

叶小岭, 沈云培, 熊雄. 2016. 一种基于改进克里金法的地面气温质量控制算法 [J]. 气候与环境研究, 21 (5): 614–520. Ye Xiaoling, Shen Yunpei, Xiong Xiong. 2016. A quality control algorithm for surface temperature observations based on improved Kriging method [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (5): 614–520, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15264.

一种基于改进克里金法的地面气温质量控制算法

叶小岭^{1,2} 沈云培¹ 熊雄³

1 南京信息工程大学信息与控制学院, 南京 210044

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

摘要 依据气温间的空间相关性, 将地统计学中的普通克里金法 (Ordinary Kriging, OK) 引入地面气温资料的质量控制。考虑气温在空间上的连续性, 提出一种基于高斯模型改进的普通克里金 (Improved Ordinary Kriging, IOK) 质量控制方法。为评估该方法的性能, 运用 IOK 法对江苏省 67 个台站 2008 年地面日平均气温资料进行质量控制, 并与 OK 法以及反距离加权法 (Inverse Distance Weighted, IDW) 进行比较。试验结果表明, IOK 法的检验效果优于 OK 法与 IDW 法, 且稳定性与适用性较高, 能有效地标记出气温观测数据中的可疑数据。

关键词 地面气温 质量控制 高斯模型 改进的普通克里金法 反距离加权法

文章编号 1006-9585 (2016) 05-0614-07

中图分类号 P413.2

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15264

A Quality Control Algorithm for Surface Temperature Observations Based on Improved Kriging Method

YE Xiaoling^{1,2}, SHEN Yunpei¹, and XIONG Xiong³

1 School of Information and Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract A method called Ordinary Kriging (OK) in Geostatistics was introduced for quality control of surface temperature observations based on spatial correlation of temperature. Due to the continuity of temperature, Gaussian model was chosen as the semi-variogram model. Because of some possible disadvantages in applying Gaussian model, it is necessary to improve Gaussian model. A quality control method based on Improved Ordinary Kriging (IOK) was developed in this study. In order to assess the effectiveness and applicability of the proposed method, daily mean surface temperature observations collected at 67 stations in Jiangsu Province were used for quality control, and the results were compared with that from OK and Inverse Distance Weighted (IDW) methods. It was found that IOK performs better than IDW and OK in error checking, and the proposed method can effectively identify errors in temperature data. In addition, IOK also has higher stability and applicability.

Keywords Surface temperature, Quality control, Gaussian model, Improved ordinary Kriging method, Inverse distance weighted method

收稿日期 2015-12-01; 网络预出版日期 2016-04-28

作者简介 叶小岭, 女, 1964 年出生, 教授, 主要从事地面气象资料质量控制与计算机应用研究。E-mail: nuist_yc@163.com

通讯作者 沈云培, E-mail: syp1464@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41675156, 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 PAPD, 江苏省六大学科高峰项目 WLW-021

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41675156), A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (Grant WLW-021)

1 引言

地面气象观测资料是区域或全球气候变化研究、数值天气预报、资料同化的基础,在资料应用前,对其进行质量控制,是保证资料发挥高效益的关键环节(任芝花等,2006),质量控制也是全国综合气象信息共享系统(CIMISS)的一个重要组成部分(熊安元等,2015)。气象数据质量控制即对气象台站和数据中心的资料审核,以便发现其中的缺测数据或错误数据并对其补充或修正,从而保证资料最大程度的完整和最大可能的准确(任芝花等,2015)。

国内外皆注重气象数据的质量控制研究,如北欧国家的4级质量控制、美国国家环境预报中心的质量控制、我国的3级质量控制等(熊安元,2003;韩海涛和李仲龙,2012)。地面气象观测资料的质量控制分为单站质量控制与多站质量控制。单站质量控制根据时间序列或同一台站相关要素对目标要素进行质量控制,传统的方法包括极值检查、时间一致性检查、内部一致性检查、缺测检查及综合检查等(孙林花等,2015);叶小岭等(2014)提出了基于基因表达式编程的质量控制方法,实现了相对湿度对气温的质量控制。多站质量控制根据邻近站对目标站进行质量控制,Barnes(1964)提出的反距离加权法(IDW),根据台站间距离分配权重,在山脊和山谷等地劣势较大;Lorenz and Hammon(1988)提出了一种通过贝叶斯概率判别粗大误差的质量控制方法,将贝叶斯概率引入到地面资料的质量控制中,从纯数学的角度计算观测资料出错的统计概率,Anderson and Järvinen(1998)在此基础上提出了变分质量控制法,通过优化基于观测场与背景场的代价函数来实现质量控制,对连续误差数据较敏感;Hubbard et al.(2005)提出了空间回归检验法(Spatial Regression Test, SRT),根据估计的标准差来分配权重,You and Hubbard(2006)利用SRT在对极端干湿天气数据的质量控制中取得良好效果,刘小宁等(2006)将SRT应用于我国气象资料质量控制,发现SRT适用于降水、风速等单一空间变化较大要素的检验;尹嫦姣等(2010)将差值稳定原理引入质量控制中,提出了空间差值检验法,其检验效果与台站间被检要素的相关程度有关;王海军和刘莹(2012)提出了基于

线性回归数据估计的质量检查方法,保持了时间一致性、内部一致性和空间一致性的逻辑关系,与一般方法相比,能更有效地检测出错误数据且第一类错误较少。

本文在根据邻近站与目标站间距离设计多站质量控制方法的基础上,将邻近站的间距及其空间分布也考虑在内,着眼于气象要素间存在的空间相关性,提出一种基于改进普通克里金(IOK)的多站质量控制方法,对江苏省2008年67个气象台站日平均气温进行质量控制。克里金法起初应用于矿业之中,之后广泛应用于土壤、石油探测、水文等领域,在气象领域主要用于降水量、气温等要素的空间化或气候的时空变化研究,时间尺度大多是年或月,如刘波等(2009)利用克里金法对新疆1960~2005年近地表主要气候要素(包括降水、气温、风速、日照时数、总云量、低云量、蒸发皿蒸发、气温日较差等)进行格点插值,借此分析它们演变的时间和空间特征。

2 数据

本文数据包括江苏省67个气象台站2008年地面日平均气温资料以及相关的地理信息,气温资料经过传统质量控制,明显的粗大误差已被剔除。为检验质量控制方法性能,参照Hubbard et al.(2007)在多站中的质量控制方法,在原始数据中种入随机产生的误差值来模拟可能产生的错误观测值,以此作为被检数据,误差值 C_x 由下式产生:

$$C_x = sp_x, \quad (1)$$

其中, p_x 是均匀分布的随机数,服从区间为 $[-q, q]$,均值为0, q 为可变参数, x 为误差值种入位置; s 为原始观测值标准差。

3 理论方法

3.1 普通克里金法

克里金法由Matheron(1971)提出,是从变量相关性和变异性出发,对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种统计方法,该方法的最佳适用条件是变量存在着空间相关性。普通克里金(OK)是应用最广、最普遍的克里金方法之一,其计算公式为

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

其中, $Z(x_0)$ 为待测点值, $Z(x_i)$ 是样本 x_i 处观测值, ω_i 为参与估值的样本点对待测点的权重, n 是样本点数目。

权重 ω_i 通过理论变异函数来求取, 是估值的关键, 而精确且分布合理的试验变异函数值是拟合理论变异函数的重要前提, 试验变异函数值通过下式计算:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (3)$$

其中, $\gamma(h)$ 为试验变异函数值; h 为分离距离; $N(h)$ 是分离距离为 h 的点对数; $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i + h)$ 为 $Z(x)$ 在位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的观测值。选择恰当的分距离、最大计算距离 (吴学文和晏路明, 2007), 计算试验变异函数值, 选用变异函数模型对其拟合, 常用的模型有高斯模型、球状模型与指数模型, 样本点 x_i 对待测点 x_0 的权重 ω_i 通过下式计算:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0), & j=1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, μ 为拉格朗日常数, $\gamma(x_i - x_j)$ 为 x_i 和 x_j 之间的变异函数值, n 是样本数。

3.2 反距离加权法

反距离加权法 (IDW) 是最常用的内插方法之一, 它基于相近相似的原理, 以样本点与待测点间的距离作为衡量标准, 计算公式为

$$\begin{cases} Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \\ \lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}, \end{cases} \quad (5)$$

其中, λ_i 是样本点对待测点的权重, d_{i0} 是样本点与待测点间的距离, p 默认值为 2。

OK 法与 IDW 法在分配权重时, 皆遵循与待测点距离越近的样本点权重越大的原则, 但 OK 法还考虑了各点间的空间相关性与样本点的空间分布。OK 的权重值因“过滤效应”和“集团效应” (孙强等, 2009), 可能小于 0 或大于 1, 因此估计值可以小于最小样本值或大于最大样本值, 更为符合现实情况, 这是 OK 法的优点之一。

3.3 评价指标

一般通过“交叉验证”评价插值方法的性能, 常用的评价参数有平均绝对误差 M_{AE} (Mean

Absolute Error, MAE) 和均方根误差 R_{MSE} (Root Mean Square Error, RMSE), MAE 反映预测误差的范围大小, RMSE 对特大或特小的误差反映非常敏感, 反映了预测的精密程度, 两者的值越小, 预测精度越高。

$$M_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - Q_i|, \quad (6)$$

$$R_{MSE} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [E_i - Q_i]^2 \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

其中, E_i 为第 i 个预测值, Q_i 为第 i 个实际观测值。

3.4 改进的普通克里金法

气温是较为连续的要素, 变异函数通常选用高斯模型, 但高斯模型存在比其它模型更大的块金值, 即受不确定性影响程度更大, 且预测过程中会加强“过滤效应”, 可能使得负权重过多, 从而导致估计结果过于异常 (张仁铎, 2005)。考虑到变异函数只要满足正定, 即可认为该函数有效 (Armstrong and Diamond, 1984), 所以本文中引入可变参数 α , 代替原高斯模型中的参数值 2, 改进后的普通克里金法记为 IOK 法。其模型公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0, \\ C_0 + C[1 - e^{-(h/a)^\alpha}] & 0 < h \leq \sqrt[3]{3}a, \\ C_0 + C & h > \sqrt[3]{3}a, \end{cases} \quad (8)$$

其中, C_0 为块金值 (Nugget), 反映了受不确定性因素影响的程度; $C_0 + C$ 为基台值 (Sill), 反映了区域变量 $Z(x)$ 总的变异强度; a 为变程 (Range), 是具有空间相关性的最大距离; h 为分离距离。

令 α 取不同值时, 式 (8) 中参数会随之变化, IOK 法的预测误差也有不同。以某日平均气温预测为例, 当改变参数 α 时, Nugget 及预测 RMSE 随指数 α 变化而变化, 变化趋势如图 1 所示。随着 α 值的增大, 两参数值同样先减小后增大; RMSE 最小时, α 位于 0.1~0.6, 此时 Nugget 趋于 0, 符合选用变异函数模型要求预测误差与块金值都较小的原则。

3.5 IOK 质量控制法

IOK 法相比 OK 有一定的优势, 将其应用到地面气温资料的质量控制, 构建了 IOK 质量控制法。本文中质量控制法的主要思路是: 应用各插值方法

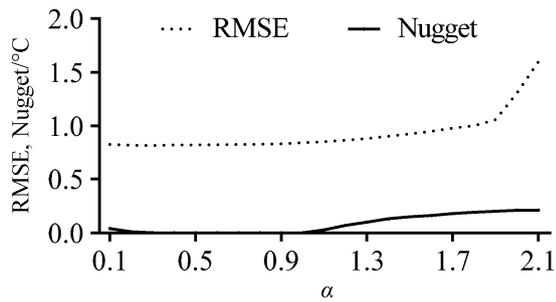


图1 不同 α 值时参数变化
Fig. 1 Variation trend of parameters with different α

对各台站值进行估计，将估计值与种入随机误差后的原始值进行比较，若其差值满足式(9)则认为数据正确；如果不满足则认为数据可疑，对可疑数据进行标记。

$$|E_i - Q_i| \leq f \cdot \sigma, \quad (9)$$

其中， E_i 为估计值； Q_i 为原始值； σ 为预测标准误差； f 为质量控制参数，其值可随应用要求而变化。气象资料质量控制过程中对可疑数据进行标记，会出现概率统计学中的第一类错误与第二类错误；屠其璞等(1984)认为应在控制“第一类错误”发生概率的前提下，使“第二类错误”达到最小，根据此原则，计算质量控制法检出添加错误的比率，简称为检错率(Ratio)，通过检错率评价质量控制方法的性能。

4 试验结果及分析

4.1 预测结果及分析

使用 IOK 法、OK 法与 IDW 法 3 种方法分别计算江苏省 2008 年每日各台站日平均气温估计值，其中就 IOK 法与 OK 法而言，为了避免季节的趋势影响，单独每日均对应一个变异函数模型(Merino et al, 2001)。通过“交叉验证”对 3 种方法的预测性能进行比较，预测误差年均值如表 1 所示，IOK 法的年均 MAE 值和 RMSE 值均最小，预测精度相对于 IDW 法提高了约 50%，相对于 OK 法提高了约 10%。

表 1 IOK、OK 与 IDW 法下日均温预测误差的年均值
Table 1 Annual average prediction errors of daily temperature by IOK (Improved Ordinary Kriging), OK (Ordinary Kriging), and IDW (Inverse Distance Weighted)

	IOK 法		OK 法		IDW 法	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
年均值	0.37	0.49	0.41	0.56	0.69	0.87

计算出各台站每日的估计值之后，便能得到每个台站全年的日平均气温估计值。如表 2 所示为各台站年预测误差统计，3 种预测方法的误差最小值、最大值与平均值均是 IOK<OK<IDW；图 2 是各台站的 MAE 值与 RMSE 值，3 种方法在各台站的预测误差大小趋势基本一致，但在不同台站的预测精度有较大差异，下文选取其中的一些台站进行了成因分析。对比各台站所在具体位置，发现江苏省范围内的预测误差呈现边界略高、中间较低，宜溧山地与太湖相交之处大于其它地区的整体趋势。

表 2 各台站全年日平均气温值预测误差

Table 2 Annual prediction errors of daily mean temperature averaged over all stations

	IOK 法		OK 法		IDW 法	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
最小值	0.18	0.23	0.20	0.25	0.36	0.46
最大值	0.93	1.51	0.98	1.71	1.46	1.83
平均值	0.37	0.48	0.41	0.54	0.69	0.86

影响算法预测精度的因素主要为地形与台站分布密度两方面，冯锦明等(2004)认为在台站分布密集的区域不同插值算法之间差异较小，在台站分布稀疏的区域可能存有较大差异；Zhao et al. (2008)认为温度插值的精度很大程度上取决于原始数据所在的海拔，与地形复杂度成反比。为探讨不同地区台站的预测性能产生如图 2 所示差异性的具体原因，选取连云港赣榆、南通海安、南京、无锡宜兴、徐州睢宁与淮安共 6 个典型台站进行对比分析，这 6 个台站周围 90 km 范围内邻近台站数分别为 7、16、12、12、6 与 15，3 种方法下此 6 站的预测误差如图 3 所示。赣榆位于江苏省东北部的沿海地区，境内山区、平原、沿海各占三分之一，属季风气候，受海洋的影响，和同纬度内陆地区相比，春季温度较低，气温回升缓慢，冬夏温度变化平缓；海安位于沿海平原地区，同属季风气候，受海洋气候影响。南京低山丘陵占全市总面积的 60% 以上，地貌形态多样，与周围地区地形气候差异较小；宜兴地势南高北低，南部为丘陵山区，北部为平原区，东部为太湖区，西部为低洼圩区，整体地形复杂度高，局部地区小气候多变。睢宁地形由南部的广阔平原和西北部少量山丘组成，属暖温带季风气候；淮安地处黄淮平原和江淮平原，无崇山峻岭，地处北亚热带和暖温带过渡地带，季风气候明

显。对比赣榆与海安、睢宁与淮安发现，在沿海与内陆同一气候地区，台站分布密度是主要影响要素，IOK 法、OK 法与 IDW 法的预测精度皆存在随台站分布密度增大而提高的趋势，其中 IDW 法受其影响最明显，IOK 法最小，OK 法居中；IOK 法在台站密度较小时相对于 OK 法与 IDW 法存在明显的优势，随着台站密度的增大，优势略有减小，符合已有结论。对比南京与宜兴发现，同一台站分布密度下，若局部区域地形复杂度较高，气候复杂多变，则会使得预测误差有所增大，符合已有结论，但将宜兴与赣榆相比，可知台站分布密度在一定程度上能弥补地形的影响。综上所述，改进后的 OK 法预测精度有所提高，与 IDW 法相比有较大优势，在台站密度较低时，IOK 法的改进效果最为明显；IOK 法受地形与台站分布密度影响程度小于 IDW 法，在地形以平原为主的江苏具有更好的预测性

能。

4.2 检验效果及分析

在各台站的全年观测数据中种入随机错误值，根据式 (9) 检验数据，计算各台站检错率，如图 4 所示是 3 种方法下同一个城市不同台站的平均检错率与 6 个典型台站的检错率。从图 4 看，不同质量控制法在同一个城市的检错率高低趋势类似，其中 IOK 法的检验效果最佳；IOK 法在各城市的检错率均值为 85%，最低为 82%，最高为 87%，在不同地区均有较好的检验效果且差距较小；IDW 法在徐州与连云港的检错率较低，表明其对地形与台站分布密度比较敏感，不同城市间检错率差距最大达 12%，在不同城市检错率起伏较大，适应性与稳定性较低；IOK 法一定程度上弥补了地形与台站分布密度的影响，有着更好的检验效果，适用性更强，台站密度越高，检验效果越好。

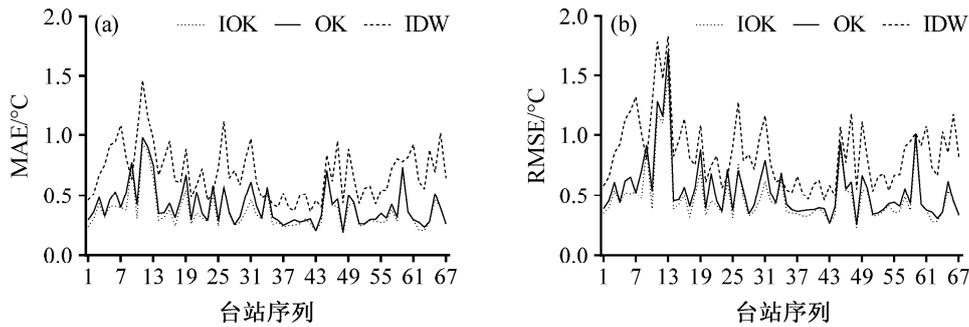


图2 各台站 (a) MAE 值与 (b) RMSE 值

Fig. 2 (a) MAEs (Mean Absolute Errors) and (b) RMSEs (Root Mean Square Errors) at individual stations

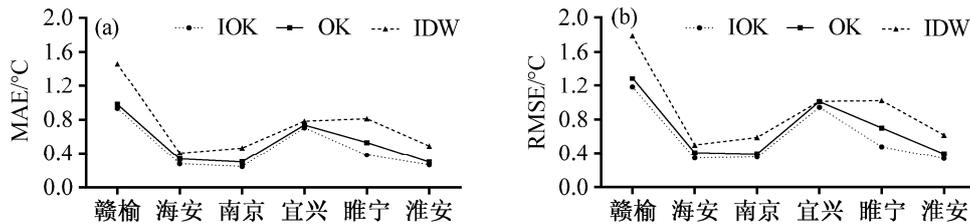


图3 典型台站 (a) MAE 与 (b) RMSE 值

Fig. 3 (a) MAEs and (b) RMSEs at typical stations

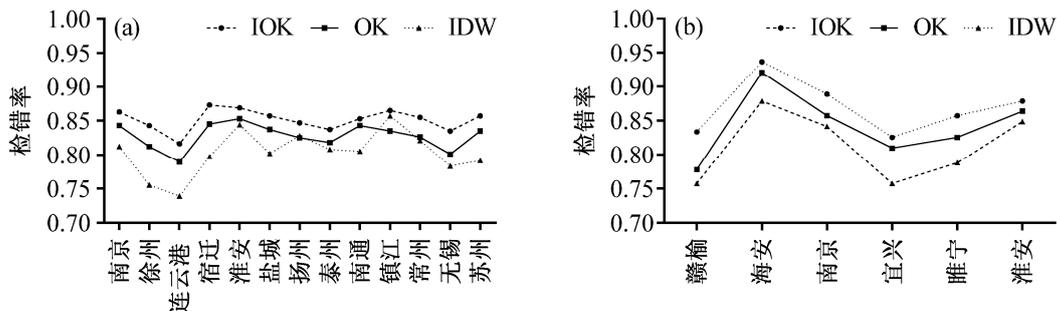


图4 不同方法下 (a) 各城市与 (b) 典型台站的检错率

Fig. 4 Error detection rates (a) in different cities and (b) at typical stations by different methods

表 3 不同 q 值下检错率

Table 3 Error detection rates with different values of q

	检错率											
	$q=0.1$	$q=0.2$	$q=0.3$	$q=0.4$	$q=0.5$	$q=1$	$q=1.5$	$q=2$	$q=2.5$	$q=3$	$q=3.5$	$q=5$
台站 1	59.1%	72.7%	80.3%	77.3%	77.3%	86.4%	89.4%	84.9%	89.4%	90.9%	86.4%	92.4%
台站 2	56.1%	75.8%	69.7%	80.3%	81.8%	80.3%	81.8%	87.9%	87.9%	92.4%	81.8%	92.4%
台站 3	59.1%	80.3%	80.3%	72.7%	84.9%	87.9%	82.8%	87.9%	81.8%	86.4%	84.9%	89.4%

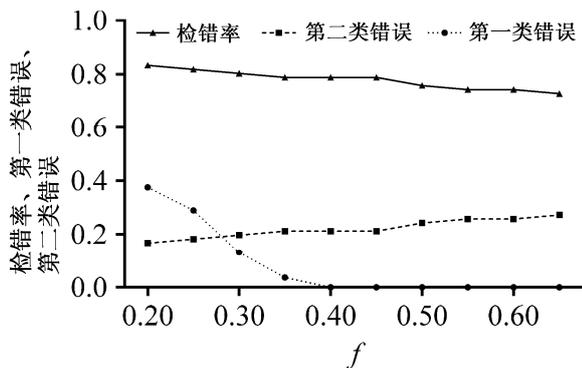


图 5 不同 f 值下的第一类错误、第二类错误以及检错率
Fig. 5 Error I, Error II and error detection rates with different f

为了判别 f 值对检验效果的影响，在人为添加错误值 C_x 不变的情况下， f 取不同值时，某台站的检验结果如图 5 所示。当 f 为 0.2 时，第一类错误最大，第二类错误最小；随着 f 值增大，第一类错误减小，第二类错误增大，检错率逐渐减小。根据上文原则，选择第一类错误与第二类错误差值最小时的检错率作为最佳检错率。

为了判别 q 值对检验效果的影响，在质量控制参数 f 一定的情况下，令 q 取不同值即 C_x 不同时，某 3 个台站的检验结果见表 3。检错率有随着 q 的增大而增大的总体趋势；当 $q=0.1$ 时，检错率都小于 0.6，因为此时插入错误值误差较小，不易被检验出来；随着 q 逐渐变大，检错率逐步增大，当 $q \geq 1$ 时，检错率稳定在 0.8 以上，能很好地检验出此幅度的误差。

通过以上分析可以看出，质量控制参数 f 表示了对气象数据的质量要求，具体值需要根据具体应用环境来确定，减小 f 可以尽可能多地标记出可疑值，若对数据质量要求较低，可以增大 f 值； q 值表示质量控制法对不同幅度误差的检测能力， q 越小表示检测能力越强。

5 结论

本文提出了一种新的质量控制方法——IOK 法对江苏省 2008 年地面日平均气温资料进行检验，

并与 OK 法和 IDW 方法进行比较，可以得到以下结论：

(1) IOK 法不仅考虑邻近站与目标站之间的距离，还将邻近站的空间分布与要素的空间相关性考虑在内，取得了比 OK 法与 IDW 法更高的预测精度，预测性能主要受台站分布密度影响，台站密度较小时优势较大，改进最为明显；

(2) IOK 法与 OK 法、IDW 质量控制法在江苏每个城市的检错率高低趋势类似，但 IOK 法相对于 OK 法和 IDW 法具有更好的检验效果，能够有效地标记出可疑数据；

(3) IDW 法对地形环境和台站分布密度较为敏感，而 IOK 法在不同城市的检错率差距较小，具有更高的稳定性与适应性。

本文所述是 IOK 法在质量控制上的简单应用，仅仅针对单一气象要素的质量控制，对其他气象要素的检验效果有待进一步研究；为了继续提高检验效果，减弱边界效应，可以考虑添加江苏省周边省市的气象台站作为邻近站；在地形起伏较大的地区，需要考虑地形对插值的影响，提高方法的地区适用性。

参考文献 (References)

Anderson E, Järvinen H. 1998. Variational quality control [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 125 (554): 697–722, doi: 10.1002/qj.49712555416.

Armstrong M, Diamond P. 1984. Testing variograms for positive-definiteness [J]. J. Inter. Assoc. Math. Geol., 16 (4): 407–421, doi: 10.1007/BF01029889.

Barnes S L. 1964. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis [J]. J. Appl. Meteor., 3(4): 396–409, doi: 10.1175/1520-0450(1964)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2.

冯锦明, 赵天保, 张英娟. 2004. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 261–277. Feng Jinming, Zhao Tianbao, Zhang Yingjuan. 2004. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 261–277, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2004.02.04.

韩海涛, 李仲龙. 2012. 地面实时气象数据质量控制方法研究进展 [J].

- 干旱气象, 30 (2): 261–265. Han Haitao, Li Zhonglong. 2012. Review of quality control methods of surface real time meteorological data [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 30 (2): 261–265, doi: 10.3969/j.issn.1006-7639.2012.02.018.
- Hubbard K G, Goddard S, Sorensen W D, et al. 2005. Performance of quality assurance procedures for an applied climate information system [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22 (1): 105–112, doi: 10.1175/JTECH-1657.1.
- Hubbard K G, Guttman N B, You J S, et al. 2007. An improved QC process for temperature in the daily cooperative weather observations [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 24 (2): 206–213, doi: 10.1175/JTECH1963.1.
- 刘波, 冯锦明, 马柱国, 等. 2009. 1960~2005 年新疆气候变化的基本特征 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 414–426. Liu Bo, Feng Jinming, Ma Zhuguo, et al. 2009. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 414–426.
- 刘小宁, 鞠晓慧, 范邵华. 2006. 空间回归检验方法在气象资料质量检验中的应用 [J]. 应用气象学报, 17 (1): 37–43. Liu Xiaoning, Ju Xiaohui, Fan Shaohua. 2006. A research on the applicability of spatial regression test in meteorological datasets [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (1): 37–43, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.01.005.
- Lorenc A C, Hammon O. 1988. Objective quality control of observations using bayesian methods. Theory, and a practical implementation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 114 (480): 515–543, doi: 10.1002/qj.49711448012.
- Matheron G. 1971. The Theory of Regionalized Variables and Its Applications [M]. Paris: École Nationale supérieure des Mines, 5: 711.
- Merino G G, Jones D, Stooksbury D E, et al. 2001. Determination of semivariogram models to krige hourly and daily solar irradiance in western Nebraska [J]. J. Appl. Meteor., 40 (6): 1085–1094, doi: 10.1175/1520-0450(2001)040<1085: DOSMTK>2.0.CO; 2.
- 任芝花, 许松, 孙化南, 等. 2006. 全球地面天气报历史资料质量检查与分析 [J]. 应用气象学报, 2006, 17 (4): 412–420. Ren Zhihua, Xu Song, Sun Huanan, et al. 2006. Quality check and analysis on the historic global surface synoptic observations [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (4): 412–420, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.04.004.
- 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制体系研制 [J]. 气象, 41 (10): 1268–1277. Ren Zhihua, Zhang Zhifu, Sun Chao, et al. 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41 (10): 1268–1277, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.010.
- 孙林花, 徐娟, 李仲龙, 等. 2015. 区域气象站实时资料问题分析与质量控制 [J]. 干旱气象, 33 (3): 521–527. Sun Linhua, Xu Juan, Li Zhonglong, et al. 2015. Analysis and quality control about real time data from regional automatic weather stations [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33 (3): 521–527, doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-03-0521.
- 孙强, 薛雷, 王媛媛. 2009. 克里金参数估值法及其在参数估计分析中的应用 [J]. 岩土力学, 30 (S2): 371–373. Sun Qiang, Xue Leilei, Wang Yuanyuan. 2009. Kriging method for parameter estimation and its application to geo-engineering [J]. Rock and Soil Mechanics (in Chinese), 30 (S2): 371–373.
- 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 1984. 气象应用概率统计学 [M]. 北京: 气象出版社, 183–186. Tu Qipu, Wang Junde, Ding Yuguo, et al. 1984. Probability Statistics of Meteorology Application (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 183–186.
- 王海军, 刘莹. 2012. 综合一致性质量控制方法及其在气温中的应用 [J]. 应用气象学报, 23 (1): 69–76. Wang Haijun, Liu Ying. 2012. Comprehensive consistency method of data quality controlling with its application to daily temperature [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23 (1): 69–76, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2012.01.008.
- 吴学文, 晏路明. 2007. 普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法——以福建省一月均温空间内插为例 [J]. 地球信息科学, 9 (3): 104–108. Wu Xuewen, Yan Luming. 2007. Setting parameters and choosing optimum semivariogram models of ordinaty Kriging interpolation—A case study of spatial interpolation to January average temperature of Fujian Province [J]. Geo-Information Science (in Chinese), 9 (3): 104–108, doi: 10.3969/j.issn.1560-8999.2007.03.020.
- 熊安元. 2003. 北欧气象观测资料的质量控制 [J]. 气象科技, 31 (5): 314–320. Xiong Anyuan. 2003. Quality control of meteorological observational data in Nordic countries [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (5): 314–320, doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2003.05.013.
- 熊安元, 赵芳, 王颖, 等. 2015. 全国综合气象信息共享系统的设计与实现 [J]. 应用气象学报, 26 (4): 500–512. Xiong Anyuan, Zhao Fang, Wang Ying, et al. 2015. Design and implementation of China integrated meteorological information sharing system (CIMISS) [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26 (4): 500–512, doi: 10.11898/1001-7313.20150412.
- 叶小岭, 周建华, 熊雄. 2014. 一种基于 GEP 的地面气温观测资料的质量控制方法 [J]. 热带气象学报, 30 (6): 1196–1200. Ye Xiaoling, Zhou Jianhua, Xiong Xiong. 2014. A GEP-based method for quality control of surface temperature observations [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30 (6): 1196–1200, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2014.06.021.
- 尹嫦娥, 江志红, 吴息, 等. 2010. 空间差值检验方法在地面气象资料质量控制中的应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 229–236. Yin Changchao, Jiang Zhihong, Wu Xi, et al. 2010. A research on the application of spatial difference method in quality control of surface meteorological data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 229–236, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.03.02.
- You J S, Hubbard K G. 2006. Quality control of weather data during extreme events [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 23 (2): 184–197, doi: 10.1175/JTECH1851.1.
- 张仁铎. 2005. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 13–37. Zhang Renduo. 2005. Spatial Variability Theory and Application (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 13–37.
- Zhao T B, Guo W D, Fu C B. 2008. Calibrating and evaluating reanalysis surface temperature error by topographic correction [J]. J. Climate, 21 (6): 1440–1446, doi: 10.1175/2007JCLI1463.1.