

文章编号:1001-8166(2009)06-0621-08

重庆山地月平均气温空间分布模拟研究*

邱新法¹, 仇月萍², 曾 燕³

(1. 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:利用月平均气温物理经验统计模型,结合重庆市及周边51个气象站1961—2000年常规气象观测资料和重庆市1:25万DEM数据,充分考虑地形(海拔、坡度、坡向和地形遮蔽)、太阳辐射、长波有效辐射等因素对气温的影响,完成了复杂地形下重庆市山地100 m×100 m分辨率月平均气温空间分布的模拟。模拟结果能较好地反映气温的宏观分布趋势和局地分布特征,月气温模拟平均绝对误差最大为0.40℃,全年平均为0.21℃。采用交叉验证、个例年验证和野外考察资料验证对模拟结果和模型性能进行了多方面的考察,结果表明:交叉验证误差全年平均为0.26℃;个例年验证误差全年平均为0.30℃;8个野外考察点验证各月误差总体小于1.0℃。

关键词:重庆市;月平均气温;DEM;空间分布

中图分类号:P468.0⁺21 **文献标志码:**A

1 引言

气温是最常用的气象要素之一^[1],也是热量资源分析中主要的指标^[2]。气温的时空分布对农业、生态、环境等领域尤为重要,是影响植物布局、生长、发育的关键气象要素。因此,研究气温的时空分布特征、变化规律对实际生产和科学研究具有非常重要的意义。高空间分辨率、栅格化的地表气温数据,具有格式规范、结构简单、易于空间分析、能更精细地表达其空间分布特征等优点^[3],并且可以和基础地理数据、遥感数据等空间信息高度兼容,已经成为陆面过程模型、地学模型、气候模型、水文模型等相关研究重要的输入变量,在气候资源分析和气候区划等方面更有直接应用。

国内外学者相继提出了相关的计算方法和模型,开展气温栅格化(空间化)技术方面的研究^[4-6],旨在获得研究区域内复杂地形条件下网格点气温的空间分布情况。大多数学者主要采用内插法、气温垂直递减率订正法和多元回归方法进行气

温栅格化研究^[7-9]。蔡福等^[10]将现有常见的气象/气候要素空间化技术总结为4种方法:简单的几何数学模型法^[11,12](IDW方法、泰森多边形方法),较为复杂的趋势面方法、多元回归方法^[7],以及更为复杂的空间统计方法(协同克里格等)^[13]和函数方法(薄片样条技术法)^[14],并对上述方法的精度进行了比较研究。张洪亮等^[15]以地理信息系统为支撑,在常规统计模型的基础上,利用坡度、坡向因子对山区气温进行了小尺度模拟,提出了地形调节统计模型,通过在环青海湖地区的应用,取得了较好的结果。杨昕等^[16]提出基于DEM的山区气温地形修正模型,以陕西省耀县为实验样区,依据DEM模拟的坡面与水平面天文辐射比值为地形调节因子,对传统山地温度推算模型进行了改进。Running等^[17]试验了增加高程权重系数的多边形算法结合高斯权重卷积,提出了估算复杂地形下1 km×1 km网格逐日最高、最低气温的方法。Bellasio等^[18]分析了海拔高度、坡度、植被对山地温度的影响,建立了回归方程。Mahrt^[19]研究了坡度、植被和太阳辐射与山地

收稿日期:2008-12-29;修回日期:2009-04-28.

* 基金项目:中国气象局气象新技术推广重点项目“基于DEM的我国太阳能资源评估”(编号:CMATG2006Z10)资助。

作者简介:邱新法(1966-),男,浙江湖州人,教授,博士,主要从事资源遥感与地理信息系统方面的研究. E-mail:qxinf@ sina. com

温度的关系。Chung 等^[20]考虑了夜间辐射冷却所引起的降温作用,并应用对数模型进行了气温模拟。

GIS 技术的发展和 DEM 数据的推广应用,为快速生成坡度、坡向等局地地形参数提供了新的手段。近十多年来,应用 GIS 技术,区域性乃至全球规模的栅格化气象数据库不断地被建立和完善,其中著名的有基于 PRISM^[21]模型建立的美国、加拿大、欧洲等国家和地区的空间气象数据库^[22],基于 ANUSPLIN 模型建立的澳大利亚、南非等国家的气象数据库^[23],以及基于 DAYMET 模型建立的美国生物气象数据库^[24]。

重庆市地跨 105°11' ~ 110°11'E 与 28°10' ~ 32°13'N,位于我国西南地区四川盆地的东南部,总面积 8.24 万 km²。地形从南北两面向长江河谷倾斜,起伏较大,以山地和丘陵为主,山地面积和丘陵面积分别占其幅员面积的 75.8% 和 18.2%,呈现“一山一岭”、“一山一槽二岭”的分布特征。

针对研究区域地形复杂的特点和野外考察资料稀少、常规气象台站数量有限的实际情况,在深入分析月平均气温影响因素的基础上,运用月平均气温物理经验统计模型,依托常规地面气象站观测资料,结合复杂地形下太阳总辐射分布式模拟结果,借助地理信息系统技术实现了重庆山地气温的空间分布模拟。

2 资料

用于建立模型的资料主要包括:重庆市及其周边 51 个气象站 1961—2000 年、2005 年月平均气温、日照百分率和相对湿度;野外考察验证资料取自

《盆周山区农业气候资源资料集》^[25],时间为 1982 年 7 月到 1985 年 7 月,为重庆境内的 8 个观测点,对应不同海拔高度的 39 处月平均气温资料。100 m × 100 m 分辨率的 DEM 数据取自国家 1:25 万基础地理数据库。

3 月平均气温物理经验统计模型

分析表明,在影响气温的众多因素中,海拔高度、太阳总辐射、长波有效辐射对区域气温的形成具有显著影响且有明确的物理意义。传统气温模拟受资料和技术手段的限制往往不能充分考虑地形因素的影响。实际地形是相对起伏的(尤其在山区),可将其称为复杂地形,对于起伏不平的地面(坡面),由于太阳光线的入射角不同,局地接收的太阳辐射量有显著的差异。为此,构造如下月平均气温的物理经验统计模型^[26]:

$$T_{\text{eq}} = a + bH_{\text{eq}} + cQ_{\text{eq}} + d(1-s)(1+w \cdot h) + \Delta T \quad (1)$$

式中: T_{eq} 为复杂地形下(山地)月平均气温(°C),“复杂地形”的意义在于突出本文气温模拟考虑了地形因素的影响; H_{eq} 为海拔高度(m),由 DEM 数据获取; Q_{eq} 为复杂地形下月平均日太阳总辐射量(MJ/m²); s 、 h 分别为月平均日照百分率和相对湿度,二者组合成一项,代表长波有效辐射影响; a 为回归常数项; b 为气温随海拔的递减率; c 为气温随太阳总辐射的递增率; d 代表长波有效辐射对气温的影响强度; w 为经验系数; ΔT 为其他因素对气温影响的综合余项。

(1) 式中 Q_{eq} 为非常规气象观测资料,需要通

表 1 月平均气温估算模型统计参数表
Table 1 Statistics of mean air temperature simulation model

| 月份 | R | a | b | c | d | w | $MABE$ |
|----|--------|---------|----------|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 0.8350 | -2.4414 | -0.00570 | 0.5979 | 5.8551 | 0.7410 | 0.99 |
| 2 | 0.7791 | -3.6509 | -0.00660 | 1.0227 | 3.2348 | 2.4960 | 1.35 |
| 3 | 0.8533 | -4.2039 | -0.00597 | 1.0903 | 12.6074 | -0.0540 | 1.08 |
| 4 | 0.8745 | 1.1102 | -0.00561 | 0.8517 | 15.0978 | -0.2411 | 0.92 |
| 5 | 0.9138 | 23.8317 | -0.00553 | 0.0860 | 4.3344 | -1.8764 | 0.72 |
| 6 | 0.9437 | 29.2436 | -0.00548 | 0.0000 | 2.8973 | -3.0732 | 0.55 |
| 7 | 0.9622 | 30.2614 | -0.00504 | 0.0071 | 15.6842 | -1.4614 | 0.48 |
| 8 | 0.9627 | 20.4235 | -0.00525 | 0.3851 | 22.9154 | -1.0301 | 0.55 |
| 9 | 0.9202 | 12.9576 | -0.00541 | 0.6101 | 19.4258 | -0.7650 | 0.71 |
| 10 | 0.8813 | 14.1060 | -0.00559 | 0.3218 | 7.3058 | -0.5231 | 0.79 |
| 11 | 0.8221 | -1.6965 | -0.00575 | 1.1346 | 6.6701 | 1.0653 | 1.00 |
| 12 | 0.8163 | -3.0831 | -0.00516 | 0.6934 | 10.4993 | 0.1299 | 1.06 |

注: R 为复相关系数; $MABE$ 为绝对误差平均值

过模型计算获得,以 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率 DEM 数据作为地形的综合反映,应用分布式太阳总辐射模型计算获得重庆市 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率复杂地形下太阳总辐射量空间分布,模型充分考虑到了天文因子(太阳常数、日地相对距离、太阳赤纬等)和宏观地理因子(纬度等),以及微观地形因子(坡度、坡向)等综合作用,具体计算方法见参考文献[27~30]。在此基础上,根据51个站经、纬度位置信息可以获取各站的 Q_{ap} 数值。

在不考虑 ΔT 的情况下,根据51个站1961—2000年复杂地形下月平均日太阳总辐射量 Q_{ap} 计算结果,结合各站1961—2000年逐月平均气温、日照百分率、相对湿度和海拔高度资料,采用统计方法拟合获得(1)式中的经验系数 a 、 b 、 c 、 d 、 w ,表1列出了各项统计参数。可以看出,大部分月份复相关系数在0.77以上,各月 a 、 b 、 c 、 d 、 w 数值符合气温形成机理,且有良好的季节变化规律。表1中的统计参数 $MABE$ (Mean Absolute Bias Error) 为绝对误差平均值,代表了综合余项 ΔT 的绝对平均值,其数值不超过 1.5°C ,大部分在 1.0°C 以内,因此(1)式进行气温拟合所选取的影响因子是成功的。尽管综合余项 ΔT 数值并不大,但对气温拟合而言,仍是不容忽视的。

4 复杂地形下重庆月平均气温空间分布模拟

以 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率的网格为计算单元,DEM 数据作为地形的综合反应,提取网格单元的海拔高度 H_{ap} ;日照百分率 s 和相对湿度 h 根据51个站观测资料采用 IDW 插值方法进行空间内插获得;综合余项 ΔT 根据51个站气温拟合余项采用 IDW 插值方法进行空间内插获得;经验系数 a 、 b 、 c 、 d 、 w 采用表1参数;结合根据分布式太阳总辐射模型计算获得的 Q_{ap} ,即可获得复杂地形下重庆月平均气温的空间分布。

4.1 复杂地形下重庆月平均气温的空间分布

图1给出了重庆气候平均(1961—2000年)年平均气温的空间分布,根据12个月平均气温的模拟结果采用算术平均计算而得。可以看出,重庆的年平均气温在 $3.1 \sim 19.0^\circ\text{C}$ 之间,气温随地势分布的地区差异明显,与重庆的地势分布一致且脉络清晰。高值区分布在西南部和中部的丘陵及局部海拔较低的山谷地带,年平均气温普遍在 15.0°C 以上;低值区主要分布在东北部的城口和巫溪两县的山区及南

部海拔较高的金佛山山区,年平均气温普遍在 10°C 以下;重庆西北部的潼南,合川等县地势相对平坦,没有大地形影响,气温变化过渡比较平缓,除局部山顶温度偏低外,年平均气温在 $15.0 \sim 18.0^\circ\text{C}$ 之间。

图2给出了重庆气候平均1、4、7、10月气温的空间分布。各月平均气温空间分布的格局较为一致,海拔高度对气温的影响在各月均有明显的表现。山区不同坡向坡地上的气温差异在各月均有不同程度的体现,相对而言,在太阳高度角较低的冬季,局地地形对山区气温的影响略大于太阳高度角较高的夏季。总体来说,重庆地区全年的温差不是很大,最高为 29.4°C ,最低为 -8.1°C 。

4.2 月平均气温的局地分布规律

为了分析地形因素对气温空间分布的影响,对重庆气温模拟结果进行统计分析。图3a反映的是 31°N 、 1500 m 海拔高度、 15° 坡地上1月、4月、7月、10月平均气温随坡向的变化规律^①,其中,横坐标为坡向, 90° 为东坡, 180° 为南坡, 270° 为西坡, 0° 或 360° 为北坡;纵坐标为月平均气温距平,指某一坡向上栅格平均气温与所有坡向上所有栅格平均气温之差;图上每个点的气温距平是同一坡向上多个栅格气温距平的平均值。由图可见:1月、4月、10月偏南坡的气温略高于偏北坡,7月各坡向上的气温基本相当;所有月份,东坡和西坡的气温与各坡向平均气温相当。

图3b为 30.5°N ,海拔高度为 1000 m ,不同坡度的坡地上月平均气温随坡向的变化规律。可以看出,1月偏南坡与偏北坡的气温差异随坡度的增加而增加;在偏南坡表现为正距平,偏北坡则为负距平。坡度 10° 和 20° 的坡地上7月气温距平基本上与 0°C 线重合,说明7月平均气温受坡度的影响很小。

5 气温模拟结果误差分析

5.1 误差分析方法

为了验证模拟结果,需要将气象站点观测资料与气温分布式模拟结果进行比对,这就需要根据气象站点的经、纬度位置信息读取其对应栅格点的气温模拟数值。这时需要考虑如下地理地形参数误差

^① 将 31°N 、海拔高度为 1500 m 且坡度为 15° 的栅格挑选出来,对其进行统计分析,首先计算所有满足条件栅格的气温平均值,之后计算某一坡向上所有栅格的气温平均值,将后者减去前者,获得该坡向栅格气温的距平值,即可绘制图3a。

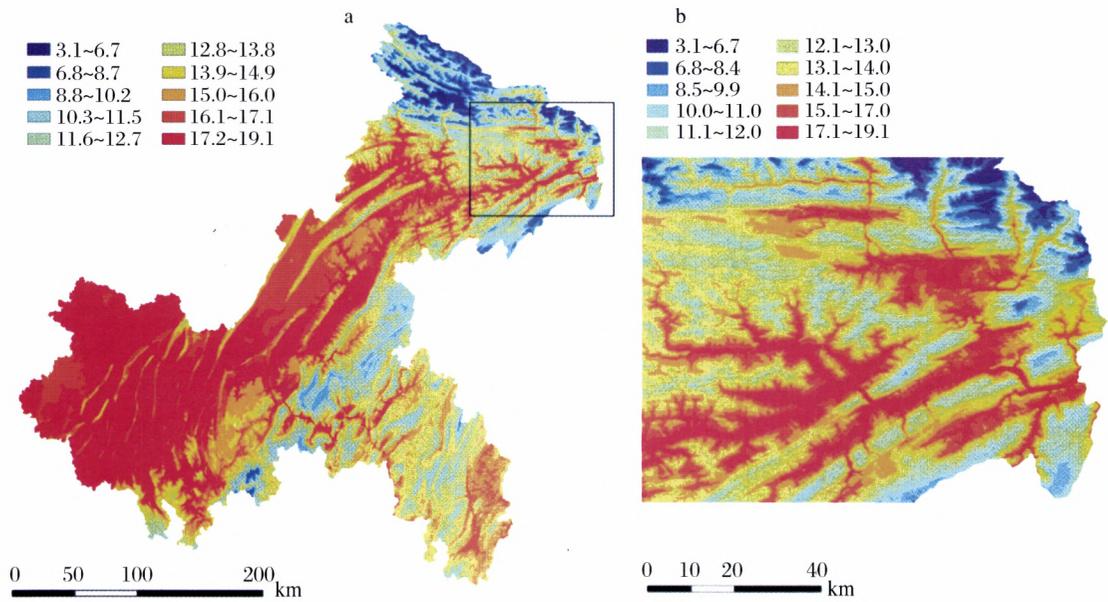


图 1 重庆气候平均年平均气温的空间分布 (1961—2000)

Fig.1 Spatial distribution of normals of annual mean air temperature of Chongqing (1961-2000)

(a) 整体;(b)局部
(a) Whole; (b) Local

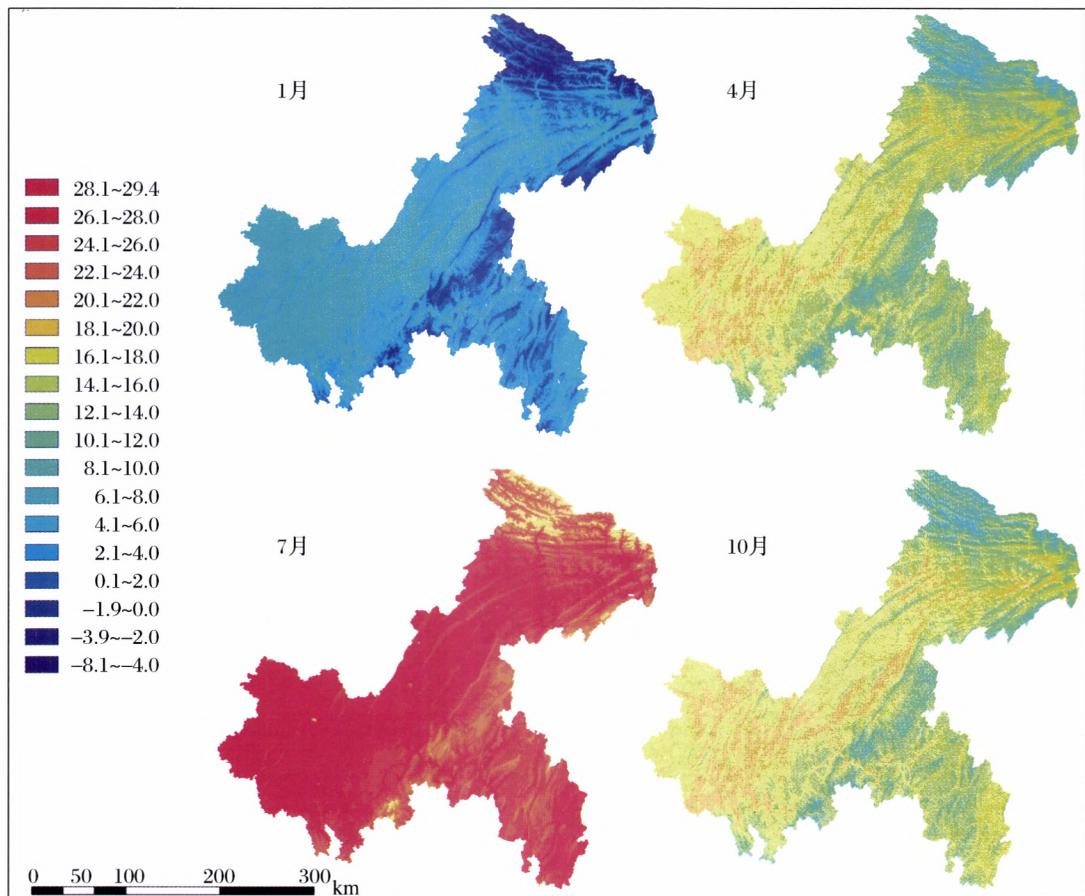


图 2 重庆气候平均 1 月、4 月、7 月、10 月气温空间分布 (1961—2000)

Fig.2 Spatial distribution of normals of monthly mean air temperature of Chongqing (1961-2000)

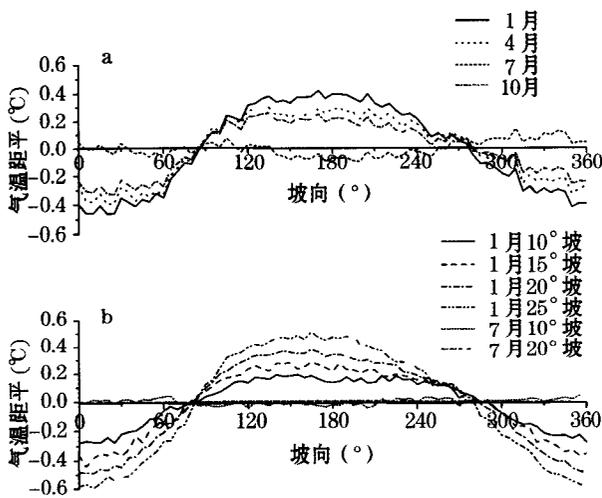


图3 重庆月平均气温受地形影响规律特征

Fig.3 Terrain influencing characteristics on month mean air temperature of Chongqing

的影响:①DEM数据精度误差。由于DEM是对地形高程的综合数字化表达,代表了网格点所在面域的平均高程,与真实地形之间必然存在一定的差距,由DEM数据派生的坡度、坡向等地形参数也必然与真实地形参数存在一定差距。不同比例尺的DEM数据对真实地形的表达精度和详细程度是不同的。②气象站位置误差。目前,由中国气象局提供的气象站经、纬度位置参数只精确到分,其位置参数的精度误差为1~2 km。上述原因影响了准确读取气象站对应网格的数据^[24]。

由于气象站一般设在水平开阔地段,其所在位置实际地形的坡度应该为0°,开阔度应该为1.0。鉴于此考虑,本文提出了邻近相似栅格法,通过查找与气象站点实际地理环境相似的栅格来克服上述两方面地理地形参数误差的影响,具体方法为:

- (1) 设定最大搜索半径 R , 确定最大搜索区域。
- (2) 设定最大相似栅格数 N , 以提高计算效率。
- (3) 设定坡度阈值 A 以搜索近似平地的栅格。
- (4) 设定开阔度阈值 O , 以搜索近似开阔地段的栅格。

(5) 设定高程误差阈值 $\Delta H = |H_s - H_p|$ (H_s 为气象台站海拔高度, H_p 为栅格海拔高度), 以查找近似海拔栅格。

(6) 以气象站经、纬度信息点为中心, 由近及远逐步搜索, 标记满足设定阈值的相似栅格, 直至相似栅格数目达到最大相似栅格数或搜索半径达到最大搜索半径为止。

(7) 读取各相似栅格气温模拟值, 并计算其算术平均值, 作为气象站模拟气温值。

5.2 交叉验证

本文取 $R = 2\ 000\ m$; $N = 20$; $A = 0.5^\circ$; $\Delta H = 50\ m$ 。在获取气象站对应网格气温模拟值的基础上, 结合气象站实测资料, 统计获得本文气温模拟误差。为了进一步分析模型的稳定性, 采用了交叉验证方案。交叉验证过程中, 考虑到验证次数和工作量等因素, 根据气象台站的空间分布, 每次均匀地抽取3个气象站不参与建模, 用剩余站点建模, 统计未参加建模站点的气温模拟误差。除城口和金佛山两站海拔过高没有参与交叉验证外, 其余重庆辖区内站点都进行了交叉验证。

表2 气温模拟误差与交叉验证误差统计表

Table 2 Error statistics of air temperature simulation

| 月 | 模拟绝对误差 平均值(°C) | 交叉验证绝对 误差平均值(°C) |
|----|-------------------|---------------------|
| 1 | 0.20 | 0.22 |
| 2 | 0.25 | 0.39 |
| 3 | 0.25 | 0.20 |
| 4 | 0.29 | 0.08 |
| 5 | 0.14 | 0.35 |
| 6 | 0.13 | 0.12 |
| 7 | 0.13 | 0.31 |
| 8 | 0.16 | 0.67 |
| 9 | 0.16 | 0.44 |
| 10 | 0.15 | 0.12 |
| 11 | 0.40 | 0.10 |
| 12 | 0.23 | 0.06 |
| 全年 | 0.21 | 0.26 |

表2中第二列给出的是所有气象站资料参加建模的情况下, 统计获得的气象站气温模拟值与实测值之间的绝对误差平均值; 第三列给出的是按照交叉验证方案, 在验证气象站被抽取, 利用其他气象站资料拟合建模的情况下, 统计获得的验证气象站气温模拟值与实测值之间的绝对误差平均值。可以看出, 各月模拟绝对误差平均值和交叉验证绝对误差平均值最大为0.67°C, 最小为0.08°C, 全年平均为0.26°C, 表明本文采用的月平均气温分布式模型具有良好的空间稳定性。

5.3 个例年验证

为验证模型在时间维上的模拟性能, 采用重庆及其周边51个气象站2005年常规气象观测资料, 模拟2005年各月平均气温, 表3列出了误差统计分析指标。可以看出, 2005年各月气温模拟绝对误差

表3 2005年气温模拟误差统计表(°C)

Table 3 Error statistics of air temperature simulation in 2005

| 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 年平均 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 绝对误差平均值(°C) | 0.30 | 0.51 | 0.34 | 0.33 | 0.18 | 0.18 | 0.28 | 0.41 | 0.25 | 0.15 | 0.38 | 0.29 | 0.30 |

平均值最大为0.51°C,全年平均不超过0.30°C,夏季的模拟精度比冬季高,表明模型具有良好的时间维模拟能力。

5.4 野外考察资料验证

在气象台站稀疏或缺乏的山区,野外考察资料是很重要的真实资料,通过实地的定点观测或流动的观测考察来获取。本文采用四川省盆周山区农业气候资源考察与研究课题^[25]成果的部分观测数据对气温模拟结果进行进一步的验证。该野外考察资料从1982年7月到1985年7月,在涪陵等19个山地剖面进行了1月、4月、7月、10月各代表月的常规气象要素观测,对每个剖面的不同海拔高度的气温进行实地考察,其中重庆境内的观测点有8个,对应不同海拔高度有完整记录的共39条资料。野外考察资料中给出了考察点的经纬度和海拔高度信息,但没有坡度、坡向等地理环境信息,因此,同样采用邻近相似栅格法获得到各考察点的气温模拟值。由表4可见,气温模拟值与实测值的绝对误差平均值大部分都在1.0°C以内,8个考察点各月总体平均误差小于1.0°C,表明模型具有良好的山地气温模拟能力。

表4 野外考察点气温模拟绝对误差平均值统计分析表(°C)

Table 4 Air temperature simulation analysis by field investigation data

| 考察点 | 1月 | 4月 | 7月 | 10月 |
|-----|------|------|------|------|
| 万源 | 0.21 | 0.60 | 0.14 | 0.93 |
| 开县 | 0.79 | 0.81 | 0.36 | 0.38 |
| 巫溪 | 0.50 | 0.84 | 0.52 | 0.25 |
| 南川 | 0.31 | 0.41 | 0.25 | 0.44 |
| 涪陵 | 0.32 | 0.35 | 0.33 | 0.43 |
| 丰都 | 0.76 | 0.79 | 0.35 | 0.64 |
| 酉阳 | 0.71 | 1.00 | 0.71 | 0.67 |
| 万县 | 0.56 | 0.44 | 0.24 | 0.19 |
| 平均 | 0.52 | 0.66 | 0.36 | 0.49 |

6 结论和讨论

气温的形成机理相当复杂,影响因素众多。利用月平均气温拟合模型,实现了重庆市山地月平均气温空间分布的模拟。通过本项研究,得出以下几点结论:

(1) 模拟结果较好地表达了重庆山地气温的宏观分布趋势和局地分布特征。模拟的月平均气温空间分布能很好地反映出重庆月平均气温随地势高差和宏观气候特征的分布规律,对模拟结果的局地分布规律分析表明,月平均气温随坡向、坡度等局地地形因素的分布规律能得到较好的表达。

(2) 提出的邻近相似栅格平均法来提取气温模拟值,减少了地理地形参数误差对数据验证的影响。

(3) 误差分析和验证结果表明模型具有良好的模拟精度、空间稳定性、时间维模拟能力和山地扩展性能。各月气温模拟误差最大为0.40°C,全年平均为0.21°C;各月交叉验证误差值最大为0.67°C,全年平均为0.26°C;个例年验证各月气温模拟误差最大为0.51°C,全年平均为0.30°C;8个野外考察点验证各月绝对误差总体小于1.0°C。

本文所用的气温拟合模型,考虑了地形(海拔、坡度、坡向和地形遮蔽)、太阳辐射、长波有效辐射等因素对月平均气温的影响,尚有一些因素未能给予充分的考虑,如地表类型对气温空间分布的影响,气温递减率等模型系数在空间上的变化等,有待于在今后的工作中进一步改进。

参考文献(References):

- [1] Wang Linlin, Wang Zhiyong, Shi Tongguang, et al. Simulation of air temperature in Shandong province based on DEM[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2007, 22(1): 79-84. [王林林, 王智勇, 史同广, 等. 基于DEM的山东省气温分布模拟研究[J]. 山东建筑大学学报, 2007, 22(1): 79-84.]
- [2] Sun Weiguo. Summary on Climate Resources[M]. Beijing: Meteorology Press, 2008. [孙卫国. 气候资源学[M]. 北京: 气象出版社, 2008.]
- [3] Yuan Aimin, Wang Jianyuan. Research on methodology for rasterizing meteorological element[J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(6): 111-115. [袁爱民, 王建源. 气象要素栅格化技术方法研究[J]. 气象, 2006, 32(6): 111-115.]
- [4] Yin Hongtao, Liu Xin'an, Liu Shoudong, et al. Analysis and grid of thermal resources in west Liaoning province[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1): 169-173. [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.]
- [5] Li Zhengquan, Yu Guirui, Liu Xin'an, et al. Grid technology for precipitation and humidity information in northeast China [J]. *Re-*

- sources Science, 2003, 25(1): 72-77. [李正泉, 于贵瑞, 刘新安, 等. 东北地区降水与湿度气候资料的栅格化技术[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 72-77.]
- [6] Fu Baopu. Simulation of the distribution of climatic elements in mountainous areas[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1988, 46(3): 319-325. [傅抱璞. 山地气候要素空间分布的模拟[J]. 气象学报, 1988, 46(3): 319-325.]
- [7] Liao Shunbao, Li Zehui, You Songcai. Comparison on methods for rasterization of air temperature data[J]. *Resources Science*, 2003, 25(6): 83-88. [廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 83-88.]
- [8] Pan Yaozhong, Gong Daoyi, Deng Lei, 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. [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.]
- [9] Liu Yu, Chen Panqin, Zhang Wen, et al. A spatial interpolation method for surface air temperature and its error analysis[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(1): 146-152. [刘宇, 陈泮勤, 张稳, 等. 一种地面气温的空间插值方法及其误差分析[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 146-152.]
- [10] Cai Fu, Yu Guirui, Zhu Qinglin, et al. Comparison of precision between spatial methods of climatic factors: A case study on mean air temperature [J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 173-179. [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.]
- [11] Fang Shumin, Qin Jiangwei, Li Yongfei, et al. Method of spatial interpolation of air temperature based on GIS in Gansu province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 2005, 41(2): 6-9. [方书敏, 秦将为, 李永飞, 等. 基于GIS的甘肃省气温空间分布模式研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2005, 41(2): 6-9.]
- [12] Wang Ling. The temperature calculation model for the mountainous areas in north China and its application[J]. *Journal of Natural Resources*, 1996, 11(2): 150-156. [王菱. 华北山区温度推算模式和应用[J]. 自然资源学报, 1996, 11(2): 150-156.]
- [13] Li Xin, Cheng Guodong, Lu ling. Comparison of spatial interpolation methods[J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(3): 261-262. [李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 261-262.]
- [14] Yan Hong. Modeling spatial distribution of climate in China using thin plate smoothing spline interpolation[J]. *Scintia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 164-166. [阎洪. 薄板光顺样条插值与中国气候空间模拟[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 164-166.]
- [15] Zhang Hongliang, Ni Shaoxiang, Deng Ziwang, et al. A method of spatial simulating of temperature based Digital Elevation Model (DEM) in mountain area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 23(3): 360-364. [张洪亮, 倪绍祥, 邓自旺, 等. 基于DEM的山区气温空间模拟方法[J]. 山地学报, 2002, 23(3): 360-364.]
- [16] Yang Xin, Tang Guoan, Wang Chun, et al. Terrain-revised ground surface temperature model of mountain area based on DEM—A case study in Yaodian county of Shaanxi province[J]. *Scintia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 525-530. [杨昕, 汤国安, 王春, 等. 基于DEM的山区气温地形修正模型——以陕西省耀县为例[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 525-530.]
- [17] Running S W, Thornton P E. Generating daily surfaces of temperature and precipitation over complex topography[M] // Goodchild M F, Sryaert L T, Parks B O. GIS and Environmental Model: Progress and Research Issues. Collins: GIS World Inc, 1996.
- [18] Bellasio R, Maffei G, Scire J S, et al. Algorithms to account for topographic shading effects and surface temperature dependence on terrain elevation in diagnostic meteorological models [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 114: 595-614.
- [19] Mahrt L. Variation of surface air temperature in complex terrain [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2006, 45(11): 1 481-1 493.
- [20] Chung U, Seo H, Hwang H, et al. Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1/2): 15-24.
- [21] Daly C, Taylor G H, Qbson W P. The PRISM approach to mapping precipitation and temperature[C] // American Meteorological Society Proceeding 10th AMS Conf. On Applied Climatology Meteorological Society, NV. Boston, Mass: American Meteorological Society, 1997: 2-23, 10-12.
- [22] Daly C, Gibson W, Taylor G, et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate[J]. *Climate Research*, 2002, 22: 99-113.
- [23] Thorton P, Running S, White M. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 190: 214-251.
- [24] Bellasio R, Maffei G, Scire J S, et al. Algorithms to account for topographic shading effects and surface temperature dependence on terrain elevation in diagnostic meteorological models [J]. *Bound-Layer Meteorology*, 2005, 114: 595-614.
- [25] Penzhou basin mountain agro-climatic resources data sets[G]. The office of agro-climatic for Sichuan meteorological administration, 1998: 11. [盆周山区农业气候资源资料集[G]. 四川省气象局农业气候区划办公室, 1998: 11.]
- [26] Zeng Yan, Qiu Xinfu, He Yongjian, et al. Distributed modeling of monthly air temperatures over the rugged terrain of the Yellow river basin[J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 52(5): 694-707.
- [27] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Liu Shaomin. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over rugged terrains[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1 028-1 033. [曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1 028-1 033.]
- [28] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Liu Changming, et al. Distributed modeling of direct solar radiation of rugged terrain over the Yellow river

- basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 680-688. [曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 起伏地形下黄河流域太阳直接辐射分布式模拟[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 680-688.]
- [29] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Liu Changming, *et al.* Distributed modeling of diffuse solar radiation over rugged terrain of the Yellow river basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 991-998. [曾燕, 邱新法, 刘昌明. 起伏地形下黄河流域太阳散射辐射分布式模拟研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 991-998.]
- [30] Zeng Yan, Qiu Xinfu, Pan Aoda, *et al.* Distributed modeling of global solar radiation over rugged terrain of the Yellow river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(11): 1 185-1 192. [曾燕, 邱新法, 潘放大, 等. 地形对黄河流域太阳辐射影响的分析研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1 185-1 192.]

Distributed Modeling of Monthly Mean Air Temperature of Rugged Terrain of Chongqing

QIU Xinfu¹, QIU Yueping², ZENG Yan³

- (1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
3. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: With a physically based empirical temperature model with DEM data of 1:250 000 scale and routine meteorological data from 51 stations in and around Chongqing municipality from 1961-2000, we generated the spatial distribution map with resolution of 100 m × 100 m of monthly mean air temperature of rugged terrain of Chongqing municipality. The model gives an overall consideration of terrain (altitude, slope, aspect, terrain-shielding), solar radiation and effective radiation effects on temperature. Analyses show that the simulation results can well reflect the macro and local temperature distribution characteristics and the maximum mean absolute bias error is 0.40°C for monthly temperature simulation and the annual average error is 0.21°C. Tests carried by cross-validation, case year data and field investigation data indicate that the annual average error of cross-validation is 0.26°C, case year test is 0.30°C and the overall monthly average error of field investigation is less than 1.0°C.

Key words: Chongqing municipality; Monthly mean air temperature; DEM; Spatial distribution.