

一种地面气温的空间插值方法及其误差分析

刘宇 陈泮勤 张稳 胡非

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 根据最近邻域法和反向距离法的基本原理, 利用空间卷积算法, 采用结合中国大陆气象站点位置的截断高斯滤波算子作为距离权重方程, 给出一种适合中国陆地区域的地面气温插值方法, 并以 300 多个地面站记录的气温为例, 使用交叉验证法分析了给定插值方法的误差分布, 结果表明该插值方法比其他插值方法所得误差较小, 能够很好地用于气象站点气象观测记录缺失的插补及其空间尺度的扩大化。

关键词 空间卷积 空间插值 地面气温 交叉验证 误差分析

文章编号 1006-9895(2006)01-0146-07 **中图分类号** P423 **文献标识码** A

A Spatial Interpolation Method for Surface Air Temperature and Its Error Analysis

LIU Yu, CHEN Pan-Qin, ZHANG Wen, and HU Fei

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Research efforts in the hydrological and ecological sciences are increasingly being directed towards the application of knowledge gained at small spatial scales to questions framed over larger domains. Consequently, there is a growing need for a new collection of research tools and methods designed with attention to the particular needs and constraints of large-scale studies. Reliable surface meteorological data are a basic requirement for hydrological and ecological research at any spatial scale, and are a particularly crucial component of studies of mass and energy transfer over large land surfaces. Our study of hydrological and ecological processes at regional and continental scales has been hindered by lack of a general method which meets the meteorological data requirements of such large-scale studies. Here it is presented that a method for generating surfaces air temperature over Chinese terrene regions by us. In our methods, it is borrowed from the nearest-neighbor method which asserts that the area of relative influence for a given observation should be inversely related to the local observation density, that is, a relatively isolated observation should influence predictions for a larger area than an observation in a data-rich region. In order to overcome the most serious fault of the nearest-neighbor method which generates a discontinuous surface, our method borrowed the assertion that the influence could decrease with increasing distance from an observation from the inverse distance method. Required inputs of our method include digital elevation data and observations of air temperature from ground-based meteorological stations. The spatial convolution of a truncated Gaussian filter with a surface containing the horizontal projections of Chinese meteorological station locations is adopted as our basic interpolation framework. A Gaussian function is chosen because it is simple to evaluate, and has the desired features of being both an inverse-distance algorithm and a smoothing filter. Sensitivity to the typical heterogeneous distribution of stations in complex terrain is accomplished with an iterative station density algorithm. Cross-validation analysis is used to test the sensitivity of our method to variation of parameters and to estimate the prediction errors associated with the final

收稿日期 2004-11-01, 2005-01-04 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-SW-01-19, 国家自然科学基金资助项目 40233030

作者简介 刘宇, 男, 1975 年出生, 博士, 助研, 主要从事大气边界层观测试验和理论研究。E-mail: liuy@mail.lapc.ac.cn

selected parameters. The general cross-validation protocol is to withhold one observation at a time from a sample, generating a prediction error for the withheld case by comparison with the observed value, and repeating over all observations in the sample to generate an average prediction error. Mean absolute error (MAE) for predicted daily average air temperature is about 0.7 °C. The results show that our spatial interpolation method produces less error than other methods used in Chinese terrene area. Our methods are designed to be independent of prediction at arbitrarily placed points, but the same methods could be applied to the generation of predicted values over an evenly spaced grid of prediction points. There is another level of abstraction involved in translating these predictions to areal totals or averages as determined by the area of grid boxes centered on the prediction points. That is to say, our method presented here is well useful for reinforcing the lacked records of weather stations and for scaling-up of the records.

Key words spatial convolution, spatial interpolation, surface air temperature, cross-validation, error analysis

1 引言

可靠的地面气象资料是各种时空尺度水文和生态研究的最基本要求，同时也是大面积陆气相互作用过程中物质和能量收支研究的至关重要的组成部分。譬如，在区域蒸发与区域生态系统生产力模拟模型的研究中，长时间尺度的气象要素值经常被用作模型驱动变量。然而，由于经济和人的原因，气象站点极其有限而无法满足模型时空精度的要求，如何将局地小尺度上获得的信息扩展到较大区域，这越来越得到气象、水文、生态等相关领域科学家们的重视。因此，迫切需要设计开发满足尺度扩大化需要的研究工具。

在实际工作中，多是利用邻近区域气象站点的资料，给定某些假设条件，通过空间插值方法来生成目标区域的气象资料^[1~3]。目前，通常使用的二维插值方法可分成两类，即真实插值法和平滑插值法^[4]。真实插值法对那些和节点重合的台站，插值后的数值与台站数据完全吻合，也就是说，该台站赋予权值为 1，其他台站的权值为 0；当台站与节点不重合时，插值后的节点值与台站观测值不同，贡献大小取决于跟距离有关的权值分配。在平滑插值法中，即使台站与节点重合时仍不能获得百分之百的权值，且在某些特殊情况下，同一区域不同台站均获得相同权值，在此情况下的插值结果与均值结果类似。当原始区域分布数据缺乏可信度时，平滑插值法的优点之一是可对一些不稳定的测值起到过滤作用。二维插值法中的距离反比法、克里格法、最近邻域法、径向函数法、Shepard 法以及线性三角函数插值法等均属于真实插值法，而最小曲率法和多项式回归法等属于平滑插值法。针对不同的插值方法国外学者进行过很多比较^[5~7]。我国学者林

忠辉等^[8]采用距离平方反比法、梯度距离平方反比法和普通克里格法等三种插值方法，对中国陆地区域气象要素进行插值以探讨插值方法的选取，结果发现对某一种气象要素合适的插值方法未必对另一种气象要素合适。李新等^[9]将空间内插方法进行了详细分类并介绍了每一种方法的适用范围、算法和优缺点，最后指出没有绝对最优的空间内插方法，必须对所研究的数据进行空间探索分析，根据数据的特点，选择最优方法。

本文参考 Thornton 等^[1]给出的日平均地面气象要素空间插值算法，根据空间卷积原理，结合中国大陆气象站点位置的截断高斯滤波算子，提出一种适合中国陆地区域地面气象要素的空间插值方法。

2 资料与方法

2.1 气象资料

气象数据由中国气象局提供，包括遍布全国大陆(台湾除外)633 个站点从 1950 年至 2000 年的逐日气象要素(气温、降水、湿度、辐射等)。由于本文旨在插值方法的探讨，所以仅以气温为例进行讨论。气象资料由台站原始记录和台站信息两组文件组成，原始气象记录包括观测台站号、序列时间号、气象要素观测值等内容，台站信息文件含台站号、台站名称、台站经纬度和高程等内容。

2.2 插值方法

插值算法采用最近邻域法和反向距离法的基本原理，将高斯滤波算子作为距离权重方程，并且出于计算效率的考虑，设定一个有效作用距离，即截断距离，如果一个测值点与插值目标点的距离大于算子的截断距离，则其测值对目标点的贡献为 0。因此，最终的权重方程^[1]为

$$W_{(r)} = \begin{cases} 0, & r > R_p, \\ \exp\left[-\left(\frac{r}{R_p}\right)^2 \alpha\right] - e^{-\alpha}, & r \leq R_p, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $W_{(r)}$ 为当测值点与目标点水平距离为 r 时测值对目标点的贡献权重; R_p 为截断距离; α 是一个与气象要素的距离相关性衰减率有关的参数, 即高斯形态系数, α 越大, 表明该气象要素的距离相关性的衰减率越高。

由于测值点空间分布的不均匀性, 如果对 R_p 取常数, 不同目标点的有效测值(即对该目标点的插值权重大于零的测值)的数量就会有很大差异。按照最近邻域法原理, 测值点密集地区过大的 R_p 并不是很必要, 而在测值点稀疏地区又有可能因取常数的 R_p 过小而造成插值结果的可靠性降低。因此, R_p 的取值应按照一定的算法, 实现在测值点密集区合理减小, 而对于测值点稀疏地区又会适当增大。一种可行的办法是给定一个目标点插值计算所需的测值数量 N 。但 N 的取值同样不能为常数, 因为这样会破坏插值结果的空间连续性。在 Thornton 等^[1]的算法中, 将 N 定义为计算一个目标点插值所需要的邻域内测值点数量的统计平均值。这样一来, 截断距离就变为关于测值点分布密度的一个平滑函数, 从而保证了插值结果的空间连续性。决定 R_p 的递归算法步骤为

(i) 为 R_p 设置初始值为 R_0 。

(ii) 计算邻域(以目标点 p 为中心、半径为 R_p 的区域)内测值点分布密度 D_p (即测站数量与邻域面积的比值):

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{\bar{W}}}{\pi R_p^2}, \quad (2)$$

其中, W_i 为测值点 i 对目标点 p 的插值权重, 由方程(1)计算得出; n 为邻域内的测值点总数; \bar{W} 为邻域内测值点权重的平均值, 其计算公式为

$$\bar{W} = \frac{\int_0^{R_p} W_{(r)} dr}{\pi R_p^2} = \left(\frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha}\right) - e^{-\alpha}. \quad (3)$$

(iii) 重新计算 R_p , 将其作为平均测值点数量 N 与测值点分布密度 D_p 的函数:

$$R_p = \sqrt{\frac{N^*}{D_p \pi}}, \quad (4)$$

其中, 对最后一次递归循环 $N^* = N$, 之前的递归循环 $N^* = 2 \times N$ 。

(iv) 通过(4)式计算的 R_p 代入步骤(ii)。算法在步骤(ii)与步骤(iv)之间循环一定的次数 M 。

(v) 经过 M 次循环计算得到的 R_p 作为插值目标点 p 的邻域截断距离, 并且用于方程(1)中计算邻域内各测值点对目标点的插值权重。

经过上述计算, 目标点气象要素 x 的插值结果 x_p 由以下公式计算:

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n W_i x_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (5)$$

其中, x_i 为测值点 i 的要素测值, W_i 为测值点 i 对目标点 p 的插值权重, n 为目标点 p 的 R_p 邻域内的测值点总数。

对于气温来说, 除了平面上的空间相关外, 还有随高度的变化。取气温的垂直递减率 β 为其平均值 $-0.006 \text{ }^\circ\text{C/m}$, 这一数值是通常观测到的环境温度垂直递减率, 同时也是许多大气环流等数值模式所选取的温度垂直递减率^[10]。经过插值站点和观测站点的高程数据修正之后的气温空间插值计算公式最终为

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n W_i [T_i + \beta \times (z_p - z_i)]}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (6)$$

其中, T_p 、 T_i 分别为目标点和测值点的气温; z_p 、 z_i 分别为目标点和测值点的高程。

2.3 误差分析

采用交叉验证法来验证插值的效果^[11]。首先, 假定每一个观测站点的气温值未知, 而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差作为误差, 依此来判断估值方法的优劣。选用平均误差、平均绝对误差和插值平均误差平方的平方根(root of mean square interpolation error, E_{msic})作为评估插值效果的标准。平均误差总体反映估计误差的大小, 平均绝对误差可以揭示估计值可能的误差范围, E_{msic} 则能反映利用样点数据的估值灵敏度和极值效应。 E_{msic} 的表达式^[8]为

$$E_{\text{msic}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (Y_{a,i} - Y_{e,i})^2}{k}}, \quad (7)$$

其中, $Y_{a,i}$ 第 i 个站点的实际观测值, $Y_{e,i}$ 为其估计值, k 为用于检测的站点数目。

3 结果

由于本文旨在插值方法的探讨及其误差的分析，而并非对气象数据库中 40 多年逐日地面气温进行插值计算，所以首先随机抽取一天的观测资料进行详细讨论，然后以 1999 年为例分析了全国 381 个观测站插值误差的季节差异。我们随机抽取的是 2000 年 6 月 29 日的地面气温观测资料，需要说明的是，尽管气象数据库的总站点数是 633 个，但选定的日子里有观测资料的气象站点只有 350 个。

3.1 插值参数

上述关于气象要素空间插值算法中有四个参数，分别是初始截断距离 R_0 、计算截断距离 R_p 的递归循环次数 M 、目标点邻域内平均测值点数 N 以及高斯形态系数 α 。计算表明，气象要素的插值误差对初始截断误差 R_0 的选取并不敏感，因此， R_0 的选取依据是对每个插值目标点只要能够保证在其相应邻域内第一次计算测值点分布密度时至少有一个测值就行。根据中国大陆气象观测站点的地理分布格局，为了满足交叉验证的需要，本研究选取 $R_0 = 250$ km。另外，我们发现循环次数 $M > 3$ 并不比 $M = 3$ 时生成更加平滑的截断距离 R_p ，因此取循环次数 M 为 3。

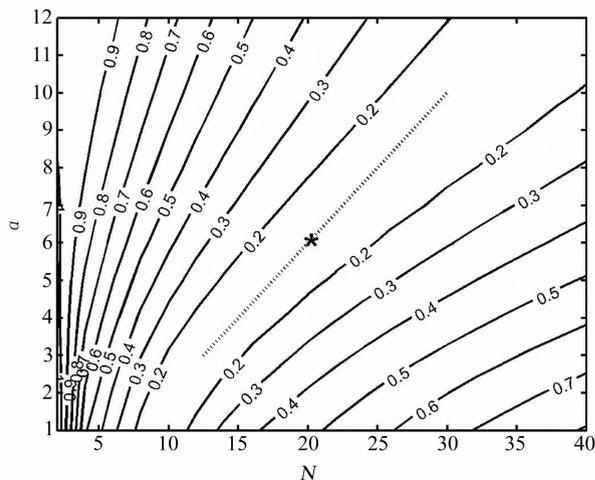


图 1 插值平均绝对误差随高斯形态系数 α 和平均测值点数 N 的等值线图。虚线：估计的最小误差所在区域；*：选取的最佳参数所在位置

Fig. 1 Contour of mean absolute error (MAE) plotted against Gaussian shape parameter (α) and average number of stations with non-zero weights (N). Dashed: the places of minimum predicted MAE; *: the best location for the selected parameters, α and N

至于另外两个参数，高斯形态系数 α 和平均测值点数 N ，图 1 给出了插值平均绝对误差随它们变化的等值线分布图。从图 1 可以看出，平均绝对误差随 α 和 N 的变化都非常敏感，经过坐标对 (12, 3) 和 (30, 10) 的一条直线是其最小值所在区域，显然较小的插值站点数可以节省插值计算所需的时间，所以，本文选取 $N = 20$ 和 $\alpha = 6.0$ 来进行气温的插值运算。Thornton 等^[1]对美国西北部地区进行温度插值时使用的 N 为 30， α 为 3.0，这说明针对不同的测站地理分布和不同的地形条件，插值参数应该选取不同的数值。

给定气温插值的四个参数以后，结合各个气象观测站点的地理位置分布，通过循环计算，最终可以求出对每一个气象站点进行空间插值的具体截断距离 R_p 和所使用周围站点的数目 N ，结果如图 2 所示。不难看出，在我国中东部地区气象站点相对密集，每一个测站的有效影响区域即 R_p 较小(多数小于 500 km)，其截断距离范围内的气象站点数也比较接近平均数 20；而在我国西部气象站点较为稀疏的地区，各站点的插值截断距离 R_p 都相应比较大，有些甚至达到 1000 km 以上，其截断距离范围内的气象站点数大部分也少于平均数，最西部边疆的几个观测站点插值所需的气象站点数只有 10 个左右。 R_p 和 N 的这种合理分布，充分反映了最近邻域法和反向距离法的基本原理：既实现了在测值点密集区截断距离 R_p 的合理减小和测值点稀疏地区 R_p 的适当增大，又不会破坏插值结果的空间连续性。

3.2 插值结果

将 2000 年 6 月 29 日全国 350 个有观测记录的气象观测站每日 4 次的常规地面气温观测资料做平均，得到各站点的日平均气温，然后参照交叉验证法的基本原理，利用上述插值方法估算每一站点的气温值，最后给出估算值与实测值的比对结果。同时，为了验证高度订正对气温插值的显著性，我们分别用(5)式和(6)式计算高度订正前后的插值结果(如图 3 所示)。可以看出，该插值方法能够很好地再现中国区域各观测站点气温值。显然，插值算法中没有进行高度订正的估算结果比较离散，而经过高度订正后的估算结果比较集中，靠近 1:1 直线，也就是说经过高度订正后的插值结果得到明显改善。通过相关系数的比较也能说明这一事实：没有

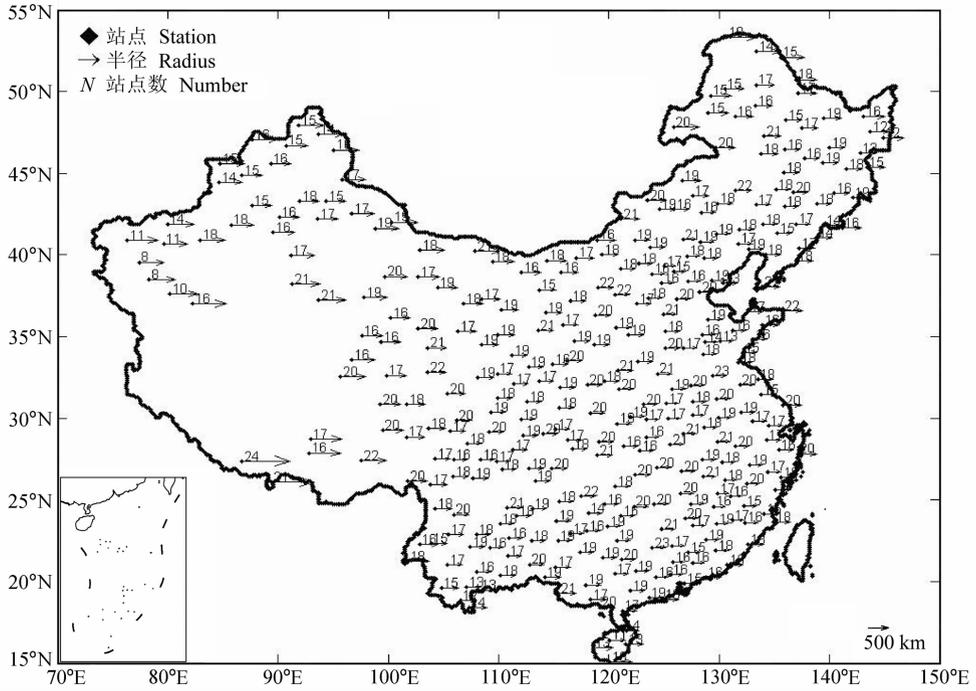


图 2 各气象站点插值截断距离 R_p 和插值所需站点数目 N 的分布图

Fig. 2 Distribution of the truncation distance (R_p) and the needed number of stations (N) for interpolation at each weather station in China

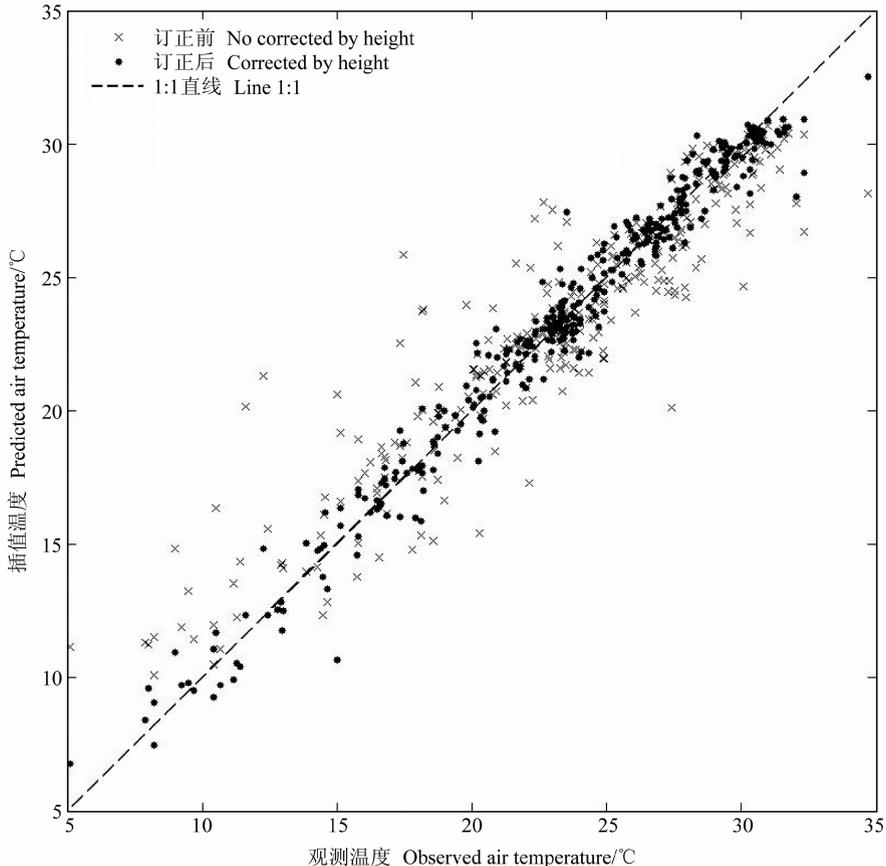


图 3 2000 年 6 月 29 日平均气温的估算和观测的对比

Fig. 3 Comparison of predicted daily mean air temperature and the observation on 29 Jun 2000

表 1 2000 年 6 月 29 日全国 350 个站点平均气温插值结果交叉验证误差统计表(单位:℃)

Table 1 Cross-validation error statistics for predictions of daily air temperatures averaged over 350 stations on 29 Jun 2000 in China (units: °C)

	高度订正前 No corrected	高度订正后 Corrected by height
平均误差 Mean error	-0.0214	-0.0206
平均绝对误差 Absolute mean error	1.4062	0.6847
平均误差平方的平方根 Root of mean square interpolation error	2.0337	0.9328
误差的中值 Median error	-0.0671	0.0468
绝对误差的中值 Absolute median error	0.9864	0.5218
绝对误差的最大值 Absolute maximum error	9.0770	4.3321
绝对误差的最小值 Absolute minimum error	0.0008	0.0013

进行高度订正的估算值与实测值的相关系数为 0.933, 尽管满足信度系数为 0.01 的信度检验, 但经过订正后相关系数高达 0.986, 从而更加接近各气象观测站点的实测值。这说明气温随高度的变化对插值结果的影响是十分明显的。

3.3 误差验证

表 1 给出了高度订正前后插值运算的交叉验证

结果。尽管平均误差在经过高度订正前后差异不大, 但平均绝对误差和平均误差平方的平方根都得到了显著的改善, 它们在经过高度订正后结果缩小了一半以上。这说明无论从估计值可能的误差范围, 还是从估计值灵敏度和极值效应来看, 经过高度订正后插值方法得到了极大的改进。另外, 单从平均绝对误差的结果来看, 经高度订正后的插值效果比林忠辉等^[8]给出的三种插值方法对中国陆地区域进行的温度插值都为优越。

为了更全面地了解本文所提出算法的插值效果, 我们还分别计算了订正前后插值误差的中值和插值绝对误差的中值、最大值、最小值, 结果全部列在表 1 中。可以看出, 几乎各种统计量都能体现温度空间插值对高度的影响非常明显, 换句话说, 在进行温度的空间插值运算时, 必须对其进行高度订正。

采用前文给定的插值参数 R_0 、 M 、 N 以及 α , 我们对 1999 年 365 天全国 381 个地面观测站的地面气温进行了插值计算, 然后分季节进行平均, 试图通过交叉验证给出插值误差的季节分布, 结果列在表 2 中。综合来看, 除了插值效果在经过高度订正后得到较大改善外, 插值误差也存在季节差异: 夏季最小, 秋季次之, 比较而言冬季为最大。造成这种季节差异的原因可能是由于全国各地不同气象站点夏季气温差距较小、冬季气温差距较大的缘

表 2 1999 年 381 个气象站点插值误差季节分布统计表(单位:℃)

Table 2 Cross-validation error statistics for seasonal variations of air temperature averaged over 381 stations within China in 1999 (units: °C)

	高度订正前 No corrected				高度订正后 Corrected by height			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
ME	-0.0415	-0.0001	-0.0184	-0.0188	-0.0502	-0.0089	-0.0271	-0.0276
AME	1.4332	1.3462	1.3131	1.4327	0.8242	0.6762	0.7772	1.0742
RMSIE	2.0693	1.9719	1.8853	2.0318	1.1364	0.9224	1.0819	1.5449
MDE	0.0976	0.1530	0.1356	0.1146	-0.0691	-0.0117	-0.0325	-0.0622
AMDE	0.9434	0.8837	0.8939	1.0009	0.6000	0.5104	0.5786	0.7526
AMAXE	9.7151	9.2351	9.11141	1.2877	5.1112	4.2475	5.8297	7.7618
AMINE	0.0043	0.0037	0.0037	0.0045	0.0028	0.0026	0.0026	0.0032

注: ME:平均误差; AME:平均绝对误差; RMSIE:平均误差平方的平方根; MDE:误差的中值; AMDE:绝对误差的中值; AMAXE:绝对误差的最大值; AMINE:绝对误差的最小值

Note: ME; Mean Error; AME; Absolute Mean Error; RMSIE; Root of Mean Square Interpolation Error; MDE; Median Error; AMDE; Absolute Median Error; AMAXE; Absolute Maximum Error; AMINE; Absolute Minimum Error

故。另外,我们还计算了不同季节插值计算温度和实测温度的相关系数,没有进行高度订正时春、夏、秋、冬各季的相关系数分别为 0.9560、0.9370、0.9678 和 0.9798;经过高度订正后它们分别提高为 0.9876、0.9861、0.9898 和 0.9880,这也进一步说明进行高度订正对气温插值的重要性。值得注意的是,不论有无高度订正,单从相关系数的数值而论,都是夏季最小,秋冬季最大。但这并不说明插值方法在夏季最差,恰恰相反,这在另一个侧面印证了造成插值误差季节差异的原因的合理性,因为相关系数仅仅揭示两组样本之间位相的一致程度,而无法体现两样本之间数据的差异程度。秋冬季节不同站点气温差异较大,即使插值误差较大,但基本步调不会改变,所以造成相关系数较大的事实;夏季则不然,不同站点本来气温差异就不大,较小的插值误差就会减弱其相关性。另外,夏季的相关系数在高度订正前后提高幅度最大也正好说明了高度订正对气温插值的敏感性。

4 讨论

在全国范围内,处在不同地理位置的气象站点大气温度随高度的变化比较复杂,在英国,报道的数据为 $-0.0059 \sim -0.0074 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}^{[12]}$,在加拿大北部,报道的范围为 $-0.005 \sim -0.01 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}^{[13]}$,林忠辉等^[8]给出了中国陆地区域海拔高度对地面气温度的回归系数范围为 $-0.0033 \sim -0.0048 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 。因此,用标准绝热下降速率 -0.006 来简单地预测温度随海拔高度的变化,结果会使估计温度偏低。

本文只是以地面气温为例对插值方法进行了详细的论述和误差分析,与气温的插值计算类似,通过选取合理的高斯形态系数 α 和所需站点数 N ,同样可以对其他地面气象要素进行插值。另外,该插值方法不仅可以指定站点进行插值以弥补气象业务中的观测资料的缺测,还可以对均匀网格点进行插值以用于对水文、生态、气候等数值模式提供初始条件。

参考文献 (References)

- [1] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J. Hydel.*, 1997, **190**: 214~251
- [2] Luo Z, Wahba G, Johnson D R. Spatial-temporal analysis of temperature using smoothing spline ANOVA. *J. Climate*, 1998, **11**(1): 18~28
- [3] Snell S E, Gopal S, Kaufman R K. Spatial interpolation of surface air temperatures using artificial neural networks: Evaluating their use for downscaling GCMs. *J. Climate*, 2000, **13**(5): 886~895
- [4] 孙和平, 罗少聪. 中国及其邻区地表气象数据预处理和网格化数值结果分析. 地壳形变与地震, 1998, **18**(3): 51~56
Sun Heping, Luo Shaocong. Preprocessing of the surface meteorological data in China and its neighbor area and analysis of the gridding numerical results. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1998, **18**(3): 51~56
- [5] Phillips D L, Dolph J, Marks D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agric. For. Meteorol.*, 1992, **58**: 119~141
- [6] Robeson S M, Janis M J. Comparison of temporal and unresolved spatial variability in multiyear time—averages of air temperature. *Climate Res.*, 1998, **10**(1): 15~26
- [7] Price D T, Mckenny D W, Nalder I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, **101**: 81~94
- [8] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值. 地理学报, 2002, **57**(1): 47~56
Lin Zhonghui, Mo Xingguo, Li Hongxuan, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57**(1): 47~56
- [9] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较. 地球科学进展, 2000, **15**(3): 260~265
Li Xin, Cheng Guodong, Lu ling. Comparison of spatial Interpolation methods. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15**(3): 260~265
- [10] Running S W, Nemani R R, Hungerford R D. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. *Can. J. For. Res.*, 1987, **17**: 472~483
- [11] Holdaway M R. Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using Kriging. *Climate Res.*, 1996, **6**: 215~225
- [12] Lennon J J, Turner J R G. Predicting the spatial distribution of climate: Temperature in Great Britain. *J. Anim. Ecol.*, 1995, **64**: 370~392
- [13] Nalder I A, Wein R W. Spatial interpolation of climate normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, **92**: 211~225