

引用格式: Wang Xiao, Zhu Shanyou, Zhang Guixin. Comparison on Simulation Methods for Spatial Distribution of Near Surface Instantaneous Air Temperature[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 858-865. [王笑, 祝善友, 张桂欣. 近地表瞬时气温空间分布模拟方法比较研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 858-865.]

近地表瞬时气温空间分布模拟方法比较研究

王 笑, 祝善友, 张桂欣

(南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 近地表瞬时气温是描述地表与大气能量交换与水分循环的关键变量, 是许多模型的输入参数之一。在常规气象观测站点稀少或没有常规气象观测站点的情况下, 如何对近地表气温进行空间分布模拟, 在理论方法与业务实践上都具有重要研究意义。以江苏省为研究区, 比较了普通克里金插值、多元线性回归分析和温度—植被指数方法用于瞬时气温空间分布模拟的精度, 分析了这些方法的误差分布特征和变化规律, 并在此基础上探讨了这 3 类气温空间分布模拟方法的适用性。结果表明: 多元线性回归分析方法的误差最小, 平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 分别为 0.42 和 0.51℃, 其结果与普通克里金插值方法接近, 温度—植被指数方法反演的精度相对较低, MAE 和 RMSE 分别为 2.49 和 3.32℃; 这 3 类方法在不同的数据来源和下垫面状况下具有不同的适用性。

关 键 词: 近地表瞬时气温; 普通克里金; 多元线性回归; 温度—植被指数方法

中图分类号: P 468; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)05-0858-08

1 引 言

近地表气温是描述陆地环境条件的重要参数, 也是气象观测资料中最基本的观测项目之一^[1]。由于近地球表面气温控制着大部分陆地表面过程 (如光合作用、呼吸作用及陆地表面蒸散过程等), 因此气温是各种植物生理、水文、气象和环境等模式或模型中的一个非常重要的近地表气象参数输入因子。由此可见, 准确地获取气温高分辨率的时空分布对于更好地理解陆地表面过程和研究全球变化等具有重要意义^[1-3]。

目前, 国内外学者利用 GIS 空间分析技术, 在考虑空间关联性的基础上, 采用统计分析方法对气温分布的空间模式进行了探测和分析。蔡福等^[4]采用空间化气候值, 利用年际距平空间插值法生成中国 1951~2001 年空间分辨率为 10 km 的年、季平均气温空间化数据。金志凤等^[5]选取浙江省 72 个

气象站点 1971~2008 年的年平均气温作为数据源, 比较了逆距离权重法、普通克里金、样条法和多元回归法等 4 种空间插值方法, 结果表明多元回归法的误差均小于其他 3 种插值方法, 插值效果最好, 验证站点的年平均气温模拟最接近实际值。张丹等^[6]以浙江省及周边 74 个气象站 1961~2000 年常规气温观测资料为基础, 利用月平均气温物理经验统计模型, 完成了浙江省空间分辨率 100 m 的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温空间分布的制图, 分析了拟合气温的局地分布规律, 并从多个角度对拟合结果进行了验证。

同时, 许多研究基于遥感数据与产品建立了气温遥感反演模型。Cresswell 等^[2]在气温—地表温度经验模型中引入太阳天顶角来估算气温, 分别建立了 4 个时刻的反演模型, 结果表明超过 70% 的检验样本误差在 3℃ 以内; Zhao 等^[7]建立了月均气温与高度、经纬度和地形因子之间的多元线性回归模型, 并将其

收稿日期: 2012-09-06; 修订日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目“基于多源遥感数据的晴空下近地表气温时空分布反演研究”(41001289), 江苏高校优势学科建设工程资助项目“环境科学与工程”。

作者简介: 王 笑(1987—), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事 3S 技术在气象方面的应用研究。E-mail: tiantian4776@126.com。

通讯作者: 祝善友(1977—), 男, 山东日照人, 副教授, 主要从事热红外遥感基础理论与应用方面的研究。E-mail: zsyzygx@163.com。

与3种地统计插值方法进行比较,结果表明回归模型具有更高的精度;Stisen等^[8]采用了静止气象卫星MSG SEVIRI图像数据,利用温度—植被指数(TVX)方法结合正弦函数插值来估算西非地区的气温日分布,均方根误差为2.55~2.99℃;徐永明等^[9]以长江三角洲为研究区,根据MODIS地表温度和NDVI数据运用温度—植被指数方法反演了2005年全年的气温,气温反演误差为2.39~2.44℃。

基于以上分析,前人的研究方法在时间尺度上主要是进行日、月、年的气温均值或最值的获取^[10],而有关瞬时气温空间分布模拟的研究则很少。近地表瞬时气温是空气在1.5~2 m高度附近的某一时刻温度,是许多陆面过程模型中非常重要的输入参数之一,如模式中感热通量和潜热通量的计算,这是均值气温和最值气温所不能替代的。深入分析前人的研究结果可以发现,没有一种方法能够适用于各种情况,研究中必须根据数据源的不同、研究区的差异来选择最合适的气温空间分布模拟方法^[11]。为此,本文以江苏省作为研究区,利用不同的数据来源,选择3种不同的空间分布模拟方法获取瞬时气温的空间分布,比较其结果精度,并深入分析这3种方法的适用性。其中普通克里金插值方法直接利用气象站点的瞬时气温数据进行空间预测分析,多元线性回归分析方法是在考虑影响气温的相关因子基础上进行的统计建模,而温度—植被指数方法是基于遥感的无实测气温数据的反演,这3种气温空间分布模拟方法的理论基础在本质上是不同的。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

本文研究区江苏省,地处美丽富饶的长江三角洲,包含13个省辖市,下辖105个县(市、区),地理坐标范围为116°18′~121°57′E、30°45′~35°20′N,面积约为10.26万km²。江苏省跨江滨海,地形以平原为主,地势低平,河湖众多,平原、水面所占比例之大,在全国居首位。江苏省是全国地势最低的一个省区,绝大部分地区在海拔50 m以下,低山丘陵集中在北部和西南部,占全省总面积的14.3%。淮河以北是温带季风性气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。淮河以南是亚热带季风性气候,夏季高温多雨,冬季低温少雨。

2.2 研究数据

本文采用的数据包括3部分,即江苏省数字高程模型数据(DEM)、2010年5月1日10点30分的气象

站点数据以及同一时刻的卫星遥感数据。其中,DEM数据来自于NASA生产的全球DEM数据产品,空间分辨率为30 m。气象站点数据由江苏省68个城市基本气象站提供,站点空间分布如图1所示。遥感数据包括MOD11A1地表温度产品数据和MOD09GA地表反射率产品数据,由美国地质调查局USGS的LPDAAC(Land Process Distributed Active Archive Center)提供,其中MOD11A1是以分片方式组织的每日栅格数据,投影为正弦曲线投影,空间分辨率为1 km;MOD09GA提供了1~7波段每日栅格化的二级数据产品,投影为正弦曲线投影,包括500 m的反射率和1 km的传感器位置、太阳位置和地理位置等辅助数据。

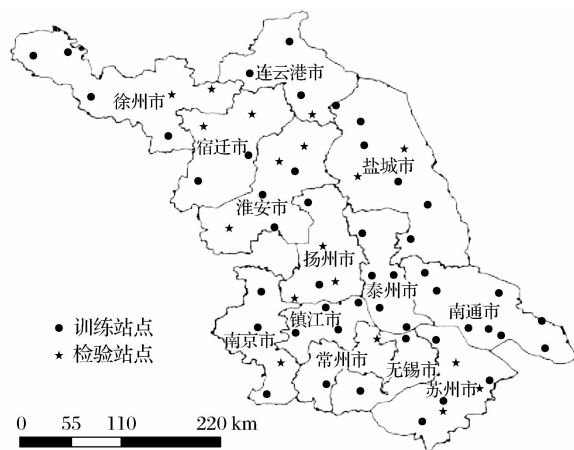


图1 研究区气温观测站点分布图

Fig. 1 The distribution of the meteorological observation stations in the study area

2.3 数据预处理

利用ArcGIS和ENVI等软件,对所有研究数据进行投影转换、镶嵌,并利用江苏省辖市界矢量图进行空间裁切。经过预处理之后,数据统一转换为Albers正割圆锥等积投影,为Krossovsky椭球体,空间分辨率统一采样为1 km。从地表反射率数据产品中提取出第1、2波段地表反射率并计算出归一化植被指数NDVI,再利用数字高程模型(DEM)提取海拔高度、坡度等地形要素。

3 研究方法

3.1 普通克里金插值方法

地统计学是利用原始数据和半方差函数的结构性,对未来采样点的区域化变量进行无偏估值的一种方法,其理论基础是区域变量理论。区域化变量是区域内不同位置取不同值的随机变量,它具有两

个最显著、也是最重要的特征,即随机性和结构性。半方差函数是为了描述区域化变量结构性和随机性并存这一空间特征而提出的,是地统计学解释变量空间变异结构的基础,它的精确估值是成功的空间内插和栅格地图制作的关键^[12]。

目前众多的地统计插值方法中,克里金插值方法是理论体系最为完善的一种插值方法。克里金插值是一种基于统计学的插值方法,以空间自相关为基础,利用原始数据和变异函数的结构性,对区域化变量的未知样本点进行无偏估值的插值,包括普通克里金法、泛克里金法、指示克里金法、析取克里金法和协同克里金法等。由于普通克里金插值方法是假定采样点不存在潜在的全局趋势,只用局部的因素就可以很好地估算未知值,是最普遍和应用最广泛的克里金插值方法。

克里金插值分析利用半方差分析模块的球状、指数、线性和高斯等模型对气温值进行拟合对比,通过半方差函数模型拟合图及综合考虑决定系数 R^2 最大、残差最小以选出最优半方差函数模型^[13]。因此本文采用普通克里金内插方法时,首先对气温数据进行探索性的空间分析,确定最优半方差函数拟合模型,最后进行空间插值分析。

3.2 多元线性回归分析方法

影响气温空间分布的因素主要有经度、纬度、坡度、海拔高度、地表温度以及下垫面类型等。在气象要素的空间化过程中,要想得到较高的精度,必须进行气象要素和影响因子之间的相互关系研究。本文利用 MODIS 数据产品,结合研究区 DEM 数据、常规气象站同步监测数据,应用数理统计方法,建立基于各个影响因子的气温多元线性回归模型,即 $T_a = f(x_1, x_2, x_3, \cdots)$,其中 x 为影响因子,进而分析不同因子对气温的影响程度。

3.3 温度—植被指数(TVX)方法

温度—植被指数方法的原理是假定浓密植被的冠层表面温度近似等于近地表气温,通过某个像元邻域窗口的地表温度—植被指数关系式(1)计算出浓密植被冠层的温度,作为该邻域窗口的气温^[14]。

$$T_a = a \cdot \text{NDVI}_{\text{饱和值}} + b \tag{1}$$

其中: T_a 为近地表气温,单位 $^{\circ}\text{C}$, a 、 b 为利用邻域窗口中的 NDVI 和地表温度 T_s 根据最小二乘法拟合得到的回归直线的斜率、截距, $\text{NDVI}_{\text{饱和值}}$ 为浓密植被冠层的 NDVI 值。

由式(1)可知,除地表温度 T_s 之外,还有两个重要参数会影响气温的反演精度,即 NDVI 饱和值与空

间窗口尺寸大小^[15],不同学者采用了不同的取值。对于植被指数饱和值的确定,Boegh 等^[16]在 1999 年利用 Landsat TM 和 SPOT 数据计算时,取值为 0.77,而在同样的研究区中,Goward 等^[17]利用 AVHRR 数据,取值为 0.9。Prihodko 和 Goward^[14]在 1997 年选取研究区内的 10 种主要植被物种,结合可见光反射率和热辐射信息,通过 TVX 方法,取平均值 0.86 作为该区的植被指数饱和值。徐永明等^[9]在长江三角洲地区近地表气温遥感反演研究中,也依据以往经验将 NDVI 饱和值赋值为 0.86。参考以往研究,本文将 NDVI 饱和值取为 0.86。

TVX 方法估算气温值的另一个重要参数是窗口尺寸大小的确定,它直接影响空间窗口内有效像元的多少,进而影响 TVX 的关系和方程拟合的稳定性。若空间邻域窗口太小、样本数不足则会造成 NDVI 值域过窄,影响 TVX 方程的稳定性,而空间邻域窗口太大时,多种地表类型的混合又会加大 TVX 散点图的离散程度,影响反演结果的精度。不同研究中采用的窗口大小不同,针对空间分辨率 3 km 的 SEVIRI 数据,较常采用的是 7×7 像元,如 Stisen 等^[8]针对西非地区的 MSG-SEVIRI 传感器数据, Prihodko 和 Goward^[14]针对斯洛文尼亚地区的静止气象卫星 MSG 搭载的 SEVIRI 传感器数据。针对 1 km 分辨率的 AVHRR 数据, Prihodko 等采用了 13×13 像元窗口^[14]。本文针对 1 km 分辨率的 MODIS 数据,在确定 NDVI 饱和值的基础上,参考以往研究结果,采用 5 种窗口,即 7×7 像元、 9×9 像元、 11×11 像元、 13×13 像元和 15×15 像元,验证比较不同邻域窗口对气温反演精度的影响。

3.4 精度评价方法

为了能够对上述 3 种方法的空间化效果进行比较,论文研究在建模前随机预留 21 个站点数据用于检验,通过计算气象站点的实测气温数据与估算结果之间的差异来评估各种方法的优劣。采用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为评价预测效果的检验指标,其中 MAE 反映了估计值的实测误差范围, RMSE 可以反映利用样本数据的估值灵敏度和极值效应, MAE、RMSE 的值越小,表明模型模拟的精度越高。

MAE 和 RMSE 表达式为:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{ABS}(T_{oi} - T_{ei}) \tag{2}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{oi} - T_{ei})^2} \tag{3}$$

其中: T_{oi} 为第 i 个站点的气温观测值, T_{ei} 为第 i 个站点的气温预测值; n 为参与检验的站点数。

4 结果与讨论

4.1 普通克里金插值方法

本文将气象站点实测数据随机分成两部分,利用 47 个站点进行普通克里金插值,获取研究区气温空间分布,剩余的其他 21 个站点用于验证。其中,根据决定系数最大、残差最小的原则,本文普通克里金插值方法选取的理论模型为球状模型(spherical model),球状模型的一般表达式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3}\right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\gamma(h)$ 为变异函数, h 为分隔两样点的矢量,称为步长, C_0 为块金方差, $C_0 + C$ 为基台值, C 为结构性方差, a 为变程。

块金方差(C_0) 表示主要由实验误差和小于取样尺度引起的变异;结构性方差(C) 表示由于土壤母质、地形、气候等非人为的区域因素(空间自相关部分) 引起的变异;半方差达到稳态的最小距离称为变程 a ,用来判断空间自相关的最大范围;稳定状态时的半方差值称为基台值($C_0 + C$),表征系统内总的变异;块金系数 $C_0/(C_0 + C)$ 表示随机因素引起的空间异质性占系统总变异的比例^[12]。

经检验,本文的气象站点气温数据符合正态分布,显著水平 $\alpha > 0.05$ 。传统统计分析得出变异系数为 4.1%,根据变异系数的划分,此时研究区的近地表气温属于弱变异性。这种分析只在一定程度上反映气温的总体状况,无法精确定量地刻画整个研究区近地表瞬时气温的随机性和结构性、相关性和独立性。采用地统计学方法对站点气温数据进行空间变异性的分析之后,得出变异函数的理论模型为球状模型,块金系数即块金方差和基台值之比为 25.1%,近地表瞬时气温在一定范围内存在中等的空间相关性,表明这个时间近地表气温的空间变异主要受下垫面类型、气候等结构性因素的影响。

4.2 多元回归分析方法

利用 SPSS 数理统计软件对 47 个气象站点数据建立的回归模型如下:

$$T_a = 107.164 - 0.611X_1 - 0.462X_2 + 0.004X_3 - 0.018X_4 + 0.756X_5 + 0.108X_6 \quad (5)$$

其中: T_a 为气温,单位为 $^{\circ}\text{C}$, X_1 为经度,单位为 $^{\circ}$, X_2 为纬度,单位为 $^{\circ}$, X_3 为海拔高度,单位为 m , X_4 为坡度,单位为 $^{\circ}$, X_5 为 NDVI 值, X_6 为地表温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

经检验,方程(5)通过了置信度 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,复相关系数为 0.858。通过回归模型发现,气温与经度、纬度以及归一化植被指数有着显著的相关关系。其中,气温分布与经纬度呈负相关,且回归系数较大,分别为-0.611 和-0.462;植被分布在很大程度上影响着气温的高低,NDVI 与气温之间的相关性较大,回归系数为 0.756;单因子相关分析表明,地表温度和近地表气温之间的相关性为 0.673,属于中等正相关关系,而模型中地表温度的回归系数仅为 0.108,产生这种现象的原因是模型中归一化植被指数与地表温度之间存在着比较强的负相关;由于江苏省地势平坦,海拔高度和坡度虽然对气温有影响,但相关性很弱,回归系数很小。

4.3 温度-植被指数方法

利用 5 种窗口的 TVX 方法,分别计算得出气温空间分布结果,通过 68 个站点的实测气温检验不同窗口的反演精度,结果见表 1。

表 1 5 种窗口的精度对比 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Table 1 The accuracy comparisons of air temperature estimated by using different windows size (Unit: $^{\circ}\text{C}$)

空间窗口尺寸	MAE	RMSE
7×7	2.47	3.23
9×9	2.50	3.44
11×11	2.62	3.71
13×13	2.35	3.20
15×15	2.42	3.58

由表 1 可以看出,气温反演误差具有随窗口尺寸先增大然后降低再升高的规律,其中 13×13 窗口的误差最小,MAE 和 RMSE 分别为 2.35 $^{\circ}\text{C}$ 和 3.20 $^{\circ}\text{C}$,而 11×11 窗口的误差值最大,MAE 和 RMSE 分别为 2.62 $^{\circ}\text{C}$ 和 3.71 $^{\circ}\text{C}$ 。两种窗口的 MAE 和 RMSE 分别相差 0.27 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.51 $^{\circ}\text{C}$ 。由此可以得出在植被饱和度确定的情况下,不同的窗口大小会影响气温反演精度。

由于 TVX 反演精度在一定程度上受到植被覆盖度的影响,而 TVX 空间窗口内的 NDVI 均值可以反映出植被信息的强弱,因此本文分别将 5 种窗口的气温反演绝对误差与各个空间窗口内有效像元(非云、水体像元)NDVI 均值联系起来,计算以各站点为中心的邻域窗口内 NDVI 均值,并划分为 10 个

值域区间,统计各个值域区间的气温反演绝对误差,并绘制误差随 NDVI 均值的变化曲线(图 2)。

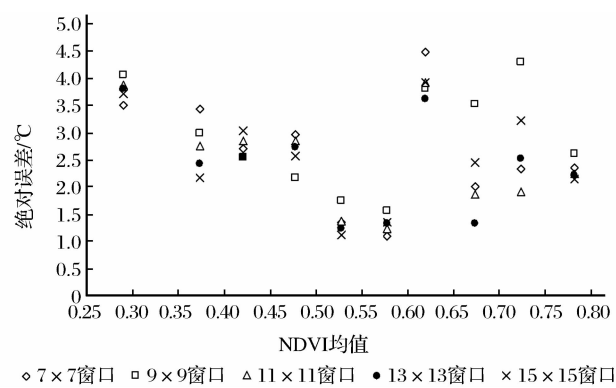


图 2 气温反演误差与空间窗口内 NDVI 均值的关系
Fig. 2 The relationship between retrieval errors and NDVI mean values under different window sizes

由图 2 可以看出,气温反演误差在总体上呈现出随 NDVI 均值升高而逐渐下降,然后又有所回升的趋势,NDVI 均值在 0.55~0.6 之间时达到最低,而在 NDVI 均值大于 0.6 的时候迅速反弹。气温绝对误差随 NDVI 均值的升高而降低是因为当地表植被覆盖较多时,地表温度与植被指数的负相关关系比较显著。而当 NDVI 均值过高时,如扬中、通州和张家港等站点,空间窗口内 NDVI 值高达 0.65 左右,造成 NDVI 值域过窄,TVX 方程拟合不稳定。同时图 2 表明,在 NDVI 均值的不同区间里,不同大小窗口的精度是有变化的,如在 NDVI 均值处于 0.3 左右时,7×7 窗口的 TVX 方法反演的误差相对较小,而 NDVI 均值处于 0.6~0.7 之间时,13×13 窗口的 TVX 方法的精度较高,这进一步说明了不同的植被覆盖程度下,窗口的大小会影响气温反演的精度。

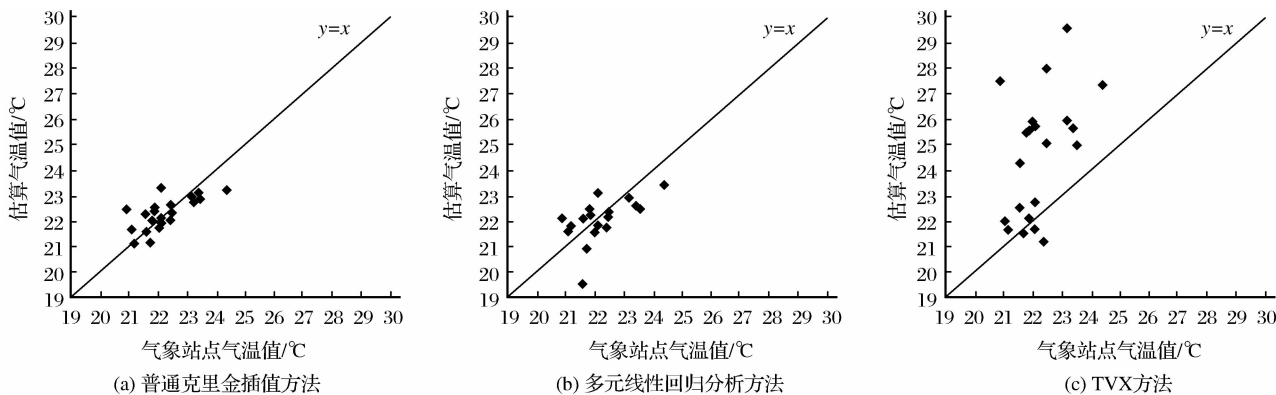


图 3 3 种方法的估算值与观测值的散点图

Fig. 3 Scatter plot of measured air temperature versus derived air temperature by three methods

4.4 不同气温空间分布模拟方法的结果对比

利用 21 个验证站点的实测气温,比较普通克里金插值方法、多元线性回归分析方法和温度—植被指数方法用于气温空间分布模拟的精度,结果见表 2。

表 2 3 种方法的精度对比(单位:℃)

Table 2 The accuracy comparisons for three methods (Unit:℃)		
空间分布模拟方法	MAE	RMSE
普通克里金插值方法	0.47	0.62
多元线性回归分析方法	0.42	0.51
温度—植被指数方法(13×13 窗口)	2.49	3.14

由表 2 可以看出,多元线性回归方法的平均绝对误差和均方根误差分别为 0.42℃和 0.51℃,均为 3 种方法中的最小值,但与普通克里金插值方法的误差比较接近,MAE 和 RMSE 分别相差 0.05℃和 0.11℃。多元线性回归方法误差最小的原因主要是该方法综合考虑了影响气温空间分布的相关因子。对于普通克里金插值方法而言,由于研究区域较小,气象站点分布均匀,而且站点高度差异不明显,该方法的精度基本上可以接近多元回归分析方法,而在地形起伏比较大的地区,其精度会发生明显的下降^[18]。温度—植被指数方法只利用了地表温度和植被指数,输入参数较少,而且假定饱和植被冠层温度等于气温,其反演的精度相对较低,MAE 和 RMSE 分别为 2.49℃和 3.32℃。前两类方法都需要利用气象站点的实测数据,对气象站点的数量和分布都有很大的依赖性,而 TVX 方法则可以在没有或只有少量气象站点的地区使用。

为进一步定量比较不同的气温空间分布模拟方法的精度,利用 21 个验证站点,绘制了实测气温与反演气温之间的散点图,结果见图 3。

从总体上看,普通克里金插值方法与多元线性回归分析方法的估算值基本和气象站点观测值一致,大部分检验样本都位于1:1线附近,说明气温空间分布模拟精度较高。图3(b)中反演误差较大的站点(灌南站),其坡度较大,由回归模型可知,坡度和气温呈负相关,因此该站点气温估算值相对较小。根据图3(c),利用TVX遥感方法反演的气温总体上大于测量值,检验样本大多在1:1线以上,反演气温偏高是TVX方法普遍存在的一个问题^[9,14,19]。由于地表热辐射主要和地物本身性质有

关,不同地物覆盖类型其表面温度差异明显^[20-21],因此在TVX反演结果中误差较大的站点,如常熟站、常州站和无锡站,接近城市繁华地带,植被覆盖度低,不透水界面大,地表温度受下垫面复杂性的影响,表现出明显的空间异质性,在一定程度上影响了温度—植被指数关系方程。

这3类不同方法得到的研究区瞬时气温空间分布如图4所示,其中温度—植被指数方法选取的是13×13窗口。

如图4所示,不同模拟方法结果均显示研究区

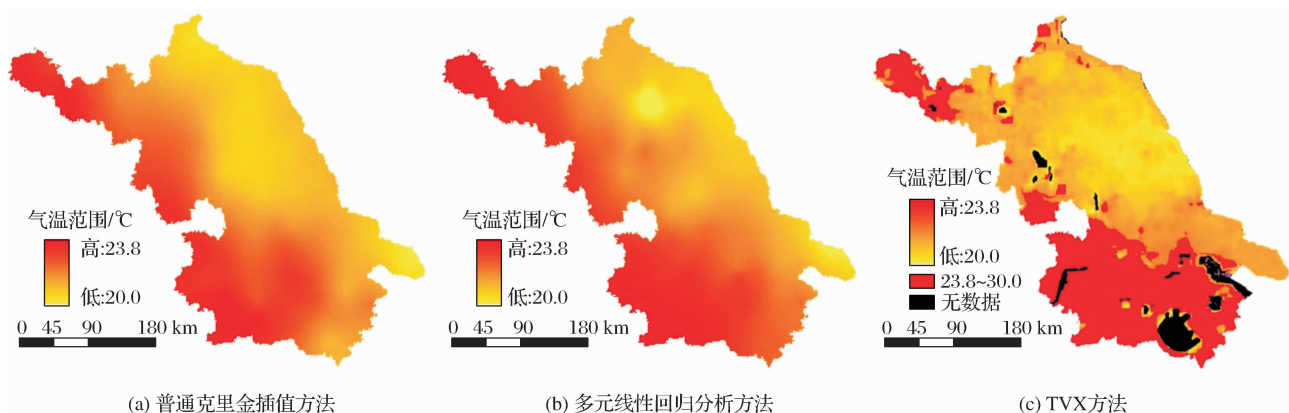


图4 3种不同的气温空间分布模拟方法得出的气温分布图

Fig. 4 The air temperature distributions derived from three different methods

南部的瞬时气温明显高于北部,内陆高于沿海,并且有内陆向沿海递减的趋势。根据图4(a),普通克里金插值方法在研究区东北部模拟的气温值存在很大的误差,而多元回归分析方法(图4(b))不仅能整体反映气温随着经纬度的变化趋势,而且还能准确地反映不同区域气温的详细变化,这是克里金插值方法所不能实现的。由图4(c)可以看出,TVX方法能够整体反映气温的空间分布差异,但在水体、云分布区域,由于不能满足TVX方法的应用条件,无法获得气温反演结果,在图中以黑色表示;而针对城市化程度较高的苏南地区,TVX反演出的气温与实测值相比明显偏高,误差较大,该方法的适用性较差。

5 结 语

本文利用2010年5月1日上午的江苏省气象站点气温数据,结合MODIS地表温度产品和地表反射率产品,通过普通克里金插值方法、多元线性回归分析方法和温度—植被指数方法反演近地表气温,并进行气温空间分布模拟精度的比较研究。结果表明,这3类气温空间分布模拟方法中,多元线性回归分析方法的误差最小,与普通克里金插值方法

的误差接近,而温度—植被指数方法反演的精度相对较低。

根据这3类方法的理论基础和误差比较分析可以看出,若研究区域较小,气象站点分布均匀,而且区域地形以及下垫面影响很小时,可利用简单易行的普通克里金插值方法获取气温空间分布,而在地形起伏比较大的丘陵山区,由于该方法未考虑地表因素的影响,其精度会发生明显的下降。如果研究区地形与下垫面类型复杂时,可合理考虑多元线性回归模型,该方法能够综合考虑影响气温空间分布的相关因子,并进一步分析不同因子的影响程度。将多元线性回归分析方法用于其他研究区、研究时段时,应对建模参数、模型系数等进行修正,以获取更好的气温空间分布模拟精度。若研究区内气象站点较少或没有,或者研究区植被覆盖程度较高、水体与城镇用地面积较少时,则可考虑温度—植被指数方法,该方法只需要输入遥感获取的地表温度和植被指数,即可反演获得近地表气温的空间分布。但针对TVX方法对下垫面的要求和反演近地表气温过高的缺陷,后续应深入开展相关研究,以提高其适用性和精度。

参考文献(References):

- [1] Qi Shuhua, Wang Junbang, Zhang Qingyuan, *et al.* Study on the Estimation of Air Temperature from MODIS Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 570-575. [齐述华, 王军邦, 张庆元, 等. 利用 MODIS 遥感影像获取近地层气温的方法研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 570-575.]
- [2] Cresswell M P, Morse A P, Thomson M C, *et al.* Estimating Surface Air Temperature, from Meteosat Land Surface Temperature, Using an Empirical Solar Zenith Angle Model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(6): 1125-1132.
- [3] Mao K B, Tang H J, Wang X F, *et al.* Near-surface Air Temperature Estimation from ASTER Data based on Neural Network Algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(20): 6021-6028.
- [4] Cai Fu, Zhang Shujie, Yu Guirui, *et al.* Research of Spatial-temporal Evolvement Characters of Mean Air Temperature in China in Recent 50 Years based on Spatialization Technique[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25: 1168-1175. [蔡福, 张淑杰, 于贵瑞, 等. 基于空间化技术对中国近 50 年平均气温时空演变特征的研究[J]. 高原气象, 2006, 25: 1168-1175.]
- [5] Jin Zhifeng, Li Bo, Yuan Dehui. A Research on Simulating Spatial Distribution of Mean Annual Temperature in Zhejiang Province based on GIS[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(6): 836-840. [金志凤, 李波, 袁德辉. 基于 GIS 的浙江省年平均气温空间模拟研究[J]. 气象科学, 2010, 30(6): 836-840.]
- [6] Zhang Dan, Qiu Xinfa, Zeng Yan. Calculation and Mapping of High Resolution Spatial Distribution of Monthly Air Temperature of Zhejiang Province[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(2): 215-224. [张丹, 邱新法, 曾燕. 浙江省高分辨率气温空间分布图的计算与绘制[J]. 大气科学学报, 2011, 34(2): 215-224.]
- [7] Zhao C Y, Nan Z R, Cheng G D. Methods for Modelling of Temporal and Spatial Distribution of Air Temperature at Landscape Scale in the Southern Qilianmountains[J]. Ecological Modelling, 2005, 189: 209-220.
- [8] Stisen S, Sandholt I, Norgaard A. Estimation of Diurnal Air Temperature Using MSG SEVIRI Data in West Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(2): 262-274.
- [9] Xu Yongming, Qin Zhihao, Shen Yan. Estimation of Near Surface Air Temperature from MODIS Data in the Yangtze River Delta[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 63-68. [徐永明, 覃志豪, 沈艳, 等. 基于 MODIS 数据的长江三角洲地区近地表气温遥感反演[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 63-68.]
- [10] Zhu Shanyou, Zhang Guixin. Progress in Near Surface Air Temperature Retrieved by Remote Sensing Technology[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 1001-8166. [祝善友, 张桂欣. 近地表气温遥感反演研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 1001-8166.]
- [11] Barringer James R F, Lilburne L R. Developing Fundamental Data Layers to Support Environmental Modeling in New Zealand[C]//4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling, Banff, Alberta, Canada, 2000: 1-9.
- [12] Yue Wenzhe, Xu Jianhua, Xu Lihua, *et al.* A Study on Spatial Interpolation Methods for Climate Variables based on Geostatistics[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(6): 974-980. [岳文泽, 徐建华, 徐丽华, 等. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 974-980.]
- [13] Xia Min, Zhao Xiaomin, Zhang Jiabao, *et al.* Investigation of Temporal-spatial Variability of Soil Nutrients in Fengqiu County[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007, 29(2): 27-28. [夏敏, 赵小敏, 张佳宝, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分时空变异分析[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(2): 27-28.]
- [14] Prihodko L, Goward S N. Estimation of Air Temperature from Remotely Sensed Surface Observations[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(3): 335-346.
- [15] Riddering J P, Queen L P. Estimating Near-surface Air Temperature with NOAA AVHRR[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2006, 32(1): 33-43.
- [16] Boegh E, Soegaard H, Hanan N, *et al.* A Remote Sensing Study of the NDVI-T_s Relationship and the Transpiration from Sparse Vegetation in the Sahel based on High-Resolution Satellite Data[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 69: 224-240.
- [17] Goward S N, Hope A S. Evapotranspiration from Combined Reflected Solar and Emitted Terrestrial Radiation: Preliminary FIFE Results from AVHRR Data[J]. Advances in Space Research, 1989, 9: 239-249.
- [18] Cai Dihua, Guo Ni, Li Chongwei, *et al.* Interpolation of Air Temperature based on DEM[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27: 10-18. [蔡迪花, 郭妮, 李崇伟, 等. 基于 DEM 的气温插值方法研究[J]. 干旱气象, 2009, 27: 10-18.]
- [19] Du Jia, Zhang Bai, Song Kaishan, *et al.* A Comparative Study on Estimated Surface Temperature based on Landsat 5 TM in the Honghe Wetland[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(3): 312-319. [杜嘉, 张柏, 宋开山, 等. 基于 Landsat-5 TM 的洪河湿地地表温度估算方法对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 312-319.]
- [20] Liang Baoping, Li Yi, Chen Kezhou. A Research on Land Features and Correlation between NDVI and Land Surface Temperature in Guilin City[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(3): 429-435. [梁保平, 李艺, 陈可宙. 桂林市 NDVI 地表温度的地物特征及相关性研究[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 429-435.]
- [21] Feng Huihui, Liu Huiping, Zhu Shoudong, *et al.* Influence Analysis of Urbanization on Land Surface Temperature in Dongguan City[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(3): 53-58. [冯微微, 刘慧平, 朱寿东, 等. 城市扩张对东莞市陆表温度的影响分析[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 53-58.]

Comparison on Simulation Methods for Spatial Distribution of Near Surface Instantaneous Air Temperature

Wang Xiao, Zhu Shanyou, Zhang Guixin

*(School of Remote Sensing, Nanjing University
of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)*

Abstract: Near surface air temperature is a key factor in energy and water exchanges between land surface and atmosphere, and it is an important input parameter in many models. It is of great significance to obtain spatial distributions of the near surface instantaneous air temperature when there are rare or not traditionally meteorological observations. Taking Jiangsu province as the study area, the paper compared precisions of the ordinary kriging interpolation, multivariate linear regression analysis and temperature-vegetation index method used for retrieving near surface air temperature, and then analyzed the characteristics and variations of the error distribution from the three methods. Furthermore, the applicabilities of different simulation methods were discussed. Results show that the error of the multiple linear regression analysis method is minimum with its Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) are 0.42 °C and 0.51 °C respectively, which is close to the ordinary kriging interpolation method. The retrieval precision of the temperature-vegetation index method is relatively lower with its MAE and RMSE are 2.49 °C and 3.32 °C respectively. These three methods have different applicabilities in various data sources and underlying land surface conditions.

Key words: Near surface instantaneous air temperature; Ordinary kriging; Multivariate linear regression; Temperature-vegetation index method