

基于5变量局部薄盘光滑样条函数的蒸发空间插值

刘志红^{1,2,3}, Tim R. McVicar⁴, LingTao Li⁴, Tom G. Van Niel⁴, 杨勤科¹, 李锐^{1†}, 穆兴民¹
(1. 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 712100, 陕西杨凌; 2. 国家卫星气象中心乌鲁木齐气象卫星站, 830011, 乌鲁木齐; 3. 中国科学院研究生院, 100049, 北京; 4. 澳大利亚联邦科工组织水资源研究所, 堪培拉)

摘要 高分辨率、栅格化的气候数据作为环境因子是地学模型和气候模型等相关研究的重要参数, 国内外的研究多集中于温度、降水等气象要素, 对陆面蒸发空间化研究较少。对黄土高原多沙粗沙区及周围共计53个气象站点(多沙粗沙区30个)蒸发皿测量值 E_{pan} 进行空间插值, 以5变量局部薄盘样条函数(经纬度为自变量, 净辐射、水气压差和风速为协变量), 建立具有多元线性子模型的蒸发插值模型, 以ANUSPLIN为实现软件, 生成连续21年共252个蒸发表面。交叉验证表明: 引入蒸发影响因子作为协变量线性子模型进行表面插值能显著提高插值精度, 夏季提高幅度更大, 拟合表面具有较高的精确度与平滑度。蒸发随协变量的变率显示, 在多沙粗沙区, 水气压差是夏季蒸发的主要控制因素, 风速对蒸发的影响冬季稍强一些, 净辐射的影响没有明显的季节性, 只在春分和秋分时略有微小提高。

关键词 5变量; 样条函数; 蒸发; 插值

Modeling spatial distribution of pan evaporation based on quintat-variate thin plate spline function

Liu Zhihong^{1,2,3}, Tim R. McVicar⁴, LingTao Li⁴, Tom G. Van Niel⁴, Yang Qinke¹, Li Rui¹, Mu Xingmin¹
(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, 712100, Yangling, Shaanxi;
2. Urumuqi Meteorological Satellite Ground Station, National Satellite Meteorological Center, 830011, Urumuqi;
3. Graduate School of Chinese Academy of Science 100049, Beijing, China; 4. CSIRO Land and Water, Canberra, Australia)

Abstract Spatial distribution of pan evaporation (E_{pan}) depending on multiple factors such as radiation, vapor pressure and wind is a crucial parameter for geographic models and climatic models, and also a key to environmental management. However the weather observation stations normally distribute sparsely and irregularly on the ground. The techniques to interpolate available point data to estimate the value of any location is demanded. This paper introduces the process to interpolate monthly Epan data of 53 stations for the period of 1980 to 2000 to create 252 Epan surfaces in Coarse Sandy Hilly Catchments of Loess Plateau. Quintat-variate partial thin plate spline models were developed in which vapor pressure deficit (p_d), net radiation (R_n) and wind speed(wind) were used as three covariate sub-models. GCV statistics indicate that the resultant evaporation surfaces hold high fidelity and smoothness. The lapse rates (evaporation changing rate with each covariate) showed that: the dependence of Epan on R_n has no strong seasonal trend although at the equinoxes it is slightly big, whereas the dependence of E_{pan} on p_d has an obvious trend with strongest influence in summer, and wind

收稿日期: 2006-01-23 修回日期: 2006-05-24

项目名称: 中国科学院知识创新重要方向项目“黄土高原水土保持的区域环境效应”(KZCX3-SW-421); 中澳合作项目 ACIAR PROJECT “Regional impacts of re-vegetation on water resources of the Loess Plateau, China and Middle and Upper Murrumbidgee Catchment, Australia”(LWR1/2002/018)

第一作者简介: 刘志红(1967—), 女, 高级工程师, 博士生。主要研究方向: 3S技术在土壤学中的应用。E-mail: wxzlh@163.com

† 责任作者简介: 李锐(1947—), 男, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 区域土壤侵蚀及3S技术应用。E-mail: lirui@ms.iswc.ac.cn

speed has more relative influence in winter.

Key words quinat-variate; thin plate spline function; pan evaporation; interpolation

蒸散发(蒸发与蒸腾)是土壤-植物-大气系统的一个重要组成部分。降落到地球表面的降水有70%是通过蒸散发作用回到大气中的,干旱地区甚至可达90%^[1]。区域蒸发研究对水土保持与生态环境建设、大面积干旱监测、土壤水分利用效率及水资源合理配置等意义重大,同时对全球气候变化及中长期天气预报也有重要作用。

对蒸发的测量有多种方法^[2-4],但通常能够得到和使用的还是由气象站用蒸发皿测得的数据,它反映了一个地区的实际蒸发能力,通过长期观测实验,并借助于一定的转换系数可以得到该地区潜在蒸发能力,联合国粮农组织推荐的作物蒸散系数,也扩大了蒸发皿数据的广泛使用^[5]。准确的蒸散发气候信息空间分布数据,理论上可由高密度站网采集;但气象数据的观测主要依赖于气象台站,而气象台站空间分布不均(以县站为采集点),密度不足(最少相距几十 km),因此,站点外区域气象数据通常由邻近站点的观测值估算,即气象信息空间插值。近年来,气象要素插值已被作为专门的议程进行探讨和研究^[6-10]。气候数据空间插值多集中于温度与降水等气象要素,同时引入地形因子改善插值精度^[8,11-13]。陆面蒸发是陆地表层水循环中最大、最难估算的分量,受气候、地形、土壤等多种条件制约,准确的区域蒸发空间插值难度更大,有必要引入多个影响因子。

针对气候数据曲面拟合的专用软件 ANUSPLIN^[14],基于样条插值理论,同时允许引入多元协变量线性子模型,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蒸发空间插值提供可能。

1 研究区概况

研究区为黄土高原中部多沙粗沙区(图1),区域面积11万2728 km²,海拔450~2079 m,平均海拔1124 m,属半湿-半干旱地区。地形破碎,水土流失极为严重,因此,极有必要对区域蒸发进行时空变化动态研究,进一步了解该地区的各种环境因素,为区域水土保持与植被恢复建设提供理论依据。

对研究区内(30个)及周围共53个气象站,1980—2000年21年(月平均)的多种气象要素数据

进行数据质量控制检查^[15],用相对湿度及最高、最低温度计算得到水气压差(p_d)^[16],用辐射模型及SRAD(Solar Radiation)软件计算得到净辐射(R_n)^[16-19],在SRAD中输入参数除了常规气象资料(最大、最小温度,晴空日照时数和气压)外,还包括地形参数(坡度、坡向)和植被参数(地表反照率和叶面积指数)等^[16]。地表反照率和叶面积指数,根据不同植被类型(土地利用图)和不同生长时间进行设置^[16]。模型中DEM利用数字地形图和ANUDEM^[20]建立,其输出是“水文地貌关系修正的DEM(hydrologically correct DEMs)”,与多要素构成TIN方法建立的DEM相比,这种DEM更为真实准确的反映了地表形态^[21]。利用DEM在地理信息系统软件ARC/INFO中生成高程、坡度、坡向等地形参数。在此基础上采用5变量局部薄盘样条函数,将蒸发的影响因子作为协变量引入线性子模型,以ANUSPLIN为实现软件对研究区21年连续252个月的蒸发观测值进行空间模拟。因此,在蒸发空间插值中,实际上已综合考虑了地形、温度、湿度、辐射及风速等多个影响因子。

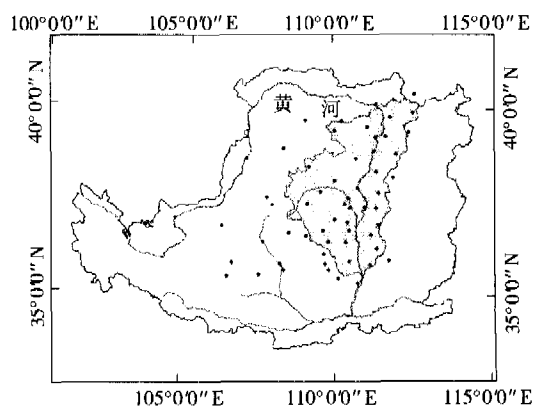


图1 研究区示意图(■研究区,·气象站)

Fig.1 The location of the reearch area

2 研究方法

2.1 蒸发影响因子确定

选取30个站、12个月连续21年共计7560个数据进行蒸发与影响因子之间一元和多元线性回归(表1)。由表1可见:水气压差(p_d)、太阳净辐射(R_n)和风速(v_w)单独作为独立变量时,蒸发与水气压差、净辐射有较强的相关性,其中水气压差最强,选取水气压差与其他2个因子组合作为独立变量

时,误差均方根值 RMSE 显著减小,相关性有所提高;同时考虑 3 种独立变量后,相关性提高到 0.944,均方差比双变量时减少了至少 $3.7 \text{ mm} \cdot \text{月}^{-1}$,尽管

这个数字很小,但它反映在 7 月或 10 月的蒸发量上大约为 40 mm。由此可见,在蒸发的空间插值中,应同时考虑这 3 个影响因子。

表 1 E_{pan} 与不同独立变量、多变量线性回归的统计结果

Tab.1 Linear regression of E_{pan} and the different independent variable and multivariate

| 项目 | 独立变量 | 相关系数 | 均方差/($\text{mm} \cdot \text{月}^{-1}$) | 回归常数/($\text{mm} \cdot \text{月}^{-1}$) | 回归系数 |
|----|---|-----------|---|--|-----------|
| 1 | 净辐射/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) | 0.791 144 | 47.060 9 | 7.010 96 | 20.101 8 |
| 2 | 气压差/kPa | 0.904 565 | 31.812 0 | 1.898 86 | 240.818 0 |
| 3 | 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 0.187 037 | 92.847 8 | -7.311 49 | 83.608 6 |
| 4 | 气压差/kPa | 0.923 216 | 28.534 6 | -5.716 34 | 181.867 0 |
| 5 | 净辐射/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) | | | | 6.100 2 |
| | 气压差/kPa | 0.926 055 | 28.002 1 | -49.252 30 | 228.798 0 |
| | 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | | | | 29.789 5 |
| | 气压差/kPa | 0.944 340 | 24.294 4 | -56.357 50 | 170.528 0 |
| 6 | 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | | | | 29.536 1 |
| | 净辐射/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) | | | | 6.040 3 |

注:第 1~3 项为单变量线性回归;第 4,5 项为双变量多元线性回归;第 6 项为 3 变量多元线性回归。

2.2 局部薄盘光滑样条空间插值方法

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^[22]。基于不同插值理论形成了不同的插值方法,如最近邻近法(泰森多边形法)、移动平均法(距离倒数插值)、薄盘光滑样条函数法 TPS(thin plate smoothing splines)^[23]、空间自协方差最佳插值方法(Kriging 法)^[24]等。在所有方法中,基于统计插值技术的 Kriging 法和 TPS 最为适用^[11,13,25-27]。薄盘光滑样条函数法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^[11,13]。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。Hutchinson 和 Gessler^[28]从理论上分析了样条法和 Kriging 法的不同,Hartkamp^[29]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。

局部薄盘光滑样条法是对薄盘光滑样条原型的扩展^[30],它除通常的样条自变量外,允许引入线性协变量量子模型,如温度和海拔之间以及降水和海岸线的相关关系。

局部薄盘光滑样条的理论统计模型表述如下:

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

式中: z_i 为位于空间 i 点的因变量; x_i 为 d 维样条独立变量矢量; f 为要估算的关于 x_i 未知光滑函数; y_i 为 p 维独立协变量矢量; b 为 y_i 的 p 维系数; e_i 为具有期望值为 0 和方差为 $w_i \sigma^2$ 的自变量随机误差; w_i 为作为权重的已知相对误差方差; σ^2 为所有数据点上为一常数误差方差,但通常未知^[31]。

由式(1)可见:当式中缺少第 2 项,即协变量($p = 0$)时,模型简化为普通薄盘光滑样条;当缺少第 1 项独立自变量时,模型变为多元线性回归(ANUSPLIN 中不允许这种情况出现)。表 1 即是用这种模型拟合的结果。

函数 f 和系数 b 通过最小二乘估计来确定:

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

式中: $J_m(f)$ 为函数 $f(x_i)$ 的粗糙度测度函数,定义为函数 f 的 m 阶偏导(在 ANUSPLIN 中称为样条次数,也叫糙度次数); ρ 为正的光滑参数,在数据逼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 GCV(generalized cross validation)的最小化来计算,也可以用最大似然估计误差 GML(Generalised max likelihood)或期望真实平方误差 MSE(expected true square error)最小确定。Wahba^[32]综合论述了选择合适平滑参数的重要性。GCV 计算可采用“one point move”方法,依次移去一个样点,用剩余样点在一定的光滑参数下进行曲面拟合,得到该点的估测值,再计算观测值和估测值的方差。ANUSPLIN 中同时提

供 GCV 和 GML 2 种选择平滑参数的判断方法。

2.3 模型参数设置

ANUSPLIN 空间分析软件提供了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)、广义交叉验证和期望真实均方误差、最大似然估计误差(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误差(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,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,拟合表面和误差表面。

光滑参数平衡了拟合曲面的精确度与平滑度,其过小或过大或者信号自由度大于观测站点的 1/2

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等问题;因此,所选模型不适合用于曲面插值,这些情况在 ANUSPLIN 中以 * 符号标出。在按月进行曲面拟合时,信号自由度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^[12]。

最佳模型选择标准为:基于广义交叉验证或最大似然法,统计误差最小,信噪比(SNR,信号自由度与剩余自由度之比)最小,信号自由度小于站点的 1/2,模型成功率判断无 * 号指示。

采用不同样条变量、不同表面样条变量、不同表面协变量、不同样条次数组合形成 24 个模型。用这 24 个模型以 1995 年 12 个月进行实验,以广义交叉验证误差最小为判断标准选择最佳模型,可以发现模型 V4、V5、V6 明显好于其他模型(表 2)。从表 2

表 2 不同模型、不同月份统计 ANUSPLIN 输出统计

Tab.2 ANUSPLIN output statistic of different model and month

| 模型 | 光滑参数 | 蒸发均值 | 标准差 | 剩余自由度 | 信号自由度 | 广义交叉验证误差均方根 | 残差均方根 | 期望真实误差均方根 | 方差估计均方根 |
|-------|-----------------------|---------|--------|-------|-------|-------------|-------|-----------|---------|
| 1_V0 | 0.142×10^1 | 0.000 | 0.000 | 0.0 | 58.0* | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1_V4 | 1.53×10^9 | 39.309 | 8.629 | 36.9 | 16.1 | 5.33 | 3.71 | 2.45 | 4.45 |
| 1_V5 | 2.14×10^9 | 39.309 | 8.629 | 39.3 | 13.7 | 5.34 | 3.96 | 2.34 | 4.60 |
| 1_V6 | 1.38×10^{29} | 39.309 | 8.629 | 38.5 | 14.5 | 5.55 | 4.03 | 2.47 | 4.73 |
| 4_V0 | 3.18×10^9 | 148.420 | 19.820 | 46.9 | 11.1 | 18.20 | 14.70 | 7.14 | 16.30 |
| 4_V4 | 6.39×10^9 | 245.390 | 38.490 | 42.3 | 10.7 | 24.60 | 19.60 | 9.85 | 22.00 |
| 4_V5 | 3.33×10^{26} | 245.390 | 38.490 | 44.0 | 9.0 | 23.80 | 19.80 | 8.94 | 21.70 |
| 4_V6 | 6.91×10^{35} | 245.390 | 38.490 | 40.0 | 13.0 | 26.00 | 19.60 | 11.20 | 22.60 |
| 7_V0 | 4.65×10^9 | 330.230 | 46.930 | 48.4 | 9.6 | 40.90 | 34.20 | 15.20 | 37.40 |
| 7_V4 | 9.64×10^9 | 267.170 | 45.850 | 43.4 | 9.6 | 29.80 | 24.40 | 11.50 | 26.90 |
| 7_V5 | 3.28×10^{26} | 267.170 | 45.850 | 44.0 | 9.0 | 29.00 | 24.00 | 10.90 | 26.40 |
| 7_V6 | 6.71×10^{35} | 267.170 | 45.850 | 40.0 | 13.0 | 31.30 | 23.60 | 13.50 | 27.80 |
| 10_V0 | 5.22×10^9 | 135.210 | 17.620 | 36.0 | 22.0 | 15.80 | 9.81 | 9.81 | 12.50 |
| 10_V4 | 2.14×10^9 | 111.610 | 23.630 | 38.4 | 14.6 | 12.70 | 9.22 | 5.70 | 10.80 |
| 10_V5 | 8.89×10^{18} | 111.610 | 23.630 | 38.5 | 14.5 | 12.40 | 9.01 | 5.53 | 10.60 |
| 10_V6 | 6.83×10^{35} | 111.610 | 23.630 | 40.0 | 13.0 | 12.40 | 9.36 | 5.34 | 10.80 |

注:以 1995 年 1、4、7、10 月为例(模型 V4、V5、V6 分别为 5 变量局部薄盘样条,经纬度为独立样条变量,净辐射、气压差和风速为样条协变量,样条次数分别为 2、3、4;V0 为无协变量模型,样条次数为 2)。

可以看出,V4、V5、V6 模型的信号自由度均小于总测量站点数的 1/2,说明观测数据点足以满足样条插值的基本要求。而对同一个模型,信号自由度在不同月之间表现出相对平稳的过渡,没有异常数据。在 V4、V5 和 V6 中 V4 的误差最小,将其定为首选模型,考虑到 V5、V6 在个别月份表现更佳(如 1995 年 10 月),将其作为备用模型。用这些模型对 252 个月进行空间模拟,这 3 个模型在 252 个月的使用情

况是:V4 使用 208 次,V5 使用 20 次,V6 使用 16 次。对 8 个不适合上述模型的月份利用最大剩余残差检测,排除个别误差较大的站点后均能适应样条次数为 2 的 V4 的模型。

在模型建立上同时考虑不引用协变量线性子模型的情况,发现仅用经纬度做样条独立变量,样条次数为 2 的模型明显优于样条次数更高的模型。以 V0 与 V4 分别代表薄盘光滑样条函数(无协变量)和

局部薄盘光滑样条函数(含有协变量线性子模型), 对1995年12个月 E_{pan} 空间模拟, 比较结果(表3):

表3 薄盘样条和局部薄盘样条模型比较

Tab.3 Comparison between of Bi-variate thin plate spline function and Quint-variate partial thin plate spline model

| 月份 | RTGCV - V0 | RTGCV - V4 | V0 - V4 |
|-----|------------|------------|---------|
| 1 | 0* | 5.33 | -5.33 |
| 2 | 7.15 | 7.03 | 0.12 |
| 3 | 8.17 | 14.80 | -6.63 |
| 4 | 18.20 | 24.60 | -6.40 |
| 5 | 29.00 | 32.80 | -3.80 |
| 6 | 39.40 | 31.30 | 8.10 |
| 7 | 40.90 | 29.80 | 11.10 |
| 8 | 39.10 | 17.50 | 21.60 |
| 9 | 19.80 | 13.60 | 6.20 |
| 10 | 15.80 | 12.70 | 3.10 |
| 11 | 15.00 | 10.80 | 4.20 |
| 12 | 15.60 | 6.92 | 8.68 |
| 平均值 | 24.40 | 19.70 | 4.70 |

注: *表示V0模型不适合1995年1月数据。

对于广义交叉验证误差均值(RTGCV)来说, 模型V0为24.4, V4为19.7, V4比V0小4.7, 在夏季7、8月份小10以上, 只有在3、4、5月V0大于V4。这充分说明在蒸发的空间插值中, 引入其影响因子作为协变量子模型, 能大大提高插值精度, 在夏季表现更为突出。因此, 在实际应用中选取带有协变量的模型。

3 结果与讨论

3.1 插值表面、误差表面

ANUSPLIN对插值结果提供了一系列统计参数和贝叶斯预测标准误差表面, 并以此得到相对误差表面。以1995年1月(a)、4月(b)、7月(c)、10月(d)不同月份进行分析。图2为蒸发拟合曲面, 图3为预测标准误差曲面, 图4为相对误差曲面。

从图2可以看出, 蒸散在研究区呈现明显的时空分异性: 从空间上, 冬季蒸发的空间变化不大, 而在其他季节, 西北部(榆林以西乌审旗一带)以及黄河及其支流流域蒸发明显高于其他地方; 从时间上, 冬季蒸发为25~50 mm, 从4月开始到8月是蒸发最强的时期, 月蒸发量在200~300 mm, 最大值出现在5月, 月蒸发量约300 mm, 随后在整个夏季呈缓慢递减, 9月份开始迅速下降。图5(a)为蒸发的月际变

化, 也能反映蒸发量的季节变化趋势。

图3可以看出, E_{pan} 预测值大的季节预测误差也大, 其趋势从高到低依次为7月、4月、10月、1月。1月(a)、10月(d)的预测标准误差基本一致, 对比4月(b)、7月(c)2幅图, 预测标准误差的空间结构特征表现明显, 高值误差与水气压差的变化(黄河流域)或地表反照率影响下的净辐射变化(东部吕梁山、南部黄龙山等高植被覆盖区)明显有关。

图4预测相对误差[(预测标准误差/蒸发表面) × 100%]在4个季节均小于30%, 大部分小于10%, 季节变化不明显。联系到蒸发随3个协变量变化的变率(图6)在不同月份表现不同, 就能清楚理解相对误差的季节性微变化。

3.2 蒸发插值误差的灵敏度

蒸发插值误差的灵敏度 $E_{\text{pan}}\text{-diff}(E_{\text{pan-m}} - E_{\text{pan-e}})$ (图5)能更好地反映插值过程带来的误差, 也是评价拟合曲面质量的灵敏方法。对研究区252个蒸发测量值和拟合曲面提取值(等于站点数据的再回放)按月求平均, 再计算两者之差 $E_{\text{pan}}\text{-diff}$ 。比较图5可以看到, 观测值、提取值月际变化趋势完全一样, $E_{\text{pan}}\text{-diff}$ 基本上为一条直线, 起伏小于3.5 mm, 说明从252个拟合曲面回放的数据与站点观测值保持高度一致, 拟合曲面具有相当高的精确度。Epan-diff在冬季为负值, 夏季为正值, 说明冬季的拟合曲面比真实测量值有微小放大, 而夏季拟合值比实际观测值有所缩小, 平均不超过3.5 mm。这也从另一方面证明了图5(b)中春夏两季的预测标准误差比秋冬季高。

3.3 Epan 随影响因子的变率

E_{pan} 随影响因子的变率是指影响因子每变化一个单位Epan的变化量。图6显示了不同影响因子的变率特征曲线, 同时也说明了3个变量对Epan影响的相对程度。

从图6可以看出, 蒸发随净辐射的变化趋于平缓, 没有很强的季节性, 只在春分和秋分时稍有增强, 而水气压差却有很强的季节性, 说明夏季蒸发主要由水气压差控制, 从4—8月, 水气压差每增加1.0 kPa, 蒸发每月增加15 mm以上。风速对蒸发的控制程度为中等, 其相对最大值出现在冬季, 从10—3月, 风速每增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 蒸发量每月增加20 mm以上。蒸发的变化是3个变量同时作用的结果, 其年际变化(图5(a))最大值出现在5月份, 当时水气压差和风速都较大, 且净辐射能够提供足够的能量。

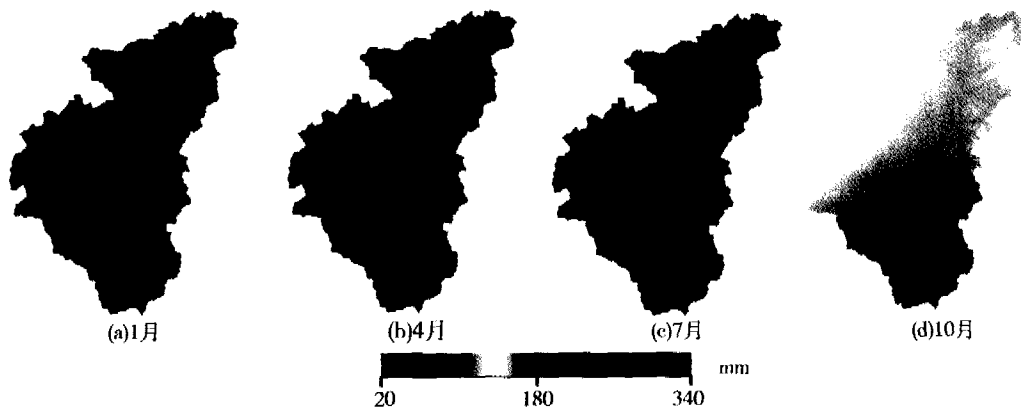


图 2 1995 年不同月份蒸发输出表面

Fig.2 Surfaces evaporation in different month of 1995

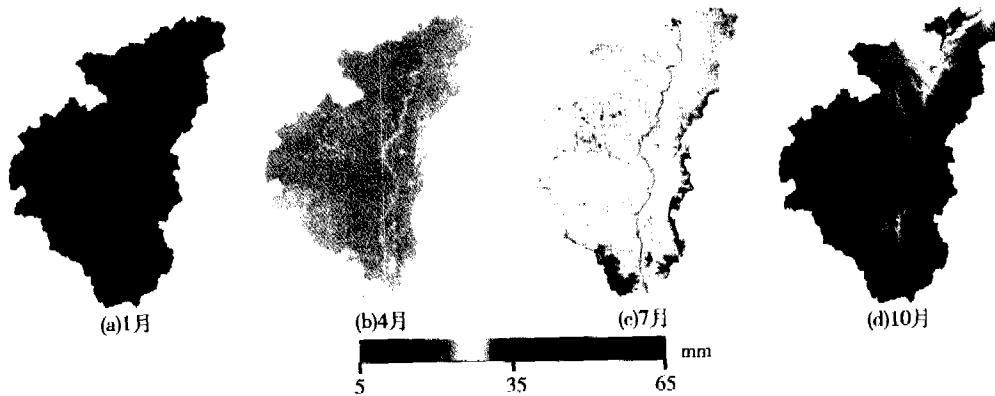


图 3 1995 年不同月份预测标准误差表面

Fig.3 Predictive standard error in different month of 1995

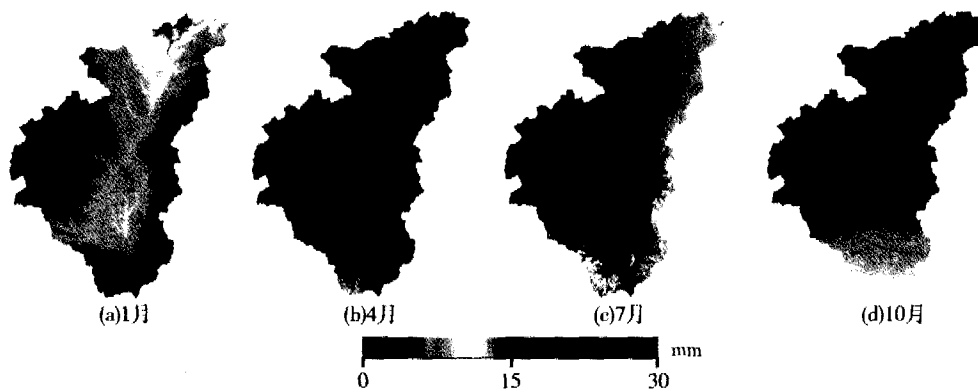


图 4 1995 年不同月份预测相对误差

Fig.4 Predictive relative error in different month of 1995

4 结论

1) 采用 5 变量局部薄盘样条函数模型, 引入净辐射、水气压差和风速作为协变量子模型, 对多沙粗沙区蒸发进行空间插值, 能显著提高插值精度, 夏季

表现更为突出。同时蒸发随影响因子变率的时间分布也能帮助理解区域蒸发的时空分异特征, 理解其影响因子的作用机制, 从而在实际应用中提出相应对策, 为当地水土保持与生态环境建设提供理论依据和参考意见。

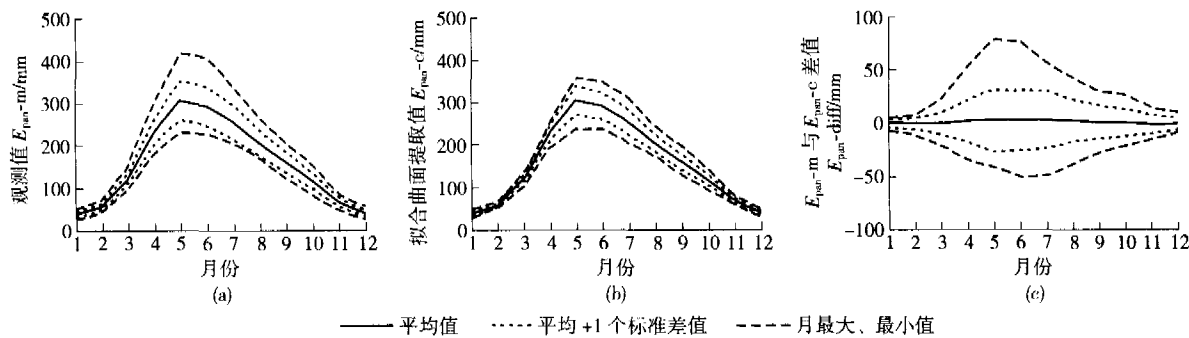


图 5 观测值(a)、拟合曲面提取值(b)及观测值与拟合提取值之差(c)的月际变化图

Fig.5 Monthly figures of (a) Epan-m; (b) Epan-e; and Epan-diff, calculated as Epan-m minus Epan-e

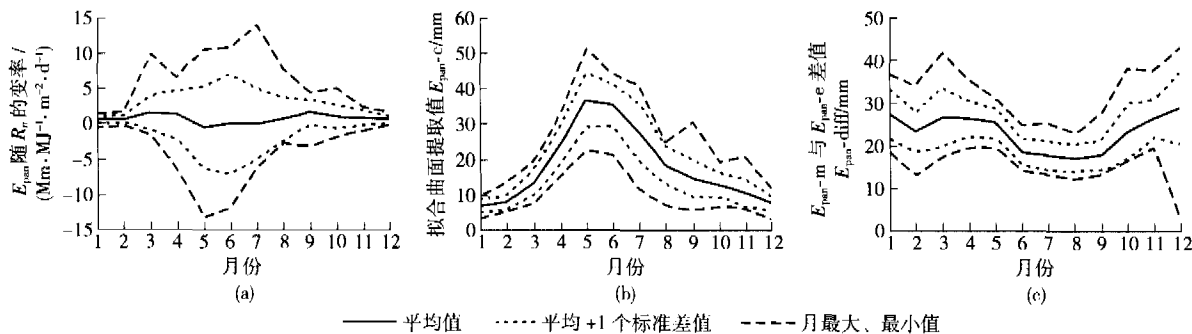


图 6 Epan 随净辐射因子(a)、水气压差因子(b)和风速因子(c)的变率

Fig.6 Change ratio of Epan follow with the only radiancy factor (a), hydrosphere pressure difference factor (b) and wind speed factor (c)

2) 具有较强综合能力的空间插值软件 ANUS-PLIN, 充分提供不同格式的输入数据、任意调整数据的变化参数, 提供光滑度与精确度最优的栅格化输出表面及误差表面, 丰富的统计参数及模型诊断参数, 能判断站点充分与否, 轻松地选择最优模型。因变量对协变量依赖性(变率)输出, 能提供时间序列变化规律, 使人们能更加清楚地理解各因子的关系, 因而在世界各国广泛使用。

3) 通过蒸发过程和数据相关分析, 影响蒸发的主要因子有空气水气压差、净辐射和风速, 地形主要通过对其他影响因子的作用对其有一定影响, 主要表现在夏季沟谷地带水气压差更大一些。水气压差是夏季蒸发的主要控制因素, 风速对蒸发的影响冬季稍强, 净辐射对蒸发的影响没有很强的季节性, 只在春分和秋分时有稍许提高。

4) 对蒸发连续拟合曲面分析, 黄土高原多沙粗沙区年蒸发能力很强, 持续时间较长, 月蒸发最大值出现在 5 月份, 此时正是该地区农牧业生产与林草建设的关键期(种植期), 也是该地区干旱少雨最严重的时期, 且此时风沙较大, 风蚀严重。进入夏季后, 水热同期, 蒸发维持在一个高水平线上, 同时暴雨引起严重水蚀。因此, 采取必要的耕作措施、减少

土壤水分无效蒸发、保水保土、提高种植植被成活率与健康生长应是这一地区水土保持与生态环境建设中重点考虑内容。

5 参考文献

- [1] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. *Microclimate the Biological Environment of Plants*. New York: John Wiley & Sons, 1983
- [2] 唐登银, 程维新, 洪嘉琏, 等. 我国蒸散研究的概括与展望. *地理研究*, 1984, 3(3): 84-97
- [3] Xu C Y, Singh V P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from switzerland. *Water Resources Management*, 2002, 16: 197-219
- [4] 刘志红, 刘文兆, 李锐. 基于 3S 技术的区域蒸散研究进展. *中国水土保持科学*, 2006, 4(3): 117-122
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998 [M/OL]. [2005-12-10] <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- [6] Price D T, McKenney D W, Nalder I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Cana-

- dian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2-3):81-94
- [7] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A. *Climate Change 1995: the science of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [8] 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. *地理学报*, 2004, 59(3):366-374
- [9] 何洪林, 于贵瑞, 刘新安, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究: II. 太阳辐射要素. *自然资源学报*, 2004, 19(5):679-687
- [10] 林忠辉, 莫兴国. 中国陆地区域气象要素的空间插值. *地理学报*, 2002, 57(1):47-56
- [11] 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. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2):152-167
- [12] 阎洪. 薄板光滑样条插值与中国气候空间模拟. *地理科学*, 2004, 24(2):163-169
- [13] Hutchinson M F. Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines-Part I: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2):139-151
- [14] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide. Canberra: The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies[R/OL]. [2006-01-20]. <http://cres.anu.edu.au/outputs/software.php>. 2004
- [15] 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 atchments of the Loess Plateau, CSIRO Land and Water Technical Report 6/05 Canberra. Australia, Canberra: CSIRO Land and Water, 2005
- [16] 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, Canberra: CSIRO Land and Water, 2005
- [17] Gallant J C. Use of SRAD Version 3.1 to model solar radiation-release notes. Canberra: Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra, 1997
- [18] McKenney D W, Mackey B G, Zavitz B L. Calibration and sensitivity analysis of a spatially-distributed solar radiation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13:49-65
- [19] Wilson J P, Gallant J C. *Secondary topographic attributes*. New York: John Wiley & Sons, 2000
- [20] Hutchinson M F. ANUDEM Version 5.1 User Guide. Canberra: The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies[R/OL]. [2006-01-20]. <http://cres.anu.edu.au/outputs/software.php>. 2004
- [21] Yang Q K, Van Niel T G, 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. Canberra: CSIRO Land and Water, 2005
- [22] 吴立新. *地理信息系统原理与算法*. 北京: 科学出版社, 2003
- [23] Wahba G, Wendelberger J. Some new mathematical methods for variational objective analysis using splines and cross validation. *Monthly Weather Review*, 1980, 108:1122-1143
- [24] Delfiner P, Delhomme J P. *Optimum interpolation by kriging*. New York: John Wiley and Sons, 1975
- [25] Laslett G M. Kriging and splines: an empirical comparison of their predictive performance in some applications. *Journal of the American Statistical Association*, 1994, 89:391-409
- [26] Peter M, Chris D. Mapping precipitation in switzerland with ordinary and indicator kriging. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2):65-76
- [27] 李丽娟, 王娟, 李海滨. 无定河流域降雨空间变异性研究. *地理研究*, 2002, 21(4):434-440
- [28] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines-more than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 1994, 62(1-3):45-67
- [29] Hartkamp A D, Kirsten D B, Stein A, et al. Interpolation techniques for climate variables, *Geographic Information Systems series 99-01*. Mexico: International Maize and Wheat Improvement Center(CIMMYT), 1999, 1-26
- [30] Bates D, Lindstrom M, Wahba G. Gcvpack-routines for generalized cross validation. *Communications in Statistics B-Simulation and Computation*, 1987, 16:263-297
- [31] Hutchinson M F. The application of thin plate splines to continent-wide data assimilation// Jasper J D. *Data Assimilation Systems*, BMRC Research Report No.27. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991, 104-113
- [32] Wahba G. Spline models for observational data. *Paper Regional Conference Series in Mathematics 59*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1990