范围内33个常规气象站1960—2010年气温、日照百分率、相对湿度等处理成多年平均以及多年春季、夏季、秋季、冬季平均;按照图1所示流程,得到相应的实际海拔下的空间化平地气温。

为了验证模拟精度,本文采用交叉验证方法,即剔除单个站点而用其他站点建模并预测该站气温。预测结果与实测值的误差即交叉验证误差。对所有站点分别进行交叉检验,以平均绝对误差(Mean Absolutle Error, MAE)和平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)来反映模拟方法的总体精度^[21]。通过表1可以看出,局部回归得出的平地气温模拟精度远高于IDW、Kriging插值结果,也总体优于传统的基于纬度、经度、海拔高度、日照百分率、相对湿度5个因子构建的全局多元回归模型,仅夏季稍逊。

4.2 地形影响修正项计算与验证

基于重庆市及周边9个辐射站,利用Solar Analyst模拟的站点晴天太阳总辐射以及历年的年及四季平均太阳总辐射、日照百分率、相对湿度等观测数据,拟合公式(5)(由于站点数量较少,且部分站点观测序列较短,故以历年资料来拟合回归方程),得到日照百分率、相对湿度相对于辐射比($Q_{\text{实测}}/Q_{\text{晴天}}$)的回归系数 a 、 b 、 c 。其中,年均值对应的回归系数

表1 平地气温局部回归模拟交叉验证结果与精度比较

Table 1 Local regression simulation cross-validation results of flat ground temperature and comparison with other methods

时段	平均绝对误差 MAE/℃				平均相对误差 MRE/%			
	局部回归	全局多元回归	IDW	Kriging	局部回归	全局多元回归	IDW	Kriging
年	0.30	0.35	0.75	0.73	1.74	2.05	4.54	4.42
春季	0.28	0.34	0.74	0.73	1.65	1.99	4.51	4.46
夏季	0.26	0.21	0.76	0.76	0.99	0.81	2.95	2.92
秋季	0.32	0.39	0.74	0.74	1.83	2.20	4.33	4.29
冬季	0.33	0.40	0.73	0.71	4.99	5.69	11.58	11.01

2019年6月

分别为0.412、0.007、-0.002,其他各季如表2。各回归方程 R 值均在0.8以上,达到0.01以上显著性水平。为了进一步验证其精确性,采用重庆市唯一具有辐射观测资料的沙坪坝站进行交叉验证(表2)。可以看出历年日均以及历年各季日均太阳总辐射量的 MAE 均低于 $0.60 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, MRE 均低于10%,总体效果较好。误差主要来源于站点日照百分率误差、站点空间精度误差等方面^[21]。

利用沙坪坝站历年的年及四季日均实际太阳总辐射、气温实测资料拟合公式(7),获得太阳总辐射与气温关系回归方程,均达到0.01以上的显著性水平。如表3所示,年、春、夏、秋、冬的 k 值分别为0.39、0.488、0.331、0.415、0.7。

在常规气象站日照百分率、相对湿度数据IDW空间插值以及利用Solar Analyst工具进行坡地晴天太阳总辐射 $Q_{\text{坡地晴天}}$ 、平地晴天太阳总辐射 $Q_{\text{平地晴天}}$ 模拟基础上,结合表2中的辐射比拟合方程,可得到空间化坡地实际太阳总辐射和平地实际太阳总辐射,进而得到坡地与平地太阳总辐射差值 $Q_{\text{差}}$ 。利用公式(6),可得到空间化的气温差值,即地形影响修正项 ΔT 。

地形影响修正项即受太阳辐射分布影响的日均温差值,反映年及四季均温受坡度、坡向、地形遮蔽等局地地形因子影响的程度。从表4和图3可以看出,冬季日均温差平均值最高,夏季最低,与年内不同季

节太阳总辐射量对气温的影响程度(即 k 值)有关;夏季日均温差值的标准差最小,表明地形影响程度相对较小;冬季日均温差值的标准差最大,表明地形影响程度相对较大,与太阳辐射入射角随季节变化有关。以上表明,地形影响修正项能有效拟合地形因子所导致的实际气温空间分布不均衡特性。

4.3 地形影响修正后气温拟合精度验证

由于常规气象站要求布设场地尽量规避地形、建筑物等遮挡影响,理论上无法反映坡地状态下的气温分布,故坡地气温拟合结果的绝对验证通常较为困难。本文尝试采用加密区域气象站数据进行精度验证。但受制于数据可获取性,仅能利用2018年夏季重庆市气温开展验证,过程如下:①将重庆市2018年6—8月常规气象站观测数据处理成夏季均值,按照本文方法模拟得到坡地气温空间分布图;②将重庆市区域气象站2018年6—8月气温观测数据,处理成夏季均值,进行拟合精度验证。由于区域气象站空间位置信息精确到分,理论上最大存在0.5分(约800 m)的误差。因此,本文提取站点所处的DEM高程与实际高程信息进行对比,剔除误差较大的站点(高差50 m以上),最终保留55个站进行绝对误差验证。地形影响修正后气温拟合平均绝对误差为 0.59°C ,误差区间见表5。与地形影响修正前相比,考虑地形因子后拟合气温绝对误差降低的区域气象站有38个,最大降低 0.26°C ,增高的

表2 辐射比($Q_{\text{实测}}/Q_{\text{晴天}}$)拟合方程及精度验证

Table 2 Fitting equation of global solar radiation ratio and accuracy verification

时段	回归方程	R	平均绝对误差 $MAE/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	平均相对误差 $MRE/\%$
年	$y=0.412+0.007S-0.002H$	0.878**	0.34	4.04
春季	$y=0.529+0.006S-0.003H$	0.837**	0.56	5.63
夏季	$y=0.456+0.006S-0.002H$	0.896**	0.47	3.56
秋季	$y=0.457+0.008S-0.002H$	0.907**	0.60	9.87
冬季	$y=0.378+0.01S-0.002H$	0.940**	0.35	9.80

注:**表示达到0.01以上的显著性水平。

表3 实际太阳总辐射与气温拟合关系

Table 3 Actual global solar radiation and temperature fitting equation

时段	回归方程	R
年	$T=15.197+0.39Q$	0.473**
春季	$T=13.621+0.488Q$	0.749**
夏季	$T=22.810+0.331Q$	0.666**
秋季	$T=16.322+0.415Q$	0.615**
冬季	$T=6.589+0.7Q$	0.540**

注:**表示达到0.01以上的显著性水平。

表4 气温地形影响修正项统计参数

Table 4 Statistical parameters of terrain correction factor

时段	均值/ $^\circ\text{C}$	标准差/ $^\circ\text{C}$
年	-0.11	0.33
春季	-0.20	0.41
夏季	-0.19	0.25
秋季	-0.10	0.54
冬季	-0.06	0.70

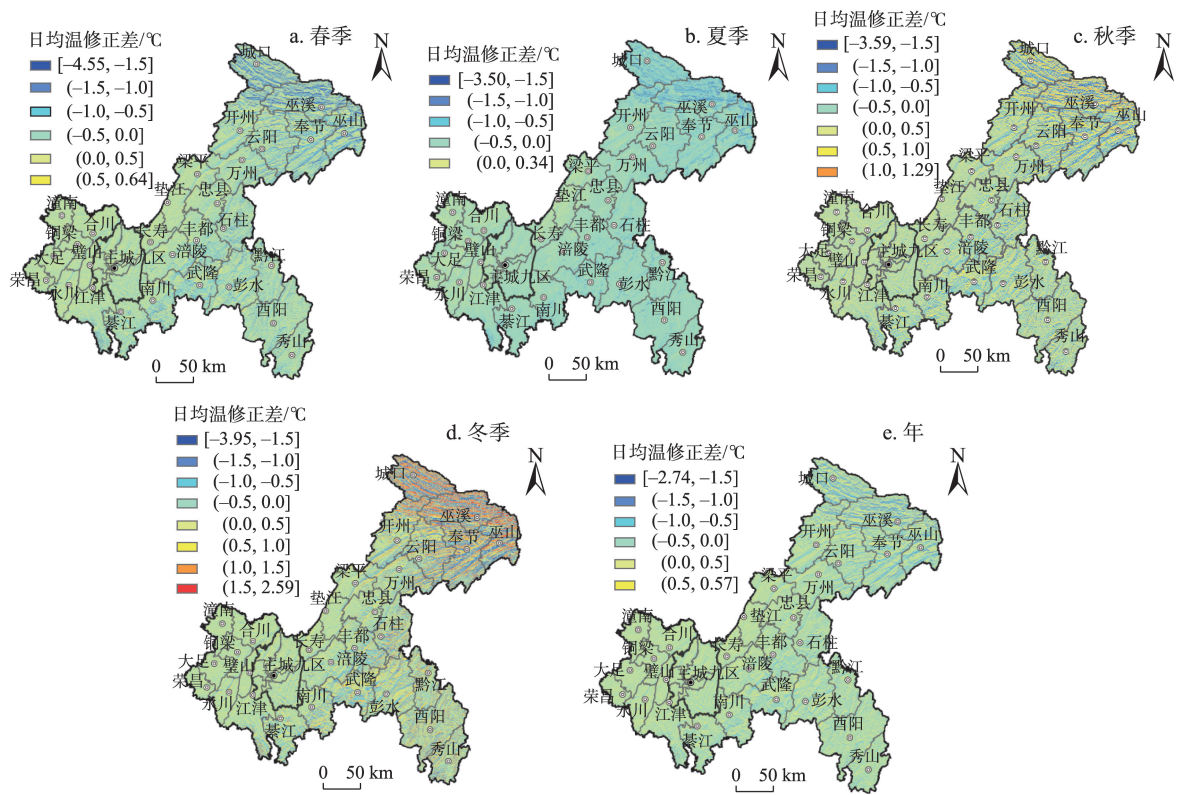


图3 重庆市年及四季平均气温修正值空间分布

Figure 3 Spatial distribution of annual and seasonal average temperature correction factors in Chongqing Municipality

仅 17 个,说明地形影响修正后气温拟合精度总体提升。

5 重庆市四季及年均温空间分布特征

5.1 气温空间分布

利用本文提出的模型方法,模拟得出重庆市 1960—2010 年 100 m×100 m 年及四季平均气温空间分布图。由图 4 可以看出,年及四季平均气温总体表现出相似的空间分布规律。渝西方山丘陵区以及长江、乌江等河谷地区气温较高;其次为中部平行岭谷区、渝东南平坝区域;海拔较高的渝东北

大巴山、巫山中山区以及渝东南喀斯特中山区气温较低。这说明重庆市起伏地形下海拔高度差异是控制气温空间分异的主要因素。

采用标准差反映重庆市域不同季节平均气温空间分布差异。夏季平均气温标准差最低,为 3.12℃;冬季最高,为 3.34℃;春季、秋季居中,均为 3.31℃。这表明重庆市山地环境下,夏季气温空间差异相对最小,冬季气温空间差异相对最大,春、秋季介于二者之间,反映出不同季节太阳高度角不同,地形遮蔽效应不同,会导致气温局地分布差异。

表5 地形影响修正后气温拟合精度验证

Table 5 Verification of temperature fitting accuracy after terrain correction

验证类型	区间	数量/个	比例/%
地形影响修正后 气温拟合绝对误差	1℃(不含)以上	9	16
	0.7℃(不含)~1℃	7	13
	0.5℃(不含)~0.7℃	13	24
	0.3℃(不含)~0.5℃	9	16
	0.3℃(含)以下	17	31
地形影响修正后拟合气温绝对误差	0℃(不含)以下	38	69
减地形影响修正前拟合气温绝对误差	0℃以上	17	31

2019年6月

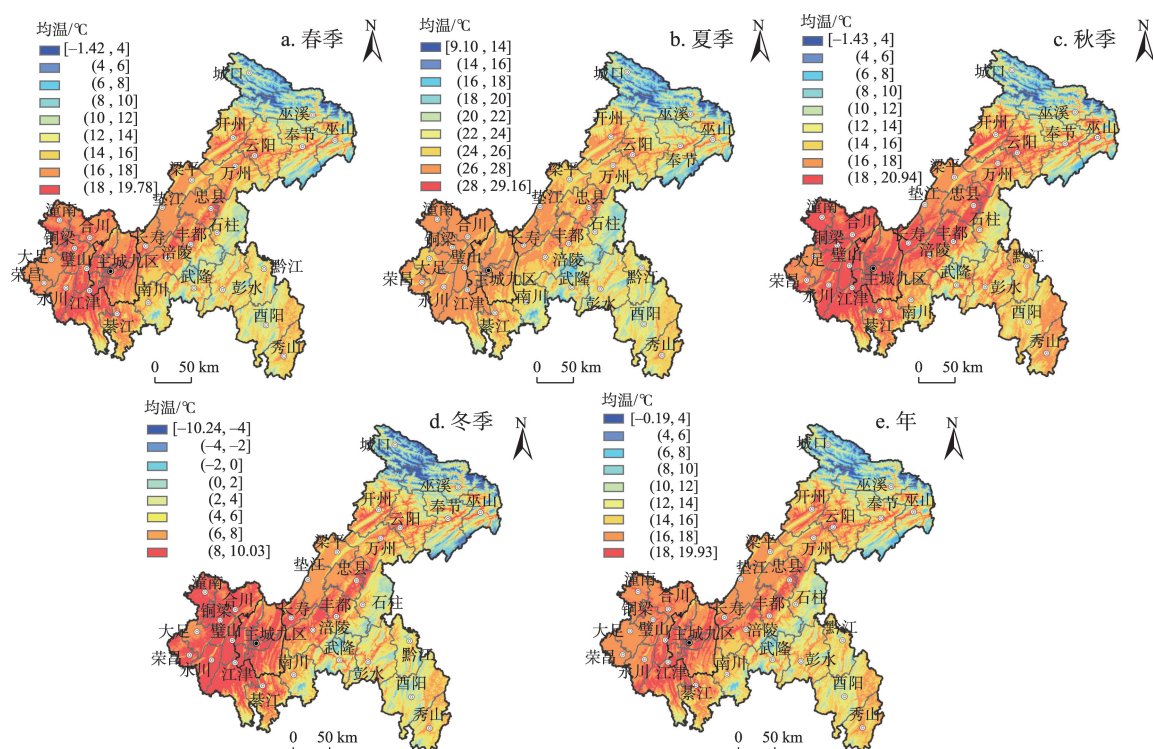


图4 重庆市1960—2010年及四季平均气温空间分布

Figure 4 Spatial distribution of annual and seasonal average temperature in Chongqing Municipality, 1960-2010

5.2 坡度、坡向影响分析

为了进一步反映山地气温的局地分布规律,从模拟得出的1960—2010年年及四季平均气温空间分布图中提取一定纬度和一定海拔高度下的气温栅格值,分析其与坡度、坡向以及季节变化的相关规律。

图5a1反映的是在 $31^{\circ}20'N$ 附近、海拔高度700 m、坡度 20° 的四季平均气温随坡向的变化规律,图5a2为对应的多项式趋势线。图中纵轴为平均气温距平,代表的是某一坡向上栅格平均气温与所有坡向上栅格平均气温之差。横轴为坡向,北坡为 0° 和 360° ,东坡为 90° ,南坡为 180° ,西坡为 270° 。四季平均气温距平都是以偏南坡为正距平峰值,向两边递减,偏北坡为负距平最低。说明重庆坡度 20° 的山区,全年偏南坡的气温均高于其他坡向区,偏北坡则低于其他坡向区。四季平均气温距平在 90° 和 270° 附近接近于0,说明东坡和西坡附近的气温更接近于区域平均值。

各季节相比,偏南坡气温正距平峰值以冬季最高,其次为春、秋季,夏季最低;偏北坡气温负距平低值则是以夏季最高、冬季最低,春、秋季居中。这说明起伏地形下冬季气温空间差异最大,夏季最

小。气温距平折线呈现出一定的波动,冬季、秋季起伏较大,尤其是偏南坡、偏北坡。以上分析表明起伏地形下山体之间的遮蔽对气温影响的季节差异,在海拔、坡度、坡向恒定的情况下,太阳辐射入射角越小,遮蔽作用越明显。

图5b1反映的是 $31^{\circ}20'N$ 附近、海拔高度700 m、坡度 10° 、 20° 、 30° 的年平均气温随坡向的变化规律,图5b2为对应的多项式趋势线。可以看出,坡度 10° 至 30° 范围内,相同坡向下,气温差异随坡度的增加而增加。 0° 或 360° 及 180° 附近不同坡度的气温距平值差异最大, 90° 和 270° 附近差异最小,这说明坡度影响以南坡和北坡附近最大,东坡和西坡附近最小。

6 结论与讨论

6.1 结论

本文采用局部回归加地形影响修正的方法,利用ArcGIS地理加权回归模型工具、Solar Analyst工具,基于较容易获取的气象站气温、相对湿度、日照百分率观测数据以及辐射站太阳总辐射观测数据,结合DEM,进行重庆市起伏地形下年及四季气温空间化模拟,具有较好的拟合精度。其中,局部回归的模拟精度远高于IDW、Kriging插值结果,也总

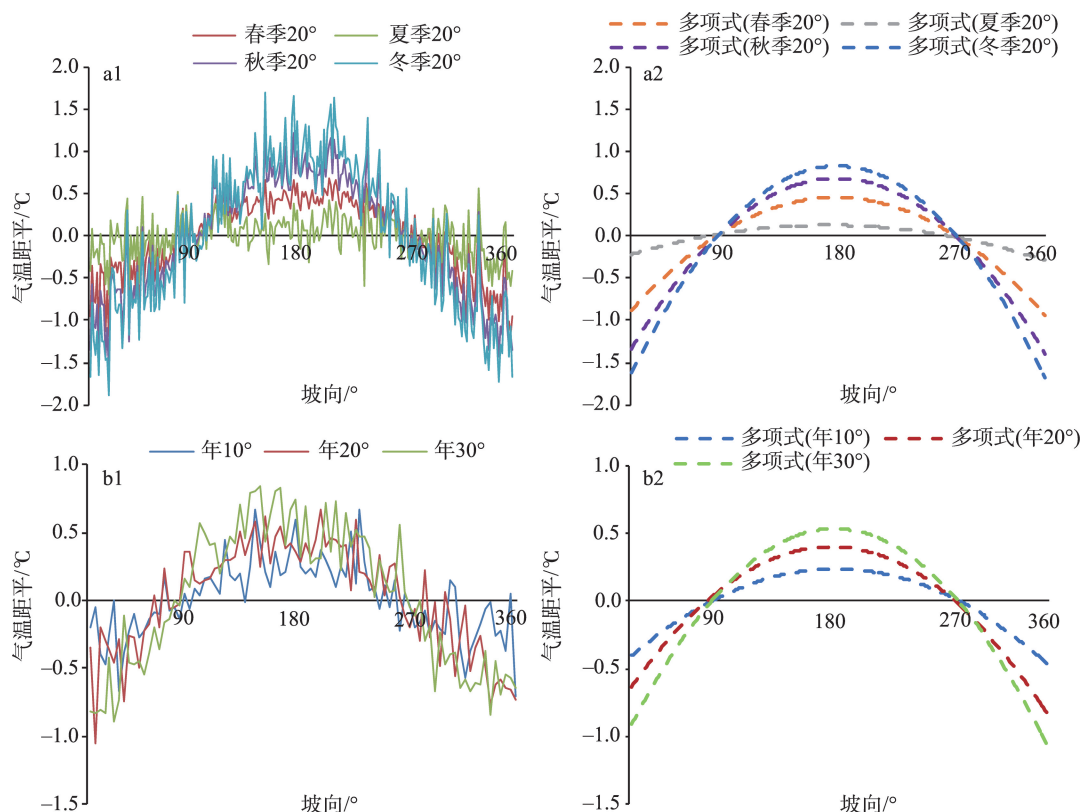


图5 气温受地形影响规律特征(a1反映不同季节20°坡度上气温距平随坡向的变化规律,b1反映年尺度10°、20°、30°坡度上气温距平随坡向的变化规律,a2、b2分别为对应的多项式趋势线)

Figure 5 Characteristics of temperature affected by terrain(a1 reflects the variation of temperature anomaly with different slope direction on 20° slope in different seasons, and b1 reflects the variation of temperature anomaly with different slope direction on 10°, 20° and 30° slopes on annual scale. a2 and b2 are corresponding polynomial trend lines)

体优于传统的基于纬度、经度、海拔高度、日照百分率、相对湿度5个因子构建的全局多元回归模型。根据数据可获取性,采用55个区域气象站进行单一年份夏季气温模拟精度验证,结果表明:地形影响修正后,气温空间分布拟合精度进一步提高,平均绝对误差为0.59℃,有38个站(数量占69%)误差降低,能体现坡度、坡向、地形遮蔽等局地因子的影响,具有较明显的物理意义。

利用本文提出的模型方法,模拟得出重庆市1960—2010年100 m×100 m年及四季平均气温空间分布图。总体上,模拟结果较好地反映了起伏地形下海拔高度差异对气温空间分布的控制作用。渝西方山丘陵区以及长江、乌江等河谷地区年及四季平均气温总体较高;其次为中部平行岭谷区、渝东南平坝区域;海拔较高的渝东北大巴山、巫山中山区以及渝东南喀斯特中山区气温较低。对不同季节平均气温空间分布进行标准差统计,以夏季标

准差最低,冬季最高,春季、秋季居中,表明重庆市山地环境下,夏季气温空间差异相对最小,冬季气温空间差异相对最大,春、秋季介于二者之间。

相同海拔下,坡度、坡向对气温影响表现为:相同坡度的全年各季节偏南坡的气温普遍高于其他坡向区,偏北坡则普遍低于其他坡向区,东坡和西坡附近的气温与区域平均气温相当。冬季南北坡的气温差最大,夏季气温差最小,春秋季居中。相同坡向的气温差异随坡度的增加而增大,坡度影响以南坡和北坡附近最大,东坡和西坡附近最小。

6.2 讨论

模型基于可获取的地面气象站观测资料以及DEM数据,利用商业化的ArcGIS软件工具,方便推广应用,特别适用于重庆及其周边西南山地太阳辐射低值区。

受气象站常布设在平地区域的实际情况制约,通常山地起伏地形下的气温空间化模型精度验证

2019年6月

较为困难,本文利用仅能获取的2018年单一年份夏季加密区域气象站进行验证,一定程度上会受到短期气象条件波动影响,但总体上模型仍能呈现较好的拟合精度,平均绝对误差为 0.59°C 。如能获取多种地形遮蔽情况下区域气象站长时间序列多年平均气温进行验证,则效果更佳。

本文利用常规气象站进行气温空间化模拟,一定程度上受到站点数量不足、空间分布不均影响,可能会导致渝东北、渝东南等地势起伏较大、地理环境较为复杂的局部区域气温外推拟合时出现异常值^[19],这也是既有的各种模型方法的共同限制因素。对这些异常值,需用进一步采用局部平均等方法进行后处理^[22]。后续应用中,通过引入区域气象站数据建模,将可能有效地解决这一问题。

参考文献(References):

- [1] 张煦庭,潘学标,徐琳,等.中国温带地区不同界限温度下农业热量资源的时空演变[J].资源科学,2017,39(11):2104-2115. [Zhang X T, Pan X B, Xu L, et al. Spatio-temporal variation of agricultural thermal resources at different critical temperatures in China's temperate zone[J]. Resources Science, 2017, 39(11): 2104-2115.]
- [2] Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas[J]. Journal of Hydrology, 2003, 282(1-4): 104-115.
- [3] 张秀美,杨前进,何志明,等.山东省旅游气候舒适度分析与区划[J].测绘科学,2014,39(8):140-143. [Zhang X M, Yang Q J, He Z M, et al. Analysis and division of tourism climate comfort level in Shandong[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(8): 140-143.]
- [4] 夏智武,刘鹏举,陈增威,等.山地环境日气温PRISM空间插值研究[J].北京林业大学学报,2016,38(1):83-90. [Xia Z W, Liu P J, Chen Z W, et al. Spatial interpolation of daily air temperature in mountain area based on PRISM[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(1): 83-90.]
- [5] Kim S N, Lee W K, Shin K I, et al. Comparison of spatial interpolation techniques for predicting climate factors in Korea[J]. Forest Science and Technology, 2010, 6(2): 97-109.
- [6] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等.气象要素空间化方法精度的比较研究:以平均气温为例[J].资源科学,2005,27(5):173-179. [CAI F, YU G R, ZHU Q L, et al. Comparison of precisions between spatial methods of climatic factors: A case study on mean air temperature[J]. Resources Science, 2005, 27(5): 173-179.]
- [7] 郭春霞,诸国强,孙伟.不同时间尺度、季节的气温数据空间平稳特征及其对插值结果的影响[J].地理研究,2015,34(9):1675-1684. [Guo C X, Zhu Y Q, Sun W. Analysis of spatial stationary characteristics of air temperature data in different time scales, seasons and its influence on interpolation performance[J]. Geographical Research, 2015, 34(9): 1675-1684.]
- [8] 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(5):875-888. [LU F Z, LU H Y. A high-resolution grid dataset of air temperature and precipitation for Qinling-Daba Mountains in central China and its implications for regional climate[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 875-888.]
- [9] Daly C, Halbleib M, Smith J I, et al. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(15): 2031-2064.
- [10] 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. [Pan Y Z, Gong D Y, Deng L, et al. Smart distance searching-based and DEM-informed interpolation of surface air temperature in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 366-374.]
- [11] Zeng Y, Qiu X F, He Y J, et al. Distributed modeling of monthly air temperatures over the rugged terrain of the Yellow River Basin[J]. Science in China (Earth Science), 2009, 52(5): 694-707.
- [12] 袁淑杰,谷晓平,缪启龙,等.基于DEM的复杂地形下平均气温分布式模拟研究:以贵州高原为例[J].自然资源学报,2010,25(5):859-867. [Yuan S J, Gu X P, Miao Q L, et al. Study on distributed simulation of mean temperature over complex terrains based on DEM: Taking Guizhou Plateau as an illustration[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(5): 859-867.]
- [13] 邱新法,仇月萍,曾燕.重庆山地月平均气温空间分布模拟研究[J].地球科学进展,2009,24(6):621-628. [Qiu X F, Qiu Y P, Zeng Y. Distributed modeling of monthly mean air temperature of rugged terrain of Chongqing[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(6): 621-628.]
- [14] 王丽,邱新法,王培法,等.复杂地形下长江流域太阳总辐射的分布式模拟[J].地理学报,2010,65(5):543-554. [Wang L, Qiu X F, Wang P F, et al. Distributed modeling of global solar radiation of rugged terrain of the Yangtze River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 543-554.]
- [15] 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. [Li Y C, He Z M, Liu C X. Review on spatial interpolation methods of temperature data from meteorological stations[J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1019-1028.]
- [16] 李丽,张正勇,刘琳,等.基于DEM的天山山区气温时空模拟研究[J].干旱区研究,2018,35(4):855-863. [Li L, Zhang Z Y, Liu L, et al. Spatiotemporal distribution of temperature in the Tianshan mountains based on DEM[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 855-863.]
- [17] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: A natural evolution of the expansion method for spatial data analysis[J]. Environment and Planning A, 1998, 30(11): 1905-1927.
- [18] 瞿明凯,李卫东,张传荣,等.地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J].土壤,2014,46(1):15-22. [Qu M K, Li W D, Zhang C R, et al. Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences[J]. Soils, 2014, 46(1): 15-22.]
- [19] 张国峰,杨立荣,瞿明凯,等.基于地理加权回归克里格的日平均气温插值[J].应用生态学报,2015,26(5):1531-1536. [Zhang

- G F, Yang L R, Qu M K, et al. Interpolation of daily mean temperature by using geographically weighted regression-Kriging[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1531-1536.]
- [20] Wu Z F, Du H B, Zhao D S, et al. Estimating daily global solar radiation during the growing season in Northeast China using the Angstrom- Prescott model[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 108(3-4): 495-503.
- [21] 何志明, 李月臣, 张秀美. 西南生态环境过渡区日照空间模拟及时空演变趋势分析: 以重庆市为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(5): 55-61. [He Z M, Li Y C, Zhang X M. Simulation and spatio-temporal analysis of sunshine in Southwest ecological transition zone: A case study in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(5): 55-61.]
- [22] Sun W, Zhu Y, Huang S, et al. Mapping the mean annual precipitation of China using local interpolation techniques[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(1-2): 171-180.

Spatial interpolation of mean temperature of Chongqing Municipality considering solar radiation correction

HE Zhiming^{1,2}, LI Yuechen^{3,4}, JIN Xianfeng^{1,2}, LIU Xian^{1,2}, HE Xiaobo^{1,2}

(1. Chongqing Geomatics Center, Chongqing 401147, China; 2. Chongqing Engineering Laboratory of Spatio-temporal Big Data Technology Research and Application, Chongqing 401147, China; 3. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 4. Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing 401331, China)

Abstract: The mountainous regions of Southwest China, where Chongqing Municipality is located, has typical regional environmental characteristics such as cloudy fog and less sunshine. In order to realize the spatial simulation of temperature in this geographical environment, this study proposes a model for local regression considering terrain correction factor for solar radiation. In this model, the terrain correction factor is derived indirectly by fitting the spatial distribution of global solar radiation under undulating terrain. The model combines the Geographically Weighted Regression model, the Solar Analyst model, the improved Angstrom- Prescott equation, and the multiple linear regression method. Based on temperature, relative humidity, sunshine percentage, and global solar radiation of the meteorological stations, combined with DEM data with a resolution of $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, this model realizes the spatial simulation of temperature under the mountainous terrain. The model has good fitting accuracy and stability. The simulation accuracy of local regression term is much higher than Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation and Kriging interpolation. It is also better than the traditional Multivariate Linear Regression model based on latitude, longitude, altitude, sunshine percentage, and relative humidity. Further, 55 regional meteorological stations are used to verify the summer temperature simulation accuracy of a single year. The average absolute error is 0.59°C , and the errors of 38 meteorological stations are reduced after considering the terrain correction factor. The model performs well in spatial and temporal simulation of air temperature, which can reflect the influence of local terrain factors such as slope, aspect, and topographic occlusion on temperature, and has clear physical meaning. Based on the available observation data of meteorological stations, DEM, and the commercial software ArcGIS, this model is convenient to apply, especially suitable for cloudy, sunless areas like Chongqing and its surrounding mountainous regions.

Key words: spatial interpolation of temperature; solar radiation; DEM; mountain temperature; Chongqing Municipality