

杨朔, 罗明良, 林叶彬, 等. 气温数据插值精度影响因素定量研究[J]. 陕西气象, 2023(5): 67-73.

文章编号: 1006-4354(2023)05-0067-07

气温数据插值精度影响因素定量研究

杨朔, 罗明良, 林叶彬, 黄瑾, 姜佳艳

(西华师范大学地理科学学院, 四川南充 637009)

摘要:为定量归因插值参数对径向基函数插值(radial basis function, RBF)的均方根误差(root mean square error, RMSE)的影响,基于 ArcGIS 软件,通过多尺度空间自相关方法指导插值参数的选择对四川省宜宾市的气温数据进行插值分析,利用地理探测器工具定量归因插值参数对 RMSE 的影响。结果显示:在保持搜索半径不变的情况下,搜索角度对 RMSE 几乎没有影响,而扇区类型对 RMSE 的影响程度接近 100%;插值参数对 RMSE 的解释度排序为扇区类型>核函数>最大相邻要素数>最小相邻要素数,具体指数为 0.022>0.020>0.019>0.010。核函数与扇区类型对 RMSE 的影响通过了 0.05 的显著性水平检验,解释度分别达到 0.020 和 0.022。实验结果表明:扇区类型与核函数是插值参数中的主要影响因素,搜索角度对 RMSE 的影响甚微,多种插值参数对 RMSE 的交互影响大于单一因素的影响;核函数为 CRS、最大相邻要素数为 8、最小相邻要素数为 6、扇区类型为 4 个、扇区旋转 45°是几种插值参数中较优的选择;多尺度空间自相关方法对插值参数的指导选择具有实际意义。

关键词:气温;影响因素;插值;空间自相关;地理探测器;宜宾市;ArcGIS

中图分类号: P468

文献标识码: A

空间化的气温信息在规划农业生态、森林设施、物种保护以及传染病的监控与防治中扮演着重要的角色^[1]。在环境气象异常背景下,通过既有的各类气象数据对研究区域进行插值预测已然成为一种趋势^[2]。气象要素监测站点由于各种原因导致在空间上呈现非均匀、小密度且离散分布特征^[3],因此,依据离散站点数据选择适合的插值方法能有效地获得连续且有序的数据^[4-6]。插值方法的选择是相对的,依据研究区域以及数据的不同,采用合适的插值方法和设置合适的参数才能使插值结果达到最优,最佳拟合研究区域的待插数据^[7-10]。

目前用于空间插值的方法有反距离加权法(IDW)^[11]、趋势面法^[12]、克里金法(Kriging)^[13]、RBF^[14]等,其中 RBF、IDW、Kriging 等已被证明

能够有效地用于地学数据的插值^[15-16]。对于气象要素的插值,彭彬等^[17]基于江苏省气温数据,结合 DEM 数据,比较了四种插值方法,指出在站点稀疏情况下,协同 Kriging 优势更明显;胡永宁等^[18]对内蒙古地区气象要素空间内插方法比较后得出,以高次曲面方程为基本函数的 RBF 是气温的最优空间化插值算法;李强^[19]基于地统计的插值方法对黄土高原南部区域气象要素研究后发现,RBF 是气温插值的最优方法;周银明等^[20]认为 RBF 对气象要素的插值精度总体优于 IDW,且更适合作为缺失气象数据的补全方法;杨春华等^[21]对重庆山地区域的气象要素插值实验表明,气温的最优插值方法为薄盘光滑样条。为了提高插值精度,Aguilar 等^[22]探讨了地形形态、采样密度和离散采样数据插值方法对 DEM 中插值高程

收稿日期: 2022-12-05

作者简介: 杨朔(1997—),男,汉族,四川雅安人,硕士研究生,主要从事地图学与地理信息系统研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871327);南充市科技计划项目(18YEZJ0034);西华师范大学博士启动项目(12B015)

精度的影响;Yang 等^[23]通过优化 ANUDEM 参数以及减少数据源误差来改进 DEM;Guo 等^[24]量化了地形变异性、激光雷达采样密度、插值方法对 DEM 精度的影响;Zhang 等^[25]研究了空间采样策略对插值精度的影响。前人研究多是插值参数对插值精度的影响,以选择较优的参数取值区间^[26-29],或者采取一些手段对插值方法进行优化^[30-34]。由于研究区域、数据特征、采样方式以及时间和空间尺度不同,插值方法的选取与优化方式也有所不同^[35];同时插值方法内部相关参数的选择对 RMSE 的影响程度以及影响机制仍需继续探索。前人通过对不同地区的气温插值进行研究,发现山地和地形复杂地区的气温插值方法较优的是 RBF。四川省宜宾市地貌以中低山地和丘陵为主,呈现境内地形起伏大,地形地貌、地质构造复杂的特点^[36]。选取宜宾市为研究区域,气温数据为数据源,基于 ArcGIS 平台使用 RBF 对数据进行插值,并利用地理探测器^[37]工具定量归因影响插值精度的五种因素(核函数、最大相邻要素数、最小相邻要素数、扇区类型以及搜索角度)。

1 数据与方法

1.1 实验数据

宜宾市地处四川、云南、贵州三省结合部,并有长江、岷江、金沙江三江流经,整体地势西南高、东北低,最大高程约 1 994 m,植被覆盖率较高,因而研究宜宾市气温的空间分布具有代表性。

气温数据为宜宾市气象局自动气象站监测数据,获取时间为 2021 年 10 月 18 日 15 时。由于实验目的是探究插值参数对插值结果的定量影响,因此,以去除缺失数据后的 142 站气温数据为样本点。样本点数据被认为是真值,全部应用于插值,实验基于均方根误差(root mean square error, RMSE)进行插值精度评价,不对实验数据作误差分析。图 1(见第 69 页)为样本点在宜宾市 30 m 分辨率的 SRTM1 DEM(下载自 <https://earthexplorer.usgs.gov>)高程格局上的分布。

1.2 实验方法及参数

1.2.1 插值方法 RBF 是一组确定性精确插值方法的统称,其包含以下五种基函数:规则样条函数(completely regularized spline, CRS)、张力样

条函数(tension spline function, TS)、高次曲面函数(higher-order surface, HS)、反高次曲面函数(inverse higher-order surface, IHS)以及薄板样条函数(thin plate spline, TPS),不同的基函数会构建不同的插值表面。RBF 依据已有的采样数据选取适合的基函数构建一个具有最小曲率,经过既有全部实验数据样本点的曲面^[38]。此方法在实验数据量庞大、地形表面起伏度小的情况下较为适用;而当数据局部变异较大,且无法保证数据的精度时不再适用。

1.2.2 插值参数 影响 RBF 插值精度的参数有核函数、最大相邻要素数、最小相邻要素数、扇区类型、搜索角度、搜索形状 6 类。最大相邻要素数和最小相邻要素数是指搜索范围内各个扇区所包含数据的最大和最小数量。扇区是指在搜索采样点时限制搜索方位的因素。扇区包含四种类型,分别是:1 个扇区、4 个扇区、4 个扇区旋转 45°、8 个扇区,示意图如图 2(见第 69 页)所示。

搜索形状分为圆形和椭圆形两种,主要通过修改长短半轴长度进行切换,当长半轴长度等于短半轴长度时,搜索形状为圆形;当长半轴长度不等于短半轴长度时,搜索形状为椭圆形。

对同一个未知点来说,随着搜索邻域的形状或方向不同,搜索区域内包含的参与计算的已知点的数量和位置也会不同^[39]。

1.2.3 多尺度空间自相关 地理学第一定律指出,所有的地理事物都是相互联系的,但离得越近的事物彼此之间的联系越强^[40];因此,实验采用了 ArcGIS 平台的“增量空间自相关”工具计算各个距离上实验站点的空间聚类情况。增量空间自相关是一种测量数据在一系列空间距离上自相关程度的方法,自相关的程度由返回的 Z 得分确定,通常情况下,距离增大 Z 得分也增大,即表示自相关程度增强,对于一些特征距离,Z 得分一般表现为峰值,峰值反映促进空间过程聚类最明显的距离^[41]。

1.3 地理探测器

地理探测器是一种探测目标要素空间差异并揭示其背后驱动力的统计学方法^[37]。地理探测器包含了因子探测、交互作用探测、生态探测和风

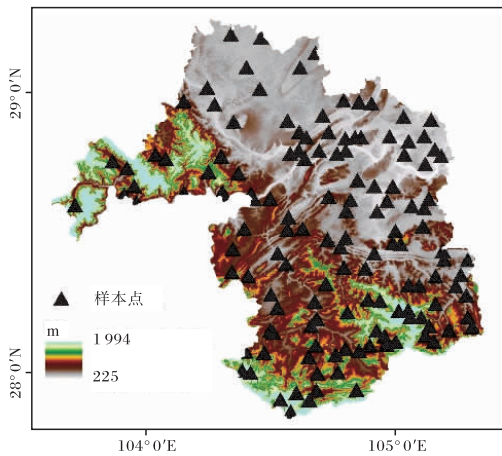


图1 样样本点空间分布(审图号为GS(2019)1822号;文见第68页)

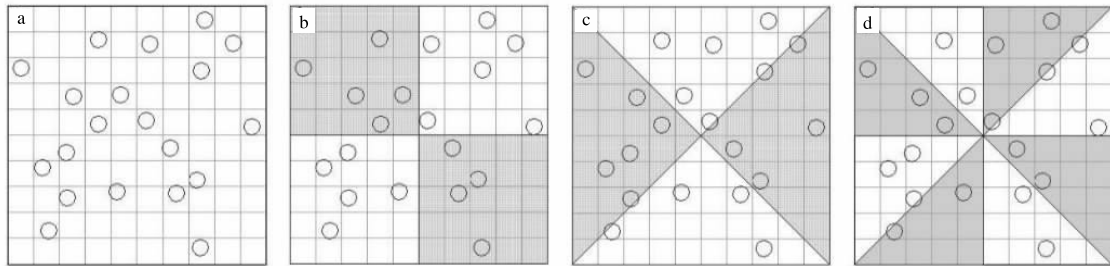


图2 RBF插值法扇区类型(a 1个扇区,b 4个扇区,c 4个扇区旋转45°,d 8个扇区)示意图(文见第68页)

是否相互独立,或者各个自变量的共同作用是否会增强或减弱对因变量的解释度,交互作用类型判断准则请参见文献[37]。

风险探测:用于判断两个子区域间的属性均值是否有显著的差别,搜索较为合适的插值参数^[37]。

险探测四个部分,主要对类型量数据进行探测与分析,并显示目标要素之间的影响程度^[42]。本研究利用因子探测、交互探测以及风险探测三部分研究影响RBF插值精度的因素。

因子探测:探测因变量的空间分异性,同时探测自变量对因变量的解释度,用 q 值度量^[37]。 q 的值为 $[0, 1]$,值越大说明因变量的空间分异性越明显;如果分层是由自变量生成的,则 q 值越大表示自变量对因变量的解释力越强,反之则越弱。极端情况下, q 值为1表明自变量完全控制了因变量的空间分布, q 值为0则表明自变量与因变量没有任何关系。

交互作用探测:探测自变量对因变量的影响

2 结果与分析

2.1 气温数据趋势分析

气温数据统计特征值见表1。气温数据不服从正态分布,呈现负偏态分布,最大值为 19.0°C ,最小值为 9.2°C ,均值为 15.2°C 。

表1 宜宾站气温数据统计特征值及趋势分析

统计项目	样本点数量/个	最大值/ $^{\circ}\text{C}$	最小值/ $^{\circ}\text{C}$	均值/ $^{\circ}\text{C}$	标准差/ $^{\circ}\text{C}$	峰度	偏度	样本点间平均距离/m
统计值	142	19.0	9.2	15.2	1.9	3.8	-0.9	5 677.9

2.2 径向基函数插值参数设置探究

RBF是移动拟合法,黄杏元^[43]提到可以通过动态搜索圆的方法确定待插点的最小邻域范围(搜索圆的半径),其公式为

$$R = \sqrt{\frac{nA}{N\pi}} \quad (1)$$

式中, N 为样本点总数, A 为总面积, n 为圆内样本点个数, R 为搜索圆的半径。依据实验数据,将对应参数数值代入公式计算得到搜索半径

约为52 734.047 m。

由于用于实验插值的是点要素数据,考虑到空间点要素对周围邻域具有一定的影响以及点要素相互之间的相关性,实验使用多尺度空间自相关分析方法,探索了不同空间距离上要素之间自相关程度得分的变化(图3)。从图3可以看出,气温数据在30个距离尺度中,距离约为30 000 m、47 500 m尺度上存在 Z 得分峰值点。超过30 000 m后, Z 得分曲线持续抬升,没有出现新的

波动相对稳定的点;因此实验设定 47 500 m 为插值最大相关距离,根据样本点间平均距离 5 677.927 m,计算得到最大相关距离约为样本点间平均距离的 9 倍,为 51 101.339 m。多尺度空间自相关方法计算得到的搜索半径与文献[43]提出的动态搜索圆方法计算得到的搜索半径基本吻合,二者相差 1 632.708 m,仅为样本点间平均距离的 1/4~1/3;因此,通过多尺度空间自相关方法确定搜索圆的半径是具有一定意义的。

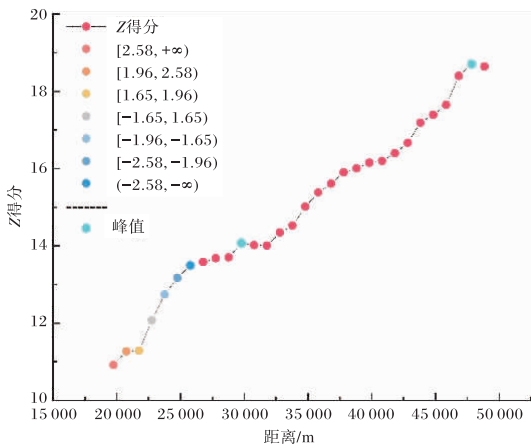


图3 气温数据增量自相关散点图

实验在设置与距离相关的插值参数时,依据了最大相关距离约为样本点间平均距离的 9 倍这一原则,同时也考虑到要使各个方向、各个扇区的插值样本点数量基本相等,因此将搜索形状设置为圆形,长短半轴长度均为 9 倍样本点间平均距离。

在保持搜索半径不变的情况下,扇区类型与搜索角度对插值的精度有所影响^[28];因此,实验

就四种扇区类型与搜索角度(搜索角度为 $[0^\circ, 360^\circ]$, 10° 为增量间隔,即 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 360^\circ$),在保持搜索半径恒定的情况下对 RMSE 的影响单独进行基于地理探测器的定量归因,结果如表 2。结果显示,搜索角度对 RMSE 的影响没有通过 0.05 的显著性检验,解释度为 0.043;扇区类型对 RMSE 的影响通过 0.05 的显著性检验,解释度为 0.910。结果表明,在保持搜索半径不变的情况下,搜索角度对 RMSE 几乎没有影响,而扇区类型对 RMSE 的影响程度极大。

表2 宜宾站气温数据搜索角度与扇区类型的因子探测

探测指标	搜索角度	扇区类型
解释度(q)	0.043	0.910
显著性水平(p)	1.000	0.000

依据上述实验结果,将 RBF 插值工具中的核函数、最大相邻要素数、最小相邻要素数以及扇区类型四种参数进行控制变量法设置,搜索角度设置为 0° ,记录每次插值结果的 RMSE,并用地理探测器模型加以分析。地理探测器因子分析结果如表 3 所示,核函数对 RMSE 的贡献为 0.020,扇区类型的贡献为 0.022,最大相邻要素数的贡献为 0.019,最小相邻要素数的贡献为 0.010,其中最大、最小相邻要素数未通过 0.05 的显著性检验。表明这四种插值参数的解释度均不是特别高,最大相邻要素数与最小相邻要素数并非影响插值结果的主导因素,而扇区类型与核函数对插值结果起主导作用,扇区类型对均方根误差的影响最强,核函数的影响相对较弱。

表3 宜宾站气温数据地理探测器因子分析结果

探测指标	核函数	最大相邻要素数	最小相邻要素数	扇区类型
解释度(q)	0.020	0.019	0.010	0.022
显著性水平(p)	0.044	0.268	0.770	0.045

交互探测分析了核函数、最大相邻要素数、最小相邻要素数以及扇区类型是否对 RMSE 存在交互影响及交互影响的解释度强弱,结果如表 4。它们对 RMSE 的共同作用均强于单一因子对 RMSE 的影响,依据判断准则,这四种插值参数

相互之间对 RMSE 的解释度均存在非线性增强现象。核函数与扇区类型交互影响解释度达到 0.127,与最大相邻要素数的相互影响次之,与最小相邻要素数的相互影响最弱解释度最低。最大相邻要素数与最小相邻要素数和扇区类型的相互

作用解释度均达到 0.201,且强于核函数与扇区类型的相互影响,表明扇区类型与最大相邻要素

数和最小相邻要素数的共同作用能最大程度地影响 RMSE。

表 4 宜宾站气温数据地理探测器交互作用分析的解释度结果

影响因素	核函数	最大相邻要素数	最小相邻要素数	扇区类型
核函数	0.020	0.112	0.072	0.127
最大相邻要素数	0.112	0.019	0.050	0.201
最小相邻要素数	0.072	0.050	0.010	0.201
扇区类型	0.127	0.201	0.201	0.022

风险探测结果如表 5 显示,对宜宾市气温数据插值进行分析,核函数中 TPS 插值的风险指数最大为 1.675,HS 插值次之,CRS、TS、IHS 插值的风险指数相近且 CRS 风险指数最小,为 1.240。最大相邻要素数为 3 时风险指数最大,为 1.839;最大相邻要素数为 8 时风险指数最小,为 1.273;其余的风险指数较为相近。最小相邻要素

数为 3 时风险指数最大,为 1.622;其余的风险指数较为一致,均在 1.278 左右;风险指数最小的是最小相邻要素数为 6 时。扇区类型中风险指数随扇区类型从一个扇区到 8 个扇区先减小后增大,其中扇区类型为 1 个扇区的风险指数最大,为 1.921;为 4 个扇区旋转 45°时风险指数最小,为 1.276。

表 5 宜宾站气温数据地理探测器风险分析结果

核函数	风险指数	最大相邻要素数	风险指数	最小相邻要素数	风险指数	扇区类型	风险指数
CRS	1.240	2	1.307	1	1.285	1 个扇区	1.921
TS	1.241	3	1.839	2	1.282	4 个扇区	1.277
HS	1.267	4	1.288	3	1.622	4 个扇区旋转 45°	1.276
IHS	1.244	5	1.280	4	1.281	8 个扇区	1.280
TPS	1.675	6	1.275	5	1.278	—	—
—	—	7	1.274	6	1.275	—	—
—	—	8	1.273	7	1.275	—	—
—	—	9	1.274	8	1.276	—	—
—	—	—	—	9	1.275	—	—

注:“—”表示数据不存在。

3 结论

(1)地理探测器分析结果得出,扇区类型与核函数为五种插值参数中的主要影响因素,在保持搜索半径不变的情况下,搜索角度对 RMSE 解释度低,而扇区类型对 RMSE 的解释度极高,影响程度接近 100%。通过多尺度空间自相关方法和地理探测器的定量分析明确了五种插值参数中影响插值精度的主要因素,降低了插值参数设置的

随意性,能有效提高插值精度。

(2)气温数据风险探测结果显示最大相邻要素个数为 8 左右时,风险指数较小,此时插值覆盖面积的半径大致为 4.5×10^4 m,与使用空间自相关得分在 4.7×10^4 m 左右达到相对稳定的峰值大致对应。这表明多尺度空间自相关方法,能够在一定程度上指导最大相邻要素个数和搜索半径的确定。

参考文献:

- [1] 辜智慧,史培军,陈晋. 气象观测站点稀疏地区的降水插值方法探讨:以锡林郭勒盟为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(2): 204-208.
- [2] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等. 气象要素空间插值方法优化[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 357-364.
- [3] 郑小波,罗宇翔,于飞,等. 西南复杂山地农业气候要素空间插值方法比较[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 458-462.
- [4] 李丽双,张颖. 基于 GIS 的东北地区气象要素空间插值方法[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(9): 5541-5543.
- [5] 刘志红,MCVICAR T R,NIEL V,等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008, 34(2): 92-100.
- [6] 徐军昶,高彦斌,李四虎. 基于 GIS 的陕西省极端气温及其重现期值的空间分布特征研究[J]. 陕西气象, 2010(1): 6-9.
- [7] 岳文泽,徐建华,徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 974-980.
- [8] 赵美艳,余君,胡芸芸. 基于局部薄盘光滑样条函数的重庆地区气温空间插值[J]. 陕西气象, 2021(1): 50-55.
- [9] 陈艳英,高阳华,游扬声,等. 面雨量空间扩展估算法[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 9-14.
- [10] 陈娟,罗明良,张斌,等. 反距离加权插值参数变化对元谋冲沟 DEM 构建的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 29-34.
- [11] BARTIER P M,KELLER C P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW)[J]. Computers and Geosciences, 1996, 22(7): 795-799.
- [12] FABRI A,JANNELLO P. Sull'uso dell'analisi de 'trend' (trend surface analysis) in geologia [J]. GeoScienceWorld, 1970, 89(1): 97-112.
- [13] RYU J S,KIM M S,CHA K J, et al. Kriging interpolation methods in Geostatistics and DACE model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2002, 16(5): 619-632.
- [14] RIPPA S. An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation[J]. Advances in Computational Mathematics, 1999, 11(2/3): 193-210.
- [15] 陈明,何凯涛,王全明. 地学自由曲面径向基函数网络重建的详细算法[J]. 物探化探计算技术, 2005(1): 75-77+99.
- [16] 吴健生,王仰麟,曾新平,等. 三维可视化环境下矿体空间数据插值[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(4): 635-641.
- [17] 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.
- [18] 胡永宁,张国盛,秦艳,等. 内蒙古地区气象要素空间内插方法比较[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 107-113.
- [19] 李强. 基于地统计的区域气象要素空间插值与分布研究[J]. 资源开发与市场, 2012, 28(5): 393-395+384.
- [20] 周银明,吴达胜. 基于 RBF 和 IDW 的气象要素插值方法比较[J]. 计算机时代, 2019(10): 8-10.
- [21] 杨春华,郑莉,黄河清,等. 重庆山地区域气象要素空间插值方法对比[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(4): 57-66.
- [22] AGUILAR F J,AGÜERA F,AGUILAR M, et al. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(7): 805-816.
- [23] YANG Q K,MCVICA T R,NIEL T G V, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: An example in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2006, 9(3): 235-246.
- [24] GUO Q H,LI W K,YU H, et al. Effects of topographic variability and Lidar sampling density on several DEM interpolation methods [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010, 76(6): 701-712.
- [25] ZHANG H R,LU L J,LIU Y H, et al. Spatial sampling strategies for the effect of interpolation accuracy[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2742-2768.
- [26] 李佳,段平,吕海洋,等. 基于改进的逐点交叉验证的 RBF 形态参数优化方法及其空间插值实验

- [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3): 39-42+48.
- [27] 刘盼, 罗明良, 任春颖, 等. RBF 插值参数对黄土高原古地形 DEM 模拟的影响[J]. 工程勘察, 2017, 45(8): 38-44+55.
- [28] 慕凯, 罗明良, 岳彦利, 等. 基于点云构建干热河谷典型冲沟 DEM 的参数优选: 以析取克里格插值方法为例[J]. 中国农学通报, 2016, 32(27): 126-131.
- [29] 许海红, 韩小锋, 袁炳强, 等. 基于径向基函数的 1:5 万规则分布重力数据插值参数优选[J]. 物探与化探, 2021, 45(6): 1539-1552.
- [30] 颜金彪, 吴波, 何清华. 顾及各向异性的多参数协同优化 IDW 插值方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(5): 675-684.
- [31] 李灵爱, 黄声享, 李治欣. 顾及数据序列非平稳变化特征的插值优化算法[J]. 测绘通报, 2022 (增刊 2): 118-121.
- [32] 吕海洋, 盛业华, 段平, 等. 局部最优形态参数的 RBF 分块地形插值方法与实验[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(3): 260-267.
- [33] 屈名, 王德麾. 一种新的带有优化参数的曲线插值算法[J]. 机械与电子, 2010 (9): 19-22.
- [34] 张增磊, 吕达, 赵灯, 等. 多种数值插值算法插值性能分析及优化[J]. 科学技术创新, 2021 (36): 8-12.
- [35] 蒲阳, 王汝兰, 罗明良, 等. 不同雨量次降雨空间插值对比: 以四川省南充市降雨为例[J]. 水文, 2018, 38(4): 73-77.
- [36] 胡承林. 宜宾市地质灾害成因及特征浅析[J]. 资源与人居环境, 2013(9): 30-31.
- [37] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [38] 解恒燕, 张深远, 侯善策, 等. 降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 117-121.
- [39] 白世彪, 王建, 常直杨. Surfer10 地学计算机制图[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 84-87.
- [40] TOBLER W. A computer movie simulating urban growth in the detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46(2): 234-240.
- [41] 刘禹希, 王学锋, 吕少梁, 等. 南海北部海域大眼鲷空间自相关性[J]. 水产学报, 2021, 45(8): 1361-1373.
- [42] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [43] 黄杏元. 地理信息系统概论(修订版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 97-104.