

内蒙古黄旗海盆地三维地质建模与地下水数值模拟：水资源精准评估与可持续管理

一、引言

1.1 研究背景与意义

黄旗海盆地位于内蒙古自治区，是一个独具特色的内陆断陷盆地。它不仅是众多河流的汇聚之地，也是区域内重要的水资源储存与调节区域。其特殊的地理位置与地质构造，使其在生态系统中扮演着极为重要的角色，为周边地区提供了关键的生态服务功能。黄旗海作为盆地内的重要水体，不仅是维系当地生态平衡的关键因素，更是众多野生动植物的栖息地，对维护生物多样性意义重大。

从经济发展角度来看，黄旗海盆地周边地区的农业、工业和居民生活用水，在很大程度上依赖于地下水。稳定且充足的地下水资源，是保障当地农业灌溉、工业生产顺利进行以及居民生活用水需求的基础。近年来，随着区域经济的快速发展和人口的持续增长，对水资源的需求也在不断攀升。大规模的农业灌溉、工业用水以及居民生活用水，导致地下水的开采量日益增大。不合理的水资源开发利用方式，如过度开采地下水、缺乏有效的水资源保护措施等，使得黄旗海盆地的地下水资源面临着严峻的挑战。地下水位持续下降，部分地区甚至出现了地面沉降、地裂缝等地质灾害，给当地的生态环境和经济发展带来了严重的负面影响。

在此背景下，开展内蒙古黄旗海盆地三维地质建模及地下水数值模拟研究具有重要的现实意义。通过构建高精度的三维地质模型，可以直观、准确地展现黄旗海盆地的地质结构特征，包括地层分布、岩性变化、断层构造等。这有助于深入了解地下水的赋存条件和运移规律，为地下水数值模拟提供坚实的地质基础。利用先进的地下水数值模拟技术，可以对不同开采方案下的地下水水位、水量变化进行预测和分析。通过模拟结果，能够评估各种水资源开发利用方案对地下水资源的影响，从而为制定科学合理的水资源管理策略提供依据。通过科学合理的水资源管理策略，可以实现地下水资源的可持续开发利用，保障区域经济的可持续发展，同时保护当地的生态环境，维护生态平衡。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 三维地质建模研究进展

三维地质建模技术的发展历程丰富而曲折。20 世纪 70 年代，其雏形初现，主要依赖物探数据进行三维可视化展示。随着计算机图形学的逐步进步，1993 年，加拿大科学家 Simon W. Houlding 正式提出三维地质建模的概念，推动了其在地质勘探领域的初步应用。在早期探索阶段（1970-1990 年代），技术主要以不规则三角网（TIN）和规则格网（Grid）为主，这些方法主要用于地表形态建模。但由于当时数据量有限，建模精度较低，难以满足复杂地质体的建模需求。

到了 2000 - 2010 年代，随着 BIM 技术的兴起，三维地质建模与工程需求紧密结合。国内学者熊祖强在 2007 年提出基于地质规律的三维建模理论，强调模型需符合地层连续性和断层切割等地质特征，为三维地质建模的发展提供了重要的理论支持。同时，克里金插值算法（Kriging）和离散光滑插值（DSI）被引入地质建模，显著提升了对复杂地质体的模拟能力。这些技术的应用，使得地质建模能够更准确地反映地质体的真实形态和内部结构。

近年来，人工智能、云计算和大数据技术的融合，将三维地质建模推向了智能化和高精度阶段（2020 年代至今）。例如，朗境创新公司开发的基于 G - BIM（地质 - 建筑信息模型）的边坡设计软件，实现了地质模型与工程设计的动态交互，大大提高了工程设计的效率和准确性。深度学习算法也被用于优化插值过程，显著提升了模型预测的准确性，使得地质建模能够更好地应对复杂多变的地质条件。

在三维地质建模方法方面，常见的有基于钻孔数据的建模方法、基于剖面数据的建模方法和多源数据融合建模方法。基于钻孔数据的建模方法自动化程度高，适用于大规模钻孔的快速建模。通过对标准化的 **Excel**

格式钻孔数据进行入库，形成标准化钻孔数据，再利用钻孔坐标及分层数据建立地层面及地质体的三维地质模型。但这种方法交互程度低，一般只适用于地质条件简单且具备一定工作程度的区域，对于断层或倒转褶皱等复杂地质现象的处理能力有限。基于剖面数据的建模方法通过剖面空间要素之间的拓扑关系来生成三维地质模型，在用户交互和干预下，能够建立大多数复杂地质模型。该方法主要包括剖面数据准备、地质界面建模、建模区边界面建模、地质界面修正及光滑、封闭成体五个步骤。然而，交叉剖面建模前期数据准备要求较高，对建模人员的地质知识水平要求也较高，建模精度取决于剖面精度、剖面数据量和建模人员知识水平，且建模速率相对较低，后期模型更新难度大，基本等同于模型重建。多源数据融合建模方法则利用多种地质数据，包括钻孔数据、剖面数据、平面地质图、物化探异常等值线等，基于人机交互式模式建立三维地质模型。不同地质体采用不同建模方法，最后进行多模型融合，实现多源交互复杂地质体建模。首先从地质图、剖面图中提取断裂数据，生成的断层面控制着地层界线的伸展位置及范围，然后将复杂褶皱、透镜体、岩体等轮廓线插值进行填充，从而形成合理的复杂地质体模型。

在黄旗海盆地的研究中，虽然三维地质建模技术已有一定应用，但仍存在不足。由于黄旗海盆地地质条件复杂，现有的建模方法在处理复杂地质构造和地层变化时，难以准确反映其真实地质特征。对多源数据的融合和利用还不够充分，导致模型的精度和可靠性有待提高。目前的研究主要集中在地质结构的建模，对于地下水与地质结构的相互作用在三维地质模型中的体现还不够深入。因此，针对黄旗海盆地的特点，进一步改进和完善三维地质建模方法，提高模型精度和可靠性，深入研究地下水与地质结构的相互作用，是未来研究的重要方向。

1.2.2 地下水数值模拟研究进展

地下水数值模拟技术在过去几十年中取得了显著的发展，在多个领域都有广泛的应用。其研究方法主要包括有限元法、边界元法、有限差分法等。有限元法将地下水流动问题离散化为一系列微分方程，然后利用计算机求解，这种方法适用于复杂地质条件的地下水模拟，能够较好地处理不规则边界和复杂的地质结构。边界元法对研究区域的边界进行离散化处理，从而减少了计算量，在处理一些边界条件较为简单的问题时具有优势。有限差分法是一种较为常用的方法，它以地下水流基本微分方程及其定解条件为基础，在渗流区剖分基础上，用差商代替微商，将地下水流微分方程的求解转化为差分方程（代数方程）求解，适用于二维矩形网格剖分、三维长方体网格剖分。

在油气勘探方面，地下水数值模拟可以用来预测油气藏的分布和储量。通过对地下水流场和压力场的模拟，分析油气的运移路径和聚集规律，为油气勘探提供重要的参考依据。在环境监测方面，地下水数值模拟可以帮助评估和预测地下水污染的发展趋势。通过建立地下水溶质运移模型，模拟污染物在地下水中的扩散、迁移和转化过程，为制定有效的污染防治措施提供科学依据。在灾害评估方面，地下水数值模拟可以预测地质灾害的发生概率和影响范围。例如，通过模拟地下水位的变化对土体稳定性的影响，预测地面沉降、滑坡等地质灾害的发生风险。

近年来，随着大数据和人工智能等新技术的不断发展，地下水数值模拟也逐步融合这些新技术，使得模拟的精度和效率得到进一步提升。利用深度学习算法对地下水数值模拟进行优化，可以提高模拟结果的准确性。通过对大量历史数据的学习，深度学习模型能够捕捉到地下水系统中的复杂非线性关系，从而更准确地预测地下水水位、水量和水质的变化。通过数据挖掘技术，可以对大量的地下水数据进行分析 and 处理，从而更好地为数值模拟提供数据支持。数据挖掘技术可以从海量的数据中提取出有价值的信息，如地下水的补给、排泄规律，含水层的参数分布等，这些信息对于建立准确的数值模型至关重要。

尽管地下水数值模拟技术取得了很大的进展，但在黄旗海盆地的研究中仍面临一些挑战。黄旗海盆地的地质条件复杂，地下水系统受多种因素的影响，如地形地貌、地质构造、气象条件等，准确获取这些因素的数据并将其纳入数值模型中存在一定的困难。地下水数值模拟中的参数不确定性问题较为突出，含水层的渗透系数、储水系数等参数难以准确测定，不同的参数取值会对模拟结果产生较大的影响。在模拟地表水与地下水的相互作用时，由于两者之间的水量交换和水质影响较为复杂，目前的模型还难以准确描述这种相互作用。

针对黄旗海盆地的研究，未来需要进一步加强对地下水系统的监测，获取更丰富、准确的数据，以提高数值模拟的精度。要深入研究参数不确定性对模拟结果的影响，采用更有效的方法进行参数估计和不确定性分析。还需要不断完善数值模型，提高其对复杂水文地质过程的模拟能力，特别是加强对地表水与地下水相互作用的模拟研究，为黄旗海盆地地下水资源的合理开发和保护提供更可靠的技术支持。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本研究旨在通过构建内蒙古黄旗海盆地的三维地质模型，深入分析其地质结构特征，并利用地下水数值模拟技术，预测不同开采方案下地下水水位、水量的变化情况，为地下水资源的合理开发和保护提供科学依据。具体研究内容如下：

- **构建三维地质模型**

：全面收集黄旗海盆地的地质数据，包括钻孔数据、地质剖面数据、地球物理勘探数据等。运用先进的三维地质建模技术，如基于钻孔数据的建模方法、基于剖面数据的建模方法以及多源数据融合建模方法，建立高精度的黄旗海盆地三维地质模型。在建模过程中，充分考虑地层的连续性、断层的切割关系以及岩性的变化等地质特征，确保模型能够准确反映实际地质情况。通过对三维地质模型的分析，深入了解黄旗海盆地的地质结构，包括地层分布、岩性变化、断层构造等，为地下水数值模拟提供坚实的地质基础。

- **建立地下水数值模型**：基于构建的三维地质模型，结合水文地质条件，建立黄旗海盆地的地下水数值模型。确定模型的边界条件，包括地下水的补给边界、排泄边界等，以及初始条件，如初始水位、初始水质等。选择合适的数值模拟方法，如有限差分法、有限元法等，对地下水的流动和溶质运移进行模拟。利用已有的地下水监测数据，对建立的数值模型进行校准和验证，确保模型的准确性和可靠性。通过模型校准，调整模型的参数，使模拟结果与实际观测数据相吻合；通过模型验证，将校准后的模型应用于其他时段或区域的地下水模拟，并与实测数据进行比较，检验模型的泛化能力。
- **模拟预测与结果分析**：运用校准和验证后的地下水数值模型，对不同开采方案下的地下水水位、水量变化进行模拟预测。分析不同开采方案对地下水资源的影响，包括水位下降幅度、水量减少情况等，评估地下水资源的可持续性。通过模拟结果，预测未来一段时间内黄旗海盆地地下水的变化趋势，为水资源管理决策提供科学依据。采用敏感性分析方法，分析模型参数变化对模拟结果的影响程度，识别对模拟结果影响较大的关键参数，为模型的优化和改进提供参考。
- **提出地下水资源保护建议**：根据模拟预测结果和敏感性分析，结合黄旗海盆地的实际情况，提出科学合理的地下水资源保护建议。包括制定合理的开采方案，优化水资源配置，提高水资源利用效率；加强地下水监测，建立健全地下水监测体系，实时掌握地下水动态变化；采取有效的保护措施，如限制开采量、实施人工回灌等，防止地下水位持续下降和水质恶化，实现地下水资源的可持续开发利用。

1.3.2 研究方法

为实现上述研究内容，本研究将综合运用多种研究方法，确保研究的科学性和可靠性。具体研究方法如下：

- 地质数据收集与整理

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/585021222224012121>

•