

Chang W Y, Dai X G, Chen H W. A case study of geostatistical interpolation to meteorological fields. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2004, 47(6):982~990

地质统计学在气象要素场插值的实例研究

常文渊^{1,2} 戴新刚^{1,2} 陈洪武³

1 兰州大学大气科学系, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所国家重点实验室 LASG, 北京 100029

3 新疆气象局, 乌鲁木齐 830000

摘要 对两种气象要素场数据分别用距离平方反比法、三次 B 样条和克里格 (Kriging) 法插值计算. 比较了三种方法结果的差异和当计算场满足不同类型克里格数学假设前提下, 普通克里格法 (OK) 与泛克里格法 (UK) 插值结果的异同. 结果表明: 克里格法的误差普遍偏小, 且在插值区域峰值处克里格法的最大绝对误差和残差方差均可能较样条的小, 说明只要充分了解研究区域特点, 恰当选用参数, 克里格法有可能得到优于样条的结果, 而距离平方反比法和克里格法用全场数据插值不如使用局部数据插值的精度高, 则表明内插计算具有局域性. 同时还发现, 虽然插值场是否满足克里格法假设对插值结果存在影响, 但这种影响有时并不重要, 它依赖于插值场的性质.

关键词 地质统计学 克里格插值 B 样条 气象要素场

文章编号 0001-5733(2004)06-0982-09 **中图分类号** P424 **收稿日期** 2003-06-12, 2004-06-21 **收修定稿**

A CASE STUDY OF GEOSTATISTICAL INTERPOLATION TO METEOROLOGICAL FIELDS

CHANG Wen2Yuan^{1,2} DAI Xin2Gang^{1,2} CHEN Hong2Wu³

1 Department of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 State Key Laboratory of Numerical modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, LASG, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Meteorological Bureau of Xinjiang, Bmqi 830000, China

Abstract We apply a Kriging interpolation, a geostatistic method, to meteorology and compare it with other traditional interpolations, i. e. the spline interpolation and the method whose weight is inversely proportional to the distance to a power. Two meteorological fields used in the paper are the sea2surface pressure field and the geo2potential height field on 500 hPa, respectively. An ideal field with a sharp variation is also used in our numerical investigation. The numerical results show that the Kriging is more accurate than the other two methods used if related parameters are well set and only the sampling points located in a small area around the estimated points. Even for the interpolation around the sharp area the Kriging still behaves well, while others did not. On the boundary of the interpolation field, there exist big errors for the spline while not for the Kriging. The results also indicate that the accuracy of the Kriging is not sensitive to stationary assumption. Though some preprocess may improve the field stability, it cannot always raise the accuracy of the Kriging efficiently. In addition, the default assump2

基金项目 国家自然科学基金项目(49875024)和国家重点实验室 LASG 开放课题资助.

作者简介 常文渊, 男, 1979 年生, 气象专业在读硕士, 主要从事气候及其预测理论研究. E2mail: changwy02@st.lzu.edu.cn

tion of the method of the inverse distance to a power is isotropy. As the meteorological fields are usually isotropic within 3000 km, it is not surprise that the interpolation methods with weights only related to the distances to a power between the interpolating points are wildly employed in meteorology despite its simplicity.

Key words Geostatistics, Kriging, B-spline, Meteorology interpolation.

1 引言

根据有限点的地质观测记录推测大范围场的结构,即利用四维观测资料,用动力的、统计的或动力加统计的方法将散布的不规则格点值插到规则格点上,该方法对地球科学各个领域都很重要.然而一般数值计算中插值方法多针对规则格点设计,如样条插值、小波插值、三次卷积插值等^[1~5],针对不规则格点插值的方法还很少.在气象中一方面常用基于以距离函数为权重的插值法处理非规则格点,如距离平方反比法和逐步订正法等.这些方法在气象业务中虽被广泛使用但毕竟过于简单.另一方面,在20世纪50年代末,一些运用统计手段分析气象场的工作先后出现.当时苏联科学家^[6]最先使用欧洲28个测站两年的观测研究了500 hPa位势高度的结构函数.1963年Bertoni et al.^[7]又根据大西洋和欧洲55个测站的地面气压资料绘制了相关系数分布图.他们的工作不仅为利用统计工具揭示气象要素场的内在结构做了有益尝试,而且也为日后的统计插值法的出现做了理论准备.20世纪90年代,气象业务中开始广泛使用一种名为最优插值(optimal interpolation,简称OI法)的统计方法,其原理是通过最小二乘估计确定当分析场误差方差取极小时样点的权重.

20世纪50年代,另一种名为地质统计学的统计插值方法逐渐兴起.最早由Krige等^[8~11]出于矿藏品位估计的需要而提出的一种加权滑动平均模型,其思想是根据取样空间位置和相关程度不同,赋予每个样点不同权重.1963年法国学者Matheron^[8]总结了Krige等人工作,发展完善了这种根据场的结构性确定样点权重的最优内插方法.经过几十年的发展,地质统计学理论日趋完善,应用范围不断扩展,目前已被广泛应用于地质、地理、海洋、生态、林业、土壤等众多领域^[9~12].

地质统计学的核心是克里格法.与传统插值法相比^[1,13],克里格法不仅能对不规则格点进行插值,而且还能根据多种要素场信息对某一要素场进行协

同插值;与OI法相比,克里格法既是一种对非均匀取样的内插方法,同时也是空间分析手段,最重要的是具备误差估计能力.然而目前气象领域中运用地质统计学的研究还很少,因此有必要将其引入气象要素场的特征结构分析和内插计算中,以替代常用的距离平方反比法等简单方法.本文在这一方向上初步尝试,主要分析比较克里格法、距离平方反比法和样条在两个气象要素场插值的性质和效果.

2 插值方法及数据

2.1 距离平方反比法

距离平方反比法是根据样点到插值点的距离确定权重的线性插值方法,有

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}}, \quad (1)$$

式中 n 为样点数目, z_i 为第 i 点的样点值, d_i 为第 i 个样点到插值点的距离, Z 为待估值.当样点与插值点重合时样点权重为1,其他点权重为0,插值点值等于样点值.

2.2 样条法

样条(Spline)是从工程实践中发展起来的插值方法^[2,14],其中三次B样条插值因精度高而被广泛使用.该方法使用分段低次多项式函数逼近曲面,一般在计算区域用不高于3次的多项式拟合,同时保证格点上插值函数直至二阶导数连续,再根据选用边界条件的不同解得相应样条函数.比较适合光滑曲面插值.

2.3 克里格法

地质统计学将研究的物理量称为区域化变量(regionalized variable),意指物理量在空间邻域内的相关现象,其核心内容克里格法根据变量平稳性的不同又分为普通克里格法(Ordinary Kriging,简称OK)和泛克里格法(Universal Kriging,简称UK),其中OK法要求区域化变量在统计上一、二阶矩存在且平稳(平稳假设),或者放宽条件只要求相邻变量

增量的数学期望平稳且为零(内蕴假设)^[9,10]; UK 法则假设区域化变量在研究领域内具有某种以多项式形式表征的漂移,从而无需平稳假设,适用于非平稳情形. 克里格法内插估计式为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n K_i Z(x_i), \quad (2)$$

式中 $Z(x_i)$ 为第 i 个取样点的值, $Z(x_0)$ 为插值点值, K_i 为各样点权重系数并由克里格方程组解得. 若用 OK 法求解则有 OK 方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n K_i r(x_i, x_j) + L = C(x_j, x_0), j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{i=1}^n K_i = 1, \end{cases} \quad (3)$$

OK 法估计方差 R_{OK}^2 为

$$R_{OK}^2 = \sum_{i=1}^n K_i C(x_i, x_0) + L, \quad (4)$$

(3)式第二式是无偏性条件, L 是方差极小化时的拉格朗日乘数, $C(x_i, x_j)$ 为样点间的变异函数值, $C(x_i, x_0)$ 和 $C(x_j, x_0)$ 为样点与插值点间的变异函数值, 它们都是不同空间点处物理量相关程度的度量, 由下式变异函数求得

$$C(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2, \quad P \times P \quad (5)$$

式中 $C(h)$ 是滞后 h 下的变异函数值, $N(h)$ 是滞后 h 时的数据对, 实际应用是先根据样点由(5)式算得实验变异函数曲线, 再由经验模型套合出变异函数的解析形式.

UK 法将区域化变量的数学期望视为空间位置的函数, 即

$$E[Z(x)] = m(x), \quad P \times P$$

$$\text{则 } Z(x) = m(x) + R(x), \quad P \times P \quad (6)$$

式中 $E[\#]$ 表示数学期望, $R(x)$ 为区域化变量 $Z(x)$ 围绕期望值的波动称为剩余. 漂移 $m(x)$ 通常用一个 K 次多项式描述

$$m(x) = \sum_{i=0}^K a_i x^i, \quad (7)$$

式中 a_i 为漂移系数. 由于内插时往往只考虑插值邻域内样点, 则 $m(x)$ 就是样点范围内的漂移, 且多用一次或二次多项式表示足矣, 此时区域化变量 $Z(x)$ 的变异函数等于 $R(x)$ 的变异函数, 有 UK 方程组

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n K_j C(x_i, x_j) + \sum_{l=0}^K L_l x_i^l = C(x_i, x_0), i = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{i=1}^n K_i x_i^l = x_0^l, \quad l = 0, 1, 2, \dots, K, \end{cases} \quad (8)$$

(8)式中第二式为无偏性条件, L_l 为漂移多项式中 l 次项的拉格朗日乘数. 实际计算中漂移既可由取样作曲面拟合, 也可由最优估计理论求得^[11]. UK 法估计方差 R_{UK}^2 为

$$R_{UK}^2 = \sum_{i=1}^n K_i C(x_i, x_0) - C(x_0, x_0) + \sum_{l=0}^K L_l x_0^l.$$

目前, 克里格法在地质统计学应用的主要问题在于能否全面考虑插值场的结构特征, 确定出恰当的变异函数, 这是保证方法精度的关键. 然而如何确定最优变异函数解析模型目前尚无有效方法, 这也是理论中惟一不能自动化计算的环节, 而且常用的有限变异函数经验模型能否适用各类不同形态的物理量场也有待研究.

2.4 资料

本文使用美国环境预报中心(NCEP)再分析资料, 分别是 1997 年 12 月海平面气压场月平均资料和 1999 年 1 月 1 日 500hPa 高度场日资料. 资料范围均为 $60^{\circ}E \sim 140^{\circ}E$, $70^{\circ}S \sim 70^{\circ}N$, 分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. 为了比较在有显著突变峰值的场中不同插值法的有效性, 文中还构造了一个各向同性的数学理想场,

$$Z(x, y) = \begin{cases} \frac{\sin(R)}{(R)}, \\ \sqrt{\left[\frac{x-29}{3}\right]^2 + \left[\frac{y-29}{3}\right]^2}, \text{其他}, \\ 0, \quad x = 29, y = 29, \end{cases} \quad (9)$$

在中心(29, 29)点处有显著峰值并向四周同步衰减直至边界处变为趋于零的微小振荡.

以上资料均构成 57×57 的格点阵. 在内插计算时抠去行列均为偶数的点作为插值点, 剩余点作为样点构成插值场. 对于距离平方反比法和克里格法均使用每个插值点周围的 8 个样点计算. 本文使用 Surfer7.0 提供的距离平方反比法和克里格法做内插, 样条插值在 MATLAB 中计算.

3 资料检验

欲用线性地统计学就应先确定研究场是否满足克里格假设. 本文使用移动窗口(moving window)统计来分析区域化变量的变化规律^[10]. 在研究区域内锁定一个矩形窗口, 求此窗口内 $Z(x)$ 的均值和相对标准差. 然后移动窗口对其余区域做同样计算, 通过窗内均值和相对标准差的变化了解区域化变量的一、二阶矩变化情况. 因为统计上证明均值是数学期

望的无偏估计量,对于 $Z(x)$ 在窗内的不同实现,均值可表征其数学期望.协方差描述 $Z(x)$ 不同实现间的离散情况,则对窗内的不同实现求其标准差就相当于求得离散情况,因此这种检验方法是合理的.但是由于协方差依赖平均数,平均数不同就不能简单地将协方差进行比较,因此这里用的是相对标准差

$$C_v = \frac{s}{m} @100, \quad (10)$$

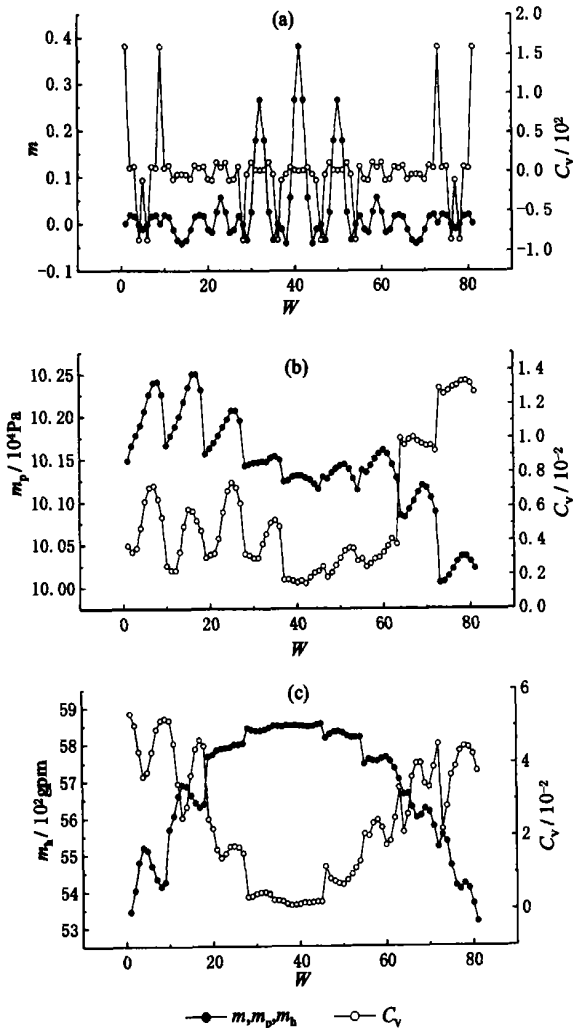


图1 移动窗口统计结果

(a)理想场; (b)海平面气压场; (c)500hPa高度场

Fig. 1 Statistical result of the fields using moving window statistics

式中 s 是窗内样点标准差, m 是窗内样点平均数,此时样点相对标准差的无量纲数 C_v 可用来相互比较.实践表明,一般有4种类型的统计曲线表明计算场适用克里格法^[10],这可作为判断插值场平稳与否的定性依据.

统计窗口从插值场西北角开始,从西向东,从北

向南移动,图1的横坐标即是这种窗口序列,以 W 表示.从图1a可知,理想场的相对标准差 C_v 基本集中在零值附近,可认为二阶矩平稳,其间的个别极值是因为此处均值接近于零的缘故.图1a均值 m 曲线中段出现极大值是因为原始场中心存在极大峰值,但考虑峰值所占空间范围有限且内插均为局部取样,所以整个理想场仍可视为准平稳.统计表明气压场和高度场的均值 m_p 和 m_h 及其相对标准差变化都不平稳(见图1b和1c),这种变化体现了原始场的基本形态,比如气压场北高南低,高度场在赤道地区梯度小等等.总之,气象要素场在本文所选范围内要符合OK法的准平稳假设有些牵强,UK法应更合适.

4 数值试验

本文均使用高斯模型手工拟合实验变异函数曲线.场内不同方向的不同变异程度常用异向性比表示,其确定方法是用全场变化最急最缓两个方向的变异函数模型之比来表示^[10,11].但实际上由于对这两个方向的确定以及该方向上模型类型、基台值复杂多变等因素,要准确确定出异向性比并非易事.为简化讨论,文中分别用异向性比2、4、8及各向同性计算,由于气象场梯度一般在南北向大于东西向,因此模型最大变程选为东西向.

4.1 理想场

对于各向同性的理想场,当使用OK法与UK法计算时发现两者结果非常接近,在最大误差、残差方差、相关系数上只在小数点后7、8位才出现差异,究其原因理想场相对平稳导致结果相近.相比之下,距离平方反比法的误差最大,样条与克里格法的残差方差位于同一量级(表1).

图2是插值误差分布图.从中可知3种方法在插值区域中心都有误差峰值,表明随平稳性减弱,内插精度也降低,这也是目前插值法中普遍存在的问题.在误差峰值处,距离平方反比法和样条的估值均偏小于真实值,分别是0.021、0.0002,而克里格法的误差偏大于真实值,为0.00015.图2a中距离平方反比法的误差等值线呈同心圆分布是权重仅与距离有关的必然结果.因为相同距离上的每一点都同等重要,没有哪一点有区别于其他点的特殊地位,因此误差也就同原始场一样呈现各向同性分布.图2b在插值区域边界有较大误差梯度是因为样条固定的边界条件造成导数在边界不连续.克里格法没有涉及导数,而是直

接利用样点间的相关性,因而避免了区域内任何大误差梯度的存在.图 2c 还表明克里格法误差极大值的四

周伴有 4 个误差极小值.这种极小值伴随极大值出现的情况,在一定程度上抑制了中心误差偏大的趋势.

表 1 理想场的插值结果的比较

Table 1 Comparison of the interpolating results for ideal field

插值法	最大绝对误差	最大相对误差	残差方差	相关系数
距离平方反比法	2.341×10^{-2}	0.593	2.558×10^{-5}	0.99995928
样条法	2.116×10^{-4}	1.507×10^{-2}	5.623×10^{-9}	0.99999994
UK(各向同性)法	1.765×10^{-4}	2.476×10^{-2}	2.245×10^{-9}	0.99999998

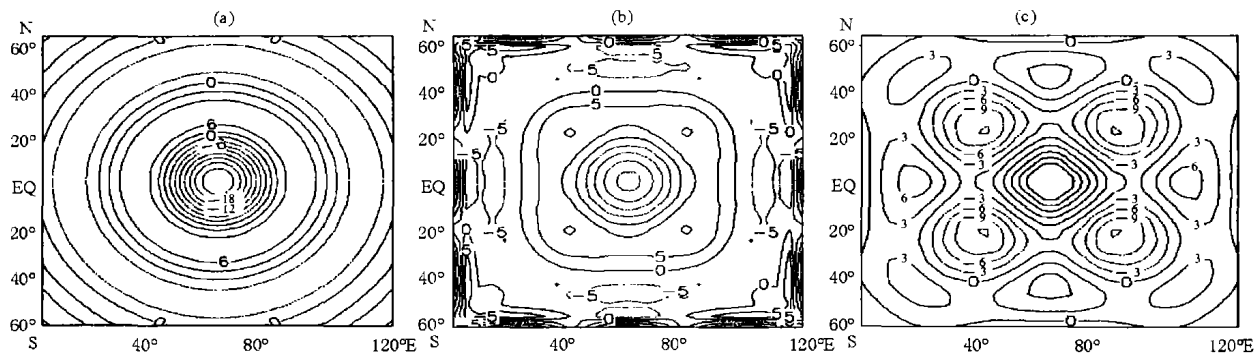


图 2 理想场插值结果误差图

(a) 距离平方反比法($\times 10^{-3}$); (b) 样条($\times 10^{-5}$); (c) 泛克里格各向同性($\times 10^{-5}$);
图中数字为无量纲.

Fig. 2 Interpolating errors of ideal field

4.2 海平面气压场

由于北半球陆地区域的海平面气压是由观测气压订正所得,因此在青藏高原处出现了虚假的海平面气压峰值.表 2 显示距离平方反比法的误差仍是最大,其残差方差已达到样条的 2 倍多,但相关系数却与样条相当.这是因为距离平方反比法虽然仅简单地假设权重为距离函数,但却抓住了内插为邻域计算的本质,而且相关系数是描述两个场的相似程度,因此虽然计算误差较大却仍有可能获得较高的相关.表 2 中克里格法设置的异向性比为 4,其计算

结果在 4 项指标上都明显好于样条,说明只要克里格法恰当设置参数是有可能得到优于样条的结果.

图 3 的误差分布图只绘制了北半球部分.从中可知,3 种方法最显著区别是距离平方反比法和样条在青藏高原出现误差峰值,而克里格法却并不明显.考虑到样条插值要求直至二阶导数连续,而峰值处曲率较大,因此二阶导数不足以描述曲率变化时样条精度就会受到限制,而克里格法则只要能准确构造变异函数就能保证精度.

表 2 海平面气压场的插值结果比较

Table 2 Comparison of the interpolating results for sea surface pressure field

插值法	最大绝对误差(Pa)	最大相对误差(Pa)	残差方差(Pa ²)	相关系数
距离平方反比法	182.583	1.769×10^{-3}	1175.439	0.99964252
样条法	135.000	1.323×10^{-3}	495.096	0.99978418
UK(异向性比 4)法	12.380	1.203×10^{-4}	6.803	0.99999709

4.3 500 hPa 高度场资料

500hPa 高度场的形态是赤道地区高而平稳并向两极降低.表 3 中克里格法的结果仍是最好,样条

次之,距离平方反比法最差.与表 2 比较可知,克里格法对高度场插值的残差方差远小于对气压场插值的方差,其原因可能是在高层大气大尺度结构影响

下,高层气象要素相关性好于地面的缘故.

图4是高度场内插误差的北半球部分.由于赤道地区高度场平稳的原因,距离平方反比法在这里误差较小,而受场的异向性影响,中高纬度则是误差等值线主要集中的区域,并在东经50°,北纬40°处

存在一个误差极值(图4a).样条和克里格法在全场的误差分布都比较均匀,究其原因两种方法都具备描述全场变化的因子,样条是分段多项式或样条基函数,克里格是全场变异函数,因此只要插值场比较光滑,两种方法都不会出现大梯度的误差分布.

表3 500hPa高度场的插值结果比较

Table 3 Comparison of the interpolating result for the 500hPa height field

插值法	最大绝对误差(gpm)	最大相对误差(gpm)	残差方差(gpm ²)	相关系数
距离平方反比法	22.917	4.368@10 ⁻³	24.460	0.99987258
样条	10.425	2.022@10 ⁻³	4.265	0.99997473
UK(异向性比4)	1.863	3.335@10 ⁻⁴	0.326	0.99999783

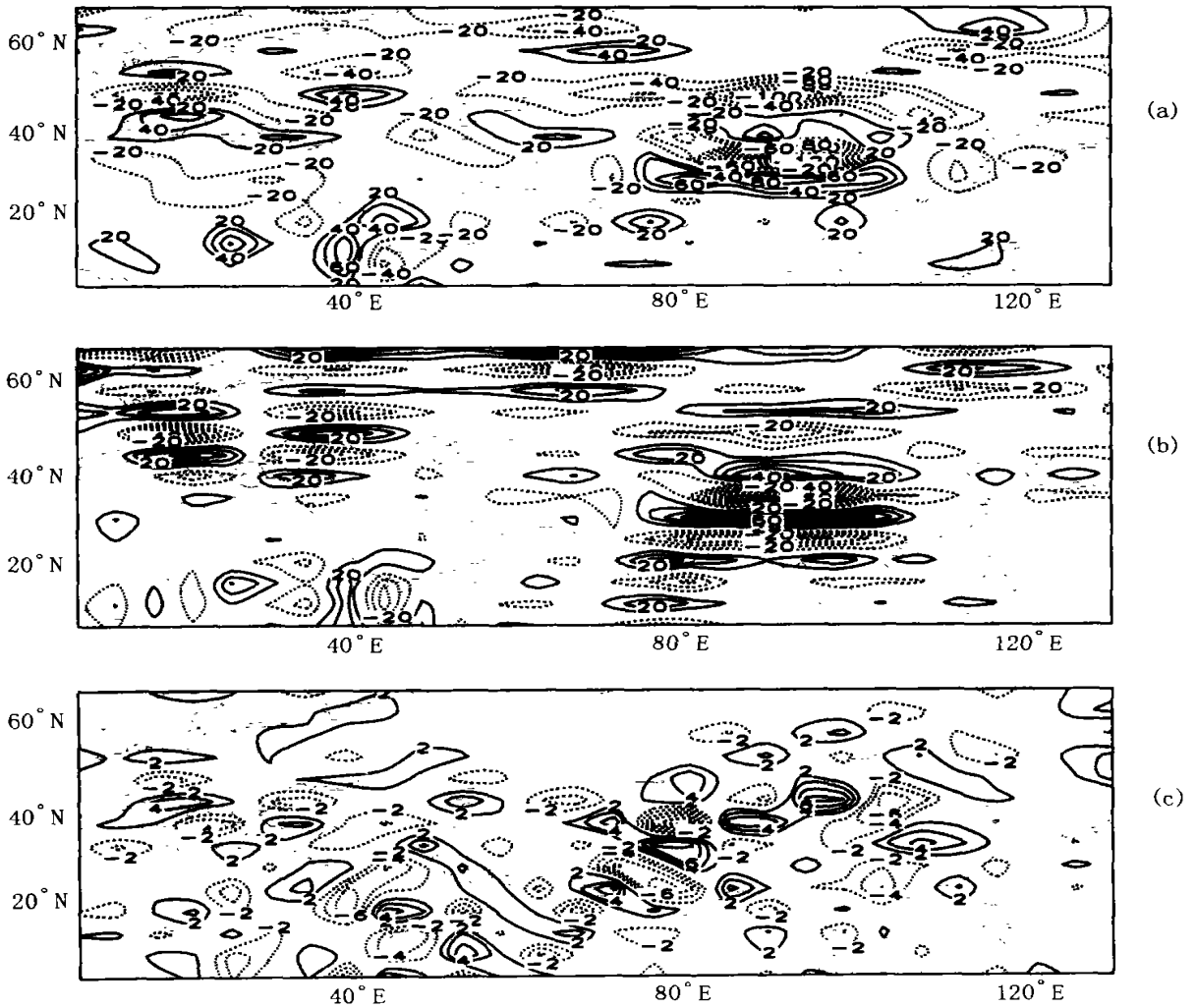


图3 1997年12月北半球海平面气压场插值结果误差图

(a)距离平方反比法;(b)样条;(c)泛克里格异向性比4.图中数字单位为Pa.

Fig. 3 Interpolating errors of sea surface pressure field in December 1997 on the North Hemisphere

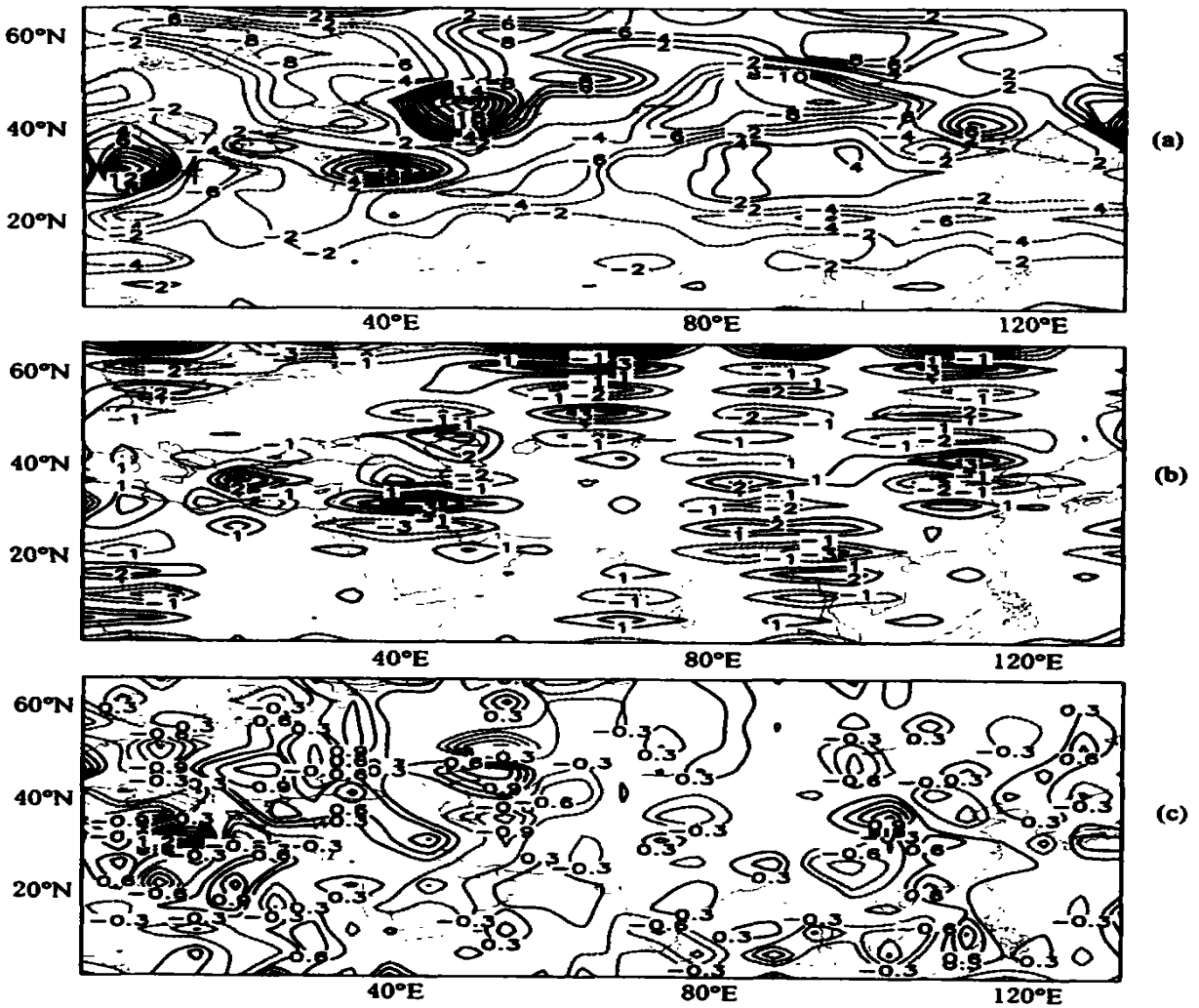
4.4 统计平稳性对克里格插值的影响

一般认为插值区域平稳性增强有利于改进克里格插值结果. 因此若能通过某种简单的预处理使原始场变得准平稳, 那就可用简单的 OK 法代替 UK 法, 也有可能得到更好结果. 为此, 本文先后对气象要素场进行了多种预处理尝试, 如二次多项式拟合、去除 21 年气候均值、分段拟合等, 计算表明去气候均值所得结果较好, 最大程度地消除了原始场的不平稳性, 且操作上也简单易行. 本文在去除 21 年气候均值的距平场上做同样计算, 将得到的距平场内插结果再加回均值并与原始场比较, 以考察克里格

法对统计平稳性的敏感程度.

表 4 统计平稳性对克里格法插值结果的影响
Table 4 The importance of the stationarity assumption in Kriging interpolation

克里格法 (异向性比 4)	残差方差	
	海平面气压场(Pa ²)	500hPa 高度场(gpm ²)
原始场 OK	6.94473392	0.32618060
原始场 UK	6.80258245	0.32614560
距平场 OK	23.61313258	0.30750746
距平场 UK	24.02132831	0.30750339



可视为准平稳,因此 UK 法对结果的改善并不明显;另一方面,区域平稳性增强对克里格法结果的改善不是必然,如表 4 中 UK 法在气压距平场上的插值结果反而更差.由于在气压距平场上用距离平方反比法和样条时,它们的插值结果确要好于原始场上的结果,这说明距平场确实比原始场平稳,然而克里格法的表现却与预想的不同.对此,估计原因是因为低层大气相异点之间的相关性比高层差,虽然除去气候均值改善了全场平稳性,但却不能增强样点间相关程度.

5 结论与讨论

5.1 若内插时用插值点周围的 4 个取样计算,则距离平方反比法和克里格法的结果完全一样.分析可知,插值受计算场各向异性和取样分布影响,在 4 个取样的小范围内场可视为各向同性.如果样点再对插值点成对称分布,则克里格法赋予每点的权重与距离平方反比法相同,两者插值结果完全一样.由此看来,距离平方反比法隐含着对插值区域的各向同性假设.另外,有学者认为对不超过 3000km 范围的气象场,其变异函数可视为只是距离的函数^[6],这等于默认研究域各向同性.这就是为什么距离平方反比法及各种以距离为函数的经验公式虽然形式简单,但在实际中却得以适用的原因.

5.2 若不用插值点周围的 8 个取样而改用全场样点做全局插值时,UK 法的精度要低于样条.究其原因,是全场数据的漂移更为明显、复杂,单靠一次或二次多项式来描述这种全场漂移是非常粗糙的.虽然仍可以使用次数更高的多项式计算,但计算过程势必更加复杂.

5.3 在经过某种预处理后的场上插值,UK 法对 OK 法结果的改善不是必然,这有赖于预处理方法并与不同气象要素场特性有关,而且即使存在这种改善也可能是微小的.

总之,距离平方反比法简单易用但精度有限,只在研究区域各向同性时才能得到较好结果;样条具有高精度,但在场内显著峰值处会出现较大估值误差;对于克里格法则只要能充分了解研究区域特征,恰当设置各项参数,则结果有可能优于样条,更优于距离平方反比法.虽然克里格法使用比较复杂,而且计算中有很多主观因素影响,尚需改进,但其众多优点也意味着具有很大的应用价值和研究意义.

参考文献

- [1] 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 X, Cheng G D, Lu L. Comparison of spatial interpolation methods. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 2000, 15(3): 260~265
- [2] 刘权威,边少峰.用样条函数对地球重力场进行 Fourier 分析.地球物理学报,1996,39(增):196~204
Liu Q W, Bian S F. Fourier analysis in the earth's gravity field using the Splines. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1996, 39(Suppl.): 196~204
- [3] 戴新刚,王国军,汪萍.小波抽样定理与气象要素场插值.计算物理,2003,20(6):529~536
Dai X G, Wang G J, Wang P. Wavelet sampling theorem and meteorological record interpolation. *Chinese J. Computational Physics. (in Chinese)*, 2003, 20(6): 529~536
- [4] 董恩清,刘贵忠,张宗平.自适应 Kalman 滤波反褶积的快速实现方法.地球物理学报,2001,44(2):255~262
Dong E Q, Liu G Z, Zhang Z P. Fast implementation technique of adaptive Kalman filtering deconvolution via dyadic wavelet transform. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2001, 44(2): 255~262
- [5] 李冰,刘洪,李幼铭.三维地震数据离散光滑插值的共轭梯度法.地球物理学报,2002,45(5):691~699
Li B, Liu H, Li Y M. 3D Seismic data discrete smooth interpolation using conjugate gradient. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2002, 45(5): 691~699
- [6] 张玉玲,吴辉碁,王晓林.数值天气预报.北京:科学出版社,1986.380~391
Zhang Y L, Wu H D, Wang X L. *Numerical Weather Prediction (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 1986. 380~391
- [7] Bertoni E, Lund T A. Space correlations of the height of constant pressure surfaces. *J. Appl. Met.*, 1963, 2: 539~545
- [8] Matheron G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 1963, 58: 1246~1266
- [9] 侯景儒,黄竟先.地质统计学理论与方法.北京:地质出版社,1990.35~105
Hou J R, Huang J X. *Theory and Method of Geostatistics (in Chinese)*. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 35~105
- [10] 王政权.地质统计学及在生态学中的应用.北京:科学出版社,1999.35~149
Wang Z Q. *Geostatistics and Application in Ecology (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 1999. 35~149
- [11] 王俊庸.地质统计学及其在煤炭资源开发中的应用.北京:煤炭工业出版社,1990.25~179
Wang J Y. *Geostatistics and Application in Exploitation of Coal Resources (in Chinese)*. Beijing: Coal Industry Press, 1990. 25~179
- [12] Monestiez Pascal, Courault Dominique, Allard Denis, et al. Spatial interpolation of air temperature using environmental context:

- Application to a crop model. Environmental and Ecological Statistics, 2001, 8(4): 297~ 309
- [13] 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 Z H, Mo X G, Li H X, et al. Comparison of Three Spatial Interpolation Methods for Climate Variables in China. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 2002, 57(1): 47~ 56
- [14] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999. 48~ 57
Li Q Y, Wang N C, Yi D Y. Numerical Analysis (in Chinese). Wuhan: Central China University Science and Technology Press, 1999. 48~ 57

欢迎订阅5地球物理学报6(中、英文版)

5地球物理学报6是有关地球物理学的综合性学术期刊, 刊登固体地球物理、应用地球物理、空间地球物理和大气、海洋地球物理以及与地球物理密切相关的交叉学科的研究论文, 主要报道创新性研究成果。

5地球物理学报6于1999年荣获首届国家期刊奖, 2000年获中国科学院优秀期刊特别奖, 2001年入围/中国期刊方阵0被评为/双高期刊0, 2003年获第二届国家期刊奖. 是中国科技信息研究所信息分析中心、中国科学院引文数据库等的统计源期刊和SCI等国际检索机构的统计源期刊。

5地球物理学报6中、英文版均为双月刊. 中文版于单月中旬出版, 英文版(网络版)由美国地球物理学家联合会(简称AGU)向世界发行, 双月底 Online.

中文版 刊号: ISSN 000125733

国外发行代号: BM 76 定价: 70.00 元/期

英文版 刊号: ISSN 089829591 定价: 100 元/年(6期)

学生和中国地球物理学会会员可按优惠价订阅.

联系地址: 北京 9825 信箱5地球物理学报6编辑部

邮 编: 100029

电 话: 010262007700、62007696

传 真: 62007709

E2mail: actageop@mail.igcas.ac.cn