

反距离权重插值与克里金插值在冀鲁豫交界区地磁场数据分布中的对比研究

李 博

河北省地震局保定地震监测中心站, 河北 保定

收稿日期: 2025年7月6日; 录用日期: 2025年8月8日; 发布日期: 2025年8月19日

摘 要

为提升冀鲁豫交界地区(35.5°N~37.5°N, 113.5°~116.5°E)地磁场总强度空间分布的刻画精度, 本文基于2025年4月35个地磁测点的总强度日变通化数据, 系统对比了克里金插值(Kriging)与反距离权重插值(IDW)的空间建模性能。通过交叉验证法计算残差, 结合平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和确定系数(R^2)定量评估精度。结果表明: 两种方法均呈现地磁场强度西北高、东南低的趋势, 但IDW对局部极值(如孤立峰谷)表现更突出, 而Kriging结果更平滑; Kriging的MAE (80.66 nT)、RMSE (94.65 nT)显著低于IDW (MAE = 127.30 nT, RMSE = 159.27 nT), 且 R^2 更高(0.90 > 0.71), 表明其模型拟合度更优; IDW残差离散性强(-357.68~388.93 nT), 存在明显区域偏移; Kriging残差分布集中(-200~200 nT), 近似正态分布, 验证其更有效捕捉空间相关性。综上, 在冀鲁豫地区地磁场建模中, 克里金插值精度与可靠性优于反距离权重插值, 可为区域磁异常识别和深部构造研究提供更可靠的数据基础。未来需进一步优化插值参数并拓展多方法对比。

关键词

地磁场, 冀鲁豫地区, 反距离权重插值, 克里金插值

Comparison of Inverse Distance Weighting and Kriging Interpolation in the Distribution of Geomagnetic Field Data in Juncture Area of Hebei, Shandong and Henan

Bo Li

Baoding Central Seismic Station, Hebei Earthquake Agency, Baoding Hebei

Received: Jul. 6th, 2025; accepted: Aug. 8th, 2025; published: Aug. 19th, 2025

文章引用: 李博. 反距离权重插值与克里金插值在冀鲁豫交界区地磁场数据分布中的对比研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(8): 1187-1194. DOI: 10.12677/ag.2025.158110

Abstract

To improve the precision of spatial distribution characterization of the geomagnetic total intensity in the juncture area of Hebei, Shandong and Henan (35.5°N~37.5°N, 113.5°E~116.5°E), this study systematically compares the spatial modeling performance of Kriging interpolation and Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation based on the total intensity diurnal variation data from 35 geomagnetic measurement points in April 2025. Cross-validation is used to calculate residuals, and the accuracy is quantitatively evaluated using Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Coefficient of Determination (R^2). The results show that both methods exhibit a trend of higher geomagnetic intensity in the northwest and lower in the southeast. However, IDW highlights the local extrema better (e.g., isolated peaks and valleys), while Kriging results are smoother. Kriging has significantly lower MAE (80.66 nT) and RMSE (94.65 nT) compared to IDW (MAE = 127.30 nT, RMSE = 159.27 nT), with a higher R^2 (0.90 > 0.71), indicating better model fitting. IDW residuals show strong dispersion (−357.68~388.93 nT) with obvious regional shifts, whereas Kriging residuals are concentrated (−200~200 nT) and approximately normally distributed, validating its better capture of spatial correlation. In conclusion, Kriging interpolation demonstrates higher precision and reliability than IDW for geomagnetic modeling in the juncture area of Hebei, Shandong and Henan, providing a more reliable data foundation for regional magnetic anomaly identification and deep structural studies. Future work should focus on optimizing interpolation parameters and expanding multi-method comparisons.

Keywords

Geomagnetic Field, Area of Hebei, Shandong and Henan, Inverse Distance Weighting, Kriging Interpolation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地磁场作为地球内部物理性质的重要表征，其空间分布特征对揭示岩石圈结构、断裂活动性及地震孕育机制具有不可替代的意义[1]。尤其在构造活动复杂的交界区域，高精度的地磁场总强度分布图是识别磁异常梯度带、分析深部磁化率结构的基础依据。在地磁场总强度分布的计算中，插值方法的选择至关重要，它直接影响到数据的准确性和分析的可靠性[2]。克里金插值(Kriging)和反距离权重插值(IDW)是两种常用的空间插值方法[3]-[5]。克里金插值基于空间自相关性的最优无偏估计，能够有效地利用数据点的空间分布特征进行插值；而反距离权重插值则是一种简单的确定性插值方法，它根据数据点与插值点之间的距离来分配权重[3][6][7]。

冀鲁豫交界地区作为我国重要的地震监测区，其地磁场总强度空间分布特征的精准刻画对区域构造活动研究和地震前兆识别具有重要意义[8][9]。流动地磁测量作为获取区域地磁场高分辨率数据的主要手段，在该区域已积累多期观测资料。本研究利用 2025 年度该区域最新的观测资料，通过克里金插值和反距离权重插值结果分析对比，系统对比两种方法在该区域的插值精度和空间分辨率，提升地磁数据处理精度，为地磁异常识别提供优选依据。

2. 研究区域与数据

冀鲁豫总强度加密区位于河北、河南和山东三省交界地区(35.5°N~37.5°N, 113.5°E~116.5°E), 布设有35个地磁总强度测点, 研究区域及测点分布如图1所示, 测点间隔30~35 km, 一年测两期。地磁总强度野外测量使用两台GSM-19T质子旋进磁力仪, 同时在主测点和辅助测点进行测量, 采用“交换同步测量方法”, 在主测点和辅助测点上共同同步进行6组地磁场总强度测量, 严格按照《流动地磁测量基本技术要求》执行。

本文采用2025年4月份最新测量数据进行处理分析。为了外源场引起的影响, 对原始观测数据集进行日变通化改正, 使用“地磁台网泰勒多项式空间参考场模型”将地磁场值通化日同一日期[10], 方法见公式(1)。

$$F_{obs}(t0) = F_{obs}(t) - (F_{ref}(t) - F_{ref}(t0)) \quad (1)$$

其中 $F_{obs}(t0)$ 为观测值的日变化改正结果, $F_{obs}(t)$ 为测点 t 时刻测量值; $F_{ref}(t)$ 为地磁台网空间参考场模型 t 时刻观测值; $F_{ref}(t0)$ 为地磁台网空间参考场模型日变化改正零时的测量值。本文日变化改正零时为北京时间2025年3月10日0:00~03:00时。最终测点日变通化值 F_i 为6组日变化改正结果均值。

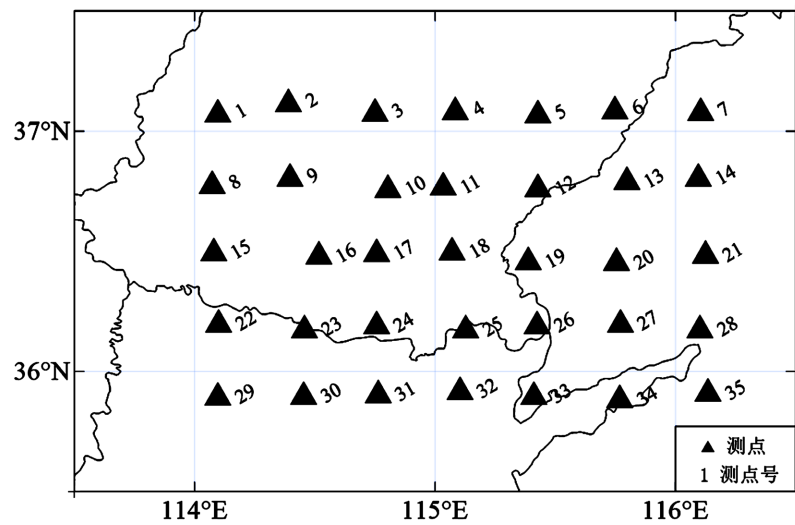


Figure 1. Distribution of measuring points of total geomagnetic intensity in area of Hebei, Shandong and Henan
图 1. 冀鲁豫地区地磁总强度测点分布图

3. 插值方法与精度评估

本部分选取克里金插值和反距离权重插值两种方法, 综合评估在冀鲁豫地区地磁场总强度分布情况插值表现。在克里金插值模型选择中, 本文选择高斯模型(地磁场模型多使用高斯模型), 通过自动化计算相关参数, 选择最优解。在反距离权重参数选择中, 幂次 P 值的选择至关重要, P 增大则强化邻近的影响, 综合不同 P 值结果及数据平滑效果, 本文选择 $P = 2$ 进行分析。通过对结果进行分析, 对插值方法的可靠性与确定性进行对比, 最终对其适用性进行讨论。

3.1. 克里金插值(Kriging)

克里金插值法是一种基于统计学的插值方法, 其核心思想是利用已知数据点的空间自相关性, 通过构建变异函数对区域化变量进行无偏最优估计, 来估计插值点的值[2] [11] [12], 原理公式(2):

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

其中, $z(x_0)$ 是 x_0 处的插值结果, $z(x_i)$ 是已知测点 x_i 处的测量值, λ 是第 i 个测点的权重, n 是测点个数。

3.2. 反距离权重插值(IDW)

反距离权重插值法是一种基于距离权重的插值方法, 其基本原理是假设距离越近的点对插值点的影响越大, 距离越远的点对插值点的影响越小[12]-[15]。反距离权重插值法利用已知测点的观测值预测除了已知点外的其他值, 原理公式(3):

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \frac{z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p} \quad (3)$$

其中, $z(x_0)$ 是 x_0 处的插值结果, $z(x_i)$ 是已知测点 x_i 处的测量值, $d(x_0, x_i)$ 是插值点与已知测点之间的距离, p 是距离的幂次, n 是测点个数。

3.3. 残差与精度评估

本文采用交叉验证法对空间插值模型的预测精度进行定量评估[7] [13], 即每次将一个已知测点作为被插值点, 用其余 34 个测点构建插值模型, 分别运用克里金插值法和反距离权重插值法对被插值点进行空间插值。通过比较真实值与预测值之间的残差, 进行误差分析。原理公式(4):

$$v_i = F_i - F_j \quad (4)$$

其中, v_i 是测点 i 处的残差, F_i 是测点 i 的日变通化结果值, F_j 是测点 i 的模型预测值。

选用平均绝对误差(MAE)和平方根误差(RMSE)来判断插值效果, 选用确定系数 R^2 来判断插值模型的拟合程度, 计算公式分别为(5)~(7):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i - F_j| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - F_j)^2} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_j)^2}{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (7)$$

其中, F_i 是测点 i 的日变通化结果值, F_j 是测点 i 的模型预测值, $\bar{F}$ 是测点日变通化结果的平均值。

4. 结果分析

对冀鲁豫地区 202503 期的地磁的总强度日变化改正结果, 分别进行克里金插值和反距离权重插值, 结果如图 2、图 3。

2 种插值方法的等值线图都是由西北向东南方向递减, 在东北位置, 有极大值区, IDW 结果图展现出两个极大值点, 而 Kriging 结果图展现出一片极大值区域。在西南位置, 有极小值区, IDW 结果图展现的单点极值更明显, 呈现多个圆形区域等值线, Kriging 结果图平滑为一片极小值区域。

结合 3D 视图, 呈现出高低起伏的形态, 像一个有峰谷的地貌模型, 红色的“山峰”对应磁场强度较高的区域, 蓝色的“山谷”对应磁场强度较低的区域。可以看到 Kriging 图“峰”“谷”更高, 值更大, 更平滑。而 IDW 图“峰”“谷”数量更多。反映出 Kriging 方法在细节上显得更加平滑, 而 IDW 方法可

能更强调局部极值的突出表现。

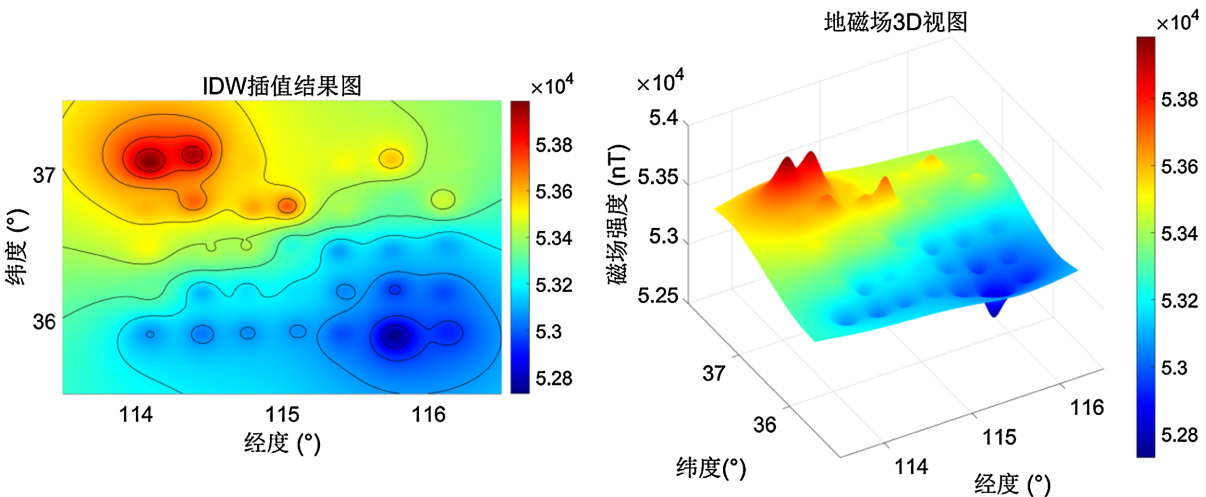


Figure 2. Geomagnetic field distribution in juncture area of Hebei, Shandong and Henan based on IDW
图 2. 基于 IDW 冀鲁豫交界区地磁场分布图

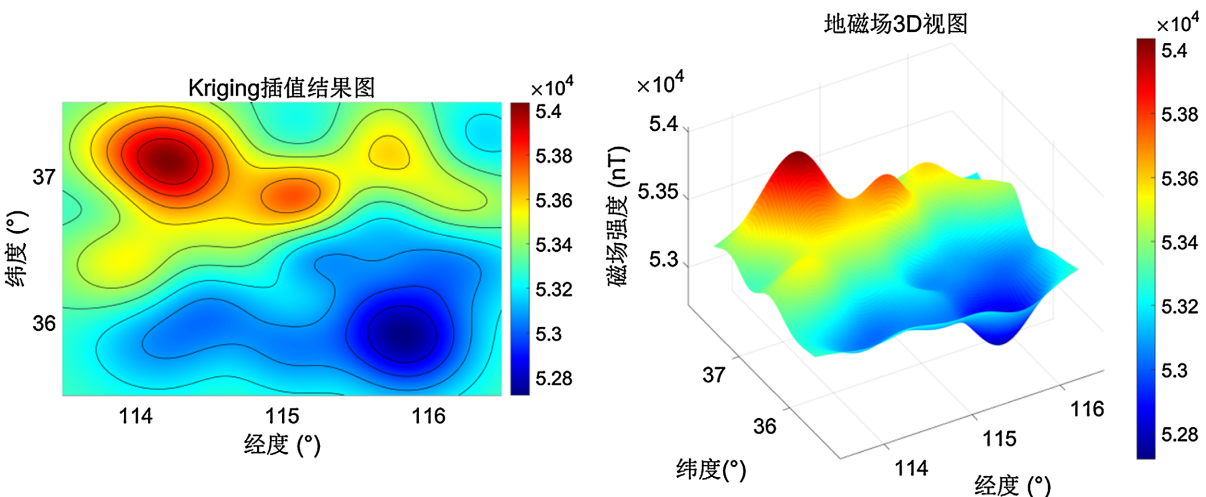


Figure 3. Geomagnetic field distribution in juncture area of Hebei, Shandong and Henan based on Kriging
图 3. 基于 Kriging 冀鲁豫交界区地磁场分布图

我们对两种插值方法的残差进行了详细的统计分析，以评估其预测精度，见表 1。为对数据更直观地了解，对残差结果绘制残差分布图及直方图，见图 4、图 5。

Table 1. Statistical analysis of residual results of different interpolation methods
表 1. 不同插值方法残差结果统计分析

测点号	F_i (nT)	F_j-IDW (nT)	v_i-IDW (nT)	$F_j-Kriging$ (nT)	$v_i-Kriging$ (nT)
1	53984.64	53595.71	388.93	53852.23	132.41
2	53938.51	53592.88	345.63	53874.35	64.16
3	53566.28	53542.60	23.68	53609.93	-43.65

续表

4	53493.14	53479.34	13.80	53465.28	27.86
5	53508.14	53425.52	82.62	53573.23	-65.09
6	53582.01	53375.53	206.48	53439.23	142.78
7	53402.45	53383.45	19.00	53584.95	-182.50
8	53602.74	53557.73	45.01	53740.79	-138.05
9	53706.48	53524.47	182.01	53543.58	162.90
10	53624.95	53476.65	148.30	53746.30	-121.35
11	53717.89	53414.31	303.58	53583.07	134.82
12	53412.11	53345.94	66.17	53475.92	-63.81
13	53317.42	53339.30	-21.88	53367.34	-49.92
14	53457.61	53289.36	168.25	53313.68	143.93
15	53516.84	53413.16	103.68	53365.35	151.49
16	53416.27	53379.53	36.74	53513.59	-97.32
17	53419.78	53361.81	57.97	53329.99	89.79
18	53235.44	53331.62	-96.18	53345.15	-109.71
19	53081.43	53244.58	-163.15	53020.47	60.96
20	53082.24	53181.70	-99.46	53092.31	-10.07
21	53091.27	53198.73	-107.46	53199.04	-107.77
22	53321.99	53284.98	37.01	53280.31	41.68
23	53104.79	53263.64	-158.85	53107.02	-2.23
24	53160.58	53234.78	-74.20	53200.08	-39.50
25	53159.70	53174.02	-14.32	53098.91	60.79
26	53051.93	53139.89	-87.96	53100.13	-48.20
27	52941.78	53103.39	-161.61	52918.03	23.75
28	52971.63	53083.66	-112.03	52996.18	-24.55
29	53067.22	53239.37	-172.15	53138.61	-71.39
30	53032.93	53190.36	-157.43	53058.39	-25.46
31	53056.38	53169.42	-113.04	53019.93	36.45
32	53058.79	53138.66	-79.87	53127.29	-68.50
33	52973.35	53094.17	-120.82	52892.24	81.11
34	52728.83	53086.51	-357.68	52895.13	-166.30
35	52920.05	53048.56	-128.51	52887.07	32.98
MAE		127.30		80.66	
RMSE		159.27		94.65	
R ²		0.71		0.90	

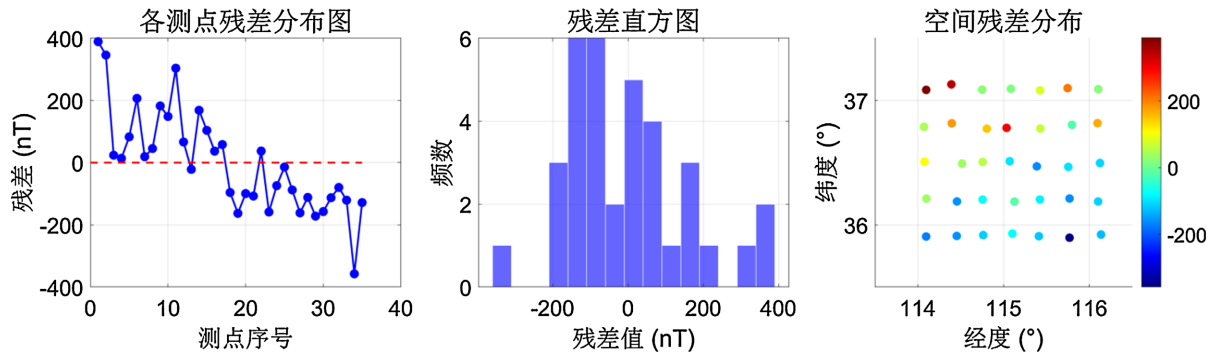


Figure 4. Residual results based on IDW

图 4. 基于 IDW 残差结果图

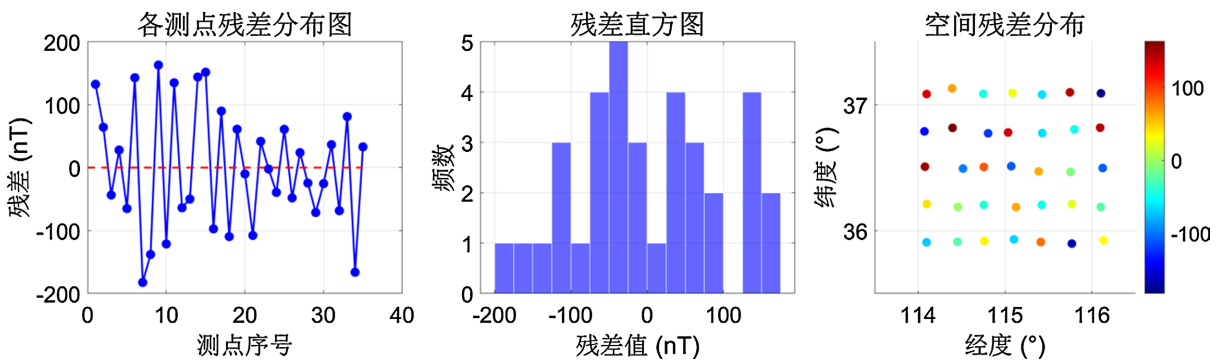


Figure 5. Results based on Kriging residuals

图 5. 基于 Kriging 残差结果图

残差测点分布图可以看出,两种插值方法的残差在测点间波动较大,且均呈现出一定的离散性。IDW 残值结果有整体变小趋势,17 号点以前除了 13 号点外均为正值,最大值为 1 号点的 388.93 nT,18 号点以后,22 号点为正值,其余点均为负值,最小值为 34 号点-357.68 nT。Kriging 残差结果波动范围在-200 nT 至 200 nT 之间,16 号点以后除了 34 号点基本在-100 nT 至 100 nT 之间波动。

残差直方图可以看出,两种插值方法的残差值主要集中在-200 nT 至 200 nT 之间,且大致呈对称分布。其中, IDW 的残差直方图显示出较多的极端值,残差值甚至达到-400 nT 和 400 nT,而 Kriging 的残差分布相对较为集中,其残差值范围在-200 nT 至 200 nT 之间,整体分布近似正态分布。这表明 Kriging 方法在处理地磁场数据时,能够更好地捕捉数据的空间相关性,从而获得更准确的预测结果。

空间残差分布图可以看出, IDW 残差分布相对集中,正值主要分布于区域北部及西北部,负值主要分布于区域南部,东部值明显低于西部值。Kriging 的残差空间分布相对较乱,正负值经常交叉出现,极值主要出现在北部区域,南部明显残差值相对较小。

由表 1 可知, IDW 的 MAE 和 RMSE 分别是 127.30 和 159.27, Kriging 的 MAE 和 RMSE 分别是 80.66 和 94.65,说明 Kriging 插值效果明显优于 IDW。IDW 的 R^2 为 0.71, Kriging 的 R^2 为 0.90,表明 Kriging 拟合程度优于 IDW。

5. 讨论与结论

本文以冀鲁豫地区的 35 个地磁总强度数据,分别采用反距离权重插值和克里金插值构建插值模型,采用交叉验证法预测精度进行评估,可以得出以下结论。

(1) 冀鲁豫地区地磁场分布相对复杂,整体呈现西北高值、东南低值。不同的插值方法(IDW 和 Kriging)产生了略有差异的地磁场分布,反距离权重插值对局部极值的表现更突出。

(2) 克里金插值整体优于反距离权重插值,其插值效果和模型拟合程度均优于后者。

(3) 总体而言,克里金插值在冀鲁豫地区的地磁场建模中优于反距离权重插值,其残差较小,数据分布更合理,为地磁场的精确分析和预测提供了更可靠的基础。

在冀鲁豫地区地磁场分布的空间插值研究中,我们发现参数的选择对插值结果具有显著影响。然而,在本文中,我们并未对参数的选择进行深入探讨和优化,这无疑是未来研究的一个重要方向。通过细致研究并精选参数,有望进一步提升插值结果的准确性和可靠性。

此外,本文研究仅选取了反距离权重插值法和克里金插值法这两种方法进行对比分析。尽管这两种方法在空间插值领域具有广泛应用,但空间插值的类型实际上多种多样,每种方法都有其独特的优势和适用场景。因此,为了获取更高精度的插值结果,需要在未来的研究中采用更多种类的插值方法进行实验和比较。

基金项目

河北省地震科技星火计划重点项目“流动地磁数据处理方法的深度改进研究”(编号:DZ2024112200008)。

参考文献

- [1] 张海洋,李博,苏树朋,等.冀鲁豫交界区岩石圈磁场异常分布与磁化率结构分析[J].地震地磁观测与研究,2019,40(6): 47-52.
- [2] 王红军,徐浩然,赵文元.电磁频谱地图构建中的空间插值方法综述[J].电讯技术,2025,65(1): 141-151.
- [3] 李海涛,邵泽东.空间插值分析算法综述[J].计算机系统应用,2019,28(7): 1-8.
- [4] 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.
- [5] 张优,王娟,张杰,等. GIS 与地统计学的土壤水分空间插值方法[J].四川师范大学学报(自然科学版),2019,42(5): 703-710.
- [6] 王怀计,祝俊慧,胡莹,等.顾及特征水深点距离重分配的反距离加权插值算法[J].海洋通报,2022,41(1): 9-18.
- [7] 梁玉柔,伍红玲,王伟鹏,等. PM_{2.5} 时空序列缺失数据的反距离权重插值方法补缺研究[J].环境与职业医学,2025,42(2): 171-178.
- [8] 徐志萍,徐顺强,姜磊,等.冀鲁豫交界区流动地磁场总强度异常特征及地震活动性分析[J].山西地震,2017(3): 28-33, 39.
- [9] 王朝景,李博,苏树朋,等.2018 年冀南地区岩石圈磁场变化分析[J].高原地震,2020,32(3): 9-12, 29.
- [10] Su, S., Chen, S. and Zhao, H. (2022) Taylor Polynomial Spatial Reference Field Method for Field Geomagnetic Diurnal Variation Reduction. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58, 981-991. <https://doi.org/10.1134/s1069351322110015>
- [11] 陈琳,任春颖,王宗明,等.基于克里金插值的耕地表层土壤有机质空间预测[J].干旱区研究,2017,34(4): 798-805.
- [12] 冯波,陈明涛,岳冬冬,等.基于两种插值算法的三维地质建模对比[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(4): 1200-1208.
- [13] 付艳平,幸松,王妍,等.基于三种空间插值方法的气温适应性分析——以江西省为例[J].绿色科技,2023,25(4): 51-56.
- [14] 陈鹏,邓飞,刘思廷.三维空间属性插值方法的研究[J].电脑知识与技术,2015,11(7): 235-239.
- [15] 刘光孟,汪云甲,王允.反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J].中国科技论文在线,2010,5(11): 879-884.