

空间插值法在热环境流动观测中的应用

杨永川^{1,2}, 杨轲¹, 王志浩¹, 卢军^{1,2}

- (1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆, 400045;
2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆, 400045)

摘要: 以重庆都市区华岩公园 3 次流动观测(GPS+温湿度自动记录仪)的温度为例, 选取常用的反距离加权插值法、普通克里格插值法和样条插值法 3 种空间插值方法, 对不同插值方法及其在不同参数时的空间温度插值结果进行验证分析和评价, 筛选出适合流动观测的空间插值法。最后, 根据普通克里格插值法中的指数模型插值得到的温度场, 分析了华岩公园的冷岛效应。研究表明: 普通克里格插值法的指数模型对描绘流动观测(GPS+温湿度自动记录仪)范围内的温度场分布效果最佳, 其他模型的插值结果精度波动性大; 对测点密度大且分布均匀的温度可使用反距离加权插值法进行快速插值, 但要根据温度的密度来确定 1 个合适的幂指数; 样条函数插值法精度不稳定且不可估计, 因此, 该方法不适用于流动观测数据的空间插值处理。

关键词: 空间插值; 交叉验证; 流动观测; 温度场

中图分类号: X831

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2012)09-3741-08

Application of spatial interpolation in moving observations of thermal environment

YANG Yong-chuan^{1,2}, YANG Ke¹, WANG Zhi-hao¹, LU Jun^{1,2}

- (1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The temperature data derived from three times of moving observations (GPS+Automatic temperature humidity data logger) in Huayan Park of Chongqing Metropolitan area were taken for example. Three common spatial interpolations (Inverse Distance Weighted, Kriging and Spline methods) were selected to acquire the temperature field. The spatial interpolation results of different methods and different parameters were analyzed and evaluated. Finally, the cool island effect of the Huayan Park is analyzed according to the temperature field obtained by exponential model of ordinary Kriging. The research results show that the exponential model of the Kriging method has the best effect on describing the air temperature field distribution in the moving observation region, while the accuracy of other models fluctuates. The inverse distance weighted method can get good results when the observation temperatures are of big density and uniform distribution, but an appropriate power must be chosen. The results obtained from spline interpolation method have an unstable accuracy and cannot be estimated, so this method is not applicable in temperature spatial interpolation of moving observation.

Key words: spatial interpolation; cross-validation; moving observation; temperature field

收稿日期: 2011-09-29; 修回日期: 2011-12-20

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAJ02A02-05)

通信作者: 杨永川(1977-), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 从事城市生态环境研究; 电话: 13883319188; E-mail: yongchuanyang@yahoo.com.cn

随着人们对城市热环境的关注程度越来越高,对城市微气候研究不断深入。对热环境的研究方法目前主要有遥感图像分析^[1-4]、固定点观测^[5-7]和流动观测^[8-11]等。遥感图像分析不能直接获得空气温度,且由于观测精度有限不能用于城市微气候观测^[1];固定点观测多用于大范围的气候观测及预报^[5],对城市微气候观测则很难达到理想的精度。流动观测在交通便利的城市有其独特的优势,因此,该方法是城市微气候观测中最有效的方法。20 世纪以来, Schmidt 等应用流动观测方法开展了城市热岛效应的研究。流动观测得到的温度具有独特的特征,与气象学上的气象站点温度有很大不同,它分布不均匀,也不具备同时性,因此,必须先进行同时性订正^[11],订正后的温度并不能清晰直观地反映整个观测区域的温度分布特征,因此,需要对得到的温度进行空间插值,以便直观地反映观测区域的温度分布特征^[8]。空间插值法是一种通过已知点或分区数据,外推求任意点或分区数据的方法。它是基于“地理学第一定律”的基本假设:在空间位置上越靠近的点具有相同特征值的可能性越大;而距离越远的点,其具有相似特征值的可能性越小。气象学上常用的插值法有反距离加权插值法(Inverse Distance Weighted, 以下简称 IDW)、克里格插值法(Kriging)和样条插值法(Spline)。虽然在在气象学上对于温度的插值法有一定的定论,但是,气象学是从宏观角度来研究温度,与微尺度的热环境有很大不同,流动观测得到的温度与固定站点观测的温度有明显不同,它在观测路线上温度密集,对这种特征的温度使用什么样的空间插值方法比较合适,迄今没有学者从具体实例出发给出证明。本研究采用上述 3 种插值方法对在重庆都市区内的华岩公园开展的 3 次流动观测结果进行插值,并对结果进行验证分析和评价,从而确定在流动观测中较适用的空间插值法,并对研究区热环境进行评价。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究所用的温度是 2009 年 9 月 9 日在重庆都市区华岩公园进行流动观测所测得的 3 组温度(观测时间分别为 9:00, 11:00 和 13:00),流动范围约 1.5 km×2.5 km,每组温度有 500 个左右。

1.2 插值方法

1.2.1 反距离加权插值法

反距离加权插值法是最常用的插值方法之一,其

依据是空间数值与距离成反比的空间特性,公式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

式中: $Z(x_0)$ 为 x_0 点处的估算值; N 为用于插值的邻近点的个数; $Z(x_i)$ 为样点 x_i 处的实测值; λ_i 为第 i 个样点对估值点贡献的权重,它由下式计算^[12]:

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^p}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^p}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中: d_{i0} 为待估点与样点间的距离; p 为距离的幂,它控制着随距离增大权系数的变化,同时,也决定着内插结果的平滑效果。其选择标准是最小平均误差。

1.2.2 普通克里格法(Ordinary Kriging)

普通克里格法是地统计学中的一种重要的插值方法,它是以区域变量理论为基础,以变差函数为主要工具,在保证估计值满足无偏性和有效性的前提下求得估计值。设区域化变量 $f(x)$ 满足二阶平稳假设或本

征假设,则待插点 P 的估计值为 $f_p = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i$ (式中 f_i 是 n 个已知点的函数值, ω 是 n 个已知点的全系数,并满足: $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$)。再根据估计的方差最小的条件:

$\sum \omega_i \gamma(x_j - x_i) + \mu = \gamma(x_p - x_i) (i=1, 2, \dots, n)$ (其中, μ 为拉格朗日算子, $\gamma(x_j - x_i)$ 为已知点间的变差函数值, $\gamma(x_p - x_i)$ 为已知点与待插点间的变差函数值。)求出待插点 P 的估计值^[13]。简单地说,克里格插值法就是一种特定的滑动加权平均法。

普通克里格法根据拟合半方差模型的不同可分为球形模型(Spherical)、环状模型(Circular)、指数模型(Exponential)、高斯模型(Gaussian)和线性模型(Linear)。普通克里格法使用数学函数与方法指定参数以适应在不同数据中的不同直线或曲线,普通克里格法假设数据的任何部分都是自由变化的,利用这 5 种模型,以确保提供的变化可以满足数据的变化,但这并不可能总是与实际的数据相适应。

1.2.3 样条函数法(Spline)

Spline 是在空间插值时准确地通过实测样点拟合出连续光滑表面。其表达式如下^[14]:

$$Z = \sum \lambda_i R(\gamma_i) + T(x, y) \quad (3)$$

式中: Z 为要预测的值; n 为参与插值的实测点数; λ_i 为一系列线性方程解所确定的系数; γ_i 为估测点到第 i

点的距离; $R(\gamma_i)$ 和 $T(x, y)$ 表达式如下:

$$R(\gamma_i) = \frac{\frac{\gamma_i}{4} \left\{ \ln \left(\frac{\gamma}{2\pi} + c - 1 \right) + \tau^2 \left[k_0 \left(\frac{\gamma}{\tau} \right) + c + \ln \left(\frac{r}{2\pi} \right) \right] \right\}}{2\pi} \quad (4)$$

$$T(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (5)$$

式中: τ_2 为权重系数; γ 为已知点与采样点之间的距离; k_0 为改正后的贝塞尔函数; c 为常数; a 为线性方程的系数。

1.3 数据分析

首先对流动观测所得到的温度进行误差修正和时间修正^[11], 将所测温度按流动观测路线排列, 从排列好的温度中每隔 2 行提出 1 行(约 33.3%)用于验证插值结果, 用剩下的(约 66.6%)温度进行插值, 插值在 ARCGIS9.2 中完成, 再利用空间分析中的栅格计算工具在插值结果图层和验证点图层之间进行乘法运算提取出验证点的插值结果, 并对验证点的插值结果图层和验证点的实测图层进行比较, 计算均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和平均标准差(RMSIE), 考察使用不同的插值方法时 3 种误差的变化情况。通过分析误差确定在流动观测温度中的最佳插值方法。

2 结果分析

分别对 3 组 66.6% 的温度进行插值, 得到的结果有所不同, 图 1 所示为上午 9:00 的温度插值结果, 图 2 所示为 3 组温度在 3 种插值方法不同参数下的误差计算结果。下面对 3 种插值方法结合温度进行具体分析。

2.1 反距离加权法的分析

在 3 组数据中, IDW 的平均相对误差和平均绝对误差随着幂指数的增加而减小, 但这并不能说明 IDW 法的插值结果就是随着幂指数的升高而减小, 因为平均标准差同时在增大, 这说明估值的灵敏度和极值效应随着幂指数的升高而增加。另外, 从 IDW 插值的原理来看, 随着幂指数增大, 较远的点对插入的数据影响越小。由于所采用的数据验证点非常接近, 验证点受邻近点的影响很大, 所以, IDW 的插值结果中平均绝对误差和平均相对误差在一定范围内必然会随着幂指数的升高而减小, 但是, 幂指数的升高并不能保证在插值范围内所有值的准确性, 因此, 在数据密度较小或局部数据密度远大于总体数据密度时不建议采用 IDW 法, 在实测数据分布均匀且密度较大的情况下采用 IDW 法较好, 但要根据数据的具体情况验证出 1

个合适的幂指数以保证插值结果的准确性。用 IDW 法在插值时是在一定的搜索半径内的数据加权平均得到未知点的数据, 当每个点的数据变化较小时, 插值结果变化也相对较小, 只有在采样点属性变化剧烈和频繁的地方才会出现较大的变化。

综上所述, 用 IDW 对 GPS+温湿度自动记录仪这种流动观测得到的温度进行插值, 可以得到较好的插值结果, 但是, 如果观测点不均匀理论上会导致局部插值结果严重失真。这种方法可以作为一种简单快速的方法使用。

2.2 普通克里格(Ordinary Kriging)插值法的分析

从图 2 中的 3 项误差分析可以看出在不同温度中普通克里格的各种模型表现的效果有所不同, 相比较来说指数模型的各项误差值始终为最小, 其他几种模型的验证参数的误差在 3 组温度中表现不稳定, 高斯模型的 3 项误差都较大, 在 2 组温度中环状模型和球形模型误差略小于高斯模型的误差, 但在第 2 组温度中最大, 因此, 这 2 种模型的误差表现不稳定, 不建议选用。从 3 组温度的各种误差参数的平均值来看指数模型的标准差、相对误差、绝对误差均为最小, 如图 3 所示。

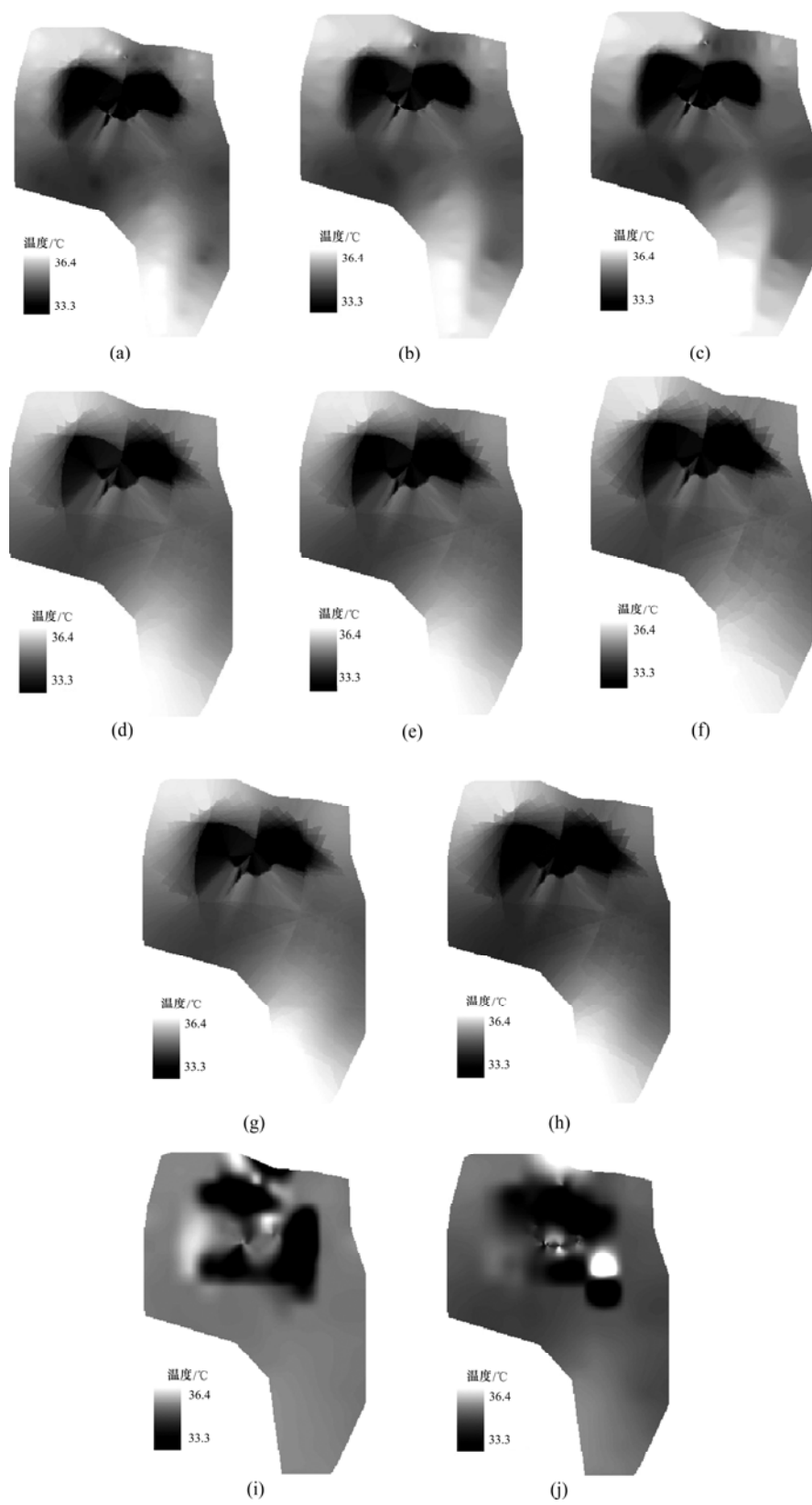
相对于其他 2 种插值方法, 普通克里格插值法的各项参数虽然不是最好的, 但普通克里格插值法中指数模型在 3 组温度中各项误差总处于稳定的位置, 因此, 采用普通克里格插值法中指数模型来对 GPS+温湿度自动记录仪的流动观测温度进行插值可以保证插值结果的精度。

普通克里格插值法是利用半方差图的模型进行测定点之间的内插, 该方法已经广泛用于各种地理数据处理。刘加平等^[15]在西安冬季城市热岛调查研究时使用了普通克里格插值法; 李军龙等^[16]在对全国 2 114 个气象站的气象数据进行交叉分析验证时也发现普通克里格插值法对温度插值来说是首选的插值方法。

2.3 样条函数(Spline)插值法的分析

3 组数据在不同插值方法下的各种误差平均值比较见图 3。从图 3 可以看出: 样条函数插值法 3 个验证参数变化没有规律, 时大时小, 这主要是由其本身的算法决定的。样条函数插值法是用多项式拟合的方法产生平滑的插值曲线, 由于多项式的阶数较低, 对温度误差的响应不敏感, 具有较好的保凸性、逼真性和平滑性, 但这种变形会对原始温度空间插值产生过于理想化的偏差且这个偏差不能估计。

李军龙等^[16]在研究中指出样条函数插值法可以较好地反映高山区域的年均温度空间分布特征, 在地形复杂的山区使用样条函数插值法较好。由于流动观



(a) 反距离加权插值, 权重为 2; (b) 反距离加权插值, 权重为 3; (c) 反距离加权插值, 权重为 4;
(d) 普通克里格法, 球形模型; (e) 普通克里格法, 环状模型; (f) 普通克里格法, 高斯模型;
(g) 普通克里格法, 指数模型; (h) 普通克里格法, 线性模型; (i) 规则样条函数法; (j) 张力样条函数法

图 1 上午 9:00 温度在不同插值法下的插值结果

Fig.1 Results of 9:00 am data interpolated in different methods

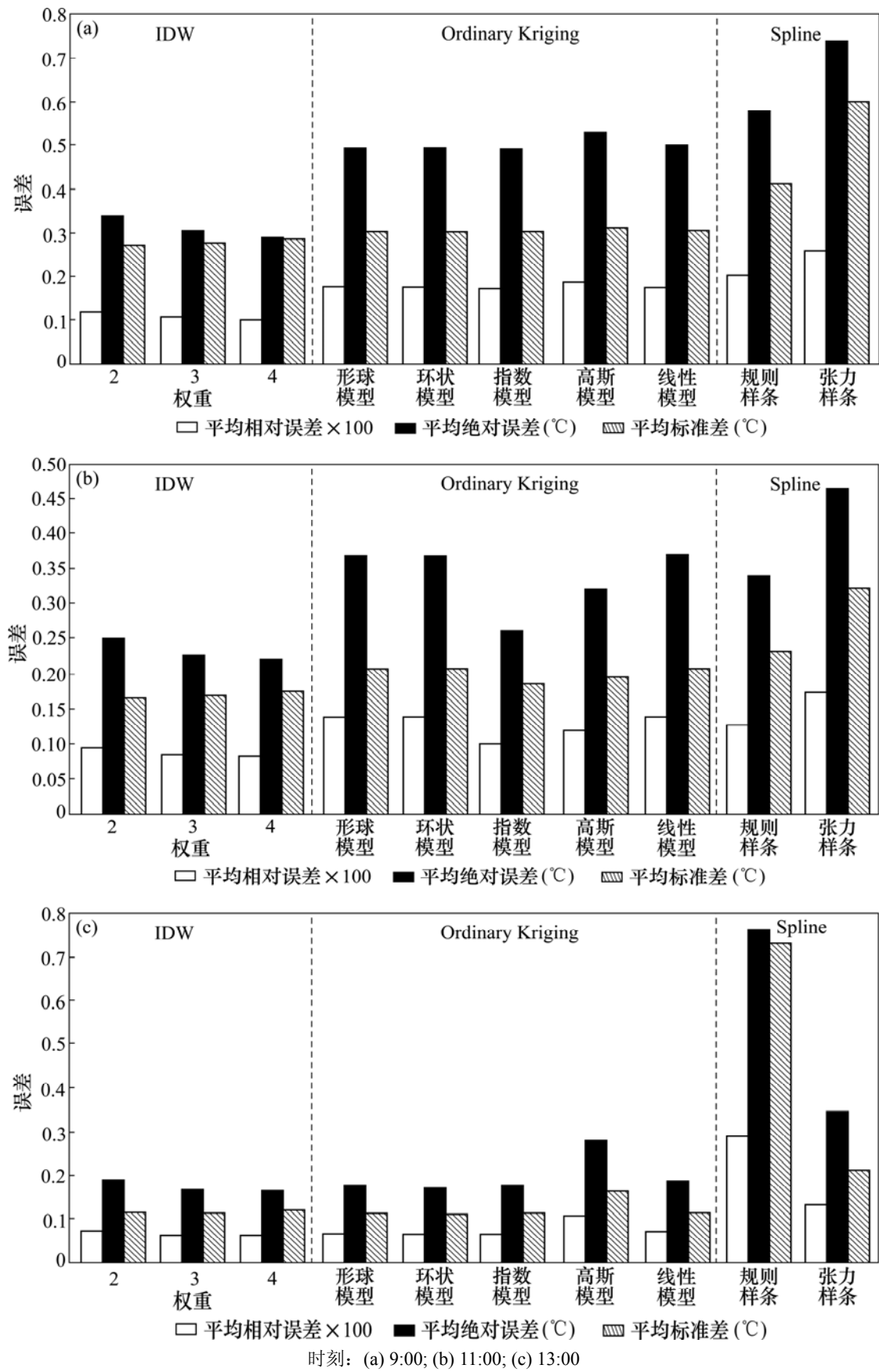


图 2 3 组温度在不同插值方法下的误差比较

Fig.2 Comparison of accuracy about three groups of data in different interpolation methods

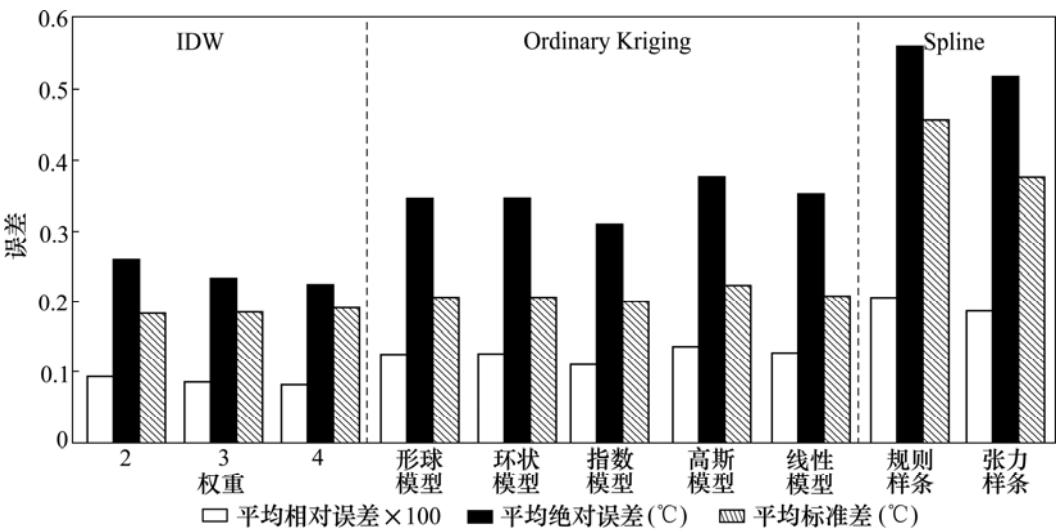


图 3 3 组温度在不同插值方法下的各种误差平均值比较

Fig.3 Comparison of the average of accuracy about the three groups of data in different interpolation method

测只是用在微气候的观测上，观测范围很小，因此，在对温度插值时用样条函数插值法的意义不大。

3 重庆都市区华岩公园的热环境分析评价

冷岛效应是相对于城市热岛效应提出的一个概念，在水体和绿地覆盖率高的地区，温度要比周围温度低，这种现象被称为冷岛效应 (Cool-island effect)^[17-19]。Chang 等^[20]在 2007 年对台湾的 61 个都市区公园的冷岛效应进行了观测；李东海等^[21]在 2008 年利用遥感技术分析了河流的冷岛效应影响范围。本研究以华岩公园的冷岛效应观测温度为例对普通克里金中指数模型的插值结果进行了简单分析。

华岩公园上午 9:00 的温度场(见图 4)。从图 4 可以看出：在整个观测范围内最低温度出现在公园的中心位置为 34.5℃，最高温度出现在观测范围的南部(公园的南偏东方向)为 36.3℃。公园南部的温度场随离公园距离的增加均匀升高，在距公园 1.5 km 的距离内温度升高了 1.5℃左右，然而，在公园北部、东部和西部温度变化梯度较大，在不到 0.5 km 内升高了 1.5℃左右，可以看出公园内温度要比其周围的都市区环境温度明显要低。由该温度场可以看出公园在对四周的冷岛效应并不相等，在公园的南部温度梯度要明显比其他几个方向小的多，主要是因为此时有北偏西小于 1.5 m/s 的微风。

华岩公园上午 11:00 的温度场(见图 5)。从图 5 可以看出：在整个观测范围内最低温度出现在公园的



单位：℃

图 4 华岩公园上午 9:00 的温度场

Fig.4 Temperature field obtained at 9:00 am in Huayan Park

中心位置为 37.1℃，最高温度出现在观测范围的地南部(公园的南偏东方向)为 38.2℃。此时，公园外的风速小于 1.5 m/s，风向为北偏西。公园南部的温度场随离公园的距离的增大均匀升高，在距公园 1.5 km 的距离内温度升高不到 1.5℃。然而，在公园北部、东部和西部，温度变化梯度较大，公园对周围的冷岛效应



单位: $^{\circ}\text{C}$

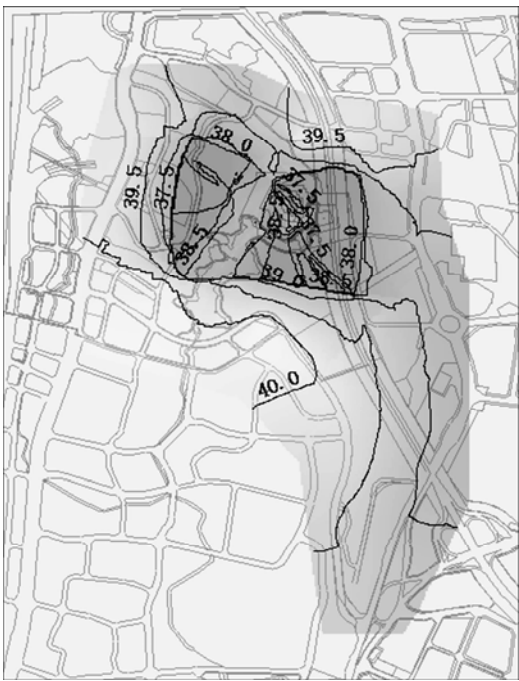
图 5 华岩公园上午 11:00 的温度场

Fig.5 Temperature field obtained at 11:00 am in Huayan Park

范围非常有限,在不到 300 m 的范围内温度就达到 $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温升超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此时,冷岛效应受风向的影响非常明显,并且比 9:00 的冷岛效应的辐射范围大。

华岩公园 13:00 的温度场(见图 6)。从图 6 可以看出:在整个观测范围内,最低温度出现在公园的中心位置为 $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度出现在观测范围的地西部(公园的正西方向)为 $40.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时,公园外的风速小于 0.5 m/s ,风向不稳定。公园南部的温度场从西到东均匀升高,在距离公园 0.3 km 的距离内温度升高 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,在公园东部距离公园 0.5 km 处温度升高了 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,在公园西部距离公园 0.3 km 处温度升高了 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,在公园北部距离公园 0.3 km 处温度升高了 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此,此时公园对周围的冷岛效应范围非常有限。

从上述 3 个温度场来看,上午 9:00 公园下风向处温度呈均匀升高趋势,但此时受太阳辐射影响较小,在人口密集区温度受人为排热的影响较大;在上午 11:00,公园下风向温度仍呈均匀升高趋势,在 1.5 km 时温度升高不到 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,但温度升高的梯度比 9:00 的温度场要小;13:00 时的温度场可以看出在 1.5 km 的范围内沿风向方向(风速小于 0.5 m/s)温度升高不到 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,该公园的冷岛效应在 1.5 km 的范围内 13:00 时要比 9:00 和 11:00 的要大,但在人口密集区



单位: $^{\circ}\text{C}$

图 6 华岩公园 13:00 的温度场

Fig.6 Temperature field obtained at 13:00 in Huayan Park

受人为排热的影响,公园冷岛效应对周围环境的冷却效应有限。

4 结论

- (1) 对于 GPS+温湿度自动记录仪的流动观测温度的插值来说,克里格插值法中指数模型是首选的插值方法;克里格插值法中指数模型对于这种类型的温度进行插值的结果较为理想,且精度稳定,而其他模型的插值结果的精度不太稳定。
- (2) IDW 法适用于测点密度大且分布均匀的数据处理,而这种类型的数据分布不均匀,使用 IDW 法不能保证其精度,而且要根据数据的密度通过验证来确定一个合适的幂指数。
- (3) 样条插值法在 GPS+温湿度自动记录仪的流动观测温度中插值的精度不稳定且不能估计,因此,使用该方法的意義不大。
- (4) 由 3 个用普通克里金插值法中指数模型得到的温度场分析得出:当风速小于 0.5 m/s 时,在距公园 0.3 km 的人口密集区温度比公园内温度高 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;冷岛效应在 13:00 时较为明显;公园的冷岛效应范围受风向和太阳辐射强度的影响较大。

参考文献:

- [1] CHEN Xiao-long, ZHAO Hong-mei, LI Ping-xiang, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 133–146.
- [2] Yuan F, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 11(3): 58–65.
- [3] MA Ya, KUANG Yao-qiu, HUANG Ning-sheng. Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(2): 110–118.
- [4] Imhoff M L, Zhang Ping, Wolfe R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504–513.
- [5] Kolokotroni M, Giannitsaris I, Watkins R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies[J]. *Solar Energy*, 2006, 80: 383–392.
- [6] Lee S H, Baik J J. Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 100(1/2): 227–237.
- [7] Sofer M, Potchter O. The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 85(1/2): 81–88.
- [8] 郭勇, 龙步菊, 刘伟东, 等. 北京城市热岛效应的流动观测和初步研究[J]. *气象科技*, 2006, 34(6): 656–661.
- GOU Yong, LONG Bu-ju, LIU Wei-dong, et al. Primary study of urban heat island effect in Beijing using mobile measurements[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(6): 656–661.
- [9] Lindberg F. Modelling the urban climate using a local governmental geo-database[J]. *Meteorological Applications*, 2007, 14(3): 263–273.
- [10] HUANG Liang-mei, ZHAO De-hua, WANG Jia-zhen, et al. Scale impacts of land cover and vegetation corridors on urban thermal behavior in Nanjing, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 94(3/4): 241–257.
- [11] 小泽行雄, 吉野正敏. 小气候调查方法[M]. 郭殿福译. 南京: 广西人民出版社, 1982: 40–42.
- Ozawa Y, Yoshino M(Translated by GUO Dian-fu). *Local Climatology Study Method*[M]. GUO Dian-fu transl. Nanning: Guangxi People Press, 1982: 40–42.
- [12] Watson D F, Philip G M. A refinement of inverse distance weighted interpolation[J]. *Geoprocessing*, 1985, 2: 315–327.
- [13] Oliver M A. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems[J]. *International Journal of Geographic Information Systems*, 1990, 4: 313–332.
- [14] Franke R. Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines[J]. *Comp & Maths, with Appls*, 1982, 8(4): 237–281.
- [15] 刘加平, 林宪德, 刘艳峰, 等. 西安冬季城市热岛调查研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(8): 912–917.
- LIU Jia-ping, LIN Xian-de, LIU Yan-feng, et al. Survey on winter urban heat island in Xi'an[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2007, 28(8): 912–917.
- [16] 李军龙, 张剑, 张丛, 等. 气象要素空间插值方法的比较分析[J]. *草业科学*, 2006, 23(8): 6–11.
- LI Jun-long, ZHANG Jian, ZHANG Cong, et al. Analyze and compare the spatial interpolation methods for climate factor[J]. *Pratacultural Science*, 2006, 23(8): 6–11.
- [17] Hamada S, Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(1): 15–24.
- [18] Marie-Claude F, Konrad G. Holocene climate change and its effect on lake ecosystem production on Northern Victoria Island, Canadian Arctic[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(2): 219–234.
- [19] Jansson C, Jansson P E, Gustafsson D. Near surface climate in an urban vegetated park and its surroundings[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, 89: 185–193.
- [20] Chang C R, Lib M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386–395.
- [21] 李东海, 艾彬, 黎夏. 基于遥感和GIS的城市水体缓解热岛效应的研究[J]. *热带地理*, 2008, 28(9): 414–418.
- LI Dong-hai, AI Bin, LI Xia. Urban water Body alleviating heat island effect based on RS and GIS: A case study of Dongguan City[J]. *Tropical Geography*, 2008, 28(9): 414–418.

(编辑 何运斌)