

刘焕莉,范增禄,韩明稚,等.基于 ANUSPLIN 的京津冀区域逐日气温格点数据集建立方法研究[J].海洋气象学报,2020,40(3):111-120.

LIU Huanli, FAN Zenglu, HAN Mingzhi, et al. Research on method of establishing Beijing-Tianjin-Hebei Daily Air Temperature Grid Data Set based on ANUSPLIN[J].Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(3): 111-120. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.012. (in Chinese)

基于 ANUSPLIN 的京津冀区域逐日气温 格点数据集建立方法研究

刘焕莉,范增禄,韩明稚,田国强
(河北省气象信息中心,河北 石家庄 050021)

摘要: 为建立一个高精度、高空间分辨率的逐日气温格点数据集,满足公共气象服务对于精确信息及实时信息的需要,利用 2018 年 6—8 月京津冀区域以及临近省区共 3 974 个国家级及区域气象观测站质控后的逐日气温资料,采用 ANUSPLIN 软件对逐日气温数据进行空间内插,得到了京津冀区域逐日气温格点数据集($0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$),并分别利用反距离权重插值法、普通克里金插值法、样条函数法对逐日气温数据进行空间插值,采用相关系数(Corr)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)等作为评估指标来检验插值精度。结果表明:1) ANUSPLIN 软件满足了空间插值对精度及曲面平滑度的要求,能直观体现京津冀区域气温由北向南递增的空间分布特征;2) 4 种插值方法中,基于 ANUSPLIN 软件的插值结果最优,相关系数平均达 0.97,其样本误差在 1°C 之内占比为 90.59%,MAE 为 0.46°C ,MRE 为 1.81%;3) 插值误差较大的区域位于冀北高原、燕山丘陵及太行山脉一带,高海拔、低站点密度等是造成插值误差的主要原因。基于 ANUSPLIN 插值方法建立的逐日气温格点数据集具有分辨率高、空间插值误差小的优势,ANUSPLIN 对气温的空间分布具有较好的预测能力。

关键词: ANUSPLIN; 气温; 格点数据集; 空间插值; 评估指标

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)03-0111-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.012

Research on method of establishing Beijing-Tianjin-Hebei Daily Air Temperature Grid Data Set based on ANUSPLIN

LIU Huanli, FAN Zenglu, HAN Mingzhi, TIAN Guoqiang
(Hebei Meteorological Information Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract In order to establish a daily air temperature grid data set of high precision and high spatial resolution to meet the need of public meteorological services for accurate and real-time data, the Beijing-Tianjin-Hebei Daily Air Temperature Grid Data Set ($0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$) is obtained by spatial interpolation using ANUSPLIN based on the quality controlled daily temperature of 3 974 national and regional meteorological stations in Beijing-Tianjin-Hebei region and neighboring provinces from June to August 2018. The spatial interpolation of daily temperature data is also conducted using the IDW (inverse distance weighted), OK (ordinary kriging), and SPLINE (spline function) methods, and correlation coefficient (Corr), mean absolute error (MAE), and mean relative error (MRE) are selected as

收稿日期:2020-03-25; 修订日期:2020-05-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0300101)

作者简介:刘焕莉,女,硕士,工程师,主要从事气象资料处理与分析研究,524221796@qq.com。

通信作者:范增禄,男,高级工程师,主要从事气象资料开发与应用研究,506906006@qq.com。

indicators to evaluate the interpolation accuracy. The results are as follows. 1) ANUSPLIN meets the requirements of spatial interpolation for accuracy and smoothness and can visually reflect the spatial distribution of temperature increasing from north to south in Beijing-Tianjin-Hebei region. 2) Among the 4 interpolation methods, the interpolation result based on ANUSPLIN is the best as the mean correlation coefficient is 0.97, the sample error within 1°C accounts for 90.59%, MAE is 0.46 °C, and MRE is 1.81%. 3) The regions with large interpolation errors are located in the plateau of northern Hebei Province, hilly area of Yanshan Mountains, and Taihang Mountains. High altitude and low density of stations are the main reasons for the interpolation errors. In summary, the daily air temperature grid data set using the interpolation method based on ANUSPLIN has the advantages of high resolution and low spatial interpolation error, and ANUSPLIN performs better in predicting the spatial distribution of air temperature.

Key words ANUSPLIN; air temperature; grid data set; spatial interpolation; evaluation indicator

引言

空间插值是基于已知采样点的数据预测未知空间(点)数据值的过程^[1]。目前,常用的空间插值方法有反距离加权法、趋势面法、克里金插值法、薄盘样条插值法等,以及形式多样的多元线性回归方法等^[2],上述插值方法在本质上均基于一定的统计学模型,但在空间化模拟过程中各有不足,其差别主要表现在适用性、插值原理、空间分辨率等方面^[3]。因此,通过比较而选择一个合适的、适用于数据空间分布特点的插值方法是空间插值的关键^[4]。

20世纪90年代以来,以ANUSPLIN专用空间插值软件为代表的区域精细化插值方法在国内外得到广泛应用^[5-14]。如钱永兰等^[15]利用ANUSPLIN软件对中国境内667个基本、基准地面气象观测站1961—2006年逐日气温和降水数据进行插值,并将插值结果分别与反向距离权重法和克里金法插值结果进行对比,结果证明ANUSPLIN插值法对降水的插值误差较另外两种方法略大,而气温的插值效果则优于反向距离权重法和克里金法。刘志红等^[16]选择黄土高原中北部多沙粗砂区为研究区,利用ANUSPLIN方法对研究区内52个气象站近21 a月平均多种气象要素进行插值,结果证明在所有气象要素中,温度的空间插值误差最小,风速、水汽压的误差中等,日照时数和降雨量的误差较大。空间内插的精度与台站分布密度息息相关,赵煜飞等^[17]分析了不同台站密集度情况下插值的精度大小,得出台站密集程度越高,插值效果越好的结论。廖荣伟等^[18]利用ANUSPLIN、SHERPAD和OI插值方法对中国地面气温数据进行了网格化并

对插值精度进行了比较,得出了考虑高程的ANUSPLIN插值的综合评价较好。

以上研究多是基于长时间序列的国家级地面气象观测站气象要素进行插值,数据集空间分辨率多为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 和 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,高空间分辨率的格点数据具有规范的格式、易于分析、能更精细地表征空间分布特征等优点^[19]。鉴于温度、降水等要素具有明显的局地小气候特征^[20],需要高空间密度的观测站点来捕获数据,本文选取京津冀区域以及临近省共3 974个国家级及区域气象观测站,利用ANUSPLIN插值软件对2018年汛期6—8月逐日气温资料进行插值,得到了京津冀区域逐日气温 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ 格点数据集,并对数据集的质量进行检验评估。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域

研究区域选择京津冀地区(图1),京津冀地区位于华北平原北部,行政区域包括北京、天津、雄安新区及河北,地域面积21.6万 km^2 ,位于 $113.5^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $36^{\circ}\sim 42.3^{\circ}\text{N}$ 。西倚太行山与山西省为邻;北部与内蒙古自治区接壤;南部与河南、山东两省毗邻;东与辽宁省相接。京津冀区域地貌类型多样,平原、丘陵、盆地、山地、高原等地貌类型尽在其中,整体地势呈现西北高东南低的地形特点。区域内海拔2 000 m以上的山峰有10座,第一高峰位于张家口小五台山东台,海拔2 882 m^[21-22]。

1.2 数据来源

本文研究所使用的数据为 $113.4^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $36^{\circ}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 范围内2018年6—8月京津冀区域2 402个站点的逐日气温数据,为减弱边界效应造成

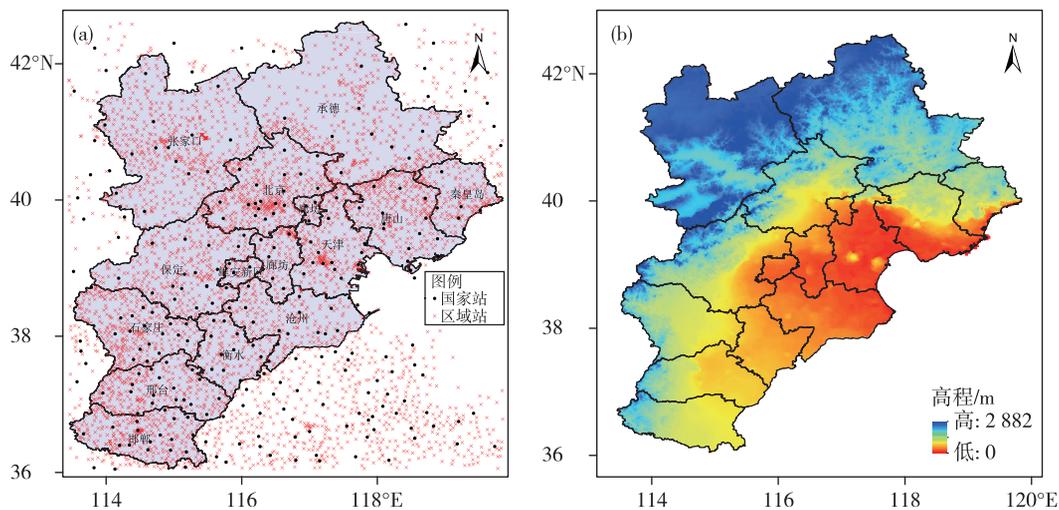


图1 研究区示意图(a.国家级和区域气象观测站分布;b.高程,填色,单位:m)

Fig.1 Location of the research area (a. distribution of national and regional meteorological stations; b. elevation in color shades, units: m)

的插值误差,引入临近省区(内蒙古、山西、山东、河南、辽宁)1 572个站点数据。数据来源于河北省气象信息共享平台,数据内容包括台站经纬度、海拔高度和日平均气温。数据的准确性对插值结果影响显著,因此原始数据均经过格式检查、缺测检查、界限值检查、内部一致性检查、时变检查、持续性检查等质量控制。

由于气温的空间分布与地形特征紧密相连,采用 ANUSPLIN 软件对研究区 2018 年 6—8 月逐日气温进行空间插值,为提高空间插值精度,减弱地形条件对气温空间插值精度的影响,真实反映研究区域气温的时空分布规律,引入高程数据 DEM^[23],分辨率为 1 km,通过数字高程模型提取地形特征因子(如海拔高度、坡向、坡度、地形遮蔽度等),利用 ArcGIS 将 DEM 数据转化成 ASCII 格式,作为协变量参与空间插值运算。

2 研究方法

2.1 空间插值方法

本文采用 ANUSPLIN 专用空间插值软件对京津冀区域气温站点资料进行空间插值,为评估 ANUSPLIN 软件的插值效果,以日平均气温为研究对象,综合比较基于多种插值方法的插值精度,确定最适合京津冀地区气温的插值方法。

2.1.1 ANUSPLIN 插值

ANUSPLIN 软件是基于普通薄盘和局部薄盘样条函数对多变量数据进行内插的工具,能同时进行多个表面的空间插值,适用于时间序列的气象数

据。ANUSPLIN 软件提供了完整的统计分析、数据诊断等功能,同时也支持多种数据输入和表面查询功能。

局部薄盘光滑样条(partial thin plate smoothing splines)是对薄盘光滑样条原型的扩展^[24],它除普通的样条自变量外允许引入线性协变量模型,如温度和海拔之间、降水和海岸线的关系等^[25]。

局部薄盘光滑样条的理论统计模型为:

$$z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

式中: z_i 是位于空间*i*点的因变量; x_i 是独立变量, f 是要估算的关于 x_i 的未知光滑函数; y_i 为独立协变量; b 为 y_i 的系数; e_i 为随机误差。

函数 f 和系数 b 通过公式(2)的值最小来获得,即由最小二乘法估计来确定:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{z_i - f(x_i) - b^T y_i}{w_i} \right]^2 + \rho J_m(f) \quad (2)$$

其中 $J_m(f)$ 是函数 $f(x_i)$ 的粗糙度测算函数,定义为 f 的 m 阶偏导, ρ 为光滑参数,在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用,在 ANUSPLIN 中通常用广义交叉验证 GCV 的最小化以及最大似然法 GML 的最小化来确定。

ANUSPLIN 程序共分为 8 个程序模块 (SPLINA, SPLINB, SELNOT, ADDNOT, DELNOT, GCVGML, LAPPNT, LAPGRD)。通过输入固定格式的数据文件,包含站号、经度、纬度、高程信息 (DEM 数据),再执行 ANUSPLIN 中的内置模块函数,最终输出插值后的数据结果,同时包含光滑参数 RHO、拟合数据误差列表文件(均值、标准差、方差等)、拟

合表面系数的协方差矩阵、误差表面等。薄盘光滑样条总共有 18 种插值模型选择（独立变量、协变量和样条次数多种组合）见表 1，根据不同气象要素选择合适插值模型。

表 1 薄盘光滑样条函数模型

Table 1 Model of thin plate smoothing spline function (SPLINE)

模型序号	变量和高程放大(缩小)尺度	样条次数	含义
1	经度, 纬度	2	双变量薄盘光滑样条函数
2	经度, 纬度	3	双变量薄盘光滑样条函数
3	经度, 纬度	4	双变量薄盘光滑样条函数
4	经度, 纬度, 高程作为协变量	2	三变量局部薄盘光滑样条函数
5	经度, 纬度, 高程作为协变量	3	三变量局部薄盘光滑样条函数
6	经度, 纬度, 高程作为协变量	4	三变量局部薄盘光滑样条函数
7	经度, 纬度, 高程(m)	2	三变量薄盘光滑样条函数
8	经度, 纬度, 高程(m)	3	三变量薄盘光滑样条函数
9	经度, 纬度, 高程(m)	4	三变量薄盘光滑样条函数
10	经度, 纬度, 高程(km)	2	三变量薄盘光滑样条函数
11	经度, 纬度, 高程(km)	3	三变量薄盘光滑样条函数
12	经度, 纬度, 高程(km)	4	三变量薄盘光滑样条函数
13	经度, 纬度, 高程(dm)	2	三变量薄盘光滑样条函数
14	经度, 纬度, 高程(dm)	3	三变量薄盘光滑样条函数
15	经度, 纬度, 高程(dm)	4	三变量薄盘光滑样条函数
16	经度, 纬度, 高程(cm)	2	三变量薄盘光滑样条函数
17	经度, 纬度, 高程(cm)	3	三变量薄盘光滑样条函数
18	经度, 纬度, 高程(cm)	4	三变量薄盘光滑样条函数

ANUSPLIN 最佳模型判断标准: GCV 或 GML 最小; 信噪比最小; 信号自由度小于站点的一半, 但不能过小以至于寻找不到最优光滑参数; 模型成功率判断中无“*”。

2.1.2 反距离权重方法

反距离权重插值基于相似相近原理, 即两个物体离得越近, 它们的值越相似, 反之, 则相似性越小。反距离权重(inverse distance weighted, IDW)方法以插值点和样点的距离为权重进行加权平均^[26], 算法如下:

$$z = \left(\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^p} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \right) \quad (3)$$

式中: z 为估算值; z_i 为第 d_i 个样点的观测值; d_i 为插值点到第 i 个样点的距离; n 为参与插值的样点数目; p 为用于计算距离权重的幂指数, 一般 $p=2$ 。

IDW 是根据点数据生成栅格图层的常用方法, 但它易受样本点极值的影响, 计算中常出现一种孤立点数据明显高于周围数据点的情况, 即“牛眼”现象。

2.1.3 普通克里金法

普通克里金(ordinary kriging, OK)法是从地统计学的克里格法中演化出的一种插值方法, 它以区域性变量理论为基础, 半变异函数为分析工具, 其

实质是利用半变异函数对未知样点进行线性无偏、最优估计。它不仅考虑预测点位置与已知数据位置的相互关系, 而且还考虑变量的空间相关性^[8]。算法如下:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (5)$$

式中: $z(x_0)$ 为 x_0 点的预测值, $z(x_i)$ 为 x_i 点的测量值, λ_i 为测量值对预测值的权重系数。

普通克里金法的优点是可估计测试参数的空间变异分布以及估计参数的方差分布, 但计算步骤繁琐, 计算量大, 且变异函数需要根据经验人为选定。

2.1.4 样条函数法

样条函数(spline function, SPLINE)法主要通过估计方差, 利用一些特征节点, 用多项式拟合的方法来产生平滑的插值曲线^[27]。算法如下:

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n A_i d_{i0}^2 \log d_{i0} + a + bx + cy \quad (6)$$

其中, $\hat{z}(s_0)$ 为 s_0 处的预测值, d_{i0} 为预测点 s_0 到第 i 个样点的距离, $a+bx+cy$ 为要素的局部趋势函数, $\sum_{i=1}^n A_i d_{i0}^2 \log d_{i0}$ 为一个基本函数, A_i 、 a 、 b 、 c 为方程系数。

样条函数插值法具有易操作, 插值速度快的优点, 但存在插值后误差不能直接估计, 采样点稀少时效果不好的缺点。

2.2 评估指标

为评估 ANUSPLIN 的插值效果, 选取空间分布均匀的 15% 站点作为检验站点 (检验站点不参与插值), 剩余站点作为插值站点, 检验站点分布见图 2。分别使用 IDW、OK、SPLINE 和 ANUSPLIN 进行插值, 使用最近距离法将插值的高分辨率资料匹配到京津冀区域各站点上, 得到了逐日气温空间插值数据集及实测数据集, 采用相关系数 (Corr)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、平均相对误差 (mean relative error, MRE) 等作为评估插值效果的指标, 讨论不同方法对气温插值结果的影响。

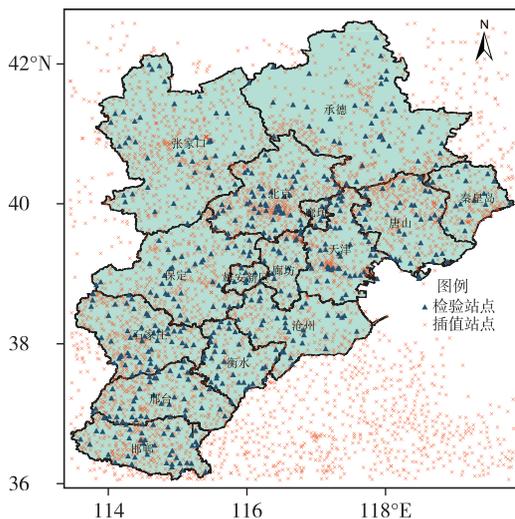


图2 插值站点与检验站点分布

Fig.2 Distribution of interpolation and inspection stations

3 结果与分析

3.1 插值结果与分析

依据 ANUSPLIN 最佳插值模型判断标准, 筛选出模型 7、模型 8、模型 9 为最优待用模型, 再分别用三个待用模型进行插值, 分析其误差分布, 确定气温的最优插值模型为模型 8。

图 3 为采用 4 种空间插值方法构建的 6、7、8 月每月 1 日的京津冀区域气温空间分布图, 通过比较

可以发现, ANUSPLIN 体现了引入 DEM 预测气温的优势, 插值结果光滑, 清晰反映出气温过渡变化的特点, 而 IDW、OK、SPLINE 在曲线平滑程度以及局部地区的空间分布具有一定差异, 其中 IDW、SPLINE 插值结果容易产生“牛眼”现象。因此, 在选取插值方法时, 应充分考虑空间特异性, 引入适当的影响因子, 充分分析数据, 才能对特定环境下的气象要素进行精确、合理的插值^[28]。

综上所述, 4 种插值方法获得的格点化气温数据均能直观体现京津冀区域气温由北向南递增的空间分布特征, 气温分界线沿太行山脉、燕山山脉, 分界线以北区域温度较以南平原地区气温低, 日气温最大值均出现在低海拔平原地区, 而最小值均出现在崇礼围场高海拔地区, 日气温整体呈现东南高西北低的趋势。究其原因是在影响气温分布的诸多因素中, 以海拔高度和地形影响最显著^[29-30]。

3.2 评估结果与分析

相关系数 (Corr) 可以用来表征预测值与实测值之间的相似程度, 用误差占比、MAE、MRE 作为评估指标来检验插值精度。相关系数检验结果如下: 由图 4 可以看出, 4 种插值方法得出的预测值与实测值相关性均较好, 相关系数均大于 0.86, ANUSPLIN 相关系数高于其他 3 种插值法, 相关系数平均达 0.97, IDW、OK 次之, 相关系数平均达 0.96, 而 SPLINE 略低, 相关系数平均达 0.95。

基于 IDW、OK、SPLINE 和 ANUSPLIN 软件插值的结果有一定差距, 通过计算预测值与实测值的误差占比、MAE、MRE 作为检验插值精度的标准, 可以看出, 不同插值方法的 MAE、MRE、误差占比并不相同 (图 5、图 6、表 2)。由表 2 可见, 4 种插值方法中, 基于 ANUSPLIN 软件的插值结果最优, 其次为 IDW、OK, 基于 SPLINE 的气温插值结果最差。

在气温插值误差空间分布方面, 插值误差较大的站点分布在冀北高原燕山丘陵及太行山脉高海拔地区, 而平原地区则误差较小, 其原因可能是冀北高原燕山丘陵及太行山脉一带站点稀少且海拔较高, 贾洋和崔鹏^[11]的研究也证明 ANUSPLIN 插值精度主要受海拔影响, 同时站点密度也是造成插值误差的原因之一^[31]。

综上所述, 4 种插值方法在京津冀区域插值精度为 ANUSPLIN > IDW > OK > SPLINE, 基于 ANUSPLIN 软件的插值方法更加适合京津冀区域的逐日气温空间插值。

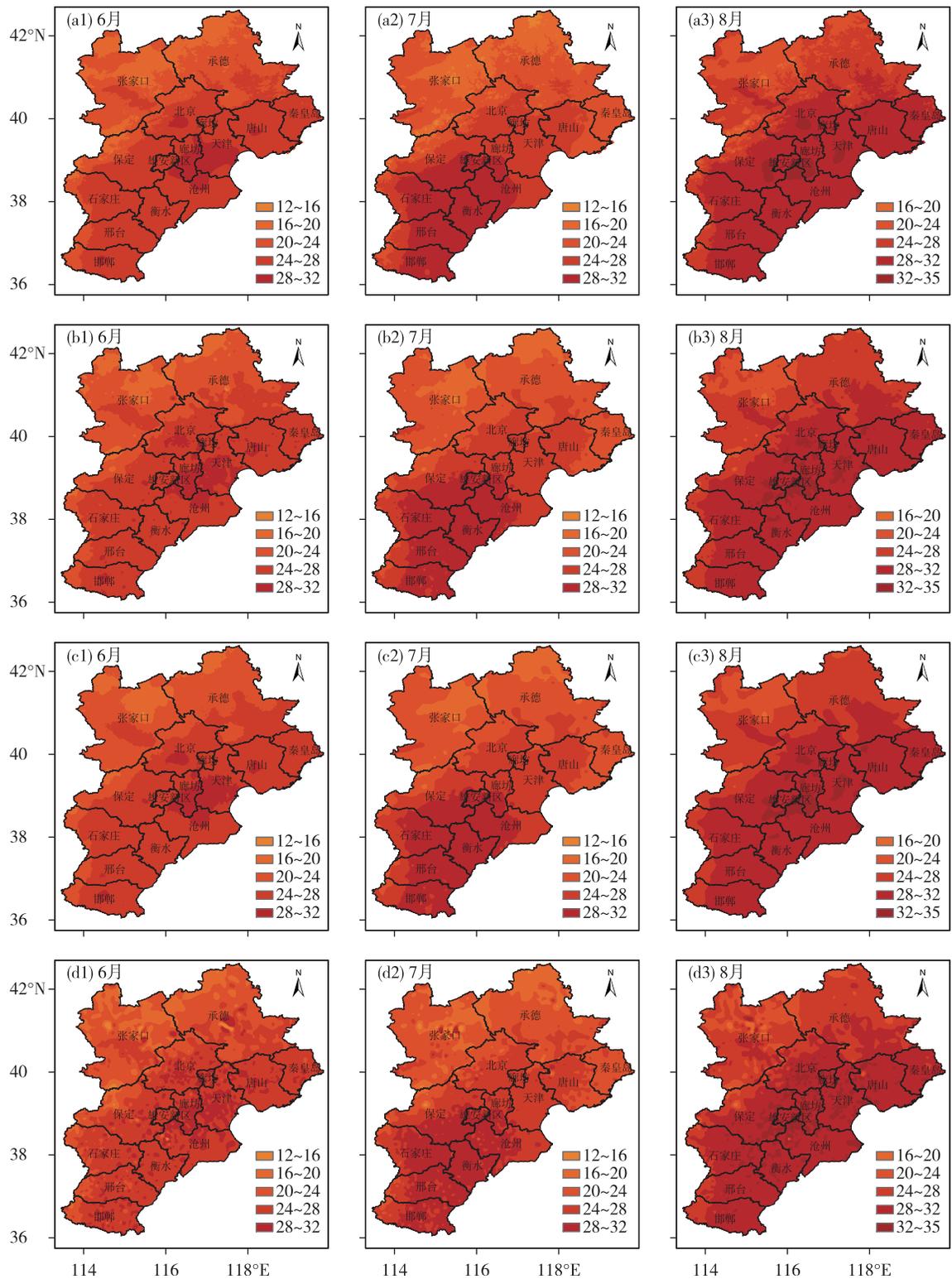


图3 日平均气温空间分布(a. ANUSPLIN, b. IDW, c. OK, d. SPLINE;单位:°C)

Fig.3 Spatial distribution of daily mean temperature (a. ANUSPLIN, b. IDW, c. OK, d. SPLINE; units: °C)

4 结论与讨论

本文使用京津冀区域以及临近省区2018年国家及区域气象观测站日气温数据,采用

ANUSPLIN 研制京津冀区域逐日气温格点数据集,并与 IDW、OK、SPLINE 插值方法进行对比分析,得出以下结论:

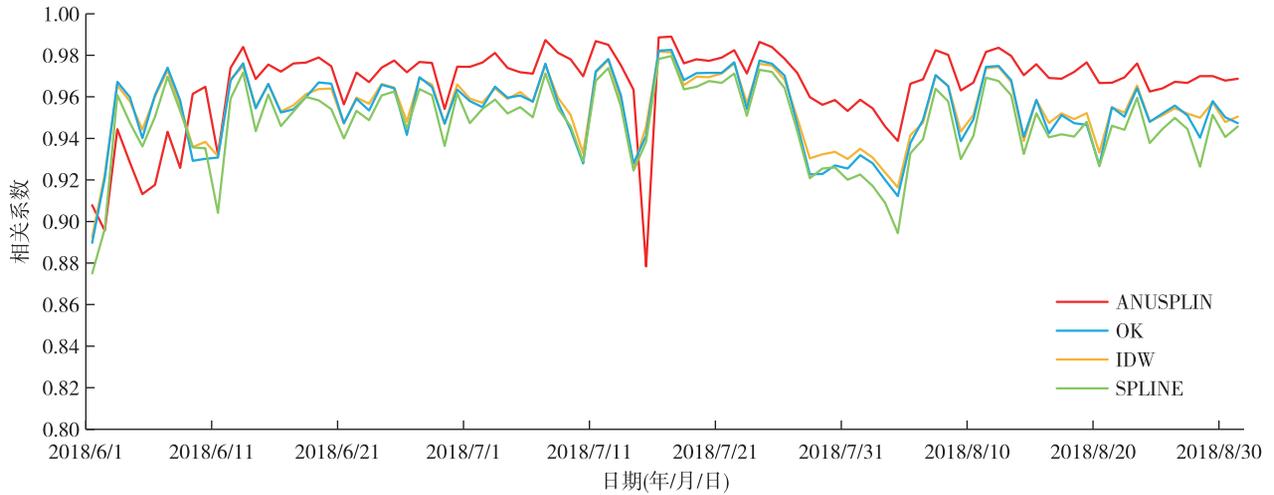


图4 基于不同插值方法的相关系数分布(红色线为 ANUSPLIN,蓝色线为 OK,黄色线为 IDW,绿色线为 SPLINE)
 Fig.4 Correlation coefficients based on different interpolation methods (red, blue, yellow, and green line for ANUSPLIN, OK, IDW, and SPLINE, respectively)

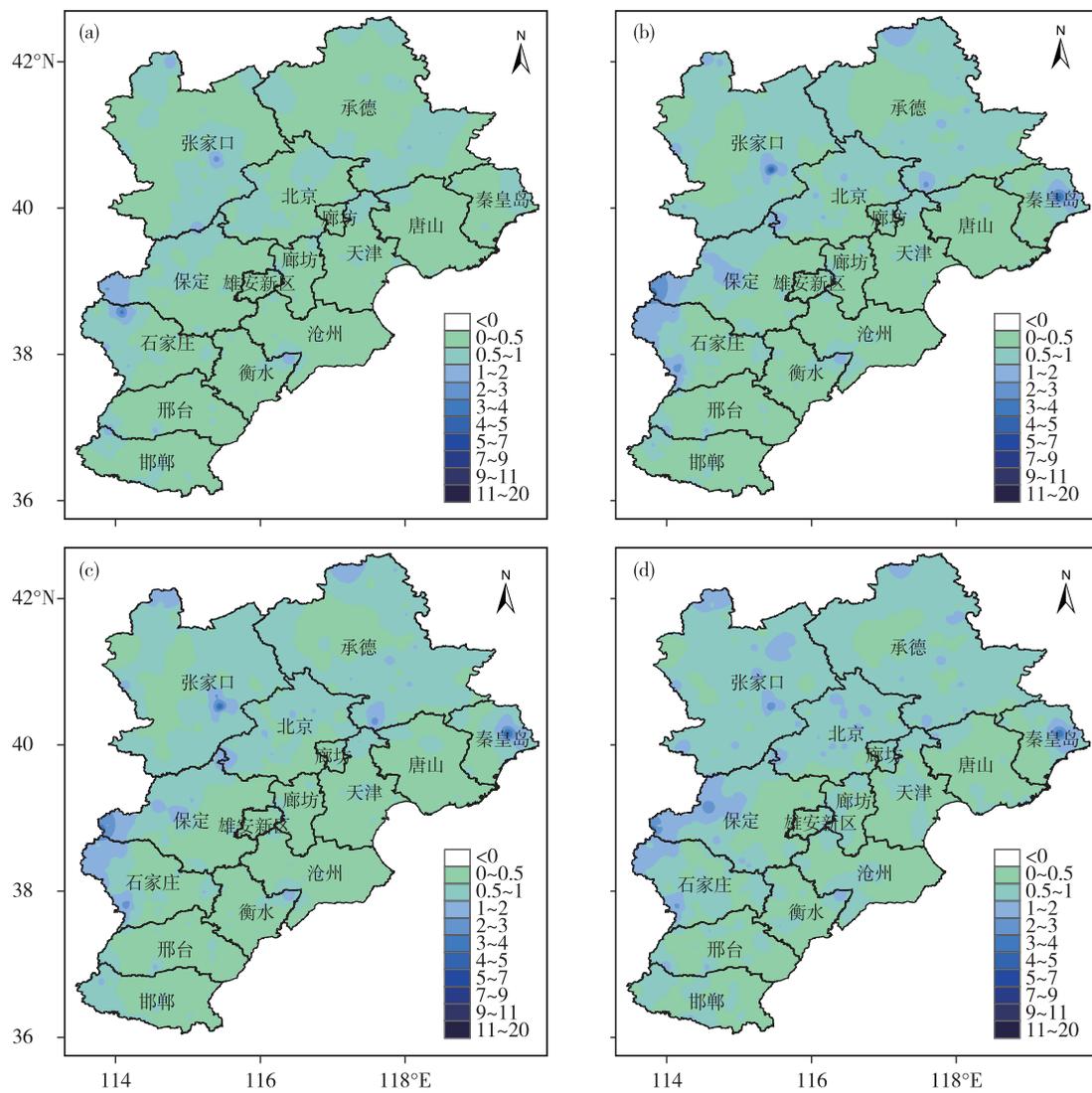


图5 平均绝对误差空间分布(a. ANUSPLIN, b. IDW, c. OK, d. SPLINE;单位:℃)
 Fig.5 Spatial distribution of MAE (a. ANUSPLIN, b. IDW, c. OK, d. SPLINE; units: ℃)

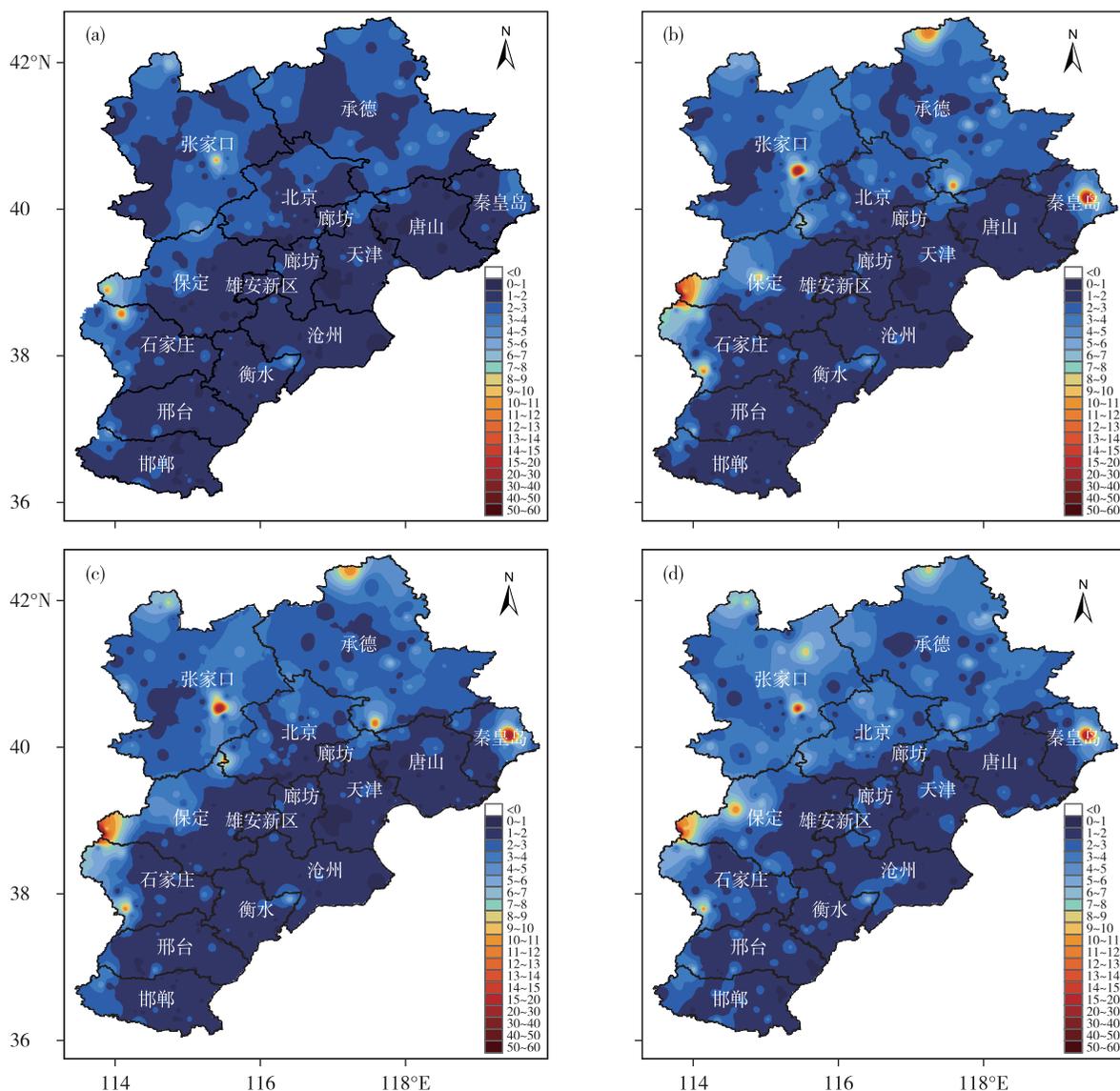


图6 平均相对误差空间分布(a. ANUSPLIN, b. IDW, c. OK, d. SPLINE;单位:%)

Fig.6 Spatial distribution of MRE (a. ANUSPLIN, b. IDW, c. OK, d. SPLINE; units: %)

表2 误差参数分析

Table 2 Analysis of parameter errors

插值方法	$ \text{误差} \leq 1 \text{ } ^\circ\text{C}/(\%)$	$1 \text{ } ^\circ\text{C} < \text{误差} \leq 2 \text{ } ^\circ\text{C}/(\%)$	$ \text{误差} > 2 \text{ } ^\circ\text{C}/(\%)$	平均绝对误差/ $(^\circ\text{C})$	平均相对误差/ $(\%)$
ANUSPLIN	90.59	7.99	1.42	0.46	1.81
IDW	86.79	10.38	2.83	0.53	2.17
OK	86.57	10.67	2.76	0.54	2.19
SPLINE	82.39	14.15	3.46	0.60	2.43

1) 基于4种插值方法对京津冀区域逐日气温数据进行插值的结果表明,ANUSPLIN插值结果与数字高程模型极为相似,插值效果优于IDW、OK、SPLINE,精度更高、光滑度更好。

2) 通过计算预测值与实测值的相关系数(Corr)、MAE、MRE等作为检验插值精度的标准,4种插值方法得出的预测值与实测值相关性均较好,在站点密度足够高的前提下,各种插值方法用于同一组数据的插

值结果差异不大,而插值误差则存在差异,综合评估,ANUSPLIN 的插值结果最优,其次为 IDW,再次为 OK,基于 SPLINE 的气温插值结果最差,ANUSPLIN 最适用于京津冀区域逐日气温插值。

3) 京津冀区域逐日气温插值误差较大的站点分布在冀北高原、燕山丘陵及太行山脉一带,平原地区误差较小,海拔及站点密度是影响 ANUSPLIN 插值精度的因素之一。

综合分析,引入 DEM 的 ANUSPLIN 插值效果最优,但由于受模型本身的局限,本文只选择了经度、纬度和高程(m)三项作为自变量,没有考虑更多影响局地气温变化的因素,建议在后续的研究中,针对不同长度的时间序列、海拔、地形、DEM 误差等因素开展更深入的研究。同时在验证插值精度时,仅采用了相关系数(Corr)、MAE、MRE 几个误差指标进行简单验证,考虑到插值过程中会平滑掉一些极端值,在后续的研究中,应尽可能选取更多的误差指标及气温特征值进行验证,全面衡量插值精度。

参考文献:

- [1] 张海平,周星星,代文.空间插值方法的适用性分析初探[J].地理与地理信息科学,2017,33(6):14-18.
- [2] 李彦,王丽娜,蒋镇.一种针对气象要素的空间插值算法[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2014,28(6):94-98,116.
- [3] 李月臣,何志明,刘春霞.基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J].地理科学进展,2014,33(8):1019-1028.
- [4] 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):260-265.
- [5] HUTCHINSON M F. The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation [R]//JASPER J D. Data Assimilation Systems, BMRC Research Report No. 27. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991:104-113.
- [6] THORNTON P E, RUNNING S W, WHITE M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain [J]. J Hydrol, 1997, 190(3/4):214-251.
- [7] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. Int J Climatol, 2005, 25(15):1965-1978.
- [8] 蔡福,明惠青,刘兵,等.采用地统计学和 GIS 技术对东北地区不同时期降水的分析[J].中国农业气象,2006,27(4):296-299,304.
- [9] 陈思宁,郭军.不同空间插值方法在区域气温序列中的应用评估:以东北地区为例[J].中国农业气象,2015,36(2):234-241.
- [10] 谭剑波,李爱农,雷光斌.青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J].高原气象,2016,35(4):875-886.
- [11] 贾洋,崔鹏.高山区多时间尺度 Anusplin 气温插值精度对比分析[J].高原气象,2018,37(3):757-766.
- [12] 徐金勤,邱新法,曾燕,等.浙江茶叶春霜冻害的气候变化特征分析[J].江苏农业科学,2018,46(22):101-105.
- [13] 徐翔,许瑶,孙青青,等.复杂山地环境下气候要素的空间插值方法比较研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2018,52(1):122-129.
- [14] WEN H Y, CHEN F J, LI J, et al. A study on spatial interpolation of temperature in Anhui Province based on ANUSPLIN [J]. Meteor Environ Res, 2019, 10(2):51-55,60.
- [15] 钱永兰,吕厚荃,张艳红.基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J].气象与环境学报,2010,26(2):7-15.
- [16] 刘志红,McVICAR T R,LI L T,等.基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(10):227-234.
- [17] 赵煜飞,朱江,许艳.近 50 a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J].气象科学,2014,34(4):414-420.
- [18] 廖荣伟,曹丽娟,张冬斌,等.中国地面气温和降水网格化数据精度比较[J].气象科技,2017,45(2):364-374.
- [19] 邱新法,仇月萍,曾燕.重庆山地月平均气温空间分布模拟研究[J].地球科学进展,2009,24(6):621-628.
- [20] 车军辉,赵勇,石振彬.精细化要素客观预报中的站点差异性研究[J].海洋气象学报,2019,39(2):106-116.
- [21] 郭军,熊明明,黄鹤.京津冀地区暖季降水日变化特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(2):58-67.
- [22] 张竞,杜东,白耀楠,等.基于 DEM 的京津冀地区地形起伏度分析[J].中国水土保持,2018(9):33-37.
- [23] 李志林,朱庆.数字高程模型[M].武汉:武汉大学出版社,2001:1-10.
- [24] BATES D M, LINDSTROM M J, WAHBA G, et al. Gcvpack: Routines for generalized cross validation [J]. Commun Stat Simulat Comput, 1987, 16(1):263-297.
- [25] 刘志红,McVICAR T R,LI L T,等.基于 5 变量局部薄盘光滑样条函数的蒸发空间插值[J].中国水土保持科学,2006,4(6):24.
- [26] 姜晓剑,刘小军,黄芬,等.逐日气象要素空间插值方法的比较[J].应用生态学报,2010,21(3):624-630.
- [27] 黄杏元,马劲松,汤勤.地理信息系统概论[M].北京:高等教育出版社,2004:141-142.

- [28] 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.
- [29] 游松财,李军.海拔误差影响气温空间插值误差的研究[J].自然资源学报,2005,20(1):140-144.
- [30] 李丽,张正勇,刘琳,等.基于 DEM 的天山山区气温时空模拟研究[J].干旱区研究,2018,35(4):855-863.
- [31] 郑小波,罗宇翔,于飞,等.西南复杂山地农业气候要素空间插值方法比较[J].中国农业气象,2008,29(4):458-462.