

文章编号:1671-6833(2024)06-0107-07

考虑地层空间各向异性的地质建模插值算法

郁军建¹, 闵浩坤², 王斐斐¹, 李 健²

(1. 河南省地震局, 河南 郑州 450016; 2. 郑州大学 地球科学与技术学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对传统地质建模插值算法精度不足、区域特征表达程度不够, 且没有顾及地质空间各向异性等问题, 提出了一种顾及地质空间各向异性的三维地质插值方法。在传统 IDW 插值的基础上, 通过构造虚拟钻孔、模拟构建原始地层点集和调整 IDW 插值椭圆搜索范围参数, 最终获得最优搜索参数的自适应性转变; 还提出了方向标志点概念, 通过膨胀与塌缩实现了搜索区域的二次优化。利用《郑州市城市活动断层探测项目》地质钻孔数据, 逐层分析了各算法的区域适应性, 实现了三维地质模型的隐式曲面表达, 并与常用插值算法进行交叉验证, 结果表明: 所提方法具有良好的区域自适应性, 能够有效表达城市地下空间结构的各向异性特征, 在保证插值精度的同时, 有效表达了区域内地层的实际延展情况。

关键词: IDW 插值; 各向异性; 地质建模; 三维插值算法

中图分类号: P624

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2024.06.002

三维地质模型可以为地质现象、地质资源利用提供直观、虚拟的地质空间^[1], 在地质调查、资源勘探、城市地下空间管理、地震监测预报等行业具有重要的应用前景。三维地质建模的一般做法是利用勘探、地球物理勘探等多元原始资料构建地层界面, 进而建立三维地质模型。考虑到原始数据的离散性^[2], 三维地质隐式建模^[3]中的克里金 (Kriging) 插值^[4]、反距离加权 (IDW) 插值^[5]、径向基函数插值^[6]和局部多项式法^[7]可以获取连续的分布数据, 高效精确地完成地层曲面模型的构建。在以上多种插值方法中, IDW 插值以其原理简单、计算简便且符合地理学第一定律等优点在三维地质建模领域被广泛应用^[8], 国内外学者对其插值参数和自适应的研究也最为广泛^[9-13], 传统 IDW 插值方法以各向同性假设为基础, 根据点与点之间的距离进行计算, 在数据分布均匀的情况下能够快速取得高精度的插值结果, 能够有效捕捉地质界面的渐进变化, 但对于属性值在某一方向存在较大差异的研究区域, 以上 IDW 插值研究结果精度明显下降, 无法全面考虑地质数据的非线性特征及其固有的方向性^[14-15], 表达复杂地质结构上的能力受限。

针对地质空间各向异性特征设计了基于椭圆范围搜索与标志点位置变换的各向异性 IDW 插值方法, 该方法在传统 IDW 插值的基础上模拟补齐纵向钻孔数据, 利用圆形范围分配和交叉验证优化参数组合, 通过标志点的膨胀与塌缩二次优化搜索范围, 以郑州市城市活动断层探测项目钻孔数据为例, 构建了研究范围的三维地质模型, 充分考虑了地质空间的非线性属性特征, 有效展现区域内的各向异性, 通过实例对比分析了本文方法与常用插值算法的优劣。

1 各向异性 IDW 插值参数的确定

使用钻孔数据进行三维地质建模是最常见的情形^[16-17], 受资料限制, 三维地质建模重点要解决钻孔深度和密度不足导致建模可信度低的问题^[18-19]。对地层平缓、结构简单的平原区域, 可利用控制性钻孔的深部信息构建虚拟钻孔^[20], 全面考虑区域地层层序体系、地层统一划分标准^[21-22], 进行浅孔纵向补齐。本文基于郑州市城市活动断层探测项目 33 个深度超过 100 m 的控制性深孔和纵向补齐深部信息的浅孔数据, 交叉验证半径和旋转角度参数最优

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42271459); 河南省地震构造探查工程项目

作者简介: 郁军建 (1989—), 男, 河南周口人, 工程师, 主要从事地震地质、构造地质、三维地质研究工作, E-mail: yujun-jian1025@163.com。

引用本文: 郁军建, 闵浩坤, 王斐斐, 等. 考虑地层空间各向异性的地质建模插值算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(6): 107-113. (YU J J, MIN H K, WANG F F, et al. Geological modeling interpolation algorithm considering spatial anisotropy of strata[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(6): 107-113.)

排列组合,快速获取最佳椭圆搜索参数,通过标志点的膨胀与塌缩完成搜索范围的二次优化,实现 IDW 插值的各向异性,技术思路如图 1 所示。

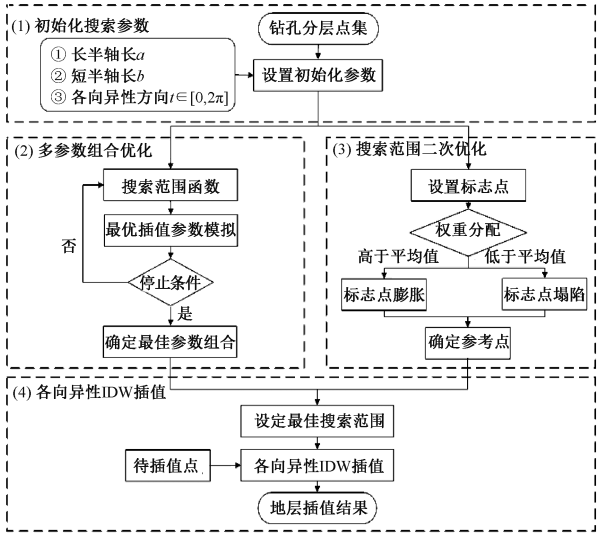


图 1 各向异性 IDW 插值算法流程

Figure 1 Process of anisotropic IDW interpolation algorithm

1.1 各向异性 IDW 插值参数确定

(1)搜索范围确定。各向异性特征通常表现为数据点在不同方向上的分布密度或变化程度不同,传统的 IDW 插值搜索半径呈圆形,每个方向的搜索重心一致,无法体现地理空间属性值在不同方向的变化差异^[23]。而采用椭圆范围搜索可综合顾及不同方向的搜索重心,实现 IDW 的各向异性插值。相对于圆形搜索范围,椭圆搜索能够通过调整长轴、短轴的比例,旋转角度,使得搜索范围更好地匹配数据点的实际分布,提高插值的精度和效果。孙梦楠等^[24]提出了采用基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法来确定椭圆公式,但由于其计算过程需不断随机地重复匹配参数来确定椭圆参数,存在计算量庞大、无法复现其最优解等局限性,本文提出一项新的插值参数模拟方法,通过代入不同半径和旋转角度排列组合,快速得出椭圆搜索参数最优解,搜索方式如图 2 所示。

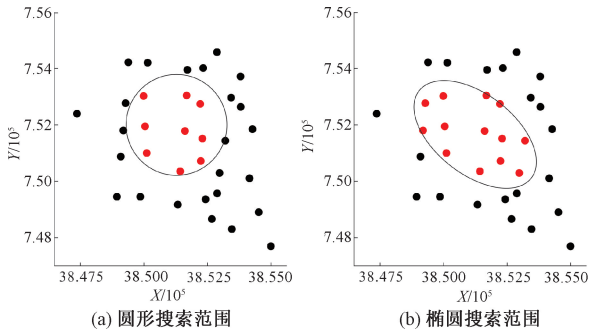


图 2 IDW 插值搜索范围

Figure 2 IDW interpolation search range

实现椭圆搜索范围重点在于判断参考点与预估点间的距离是否小于预估点到此方向上椭圆边的距离。假设 d 为参考点与预估点间的距离,参考点坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, 预估点坐标为 (x_0, y_0) , 则两者间的距离为

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (1)$$

设预估点与参考点形成直线与椭圆的交点为 (x_1, y_1) , 预估点与交点间的距离为 d_1 , 则 d_1 可以由椭圆方程和两点间直线的方程联合求解。

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (2)$$

以预估点作为坐标系原点,则两点间的直线公式为

$$y = \frac{(y_i - y_0)}{(x_i - x_0)} \cdot x_0 \quad (3)$$

设椭圆长轴与坐标系 x 轴间的夹角为 t , 长半轴长为 a , 短半轴长为 b , 则椭圆的标准方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

当标准椭圆沿原点旋转了角度 t 后, 建立一个新的 $u-v$ 坐标系, 则存在以下的等量关系:

$$\begin{cases} u = x \cos t + y \sin t; \\ v = -x \sin t + y \cos t. \end{cases} \quad (5)$$

将上式代入标准椭圆方程后, 即可求得旋转角度 t 后的椭圆方程:

$$\frac{(x \cos t - y \sin t)^2}{a^2} + \frac{(x \sin t + y \cos t)^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

若 $d_1 \leq d_i$, 则此数据点被视为参考点; 若 $d_1 > d_i$, 则此数据点不参与预估点属性值的计算。

由上述推导过程可知, 合理调整计算过程中椭圆旋转角度 t 、椭圆长半轴长 a 及椭圆短半轴长 b 的数值后, 可获取最适用于研究区域地层结构的搜索重心。

(2)最优插值参数模拟。最优插值参数需合理调整椭圆旋转角度 t 、椭圆长半轴长 a 及椭圆短半轴长 b 的数值。

利用不同半径的圆形搜索范围确定参数 a, b 的取值范围, 如表 1 所示。通过实验发现 t 取值间隔过大时, 无法体现参考点选取的细微差异和各向异性, t 取值间隔过小时, 椭圆搜索范围会近似趋于圆形, 无法达到预期效果, 本文将 t 的取值划分为 $\frac{\pi}{5}$,

$\frac{2\pi}{5}$, $\frac{3\pi}{5}$, $\frac{4\pi}{5}$ 和 π , 讨论 5 种椭圆旋转角度下的参考点选取方式, 如表 2 所示。

表 1 中, 2 700 m 的圆形搜索半径取得了最佳的

交叉验证结果,设置 a 的取值分别为 2 300,2 500,2 700,2 900,3 100,以 2 700 为中心,设置 b 的取值为 1 500,1 700,1 900,2 100,2 300,以长半轴的最小值作为短半轴的最大值,叠加 5 种旋转角度 t 构成 125 种三参数取值组合,表 2 为均方根误差最小的 10 种最佳参数组合。

表 1 圆形搜索交叉验证结果

Table 1 Cross validation results of circular search					
序号	半径/m	均方根误差	序号	半径/m	均方根误差
1	1 500	1.599	11	2 500	1.597
2	1 600	1.599	12	2 600	1.588
3	1 700	1.599	13	2 700	1.586
4	1 800	1.599	14	2 800	1.593
5	1 900	1.599	15	2 900	1.592
6	2 000	1.599	16	3 000	1.593
7	2 100	1.598	17	3 100	1.596
8	2 200	1.600	18	3 200	1.612
9	2 300	1.605	19	3 300	1.624
10	2 400	1.602	20	3 400	1.646

表 2 各向异性 IDW 插值最佳结果

Table 2 Best results of anisotropic IDW interpolation				
序号	短半轴长/m	长半轴长/m	旋转角度	均方根误差
1	1 500	3 100	$4\pi/5$	1.457
2	1 700	3 100	$4\pi/5$	1.464
3	1 500	2 900	$4\pi/5$	1.469
4	1 500	2 700	$4\pi/5$	1.478
5	1 700	2 900	$4\pi/5$	1.481
6	1 900	3 100	$4\pi/5$	1.484
7	1 500	2 500	$4\pi/5$	1.491
8	1 700	2 700	$4\pi/5$	1.503
9	1 900	2 900	$4\pi/5$	1.510
10	2 100	3 100	$4\pi/5$	1.510

对比发现,在椭圆旋转角度 t 、椭圆长半轴长 a 及短半轴长 b 叠加下,均方根误差由 1.586 进一步减小为 1.457,插值精度提升较大。插值最佳结果的椭圆搜索范围旋转角度均为 $4\pi/5$,表明本文的研究区域在 $4\pi/5$ 方向具有强各向异性特征,进一步证实椭圆搜索范围能更好顾及地质空间的各向异性特征。

1.2 搜索范围优化

李正泉等^[25]认为,在各向异性变化最为剧烈的方向投入更多权重是获得较好插值结果的有效途径;本文根据各向异性对比结果,重新制定各方向的权重分配,在这一方向上投入更多搜索重心,

进一步优化 IDW 各向异性插值的搜索结果。针对示例数据,本文提出了一种标志点膨胀与塌缩优化确定各向异性搜索范围的方法,基于已有实验结果为不同方向分配相应的搜索权重。此方法主要包括 3 个步骤:确定标志点、权重分配与范围划定。

(1)确定标志点。为实现 IDW 的各向异性插值,基于上文划分的 5 种椭圆旋转角度 t ,在圆形最佳搜索范围上创建 10 个标志点,依次被记为 $A_1 \sim A_{10}$,每个标志点距离圆心的距离均为最佳搜索 2 700 m,对应的旋转角度分别为 $0, \frac{\pi}{5}, \frac{2\pi}{5}, \frac{3\pi}{5}, \frac{4\pi}{5}, \frac{6\pi}{5}, \frac{7\pi}{5}, \frac{8\pi}{5}$ 和 $\frac{9\pi}{5}$,如图 3(a)所示。

(2)权重分配。如表 3 所示,在本文示例数据 125 组参数组合中选择误差较小的前 60 种组合进行权重分配,将 10 个旋转角度划分为 5 组,对异性特征较强方向的标志点膨胀处理,对异性特征较弱方向的标志点塌缩处理,膨胀或塌缩处理方式如下:基于前 60 组中旋转角度的占比与平均值的差异计算,实现对标志点的位置偏移,每多于平均值 1 组数据,则标志点沿原方向向外偏移 σ ,每少于平均值 1 组数据,则标志点沿原方向向内偏移 σ , σ 的值可根据研究区域实际应用状况确定。

(3)搜索范围划定。按权重分配进行标志点膨胀或塌缩处理后,依次连接 A'_1 到 A'_1O ,最终形成 IDW 各向异性插值搜索范围二次优化后的结果(图 3)。优化参考点搜索范围后,参考点的选取方式同样改变,需再次判断 d_1 和 d_i 的大小确定搜索范围,后续处理方式如下:以区域 $A'_1OA'_2$ 为例,在判断数据点 M 是否可以作为参考点前,首先计算 $\angle A'_1OM$,若 $\angle A'_1OM \leq \pi/5$,则比较 OM 与 ON 的长度,若 $OM \leq ON$,则 M 被视为参考点,如图 4 所示,反之则不被选用。同理,在其他 9 个区域也要进行角度计算和距离判断来选择参考点。

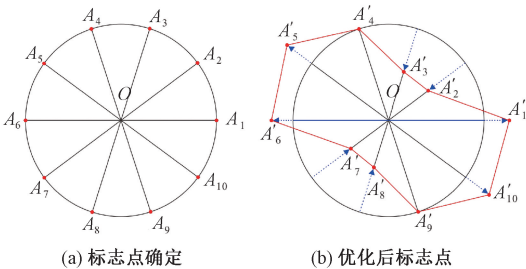


图 3 搜索范围二次优化

Figure 3 Results of secondary optimization of search scope

表 3 前 60 组旋转角度分析

Table 3 Analysis of the first 60 sets of rotation angles

序号	旋转角度	组数	与平均值差异	偏移距离 σ
1	$0, \pi$	22	+10	膨胀 10 m
2	$\frac{\pi}{5}, \frac{6\pi}{5}$	0	-12	塌缩 12 m
3	$\frac{2\pi}{5}, \frac{7\pi}{5}$	0	-12	塌缩 12 m
4	$\frac{3\pi}{5}, \frac{8\pi}{5}$	14	+2	膨胀 2 m
5	$\frac{4\pi}{5}, \frac{9\pi}{5}$	24	+12	膨胀 12 m

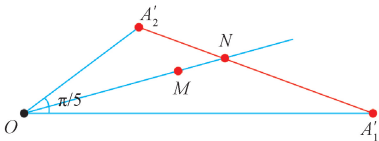


图 4 参考点选取示意图

Figure 4 Schematic diagram of reference point selection

2 三维地质建模实例

三维地质建模需要利用控制性钻孔建立标准层序体系,统一时间与岩性信息,建立空间上具有等时

意义的三维地质模型^[19]。研究区属黄河冲积平原,地势东低西高,地表多为第四纪松散覆盖层,本文参照“河南省平原第四纪地层统一划分标准”,利用部分控制钻孔的测年结果,将所有钻孔按全新统、上更新统、中更新统和下更新统 4 个时序进行标定^[21],提取出 5 个地层分界点。

以 Z0~Z2 地层为例,用 5 种传统插值方法与本文提出的插值方法进行比较,如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可以看出,本文提出的插值方法可最好地表征地质空间的各向异性特征,图 6 中的实际值和预测值插值精度近似克里金插值方法,较传统 IDW 插值算法精度提升明显;表 4 为 6 个地层界面建模交叉验证结果,对比 5 种传统插值方法,本文所示各向异性 IDW 插值方法在最好地表征地质空间的各向异性特征同时,还可实现均方根误差总体最小、大多数地层插值加密效果最好。经过对比分析,本文各向异性 IDW 插值方法总体效果最佳。

图 7 展示了利用三角网生成的各地层隐式曲面模型结果,以及通过体元填充构建的研究区域三维地质模型。

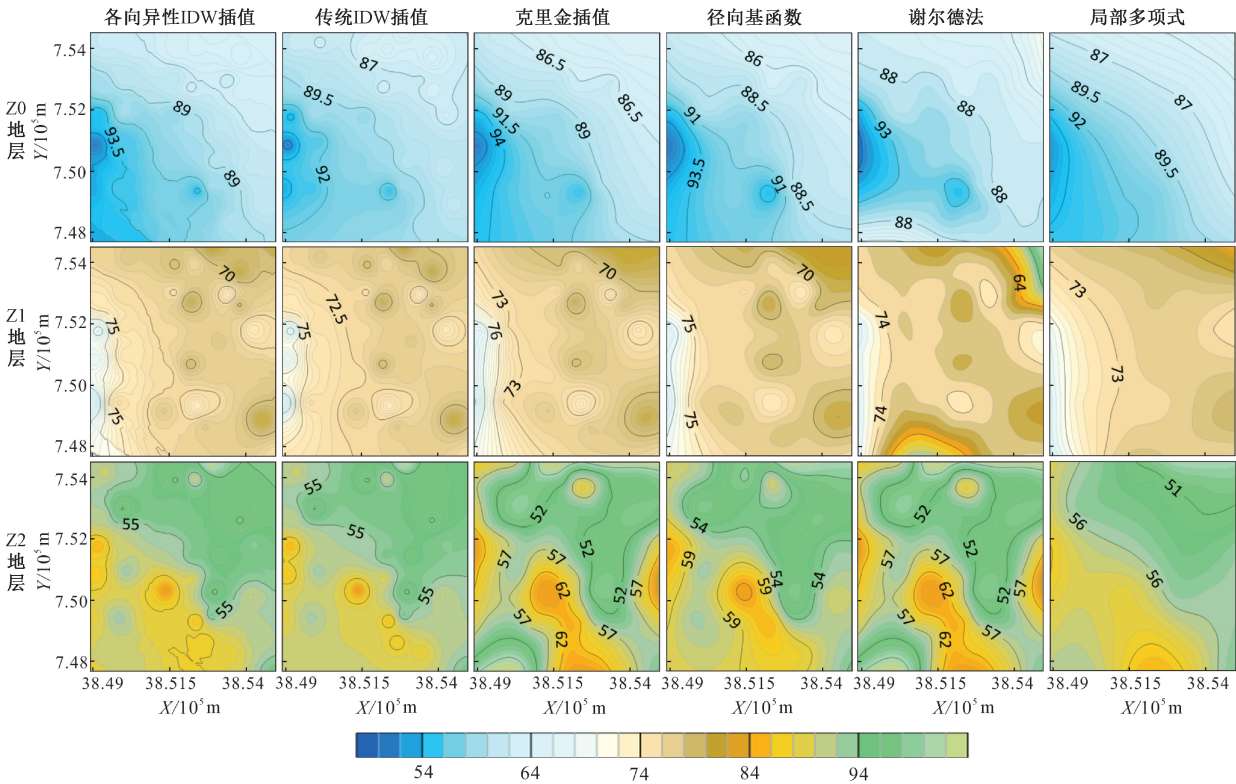


图 5 Z0~Z2 地层插值效果对比

Figure 5 Comparison of interpolation effects for Z0 to Z2 strata

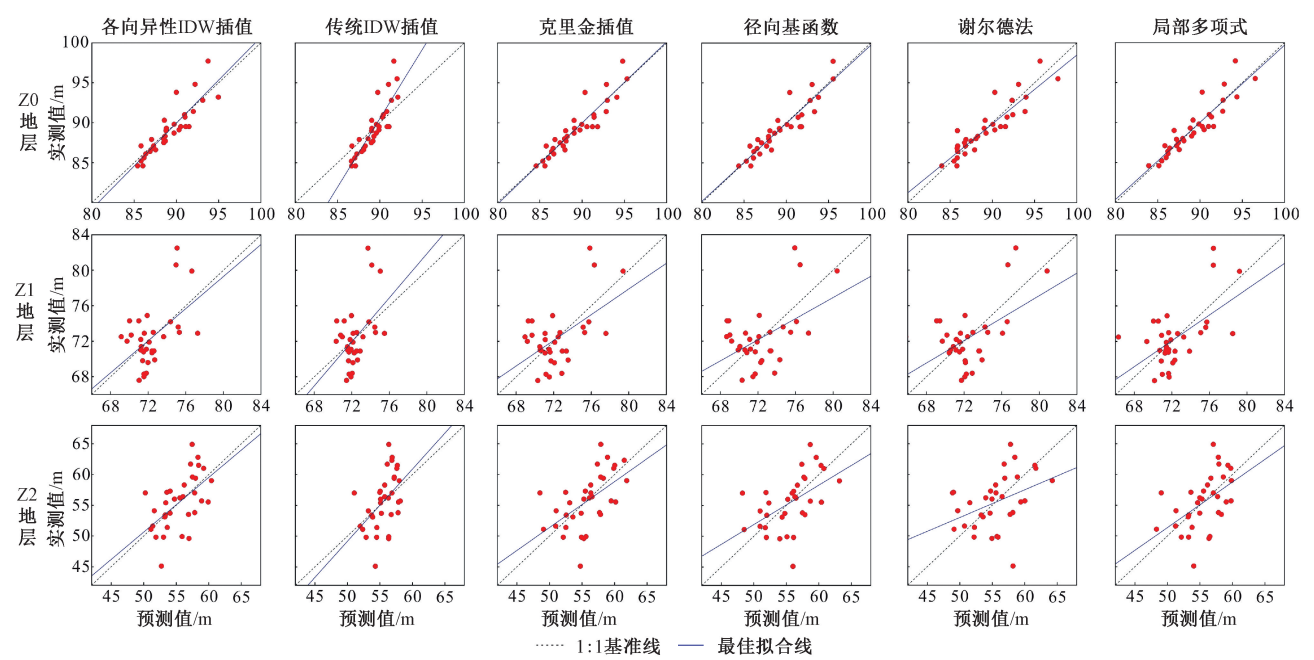


图 6 Z0~Z2 地层实际值与预测值对比

Figure 6 Comparison between actual and predicted values of Z0 to Z2 strata

表 4 交叉验证结果

Table 4 Cross validation results

地层	各向异性 IDW		传统 IDW 插值		克里金插值		径向基函数		谢尔德法		局部多项式	
	平均	均方根	平均	均方根	平均	均方根	平均	均方根	平均	均方根	平均	均方根
	误差	误差	误差	误差	误差	误差	误差	误差	误差值	误差	误差	误差
Z0	1.077 3	1.369 4	1.177 0	1.600 9	0.845 3	1.218 7	0.935 7	1.256 4	1.127 2	1.421 8	0.913 9	1.269 9
Z1	2.102 4	2.494 2	2.203 0	2.852 2	2.172 3	2.843 2	2.223 8	2.794 0	2.383 5	2.973 5	2.201 0	2.783 6
Z2	2.660 8	3.344 8	3.029 0	3.805 0	2.890 6	3.765 1	2.875 9	3.702 7	3.482 6	4.503 7	2.979 1	3.822 2
Z3	6.368 5	7.493 0	6.507 9	7.669 9	6.215 4	7.497 8	6.925 9	8.097 5	8.086 9	9.815 1	7.347 1	9.114 1
Z4	3.105 0	4.616 2	5.714 5	6.783 1	3.628 5	5.003 8	3.152 0	4.701 9	4.245 8	5.627 1	3.409 0	4.697 4
Z5	2.867 9	4.660 9	5.715 2	5.581 7	3.434 7	4.924 4	3.072 5	4.398 3	4.087 8	5.289 5	3.173 1	4.586 5

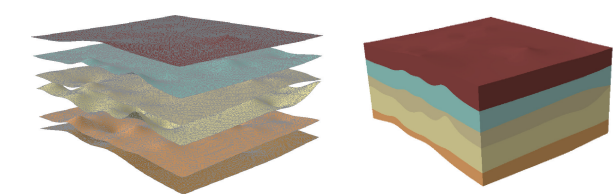


图 7 三维地层曲面和地质模型

Figure 7 Three-dimensional strata surface and geological modeling

3 结论

本文针对传统地质建模插值算法区域特征表达程度不够的问题,提出了一种顾及地质空间各向异性特征的三维地质插值算法,克服了传统插值方法各向同性的局限,有效表达城市区域地下空间结构的各向异性特征。该算法的核心是确定最优的椭圆搜索区域,依据方向标志点二次优化不同方向上的搜索权重,对模型进行最优参数设置;通过与传统插

值效果的大量对比实验,证实该算法在地质建模领域的有效性。

(1)在传统 IDW 插值的基础上,利用长半轴、短半轴、旋转角的不同组合,快速实现区域内各方向的搜索重心转移,提出了一种椭圆搜索范围参数的最优选择思路,通过交叉验证对比确定建模区域的最优搜索参数,解决了传统插值算法无法顾及地质空间各向异性特征、椭圆参数计算繁杂等问题。

(2)提出了方向标志点的概念,结合各向异性 IDW 插值的结果,进行膨胀和塌缩处理,二次优化搜索区域,赋予区域内各向异性特征较强、方向更大的搜索权重,体现地质空间属性在不同方向的变化差异,提升顾及地质空间各向异性插值算法的精度。

目前,本文提出的顾及地质空间各向异性特征的三维插值算法在地层起伏不剧烈的城市平原区域中得到很好的建模效果,但还缺乏在复杂地质构造或者地层起伏剧烈的研究区域的进一步分析验证。

接下来将充分考虑该方法在其他复杂地质条件下的适用性,提高该方法的普适性,充分反映地质空间的真实三维构造。

参考文献:

- [1] 李青元,张洛宜,曹代勇,等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767.
- LI Q Y, ZHANG L Y, CAO D Y, et al. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(4): 759-767.
- [2] 李小根,王安明. 基于 GIS 的滑坡地质灾害预警预测系统研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 114-118.
- LI X G, WANG A M. The research of the early warning system about the geological disasters based on GIS[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2015, 36(1): 114-118.
- [3] GUO J T, WANG X L, WANG J M, et al. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm[J]. *Engineering Geology*, 2021, 284: 106047.
- [4] 王金鑫,秦子龙,曹泽宁,等. 基于八叉树的修正克里金空间插值算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(6): 21-27.
- WANG J X, QIN Z L, CAO Z N, et al. Modified Kriging spatial interpolation algorithm based on octree mechanism[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2021, 42(6): 21-27.
- [5] 贾立娟. 基于钻孔数据的三维地质建模插值算法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018.
- JIA L J. Research on 3D geological modeling interpolation algorithm based on drilling data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [6] 王威,周杰,王水林,等. 基于径向基函数的三维地层分块建模方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 939-944.
- WANG W, ZHOU J, WANG S L, et al. Research on three-dimensional modeling of strata block based on radial basis function[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(3): 939-944.
- [7] 程明华. 基于 GIS 的地层产状空间插值方法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2010.
- CHENG M H. Method research of spatial interpolation for the stratum attitude based on GIS[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [8] LI Z L. An enhanced dual IDW method for high-quality geospatial interpolation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 9903.
- [9] 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.
- FENG B, CHEN M T, YUE D D, et al. Comparison of 3D geological modeling based on two different interpolation methods[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(4): 1200-1208.
- [10] CHEN F W, LIU C W. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan[J]. *Paddy and Water Environment*, 2012, 10(3): 209-222.
- [11] 张锦明,郭丽萍,张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对 DEM 插值误差的影响[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(1): 51-56.
- ZHANG J M, GUO L P, ZHANG X D. Effects of interpolation parameters in inverse distance weighted method on DEM accuracy[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(1): 51-56.
- [12] 段平,盛业华,李佳,等. 自适应的 IDW 插值方法及其在气温场中的应用[J]. 地理研究, 2014, 33(8): 1417-1426.
- DUAN P, SHENG Y H, LI J, et al. Adaptive IDW interpolation method and its application in the temperature field[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1417-1426.
- [13] ROBERTS E A, SHELEY R L, LAWRENCE R L. Using sampling and inverse distance weighted modeling for mapping invasive plants[J]. *Western North American Naturalist*, 2004, 64(3): 312-323.
- [14] LI J, DUAN P, SHENG Y H, et al. Spatial interpolation approach based on IDW with anisotropic spatial structures[C]//SPIE Proceedings International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015. Washington, D. C.: SPIE, 2015: 1-6.
- [15] 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.
- YAN J B, WU B, HE Q H. An anisotropic IDW interpolation method with multiple parameters cooperative optimization[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(5): 675-684.
- [16] 李璐,刘新根,吴蔚博. 基于钻孔数据的三维地层建模关键技术[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1056-1062.
- LI L, LIU X G, WU W B. Key technology of 3D stratum modelling based on borehole data[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1056-1062.

[17] 徐学闯,张恒兵,符绍华等. 基于钻孔伪标签半监督深度学习的沈阳市浅表地层三维建模研究[J]. 地理与地理信息科学,2023,39(6):9-17.
XU X C, ZHANG H B, FU S H, et al. Three-dimensional modeling of shallow strata in shenyang city based on pseudo-labels and semi-supervised deep learning of boreholes [J]. Geography and Geo-information Science, 2023,39(6): 9-17.

[18] 陈应军,严加永. 澳大利亚三维地质填图进展与实例[J]. 地质与勘探,2014,50(5):884-892.
CHEN Y J, YAN J Y. Progress and examples of three-dimensional geological mapping in Australia[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(5): 884-892.

[19] 梁栋. 三维地质模型不确定性分析方法研究[D]. 武汉:中国地质大学,2021.
LIANG D. Research on the methods of uncertainty analysis of three-dimensional geological model [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.

[20] 林冰仙,周良辰,闫国年. 虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建方法[J]. 地球信息科学学报,2013,15(5):672-679.
LIN B X, ZHOU L C, LYU G N. A 3D geological model construction approach based on virtual boreholes [J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(5): 672-679.

[21] 李亦纲,曲国胜,陈建强. 城市钻孔数据地下三维地质建模软件的实现[J]. 地质通报,2005,24(5):470-475.
LI Y G, QU G S, CHEN J Q. Realization of a 3D sub-surface geological modeling software in urban areas based on borehole data[J]. Regional Geology of China, 2005, 24(5): 470-475.

[22] 李健,刘沛溶,梁转信,等. 多源数据融合的规则体元分裂三维地质建模方法[J]. 岩土力学,2021,42(4):1170-1177.
LI J, LIU P R, LIANG Z X, et al. Three-dimensional geological modeling method of regular voxel splitting based on multi-source data fusion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1170-1177.

[23] LIU Z, ZHANG Z L, ZHOU C Y, et al. An adaptive inverse-distance weighting interpolation method considering spatial differentiation in 3D geological modeling[J]. Geosciences, 2021, 11(2): 51.

[24] 孙梦楠,刘少华,刘京城. 顾及空间各向异性的 IDW 插值算法[J]. 计算机工程与设计,2020,41(4):983-987.
SUN M N, LIU S H, LIU J C. IDW interpolation algorithm considering spatial anisotropy[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(4): 983-987.

[25] 李正泉,吴尧祥. 顾及方向遮蔽性的反距离权重插值法[J]. 测绘学报,2015,44(1):91-98.
LI Z Q, WU Y X. Inverse distance weighted interpolation involving position shading[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(1): 91-98.

Geological Modeling Interpolation Algorithm Considering Spatial Anisotropy of Strata

YU Junjian¹, MIN Haokun², WANG Feifei¹, LI Jian²

(1. Henan Earthquake Agency, Zhengzhou 450016, China; 2. School of Earth Science and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address the issues of insufficient precision, inadequate representation of regional characteristics, and the lack of consideration for geological spatial anisotropy in traditional geological modeling interpolation algorithms, in this study a three-dimensional geological interpolation method was proposed to take into account geological spatial anisotropy. Building upon the traditional IDW interpolation, this method involved constructing virtual boreholes, simulating the creation of an original stratum point set, and adjusting the parameters of the IDW interpolation ellipse search range to ultimately achieve an adaptive transformation of the optimal search parameters. Additionally, in this study the concept of "directional marker points" was introduced to achieve a secondary optimization of the search area through "expansion" and "collapse". Geological borehole datas from the Zhengzhou Urban Active Fault Detection Project, were used to analyze the regional adaptability of each algorithm layer by layer, implement the implicit surface representation of the three-dimensional geological model, and conduct cross-validation with commonly used interpolation algorithms. The experiment results demonstrated that the proposed method possessed good regional adaptability and could effectively represent the anisotropic characteristics of urban underground spatial structures. While ensuring interpolation accuracy, it could effectively expresse the actual extension of strata within the region.

Keywords: IDW interpolation; anisotropy; geological modeling; three-dimensional interpolation algorithm