

# 基于MODIS数据和气象观测数据的气温空间插值方法比较

周婷婷<sup>1,2</sup>, 陈文惠<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 福建省基础地理信息中心, 福州 350003)

**摘 要:** 本文以福建省福州市为研究区域, 利用MODIS影像数据反演福州市地表温度; 同时利用相同时间的福州市及其周边的32个气象站日平均气温数据, 结合数字高程模型(DEM)中提取出的地形因子, 研究温度与经度、纬度、海拔高度等的相关关系, 提出了福州市地形因子与气温相关模型, 利用该模型插值得到福州市的地表温度; 再利用气温垂直递减规律进行插值得到地表温度。对比3种结果可知, 对于气象数据容易获得, 气象站点较多且均匀分布在研究区时, 利用气象数据插值地表温度较快, 但计算结果比实际值略高; 对于气象数据不易获得或站点较少时, 可以用影像数据来反演地表温度, 其精度受提取参数的精度的制约, 在参数使用正确情况下比插值方法反演精度高。

**关 键 词:** MODIS; 地表温度; DEM; 空间插值; 气温数据; 福州

## 1 引言

气候对人类与自然系统有重要影响。气温或地表温度作为反映地球表层系统热量状况的综合环境指数, 不仅是参与自然地域系统界限划分的关键指标, 更是地表陆面过程模型模拟的重要参数, 被广泛地应用于工农业生产、环境保护、科学研究的诸多领域。随着全球资源环境分析、气候变化研究和城市热岛监测等工作的广泛深入开展, 人们对气温数据有了更高的需求。然而, 由于自然和社会因素的限制, 气象站点数量有限且分布不均, 无法满足地学模型、气候模型、水文模型等多种模型空间精度的要求, 解决这一问题的主要出路就是利用遥感数据进行地表温度反演和利用地理信息系统技术进行空间插值模拟。20世纪90年代以前, 常采用数理统计方法推算和模拟气温的空间分布, 这些方法虽能够反映气温要素的整体变化趋势, 但局部误差较大, 且计算繁琐, 工作量大, 制图困难。

目前, 现有的地表温度反演研究有很多, 主要包括从影像上反演温度和利用现有气象站点提供的气温数据进行空间插值出温度。卫星热红外传

感器是目前能大范围获取地表温度空间分布的途径之一, 如何从热红外遥感数据反演地表温度一直是众多学者所关注的问题<sup>[1]</sup>, 比较成熟的有覃志豪、毛克彪等<sup>[1]</sup>基于MODIS数据反演地表温度的算法, 此算法获得的精度高, 但涉及到的参数比较复杂。基于TM影像反演地表温度在地表分辨率较高的情况下精度适合一般研究, 此方法反演中涉及的参数容易获得。利用气象站提供的气温数据进行空间插值出温度在气温数据易于获得情况下适合小范围的研究区域。空间插值方法有很多, 常用的方法有反距离加权法、样条函数法和普通克里格法等方法, 很多研究中提出模拟站点的加入大大提高了插值的精度; 采用的3种插值方法中, 普通克里格法比反距离加权法和样条函数法具有更好的插值效果。蔡迪花等<sup>[2]</sup>基于DEM研究了气温插值方法, 利用气象站点和数字高程模型(DEM), 在分析平均气温与经度、纬度、海拔高度、坡度、坡向地形要素相关关系基础上, 提出了一种基于DEM的多元线性回归空间插值方法(MLR), 无论从误差大小还是从插值效果上, 考虑了地形要素的MLR方法均优于传统的插值方法。谢云峰等<sup>[3]</sup>在定量分析海拔高

收稿日期: 2010-01; 修订日期: 2011-01.

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2008J0125; 2010R1037-2)。

作者简介: 周婷婷(1985-), 女, 吉林省, 硕士研究生, 研究方向为遥感应用及地理信息系统应用与区域发展。

E-mail: zhoutingtingztt@sohu.com

通讯作者: 陈文惠(1965-), 男, 黑龙江嘉荫人, 博士, 副研究员, 主要从事遥感及地理信息系统应用研究。

E-mail: whchenfz@sohu.com

度、经纬度等因子对气温空间分布影响的基础上,选取气温数据,利用DEM模型和相关辅助信息进行复杂地形条件下气温空间分布模拟。精度交叉验证的结果表明,基于DEM辅助相关信息的插值精度明显高于常规的逆距离权重法、样条函数法、普通克里格法。气温的空间分布趋势也更加合理,更好的体现出气温分布的空间异质性。游松财<sup>[4]</sup>研究了海拔精度影响气温空间插值精度,研究表明海拔高度对气温影响非常显著。

福州位于中国东南沿海,福建省东北部,闽江下游。地貌属典型的河口盆地,城区位于盆区中央,盆地四周被群山峻岭所环抱,东有鼓山,西有旗山,南有五虎山,北有莲花峰,境内地势自西向东倾斜,由于地形的闭塞,不利于气流流动,加剧了城市热岛效应。

由于福州的典型的地貌特征,城市热岛效应十分明显,对其温度研究就显得尤为重要。因此,本文以福州为研究区进行地表温度研究,利用成熟的MODIS影像数据反演地表温度方法反演福州市地表温度;同时考虑了空间因子对于数据的空间插值的影响,对比常用的方法可以发现考虑了空间因子的空间插值方法精度较高。本文试图在现有方法的基础上,考虑福州的地形因子,得到更适合福州区域的温度模型。

## 2 研究区域

### 2.1 研究区域概况以及气象站分布

福州市位于福建省东部沿海,闽江下游,介于 $25^{\circ}15' \sim 26^{\circ}39'N$ ,  $118^{\circ}08' \sim 120^{\circ}31'E$ 。福州市区所在地属于典型的河口盆地,盆地四周被群山峻岭所环抱,其海拔多在600~1000 m之间。福州气候属海洋性亚热带季风气候,全年冬短夏长,温暖湿润;年平均降水量为900~2100 mm;年平均气温为16~20℃,最冷月1-2月,平均气温达6~10℃;最热月7-8月,平均气温为24~29℃。年相对湿度约77%。近年来常出现热岛效应,又因盆地地形影响,夏季中午气温高达36℃以上。气象站分布如图1所示。

### 2.2 研究数据源

本研究所需的数据主要包括福州市2006年11月12日MODIS影像数据、高程数据和2006年11月12日气温数据以及福州市的政区范围矢量图,

高程数据为1:10万等高线数字线划图基础上生成的30 m网格DEM。

## 3 利用MODIS数据反演地表温度

目前,从遥感影像上反演地表温度的方法有利用一个热红外通道的单窗算法<sup>[5-6]</sup>、利用两个热红外通道的劈窗算法和利用多个热红外通道的多通道反演方法。其中劈窗算法是比较成熟的温度反演算法。本文基于这一算法利用MODIS中的热红外波段31和32来反演福州市地表温度。

### 3.1 基于辐射传输方程的地表温度反演模型<sup>[1,7-8]</sup>

基于辐射传输方程反演地表温度主要是利用大气辐射传输模型来模拟大气对地表热辐射的影响,包括大气的吸收作用及大气自身的上行辐射和下行辐射。卫星传感器观测到的辐射能量中减去这些大气的吸收作用,得到地表的真实热辐射强度,进而反演出地表的真实温度。在考虑大气和地表比辐射率的影响之后,将辐射传输方程简化如下<sup>[1]</sup>:

$$B_i(T_i) = \tau_i [\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i) I_i \downarrow] + I_i \uparrow \quad (1)$$

式中:  $T_s$  为地表温度;  $T_i$  为波段  $i$  的亮度;  $\tau_i$  为大气透过率;  $\varepsilon_i$  为地表比辐射率;  $B_i(T_i)$  为遥感器所接收到的辐射强度;  $B_i(T_s)$  为地表在  $i$  波段区间内的实际热辐射强度,直接取决于地表温度;  $I_i \uparrow$  和  $I_i \downarrow$  分别为大气在  $i$  波段区间内向上和向下的热辐

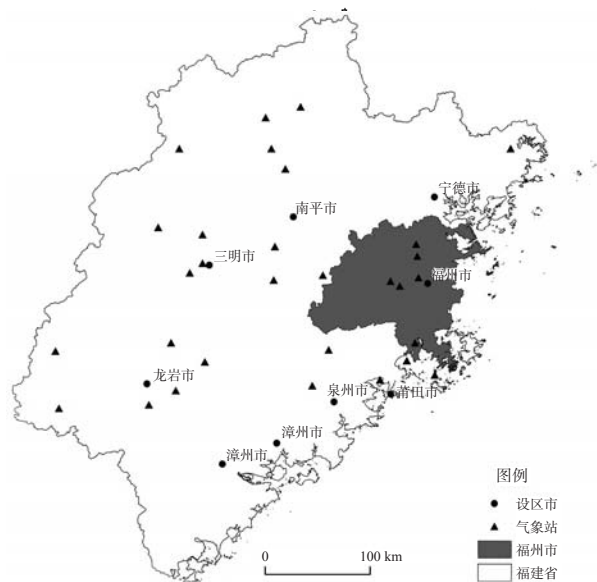


图1 福州市气象站分布图

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Fuzhou

射强度。毛克彪等<sup>[1,6]</sup>用大气向上平均辐射强度代替大气向下辐射强度,对上式简化得到式(2)所示:

$$B_i(T_a) = \varepsilon_i \tau_i(\theta) B_i(T_s) + [1 - \tau_i(\theta)][1 + (1 - \varepsilon_i) \tau_i(\theta)] B_i(T_s) \quad (2)$$

式中:  $T_a$  是大气向上平均作用温度;  $B_i(T_a)$  为通道  $i$  的大气向上平均辐射强度;其他变量含义同上。

利用MODTRAN模型来模拟出辐射强度与温度之间的相关关系。毛克彪等<sup>[1]</sup>对31和32波段做气温(0~50℃)与辐射强度的散点图,发现温度与辐射强度在区间(0-50℃)之间,是近似线性关系。

$$B_{31}(T) = 0.13787T_{31} - 31.65677, R^2 = 0.9971$$

$$B_{32}(T) = 0.11849T_{32} - 26.50036, R^2 = 0.9978 \quad (3)$$

利用31和32的两个近似线性关系,可以将2式简为地表温度与大气向上的平均作用温度之间的二元方程组,其中方程组的未知数为波段31、32的大气透过率、比辐射率还有亮度温度值。

$$A_{31}T_s = B_{31} - C_{31}T_{31} + D_{31}$$

$$A_{32}T_s = B_{32} - C_{32}T_{32} + D_{32} \quad (4)$$

$$A_{31} = 0.13787\varepsilon_{31}\tau_{31}$$

$$B_{31} = 0.13787T_{31} + 31.65677\varepsilon_{31}\tau_{31} - 31.65677$$

$$C_{31} = (1 - \varepsilon_{31})[1 + (1 - \varepsilon_{31})\tau_{31}]0.13787$$

$$D_{31} = (1 - \varepsilon_{31})[1 + (1 - \varepsilon_{31})\tau_{31}]31.65677$$

$$A_{32} = 0.11849\varepsilon_{32}\tau_{32}$$

$$B_{32} = 0.11849T_{32} + 26.50036\varepsilon_{32}\tau_{32} - 26.50036$$

$$C_{32} = (1 - \varepsilon_{32})[1 + (1 - \varepsilon_{32})\tau_{32}]0.11849$$

$$D_{32} = (1 - \varepsilon_{32})[1 + (1 - \varepsilon_{32})\tau_{32}]26.50036$$

地表温度的方程为:

$$T_s = \frac{[C_{32}(B_{31} + D_{31}) - C_{31}(D_{32} + B_{32})]}{(C_{32}A_{31} - C_{31}A_{32})} \quad (5)$$

这些值可以通过模型及以下方程求出来,从而求出地表温度。

### 3.2 亮度温度的估算

亮度温度是指与实际物体具有相同辐射出射度的黑体的温度。

(1) 遥感影像传感器定标处理,将像元值转换为星上辐射亮度值  $L_\lambda$

辐射定标方程为:

$$L_i = (\text{radiance\_scales}_i) \times (\text{radiance\_count}_i - \text{radiance\_offset}_i) \quad (6)$$

式中:  $L_i$  代表  $i$  通道的光谱辐射亮度;  $\text{radiance\_scales}_i$  代表  $i$  通道的比例系数;  $\text{radiance\_count}_i$  代表  $i$  通道的记数值;  $\text{radiance\_offset}_i$  代表  $i$  通道的偏移量。

(2) 利用普朗克方程求得亮度温度

$$\text{普朗克方程为: } B_\lambda(T) = \frac{hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (7)$$

式中:  $B_\lambda(T)$  为黑体辐射度( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{sr} \cdot \text{m})$ );  $h$ 、 $c$ 、 $e$  为常数;  $\lambda$  为波长;  $k$  为波尔兹曼常数,  $k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ;  $c$  为光速,  $c = 2.99793 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

(3) 根据式(4)将地表温度 计算出来。

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[ \frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda(T)} + 1 \right]} \quad (8)$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$  为常数。其中,  $c_1 = hc = 5.95522012 \times 10^{-17} \text{W} \cdot \text{m}^2$ ,  $c_2 = hc/k = 1.43876869 \times 10^2 \text{m} \cdot \text{K}$ 。

经过计算得到的2006年11月12日MODIS数据的波段31和32的亮度温度图如图2所示。

从图2中可以看出,波段31和波段32的亮度

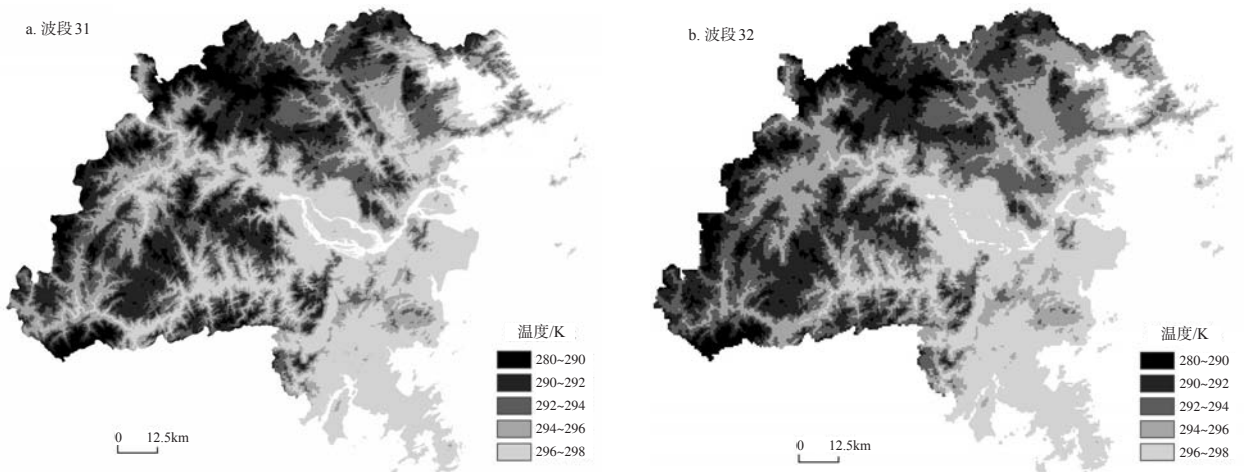


图2 福州市亮度温度

Fig.2 Brightness temperature in Fuzhou



温度基本上都在280~300K之间,波段31的亮度温度总体上比波段32的亮度温度高一些。

3.3 大气透过率的估算

大气透过率是地表温度反演的重要的参数。毛克彪等<sup>[2]</sup>、覃志豪等<sup>[5]</sup>在研究中利用大气透过率和大气水分含量存在着线性关系,因此利用MODIS数据的波段2和波段19来反演大气水分含量后,利用这种线性关系反演出大气透过率。

计算大气水汽含量的公式如下<sup>[9-10]</sup>:

$$\omega = \left[ \frac{\alpha - \ln\left(\frac{\rho_{19}}{\rho_2}\right)}{\beta} \right]^2$$

(9)

式中:  $\omega$  是大气水分含量;  $\alpha$  和  $\beta$  是常量,  $\alpha=0.02$ ,  $\beta=0.6321$ ;  $\rho_{19}$  和  $\rho_2$  分别是MODIS第19和2波段的地面反射率。

由于MODIS数据的第19波段和2波段是近红外波段,可以忽略大气影响,  $\rho_{19}$  和  $\rho_2$  分别由如下方程求得:

$$\rho_{g\lambda} = (\pi L_{g\lambda}) / (E_0(\lambda) \cos \theta_g)$$

(10)

式中:  $L_{g\lambda}$  可由星上或地面定标结果求得;  $E_0(\lambda)$  可由探测器响应函数计算求得,  $\theta_g$  以由日期和时间计算得。

覃志豪等<sup>[5]</sup>利用MODTRAN来模拟中纬度标准大气状况下大气透过率与大气水分含量的线性关系,其线性关系方程如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned} \tau_{31} &= -0.10671\omega + 1.04015, R^2 = 0.994787 \\ \tau_{32} &= -0.12577\omega + 0.99229, R^2 = 0.995585 \end{aligned}$$

(11)

由此可得MODIS数据的波段31和32的大气透过率图分别如图3a和图3b所示。

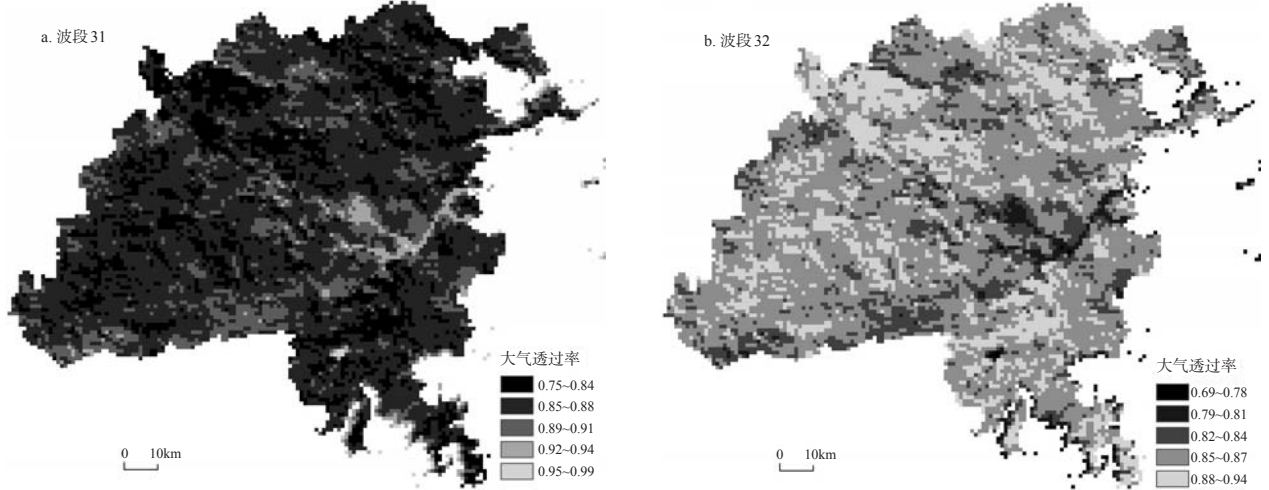


图3 大气透过率图

Fig.3 Atmospheric transmittance map. (a) band 31; (b) band 32

3.4 地表比辐射率的估算

地表比辐射率是地表温度反演的一个重要的参数。地表比辐射率是指物体的辐射出射度与同温度、同波长下黑体的辐射出射度的比值。

由于MODIS数据的分辨率为1 km,所以地表可分辨的地物可分为水面、植被和裸土。根据混合像元的热辐射构成,MODIS图像的地表比辐射率可以用式(8)估计<sup>[1,6,11]</sup>:

$$\varepsilon_i = P_v R_v \varepsilon_{iv} + (1 - P_v) R_s \varepsilon_{is} + d\varepsilon$$

(12)

式中:  $\varepsilon_i$  是MODIS图像第  $i$  ( $i=31, 32$ ) 波段的地表比辐射率;  $\varepsilon_{iv}$  和  $\varepsilon_{is}$  分别是植被和裸土在第  $i$  波段的地表比辐射率,分别取  $\varepsilon_{31v}=0.98672$ ,  $\varepsilon_{32v}=0.98990$ ,  $\varepsilon_{31s}=0.96767$ ,  $\varepsilon_{32s}=0.97790$ ;  $P_v$  是像元的植被覆盖率,通过植被指数估计;  $d\varepsilon$  是热辐射相互作用校正,由植被和裸土之间的热辐射相互作用产生;  $R_v$  和  $R_s$  分别是植被和裸土的辐射比率。

值得指出的是,计算出的  $\varepsilon > \varepsilon_{iv}$  时,则取  $\varepsilon_{iv}$ ;  $\varepsilon < \varepsilon_{is}$  时,则取  $\varepsilon_{is}$ 。对于水体像元,直接取水体的地表比辐射率作为该像元的地表比辐射率:  $\varepsilon_{31}=0.99683$ ,  $\varepsilon_{32}=0.992324$ 。

$P_v$  是像元的植被覆盖率,可通过植被指数进行估计;

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}$$

(13)

式中:  $NDVI_s$  和  $NDVI_v$  分别为完全裸土像元和茂密植被覆盖像元的  $NDVI$  值,通常取  $NDVI_s=0.15$ ,  $NDVI_v=0.9$ 。当  $NDVI > 0.9$  时,把像元看作是完全植被覆盖,  $P_v=1$ ; 当  $NDVI < 0.15$  时,把像元看作是完全裸土覆盖,  $P_v=0$ 。其中,  $NDVI$  在MODIS数据中可以用公式表示为:

$$NDVI = \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1}$$

(14)

植被覆盖度中,热辐射相互作用校正  $d\epsilon$  的计算,分为以下几种方式:

- 当  $P_v=0$  或者  $P_v=1$  时,  $d\epsilon$  最小,为0;
- 当  $0<P_v<0.5$  时,  $d\epsilon=0.003796 P_v$ ;
- 当  $0.5<P_v<1$  时,  $d\epsilon=0.003796(1-P_v)$ ;
- 当  $P_v=0.5$  时,  $d\epsilon$  最大,为0.001898。

$R_v$  和  $R_s$  分别是植被和裸土的辐射比率。

关于植被和裸土的辐射比率,覃志豪<sup>[7,9]</sup>研究提出了这两种比辐射率与植被覆盖度相关关系如下:

$$\begin{aligned} R_v &= 0.92762 + 0.07033P_v \\ R_s &= 0.99782 + 0.08362P_v \end{aligned} \tag{15}$$

对于水体的比辐射率,用NDVI阈值的界定来直接提取出水体,给水体相应波段的比辐射率值。运用公式8,和以上未知数的求解,可以得到波段31和波段32的地表比辐射率如图4所示。

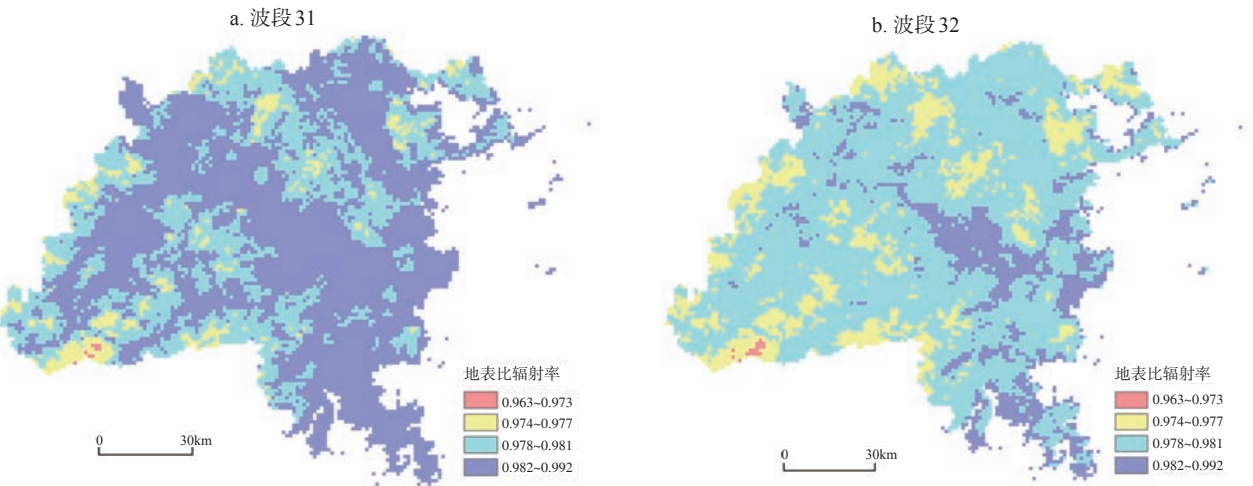


图4 福州市地表比辐射率  
Fig.4 Surface emissivity in Fuzhou

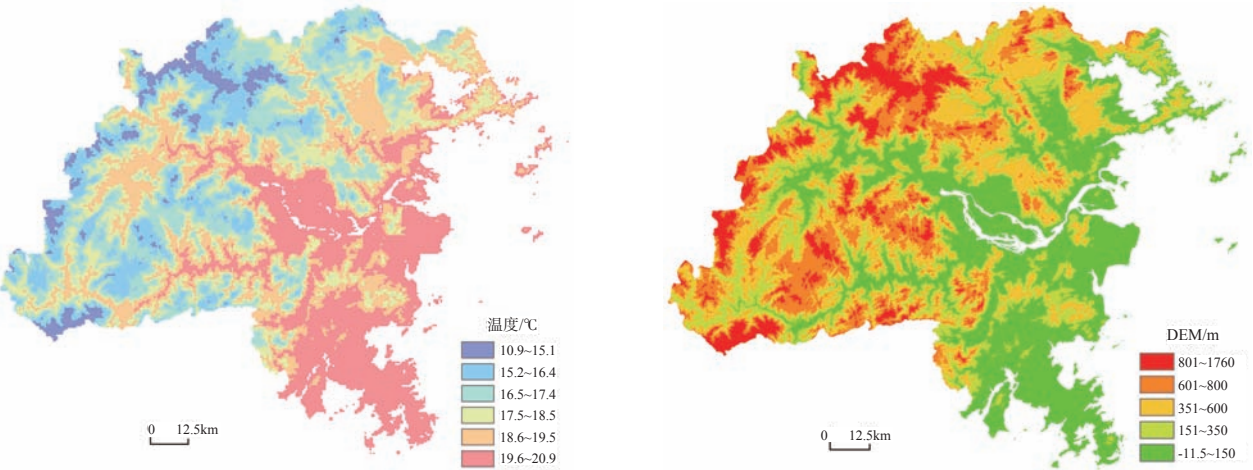


图5 福州市地表温度图  
Fig.5 Surface temperature in Fuzhou

3.5 地表温度的反演及精度分析

在亮度温度、大气透过率、地表比辐射率计算确定之后,可以由以上公式反演出福州地表温度图如图5所示。由图5中可以看出,2006年11月12日福州市的温度为10~27℃之间,基本上与实际相符,温度最高的部分位于城市与河流附近,林地上由于海拔较高,温度较低。

精度检验:用已有的地面站气温观测数据来对比反演的精度如表1所示。

表1 模型估测温度与实际温度的比较

Tab.1 Comparison between model estimated temperature and the actual temperature

气象站	实测的地表温度/℃	反演的地表温度/℃	误差/℃
罗源	18.2	18.27	0.07
福州	19.6	22.21	2.61
连江	19.2	21.76	2.56
长乐	19.3	20.124	0.824
闽侯	18.5	16.938	-1.562

图6 福州市地势图  
Fig.6 Terrain map of Fuzhou

4 基于地形数据的气温空间插值模型

4.1 地形数据

利用等高线数据构建 30 m 网格的福州市 DEM 数据(图 6)。

由图 6 可以看出福州市的地形表现为西高东低,西部地势较高,大多数为林地,森林多分布在山区,森林覆盖率 57.8%,东部地势较低,为沿海地区。福州市区所在地属于典型的河口盆地,盆地四周被群山峻岭所环抱。福州市小盆地很明显,很多地区都被群山环抱。

4.2 气象数据空间插值成栅格数据

空间插值是通过已知的空间数据估算未知空间数据值的数学方法。插值的前提是空间地物具有一定的空间相关性。本文基于气温的垂直变化规律栅格化插值生成福州市的气温分布栅格图。气温数据来自福州市及周边 32 个气象站点。

气温数据在形成福州栅格格式的经度、纬度数据层的基础上,运用空间插值逐个栅格地计算出福州市的气温。本研究利用克吕金插值方法对福州市 2006 年 11 月 12 日的气温数据进行空间插值,在此基础上,考虑到高度对气温的影响,将气温垂直变化规律栅格化生成福州市的气温分布栅格图。

在对流层范围内,气温随海拔的升高而降低,海拔每升高 100 m,气温平均降低 0.65℃。气温垂直递减率随地点、季节和昼夜的不同而变化,夏季和白天气温的垂直递减率高,冬季和夜晚的垂直递减率低<sup>[1]</sup>。

首先将已有的气象站点的气温根据海拔高程

和气温垂直递减率换算到虚拟海平面上,即:

$$T_2 = T_1 + 0.65h/100 \tag{16}$$

式中:  $T_1$  为某点的实测气温(℃);  $T_2$  某点在虚拟海平面上的气温(℃);  $h$  为气象站的海拔高度(m)。

然后对虚拟海平面上的气温值按要求的格网大小进行内插和栅格化,因为在同一水准面上气温的变化被认为是连续的。在此用克吕金插值法对上面求得的虚拟海平面上的气温插值生成福州市的海平面处的气温栅格图(图 7)。

最后,用虚拟海平面上的栅格气温值按气温垂直递减率减去因海拔升高而降低的气温差而得到估算的实际地面的气温值(图 8)。

5 基于地形和气象数据气温统计模型

5.1 模型建立

气温与经纬度、海拔高度之间具有较好的线性相关关系,虽然这种关系的存在有它的内在机理,但就模型本身而言,是完全用统计的方法构建的。

由图 9 和图 10 可以看出,温度与纬度以及海拔高度具有相关性,可以进行回归分析。在用统计分析软件 SPSS 做逐步回归分析时,模型中的自变量自动选为纬度和海拔高度。

由表 2 可以看出,在显著水平为 0.001 下,模型

表 2 气温模型概要  
Tab.2 Model descriptions

模型	R	R <sup>2</sup>	调整的 R <sup>2</sup>	标准误
1	0.728 <sup>a</sup>	0.531	0.514	0.6479
2	0.907 <sup>b</sup>	0.882	0.809	0.4062

注:a 表示经度;b 表示纬度与海拔高度。

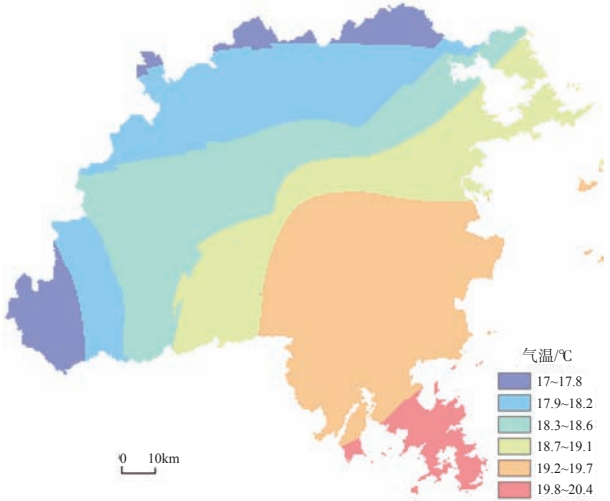


图 7 海平面处的气温栅格图  
Fig.7 Sea level temperature grid map

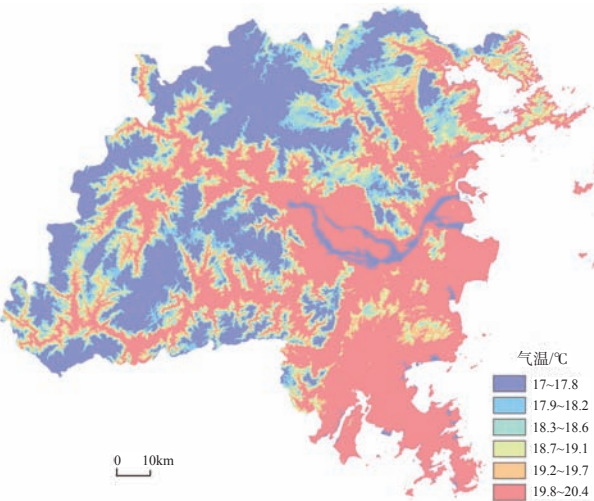


图 8 福州市气温垂直变化栅格图  
Fig.8 The grid map of temperature vertical changes in Fuzhou



一为温度与海拔高度的拟合程度为 0.728,标准估测误差为 0.6479;模型二为温度与纬度以及海拔高度的拟合程度为 0.907,标准估测误差为 0.4062。因此,模型二的拟合程度更好,可以建立出温度与纬度以及海拔高度的回归模型。因此,该模型可表示为:

$$T = -0.830 X_1 - 0.005 X_2 + 42.378 \quad (17)$$

式中: $T$ 为模型估测温度; $X_1$ 为纬度; $X_2$ 为海拔高度。由于在逐步回归过程中,经度相对于纬度、海拔高度等变量与温度的相关性较小,没有出现在模型中,模型主要是由纬度和海拔高度来估测温度。

5.2 模型精度验证

应用气象站点数据进行气候指标插值结果的精度检验,通常采用“实际验证”和“交叉验证”两种方法<sup>[15]</sup>:实际验证过程是将部分气象站点作为“训练数据集”,用于插值计算,另一部分站点作为“验证数据集”,不参加插值计算,然后利用“训练数据集”站点进行插值,插值结果与“验证数据集”的站点的实际观测值对比。交叉验证的过程是,首先假定每一个观测站点要素未知,采用周围站点的观测值来估算,然后计算所有站点实际观测值与估算值的误差,以此来评估插值方法的优劣。

用交叉验证法来检测模型的精度,其实测值与模型估测值之间的散点图如图 11 所示,其相关系数为 0.787,呈现出显著正相关,所以模型比较精确。

经纬度和海拔高度等宏观地理因子是影响气温的主要因素<sup>[16]</sup>。此外,局部微观因子也影响气温,如地形、下垫面等<sup>[17-18]</sup>。因此,回归方程的计算结果不可能与实测值完全一致,这种不一致在回归分析中表现为残差,残差可以认为是除经纬度和海拔高度以外的其他因素对气温影响的总和<sup>[19]</sup>。其中,可以用实测值与模型估测值之间的残差来插值出整个研究区域的残差栅格数据。将模型估测值与残差值相加,可以得到研究区域的更精确的温度(图 12)。

本研究采用交叉验证法,该方法通常用平均绝对误差和平均误差平方和的平方根来检验模型精度。两者的值越小,表明模型模拟的精度越高。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(T_{2i} - T_{1i}) \quad (18)$$

$$RMSIE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{2i} - T_{1i})^2} \quad (19)$$

模型运行的平均绝对误差为 0.33,平均误差平方

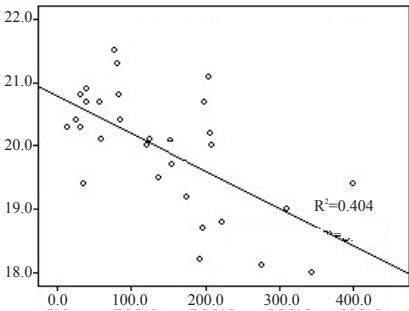


图9 温度与海拔高度关系散点图

Fig.9 Scatter the relationship between temperature and altitude

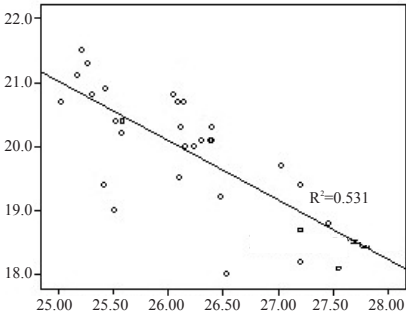


图10 温度与纬度的关系散点图

Fig.10 Scatter plot of the relationship between temperature and latitude

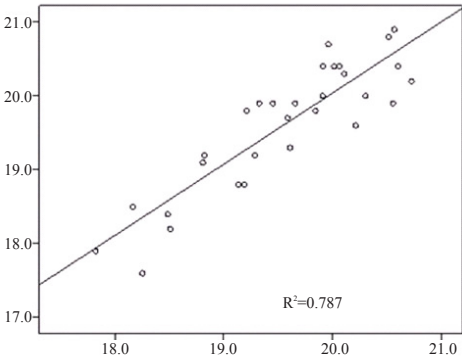


图11 实测值与模型估测值之间的散点图

Fig.11 The scatter plot between the measured values and the values estimated by the model

表3 模型相关系数					
Tab.3 The correlation coefficients of the model					
模型	非标准化系数		标准化系数	t	Sg
	B	标准误	Beta		
1 常数	44.160	4.233		10.434	0.000
纬度	-0.926	0.162	-0.728	-5.725	0.000
2 常数	42.378	2.667		15.891	0.000
纬度	-0.830	0.102	-0.653	-8.105	0.000
海拔高度/m	-0.005	0.001	-0.545	-0.6766	0.000

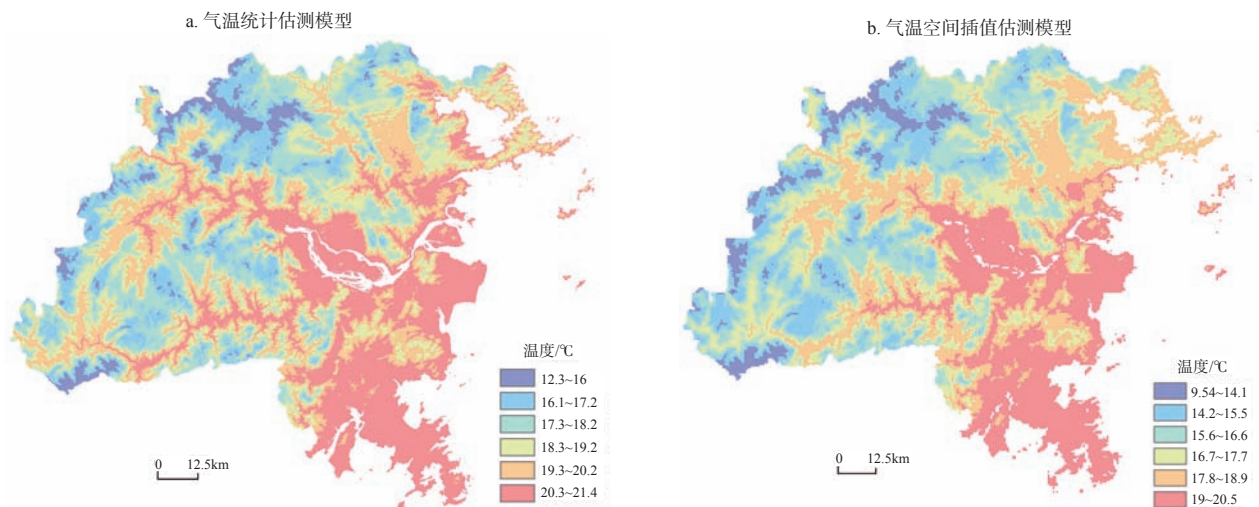


图 12 气温统计估测模型(a)和气温空间插值估测模型(b)的估测温度

Fig.12 The estimated temperature from two models

(a) The statistical temperature estimation model; (b) the temperature estimation model based on spatial interpolation

方和的平方根为 0.149。两者的值都小于 0.5,所以模型精度高一些。

两种方法生成的气温栅格图基本上相同,但是相对于气温空间插值模型而言,气温统计模型精度较高一些,其中不仅考虑了高度对温度的影响,还考虑了纬度对温度的影响而气温垂直递减规律温度估测模型全区采用同样的气温直减率降低了模型的精度。

## 6 结论与讨论

### 6.1 主要结论

(1) 利用遥感影像来反演地表的温度,其反演结果与实际地面站温度相差很小,在地面实测数据有限的情况下,用遥感影像来反演地表温度是一个切实可行办法。

(2) 由于气象站点数量和空间分布会影响气温空间插值的精度。本研究考虑气温垂直递减规律,利用克吕金插值方法来插值地表温度,比直接应用克吕金方法得到的结果更接近地表温度,在一定程度上抵消了气象站数量和空间分布对插值精度的影响。

(3) 结合气象数据与地形数据,在分析气温与地形因子相关关系的基础上,研究气温与纬度及海拔高度的相关关系建立统计关系模型,利用交叉验证法,实测值与模型估测值相关系数为 0.787,模型精度相对较高,相对气温空间插值精确些。

### 6.2 讨论

(1) 由遥感影像反演地表温度的过程中,使用参数的数量和精度限制了地表温度反演精度,因此各参数易获取性和准确性是在今后的研究重点考虑的因素。

(2) 在考虑气温垂直递减规律基础上插值温度时,整个研究区用相同的气温垂直递减率降低了模型插值精度。在今后的研究中,可以根据不同区域天气情况用不同气温垂直递减率先插值出研究区的气温垂直递减率图,从而提高模型插值精度。

(3) 本文根据地形对气温的影响,构建了部分地形因子与气温的相关关系模型,精度相对较高,在今后研究中,可尝试将地形因子中的坡度、坡向及坡位等因子引入模型中,进一步提高模型的精度。

(4) 可以进一步研究将遥感反演与插值模型相结合,提高反演温度模型精度的方法。

### 参考文献

- [1] 毛克彪, 覃志豪, 施建成, 等. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(8): 703-707.
- [2] 蔡迪花, 郭锐, 李崇伟. 基于 DEM 的气温插值方法研究. 干旱气象, 2009, 27(1): 10-17, 28.
- [3] 谢云峰, 张树文. 基于数字高程模型的复杂地形下的黑龙江平均气温空间插值. 中国农业气象, 2007, 28(2): 205-211.
- [4] 游松财, 李军. 海拔误差影响气温空间插值误差的研究



- 究. 自然资源学报, 2005, 20(1): 140-144.
- [5] 覃志豪, Li W, Zhang W, 等. 单窗算法的基本大气参数估计方法. 国土资源遥感, 2003, 56(2): 37-43.
- [6] 覃志豪, Zhang M, Karnieli A, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- [7] 毛克彪, 唐华俊, 周清波. 用辐射传输方程从 MODIS 数据中反演地表温度的方法. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(4): 12-17.
- [8] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001.
- [9] Kaufman Y J, Gao B C. Remote Sensing of Water Vapor in the Near IR from EOS/MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 871-884.
- [10] 丁莉东, 覃志豪, 毛克彪. 基于 MODIS 影像数据的劈窗算法研究及其参数确定. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 284-289.
- [11] 高懋芳, 覃志豪, 徐斌. 用 MODIS 数据反演地表温度的基本参数估计方法. 干旱区研究, 2007, 24(1): 113-119.
- [12] 张兆明, 何国金, 肖荣波, 等. 基于 MODIS 和 TM 数据的陆面温度反演. 中国图象图形学报, 2007, 12(2): 366-370.
- [13] 历华, 曾永年. 利用多源遥感数据反演城市地表温度. 遥感学报, 2007, 11(6): 891-898.
- [14] 廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较. 资源科学, 2003, 25(6): 83-88.
- [15] 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. 地理学报, 2004, 59(3): 366-374.
- [16] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地地区气象要素的空间插值. 地理学报, 2002, 57(1): 47-56.
- [17] 李军, 游松财, 黄敬峰, 等. 中国 1961-2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布. 生态环境, 2006, 15(1): 109-114.
- [18] 李军, 黄敬峰, 王秀珍. 山区月平均气温的高空间分辨率分布模型与制图. 农业工程学报, 2004, 20(3): 19-23.
- [19] 赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究. 地理科学, 2004, 24(2): 205-211.

## Comparison of the Temperature Spatial Interpolation Methods Based on MODIS Data and Meteorological Observation Data

ZHOU Tingting<sup>1,2</sup>, CHEN Wenhui<sup>1</sup>

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Geomatics Center of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** This study makes use of MODIS image data and the daily average temperature data from the 32 meteorological stations to reckon the surface temperature in Fuzhou, and by combining terrain factors extracted from the digital elevation model DEM to explore and study the correlations among the temperature, longitude, latitude, altitude and other factors, and establishes a model to interpolate the surface temperature in Fuzhou. Using meteorological data to interpolate surface temperature is faster, but the calculation is slightly higher than the actual value. Using image data to reckon land surface temperature is affected by the accuracy of parameters. When using correct parameters, the calculation of land surface temperature from the images has higher accuracy than the interpolation by the measured meteorological data. The parameters limit the accuracy of land surface temperature estimation, and the future research should focus on selection of parameters. Based on the topographic effects on temperature, we build a correlation model between topographical factors and temperature, and the accuracy is relatively high. In the future research, we will try to bring other factors such as the terrain, slope, aspect and slope position into the model to improve the accuracy.

**Key words:** MODIS; surface temperature; DEM; spatial interpolation; temperature data; Fuzhou

本文引用格式:

周婷婷, 陈文惠. 基于 MODIS 数据和气象观测数据的气温空间插值方法比较. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1143-1151.