

中图法分类号:P423 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2011)09-1708-08

论文索引信息:陈锋锐, 崔伟宏, 彭光雄, 李熙. 融合多源信息的地表气温插值研究 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1708-1715

## 融合多源信息的地表气温插值研究

陈锋锐<sup>1),2)</sup>, 崔伟宏<sup>1)</sup>, 彭光雄<sup>1)</sup>, 李熙<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

<sup>2)</sup>(中国科学院研究生院, 北京 100190)

<sup>3)</sup>(测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉大学, 武汉 430079)

**摘要:** 为了提高地表气温的插值精度, 提出了融合多源信息的地表气温插值方法, 该方法以地表气温和辅助信息之间显著相关为前提条件, 利用多元地统计(拟协同克里金、基于局部变化均值的简单克里金、带外部漂移的克里金)来实现多源信息的融合。对中国 720 多个气象站 2008 年 8 月的月平均地表气温进行了空间插值实验, 实验结果表明, 综合考虑两种辅助信息的 SKlm 和 KED 插值方法最优, 其原因在于: 1) 地表气温和海拔及地表温度显著相关, 海拔反映地表气温的总体趋势, 而地表温度更侧重反映它的局部趋势, 综合考虑它们能更准确地预测地表气温。2) SKlm 和 KED 均是基于非二阶平稳的插值方法, 而地表气温的空间分布往往呈非平稳性, 因此它们要优于其他方法。

**关键词:** 地表气温插值; 多源信息融合; 多元地统计

## Surface air temperature interpolation based on multiple sources information fusion

Chen Fengrui<sup>1),2)</sup>, Cui Weihong<sup>1)</sup>, Peng Guangxiong<sup>1)</sup>, Li Xi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 China)

<sup>2)</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 China)

<sup>3)</sup>(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079 China)

**Abstract:** The paper presents an interpolation method for surface air temperature (SAT) based on data fusion of multiple sources. It should check whether there is a significant correlation between primary and secondary variables firstly. Three multivariate geostatistical algorithms which includes collocated cokriging (CCK), simple kriging with varying local means (SKlm) and kriging with an external drift (KED) were introduced to incorporating ancillary information into the spatial prediction of SAT. The method was illustrated using monthly mean temperature data from more than 720 meteorological stations in China in August 2008, and cross validation was performed to evaluate the performance of the map prediction quality. The results show that: Accounting for both land surface temperature (LST) from remote sensing and digital elevation model (DEM), used as ancillary spatial information in three algorithms, outperforms accounting for only one ancillary data. Among all different methods, SKlm and KED incorporating LST and DEM have produced the best results, this is because: (1) LST is better to indicator the local trend of SAT. (2) DEM prefers to indicator the global trend of SAT. (3) Both SKlm and KED considering SAT with a non-tationary spatial distribution have better performance than others.

**Keywords:** surface air temperature interpolation; information fusion based on multiple sources data; multivariate geostatistics

收稿日期: 2010-05-18; 修回日期: 2010-10-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAK50B01); 中国博士后科学基金项目(20080430586)。

第一作者简介: 陈锋锐(1982—), 男, 中国科学院遥感应用研究所地图学与地理信息系统专业博士研究生, 主要从事多元地统计, 多源信息融合研究。E-mail: fruich@gmail.com。

## 0 引言

地表气温(SAT)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,更重要的也是地表陆面过程模型模拟的重要参数,被广泛地应用于农业、气象灾害、气候变化研究等领域<sup>[1-2]</sup>。通常,SAT的获得来自于气象站点的观测,但是气象站点是有限的,且站点的空间分布往往也是不均匀的,很难满足对面SAT的实际需求。因此,如何利用有限的观测数据,借助于空间插值方法估计它们合理的空间分布具有十分重要的意义。

传统的空间插值方法如多项式插值,样条曲线,反距离方法等<sup>[3-5]</sup>,仅采用经典的数理方法来估计和模拟气温的分布,对空间数据之间的空间相关性考虑不足,因此,这些结果虽然能够反映空间变量的整体趋势,局部误差往往较大。而克里金插值用变异函数来衡量数据之间的空间相关性,并强调局部最优以及无偏估计,越来越多地用在空间数据的插值中<sup>[6-10]</sup>。Robeson在比较各种插值方法后指出,如果不考虑温度的空间分布特性和受地形高度等的影响,将温度看作同一平面上的离散点,虽然不同插值方法处理过程有所差别,但均很难得到高精度的估计结果<sup>[11]</sup>。相比仅采用SAT观测数据的插值,考虑DEM(数字高程模型)影响的普通克里金插值方法(OK-D)在插值的过程中顾及海拔对SAT的影响,并通过相应的函数来量化它,因此该方法较大地提高了估计精度<sup>[6-7,10]</sup>。高程信息之所以被用来提高气温的插值精度,根本的原因在于高程和气温之间存在相关关系,所以从广义上说,不止DEM,其他与SAT显著相关的辅助信息都可以用来提高插值的精度。

随着遥感技术的发展,大量的对地观测数据被获得,遥感的一个重要特点是能够快速对广大区域进行观测,并获得高分辨率的地表参数,因此利用遥感数据可以弥补观测站点以外信息的缺失。遥感观测的地表温度(LST)是衡量地球表面冷热程度的物理量,它不等同于SAT,但是它们之间存在着紧密的联系<sup>[12]</sup>。本文旨在运用多元地统计技术来有效融合辅助信息(LST和DEM)以提高SAT的插值精度,并利用交叉检验

对结果的精度进行了评估,采用的多元地统计方法包括拟协同克里金(CCK),基于局部变化均值的简单克里金(Skln)、带有外部漂移的克里金<sup>[13-14]</sup>(KED)。如何有效地整合多源信息并提高SAT的插值精度,是研究重点。

## 1 数据来源

SAT数据来源于中国气象局气象信息中心提供的中国720多个基本、基准地面气象观测站及自动站气候资料月值数据集,其中大部分站点是国家基本气候站和基本气象站,个别为一般气象站(图1)。仅采用2008年8月的月平均SAT数据,其中最高月平均气温出现在新疆的吐鲁番观测站,为31.1℃,最低为青海的伍道梁观测站的4.3℃。

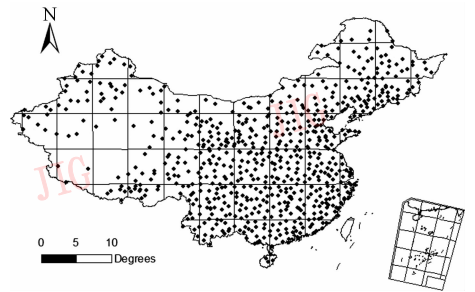


图1 中国气象站点空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of meteorological observation stations in China

DEM来源于美国地球资源观测系统数据中心的GTOPO30,其空间分辨率为30"。LST数据来自NASA的MODIS数据共享网站,Wan和Li对该数据的精度进行了评价,认为对于已知比辐射率特性的均匀地表,LST的误差小于0.5℃<sup>[15-16]</sup>。

## 2 研究方法

空间插值是通过已知空间位置变量来估算未知空间位置变量的数学方法。相比多边形、三角形、局部平均、反距离等插值方法等,克里金插值具有估计无偏性和最优性等优点,并对结果的误差和不确定性进行衡量<sup>[17]</sup>。考虑到气象站点有限,仅采用站点数据很难提高现有插值方法的精度。本文研究基于多源信息融合的SAT空间插值方法,引入了密集的遥感观测的LST和DEM

数据,通过它们提供研究区无站点位置的辅助信息,来提高插值的精度;3种多元地统计方法被用来融合多源数据,它们分别是拟协同克里金,基于局部变化均值的简单克里金以及带有外部漂移的克里金;此外,利用交叉验证对结果的精度进行评价。

### 2.1 普通克里金

普通克里金(OK)假设区域变量  $Z(X)$  二阶平稳,其数学期望为常数,但未知<sup>[14,18]</sup>。其定义为

$$z_{OK}^*(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a^{OK}(u) z(u_a) \quad (1)$$

式中,  $z_{OK}^*$  为待估计值,  $\lambda_a^{OK}(u)$  为权重系数,  $z(u_a)$  为  $u_a$  位置的观测值,  $n$  为参与估计的观测点数。为满足无偏性和最小误差方差两个条件,权重系数  $\lambda_a^{OK}(u)$  需要满足

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^n \lambda_b^{OK}(u) C(u_a, u_b) - \mu = C(u_a, u) & a = 1, \dots, n \\ \sum_{b=1}^n \lambda_b^{OK}(u) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $C(h)$  为观测值的协方差函数,  $\mu$  为拉格朗日参数。

### 2.2 拟协同克里金

OK只限于研究单变量的空间分布特征,不能利用辅助变量信息来增强或提高估计的精度,而辅助信息,特别是样本数目远大于主变量的辅助变量往往能够降低估计的不确定性。协同克里金(CK)同时考虑多元变量,以交叉变异为基本工具,对其中的一个或多个变量进行空间估计,以提高估计的精度和合理性<sup>[14,19]</sup>。其定义为

$$z_{CK}^*(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a^{CK}(u) z(u_a) + \sum_{b=1}^n \lambda_b^{CK}(u) y(u_b) \quad (3)$$

式中,  $y(u)$  为辅助变量。当辅助变量分布在整个研究区时,考虑到与主变量同位置的辅助变量可屏蔽较远位置辅助变量的影响,CK演变成CCK,CCK仅利用一个辅助变量对未知点估计。其定义为

$$z_{CCK}^*(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a^{CCK}(u) z(u) + \lambda_2^{CCK}(u) [y(u) - m_y + m_z] \quad (4)$$

式中,  $m_y$  和  $m_z$  分别是主变量和辅助变量的局部均

值,  $\lambda^{CCK} a(u)$  和  $\lambda^{CCK} 2(u)$  满足以下约束:

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^n \lambda_b^{CCK}(u) C_{11}(u_a, u_b) + \lambda_2^{CCK}(u) C_{12}(u_a, u) + \mu^{CCK}(u) = C_{11}(u_a, u) & a = 1, \dots, n \\ \sum_{b=1}^n \lambda_b^{CCK}(u) C_{21}(u, u_b) + \lambda_2^{CCK}(u) C_{22}(0) + \mu^{CCK}(u) = C_{21}(0) \\ \sum_{b=1}^n \lambda_b^{CCK}(u) + \lambda_2^{CCK}(u) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $C_{11}(h)$ ,  $C_{22}(h)$  分别是主变量和辅助变量的协方差,  $C_{12}(h)$  是主变量和辅助变量之间的协方差。

### 2.3 基于局部变化均值的简单克里金(SKlm)

前面的OK以及CCK都是基于平稳的克里金方法,它们假设  $Z(u)$  在估值邻域内满足二阶平稳或本征假设。而SKlm以及后面的KED认为变量值在某一方向上具有上升的趋势,即所谓的漂移。不同于简单克里金(SK),SKlm的局部均值来源于辅助变量,并且非平稳<sup>[14]</sup>。SKlm定义为

$$z_{SKlm}^*(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a^{SK}(u) [z(u_a) - m_{SKlm}^*(u_a)] + m_{SKlm}^*(u) \quad (6)$$

式中,  $m_{SKlm}^*(u)$  为局部均值,  $\lambda_a^{SKlm}(u)$  为权重。通常  $m_{SKlm}^*(u)$  是辅助变量的线性函数:  $m_{SKlm}^*(u) = a_0 + a_1 y(u)$ ,  $a_0$  和  $a_1$  是常量。  $\lambda_a^{SKlm}(u)$  满足

$$\sum_{b=1}^n \lambda_b^{SK}(u) C_R(u_a, u_b) = C_R(u_a, u) \quad (7)$$

$$a = 1, \dots, n$$

式中,  $C_R(h)$  是残差  $R(u) = Z(u) - m(u)$  的协方差,而不再是  $Z(u)$  的协方差。

### 2.4 带外部漂移的克里金

与SKlm相似的是,KED也通过辅助变量来获得局部均值,它的局部均值其趋势  $m(u)$  估计为  $m(u) = a_0(u) + a_1(u) y(u)$ ,其中  $a_0(u)$ ,  $a_1(u)$  随位置而变,这与SKlm不同<sup>[14]</sup>。KED趋势反映了主变量在大尺度上的变异,而其残差则反映了小尺度的变异,最终的结果则是两者的有机结合<sup>[20]</sup>。它的估计定义为

$$z_{KED}^*(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a^{KED}(u) z(u_a) \quad (8)$$

$\lambda_a^{KED}(u)$  满足

$$\begin{cases} \sum_{b=1}^n \lambda_b^{\text{KED}}(u) C_R(u_a, u_b) - \mu_0^{\text{KED}}(u) + \mu_1^{\text{KED}}(u) y(u_a) = C_R(u_a, u) & a = 1, \dots, n \\ \sum_{b=1}^n \lambda_b^{\text{KED}}(u) = 1 \\ \sum_{b=1}^n \lambda_b^{\text{KED}}(u) y(u_b) = y(u) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\mu_0^{\text{KED}}(u)$  和  $\mu_1^{\text{KED}}(u)$  为拉格朗日参数,  $C_R(h)$  为残差协方差。在实际计算中,当  $h$  比较小时,残差协方差是通过受趋势影响很小的点对来计算;当  $h$  较大时,趋势点对对影响很微弱,于是  $C_R(h) \approx C(h)$ 。

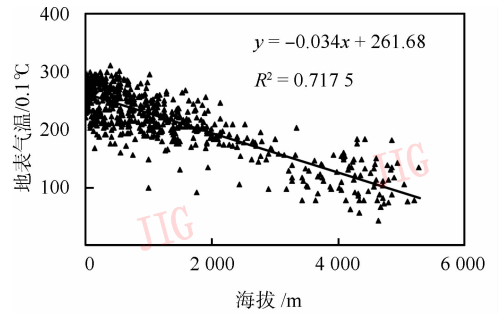
### 3 结果及分析

#### 3.1 数据相关分析及其半变异模型的建立

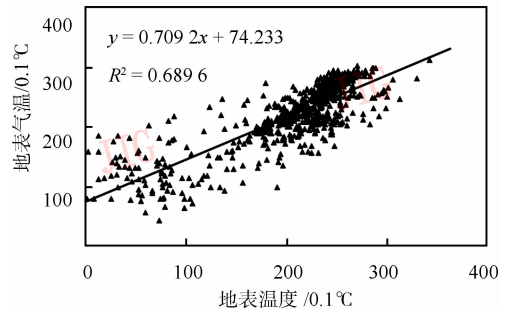
运用辅助信息对主变量进行估值时,首先需要分析它们之间的相关性,如果它们之间具有显著的相关性,则该辅助信息可以被采用<sup>[20-21]</sup>。海拔和 SAT 密切相关,此外, LST 是地表冷热程度的衡量,地表包括冰雪、草地、建筑物顶部以及树木的顶端等,而 SAT 则是在距离地表两米处测得的环境温度, LST 不等于 SAT。通过分析站点 SAT 与其相同位置海拔和 LST 的关系发现:八月份 SAT 和海拔之间的相关系数为 -0.84,通过  $p < 0.01$  显著性检验,对它们的回归分析也证明了这一点,其回归系数通过  $p < 0.01$  显著性检验,随着海拔的升高,我国八月份 SAT 呈下降态势,海拔每升高 1 000 m, SAT 下降 3.4 °C (图 2);与海拔不同的是, LST 和 SAT 之间存在着显著的正相关,其相关系数(0.83)和线性回归系数(0.71)均通过  $p < 0.01$  显著性检验(图 2)。

由图 2 可知, DEM 反映 SAT 的整体趋势, LST 更倾向于反映 SAT 的局部细节,这两种信息之间存在着较大的互补性,综合考虑它们更有利于 SAT 的预测。逐步回归法被用来选择及合并这两种辅助信息, SAT 与 LST(  $T_s$  ) 和 DEM(  $H$  ) 的回归系数分别是 0.491 8 和 -0.012 2,它们均通过  $p < 0.01$  的显著性检验。从相关关系可知, SAT 与 LST 呈正相关,而与 DEM 呈负相关,整合后的综合辅助信息  $T_{\text{LD}}$  为

$$T_{\text{LD}} = 133.4514 + 0.4918 \times T_s - 0.0122 \times H \quad (10)$$



(a) 地表气温与海拔回归分析



(b) 地表气温与地表温度回归分析

图 2 主变量与辅助变量的线性回归

Fig. 2 Linear regression between primary and secondary variable

此外,综合辅助信息  $T_{\text{LD}}$  和 SAT 之间的相关系数为 0.88,大于单一辅助信息与 SAT 的相关系数(0.84 和 0.83),验证了 DEM 和 LST 这两种辅助信息具有互补性。

变量的变异模型见表 1。其中 CCK 的变异和交叉变异模型需要满足柯西-施克瓦兹不等式:  $|\gamma_{12}(h)| \leq |\gamma_{11}(h) \gamma_{22}(h)|^{1/2}$ ,以保证插值过程中方程组的系数矩阵正定,具有唯一解。在 SKlm 中,考虑到区域变量不再满足二阶平稳假设,所以采用主辅变量残差的半变异函数来衡量变量之间空间相关程度,而不是主变量的半变异函数<sup>[19]</sup>。相比主变量或辅助变量的变异模型,残差变异模型的基台值往往比较小。

#### 3.2 交叉验证

为了衡量辅助信息以及插值方法在提高 SAT 插值精度过程中的作用,采用 4 类方法对我国 2008 年 8 月的月平均 SAT 进行插值。它们分别为不考虑辅助信息的插值(OK),考虑 DEM 辅助信息的插值(CCK-D、SKlm-D、KED-D),考虑 LST 辅助信息的插值(CCK-L、SKlm-L、KED-L)以及综合考虑 DEM 和 LST 辅助信息的插值(CCK- $T_{\text{LD}}$ 、SKlm- $T_{\text{LD}}$ 、KED-

**表 1 变异和交叉变异模型的参数**  
**Tab. 1 Parameters of variogram and cross variogram model**

变量	变异模型	块金	变程/(°)	基台
SAT	高斯	470	20	3 470
LST	高斯	300	20	2 500
DEM	高斯	100	20	3 000
$T_{LD}$	高斯	200	20	2 900
SAT-LST	高斯	250	20	2 550
SAT-DEM	高斯	100	20	2 800
SAT- $T_{LD}$	高斯	200	20	2 800
SAT/LST	高斯	350	20	1 100
SAT/DEM	高斯	200	20	1 200
SAT/ $T_{LD}$	高斯	280	20	880

注: ‘-’表示交叉变异, ‘/’为残差的变异。如: SAT-LST 表示 SAT 和 LST 的交叉变异, SAT/ $T_{LD}$ 表示 SAT 和综合辅助信息  $T_{LD}$  的残差变异。

$T_{LD}$ )。此外,还与 OK-D 方法进行了对比。

交叉检验(cross validation)方法被用来对气温的空间插值结果进行精度检验。即首先假设某一个

气象站点的气温未知,用其他所有气象站点来估算该气象站点的气温,然后计算所有气象站点的实际观测气温值与估算值之间的误差来评判空间插值方法的优劣。采用的验证标准有平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)。MAE 反映样本数据估值的总体误差或精度水平, RMSE 反映样本数据的估值灵敏度和极值, MAE 与 RMSE 的值越小,表明插值的精度越高。

由交叉验证结果(表 2)可知:1)不采用任何辅助信息的插值(OK)的精度最低, MAE 为 1.53 °C, RMSE 为 2.33 °C;2)考虑辅助信息的插值中, CCK 的插值精度虽比 OK 有了较大提高,但是相比其他方法,其精度还是较低;3)除 CCK 外,考虑一种辅助信息的插值,总体上精度变化不大,采用 LST 辅助信息的插值精度要略高于采用 DEM 辅助信息的插值;4)综合采用 LST 和 DEM 辅助信息的插值精度最高,其 MAE 较采用一种辅助信息插值结果的精度提高 10%,约 0.1 °C。

**表 2 各种插值方法的交叉验证结果**

**Tab. 2 The results of cross-validation for different interpolation methods**

	OK	OK-D	/0.1 °C								
			考虑 DEM			考虑 LST			考虑 DEM 和 LST		
			CCK	SKlm	KED	CCK	SKlm	KED	CCK	SKlm	KED
MAE	15.3	11.8	14.9	11.6	11.6	14.4	11.4	11.3	14.3	10.3	10.5
RMSE	23.3	18.8	21.8	18.5	18.7	21.4	18	17.9	21	16.9	17.2

**3.3 地表气温空间插值结果**

插值结果见图 3—5,空间分辨率为 0.1° × 0.1°。这些方法均反映出该时期 SAT 随经度和纬度的地带性变化特征,但是在细节信息表现上存在较大差异。相比仅采用站点数据的 OK 插值,其余方法由于辅助信息的引入, SAT 在空间上呈现出不同程度的细节。特别是西部的青藏高原地区,它们能够准确地反映出温度随地形高度的变化趋势和由于地形高程不同所带来的细节信息,而 OK 更多的是反映气温的变化趋势。此外,OK、CCK-D、CCK-L 以及 CCK- $T_{LD}$ 的结果在整体上更趋于平滑,对较低的气温值估计过高,而对较高的气温值估计不足,如:OK 对塔克拉玛干沙漠部分地区的气温(大于 25 °C)估计过低,而对青海和西藏部分地区的气温(<10 °C)估计过高。

考虑 DEM 辅助信息的插值中(CCK-D 除外),各种插值结果在东部地区相差不大,差异主要出现在西部。特别是塔里木盆地地区,该区域大部分站点 SAT 大于 25 °C,3 种方法中,OK-D 的高温区域(大于 25 °C)最小,与实际偏离最大,而 KED-D 最符合实际情况。而在考虑 LST 辅助信息的插值中,新疆的高温区均很好的得到呈现,SKlm-L 和 KED-L 差异不明显。

相同辅助信息的条件下,SKlm 插值结果的气温范围总小于 KED 的插值范围,这在综合考虑 LST 和 DEM 辅助信息的插值中同样如此。SKlm- $T_{LD}$ 对较高气温值估计不足,其最高气温只有 30 °C,小于 KED- $T_{LD}$ 的 31.6 °C。此外,KED- $T_{LD}$ 和 SKlm- $T_{LD}$ 插值结果的气温范围最接近站点数据的气温范围。

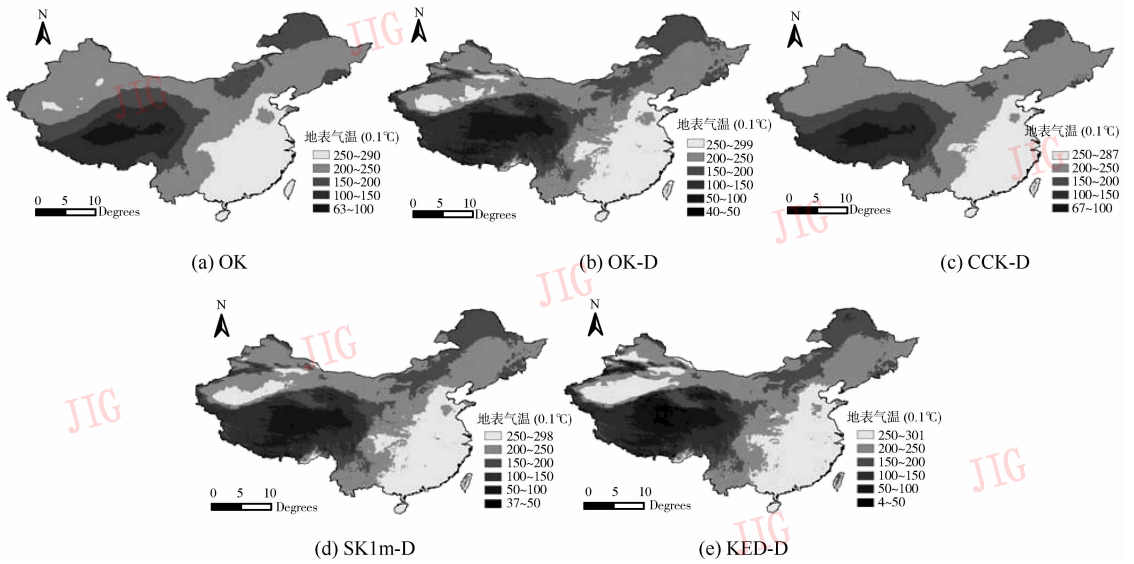


图 3 OK 和考虑 DEM 辅助信息的插值结果

Fig. 3 The interpolation results of OK and kriging accounting for DEM

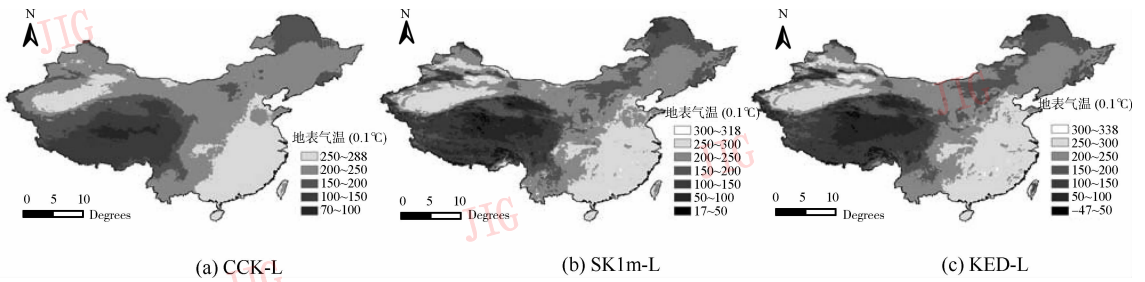


图 4 考虑 LST 辅助信息的插值结果

Fig. 4 The interpolation results of kriging accounting for LST

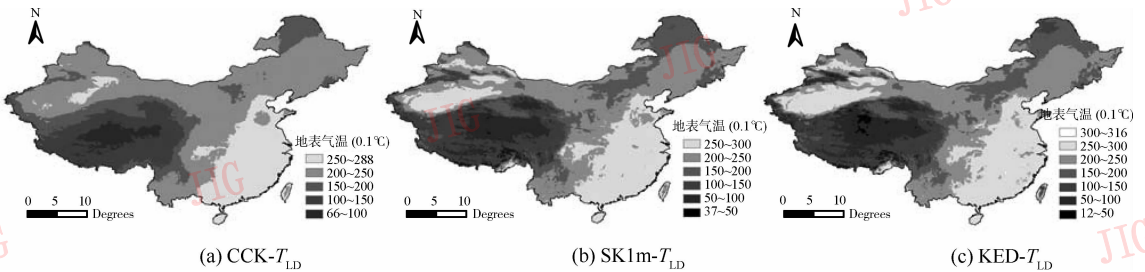


图 5 综合考虑 LST 和 DEM 辅助信息的插值结果

Fig. 5 The interpolation results of kriging accounting for both LST and DEM

### 3.4 分析与讨论

OK 和 CCK 是基于二阶平稳假设的克里金方法,它们的变异是整个研究区变异的数学期望,一些局部细节信息被过滤,整体趋势得以保留,因此结果往往对较低气温值估计过高,而对较高气温值过低估计。SAT 受地形的影响往往不满足二阶平稳假设,比如我国的西部特别是青藏高原地区

由于海拔的影响,气温往往要低于东部,所以相比其他基于非平稳假设的方法,OK 和 CCK 的精度最低。

OK-D 通过把 SAT 订正到伪海平面上来消除海拔的影响,并进行 OK 插值,然后对伪海平面上的插值结果重新考虑海拔的影响。实际上该方法已是基于非平稳假设的方法,所以其预测精度能够达到较

高的水平<sup>[6-7,10]</sup>。但是 OK-D 只考虑站点位置的海拔信息,忽略了其余位置的海拔信息,所以该方法仅仅是消除了海拔的影响,而没有充分利用 DEM 信息,导致其在细节表达上弱于其他考虑 DEM 的非平稳方法(SKlm-D, KED-D),此外,OK-D 不能融合除海拔外的其他辅助信息,扩展性差。提出的插值方法(如基于 SKlm 以及基于 KED 的插值),站点和其余位置的辅助数据均参与预测主变量,且扩展性强,能够融合其他的辅助数据,较好地解决了 OK-D 方法的不足。

KED 法利用局部邻域主、辅变量之间的线性相关关系,相比 SKlm 采用主、辅变量之间整体的线性相关,局部细节较好地被保留,因此,KED 插值结果范围要大于 SKlm。DEM 反映的是 SAT 的总体变化趋势,所以 SKlm-D 的插值精度要略高于 KED-D 法;LST 和地表的物理性质有关,由于局部地区地表类型和大气环境基本一致,其在局部范围内能够表征出气温的变化趋势,导致 KED-L 插值精度在考虑 LST 辅助信息条件下最优。

综合考虑 LST 和 DEM 辅助信息的插值融合了 DEM 的总体趋势以及 LST 的局部趋势,所以它们的插值精度最优。虽然 SKlm- $T_{LD}$  的插值精度略高于 KED- $T_{LD}$  法,MAE 和 RMSE 分别降低 0.02 °C 和 0.3 °C;考虑其插值结果的最高气温小于站点数据的最高气温,而 KED- $T_{LD}$  则不然。因此,很难确定哪个结果更优,需根据相应的目的和用途来选择采用哪种方法。

## 4 结 论

合理地选择和整合辅助数据能够有效提高 SAT 的预测精度。在对 SAT 与 DEM 和 LST 进行相关分析的基础上,提出了基于多源信息融合的 SAT 插值方法。相比传统仅采用 SAT 数据以及近来较优秀的 OK-D 插值方法,该方法扩展性好,且充分考虑了辅助数据与主变量的相关性,并采用多元地统计(SKlm 和 KED)来实现多源信息的完全融合。实验结果表明:综合考虑 DEM 和 LST 辅助信息时,该方法比 OK-D 的预测精度提高 10%。同时还发现:1) 基于非平稳假设插值方法的插值精度要远优于基于平稳假设的插值方法;2) LST 和 DEM 分别侧重于反映 SAT 的局部和全局趋势,它们之间相互补充。另外,DEM 和 LST 是栅格数据,SAT 观测值是点状数据,它们之间

存在着不同的尺度。而在进行主辅变量相关分析时,把观测点同位置辅助数据的像元值(面)作为辅助变量取值,这种简化是否对 SAT 插值结果造成影响有待于进一步的研究。

## 参考文献(References)

- [1] Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu ZiYing, et al. Changes of surface air temperature in china during 1951-2004 [J]. Climatic and Environment Research, 2005, 10(4): 717-727. [任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近 54 年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 717-727.]
- [2] Xu Xingkui, Wang Xiaotao, Jing Xiaoqing. Vegetation response to active accumulated temperature patterns from 1969-2000 in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6042-6050. [徐兴奎, 王小桃, 金晓青. 中国区域 1960—2000 年活动积温年代变化和地表植被的适应性调整[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6042-6050.]
- [3] Borga M, Vizzaccaro A. On the interpolation of hydrologic variables; formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging [J]. Journal of Hydrology, 1997, 195(1): 160-171.
- [4] Nalder I, Wein R. Spatial interpolation of climatic normals; test of a new method in the Canadian boreal forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(2): 211-225.
- [5] Price D, McKenney D, Nalder I, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101(4): 81-94.
- [6] Li Jun, You Songcai, Huang Jingfeng. Spatial interpolation method and spatial distribution characteristics of montlyly mean temperature in china during 1961-2000 [J]. Ecology and Enviroment, 2006, 15(1): 109-114. [李军, 游松财, 黄敬峰. 中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 109-114.]
- [7] Li Xin, Cheng Guodong, Lu, Ling. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang plateau [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(6): 565-573. [李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 565-573.]
- [8] Shi Peng, Rui Xiaofang. Comparison and improvement of spatial rainfall interpolation methods [J]. Journal of Hohai University. 2005, 33(4): 361-365. [石朋, 芮孝芳. 降雨空间插值方法的比较与改进[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 361-365.]
- [9] Liu Yinwen, Lai Geying, Chen Yunzeng, et al. A research on rainfall spatial interpolation methods based on GIS [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2007, 2(3): 29-34. [刘胤雯, 赖格莱, 陈云增, 等. 梅江河流域年均降雨量空间插值方法研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(3): 29-34.]
- [10] 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.]
- [11] Robeson S. Influence of spatial sampling and interpolation on estimates of air temperature change[J]. *Climate Research*, 1994, 4(5):119-126.
- [12] Kawashima S, Ishida T, Minomura M, et al. Relations between surface temperature and air temperature on a local scale during winter nights[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 23(5):1570-1579.
- [13] Wackernagel H. *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*[M]. Berlin: Springer 2003.
- [14] Goovaerts P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* [M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [15] Wan Z, Dozier J. Land-surface temperature measurement from space: Physical principles and inverse modeling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(6):268-278.
- [16] Li Z, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(2):67-85.
- [17] Isaaks E, Srivastava R. *An Introduction to Applied Geostatistics* [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [18] Webster R, Oliver M. *Geostatistics for Environmental Scientists* [M]. Amsterdam: Wiley, 2007.
- [19] Deutsch C, Journel A. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's guide*[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [20] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 228(1):113-129.
- [21] Pei T, Qin C Z, Zhu A X, et al. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: a comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(3):610-619.