

## 基于 GIS 的地形要素插值验证及三维建模研究

张 鹏<sup>1,2</sup>, 左继翔<sup>1,2</sup>, 高 超<sup>3</sup>, 宋晓丽<sup>1,2</sup>, 杨 涛<sup>1,2</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266033; 2. 山东蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 青岛 266033;  
3. 中国华冶科工集团有限公司, 北京 100176)

**摘 要:** 针对不同空间插值计算方法对于三维可视化建模精度差异问题, 为进一步提高三维可视化效果, 以重庆市某工程场区的高程数据作为样本点, 基于普通克里格法、张力样条函数法、反距离加权法, 根据地统计学理论与工程实际相结合, 分别对高程数据进行空间插值。同时, 预留部分样本点要素作为验证点进行插值精度对比, 分析其插值结果及差异原因进而完成三维可视化建模与分析工作。结果表明: 在本工程实例中, 张力样条函数法在地表高程上插值精度最高、误差最小, 其次是普通克里格法、反距离加权法。依据上述分析结果得出的最优插值方法, 应用 GIS (Geographic Information System) 技术, 在地形数据不充分的条件下完成了场区三维模型的构建, 三维模型较好地反映了地表起伏和资源分布状态。

**关键词:** 最优插值; 交叉验证; 三维场区; GIS

中图分类号: P208

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2019)01-0034-06

## Research on terrain element interpolation verification and 3D modeling based on GIS

ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, ZUO Ji-xiang<sup>1,2</sup>, GAO Chao<sup>3</sup>, SONG Xiao-li<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;  
2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone,  
Qingdao 266033, China; 3. China Huaye Group Company Limited, Beijing 100176, China)

**Abstract:** In consideration of accuracy differences of 3D visualization modeling led by different spatial interpolation methods, this paper aims to further improve the three-dimensional visualization effect, taking the elevation points of a specific field in Chongqing as a sample, this paper performs spatial interpolation of elevation data respectively, based on the interpolation methods of Ordinary Kriging, Tension Spline Function, and Inverse Distance Weighting, and the combination of the geostatistics theory and engineering practice. Parts of the sample points were reserved as the verification points to compare the interpolation precision, analyze the interpolation results, and understand the causes of the differences, which were essential for the 3D visualization modeling and further analysis. The results show that the Tension Spline Function method exposes the highest interpolation accuracy and the smallest error on the surface elevation, followed by Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting meth-

收稿日期: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41702320); 山东省高等学校科技计划项目(J17KA204)

作者简介: 张 鹏(1985-), 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、地下工程及信息化等方面的研究。E-mail: zhangpchn@qut.edu.cn.

ods. Using this method and GIS technology, a 3D model was constructed which properly reflects ground surface relief and distribution pattern, even though the elevation data were insufficient.

**Key words:** optimal interpolation; cross validation; 3D visualization; GIS

三维场区可视化不仅提供立体模型展示,提高施工作业效率,而且分析区域地形地貌,了解并保护周边的生态环境。因此,为更迅速、更环保建造适宜小区,利用合适的空间插值方法进行场区三维可视化的研究,对提高居民生活质量、生态资源保护具有重要意义。

测绘数据越丰富,可视化效果越精细,而完全充足的测绘数据有着过高的经济成本。为了解决数据与经济的矛盾,选择合适的插值方法,利用有限的采样点补充其他相对准确、精度较高的插值结果。不同的插值方法都有自己的优缺点及适用范围<sup>[1]</sup>,原理各异的插值方法应用到各个领域<sup>[2-9]</sup>。鲁振宇等<sup>[10]</sup>使用反距离加权法(Inverse Distance Weighted, IDW)、张力样条函数法(Tension Spline, TS)和普通克里格法(Ordinary Kriging, OK)对月平均降水数据进行空间插值。杜斌等<sup>[11]</sup>使用克里格插值法完成2种同位素的等值线图,为进一步成矿分析打下实验基础。尽管很多学者为寻找合适的空间插值方法做了不懈的努力,但在源数据不同的情况下处理数据的方式各异且选择插值方法后并没有建立三维立体模型作进一步分析。本文针对重庆市某工程场区开展三维可视化建模工作,空间插值计算分析为本文的核心研究内容。由于该场区存在地形数据不充分及高程数据无法直接提取等问题,旨在通过非参数检验、交叉验证与精度对比等技术手段,选取最合适的空间插值方法,进而完成深入系统的三维可视化建模与分析工作。

## 1 工程概况与数据取样

### 1.1 研究区域概况

重庆位于中国西南部,年平均气温 $16\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属亚热带季风性湿润气候。气候特征为:冬暖,春早,夏热多伏旱,秋迟多绵雨。

研究区域属浅丘剥蚀地貌,场内地表高程在 $299.65\sim 369.30\text{ m}$ ,相对高差 $69.65\text{ m}$ 。样本数据最大值是最小值的1.23倍,所以不存在过大异常值。

### 1.2 地形数据预处理与分层取样

勘察院宏观考虑现实环境,收集并提供地表高程标注、坐标等测绘数据。采样点基本覆盖整个研究区域,具有数据结果分析的代表性。由于CAD数据所有等高线被创建块,在本文使用湘源控制性详细规划对地形图不同的空间数据生成标高数据离散点,其处理结果并没有高程数据,仅有地形图原数据中的高程标注。吴聪聪等<sup>[12]</sup>分析4种CAD数据向GIS转换的方法,并总结出优缺点和适用范围。采用基于编程的方法适合数据量大、需要反复转换的数据;基于C/S系统平台适用于所研究的数据达到数据共享的要求。源数据只有一张CAD平面图,没有需要重复转化、数据共享的要求,只考虑用CAD通过ArcGIS本身工具模块和FME 2种方法转化数据。经过对比分析,2种转化方式产生的结果一致,共有1219个点要素。

在研究区域按照分层取样法,基于分层策略将随机变量数据集分成11个不相交的非零子集。按照每个区间等比分配的原则,考虑到尽可能分布均匀、减小误差,共有121个点要素作为验证点(图1),其他点要素经过插值函数公式,计算其拟合值。运用地统计学分析,探索Histogram、QQ Plot以及在SPSS,偏度系数为 $-0.848$ 、峰度系数为 $1.854$ 、偏斜度标准误为 $0.22$ 、峰度标准误为 $0.437$ ,可近似认为数据为非正态分布且不具有空间自相关性。段志鹏等<sup>[13]</sup>在实例中认为尽管数据不符合正态分布,但普通克里格法也具有较高精度,所以本文讨论普通克里格法也是有意义的。



图1 验证点与插值点分布

● 验证点; ● 插值点

2 基于不同插值法的样本数据计算

目前,应用三维场区可视化的插值方法有很多,这里主要介绍常见的普通克里格法、张力样条函数法、反距离加权法.不同插值方法对比分析见表 1.

表 1 不同空间插值方法的优缺点及擅长领域

插值方法	优点	缺点	擅长领域
普通克里格法	考虑采样的距离和属性值的空间自相关性,反映空间数据的各向异性;不产生边界效应且不牺牲精度;适用范围广,采样点较少时精度也高	计算步骤繁琐;需要满足多种假设,有时需要根据经验另设参数	具备空间自相关性且无明显趋势
张力样条函数法	操作简单、插值速度快;估测大小的范围不局限	数据点稀少时,精度低、误差大;赋予权重越大,DEM 越粗糙;边界插值容易出现错误	密度适中、平缓变化的表面,如温度、高程 <sup>[14]</sup>
反距离加权法	所需存储空间小;具有空间探索功能	个别点数据有时远大于其邻域点;仅插值生成拟合值表面,不能对其误差分析;仅以距离为权重,忽略空间正相关	密度充足且均匀分布 <sup>[15]</sup>

利用不同空间插值法,其计算结果如表 2 所示,所得 DEM 如图 2 所示.

表 2 实测值与拟合值

采样点标号	Point-X/m	Point-Y/m	实测值/m	拟合值/m		
				OK 法	TS 法	IDW 法
4	54 177.806 02	59 496.638 24	343.32	341.482 788	343.388 733	341.558 685
21	54 321.059 00	59 492.943 00	351.11	349.966 461	350.721 802	350.017 120
52	54 310.633 00	59 579.891 00	349.53	347.640 961	348.086 029	347.198 151
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 247	54 270.929 06	59 670.481 57	360.00	359.601 685	360.043 488	359.996 887
1 269	54 367.526 74	59 943.811 36	338.18	338.366 821	337.975 525	337.754 669
1 285	54 259.778 50	59 872.439 75	346.80	348.005 798	348.142 303	347.977 325

3 计算结果验证分析

3.1 非参数检验

由于数据不满足正态假定和方差齐性假定,非参数检验基于“小概率事件实际不可能性”原理,在总体方差未知或数据不符合正态分布的情况下,可利用样本数据对总体分布形态等进行推断.其中曼-惠特尼 U 检验(Mann-Whitney U Test)假设 2 个样本分别来自除了总体均值以外完全相同的 2 个总体,通过对 2 组样本平均秩的研究来实现判断.经过实测值分别与 OK 拟合值、TS 拟合值、IDW 拟合值进行 2 个独立样本非参数检验,得出结果如表 3 所示.

由表 3 可知,Mean Rank 相差不大且 Asymp. Sig. (2-tailed)均大于 0.05,故接受原假设,说明拟合值与实测值无显著差异.

3.2 交叉验证以及精度对比

插值点和验证点的分布、密度直接影响数据插值的精度.在有限的取样次数中,插值点和验证点分布越均匀、数量适中,越能准确反映总体数据的实际情况.将实测值与拟合值通过交叉验证进行计算:

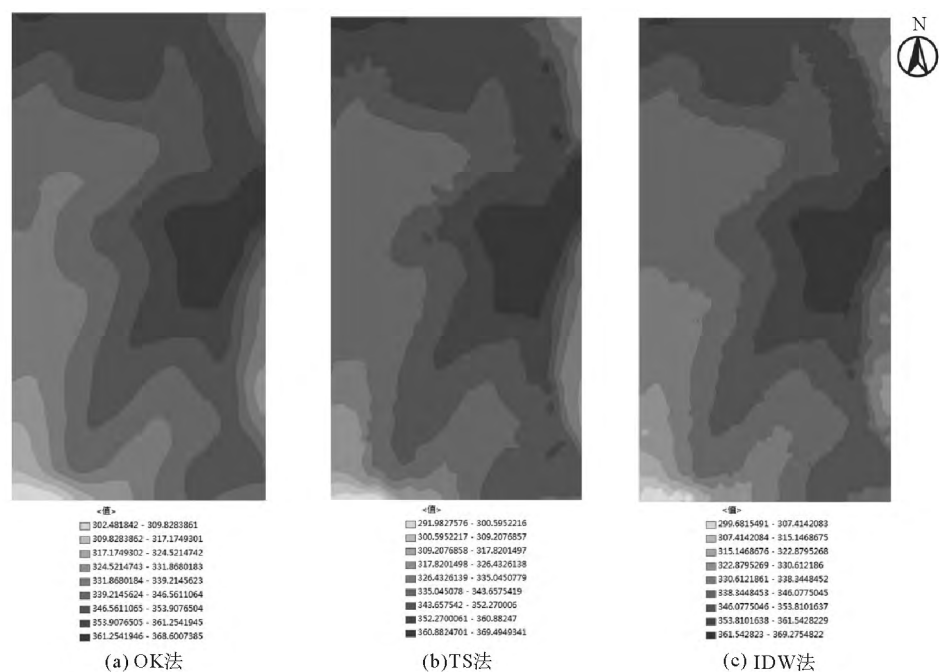


图 2 插值结果

1) 平均相对误差 (MRE): 拟合值与测量值之间的差异有正有负, 通常使用绝对值, 消除正负的影响, 更好地反映了误差的趋势性, 当数值越小, 说明拟合效果越好.

标准误差 (RMSE): RMSE 是实际值与不同拟合值误差的平方和验证点个数的比值的平方根, 反映了数据的离散程度.

其一般公式为

$$MRE = \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^n \left| \frac{X_j - Y_j}{Y_j} \right| \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^n (X_j - Y_j)^2} \tag{2}$$

式中:  $Y_j$  为实测的高程值;  $X_j$  为通过不同插值方法的拟合值;  $n$  为验证点个数.

2) 自变量的方差与因变量的方差的平方的比值 (拟合优度, RSQ 函数) 主要计算回归直线精确性的高低. 当结果越接近 1 时, 精度越高; 反之接近 0 时, 精度越小.

SLOPE 函数 (一致率) 表示 2 个数值之间的垂直距离 ( $h$ ) 与水平距离 ( $l$ ) 的比值, 反映了回归直线的斜率. 引用 RSQ 函数与 SLOPE 函数的概念更能对不同插值结果的分析与评价.

3) 相关性分析: 相关性判断不同插值方法所得的结果与实测值两两对比, 反映了 2 个因素的相关密切程度. 所得数值越接近 1, 说明 2 个变量之间相关性越大, 反之越小 (图 3).

表 3 非参数检验

方法	结果		检验统计量
	N	Mean Rank	Asymp. Sig. (2-tailed)
实测值	121	122.49	0.826
OK 拟合值	121	120.51	
实测值	121	121.82	0.944
TS 拟合值	121	121.18	
实测值	121	122.65	0.798
IDW 拟合值	121	120.35	

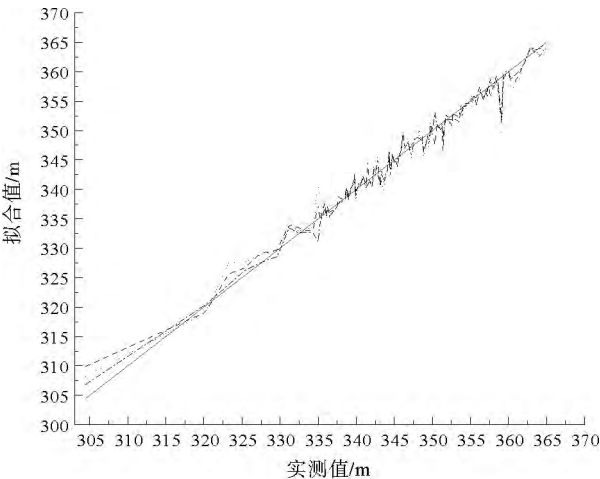


图 3 相关性分析

—— 实测值; ---- OK; ..... TS; - · - · - IDW

通过以上方法,针对 3 种插值结果与实测值两两比较,计算结果如表 4 所示.

### 3.3 验证结果

1) 从分析结果来看,TS 法在 3 种空间插值方法中误差最小、精度最高、拟合效果最好,普通克里格法、反距离加权法精度依次降低.

2) OK 法不仅考虑了插值点距离远近的因素,还考虑了已知点的位置和属性值整体的空间分布和格局.虽然 OK 在源要素数据不多且不均匀分布时也有较好的精度,但前提数据要符合正态分布且要有足够的空间自相关性的点要素,故精度不理想,在地貌场区类尚待更多实例的验证.

3) IDW 法误差波动大,能反映大体趋势.在源要素数据稀少或者分布不均匀时,总体插值结果不够平滑,异常值最多、误差最大.当采样点稀少时,因缺少邻域点产生“牛眼效应”,具有较大的局限性.

## 4 三维建模及效果分析

选择 TS 法插值后,建立三维模型流程如图 4 所示.

基于有限采样点未进行插值计算和使用张力样条函数法插值生成的三维模型分别如图 5、图 6 所示,

探索了基于插值结果对复杂的地形场区的三维可视化研究方法,统一调度高程标注、点、线、面、三维模型,使三维可视化效果更加平滑、精细、误差小,更好地反映小区与区域之间的关系.

不规则三角网(TIN)是数字高程模型(DEM)中最基本和最重要的一种模型,它能以不同层次的分辨率来描述地形表面,可以灵活地处理特殊地形. TIN 的结构基本组成包括节点、三角形边和三角形面这 3 个部分,通过从不规则分布的数据点生成的连续三角面来逼近地形表面. 三角面的形成和大小取决于不规则分布的节点的位置和密度,即点密集时生成的三角形小且密、精确度高;点稀疏时生成的三角形大而稀疏、精确性差.当离散点未插值时,采样点数量比较少,生成的不规则三角网稀疏、误差大、精确性低.

等值线是用来表示那些具有连续分布特征的地形现象,可以精确表示地形现象的垂直变化和水平方向的强势差异,是根据栅格表面创建等值线(等高线)的线要素类,也是构造不规则三角形的方法之一.当离散点空间插值生成栅格后,通过执行“等值线”命令生成更加密集的等高线.由增密的等高线创建不规则三角网,三角形形状小且密,分辨率就高、精确性高.

表 4 不同方法的插值结果

比较	插值结果		
	OK 法	TS 法	IDW 法
MRE	0.003 231 361	0.002 513 900	0.03 571 321
RMSE	1.578 486 105	1.281 111 235	1.825 564 246
RSQ	0.977 239 802	0.983 487 352	0.968 639 762
SLOPE	0.930 105 046	0.979 998 170	0.922 780 830
Correlation	0.989 000 000	0.992 000 000	0.984 000 000

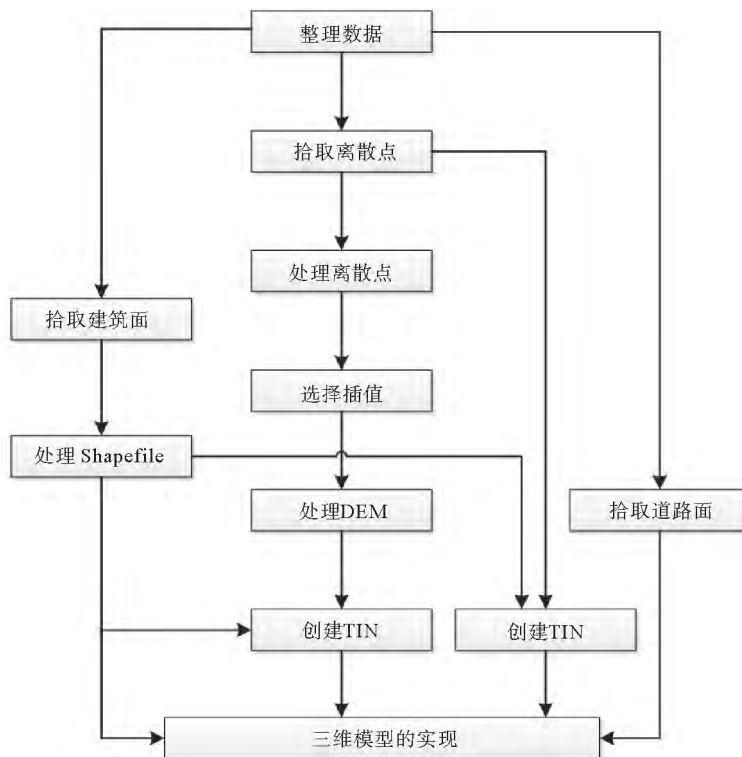


图 4 建模流程

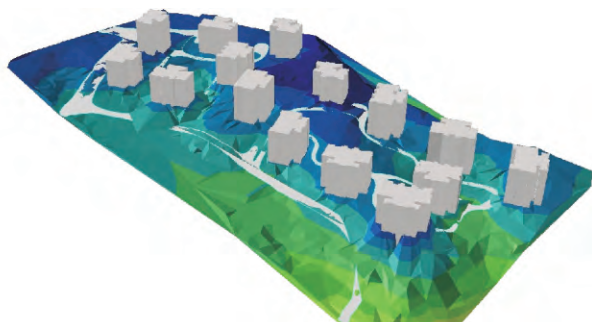


图 5 未插值的三维模型

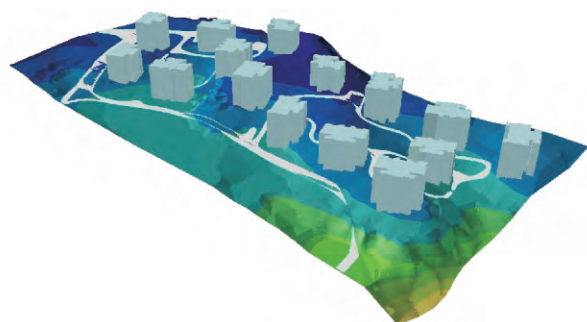


图 6 插值后的三维模型

## 5 结论

1) 3 种插值方法计算结果差异性很小,张力样条函数法的整体效果要好一些.在交叉验证分析中,TS 法的 MRE、RMSE 最小,IDW 的 MRE、RMSE 最大,但相差只有 0.001、0.247;在拟合效果、一致性和相关性分析中,TS 效果依旧最佳.然而,不同插值方法差异较小,计算结果均接近于 1,说明 3 种插值计算都很好地反映客观实际情况.TS 法在插值点分布均匀、密度适中的情况下,发挥了自身的优越性,精度高于其他 2 种算法,质量更高、更加可靠、更贴合实际.

2) 根据三维立体模型显示,用高程标注直接生成的三维模型表面粗糙、精度低、误差大,用张力样条函数法计算出其他拟合值构成等值线,三维模型明显要精细、平滑,更好地降低误差,更精确地反映地形趋势,提高三维可视化的利用率.通过对现场考察,基本符合区域实际,充分体现了建模的科学性.

3) 如何与 BIM 结合,实现更好的三维可视化是本文接下来研究的重点,实现三维模型的多角度绘制,借助 GIS 可视化技术进行环境资源损害评价具有极大的优势,充分体现了其灵活性.

### 参考文献:

- [1] 李新,程国栋,卢玲.空间内插方法比较[J].地球科学进展,2000(3):260-265.
- [2] 王璞玉,李忠勤,吴利华,等.GPR、GPS 与 GIS 支持下的冰川厚度及冰储量分析:以天山博格达峰黑沟 8 号冰川为例[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(S1):179-187.
- [3] 唐新建,任伟中,王川婴,等.多尺度数字高程模型[J].岩土力学,2006(12):2294-2298.
- [4] 谢谟文,柴小庆,贾宁,等.滑坡实时监测网络地理信息系统研发及应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2090-2102.
- [5] 赵玉杰,师荣光,白志鹏,等.山东淄博玉米产区土壤砷含量空间变异研究[J].环境科学,2006(8):1676-1681.
- [6] 段祝庚,肖化顺,袁伟湘.基于离散点云数据的森林冠层高度模型插值方法[J].林业科学,2016,52(9):86-94.
- [7] GEACH M R, STOKES M, TELFER M W, et al. The application of geospatial interpolation methods in the reconstruction of quaternary landform records[J]. Geomorphology, 2014, 216(216):234-246.
- [8] BÉJAR Pizarro M, GUARDIOLA Albert C, GARCÍA Cárdenas R, et al. Interpolation of GPS and geological data using in SAR deformation maps: Method and application to land subsidence in the alto guadaleñín aquifer (SE Spain)[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11):965.
- [9] 宋伟涛,王旭春,张鹏,等.平朔东露天煤矿南帮边坡稳定性评价与治理研究[J].青岛理工大学学报,2016,37(1):10-16,130.
- [10] 鲁振宇,杨太保,郭万钦.降水空间插值方法应用研究:以黄河源区为例[J].兰州大学学报,2006(4):11-14.
- [11] 杜斌,王长明,贺昕宇,等.锆石 Hf 和全岩 Nd 同位素填图研究进展:以三江特提斯造山带为例[J].岩石学报,2016,32(8):2555-2570.
- [12] 吴聪聪,蓝贵文,耿继军,等.CAD 数据向 GIS 数据转换的方法比较[J].测绘科学,2017,42(2):183-186.
- [13] 段志鹏,林进清,利锋,等.基于 GIS 的近海沉积物痕量元素空间分布特征插值方法选择[J].海洋环境科学,2014,33(2):262-268.
- [14] 彭彬,周艳莲,高苹,等.气温插值中不同空间插值方法的适用性分析:以江苏省为例[J].地球信息科学学报,2011,13(4):539-548.
- [15] 李杰,翟亮,桑会勇,等.PM<sub>2.5</sub>浓度插值中不同空间插值方法对比[J].测绘科学,2016,41(4):50-54, 101.

(英文校审 郭 印)