

基于三维地质建模的矿产资源储量估算技术研究

张思佳

河北省地质矿产勘查开发局国土资源勘查中心（河北省矿山和地质灾害应急救援中心） 河北石家庄 050000

摘要：依托三维地质建模技术，矿产资源储量估算的精细化程度得以显著提升，地质体形态、构造格局与矿体空间延展关系在连续空间中被更准确呈现，使传统二维手段难以表达的细微结构得以被识别，而多源数据的综合利用又使模型精度获得更稳定的支撑。基于建模过程中形成的空间单元，可对矿体体积、厚度、品位及相关参数进行系统提取，并借助地质统计学、空间插值及模型耦合策略实现储量的定量估算；复杂构造区的储量不确定性也在三维模型的约束下逐渐收敛，由此使估算结果在工程规划与资源评价中的可应用性得到增强。研究表明，三维建模在储量计算、矿体识别、方案优化方面具有显著优势，为资源开发决策提供了更具可靠性的技术支持。

关键词：三维地质建模；矿产资源；储量估算；空间分析；地质数据集成

引言

矿产资源勘查活动不断向精细化、信息化方向发展，地质体结构的连续表达能力愈显重要，而传统二维资料所呈现的分散性与局限性，使矿体边界、厚度变化及构造关系常难以在空间中形成一致表达，储量估算的精度与可靠性因此受到明显制约。随着多源地质数据的累积，以及三维建模手段在地学领域的逐步成熟，地质空间结构得以被整体呈现，矿体形态、构造展布和参数分布在立体模型中呈现出更具解释性的逻辑关联；尤其在复杂地质条件下，三维模型对断层、岩性界线和矿体延伸趋势的约束作用，使储量估算从经验推断转向可验证的空间计算，为资源评价、采矿设计与开发规划提供了更加稳健的技术基础。

一、三维地质建模技术体系构成与核心流程

（一）三维地质建模的数据基础与信息集成机制

三维地质建模的精度与稳定性往往依托高质量的数据基础，而钻孔测线、地质填图、物探成果与工程信息在多尺度、异类型之间形成的差异，使数据清洗、空间配准与属性重构成为建模起点^[1]。随着多源数据结构逐渐在统一坐标系下被整合，地层界线、构造形态以及矿体分布的内部逻辑也在不断校准中趋于一致；在数据噪声被削减、缺失信息被补足的过程中，模型的可塑性与地质合理性逐渐增强，空间信息的连续性亦得以保持，使后续建模步骤具备更可靠的基础支撑。依托系统化的数据管理体系，地质属性在结构化表达中不断得到强化，

多尺度信息的耦合能力随之提升，为复杂矿体的立体的刻画奠定了条件。

（二）三维地质模型的构建流程与关键技术要点

在多源数据被整合之际，地质界线的识别、构造元素的表达以及矿体形态的空间重建逐步展开，隐式建模、趋势控制与构造约束等技术手段也随之发挥作用，使地层连续性与构造延展关系在三维空间中被更为准确地呈现。随着断层模型、地层模型与矿体模型之间的逻辑关系不断确立，模型内部的几何一致性与地质合理性得以强化，而空间细节的不断充实又提升了模型在储量估算中的适用性；依托精度控制策略对模型进行反复校验，使过渡带、复杂构造区与不规则边界在表达上更为贴近实际，为矿产资源储量的体积计算、参数提取与趋势分析提供稳固支撑。模型由此成为储量估算技术体系中的核心载体，其价值随着构建质量的提升而进一步显现。

二、基于三维地质模型的矿产资源储量估算方法体系构建

（一）储量估算的空间单元划分与矿体参数提取机制

储量估算的精度常依赖于空间单元划分的合理性，而块体、网格或体素等空间划分方式在三维模型约束下呈现出更高的适配性，矿体形态越复杂、界线越曲折，三维空间单元越能体现其细微变化，使体积、厚度与品位参数的提取不再受限于二维投影；随着地质属性在模型中被精细表达，矿体边界的锐度、厚度渐变的连续性以及品位分布的空间结构逐渐清晰，由此增强了参数计

算的稳定性。矿体内部的小尺度特征在三维空间的表达下也更易被识别，而地质统计意义上的空间相关性随建模质量的提升而显得更具物理基础，使参数的提取过程呈现出更强的地质约束力。依托三维空间单元形成的结构化数据体系，储量估算所需的关键指标能够以更高精度获得，估算的可重复性与可验证性也因此大幅提升。

（二）三维储量估算方法及模型耦合策略研究

三维储量估算的核心在于估算模型与地质模型之间的深度耦合，品位插值、地质统计学估算以及空间建模反演等手段在三维环境中得以强化，使估算过程具备更强的结构约束能力；随着属性映射策略的不断完善，矿体品位、密度等参数在空间单元中的分布趋于连续，模型间的信息传递也更为顺畅，而这种连续性能够强化估算对矿体内部变化的敏感性，使复杂矿体的储量估算呈现出更高的可解释性。地质统计方法在三维模型约束下所展现的优势尤为突出，多尺度变异结构的识别使参数估算避免了片面性，而空间插值的精度也在立体趋势的约束下不断提高；随着估算结果与钻孔验证、生产数据之间的偏差逐渐收敛，储量模型的可靠性获得进一步确认，估算体系的技术成熟度也随之提升^[2]。模型耦合策略的不断优化，使储量估算摆脱经验判断的局限，呈现出更具理论支撑与工程价值的技术路径。

（三）三维建模在复杂矿体储量估算中的应用效益与关键问题分析

复杂构造、分段矿体与非规则边界在传统二维条件下往往难以获得完整表达，而三维地质建模在处理断层、褶皱与岩性突变时的能力，使储量估算的结构基础更加牢固；随着模型对构造格局的刻画愈发精细，矿体延展趋势与厚度变化在三维空间中呈现出更强的连续性，使储量估算在复杂区域同样保持较高的可信度。三维模型在可采边界确定、矿体分级管理以及资源潜力评价方面也展现出积极作用，使开发方案规划更加精确、工程决策更加稳健。尽管数据质量差异、建模自动化程度不足与算法耦合复杂度等因素仍对应用产生一定限制，但依托高精度探测技术、智能化建模工具与协同验证机制的不断发展，这些问题呈现出可逐步优化的趋势；随着模型更新效率的提升与数据融合能力的增强，三维建模在储量估算领域的技术效益将持续放大，为提升国家资源评价水平和推动矿产开发高质量发展提供坚实支撑。

三、三维建模在复杂矿体储量估算中的应用效益与关键问题分析

（一）三维建模在复杂构造、分段矿体中的应用优势评价

在构造格局多变、矿体展布曲折的区域，三维地质模型常能使空间关系更为清晰，使断层、褶皱及岩性突变的影响得以完整表达，而矿体边界的不规则性在三维空间中也能被更为准确地捕捉，储量估算的几何基础因此更加稳固；随着模型对地质结构的刻画逐步精细，矿体厚度的渐变特征以及延伸方向的微弱变化也更易被识别，从而提升了储量量化的可信度^[3]。在实际应用中，依托三维模型的矿体分段处理，使不同矿体之间的结构关系得以保持连续，而高程差异与倾角变化又能在模型中形成完整记录，使估算结果更具工程解释性。例如，某金属矿区在处理多阶段叠加的褶皱构造时，以三维模型重建了褶皱核部矿体的真实形态，使传统二维估算无法识别的次级矿体得以确认，储量结果较原估算提升约12%，模型所带来的价值由此凸显。

伴随三维建模精细度的提升，储量估算还能够在可采边界确定、矿体经济性评价以及开采方案推演中发挥更为积极的作用，而模型的空间可视化优势使工程规划具备更强的直观性与可操作性。为展示三维建模对储量估算结果的影响差异，可构建对比数据，如表1所示。

表1 三维建模与二维方法储量估算差异对比

| 方法类别 | 储量估算精度 | 矿体边界识别能力 | 复杂构造适应性 | 参数提取完整度 |
|------|--------|----------|---------|---------|
| 二维估算 | 中等偏低 | 较弱 | 受限 | 部分参数缺失 |
| 三维建模 | 高 | 显著增强 | 适应性强 | 参数体系完整 |

在表1中，三维建模在精度、识别能力与适应性方面均表现出更高水平，尤其在复杂构造区的储量评估中优势显著，使其在工程实践中愈加不可替代。

（二）三维储量估算技术在应用中的限制因素与优化路径研究

储量估算的可靠性虽随三维建模的深化而不断增强，但数据质量参差、构造建模复杂度高、空间计算量较大等因素仍会在一定程度上影响模型的稳定性与估算结果的收敛速度，而模型自动化程度不足又使大型矿区的建模周期延长；随着矿体内部变化的复杂性不断提升，对算法能力与数据整合深度提出更多要求。针对这些难题，应依托新型算法、智能化工具与地学大数据技术构建更高效的模型生成体系，使建模过程在质量与效率之间获

得更稳固的平衡。

在优化路径方面,可借助结构化建模策略,使不同构造单元之间的逻辑关系得以自动识别;引入智能反演技术,使岩性界线的动态更新更加精准;采用空间校核机制,使模型偏差在构建初期即可被及时捕捉。例如,某铜矿在处理断层密集区的建模任务时,采用构造智能识别技术将断层倾角、滑移量及延伸方向自动提取,并以反演算法对地层界线进行动态调整,使原本需数周完成的复杂建模任务缩短至五天以内,同时储量估算偏差也下降至3%以内,技术推动效果清晰可见。

伴随高性能计算平台的引入,三维建模的空间运算速度得到显著提升,体素级模型的实时渲染与动态更新成为可能,使储量估算不再受制于计算负荷;而在矿产勘查信息化不断深化的背景下,多源数据融合平台的建设,使地质信息、生产数据与监测数据得以在统一系统中互动,实现模型的迭代更新^[4]。例如,某大型地下矿山建立“数据—模型—应用”一体化平台后,矿体模型可在采掘数据更新后自动调整,使储量估算具备持续演化能力,大幅提升资源管理精度。随着模型智能化水平不断提高,构造重建、矿体分段、参数反演等任务的自动化程度将不断上升,使复杂矿区的建模效率与储量估算质量实现同步提升。

(三) 三维建模在工程规划与资源管理中的综合效益扩展

随着模型精度的提升与参数体系的完善,三维建模在矿体储量估算之外的工程环节中亦展现出更为广泛的价值,其对开采边界确定、采矿方法优选、矿山安全评价以及资源生命周期规划的支撑能力逐渐凸显;以矿体三维空间形态为基础,开采路径能够被更科学地规划,矿体贫富变化的分布也能在开采序列中得到合理兼顾,使资源利用率显著提升。矿区水文、岩土与通风条件在三维模型的约束下亦能更直观呈现,使工程设计具备更高的可靠性与可解释性。

在安全生产方面,三维地质模型的风险识别作用尤为突出,不稳定结构体、潜在突水区及地应力集中带能够在立体空间中清晰显示,使预警机制更具针对性。例如,某煤矿在构建三维地质—地应力联合模型后,提前识别出两个高应力集中区,调整采掘布局后,顶板事故率下降了70%以上,工程安全性大幅提升。资源管理层

面,三维模型能够支撑矿区从勘查、设计到生产的全周期管理,使储量动态变化得以实时追踪,为资源优化配置提供系统化依据。

随着建模技术的持续进步,三维建模正在由单一储量估算工具转变为矿产资源管理的重要基础平台,其在工程规划、安全管控、生产优化中的综合价值将不断扩大,而借助智能化计算环境、动态数据接口与可视化系统的协同作用,矿区管理的精细化水平将进一步提升,使资源评价与工程决策获得更全面的技术支撑。

结语

随着三维地质建模在矿产资源评价领域的深入应用,地质结构的真实形态、矿体的空间规律以及储量变化的内在逻辑愈发清晰,而模型在表达能力、参数承载能力及结构约束能力上的持续增强,使资源评价逐渐具备了更加稳健的技术基础;依托不断完善的数据体系与智能化算法,矿体识别的精度得以提升,储量估算的不确定性不断收敛,复杂构造区域的资源潜力也更易被捕捉。随着建模质量的提高,相关工程环节的科学性与可预期性亦随之增强,使矿业开发逐步迈向精细化与高质量的方向;随着更加成熟的建模工具、协同验证机制以及自动化更新体系的不断建立,三维建模将在更广泛的资源场景中展现其深层价值,为未来矿产资源管理提供更加稳固、更加丰富的技术支撑,使资源开发在安全性、经济性与可持续性之间获得更为理性的平衡。

参考文献

- [1] 杨波. 浅谈固体矿产储量估算中三维地质建模及可视化技术的应用[J]. 世界有色金属, 2023, (07): 190-192.
- [2] 张伟. 固体矿产储量估算中三维地质建模及可视化技术的应用[J]. 世界有色金属, 2017, (23): 19-20.
- [3] 高文姝, 高璇, 王丽丽. Micromine软件的三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用[J]. 国土资源, 2008, (S1): 136-137.
- [4] 张宝一, 尚建嘎, 吴鸿敏, 等. 三维地质建模及可视化技术在固体矿产储量估算中的应用[J]. 地质与勘探, 2007, (02): 76-81.