

京津冀气溶胶数据普通克里金插值研究

李如仁¹,李广超^{1,2},陈伟²,霍音娇¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要 目的 针对地面及卫星监测的气溶胶数据覆盖度不高的问题,笔者选取普通克里金插值方法对京津冀地区大气气溶胶(AOD)数据进行预测,对比普通克里金插值方法选用不同半变异函数时对AOD数据插值结果精度评价.方法 选取京津冀地区AOD试验数据,分别采用球状模型、指数模型、高斯模型对AOD数据进行普通克里金插值对比试验,并利用Python程序计算插值结果的平滑效应.结果 通过试验对比分析可知,AOD预测精度由高到低依次为普通克里金插值采用指数模型、球状模型、高斯模型方法.结论 采用指数模型的普通克里金插值对京津冀地区AOD数据的插值结果精度最高,该方法可以为AOD数据缺失的区域提供精度较高的参考数据,同时为环境治理、气象预测、医学研究等提供数据依据.

关键词 普通克里金插值;AOD;半变异函数;平滑效应

中图分类号 P237

文献标志码 A

A Study on Ordinary Kriging Interpolation of Aerosol Data in Jing-Jin-Ji Area

LI Ruren¹, LI Guangchao^{1,2}, CHEN Wei², HUO Yinjiao¹

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, China, 100083)

Abstract: Aiming at the problem that the coverage of aerosol data in the ground and satellite monitoring is not high enough, the author selects the ordinary Kriging interpolation method to predict the AOD data in Jing-Jin-Ji area, and compares the accuracy evaluation of the AOD data interpolation results when the ordinary Kriging interpolation method selects different semi variogram functions. Taking the aerosol data in Jing-Jin-Ji area as the experimental data, the author use the spherical model, exponential model and Gaussian model respectively to compare with ordinary kriging interpolation, and use Python program to calculate the smoothing effect of interpolation results. The results show that the prediction accuracy of AOD from high to low is ordinary kriging interpolation with Exponential model, Spherical

收稿日期:2018-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51774204)

作者简介:李如仁(1966—),男,教授,博士,主要从事空间数据处理方面研究.

model and Gaussian model. The precision of ordinary Kriging interpolation with exponential model is the highest for AOD data in Jing-Jin-Ji area. This method can not only provide high precision reference data for AOD data missing areas, but also provide data basis for environmental governance, meteorological prediction, medical research, etc.

Key words: ordinary kriging interpolation; AOD; semi variogram; smoothing effect

大气气溶胶 (Aerosol Optical Depth, AOD) 作为环境污染、气候变化、水平能见度等关键影响因素, 逐渐受到重视. AOD 是大气污染评价的关键因子^[1], AOD 定义为介质的消光系数在垂直方向上的积分, 是描述气溶胶对光的削弱作用, 已经广泛应用于空气质量评价中^[2]. AOD 作为主要的大气污染物, 使地面的可见度下降, 导致交通通行在空中和地面难度增加, 还会对人体的健康造成直接影响, 并通过影响地球大气系统中行星的反照率, 从而影响地球地面气体系统的能量守恒^[3-6]. AOD 数据分布变化与气候、环境污染、人体健康密切相关, 是气象学、环境学和医学研究关注的热点问题^[7].

AOD 的观测方法包括地面和卫星观测. 常用的 AOD 数据卫星观测有中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据, 利用空间插值对 MODIS 反演的 AOD 数据分析可以为 AOD 未覆盖区域提供参考数据. 空间插值方法已经应用到各个领域, 杨雪峰等^[8]采用普通克里金插值对某海域获得的剖面样本进行了插值研究; 郝彦莉^[9]对 AOD 数据进行了趋势线插值研究; 赵菲^[10]采用空间序列方法对 AOD 数据进行了插值研究; 颜华^[11]结合最小二乘法与克里金插值法, 使高精度且复杂性高的 3D 温度场得到了重建; 杨雨亭等^[12]利用普通克里金插值法对土壤含水率进行了插值研究; 杨彦海等^[13]采用普通克里金方法对辽宁省年降水量空间要素进行了插值研究. 克里金插值对 AOD 数据进行预测的研究也有很多, 边健^[14]利用 AOD 数据进行克里金插值得出了渤海湾区域内全方位的 AOD 数据分布情况; 成斌^[15]采用克里金插

值方法对 AOD 数据进行插值, 并利用该地区的真实 AOD 数据值来验证插值所得结果数据, 通过验证结果表明, 采用克里金插值方法在 AOD 研究分析方面具有可靠性, 利用该方法可以推测 AOD 未覆盖区域的值.

笔者以京津冀为研究区域, 利用 Terra 和 Aqua 卫星提供的 MOD04_3K 和 MYD04_3K 为研究数据, 首先对数据预处理和检验数据是否符合正态分布, 然后利用不同半变异函数的普通克里金方法对 AOD 数据进行插值分析, 由插值结果精度、插值结果图、平滑效应、影响因素四方面对京津冀地区 AOD 的空间分布进行分析可得, AOD 预测精度由高到低依次是普通克里金插值采用指数模型、球状模型、高斯模型方法.

1 研究方法原理

1.1 普通克里金插值

普通克里金插值法 (Ordinary Kriging interpolation, O-Kriging) 是一项实用空间估计技术, 是地质统计学的重要组成部分, 也是地质统计学的核心^[16]. O-Kriging 方法用来估算未采样位置的属性值, 研究对象是区域化变量, 是一种最优无偏估计方法. O-Kriging 方法计算式为^[17]

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) . \tag{1}$$

式中: λ_i 为 $Z(x_i)$ 分配所得权重; $Z(x_i)$ 为已知位置 x_i 处的观测值; $Z^*(x_0)$ 为估计位置 x_0 处的估计值; n 为估计 $Z^*(x_0)$ 值所采用的实际观测值个数. O-Kriging 方法的具体计算公式可参考文献[17].

1.2 半变异函数模型

采用不同的半变异函数进行 O-Kriging

会影响未知数据值的预测,尤其是当接近原点的曲线形状明显不同时.接近原点处的曲线越陡,最接近的相邻元素对预测的影响就越大.这样输出曲面将更不平滑.半变异函数模型可以根据基台值的有无而分类,笔者研究主要利用 3 个有基台值模型的 O-Kriging 对融合后的 AOD 数据进行插值分析,并对分析结果精度进行评价^[18].

(1) 球状模型

球状模型(Spherical Model, 原点位置是线性模型)显示了空间自相关逐渐减小(等同于半方差的增加)到超出某个距离后自相关为零的过程.球面模型是最常用的模型之一,计算式如下:

$$y(h) = \begin{cases} 0, & h = 0; \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a; \\ C_0 + C, & h > a. \end{cases} \quad (2)$$

式中: C 为拱高; C_0 为块金常数; a 为变程; $C_0 + C$ 为基台值.当 C_0 为 0、且 C 为 1 时,称为标准球状模型.

(2) 指数函数模型

指数函数模型(Exponential Function Model, 原点位置是线性模型)在空间自相关随距离的增加呈指数减小时应用.这里自相关仅会在无穷远处完全消失.指数模型也是常用模型,计算式如下:

$$y(h) = \begin{cases} 0, & h = 0; \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}), & h > 0. \end{cases} \quad (3)$$

当 $h = 3a$ 时, $1 - e^{-3} \approx 0.95 \approx 1$, 所以式(3)中的 a 指的不是变程.由 $y(h) \approx C_0 + C$, 故其变程为 $3a$.当 C_0 为 0、且 C 为 1 时,称为标准指数模型.

(3) 高斯模型

高斯模型(Gaussian Model, 原点位置是抛物线模型)是利用高斯概率密度函数(正态分布曲线)精确地量化学物,将一个事物

分解为若干的基于高斯概率密度函数(正态分布曲线)形成的模型,计算式如下:

$$y(h) = \begin{cases} 0, & h = 0; \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}), & h > 0. \end{cases} \quad (4)$$

当 $h = \sqrt{3a}$ 时, $1 - e^{-3} \approx 0.95 \approx 1$, 所以式(4)中 a 的指的不是变程,由 $y(h) \approx C_0 + C$, 故其变程为 $\sqrt{3a}$.当 C_0 为 0、且 C 为 1 时,称为标准高斯模型.

1.3 平滑效应

极差含义是指数据的变化范围,即最大值减去最小值(也就是极差)来评价一组数据的离散度.标准差含义是指数据变异程度,方差(样本方差)是每个样本值与全体样本值的平均数之差的平方值的平均数,方差开根号即为标准差.计算数据的变化范围和变异程度互不相关^[19].克里金插值结果的平滑效应采用极差、标准差平滑率两项指标评定.

(1) 极差平滑率

极差平滑率(Range's Smoothing Rate, RSR)主要指实际值和预测值极差变化率,即数据变化范围的平滑效应,计算式如下:

$$C_R = \frac{R_d - R_i}{R_d} \times 100\%. \quad (5)$$

式中: C_R 为极差平滑率; R_d 为实际值的极差; R_i 为预测值的极差.

(2) 标准差平滑率

标准差平滑率(Stdv's Smoothing Rate, SSR)是实际值和预测值标准差变化率,即数据变异程度的平滑效应,并且值越小代表插值效果越好,计算式如下:

$$C_{st} = \frac{st_d - st_i}{st_d} \times 100\%. \quad (6)$$

式中: C_{st} 为标准差平滑率; st_d 为实际值得标准差; st_i 为预测值的标准差.

2 试 验

2.1 研究区域概况

研究区域选用地理范围为 $35.5^\circ \text{N} \sim$

43°N、113°E ~ 120°E 的京津冀地区,包括北京市、天津市及河北省的 11 个地级市. 京津冀地区作为我国五大城市群中的一个区域,2015 年底人口约为 11 143 万人,地区生产总值约为 69 358. 89 亿元. 近年来,随着经济的快速发展和城市化进程的加快,该区域的空气质量污染越来越严重,人们的生活和健康都受到一定的威胁,所以控制和优化京津冀地区的空气质量是非常重要的任务.

2.2 数据来源

文中采用的 AOD 数据来自 Terra 和 Aqua 卫星的影像数据^[20], Terra 卫星运行轨迹为自北向南, Aqua 卫星运行轨道为自南向北^[5], Terra 和 Aqua 两颗卫星分别提供了 MOD04_3K 和 MYD04_3K 两种 MODIS

AOD 产品数据. 文中采用参数名为“Optical_Depth_Land_And_Ocean”的 MODIS Collection 6 MOD04_3K 和 MYD04_3K, 波段为 550 nm 的 2 级 AOD 数据,空间分辨率为 3 km,访问周期为每天,选用 2015 年 5 月和 6 月的数据进行处理分析.

2.3 数据预处理

在 ArcGIS Engine 开发环境下,采用 C# 语言,利用 Visual Studio 2013 编写针对 MODIS AOD 影像数据进行批量处理的程序,实现 AOD 影像数据的自动批量提取. 笔者所采用的 Aqua 和 Terra MODIS AOD 数据融合方法为二次多项式回归算法^[21]. 数据预处理流程如图 1 所示.

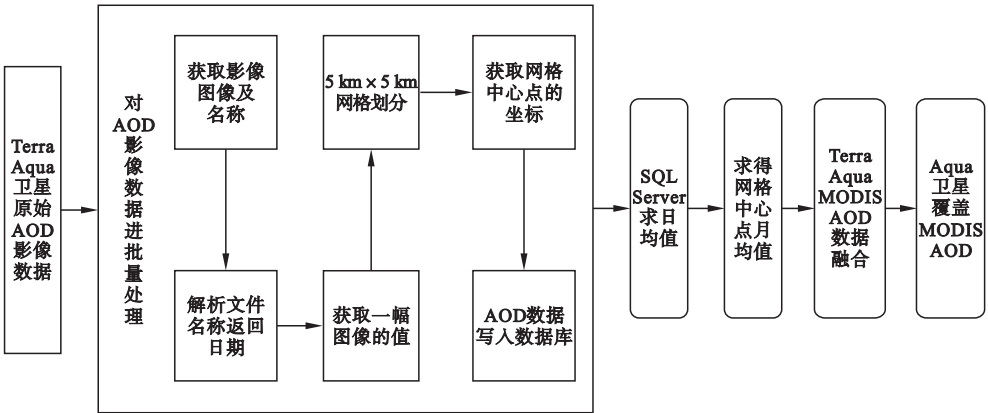


图 1 数据预处理流程

Fig. 1 Data preprocessing flow chart

2.4 试验与分析

在 AOD 数据空间插值之前对 2015 年 5 月和 6 月的 AOD 数据进行正态 QQPlot 分析,由分析结果可知,AOD 数据集接近正态分布,对该数据进行 O-Kriging 插值所得结果的精度比较高.

为了评估在使用三种不同半变异函数模型时,O-Kriging 在京津冀地区 AOD 数据预测的精确性,笔者采用平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 作为评价指标,对 O-Kriging 采用三种不同半变异函数模型所得出的评价指标作对比^[22-27]. 其中 MAE 表

示所估计的数值可能出现的误差范围,结果越接近于零,插值效果越好;RMSE 表示插值函数的极值效应与反演灵敏度,RMSE 值越小,插值结果精度就越高. 采用极差平滑率和标准差平滑率来评价 O-Kriging 对 AOD 数据插值结果的平滑效应.

分别对 2015 年 5 月和 6 月 AOD 数据进行 O-Kriging,采用半变异函数为球状模型、指数模型、高斯模型时的 O-Kriging 结果如图 2、图 3 所示,其中图 2 为 2015 年 5 月 AOD 数据的插值结果图,图 3 为 2015 年 6 月 AOD 数据的插值结果图. O-Kriging 插值

结果见表 1. 其中半变异函数模型为球状模型的 O-Kriging 简称 S-Kriging (S-K), 半变异函数模型为高斯模型的 O-Kriging 简称 G-Kriging (G-K).

半变异函数模型为指数模型的 O-Kriging 简称

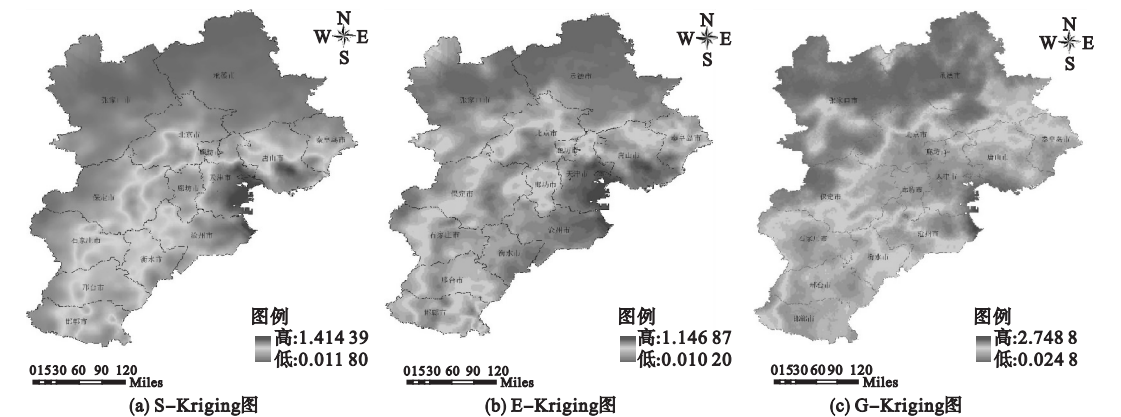


图 2 2015 年 5 月 AOD 数据插值结果

Fig. 2 The AOD interpolation results of May 2015

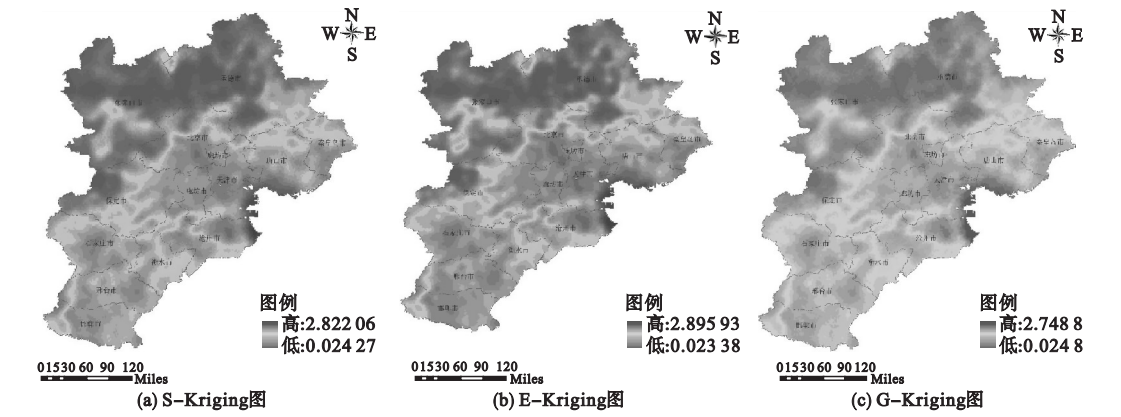


图 3 2015 年 6 月 AOD 数据插值结果

Fig. 3 The AOD interpolation results of June 2015

表 1 插值结果

Table 1 Interpolation results							
月份	评价指标	球面模型 (S-K)	指数模型 (E-K)	高斯模型 (G-K)	(E-K/S-K) 提高率/%	(E-K/G-K) 提高率/%	(S-K/G-K) 提高率/%
5 月	MAE	0.089 03	0.085 87	0.093 86	3.55	8.51	5.15
	RMSE	0.138 53	0.135 76	0.143 04	2	5.09	3.15
	RSR	0.409 4	0.413 1	0.404 3	—	—	—
	SSR	0.073 9	0.066 7	0.053 7	—	—	—
6 月	MAE	0.164 78	0.173 05	0.185 53	4.78	6.73	11.18
	RMSE	0.254 13	0.247 26	0.260 03	2.7	4.91	2.27
	RSR	0.303 1	0.173 1	0.182 7	—	—	—
	SSR	0.223 8	0.088 8	0.079 2	—	—	—

由 AOD 数据的插值结果可知,在使用三种不同半变异函数模型的 O-Kriging 有明显的差异性.在京津冀地区,张家口市和承德市 AOD 数据值相对较低,沧州市、唐山市、衡水市 AOD 数据值相对较高,AOD 数据值总体趋势为西北低、东南高.产生这种现象的主要原因是京津冀地区受到“东亚气候系统”的影响,即 5 月和 6 月期间暖湿的西南气流,沧州市、唐山市、衡水市沿海城市受海水的影响比较严重;西北地区海拔高,草地、森林、植被等覆盖率比较高,工业发展及污染源排放少,人口密度较小,并且较大的风力对污染物的扩散非常有利;东南地区海拔低、经济较为发达、人口密集、人类活动频繁、污染物排放比较多,而且风力小使污染物不易排放.

由表 1 可知,采用三种不同半变异函数模型的 O-Kriging 在 AOD 数据预测方面,插值结果相差比较大,AOD 数据预测精度由高到低依次为 E-Kriging、S-Kriging、G-Kriging.由 5 月份 AOD 插值结果可知,G-Kriging 的极差平滑率为 40.43%,标准差平滑率为 5.37%,都小于 E-Kriging 和 S-Kriging 所得结果,所以 G-Kriging 小于 E-Kriging 和 S-Kriging 的平滑效应.由于 E-Kriging 相比于 S-Kriging,极差平滑率相对较大,标准差平滑率相对较小,并且数值之差很小,所以二者的平滑效应相差不大.由 6 月份 AOD 插值结果可得,S-Kriging 的极差平滑率为 30.31%,标准差平滑率为 22.38%,都要大于 E-Kriging 和 G-Kriging 的平滑效应.E-Kriging 相比于 G-Kriging 极差平滑率相对较小,标准差平滑率相对较大,并且数值之差很小,所以二者的平滑效应相差不大.

3 结 论

(1)采用 O-Kriging 对京津冀地区 AOD 数据插值结果可得,AOD 数据值的总体趋势为西北低、东南高.

(2)AOD 数据预测精度由高到低依次

为 E-Kriging、S-Kriging、G-Kriging.

(3)在 5 月 AOD 数据的插值结果中,G-Kriging 的平滑效应最低,在 6 月 AOD 数据的插值结果中,E-Kriging 和 G-Kriging 的平滑效应相对较低.

参考文献

- [1] 王强.基于 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 影像协同反演陆地上空气溶胶光学厚度[D].南京:南京师范大学,2014.
(WANG Qiang. Aerosol optical thickness retrieval by using the synergy of TERRA/AQUA MODIS Data [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014.)
- [2] 刘灿,高阳华,易静,等.基于 MODIS 数据的西南地区气溶胶光学厚度时空变化特征分析[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(5):182-189.
(LIU Can, GAO Yanghua, YI Jing, et al. An MODIS-based analysis of spatio-temporal variations of aerosol optical depth in southwest of China [J]. Journal of southwest university (natural science edition), 2014, 36(5): 182-189.)
- [3] ZHANG Q, WU J. Image super-resolution using windowed ordinary Kriging interpolation [J]. Optics communications, 2015, 336: 140-145.
- [4] 闫婧华. MISR 和 MODIS 气溶胶光学厚度产品的数据融合及其在大气细颗粒物监测中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
(YAN Jinghua. Data merging of MISR and MODIS aerosol optical thickness and application in estimating ground-level fine particulate matter concentrations [D]. Qingdao: China Ocean University, 2014.)
- [5] 陈韵竹.气溶胶光学厚度的数据融合研究[D].上海:华东师范大学,2013.
(CHEN Yunzhu. Data fusion of aerosol optical depth [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.)
- [6] WANG L, WANG Y, XIN J, et al. Assessment and comparison of three years of Terra and Aqua MODIS aerosol optical depth retrieval (C005) in Chinese terrestrial regions [J]. Atmospheric research, 2010, 97(1/2): 229-240.
- [7] 李晓静,高玲,张兴赢,等.卫星遥感监测全球大气气溶胶光学厚度变化[J].科技导报,2015,33(17):30-40.
(LI Xiaojing, GAO Ling, ZHANG Xingying, et al. Global change of aerosol optical depth based on satellite remote sensing data [J]. Science & technology review, 2015, 33(17): 30-40.)
- [8] 杨雪峰,胡长青.普通克里金法在海水温度剖面插值中的应用[J].声学技术,2015,34(5):385-388.
(YANG Xuefeng, HU Changqing. Application of

- Ordinary Kriging method in the interpolation for seawater temperature profile [J]. Automated technology, 2015, 34(5): 385–388.)
- [9] 郝彦莉. 基于插值模型的京津冀典型地区气溶胶光学厚度变化研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2015.
(HAO Yanli. Research on aerosol optical depth change based on interpolation model of Beijing-Tianjin-Hebei typical region [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2015.)
- [10] 赵菲. 基于 Peterson 模型的京津冀地区 AOD 时空插值研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016.
(ZHAO Fei. Research on the time and spatial interpolation of AOD based on the peterson model of Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016.)
- [11] 颜华, 李欣, 王善辉. 基于最小二乘法和克里金插值的三维温度场重建[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(3): 303–307.
(YAN Hua, LI Xin, WANG Shanhui. Reconstruction of three-dimensional temperature field based on least-square method and Kriging interpolation [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2014, 36(3): 303–307.)
- [12] 杨雨亭, 尚松浩, 李超. 土壤水分空间插值的克里金平滑效应修正方法[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 208–213.
(YANG Yuting, SHANG Songhao, LI Chao. Correcting the smoothing effect of ordinary Kriging estimates in soil moisture interpolation [J]. Progress in water science, 2010, 21(2): 208–213.)
- [13] 杨彦海, 侯博, 姜宏宇. 基于空间插值方法的路面结构设计湿度指标精度研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 643–650.
(YANG Yanhai, HOU Bo, JIANG Hongyu. Study on the accuracy of pavement structure design based on spatial interpolation methods [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(4): 643–650.)
- [14] 边健. 基于 MISR 数据反演渤海湾气溶胶光学厚度[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 74–78.
(BIAN Jian. Back analysis of aerosol optical thickness on Bohai Gulf based on MISR data [J]. Journal of applied optics, 2013, 34(1): 74–78.)
- [15] 成斌. 基于克里金插值法的气溶胶光学厚度研究: 以江苏省区域为例[J]. 产业与科技论坛, 2016(8): 38–39.
(CHENG Bin. Study on Aerosol optical thickness based on kriging interpolation: a case study of Jiangsu province [J]. Workshop of industry and technology, 2016(8): 38–39.)
- [16] 张靖. 基于克里金算法的点云数据插值研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
(ZHANG Jing. Interpolation of point clouds data based on Kriging interpolation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [17] 周体鹏. 基于克里金插值法的昆明市 PM_{2.5} 预测[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
(ZHOU Tipeng. The PM_{2.5} Prediction in Kunming Base on Kriging Interpolation Method [D]. Kunming: Yunnan University, 2016.)
- [18] 王倩. 基于 Delaunay 的三维快速克里金插值[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
(WANG Qian. The fast three-dimensional Kriging interpolation method based on Delaunay [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.)
- [19] 段建军, 赖飞, 王小利, 等. 克里金插值平滑效应校正及凤冈县富硒茶园适宜区研究[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 564–574.
(DUAN Jianjun, LAI Fei, WANG Xiaoli, et al. Correction of Kriging's smoothing effect and suitability of selenium-rich tea garden in Fenggang county of Guizhou province [J]. Chinese agricultural sciences, 2013, 46(3): 564–574.)
- [20] 马宗伟. 基于卫星遥感的我国 PM_{2.5} 时空分布研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
(MA Zongwei. Study on spatiotemporal distributions of PM_{2.5} in China using satellite remote sensing [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.)
- [21] 李广超, 李如仁, 赵阳阳, 等. 基于二次多项式的 AOD 数据融合方法[J]. 测绘通报, 2018(1): 67–71.
(LI Guangchao, LI Ruren, ZHAO Yangyang, et al. AOD data fusion method based on quadratic polynomial [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2018(1): 67–71.)
- [22] GIRALDO R, DELICADO P, MATEU J. Ordinary Kriging for function-valued spatial data [J]. Environmental and ecological statistics, 2011, 18(3): 411–426.
- [23] ELBADIOUNY H, ABOWALY M, ABUALKHEIR A, et al. Spatial variation of soil carbon and nitrogen pools by using ordinary Kriging method in an area of north Nile Delta, Egypt [J]. Catena, 2014, 113: 70–78.
- [24] SETIANTO A, TRIANDINI T. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis [J]. Journal of applied geology, 2013, 5(1): 21–29.
- [25] PESQUER L, CORTES A, PONS X. Parallel ordinary kriging interpolation incorporating automatic variogram fitting [J]. Computers & geosciences, 2011, 37(4): 464–473.
- [26] MENG Q, LIU Z, BORDERS B E. Assessment of regression kriging for spatial interpolation – comparisons of seven GIS interpolation methods [J]. Cartography and geographic information science, 2013, 40(1): 28–39.
- [27] ARUN P V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods [J]. The egyptian journal of remote sensing and space science, 2013, 16(2): 133–139.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)