

储层空间案例推理模型 与油气储层综合评价

陈建华 王卫红 李君文 著



科学出版社

储层空间案例推理模型与油气 储层综合评价

陈建华 王卫红 李君文 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书将计算机信息处理技术、地理信息技术、人工智能技术与油气储层综合评价相结合,系统阐述了智能化的油气储层综合评价方法,内容包括:储层空间案例推理模型、储层BP神经网络方法、地质经验法等。详细阐述了相关模型或方法的原理、技术流程、实验过程、对比分析结果等。

本书可供从事油气储层综合评价、地理信息科学、人工智能、信息技术相关的研究与工程人员参考,也可作为地理信息科学和石油地质等相关专业研究生和高年级本科生的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

储层空间案例推理模型与油气储层综合评价 / 陈建华, 王卫红, 李君文著. —北京: 科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058457-1

I. ①储… II. ①陈… ②王… ③李… III. ①储集层-案例②储集层-综合评价 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第177429号

责任编辑: 韦 沁 韩 鹏 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京东方人华科技有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年8月第一次印刷 印张: 6 3/4

字数: 136 000

定价: 89.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着计算机信息处理技术、地理信息技术、人工智能技术等快速发展，多学科、多技术交叉、融合研究与应用已成为一种新的发展趋势。储层综合评价作为油气地质学的重要研究内容，如何通过多学科、多技术融合研究，突破传统储层综合评价思路，建立简单、快速、有效、智能化的储层综合评价方法，从而降低储层评价成本，提高储层评价的效率和精度，显得极具科学意义和应用价值。

本书是作者在国家自然科学基金项目（面向油气储层综合评价的空间案例推理模型与方法，编号：41101366）的资助下系统开展储层空间案例推理模型与方法的研究成果。其中，提出了一种面向油气储层综合评价的空间案例推理模型（已荣获国家发明专利，专利号：ZL201510098626.5），开发了储层综合评价系统，开展了实验，与BP神经网络方法和传统储层综合评价方法中的地质经验法进行了对比。

本书共分7章，第1章为绪论，包括本书研究的目的及意义、国内外相关研究现状、本书的主要研究内容等；第2章是研究区数据采集与处理的相关简述，包括研究区选择依据、钻井数据采集与矢量化、评价参数空间插值、栅格化与矢量化等；第3章详细阐述了储层空间案例推理模型的原理、技术流程与实验过程；第4章详细阐述了BP人工神经网络的原理、储层评价技术流程与实验过程；第5章对储层空间案例推理模型与BP神经网络方法实验的结果进行了分析；第6章阐述了储层空间案例推理模型、BP神经网络方法、地质经验法三者的对比验证与分析，以及对研究区的储层评价成图；第7章对全书研究工作做了总结。附录概述了储层综合评价系统的设计思路 and 实现要点。

随书提供有储层综合评价系统完整的源代码、可执行程序、实验数据等，可供读者学习和研究使用。

感谢成都理工大学沉积地质研究院张锦泉教授、林小兵博士，成都理工大学能源学院张银德博士在本书研究工作开展期间给予的热心指导和帮助。

水平所限，书中疏漏之处敬请批评、指正（E-mail: chjh3@163.com）。

著 者

2018年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 主要研究内容	6
第 2 章 数据采集与处理	8
2.1 研究区选择依据	8
2.2 钻井数据的采集与矢量化	9
2.3 储层评价参数空间插值	9
2.4 储层评价参数数据栅格化与矢量化	36
第 3 章 储层空间案例推理模型与储层评价	39
3.1 传统案例推理模型	39
3.1.1 传统案例表达模型	40
3.1.2 传统案例存储组织	40
3.1.3 传统案例检索模型	41
3.2 储层空间案例推理模型	42
3.2.1 储层案例空间特征与属性特征一体化表达模型	42
3.2.2 储层案例空间相似性与属性相似性联合测度推理模型	44
3.2.3 储层案例空间特征与属性特征权重确立方法	49
3.3 模型评价指标	51
3.4 储层评价实验	52
3.4.1 储层案例的构建	52
3.4.2 储层案例的存储组织	54
3.4.3 储层空间案例推理系统的实现	54
3.4.4 储层案例空间特征与属性特征权重确立	54

3.4.5 储层空间案例推理实验结果	57
第 4 章 储层 BP 人工神经网络评价	60
4.1 人工神经网络简介	60
4.2 BP 人工神经网络原理	61
4.3 储层 BP 人工神经网络评价实验	63
4.3.1 储层训练数据与验证数据的构建	63
4.3.2 储层训练数据与验证数据的存储组织	63
4.3.3 储层 BP 人工神经网络评价系统的实现	63
4.3.4 储层 BP 人工神经网络评价实验结果	64
第 5 章 储层空间案例推理与 BP 人工神经网络的对比	76
5.1 储层空间案例推理实验结果的分析	76
5.2 储层 BP 人工神经网络评价实验结果的分析	77
5.3 储层空间案例推理与 BP 人工神经网络的对比	78
第 6 章 储层空间案例推理、BP 人工神经网络、地质经验法对比验证 与分析	80
6.1 验证数据的获取与实验的实施	80
6.2 验证结果对比与分析	86
6.3 三种方法储层综合评价成图	88
第 7 章 结语：再话定性与定量	90
参考文献	92
附录 储层综合评价系统设计与实现	97
A.1 系统需求规定	97
A.2 系统开发与运行环境	97
A.3 系统结构	97
A.4 系统设计要点	98
A.5 系统主要功能模块的实现	98
A.6 系统源代码开源说明	101

第1章 绪 论

1.1 研究目的及意义

石油、天然气是国民经济的命脉，对于一个国家经济的发展、综合国力的提高具有举足轻重的重要影响。随着社会的发展，人们对石油、天然气的需求越来越大，与此同时石油、天然气资源却越来越紧缺，为确保石油、天然气的长期供给，一方面需要对老油田进一步挖潜，另一方面需要积极寻找新的勘探领域；而油气储层综合评价是查明油气资源分布规律的关键途径。储层是油气聚集的场所，是油气资源评价研究的重要内容，是油气勘探的主要研究对象。对于储层的储集性能的评价，主要是对区域储集物性的好坏进行评价，从而划分评价等级。在进行开发部署或调整之前清楚地认识储层是十分必要的。

传统的油气储层综合评价主要建立在油气地质工作者独立评价的基础上，领域工作者利用本行业获得的信息并使用各种统计方法，依靠研究人员的经验和理解，把不同类型的图件叠合起来进行研究。该类方法评价效果的好坏较多的依赖领域研究人员的经验和知识水平。

随着油气田勘探、开发的推进，传统的油气储层综合评价方法在某种程度上已不能适应其迅速发展的需要，迫切需要新技术和新方法来提高其评价的准确性和科学性。地理信息系统（Geographical Information Systems, GIS）的出现为油气储层综合评价提供了新的技术手段。GIS之所以能够用来进行油气储层综合评价是由油气地质信息的特点和GIS在处理空间信息方面的特长所决定的。GIS可以将储层评价需要的各种地质或非地质因素的多学科信息输入计算机，形成一体化的地质空间数据库，节省大量重复的工作，并使各类不同的信息互相配合应用，使大量累积的与储层相关的图形信息和属性信息得以充分的利用，有助于石油信息的共享。与传统方法相比，其优点不仅在于能够整合各种地学空间数据和其他相关属性信息，更重要的是利用GIS

的空间分析模型与储层评价模型集成解决油气储层评价问题,实现储层评价模型的科学性和完备性,拓宽了储层评价的深度和广度,增强了结果的可信度。同时,通过 GIS 与储层评价模块的集成,不仅扩展了 GIS 的空间分析功能,而且集油气储层评价的数据输入、管理、处理、分析及可视化表达于一体,实现了储层 GIS 由数据支持向信息支持和决策支持的发展,使油田的管理决策者从经验性决策转为智能化决策(施冬等,2004;刘学锋,2004)。

目前,结合 GIS 的油气储层综合评价方法主要有:GIS 辅助下的传统油气储层综合评价方法和 GIS 与储层评价数学模型集成的评价方法。前者将领域专家手工方式处理、生成的沉积相分布图、有效厚度等值线图、孔隙度等值线图、渗透率等值线图、产能等值线图经二次加工(矢量化、配准等)存入空间数据库,然后由领域专家在 GIS 软件中基于领域知识和经验并通过各单参数间的叠加综合分析绘制出储层综合评价图。该方法以通用 GIS 软件平台为基础,其专业化和智能化水平还不高。GIS 与储层评价数学模型集成的评价方法构建于模糊数学(郭少斌等,1994;邓万友,2008; Taheri, 2008; Schrader *et al.*, 2009; Zoveidavianpoor *et al.*, 2013)、灰色聚类(王瑞飞等,2003;宋子齐等,2007; Gonzalez *et al.*, 2008)、神经网络(刘世翔,2008; Ahmadi *et al.*, 2008; 郗瑞卿等,2009; Elshafei and Hamada, 2009; Wang *et al.*, 2013)、灰色多元关联分析(施冬等,2004, 2009; Naseri *et al.*, 2014)、粗糙集(Liu *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2008)、支持向量机(Ahmadi, 2015)、地统计(Tamaki *et al.*, 2016)等数学方法的基础之上,将储层评价数学模型与 GIS 集成,在 GIS 环境中将各种储层评价参数数据进行叠加分析,并以参数的属性值为输入项,采用所选储层评价数学模型进行油气储层综合评价,并最终生成储层综合评价分类图。该方法的核心是储层评价数学模型。由于 GIS 与储层评价数学模型集成的评价方法不仅扩展了 GIS 的空间分析功能,而且集油气储层评价的数据输入、管理、处理、分析及可视化表达于一体,并且具有提高储层评价效率,增加评价结果的定量化,增强分析结果的表现力等特点,在油气储层综合评价中已得到逐步推广和应用。

然而,从领域研究情况及当前能够获取的文献看,基于 GIS 的储层评价数学模型方法通常是在对储层评价参数进行图层叠加分析的基础上,采用储层评价参数的属性值进行储层综合评价。在储层综合评价数学模型计算时较少考虑评价参数之间及内部的空间关系。加之油气储层影响参数众多,其储集性能与各参数之间的关系往往是复杂的、非线性的,同时各参数之间也存

在或强或弱的相关性；另外，从地质学分析得到的数据往往具有不精确性和随机性，故而储层评价精确数学模型的建立具有一定的挑战性。

鉴于储层地质现象的复杂性、模糊性、不确定性和非线性特征，有必要尝试研究新的油气储层综合评价模型与方法。

案例推理 (Case-Based Reasoning, CBR; Schank and Abelson, 1977; Watson and Marir, 1994; Holt and Benwell, 1999) 是人工智能的一个分支, 其研究始于 Schank 及其他研究者在 20 世纪 80 年代的工作, 目前已广泛应用于分类、预测、控制、监测、规划、设计、诊断、在线技术支持等方面, 涉及工业制造、企业管理、交通运输、金融、司法、医学、地学、环境、气象等领域。当前, 案例推理在国际上已得到广泛的研究与应用, 国际案例推理大会至 2017 年 6 月已召开 25 届 (大会常设网站: www.iccbr.org) ; 研究者与研究工作尤以欧洲和美国最具代表性。案例推理基本思想可简述为: 针对新问题 (待求解案例), 在历史案例库中搜索与之匹配的相似案例, 并重用相似案例, 将其结果赋予新问题 (待求案例得解); 如果待求案例获取的结果值不合理, 依据领域知识对其进行修订, 从而使该待求案例最终得解。进一步, 将直接得解或修订得解的典型案例加入案例库中, 以扩充案例库。案例推理无需精确领域模型, 而通过历史案例知识, 来推求新案例问题的解; 其应用基于两个基本的假设: 一是客观世界是有规律的, 相似的问题具有相似的解, 二是相似的问题有可能再次发生。案例推理基于相似性原理寻找新问题的解决策略, 提供了一种与人类解决问题很相似的方法, 便于抽取和存储专家知识。从方法论的角度看, 它提出了一种面向问题的综合分析方法, 具有比基于规则的推理和基于模型的推理有更广泛的适应性, 对于模糊性、不确定性问题的求解具有显著的优势; 被认为特别适合于那些专业知识难以被概括、抽象和表达的领域。案例推理无须细究机理即可实现定量分析和预测, 并且, 它具有简化知识获取、提高求解效率、改善求解质量、增进知识积累等优点 (吴泉源和刘江宁, 1995)。另外, 案例的推理和识别过程自动化程度较高, 可重用性强, 在先验知识较为缺乏, 或者构建定量模型难度较大的复杂问题中, 案例推理是一种比较有效的方法 (钱峻屏等, 2007)。

在实际生产实践中有经验的领域专家在进行储层综合评价时往往根据以往类似问题评价的经验和结果来求解当前所面临的问题。可见, 案例推理应用于油气储层综合评价具有较好的理论基础一致性。由于储层地质现象的复杂性、模糊性、不确定性和非线性特征, 使得案例推理具有比基于规则的推

理和基于模型的数学方法拥有更广泛的适应性和潜在优势，案例推理无须细究机理即可能实施储层定量分析和预测。

然而，并不能直接将传统案例推理方法直接应用于油气储层综合评价。因为，与传统案例推理只针对属性特征进行描述与推理不同，储层案例是描述发生在特定空间的储层地质现象，由于储层地质体的空间特征与分布规律，导致储层案例具有显性或隐性呈现出一定的空间分布模式。而且，储层案例自身的空间形态和属性特征随不同的研究尺度和层次而变化；同时，储层案例之间还存在着一定的空间制约或空间依赖关系。因此，进行储层案例推理必须考虑特定的空间特征；而且，储层案例推理涉及空间相似性计算与属性相似性计算；而空间相似性计算是储层案例推理的关键。

因此，本书将开展面向油气储层综合评价的空间案例推理模型研究，欲意为油气储层综合评价提供新的方法支持。

1.2 国内外研究现状

自 20 世纪 90 年代起，即有学者开始开展案例推理在气象、制图、规划、环境、土地利用、矿产资源预测、油气地质与工程等领域的研究与应用。

Jones 和 Roydhouse (1993) 应用案例推理研究气象卫星图像，进行天气模式的预报；Liu 等 (2009) 采用案例推理方法对热带气旋强度进行了预测研究；Bajo 等 (2010) 采用案例推理研究海洋环境中大气与洋面二氧化碳交换的问题，并通过案例推理监测影响交互的因素；Lee 等 (2014) 采用案例推理和地统计方法对日均太阳辐射强度制图开展了研究。

Keller (1994) 利用案例推理作为一种知识获取手段辅助制图综合；Shi 等 (2004) 采用案例推理方法进行土壤制图，开发了软件系统并对威斯康辛西南地区进行了制图实验，结果较规则方法更优。

叶嘉安和施迅 (2001) 开展了案例推理与 GIS 相集成的技术在规划申请审批中的应用研究，该研究主要基于属性信息进行规划案例的推理，空间查询基于 GIS 的传统空间位置、坐标查询方式实现。

杜云艳等 (2002a, 2002b, 2003, 2005) 在地学案例推理研究中，针对不同的地理现象或事件采用不同的案例表达模型、不同的案例相似性检索模型 (算法)。在相似性检索模型中，一般采用时空或空间抽取一属性相似性再抽取一新案例解获取等模式。其相关的应用涉及：东海中心渔场预报、海

洋涡旋特征信息空间相似性推理、地理实体固定模式案例推理等。Florentino 和 Corchado (2003) 利用案例推理进行赤潮预测, 开发了相关系统并对伊比利亚半岛西北海岸进行了预测实验。Mata 和 Corchado (2009)、Baruque 等 (2010) 利用案例推理模型预测海面原油泄漏后的扩散趋势, 并对西班牙加利西亚西北海滨进行了预测。Mota 等 (2009) 利用案例推理方法分析地理空间实体的形态和特征演化, 并以巴西亚马孙热带雨林作为研究实例。Kaur 和 Kundra (2015) 利用案例推理和蚁群优化方法对地下水资源开展了评估研究。Chazara 等 (2016) 对案例推理的案例表达和相似性检索方法进行了研究并试用于污染物处理中。

黎夏等 (2004) 开展了案例推理方法对雷达图像进行土地利用分类的研究, 该研究以像元的稳定光谱信息和纹理信息等作为案例库中案例的特征属性, 并采用 K 最近邻算法进行相似性推理, 分类精度与监督分类和非监督分类相比更优。钱峻屏等 (2007) 开展了时间序列案例推理检测土地利用短期快速变化的研究, 该研究以像元的稳定光谱信息和纹理信息等为案例的特征属性, 并在特征属性中加上了时间维, 以反映土地利用 / 土地覆盖案例的特征属性在时间域中的动态变化, 并采用 K 最近邻算法进行相似性推理, 其检测精度优于基于规则的变化检测方法。杜云艳等 (2009a, 2009b)、温伟等 (2009) 在基于案例推理的土地利用变化预测研究中, 地学案例的表达还选取了地块的周长、面积、距城镇的距离、距其他建筑用地的距离、地块邻接主要土地类型等表达空间关系的特征; 通过相似性检索模型推理, 其实验预测精度达到 80% 以上。Liu 等 (2014) 在城市扩张研究中将案例推理应用于元胞自动机转换规则, 获得了很好的效果。

窦杰等 (2010) 将案例推理方法应用于岩溶地面塌陷检测中, 以多尺度分割后的影像对象为基本单元, 提取其特征属性, 经案例推理快速实现对岩溶塌陷的自动识别与分类; 该方法较传统监督分类方法检测精度更高。吕威和倪玉华 (2010) 开展了案例推理确立最佳旅游线路的研究, 通过将等距加密变换获取的数据集执行案例推理从而进行旅游线路的聚类分析, 最终推荐合适的旅游线路。

Chen 等 (2010)、陈建华等 (2012)、何彬彬等 (2014) 开展了区域成矿潜力预测案例推理研究, 初步确立了成矿案例空间与属性特征一体化表达模型、成矿因子案例推理权重确定方法、成矿案例相似性测度推理模型, 开发了成矿案例推理程序, 对青海东昆仑地区进行了成矿案例推理实验, 生成

了铜铅锌矿、铁矿、金矿所属各种成因类型案例推理成矿潜力预测图十七张。

Bhushan 和 Hopkinson (2002) 开展了 Web 环境下基于案例推理的储集体类比识别与信息共享的研究。通过将过去研究确定的储集体依据其属性特征建模为一个个历史储集体案例, 当面对新的未知储集体对象时进行一般案例相似性测度, 并给出相似类别。其目的在于团体协同工作时, 及时、方便的确定未知储集体类别, 以便进行其他处理, 而非用于储层综合评价, 是案例推理在石油机构协同工作的应用。徐英卓 (2005) 提出了案例表达采用储层评价参数的属性特征, 案例相似性检索采用传统案例推理检索模型的储层评价构想。Shokouhi 等 (2010, 2014) 针对油井钻探过程的复杂性, 研究了如何将案例推理应用于此问题, 并提出了案例推理针对此问题的案例获取的一种半自动化方法。

总体而言, 目前案例推理在地学方面的研究与应用还存在一定的问题, 缺乏空间推理, 而主要依据属性特征进行推理预测。部分研究人员虽然针对具体研究对象开展了空间推理研究, 但是关键的推理过程主要还是将空间特征属性化后进行的相似性推理, 缺乏有效的空间相似性推理。整体上地学空间案例推理在理论和技术方法体系及应用方面还远远没有成熟。

1.3 主要研究内容

本书将求解模糊性、不确定性问题的案例推理思想引入储层综合评价中, 结合 GIS 技术, 针对储层地质问题的空间特征和复杂性, 系统研究储层案例空间特征与属性特征一体化表达模型、储层案例空间相似性与属性相似性联合测度推理模型, 储层案例空间特征与属性特征权重的确立方法, 从而建立一种面向油气储层综合评价的空间案例推理模型, 尝试为油气储层综合评价提供一种新的方法支持。具体研究内容如下。

(1) 储层案例空间特征与属性特征一体化表达模型。由于储层地质问题内含空间特征, 使得储层案例表达模型仅仅基于一般储层评价基础参数的属性特征是不够的, 储层评价基础参数中的空间关系特征必须予以充分考虑, 以反映其空间特征。提出储层评价基础参数中空间关系特征的提取方法, 在此基础上给出储层案例空间特征与属性特征一体化表达模型。

(2) 储层案例空间相似性与属性相似性联合测度推理模型。储层案例具有空间特征和属性特征, 案例间的相似性测度不能也无法采用传统案例推理

模型。提出针对储层案例空间特征的空间相似性推理方法，提出针对储层案例属性特征的属性相似性推理方法，在此基础上提出储层案例空间相似性与属性相似性联合测度推理模型。

(3) 储层案例空间特征与属性特征权重确立方法。储层案例推理时，储层案例空间特征与属性特征权重的不同设置将明显影响推理结果，客观、有效的储层案例空间特征与属性特征权重值对于储层案例推理结果的有效性非常重要。针对储层案例，给出其空间特征、属性特征权重确立的有效方法。

储层空间案例推理模型确立后，需要设计、开发储层综合评价空间案例推理系统，以用于研究区（实验区）储层综合评价案例推理实验、效果评价。为了与已有数学模型方法和传统油气储层综合评价方法进行效果对比，还需分别选择一种数学模型方法和一种传统油气储层综合评价方法开展对比实验，以便评价储层空间案例推理模型的有效性和合理性。

第2章 数据采集与处理

2.1 研究区选择依据

研究区位于鄂尔多斯盆地苏里格气田东区，面积4873km²（图2.1），研究层位为二叠系下石盒子组8段。由于苏里格气田是中国规模很大的气田，本书研究区域与其毗邻且拥有相似的成藏地质条件，尤其是下石盒子组8段成藏地质条件非常相似，而且该地区目前是油气勘探的重点区域，因此选择它作为研究区域。

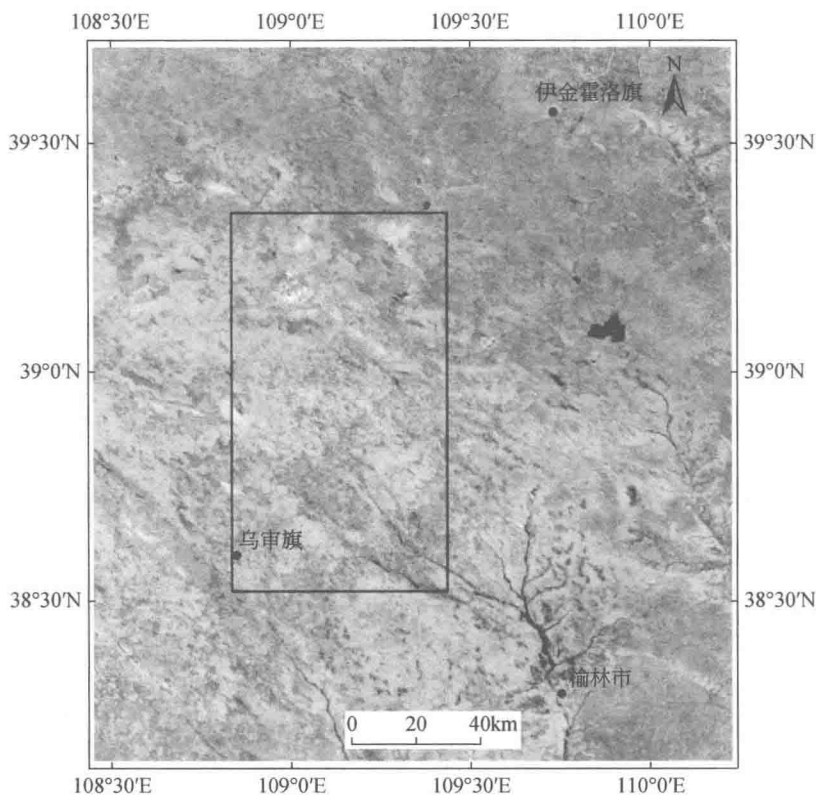


图 2.1 研究区域所在位置（图中矩形框所示）

2.2 钻井数据的采集与矢量化

储层评价基础参数通常有数十项之多,包括地质与地球物理参数(Sneider *et al.*, 1991; 裘亦楠和薛叔浩, 1997; Brown, 2011; 陈欢庆等, 2015),其中有些是原始数据(如砂体厚度),有些是领域专家深加工后的衍生数据(如沉积相),研究时选择了砂体厚度、地层厚度、砂地比、孔隙度、渗透率、储层埋深 6 个储层评价基础参数数据,原因在于这 6 个参数是原始数据,且易于获取。

从油田收集了研究区域针对二叠系下石盒子组 8 段的 524 口天然气钻井数据,其中,全部钻井拥有:砂体厚度、地层厚度、砂地比、储层埋深数据,336 口拥有孔隙度数据,333 口拥有渗透率数据,321 口钻井由领域专家确定了储层类别。

在收集的钻井数据中,每一口井数据都含有采用高斯-克吕格投影的平面坐标,通过投影转换工具将其转换为经纬度地理坐标。在 ArcMap 软件中,对转换了坐标的全部 524 口井数据依据坐标生成点矢量图层,每一点要素属性数据则包含了砂体厚度、地层厚度、砂地比等 6 个基础参数。为了与传统储层综合评价方法生成的图件保持统一,将钻井点矢量图层坐标系转换为兰勃特投影坐标系(其他矢量、栅格图层皆设为此投影坐标系)。钻井数据矢量化后,为便于后续数据处理和储层评价研究,生成研究区范围矢量图层(表现为一矩形框),并以此为基础生成矢量格网图层,格网大小为 80m × 80m,在如此大小的格网内,砂体厚度等每一基础参数数据可近似视为相等,共计有 761425 个格网单元。

2.3 储层评价参数空间插值

由于钻井点矢量图层是离散分布的,为了使研究区矩形范围内每一处都具有砂体厚度、地层厚度、砂地比、孔隙度、渗透率、储层埋深 6 个储层评价基础参数数据值,需要利用钻井点矢量数据采用空间插值方法生成研究区面状分布的这 6 个评价参数数据值。

空间插值是一种将区域上呈离散分布的数据值面状化(连续化)的方法,

一般包括确定性插值方法和地统计（估计）插值方法。确定性插值包括：反距离加权插值法（Inverse Distance Weighting, IDW）、自然近邻法（Natural neighbor）、最近邻法（Nearest-neighbor）等，地统计插值主要指克里金插值法（Kriging and Cressie, 1993；刘爱利等, 2012）。

空间插值的核心思想是：待插值点 j 的 z 值是邻近采样点 z 值加权和平均值。统一公式为

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i z_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2.1)$$

式中， z_i 是邻近采样点 i 的 z 值； λ_i 是对应点 z 值的权值； n 是邻近采样点的总数； z_j 是待插值点 j 插值后的结果。

不同的插值方法，区别是权值的确定方法不同。

克里金插值法，又称空间局部估计或空间局部插值，它建立在变异函数理论及结构分析的基础之上，是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点，对未采样点的区域化变量的取值进行线性、无偏、最优估计的一种方法。

克里金插值法涉及地统计学的 3 个要素：区域化变量、协方差、变异函数。区域化变量是指当一个变量呈空间分布时，称之为区域化变量，这种变量反映了空间某种属性的分布特征。区域化变量具有两个重要的特征：一是区域化变量是一个随机函数，它具有局部的、随机的、异常的特征；其次是区域化变量具有一般的或平均的结构性质，即 A 点和与其相距 h 的 B 点处的属性变量具有某种程度的空间自相关。协方差又称半方差，是用来描述区域化变量之间差异的参数。而变异函数能同时描述区域化变量的随机性和结构性（即空间自相关性），从而在数学上对区域化变量进行严格分析，是空间变异规律分析和空间结构分析的有效工具。变异函数是在协方差或半方差云图的基础上结合球状、线性、高斯等拟合模型确立起来的。

克里金插值法可分为：普通克里金法（Ordinary Kriging）、泛克里金法（Universal Kriging）、指示克里金法（Indicator Kriging）、析取克里金法（Disjunctive Kriging）、协同克里金法（Cokriging）等。普通克里金法要求区域化变量满足二阶平稳假设或本征假设，但实际应用中这一假设往往无法满足，即区域化变量存在空间漂移或趋势，从而限制了普通克里金法的应用，而泛克里金法的引入解决了这个问题。