

基于储层品质的油田开发动用设计与经济效益分析

蓝 倩 (中国海洋石油研究总院有限责任公司, 北京 100029)

刘晨晨 (山东省核工业二四八地质大队, 山东 青岛 266000)

摘要:南海东部海域L油区深层低渗油田因储层品质差、开发风险高、经济效益低,传统模式难经济动用。本研究以L4油田为例,基于储层品质分类参数($C=(Kh/\mu) \cdot f$),提出“差异化决策”与“区域协同”开发策略,包括储层分级动用、设施共享优化、井网灵活部署及能量高效利用。通过国产化平台、老油田设施共享、创新注水系统等措施,显著提升经济效益。差异化开发策略有效提高油田产能与采收率,推动规模化开发,形成可复用的技术框架与经济模型。经济分析表明,项目收益超行业边际门槛,实现短期收益与长期可持续开发平衡。该成果为海上复杂边际油田经济高效开发提供实践范例,对深海低渗资源开发具重要战略意义。

关键词:深层;低渗;储层品质;开发成本;投资回报率;经济效益

0 引言

南海东部海域是我国重要的海上油气产区,近年来勘探开发逐步向深层低渗领域延伸。此类油田普遍存在储层品质差、开发风险高、经济效益低等问题,是典型的复杂边际油田。尽管国内外学者针对深层低渗油藏开发已开展了大量研究^[1-5],但海上边际油田的开发动用仍面临地震资料品质差、储层非均质性强等挑战^[6-7]。本文以南海东部L油区L4油田为例,通过储层品质分类与开发策略优化研究,提出一套适用于深层低渗油田的开发方案,旨在为类似油田的高效开发提供技术参考。

1 研究区基本地质特征

L油区位于南海东部珠江口盆地,构造背景为被动大陆边缘裂谷盆地,历经多期构造演化形成复杂断块格局(图1)。L4油田作为该区典型边际油田,位于L3东洼大型斜坡构造带,主力储层为古近系文昌组辫状河三角洲砂体,埋深>3000m,含油井段700m,具有“三低一强”特征:

①低孔渗:孔隙度10.2%~14.9%,渗透率2.4~52.6mD。②强非均质性:砂体横向展布受限,纵向叠置(图2)。③微观孔隙结构复杂:核磁共振分析显示,孔隙喉道半径以0.1~1.0μm为主,可动流体饱和度<45%。

2 储层品质分析

针对L4油田深层低渗油藏,本身深层地震资料品质较差,目前运用地球物理方法进行储层预测效果有限。为降低开发风险,确保开发前期储量规模的可靠性,以层序地层、沉积理论为基础,选取反映油田

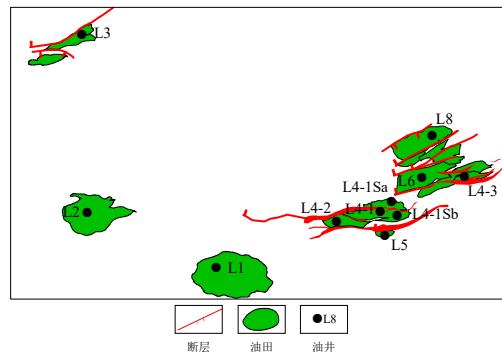


图1 L4油田区域位置示意图

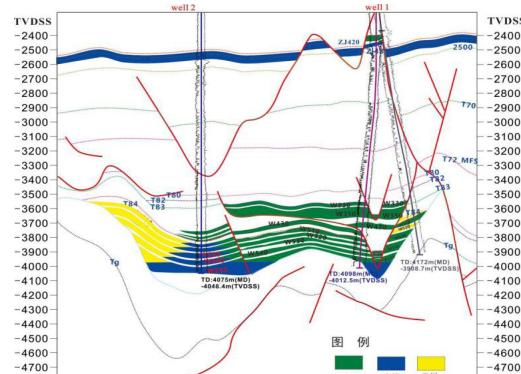


图2 L4油田油藏剖面示意图 (TVDSS 为水下真实垂直深度)

储层性质与开发效果的表征参数C:

$$C = (Kh/\mu) \cdot f$$

式中, K为渗透率, mD; h为油层净厚, m; μ 为地层原油黏度, MPa·s; f为含砂率。

综合表征储层物性、砂体连通性、流体流动性、产能特征,对油田储层品质进行评估分析(表1),根据综合储层品质评价公式计算得到的C值,将储层品质分为I、II、III、IV类四个等级为油田后续开发

表 1 L4 油田储层品质分类

储量品质分类	井区	油组	渗透率 (mD)	油层净厚 (m)	含砂率 (f)	地层原油粘度 (MPa · s)	C (mD·m/MPa · s)
I 类: C ≥ 500	1 井区	ZJ420	2521.4	9.5	0.998	1.5	15936.9
		ZJ430	7109.8	4.1	0.78	1.5	15158.1
II 类: 100 ≤ C < 500	1 井区	WC430	52.6	5.2	0.61	0.89	187.5
		WC510	35.7	10.3	0.498	0.89	205.8
		WC520	36.3	9.6	0.634	0.89	248.2
		WC530	20.7	17.7	0.899	0.89	370.1
		WC540	18.3	24.2	0.862	0.89	428.9
	1Sa 井区	WC510	9.8	10.4	0.536	0.437	125
		WC520	10.9	7.0	0.672	0.437	117.3
III 类: 30 ≤ C < 100	1 井区	WC550	23.9	6.3	0.551	0.89	93.2
		WC430	5.8	6.6	0.728	0.89	31.3
	2 井区	WC440	17.5	3.5	0.713	0.89	49.1
		WC310	17.5	7.6	0.607	0.89	90.7
	3 井区	WC430	6.7	5.1	0.467	0.437	36.5
		WC510	7.6	2.8	0.862	0.437	42
		WC530	8.6	5.6	0.865	0.437	95.3
		WC540	2.4	8.7	0.694	0.437	33.2
		WC550	9.5	4.6	0.795	0.437	79.5
IV 类: C < 30	1 井区	WC330	11.9	2.2	0.536	0.89	15.8
		WC350	14.2	1.7	0.343	0.89	9.3
	2 井区	WC430	2.7	7.4	0.479	0.89	10.8
		WC450	9.7	1.7	0.705	0.89	13.1

可动用方案的设计提供了夯实可靠的地质基础^[8]。结果表明, I类(C>500): ZJ420、ZJ430储层, 具有较高的优先开发潜力; IV类(C<30): 1井区文三段和2井区文四段储层品质较低, 开发难度较大, 需要采取特殊的开发策略。

3 开发动用设计策略

针对L4油田深层低渗油藏的特点, 结合储层品质分析结果, 提出了四项开发策略, 旨在提高储量动用程度、降低开发风险、实现经济高效开发。

3.1 区别对待, 分批动用

基于储层品质分类结果, 优先开发高效益储层, 逐步释放低品质储层潜力, 实现资源的高效利用。根据储层品质的不通过参数C(C=(Kh/μ)·f)定量划分储层品质, 结合孔隙度、渗透率等宏观参数, 将储层分为I、II、III类。例如, L4油田ZJ420和ZJ430为I类优先开发目标。同时采用分批开发逻辑, I类储层采用常规井网开发, II类结合压裂增产技术, III类待技术成熟后开发。此策略可降低初期投资风险, 同时提高资金周转效率。

3.2 主力区、潜力区、边际区分区开发策略

按储层可靠性和经济性划分开发优先级, 实现滚动开发与风险控制。在主力区开发优先动用探明储量高、储层连通性好的区域(如L4油田文昌组主力层), 采用水平井单采以提高单井产能12。潜力区评价通过开发井兼评价井(如定向井合采多层砂体), 验证未探明储层潜力, 动态调整开发方案。边际区利用区域联合开发降低边际区成本。例如, 文昌组低渗储层依

托邻近L5油田注水系统补充能量, 提升经济性。

3.3 新旧结合、依托一体化区域联合开发策略

L4油田单独开发不具备经济性, 需整合区域内老油田设施与新油田资源, 实现资源共享与成本分摊。L4油田可联合L6、L8油田新建固定平台, 依托老区FSO(浮式储卸油装置)处理原油, 节省新建处理设施投资30%以上。同时可以通过管网优化, 构建海底集输管网系统, 连接多个边际油田至中心平台, 降低单油田开发成本(图3)。

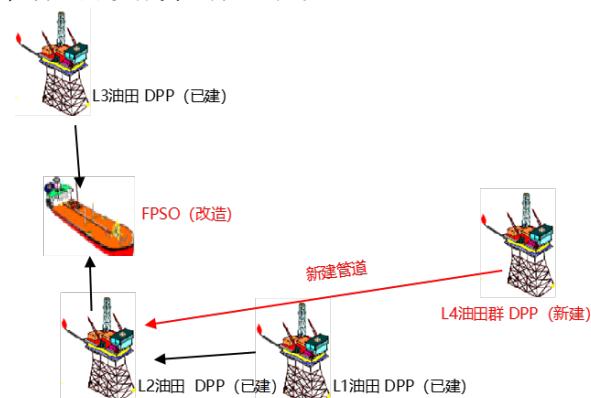


图3 L4油田群区域开发工程方案示意图

3.4 能量利用与井网优化策略

本策略的核心思路是结合天然能量与人工补充, 通过灵活设计井网以提高采收率。具体实施中, 珠江组储层充分利用底水能量进行开发, 而文昌组则通过注水(利用L5油田产出水回注)补充能量, 从而减少人工注水成本。在井型组合优化方面, 采用定向井合采多层叠置砂体(如文昌组多套砂体), 利用水平

并针对主力单层（如WC220层）提高泄油面积，并通过多分支井开发复杂断块储层以增加控制储量。

4 经济效益分析

L4油田作为南海东部海域首个实现3000m以上深层低渗油田规模化开发的标杆项目，通过储层品质分类与差异化开发策略，在技术创新、成本控制、区域协同等多维度实现经济效益优化，成功突破传统开发模式的经济性瓶颈，为类似边际油田商业化开发提供了可复制的范本。

4.1 技术创新驱动开发成本优化

L4油田群采用自主设计的国产化原油生产平台，设备国产化率显著提升，降低了设备进口成本。同时，通过一体化建造和浮托法安装技术，缩短了平台建设周期，节约了工程投资。此外，注水开发系统的创新应用进一步优化了运营成本：利用邻近L5油田产出水回注补充地层能量，减少淡水需求量的同时，年注水能耗降低，降低年运营成本，同时延长了油田稳产周期。在区域协同方面，L4油田群依托老油田设施实现资源共享，与邻近油田共享海底集输管网和浮式储卸油装置（FSO），进一步分摊了基础设施投资，降低单桶原油开发成本。

4.2 产量提升与收益增量

差异化开发策略显著提升了油田产能与采收率。针对主力储层采用水平井单采技术，单井日产量为常规直井的1.5倍，提高初期产能释放率，实现快速现金流回笼。油田群高峰年产原油超过100万吨，不仅实现规模化开发还带动了周边油田联合开发，形成区域协同效应，整体采收率提升3%左右，长期收益显著放大。

4.3 综合效益与社会价值

深层低渗油田开发不仅创造了经济效益，其成功经验被列为“低渗开发试验田”，为南海及类似海域的边际油田开发提供了可复用的技术框架与经济模型。社会效益方面，国产化技术应用减少对外依赖，提升产业链自主可控能力；区域联合开发模式降低碳排放强度，符合绿色发展理念。

5 应用效果和结论

①基于储层品质分析的边际油田开发动用评价，提高了开发方案的可靠程度，推动深层低渗的L4油田地质油藏方案已进入调整实施阶段。初步实施开发方案后，L4油田地质油藏方案实施后，Ⅰ类储层（ZJ420、ZJ430）开发效果优于设计方案，累产油增幅最高达80%；Ⅱ类储层因投产井数少产能不能预期，

但实施后探明石油地质储量略有增加；Ⅲ类储层探明石油地质储量略有减少。

②通过储层分级、分区开发、设施共享及井网优化等开发动用设计策略，提高了L4油田储量动用程度，注采井网优化使采收率从18%提升至21%。纵向上，Ⅰ类储层储量已100%动用；平面上，新建的L4油田群平台依托条件较好，已带动周边油田联合投入开发，并被选定为公司内部“低渗开发试验田”，这种模式设计为海上油田的经济高效开发提供了范例。

③四项开发策略通过储层分级、分区开发、设施共享及井网优化，系统性分析深层低渗油田开发难题。其核心在于“差异化决策”与“区域协同”，为海上边际油田开发提供了可复用的技术框架。

④L4油田通过“储层分级-分区开发-设施共享”的优化策略，实现了深层低渗储量的经济动用，单桶成本、采收率、稳产周期等核心指标均达到行业领先水平。其经济效益不仅体现在短期现金流与长期收益增量，更通过技术推广与区域协同，为海上边际油田开发提供了可持续的解决方案。未来，随着智能化技术与绿色能源的进一步整合，此类油田的经济潜力有望持续释放。

参考文献：

- [1] 朱江,周文胜.中国近海油气田区域开发战略思考[J].中国海上油气,2009,21(6):380-387.
- [2] 朱江,刘伟.海上油气田区域开发模式思考与实践[J].中国海上油气,2009,21(2):102-104.
- [3] 朱国金,张金庆,等.海上油田开发方案设计策略[C].中国海油开发技术座谈会论文集.北京:石油工业出版社,2012.
- [4] 胡光义,王巍.海上油气田勘探开发一体化开发方案编制理念和实现途径[C].中国海油开发技术座谈会论文集.北京:石油工业出版社,2012.
- [5] 王晖,谭先红.前期地质油藏研究的创新推动海上油田开发[R].中海石油(中国)有限公司北京研究中心,2013.
- [6] 陈伟,孙福街,等.海上油气田开发前期研究地质油藏方案设计策略和技术[J].中国海上油气,2013,2(6):49-50.
- [7] 李茂.南海西部海域边际油田开发浅谈[J].石油钻采工艺,2007,29(6):61-64.
- [8] 胡光义,范廷恩等.海上油田开发前期研究阶段储量品质评估方法及应用--以渤海地区明化镇组储层为例[J].中国海上油气,2013,25(1):33-36.