

广东沿海地区极值风速空间插值方法的对比研究

蔡彦枫¹, 张灿亨¹, 黄勇²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663;
2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 利用反距离加权法、Cressman 法、基于规则样条函数和平板样条函数的径向基函数法、普通 Kriging 法和泛 Kriging 法等 4 大类共 6 种空间插值方法, 对位于广东沿海地区的 26 个国家级气象站、101 个自动气象站和 6 个海洋站在内的 133 个站点重现期为 50 年离地 10 m 高 10 min 平均的最大风速进行空间插值研究, 并进行交叉验证和空间分布对比。结果表明, Cressman 法的绝对误差最小; 泛 Kriging 法的均方根误差最小, 相关系数最高; 泛 Kriging 法在空间分布上更贴合实际情况, 更适用于广东沿海地区极值风速的空间插值。

关键词: 极值风速; 空间插值; 交叉验证

中图分类号: P444

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0187-06

Study on the Comparison of Spatial Interpolation Methods Used to Estimate Extreme Wind Speed Spatial Distribution Using Irregularly Distributed Station Data in Guangdong Coastal Area

CAI Yanfeng¹, ZHANG Canheng¹, HUANG Yong²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute, Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Data from 26 national reference weather stations, 101 regional automatic weather stations and 6 ocean observation stations in Guangdong coastal area are collected. Inverse Distance Weighting scheme, Cressman Interpolation scheme, Radial Basis Function scheme and Kriging method are then employed to study the continuous extreme wind speed distribution spatial interpolation experiment of 10 min averaged extreme wind speed at 10 meters above ground with a return period of 50 years. Cross-validation shows that the Mean Absolute Error of Cressman Interpolation is least while Universal Kriging interpolation lead to the least Root-Mean-Square Error and the best correlation coefficient. It is indicated that Universal Kriging interpolation is more appropriate for extreme wind speed spatial interpolation in Guangdong coastal area.

Key words: extreme wind speed; spatial interpolation; cross-validation

在输电线路工程的设计、改造及防灾减灾研究中, 风荷载是不可或缺的设计输入和控制因素。广东全省大陆岸线长达 3 368.1 km, 居全国第一位^[1]; 在广阔的沿海走廊上分布着数量众多的输电线路网。研究表明, 广东位于西北太平洋热带气旋和南海热带气旋登陆中国的主要路径上, 受高空引导气流影响, 热带气旋在此地登陆的频率最高, 使得广东成为全国热带气旋灾害最严重的省份^[2-4]。热带气旋登陆造成的风灾是危及沿海地区电网安全

的重大隐患之一。历次热带气旋登陆, 都使登陆地区电网遭受重大损失, 如 1996 年登陆湛江的 9615 号强台风, 造成湛江电厂出线段 6 km 内的 220 kV 湛江线及湛尼线发生部分倒塔; 2008 年强台风“黑格比”登陆粤西地区, 造成阳江的 110 kV 平闸甲、乙线大面积倒塔; 2013 年强台风“天兔”登陆汕尾, 造成 500 kV 惠茅乙线部分导线断线, 220 kV 桂星线发生部分倒塔等; 中低压配电网受灾情况则更为严重。因此, 针对沿海地区的极值风速开展研究, 对于合理确定新建输电线路工程的设计风速, 指导已建线路工程的抗风改造, 以及确保沿海地区电网的稳定运行等方面具有重要的理论和现实意义。

气象站点的风速观测资料是计算极值风速的重

收稿日期: 2014-12-01

作者简介: 蔡彦枫(1986), 男, 广西柳州人, 助理工程师, 硕士, 主要从事电力工程水气象条件评估(email: caiyanfeng@gedi.com.cn).

要来源。随着我国气象事业现代化的推进,各地先后投运了数量可观的区域自动气象站,使得风速的空间观测密度大幅提升。但对于长度在 $10 \sim 10^2$ km量级的输电线路而言,沿线可供参考的气象站点数目仍然有限,为此需要引入空间插值方法,以期准确地表达极值风速在区域空间上的整体分布特征,并且获取无资料地点的极值风速。

国内外学者对气温、降水等常规气象要素的空间插值方法(反距离加权法、样条函数法、多项式法、趋势面法、Kriging法等)进行了广泛讨论,普遍认为同一种插值方法对不同对象的插值效果存在差异,应针对研究对象自身的特点、气象站点数目和分布特征在各类插值方法中选择相对适合的方法^[5-10]。但已有研究很少涉及诸如极值风速这样的特殊对象^[11]。本文旨在根据广东沿海地区气象台站极值风速的计算成果,通过空间插值试验和比较分析,得出适用于极值风速的空间插值方法。

1 资料与方法

1.1 数据来源

本文采所用的数据来源于:

1) 国家级气象站:距海岸线约100 km范围内,通过台站代表性、资料一致性和可靠性审查及与自动站的相关度,选择26个拥有30年以上测风资料的国家级气象站作为区域参证站。

2) 区域自动气象站:选取2003年以来陆续建立的拥有5~10年以上的测风资料的101个自动气象站,与区域参证气象站建立相关关系。

3) 海洋站:位于粤西、珠三角和粤东沿海的6个海洋站,每个台站均有30年以上的测风资料。

气象站点的空间分布见图1。

1.2 资料处理

按照《电力工程气象勘测技术规程》(DL/T 5158—2012),输电线路工程需要考虑的极值风速为一定重现期下的离地10 m高时距为10 min平均的最大风速值。而按照《110 kV~750 kV架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010),110 kV~330 kV等级设计风速重现期为30年(年出现概率不高于3.3%),500 kV、750 kV等级设计风速重现期为50年(年出现概率不高于2%)。

因此,首先对国家级气象站和海洋站建站以来的历年最大风速序列进行高度和时距订正;然后根

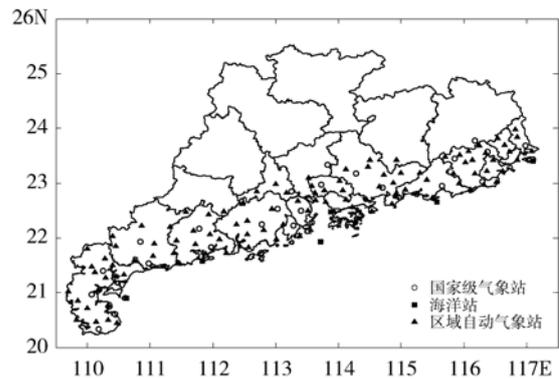


图1 广东沿海地区筛选的气象站与海洋站空间分布示意图

Fig. 1 Location of Weather Stations and Ocean Observation Stations Selected in Guangdong Coastal Area

据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)的极值I型概率分布计算上述站点重现期为30年和50年的极值风速;最后结合自动气象站与其参证气象站最大风速的比例关系推算各区域自动站的重现期为30年和50年的极值风速。

最终用于空间插值试验的样本为上述133个站点重现期为50年的离地10 m高10 min平均最大风速(换算至标准空气密度状态下),如图2所示。

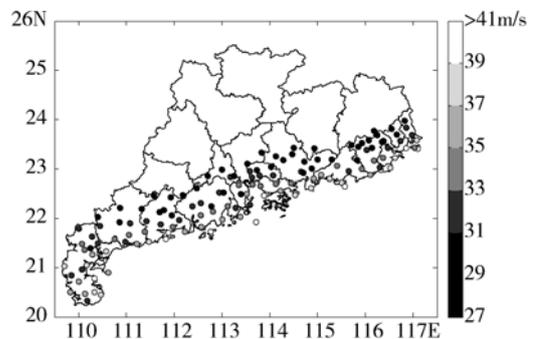


图2 广东沿海地区气象站与海洋站50年一遇最大风速值

Fig. 2 Extreme Wind Speed in Return Period of 50 Years of Weather Stations and Ocean Observation Stations in Guangdong Coastal Area

1.3 插值方法

1.3.1 反距离加权法

反距离加权法(Inverse Distance Weighted, IDW)的一般公式如下:

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

式中: z^* 为插值点的气象要素; z_i 为气象要素在第*i*个站点的值; n 为插值所需的站点总数; λ_i 为各个站点的权重,该值随着站点与插值点之间距离的

增加而减少。各个站点权重的计算公式为:

$$\lambda_i = d_i^{-p} / \sum_{i=1}^n d_i^{-p} \quad (2)$$

式中: d_i 为插值点与第 i 个站点间的距离; p 为指数值, 本文 p 取 2; 实际操作过程中需要设定一定的搜索半径 D , 选取范围以内的站点进行插值。

1.3.2 Cressman 法

Cressman 法 (Cressman Interpolation, CI) 的一般公式如下:

$$Z^* = z_0 + \Delta z \quad (3)$$

$$\Delta z = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4)$$

式中: z_0 为该气象要素的初值; Δz 为订正值与初值之差; Δz_i 为第 i 个站点上订正值与初值之差; n 是搜索半径 D 之内的站点数; λ_i 为权重因子, 一般形式为:

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{D^2 - d_i^2}{D^2 + d_i^2} & (d_i < D) \\ 0 & (d_i \geq D) \end{cases} \quad (5)$$

实际操作过程中需要进行多次订正, 搜索半径 D 根据经验设定。

1.3.3 径向基函数法

径向基函数法 (Radial Basis Function) 可以表示为:

$$Z^*(x) = \sum \lambda_j \Phi(\|x - x_j\|) \quad (6)$$

其满足插值条件:

$$\sum \lambda_j \Phi(\|x_k - x_j\|) = z_k, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

根据径向基函数的正定性和快速收敛性, 可以通过线性代数算法求解系数 λ_j , 从而获取实际函数在径向基函数空间中的逼近值。

常用的径向基函数包括: 规则样条函数 (Completely Regularized Spline, CRS)、平面样条函数 (Thin Plate Spline, TPS) 等, 表达式如下:

$$\Phi_{CRS} = d^3 \quad (8)$$

$$\Phi_{TPS} = d^2 \log(d + 1) \quad (9)$$

式中: d 为插值点与站点之间的距离。

1.3.4 Kriging 法

Kriging 插值可以表示为:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (10)$$

为达到线性无偏估计, 使估计方差最小, 权重系数 λ_i 可以列出 Kriging 线性方程组进行求解, 并利用半变异函数表示:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}(x_i - x_j) \lambda_i + \mu = \bar{\gamma}(x_0 - x_j) \\ (\sum_{i=1}^n \lambda_i) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

常用的半变异函数有: 球型函数 (Spherical function, Sph)、指数型函数 (Exponential function, Exp)、高斯型函数 (Gaussian function, Gau) 等。表达式如下:

$$\gamma_{Sph} = \begin{cases} \frac{3d}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{a}\right)^3, & 0 \leq d \leq a \\ 1 & d > a \end{cases} \quad (12)$$

$$\gamma_{Esp} = 1 - \exp\left(-\frac{d}{a}\right), d \geq 0 \quad (13)$$

$$\gamma_{Gau} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{a}\right)^2\right), d \geq 0 \quad (14)$$

式中: d 为插值点与站点之间的距离; a 为变程。

本文采用 Kriging 插值方法系列中的普通 Kriging (Ordinary Kriging, OK) 和泛 Kriging (Universe Kriging, UK) 两种衍生方法。

1.4 检验方法

采用交叉验证方法 (Cross-Validation) 来验证各种空间插值方法的插值误差。具体形式为 K -fold 验证, 即将插值样本随机分割成 K 个子集, 一个单独的子集作为验证集, 其他 $K-1$ 个子集作为训练集。交叉验证重复 K 次, 每个子样本验证一次, 平均 K 次的结果作为空间插值误差, 本文 K 取 10。

空间插值误差的统计指标如下:

1) 平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)| \quad (15)$$

2) 均方根误差 (Root-Mean-Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]^2} \quad (16)$$

3) 相关系数 (Correlation Coefficient, CC)

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - \overline{z^*(x_i)}) (z(x_i) - \overline{z(x_i)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - \overline{z^*(x_i)}]^2 \sum_{i=1}^n [z(x_i) - \overline{z(x_i)}]^2}} \quad (17)$$

4) 各站相对误差 (Relative Error, RE)

$$RE = |z^*(x_i) - z(x_i)| / z(x_i) \quad (18)$$

2 试验结果

2.1 参数设置

根据 1.3 节的介绍, 除属于全局精确性插值方法的径向基函数法不需要设定参数外, 反距离加权法和 Cressman 法均需要设定搜索范围, 而 Kriging 法则需要设定半变异函数及其变程。从本文气象站点空间分布的不均匀性出发, 为保证插值过程中所利用站点数目的有效性以及插值误差的稳定性, 经过数值试验, 反距离加权法的搜索半径 D 取 40 km; Cressman 法进行 4 次订正, 首次订正的搜索半径 D 取 120 km, 余下订正则每次递减 36km; Kriging 法的半变异函数形式为球形函数, 变程 a 取 120 km, 如图 3 所示; 泛 Kriging 插值的倾向函数为线性函数。

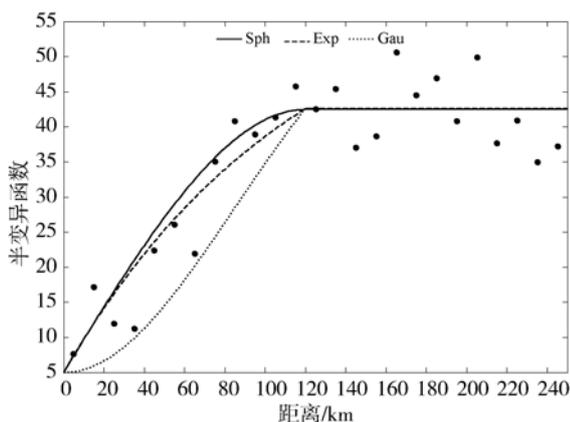


图3 Kriging 法的半变异函数

Fig. 3 Semi-variation Function for Ordinary Kriging Interpolation and Unverse Kriging Interpolation

2.2 插值误差对比

首先对各种插值方法的整体插值误差进行检验。表 1 显示了交叉验证的统计结果, 其中, 反映误差值上界的绝对误差 (MAE) 的大小排序为 $CI < UK < OK < TPS < CRS < IDW$, 反映误差离散程度的均方根误差 (RMSE) 的大小排序为 $UK < CI < OK < TPS < CRS < IDW$, 反映误差空间特性的相关系数 (CC) 的大小排序为 $UK > CI > OK > TPS > CRS > IDW$ 。可以看出, 泛 Kriging 插值 (UK) 和 Cressman 插值 (CI) 取得了最低的 MAE、RMSE 和最高的 CC, 插值精度最高; 径向基函数插值次之; 而反

距离加权插值 (IDW) 的各项统计指标与其他插值方法差距较大。

表 1 交叉验证统计结果

Table 1 Statistical Results of Cross-Validation

统计指标	IDW	CI	CRS	TPS	OK	UK
MAE	3.204	2.284	3.183	2.603	2.469	2.319
RMSE	7.438	3.858	4.947	4.258	4.002	3.839
CC	0.369	0.769	0.673	0.734	0.748	0.775

为了进一步分析插值误差在空间上的分布情况, 对各个站点的相对误差 (RE) 进行分区间统计。表 2 显示了交叉验证中 RE 在各站点的分布情况, 其中, RE 小于 10% 的站点数排序为 $CI > UK > IDW > OK > TPS > CRS$, RE 大于 30% 的站点数排序为 $CI、OK、UK < TPS < IDW、CRS$ 。可以看出, 泛 Kriging 插值 (UK) 和 Cressman 插值 (CI) 在单个站点出现高相对误差的频率更低, 插值结果更加稳定。

表 2 不同相对误差的站点数占比

Table 2 Statistics of Relative Error

RE	IDW	CI	CRS	TPS	OK	UK
<5%	58%	64%	55%	63%	60%	61%
5% ~ 10%	25%	20%	18%	16%	21%	22%
10% ~ 20%	11%	9%	16%	13%	12%	12%
20% ~ 30%	3%	5%	8%	7%	7%	5%
30% ~ 50%	3%	1%	3%	2%	1%	1%

2.3 空间分布对比

除了统计误差, 空间分布形态也是评价插值方法的重要方面。选择插值误差较小的三种插值方法: Cressman 法 (CI)、基于平板样条函数的径向基函数法 (TPS) 和线性趋势面的泛 Kriging 插值 (UK) 进行对比。各种插值方法的空间插值结果见图 4。由图可知, 三种插值结果的空间形态整体一致, 均体现了极值风速呈现由海及陆迅速衰减的趋势, 并且由于加入了自动气象站的信息, 等值线在从茂名至潮州的复杂海岸线近岸段过渡更加真实, 并且更为清晰地反映粤西和粤东山地的地形阻塞效应。

相比而言, TPS 在粤东部分近岸处的风速等值线与海岸线走势并不吻合, 表现也存在缺陷; CI 在粤西 (阳江、江门) 与粤东 (汕尾、惠来) 等地的海陆交界处的过渡表现不佳, 等值线曲率过大, 甚至呈现出锯齿状; UK 在插值区域边缘, 特别是低风速区间的过渡连续性更强。

统计结果表明, UK 在粤西沿岸区域的平均相对误差(RE)为 6.62%, CI 则为 6.82%; 两者在粤东沿岸区域的平均 RE 分别为 3.64% 和 3.98%。说明 UK 在沿海近岸地区具有更好的适用性。

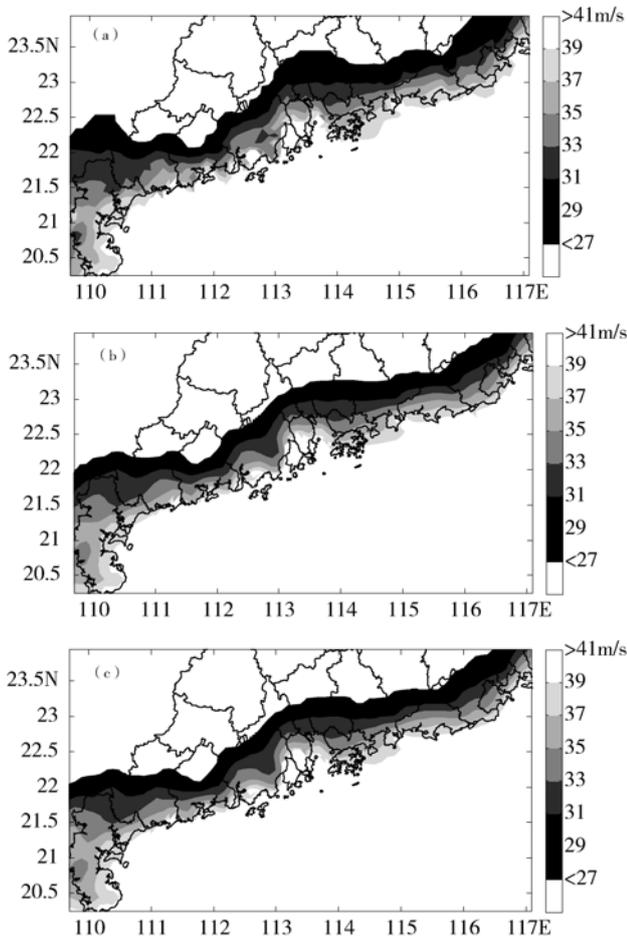


图 4 Cressman 法、径向基函数法与 Kriging 法的插值结果空间分布对比 (a) CI; (b) TPS; (c) UK

Fig. 4 Spatial Interpolation of Extreme Wind Speed in Guangdong Coastal Area by (a) CI; (b) TPS and (c) UK

3 讨论与分析

通过反距离加权法、Cressman 法、径向基函数法和 Kriging 法的空间插值试验可以发现, 反距离加权插值(IDW)的统计误差相较其他方法明显偏大, 并且在单个站点出现更大频率的高相对误差。该方法基于相近相似的原理, 根据周围站点的加权平均来确定插值结果; 需要站点均匀分布, 并且密度程度足以满足在分析中反映局部表面变化。因此更适用于气温和太阳辐射等空间连续性更强的气象要素, 而面对局地性更强的降水、风

速等要素时则容易因临近站点的异常值造成插值结果失真。

径向基函数插值(CRS、TPS)适用于对大量站点进行插值计算的情况, 可以形成平滑的插值表面; 从空间分布对比可以看到, 其与泛 Kriging 插值的空间分布基本一致, 仅在局部地区存在差异。但该方法仍然不适用于如风速等在一段较短的水平距离内出现发生较大的局地变化的变量, 因此虽然取得优于反距离加权的插值误差, 但与 Cressman 插值和 Kriging 插值仍有差距。

Cressman 插值(CI)实质是一种逐步订正的内插方法, 多次迭代计算逐步逼近实测值, 因此比反距离加权法包涵更多的临近站点信息, 更适用于降水等局地性较强的气象要素, 从而取得更小的统计误差。但 Cressman 插值只考虑周围站点的距离来确定权重, 无法考虑站点间的空间相关性, 因此可能出现一定程度的偏向^[12], 最终导致其空间分布在海陆交界处的等值线曲率过大。

泛 Kriging 插值(UK)作为 Kriging 插值的一种, 适用于在空间上既有相关性又带有随机特征的气象参数(如风速), 其本身假定区域化变量具有某种以多项式表征的倾向, 从而无需平稳假设, 因此也适合于非平稳情形。在本文中, 由于极值风速由海及陆迅速衰减, 在设定倾向函数为线性函数的情况下, 泛 Kriging 插值取得了最低的统计误差和合理的空间分布形态。

4 结论

已有的研究工作甚少涉及极值风速的空间插值, 本文利用反距离加权法、Cressman 法、径向基函数法和 Kriging 法等四类空间插值方法, 将筛选的广东沿海地区 133 个气象站点重现期为 50 年的离地 10 m 高 10 min 平均最大风速作为样本, 对广东沿海地区 50 年一样最大风速进行空间内插。交叉验证结果发现 Cressman 插值绝对误差值最小, 泛 Kriging 插值均方根误差值最小; 另外泛 Kriging 插值的空间分布比其余插值方法的结果更合理可靠。综上所述, 泛 Kriging 插值更适于广东沿海地区极值风速的空间插值。上述结论可以为华南地区其他省份的极值风速插值研究提供有益参考。

参考文献:

- [1] 宋丽莉. 中国气象灾害大典广东卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [2] 唐晓春, 刘会平, 潘安定, 等. 广东沿海地区近 50 年登陆台风灾害特征分析 [J]. 地理科学, 2003, 23(2): 182-187. TANG Xiaochun, LIU Huiping, PAN Anding, et al. Analysis of Disastrous Features of Landing Typhoon in Coastal Regions of Guangdong Province in Recent 50 Years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(2): 182-187.
- [3] 王同美, 温之平, 李彦, 等. 登陆广东热带气旋统计及个例的对比分析 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(5): 97-100. WANG Tongmei, Wen Zhiping, Li Yan, et al. Comparative Analysis of The Duration Reason of Tropical Cyclones Landing on Guangdong [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(5): 97-100.
- [4] 胡娅敏, 宋丽莉, 罗晓玲. 近 58 年登陆广东热带气旋位置和生成源地的变化 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(4): 113-120. HU Yamin, SONG Lili, LUO Xiaoling. The Variation of the Location and Source Region of Tropical Cyclones Making Landfall in Guangdong Over the Past 58 Years [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(4): 113-120.
- [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 Zhonghui, MO Xingguo, LI Hongxuan, et al. Comparison of Three Spatial Interpolation Methods for Climate Variables in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 57(1): 47-56.
- [6] APAYDIN H. SONMEZ F K, YILDIRIM Y E. Spatial Interpolation Techniques for Climate Data in the GAP Region in Turkey. Climate Research, 2004(28): 31-40.
- [7] 于飞, 郑小波, 谷晓平, 等. 复杂山地环境下气候要素空间插值精度比较研究 [J]. 贵州气象, 2008, 32(3): 3-6. YU Fei, ZHENG Xiaobo, GU Xiaoping, et al. Comparison of Spatial Interpolation for Climatic Element in Complex Mountain Terrain [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2008, 32(3): 3-6.
- [8] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究—以 2009 年中国年降水为例 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818. ZENG Hongwei, LI Lijuan, ZHANG Yongxuan, et al. Study on Spatial Interpolation of Precipitation with Large Scale Samples: A Case Study on 2009's Precipitation of China [J]. Progress in Geography, 2011, 30(7): 811-818.
- [9] 金君, 彭思岭, 刘启航, 等. 中国陆地区域气象要素空间插值方法比较研究 [J]. 工程勘察, 2010(11): 48-51. JIN Jun, PENG Siling, LIU Qiliang, et al. A Comparative Study of Spatial Interpolation Methods for Meteorological Elements in China [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(11): 48-51.
- [10] 胡林涓, 彭定志, 张明月, 等. 雅鲁藏布江流域气象要素空间插值方法的比较与改进 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 449-452. HU Linjuan, PENG Dingzhi, ZHANG Mingyue, et al. Spatial Interpolation of Meteorological Variables in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2012, 48(5): 449-452.
- [11] YE Wei. Spatial Variation and Interpolation of Wind Statistics and Its Implication in Design Wind Load [D]. Ontario: The University of Western Ontario, 2013.
- [12] 郑永骏, 金之雁. 对偶 Kriging 插值方法在气象资料分析中的应用 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 201-208. ZHENG Yongjun, JIN Zhiyan. The Application of Dual Kriging Interpolation Method to Meteorological Data Analysis [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(2): 201-208.

(责任编辑 林希平)