

基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值

刘志红^{1,2}, Tim R. McVicar³, Li LingTao³, Tom G. Van Nie³,
杨勤科⁴, 李 锐⁴, 穆兴民⁴

(1 成都信息工程学院, 四川 成都 610225; 2 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225;
3 澳大利亚联邦科工组织水资源研究所, 堪培拉 2601 ACT; 4 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】介绍 ANUSPLIN 在黄土高原多沙粗沙区时间序列气象要素的空间插值过程, 为相关人员在 ANUSPLIN 的参数设置、误差分析和协变量要素选择等方面提供参考。【方法】以薄盘样条函数为插值理论, 以专用气象数据插值软件 ANUSPLIN 为实现工具, 并引入一个或多个协变量线性子模型, 来实现多个气象要素的空间插值。【结果】完成了黄土高原多沙粗沙区时间序列(1980~2000年)多个气象要素月平均数据的栅格化, 计算了气象要素随其影响因子变化的关系。【结论】ANUSPLIN 以薄盘光滑样条函数为理论基础, 引入协变量线性子模型, 能较好地提高气象要素空间插值精度, 且能反映气象要素随其影响因子变化的比率关系。在大多数情况下, 该区模型选择以样条次数为3次的局部薄盘光滑样条函数模型为最佳。温度的空间插值相对比较容易, 且误差较小, 1995-07 平均相对误差为1%; 风速、水汽压的误差中等; 日照时数和降雨量的误差较大, 个别情况相对误差可超过50%。

[关键词] ANUSPLIN; 时间序列; 气象要素; 空间插值

[中图分类号] O245

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2008)10-0227-08

Interpolation for time series of meteorological variables using ANUSPLIN

LIU Zhi-hong^{1,2}, Tim R. McVicar³, Li LingTao³, Tom G. Van Niel³,
YANG Qin-ke⁴, LI Rui⁴, MU Xin-min⁴

(1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China; 2 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding-KLAS, Chengdu, Sichuan 610225, China; 3 CSIRO Land and Water, Canberra 2601, ACT, Australia; 4 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The interpolation processes of the meteorological variables using the ANUSPLIN in coarse sandy hilly catchments of the loess plateau were introduced in this paper. It should be a useful reference for setting parameters, analyzing the errors and selecting the correct covariates. 【Method】In the interpolation of different meteorological variables, a professional interpolation package ANUSPLIN was used in which one or more influenced factors were introduced as covariate sub-models. 【Result】Time Series of monthly meteorological data from 1980 to 2000 on the geomorphologically complex Coarse Sandy Hilly Region in Loess Plateau were interpolated to surfaces, and the lapes rate of the meteorological variable changing with its influence factors were calculated. 【Conclusion】Based on the thin plate smoothing spline function, using multiple covariates as linear sub-models in addition to the independent spline variables, ANUSPLIN can develop the interpolation accuracy and reflect the rates between the meteorology variables and

[收稿日期] 2007-10-31

[基金项目] 中澳合作 ACIAR PROJECT(LWR1/2002/018); 中国科学院西部之光项目(B184/2004)

[作者简介] 刘志红(1967-), 女, 新疆沙湾人, 副教授, 博士, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究。
E-mail: wxzlh@163.com

their influenced factors, and especially adapt to time series of data. For the research area, partial thin plate smoothing spline model using one or more linear sub-models with 3 spline order is the best model for most meteorological variables. Temperature interpolation is easier with less error, for 1995-07 month, the mean relative error is about 1%, the interpolation errors for wind and vapor pressure are moderate, and higher for sunshine hour and rain in which max relative error reach 50% in some way.

Key words: ANUSPLIN; time series; meteorological variable; spatial interpolation

气候要素信息数据,是多种地学模型和气候学模型的基础。准确的气候信息空间分布数据,理论上可由高密度站网采集,而气象数据的观测主要依赖于气象台站,但目前气象台站空间分布不均(以县站为采集点)、密度不足(最少几十公里),问题十分突出。因此,站点外区域的气象数据通常只能由邻近站点的观测值进行估算,即气象信息空间插值。近年来,已有较多关于气象要素插值的专门探讨和研究^[1-5]。

空间数据内插就是根据一组已知的离散数据或分区数据,按照某种数学关系推求出其他未知点或未知区域数据的数学过程^[6]。目前常用的方法有最近邻近法(泰森多边形法)、移动平均法、样条函数法(spline法)、空间自协方差最佳插值法(Kriging法)等。样条函数法实际上是采用M次多项式对采样曲线进行分段修匀,其拟合过程相当于用灵曲板来绘制分段连续的曲线。薄盘光滑样条函数法(Thin plate smoothing spline, TPS)是对样条函数法的曲面扩展,常用于不规则分布数据的多变量平滑内插^[7],其利用光滑参数来达到数据逼真度和拟合曲面光滑度之间的优化平衡,保证了插值曲面光滑连续,且精度可靠。在所有方法中,基于统计插值技术的Kriging法和TPS法最为适用,这些技术建模时只将空间分布作为观测数据的函数,而不需要其先验知识和物理过程,能提高插值的准确度^[8]。Hutchinson等^[9]从理论上分析了样条法和kriging法的不同;Hartkamp等^[10]对比了2种方法,认为二者都容易扩展到多维空间,当半变异函数有好的选择效果和样条粗糙度稳定时,2种方法都能获得准确的插值效果,但考虑到误差估计、数据结构和计算的简便,建议在气候数据插值中使用样条法。另一方面,除了插值算法本身外,考虑多个影响因子的多变量模型,成为提高插值精度的一种主要途径^[3,11]。

针对气候数据曲面拟合的专用软件ANUSPLIN^[12]基于样条插值理论,同时其允许引进多元协变量线性模型,且模型系数可根据数据自动确定,

因此ANUSPLIN可以平稳地处理二维以上的样条,这就为引入多个影响因子作为协变量进行气象要素空间插值提供了可能。更为重要的是,它能同时进行多个表面的空间插值,对于时间序列的气象数据尤其适合。ANUSPLIN已在国际上得到广泛应用^[1,13-14],但在中国的使用仅限于与澳大利亚有合作的科研人员^[11,15-16],对其使用方法和协变量因子优选方案等介绍较少。本文详细介绍了ANUSPLIN在黄土高原多沙粗沙区时间序列气象要素的空间插值过程,以期对相关人员在ANUSPLIN的参数设置、误差分析和协变量要素选择等方面提供参考。

1 研究方法

1.1 ANUSPLIN的基本原理

ANUSPLIN基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论。局部薄盘光滑样条法是对薄盘光滑样条原型的扩展^[17],除普通的样条自变量外允许引入线性协变量模型,如温度与海拔、降水与海岸线之间的相关关系。

局部薄盘光滑样条的理论统计模型为:

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

式中: z_i 是位于空间*i*点的因变量; x_i 为*d*维样条独立变量, f 为需要估算的关于 x_i 的未知光滑函数; y_i 为*p*维独立协变量; b 为 y_i 的*p*维系数; e_i 为具有期望值为0且方差为 $w_i \sigma^2$ 的自变量随机误差,其中 w_i 为作为权重的已知局部相对变异系数, σ^2 为误差方差,在所有数据点上为常数,但通常未知^[13]。

由(1)式可见,当式中缺少第二项,即协变量维数*p*为0时,模型可简化为普通薄盘光滑样条;当缺少第一项独立自变量时,模型变为多元线性回归模型(ANUSPLIN中不允许这种情况出现)。

函数*f*和系数*b*可通过下式的最小化确定,即最小二乘估计确定:

$$\sum_{i=1}^N \frac{(z_i - f(x_i) - b^T y_i)^2}{w_i} + \rho J_m(f). \quad (2)$$

式中: $J_m(f)$ 为函数 $f(x_i)$ 的粗糙度测度函数, m 在

ANUSPLIN 中称为样条次数,也叫糙度次数; ρ 为正的光滑参数,在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用,通常由广义交叉验证 (generalized cross validation, GCV) 的最小化来确定,也可由最大似然估计 (generalised max likelihood, GML) 或期望真实平方误差 (expected true square error, MSE) 最小来确定^[12]。ANUSPLIN 中同时提供了 GCV 和 GML 2 种选择平滑参数的判断方法。

1.2 研究区域和数据基础

1.2.1 研究区域的选择

研究区选择黄土高原中北部多沙粗沙区(如图 1),行政区主要包括山西的西部、陕西的北部、甘肃的东北部、内蒙古中南部(清水河、准格尔等地区)和宁夏东南角小部地区,区域面积 112 728 km²,海拔 450~2 079 m,平均海拔 1 124 m,属半湿润-半干旱地区。该区沟壑纵横、地形破碎、土壤疏松、水土流失极为严重,是黄河泥沙的主要来源区。气候要素的变化是各种生态环境变化的基础,因此很有必要对这一地形复杂地区的气候要素进行时空变化动态研究,进一步了解该地区各种环境因素变化的规律,为区域内水土保持与植被恢复建设提供理论依据。

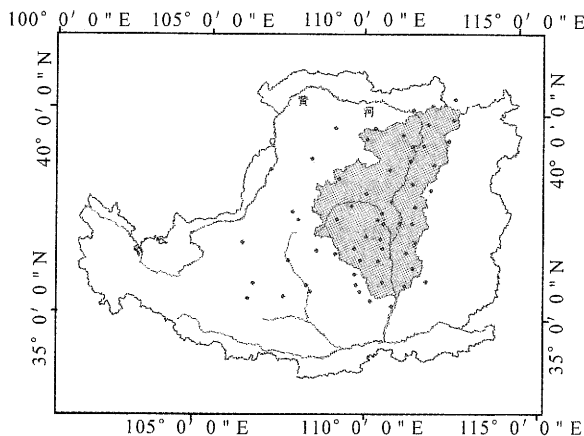


图1 研究区及气象站点示意图

■. 研究区; ·. 气象站

Fig.1 Location of the research area and meteorology station

■. Reearch area; ·. Meteorology station

1.2.2 数据资料

资料主要来源于研究区内(30个)及其周围(22个)共 52 个气象站 21 年(1980~2000 年)月平均多种气象要素数据以及 1:25 万数字地形图和土地利用图。

1.2.3 数据预处理

对所取得的气象数据、数字地形图、土地利用图等数据进行质量控制检查^[18],用相对湿度及最高、最低温度计算得到水汽压差 VPD^[15],用辐射模型及 SRAD(Solar Radiation)软件^[19-20]计算净辐射 R_n ^[15]。在 SRAD 中输入的参数

除了常规气象资料(最大、最小温度及晴空日照时数和水汽压)外,还包括地形参数(如坡度、坡向)、植被参数(地表反照率和叶面积指数)等。地表反照率和叶面积指数根据不同植被类型(土地利用图)不同生长时间进行设置^[15]。模型中 DEM 由数字地形图和 ANUDEM^[12]软件建立,其输出是“水文地貌关系修正的 DEM(hydrologically correct DEMs)”,与多要素构 TIN 方法建立的 DEM 相比,这种 DEM 能更真实、准确地反映地表形态^[21]。利用 DEM 在地理信息系统软件 ARCGIS 中生成坡度、坡向等地形参数。

1.3 插值模型的选择

1.3.1 选择依据

ANUSPLIN 软件能够支持输入数据的多种格式变换,可提供一系列用于判别误差来源和插值质量的统计参数和输出文件。

统计参数有观测数据平均值、方差、标准差、拟合曲面参数的有效数量估计 Signal(又称信号自由度)、剩余自由度 Error、光滑参数 RHO、广义交叉验证 GCV 和期望真实均方差 MSE、最大似然估计 GML、均方残差 MSR、方差估计 VAR 及其平方根;统计结果还给出了具有最大剩余残差(Root mean square residual)的数据点序列,用以检验并消除原始数据在位置和数值上的错误。

输出文件有光滑参数 RHO、拟合数据误差列表文件(贝叶斯标准误差、模型误差和置信区间)、曲面拟合系数的协方差矩阵及拟合曲面和误差表面。

Signal 指示了拟合曲面的复杂程度,RHO 平衡了拟合曲面的精确度与平滑度,RHO 过小和 Signal 大于观测站点的一半或者 RHO 过大,都预示着拟合过程找不到最优光滑参数,说明数据点可能过于稀疏、数据存在短相关或拟合函数太过复杂,因此所选模型不适合用于曲面插值,这些情况在 ANUSPLIN 中会以“*”符号标出。在按月进行曲面拟合时,Signal 的值应有平稳的月间过渡,明显地背离过渡趋势意味着该月插值曲面可能存在系统误差,它可用于数据的初步检验,通常表示数据中含有缺失数据^[16]。

最佳模型判断标准有 GCV 或 GML 最小、信噪比 SNR(信号自由度与剩余自由度之比)最小,剩余自由度大于站点的一半,模型成功率判断中无“*”号指示。

1.3.2 选择过程

对于时间序列气象要素的空间插值,既要保证每个表面的插值精度,又要保证插值模型的相对稳定性,使其在时间连续性上具有可比

性。在对研究区不同气象要素连续 21 年的月平均值进行曲面空间插值过程中,首先选取 1995 年的 12 个月进行试验(1995 年为平水年,年降雨量接近历年平均)。试验中采用了薄盘样条和局部薄盘样条函数的 18 个 Spline 模型(变量、协变量和样条次数多种组合),如表 1。通过统计参数比较,依据最

佳模型判断标准,初步选出每个气象要素的最优待用模型。再用这些待用模型进行 21 年 252 个月插值,判断其可行性,对个别模型通不过的月份,分析模型失败原因;利用残差分析,剔除个别残差较大的站点以使模型能够使用。

表 1 18 个待选薄盘光滑样条函数模型的选择

Table 1 Selection of 18 SPLINA models tested for each meteorological variable

模型序号 Version	变量 Variables	协变量 Covariate	样条次数 m Spline order	函数选择 Function selection
1	经度,纬度 Longitude,latitude		2	双变量薄盘光滑样条函数 BVTPS2
2	经度,纬度 Longitude,latitude		3	双变量薄盘光滑样条函数 BVTPS3
3	经度,纬度 Longitude,latitude		4	双变量薄盘光滑样条函数 BVTPS4
4	经度,纬度 Longitude,latitude	高程 Elevation	2	三变量局部薄盘光滑样条函数 TVPTPS2
5	经度,纬度 Longitude,latitude	高程 Elevation	3	三变量局部薄盘光滑样条函数 TVPTPS3
6	经度,纬度 Longitude,latitude	高程 Elevation	4	三变量局部薄盘光滑样条函数 TVPTPS4
7	经度,纬度,高程(m) Longitude,latitude,elevation		2	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS2
8	经度,纬度,高程(m) Longitude,latitude,elevation		3	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS3
9	经度,纬度,高程(m) Longitude,latitude,elevation		4	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS4
10	经度,纬度,高程(km) Longitude,latitude,elevation		2	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS2
11	经度,纬度,高程(km) Longitude,latitude,elevation		3	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS3
12	经度,纬度,高程(km) Longitude,latitude,elevation		4	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS4
13	经度,纬度,高程(dm) Longitude,latitude,elevation		2	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS2
14	经度,纬度,高程(dm) Longitude,latitude,elevation		3	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS3
15	经度,纬度,高程(dm) Longitude,latitude,elevation		4	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS4
16	经度,纬度,高程(cm) Longitude,latitude,elevation		2	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS2
17	经度,纬度,高程(cm) Longitude,latitude,elevation		3	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS3
18	经度,纬度,高程(cm) Longitude,latitude,elevation		4	三变量薄盘光滑样条函数 TVTPS4

对于最高温度(T_{max}),用初定的 18 个模型对研究区 1995 年 12 个月的数据进行试验显示:不管是用 GCV 还是 GML 校验方法,用高程作为协变量的 TVPTPS 模型都是最佳模型(如表 2)。在 12 个月中,以 GCV 为校验方法产生最小残差比 MRR 的月份有 9 个,对应局部样条函数的样条次数 $m=3$,另外 3 个月份的样条次数分别为 $m=2$ (1995-02 和 1995-03)和 $m=4$ (1995-11)。以 GML 为校验方法

产生最小残差比 MRR 的月份有 7 个,对应局部样条函数的样条次数 $m=3$,剩余 5 个月份的样条次数分别为 2 和 4。由此可见,选择以高程为协变量、样条次数为 3 的三变量局部薄盘光滑样条函数 TVPTPS3 模型,能保证大部分月份插值结果最为精确。在 252 个月 T_{max} 插值中发现,有 3 个月(1985-03,1995-03,1998-09)利用 TVPTPS3 模型插值失败后,采用 TVPTPS2 模型得到的效果很好。

表 2 1995 年月平均最高温度 ANUSPLIN 输出结果的 GCV 和 GML 校验比较

Table 2 Monthly comparisons of the ANUSPLIN output statistics for both the GCV and GML smoothing directive in 1995 for T_{max}

月份 Month	判断标准 Criterion	均值 Mean	标准差 SD	模型 Model	剩余 自由度 tr(I-A)	自由度 tr(A)	信噪比 SNR	广义交 叉验证 \sqrt{GCV}	均方 残差 \sqrt{MSR}	期望真 实误差 \sqrt{MSE}	方差 估计 \sqrt{VAR}
1	GCV	-0.397	2.78	TVPTPS3	45.3	12.7	0.280	0.728	0.569	0.301	0.643
	GML	-0.397	2.78	TVPTPS2	45.6	12.4	0.271	0.742	0.583	0.304	0.658
2	GCV	5.259	2.15	TVPTPS2	48.9	9.1	0.186	0.519	0.438	0.189	0.477
	GML	5.259	2.15	TVPTPS2	49.5	8.5	0.171	0.519	0.443	0.184	0.480
3	GCV	11.238	2.27	TVPTPS2	46.7	11.3	0.241	0.469	0.378	0.186	0.421
	GML	11.238	2.27	TVPTPS4	46.2	11.8	0.255	0.473	0.376	0.191	0.422
4	GCV	17.119	2.28	TVPTPS3	45.7	12.3	0.269	0.454	0.358	0.186	0.403
	GML	17.119	2.28	TVPTPS3	47.3	10.7	0.226	0.455	0.371	0.177	0.411
5	GCV	24.595	2.27	TVPTPS3	43.2	14.8	0.342	0.448	0.334	0.195	0.387
	GML	24.595	2.27	TVPTPS3	46.6	11.4	0.244	0.450	0.362	0.179	0.404

续表 2 Continued table 2

月份 Month	判断标准 Criterion	均值 Mean	标准差 SD	模型 Model	剩余 自由度 tr(I-A)	自由度 tr(A)	信噪比 SNR	广义交 叉验证 \sqrt{GCV}	均方 残差 \sqrt{MSR}	期望真 实误差 \sqrt{MSE}	方差 估计 \sqrt{VAR}
6	GCV	29.074	2.09	TVPTPS3	38.5	19.5	0.506	0.507	0.336	0.239	0.413
	GML	29.074	2.09	TVPTPS2	49.2	8.8	0.178	0.526	0.446	0.189	0.485
7	GCV	29.648	2.17	TVPTPS3	47.0	11.0	0.234	0.536	0.434	0.210	0.482
	GML	29.648	2.17	TVPTPS3	48.3	9.7	0.200	0.536	0.447	0.20	0.489
8	GCV	25.964	1.63	TVPTPS3	44.7	13.3	0.297	0.438	0.337	0.184	0.384
	GML	25.964	1.63	TVPTPS4	45.8	12.2	0.266	0.446	0.352	0.182	0.396
9	GCV	22.069	2.00	TVPTPS3	47.6	10.4	0.218	0.512	0.420	0.196	0.464
	GML	22.069	2.00	TVPTPS3	46.9	11.1	0.236	0.512	0.414	0.201	0.461
10	GCV	16.029	1.60	TVPTPS3	46.7	11.3	0.241	0.479	0.386	0.190	0.430
	GML	16.029	1.60	TVPTPS3	47.5	10.5	0.221	0.480	0.393	0.185	0.434
11	GCV	9.526	1.93	TVPTPS4	46.2	11.8	0.255	0.597	0.475	0.241	0.533
	GML	9.526	1.93	TVPTPS3	46.8	11.2	0.239	0.588	0.474	0.232	0.528
12	GCV	1.067	2.18	TVPTPS3	47.4	10.6	0.223	0.687	0.562	0.265	0.621
	GML	1.067	2.18	TVPTPS3	47.4	10.6	0.223	0.687	0.561	0.266	0.621

1.3.3 不同气象要素的最佳插值模型 参照月平均最高温度插值方法,对研究区的其他气象要素进行空间插值。经过分析对比,选择出不同气象要素的最佳模型,如表 3 所示。

表 3 不同气象要素空间插值的最佳模型

Table 3 Best SPLINA model for different meteorological Variables

气象要素 Meteorological Variable	模型 Model	独立变量 Variable	独立协变量 Covariate	数据转换方式 Transform	样条次数 Spline order
月平均最高气温 Monthly mean max air temperature	TVPTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	高程 Elevation		2,3
月平均最低气温 Monthly mean min air temperature	TVPTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	高程 Elevation		2,3
月平均风速 Monthly mean wind speed	TVPTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	高程 Elevation		2
月降雨量 Monthly precipitation	BVTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	无 No	平方根转换 Square root transform	2
水汽压 Monthly mean vapor pressure	TVPTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	高程 Elevation		2
月日照时数 Monthly sunshine hours	TVPTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	月温度范围 Range of temperature		2,3
净辐射 Net radiation	SRAD+TVPTS	经度,纬度 Longitude, latitude	年辐射,地表覆被,地形等 Annual radiation parameters, landform, topography		2,3
蒸发皿蒸发 Monthly pan evaporation	QVPTPS	经度,纬度 Longitude, latitude	净辐射,水汽压差,风速 Net radiation, water vapor difference, wind speed		2,3,4

表 3 显示,对于不同的气象要素,应采用不同的插值模型。在温度、风速、水汽压等的插值中,应用高程作为协变量;而在日照时数的插值中,应用月温度范围 $T_r(T_{max} - T_{min})$ 作为协变量;实际插值中,月降雨量与日照时数也有很好的相关性,但因降雨量的随机性与空间分布的不均匀性,且其数据值域范围较大,因此没有考虑用降雨量作为协变量;在蒸发的插值中用净辐射、水汽压差和风速作为协变量。对于月降雨量的空间插值,考虑到其随机性强与数据值域范围大的特点,对原始数据进行平方根变换降低数据值域范围,然后再用普通双变量薄盘样条函数 BVTPS(不考虑协变量)进行插值,结果证实其与 Hutchinson^[7,22] 推荐的结果一致。

2 结果与分析

2.1 黄土高原中北部多沙粗沙区温度要素插值结果及质量评价

图 2 为 ANUSPLIN 输出的研究区 1995-07 T_{max} 空间插值结果——温度趋势面,图 3 为其预测标准误差趋势面,栅格大小均为 100 m。从图 2 可以看出,1995-07 黄土高原多沙粗沙区月平均最高温度呈现出明显的地带性差异,南部高于北部,黄河沟谷地区高于其他地区,整个地区的变化在 23~35℃。该温度趋势面带有明显的 DEM 特征,这与常见的温度趋势面不太一样,表明温度随高程的梯度变化更为直观。图像中部黄河右边的白点是一座最高海拔

约 1 800 m 的紫金山山脉,由于插值中没有该山上的气象数据,而利用高程作为协变量的插值方法可以预测其温度,这用常规方法(不考虑高程)是反映不出来的。从图 3 可以看出,预测标准误差在 0.5~0.83 °C,没有地带性差异,在地区边缘误差较高,主要是边缘区参与插值的站点较少(如图 1)所致,紫

金山的误差较大则是因为无山上气象数据造成。图 4 是 T_{max} 实测值与预测值的比较,从图 4 可见,大部分站点 T_{max} 实测值与预测值成对出现,两者非常接近,平均绝对误差为 0.33 °C,平均相对误差为 1%。由此可以证明,用 ANUSPLIN 方法引入高程线性子模型进行温度空间插值,可得到较高的精度。

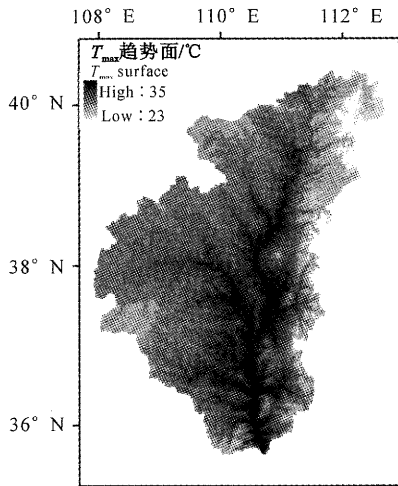


图 2 ANUSPLIN 输出的研究区 1995-07 T_{max} 趋势面
Fig. 2 ANUSPLIN output surface of T_{max} for July, 1995

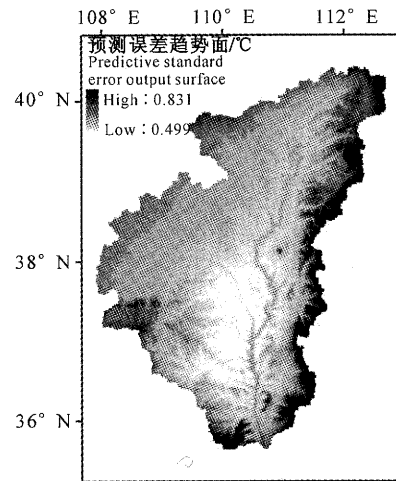


图 3 ANUSPLIN 输出的研究区 1995-07 T_{max} 预测误差趋势面
Fig. 3 Predictive standard error output surface of T_{max} for July, 1995

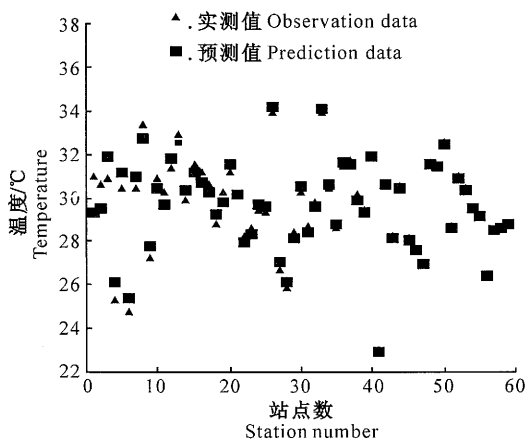


图 4 研究区 1995-07 T_{max} 实测值与观测值的比较
Fig. 4 Comparison between the observation and prediction data of T_{max} for 1995-07 in the research area

2.2 黄土高原中北部多沙粗沙区温度随高程的变率

使用 TVPTPS3 模型进行温度插值,实际上引入了高程线性子模型,也就意味着存在一个依赖于第三变量(高程)变化的线性常数,这里可理解为温度随高程的变率(lapse rate),即高程每升高一定值,温度会随之变化的多少。对研究区 252 个月的月平均最高、最低温度的 lapse rate 进行统计,得出

温度随高程变率的季节平均值,结果如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出,在黄土高原多沙粗沙区,月平均最高温度随高程的变化呈现很强的季节性,以夏季最高,高程每升高 1 000 m,月平均最高温度可下降近 8 °C,春秋季节下降 5 °C 左右,而冬季则下降 3 °C 左右。月平均最低温度 T_{min} 随高程的变化规律与 T_{max} 基本一致,但变化范围稍小,一般变率为 3~6.5 °C,这与有些学者在其他地方得出的结论基本一致^[23-24]。

2.3 黄土高原中北部多沙粗沙区多种气象要素的插值分析

利用不同气象要素空间插值的优选模型(如表 3),得到了不同气象要素时间序列的栅格表面。综观所有气象要素的空间插值,从插值模型的样条次数来看,并非样条次数越高越好,一般选 3 次或 2 次样条为宜。从插值的复杂程度上看,温度、风速和水汽压的空间插值相对比较容易,仅考虑高程作为协变量;日照时数的插值考虑月温度范围为协变量;月降雨量的随机性强,考虑高程因子为协变量并没有带来更好的插值效果,而对其原数据以某种方式进行值域范围压缩后,对插值结果有一定改善;蒸散插值考虑了 3 个协变量因子——净辐射、水汽压差和

风速;最复杂的是净辐射,除考虑与其他气候因子的相关性外,还需考虑高程、坡向等地形因子,更要考虑地表覆被情况。从插值结果的误差来看,插值精度与数据的随机分布特征极大相关,随机性越大,插值精度越差。一般温度的插值精度较高,风速、水汽压插值的误差中等,日照时数和降雨量的误差较大,

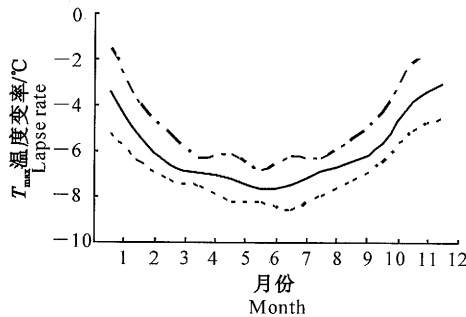


图5 研究区21年各月平均 T_{\max} 随高程的变率

— . 平均值; --- . 月最大值; 月最小值

Fig.5 Monthly T_{\max} mean lapse rates for the 21 years in the research area

— . Monthly mean value; --- . Maximum monthly value; Minimum monthly value

个别情况下可超过 50%,用其他插值方法(如反距离法、Kriging 方法等)插值结果误差也较大。从气象要素随协变量的变率来看,该值直接反映了影响因子的作用能力和作用规律,更宜于人们理解气象要素的时空分异特征及与影响因子的相互关系。

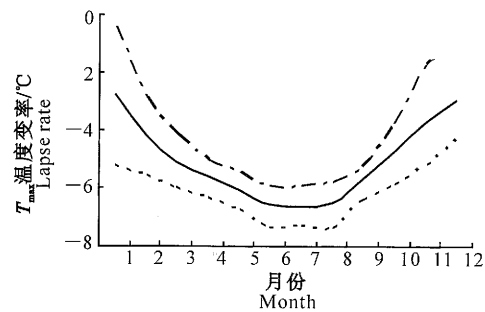


图6 研究区21年各月平均 T_{\min} 随高程的变率

— . 平均值; --- . 月最大值; 月最小值

Fig.6 Monthly T_{\min} mean lapse rates for the 21 years in the research area

— . Monthly mean value; --- . Maximum monthly value; Minimum monthly value

3 结 论

1)薄板光滑样条函数方法是目前较好的一种曲面插值方法,兼顾了插值曲面的平滑度与精确度。ANUSPLIN 软件允许引入线性子模型作为协变量模型,独立变量个数最高可以达到 10 个,这就使得气象要素插值中能够充分考虑多个因子的影响。线性子模型的线性常数反映了气象要素随协变量的变化情况,使人们能更加清楚地理解各因子间的关系。

2)黄土高原地形复杂、沟壑纵横,地表生态景观多样,不同气象要素在不同高度、不同坡向时差别较大,因此不同要素应采用不同模型。在温度、风速、水汽压等的插值中,应用高程作为协变量;而在日照时数的插值中,应用月温度范围 T_r 作为协变量;在降雨量插值中,首先对输入数据进行平方根变换以压缩其值域范围,插值后再进行数值恢复;在蒸发的插值中,用净辐射、水汽压差和风速作为协变量,能提高插值精度。在大多数情况下,模型选择以样条次数为 3 次的局部薄盘光滑样条函数模型为最佳。

3)在所有的气象要素中,温度的空间插值相对比较容易,且误差较小,风速、水汽压的误差中等,日照时数和降雨量的误差较大,个别情况相对误差可超过 50%,这是受其随机性较大的影响,用其他插值方法得到的结果也不尽理想。

[参考文献]

- [1] Price D T, McKenney D W, Nalder I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101, 81-94.
- [2] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A. *Climate change 1995: the science of climate change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [3] 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. Pan Y Z, Gong D Y, Deng L, 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. (in Chinese)
- [4] 于贵瑞, 何洪林, 刘新安, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究(I): 气象/气候信息的空间化技术途径 [J]. *自然资源学报*, 2004, 19 (4): 537-544. Yu G R, He H L, Liu X A, et al. Study on spatialization technology of terrestrial eco-information in China (I): The approach of spatialization in meteorology/climate information [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19 (4): 537-544. (in Chinese)
- [5] 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 [J]. *地理学报*, 2002, 57 (1): 47-56. Lin Z H, Mo X G, Li H X, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57 (1): 47-56.
- [6] 吴立新. *地理信息系统原理与算法* [M]. 北京: 科学出版社, 2003. Wu L X. *Principle and algorithm of geographical information*

- system [M]. Beijing, Science Press, 2003.
- [7] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines - part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139-151.
- [8] Peter M, Chris D. Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator Kriging [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 65-76.
- [9] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines-more than just a smooth interpolator [J]. *Geoderma*, 1994, 62, 45-67.
- [10] Hartkamp A D, Kirsten D B, Stein A. Interpolation techniques for climate variables, Geographic Information Systems series 99-01 [M]. Mexico DF: International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), 1999: 1-26.
- [11] 刘志红, Tim R McVicar, Li LingTao. 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): 23-30.
Modeling spatial distribution of pan evaporation based on quinat-variate thin plate spline function [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(6): 23-30. (in Chinese)
- [12] Hutchinson M F. ANUDEM version 5. 2 user guide [M]. Canberra: The Australia National University, Center for Resource and Environment Studies, 2004.
- [13] Hutchinson M F. The application of thin plate splines to continent-wide data assimilation, Data Assimilation Systems, BMRC Research Report NO. 27 [R]. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991: 104-113.
- [14] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1965-1978.
- [15] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G, et al. Spatial interpolation of time Series point hydrometeorological data in China and spatio-temporal analysis of FAO-56 crop reference evapotranspiration and pan evaporation with reference to climate change, CSIRO Land and Water Technical Report 8/05 [R]. Canberra: CSIRO Land and Water, 2005: 72-82, 96-103.
- [16] 阎 洪. 薄板光滑样条插值与中国气候空间模拟 [J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 163-169.
- Yan H. Modeling spatial distribution of climate in China using thin plate smoothing spline interpolation [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004(2): 163-169. (in Chinese).
- [17] Bates D, Lindstrom M, Wahba G. Gcvpack-routines for generalized cross validation [J]. *Communications in Statistics B-Simulation and Computation*, 1987, 16: 263-297.
- [18] Li L T, McVicar T R, Van Niel T G, et al. Quality control of 21 years of monthly meteorological and hydrological data in the coarse sandy hilly catchments of the loess plateau. CSIRO Land and Water Technical Report 6/05 [R]. Canberra: CSIRO Land and Water, 2005.
- [19] Gallant J C. Use of SRAD Version 3. 1 to model solar radiation-release notes [M]. Canberra: Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, 1997.
- [20] McKenney D W, Mackey B G, Zavitz B L. Calibration and sensitivity analysis of a spatially-distributed solar radiation model [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13: 49-65.
- [21] Yang Q K, Tom G Van Niel, McVicar T R, et al. Developing a digital elevation model using ANUDEM for the coarse sandy hilly catchments of the loess plateau, China. CSIRO Land and Water Technical Report 7/05 [R]. Canberra: CSIRO Land and Water, 2005.
- [22] Hutchinson M F, Hogarth W, Rose C W, et al. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines - part II: Two dimensional smoothing of data with short range correlation [J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 152-167.
- [23] Bolstad P V, Swift L, Collins F, et al. Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 161-176.
- [24] Lookingbill T R, Urban D L. Spatial estimation of air temperature differences for landscape-scale studies in montane environments [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 114: 141-151.