

注水增效的边际效益与规模经济性分析

赵青 范春高 (延长油田股份有限公司志丹采油厂, 陕西 延安 717500)

摘要: 油田注水增效是油田稳产增产的核心技术, 其经济可行性很大程度上取决于边际效益与规模经济性分析。边际效益分析着重考量每增加一单位投入所带来的增量收益与成本, 据此判断技术措施的合理应用边界; 规模经济性分析则聚焦注水系统规模扩大过程, 探究单位成本下降与协同效应提升的内在规律。二者共同构成注水开发方案优化与投资决策的核心依据, 核心目的是规避效益递减风险, 找到整体效益最优的注水策略。基于这一背景, 本文围绕注水增效的边际效益与规模经济性展开研究, 供相关从业者参考。

关键词: 注水增效; 边际效益; 规模经济性

中图分类号: TE357.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 011-0068-03

Marginal benefit and scale economy analysis of water injection efficiency improvement

Zhao Qing, Fan Chungao (Zhidan Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan' an Shaanxi 717500, China)

Abstract: Water injection and efficiency improvement is the core technology of stable and increased production in oil fields, and its economic feasibility depends largely on marginal benefit and economies of scale analysis. Marginal benefit analysis focuses on the incremental benefits and costs brought by each additional unit of input, and accordingly judges the reasonable application boundary of technical measures; Economies of scale analysis focuses on the process of water injection system scale expansion, and explores the inherent law of unit cost decline and synergistic effect improvement. Together, the two forms the core basis of water injection development scheme optimization and investment decision-making, and the core purpose is to avoid the risk of diminishing returns and find the optimal water injection strategy with overall benefits. Based on this background, this paper focuses on the marginal benefit and economies of scale of water injection efficiency, for the reference of relevant practitioners.

Keywords: water injection to increase efficiency; Marginal benefit; Economies of scale

油田进入开发中后期进入高含水后, 注水增效是保持产油、提高采收率的重要措施, 注水增产措施有“效益递减”现象, 如何尽量提高油田注水增产效益是大家最关心的话题。因而对边际效益、规模经济性进行分析显得十分重要。前者是针对单个措施或措施、调整的投入产出问题, 确定经济工作量上限与下限; 后者是从整体考虑注水系统规模扩大是否能降低注水单井位油成本。本文试图对这方面的研究和内容进行分析, 为油田上更好地、经济效益地开发提供一套可行性的建议。

1 油田注水增效技术

油田注水增效方法包括调剖调驱、精细注水、智能分注等。调剖调驱就是注入化学剂、注入凝胶堵注高渗地层、改变注入水流动方向, 来提高波及体积、油水驱效率; 精细注水就是根据对油藏非均质性的认识, 对油藏不同层、块段区别配注量、配注措施, 做到流体断面无拥堵地总体向前推进; 智能分注就是依靠井下监控、控制设备实现对分层状态监测感知、自动调节各层注水量, 即实现注水过程精细化管理和高效作业。这些方法的主要目的都是要改善水驱效果,

提高原油采收率。油田注水增效的作用机理, 在于提高波及系数、增加驱油效率: 改变注入水流向、有效封堵高渗, 使得水流至未波及区或低渗区波及, 增加水驱的宏观波及体积; 同时改变油水界面性质、增加洗油力, 减少孔隙中微观尺度残留的油饱和度, 进而驱动已波及区内的油采出来, 在两者的协同作用下提高原油的采收率。

2 边际效益概念在注水项目中的内涵

单井或开发单元的增油量边际收益分析, 核心是评估每新增一单位措施投入对应的增量经济回报。该分析先量化注水增效措施带来的额外原油产量, 结合当前油价估算增量销售收入; 再识别并扣减为实现增产直接新增的变动成本, 比如额外消耗的药剂、电力及直接人工等。通过对比增量收入与增量成本, 得出措施的边际净收益, 为判断是否继续追加投入或优化措施方案提供关键经济决策依据。油田注水增效措施的边际成本, 指为获得增量原油产量而直接发生、且随措施规模变动的费用支出, 主要包括药剂成本、能耗成本与运维成本三部分: 药剂成本涉及为实现调驱、调剖效果额外注入的各类化学剂费用; 能耗成本主要

是提升注水压力或增加注水量导致的额外电力消耗；运维成本则涵盖实施并维持增效措施所增加的设备维护、人工操作及动态监测等直接花费，这些变动成本的总和直接决定措施的经济可行性。

3 规模经济性在油田注水中的体现

注水系统规模与单位操作成本之间通常呈现显著的规模经济性关系：在一定技术条件下，随着系统处理与注入规模的扩大，分摊到每单位注水量或每口注入井上的平均操作成本会逐步下降。这主要源于大规模系统能更充分地利用并分摊管网、泵站等大型固定资产的投资与固定运维费用，同时通过标准化、集中化管理提升运行效率，降低采购与能耗的边际成本。但这种下降趋势并非无限延续，当规模超出与油藏地质条件及开发阶段相匹配的最优区间后，管理复杂度的急剧增加或系统负荷不均衡可能导致效率下滑，使单位操作成本进入平台期，甚至转而上升。区块整体调整与单井措施在经济性上有着明显差异：区块调整侧重于从宏观层面优化井网结构与注采系统，投资规模大且注重长期开发的整体协同效益，能通过改善整个区域流场实现显著规模经济性，但投资回收周期相对较长；单井措施如调剖或增注，针对具体井点实施，投资灵活、见效快，更侧重短期边际效益提升，却因缺乏区域协同性可能限制措施整体效益。两者分别适用于不同开发阶段与地质条件，投资决策中需统筹考量。

4 边际效益分析方法

边际效益分析方法包括增量效益评价模型、边际成本识别与测算、边际效益曲线与临界点确定等方面，具体内容如下：

4.1 增量效益评价模型

增量效益评价模型中的增油量预测是核心部分，大多是利用油藏数值模拟或水驱特征曲线、产量递减规律来预测量化，其中的关键参数包括措施后果的含水率降低量、增产油量、有效期限等。油价设定主要考虑中长期的油价预测结果，引入油价情景设定——即设定基准油价、乐观前景及保守前景，对未来不同市场环境下项目的经济抗风险性进行分析，求取稳健的增量效益指标。边际收益计算框架是增量效益评价模型核心部分，其目的是计算单次增量增效措施的经济效应，边际净收益是计算模型的核心，即计算措施带来的边际增量收入与边际增量变动成本的差。增油量预测结果，再乘以确定的基础油价和预测情景得出增量收入；增量成本需要识别出和它们相关并可取到的具体的可变药剂、能耗、管理成本等。基于这一框架最终可以获得项目投资的边际净收益及边际利润率等一系列投资决策参数。

4.2 边际成本识别与测算

注水系统扩容的边际投资识别与测算，核心是锁定为提升注水能力而产生的增量投资成本，主要包括新增或扩建高压注水泵、铺设附加注水管线、升级水处理设施等直接资本性支出。测算需以工程设计为依据，通过分析不同扩容方案对应的新增日注水能力，核算单位增量产能所对应的边际投资额，该数据是评估规模经济性的关键输入参数。边际成本识别中，变动成本分析聚焦随注水措施强度直接变化的费用：化学剂成本由单位用量与单价决定，比如每立方米注入液需消耗特定浓度的聚合物若干克，结合市场价格可算出吨油化学剂成本；电力成本与注水泵机组运行时长、功率直接相关，通常通过核算单井日耗电量乘以工业电价，得出吨水或吨油的边际电费支出。

4.3 边际效益曲线与临界点确定

边际效益曲线分析中，随着注水措施强度（如日注水量）从 100m^3 逐步提升至 200m^3 ，对应的边际增油量会呈现典型递减规律，从初始每天 5t 逐步降至 1t 。临界点确定需区分技术极限与经济极限：技术极限受油藏物性制约，比如含水率升至 98% 时增油量趋近于零；经济极限需通过量化核算，当按当前油价计算的边际收益与耗用的边际成本相等时，即达到盈亏平衡点。基于这一递减规律，优化注水周期的关键在于通过历史生产数据分析与数值模拟，预判效益递减趋势，在经济极限到来前适时调整或转换措施，例如将措施周期从 120 天优化至 90 天，实现全周期净现值最大化。

5 规模经济性评估框架

5.1 注水系统规模经济模型

注水系统的规模经济模型分析中，集中式和分布式注水的对比非常明显：集中式注水的系统越大，每吨水成本就越小，比如每秒注水量从每日 1万 m^3 增加到 2万 m^3 ，每吨水的成本就从 5 元降低到 3 元，主要是因为固定投资和运维投资都能够得到较大规模的摊薄；分布式注水虽然初始投资灵活，但是每吨水的成本曲线相对较平，低规模下很有可能会有比较类似的代价，但更大的规模下，每吨水成本往往在 4 元左右，不会再进一步降低太多；另外，管网、泵站等系统容量的规模弹性往往都在 $0.6 \sim 0.8$ 的范围内，小于 1 的意义是系统容量的扩大，将带来单位容量投资成本的降低。具体到系统处理规模由每日 1万 m^3 增大到每日 2万 m^3 ，管网和泵站总投资可能由 1200 万元发展到 2000 万元，而不增长为 2400 万元，每天每立方米处理单元成本由 1200 元降到 1000 元，也正体现了所谓的规模经济效益。

5.2 区块整体调控的经济性

区块整体调控通过井网与流场优化形成的协同效应，其经济性远高于单井措施的简单叠加。量化分析显示，区块综合调整可实现区域日增油 20t，而将同等投资分散用于 5 口单井措施，总计可能仅达成 12t 日增油，两者相差的 8t 便是协同增效的价值体现。其经济优势核心在于整体调控能有效提升波及效率，降低单位操作成本，进而实现更高的净现值。区块整体调控规模扩大对采收率提升的边际贡献，呈现先增后减的规律：开发初期，将调控规模从一个井组扩展至整个井区，采收率可能从 30% 提升至 32%，此阶段每扩大一定规模如增加 5 口受效井，边际采收率增幅约为 0.5%，协同效应显著；但随着规模持续扩大至整个油藏，受储层非均质性制约及波及效率提升难度加大，边际贡献会逐步递减，例如规模再扩大一倍，可能仅能额外提升 0.2% 的采收率，此时单位增油所需的边际投资会显著上升。

5.3 长期规模经济动态分析

长期规模经济动态分析中，随着油田综合含水率不断上升，注水系统的规模经济性通常会经历由强转弱的变化。含水率相对较低的阶段，扩大注水规模能有效摊薄单位固定成本，例如单位吨油操作成本可从 500 元降至 400 元；但当含水率进入特高阶段后，产液量大幅增加而增油量急剧减少，导致吨油分摊的提液与处理成本显著上升，规模经济效应减弱甚至出现规模不经济，此时单位吨油成本可能反弹至 450 元以上，继续扩大规模的边际效益趋于零。技术升级与规模调整的路径选择，需与开发阶段协同优化：含水率低于 85% 的阶段，推广智能分注等技术升级，同时将注水规模从每日 1 万 m^3 扩大至 1.5 万 m^3 ，可使单位增油成本从每吨 600 元降至 480 元；进入高含水期后，边际效益下降，应转向自适应注水等精细调控技术，规模扩张需极为审慎，若盲目将规模从 1.5 万 m^3 扩至 2 万 m^3 ，单位成本可能因效率降低回升至 520 元，最优路径转为以技术迭代维持效益，而非单纯追求规模增长。

6 不同规模油田注水系统经济性对比

不同规模油田的注水系统经济性对比结果表明，大规模油田（日注水能力超过 5 万 m^3 ）依托显著规模效应，单位吨水处理成本可降至 2 至 3 元，吨油操作成本也因固定成本充分摊薄具备明显优势，但此类系统初始投资规模庞大，且对油藏均质性要求较高。中等规模油田（日注水 1 至 3 万 m^3 ）是行业内常见的高效区间，能够在规模经济与投资灵活性之间实现平衡，单位吨水处理成本约为 3 至 5 元。小规模或复杂断块油田（日注水低于 5 千 m^3 ）的单位成本通常偏高，可

能达到 6 至 8 元以上，不过其可采用模块化分布式设计降低初始投资风险，更适用于开发早期或分散储量的开发场景。

7 未来研究方向

未来研究方向应聚焦低碳约束下的注水经济性重构，以及数字化赋能对规模经济的深刻重塑。低碳领域需将碳税、内部碳定价及绿色电力成本纳入全生命周期经济评价体系，量化分析水源处理、注入作业到采出液回注等各环节的碳足迹与能耗强度；同时研究碳捕集、绿电驱动等技术改造的应用效果，明确改造后单位增油成本的变动规律及其政策适应性。数字化领域则要探索依托物联网实时数据、大数据分析机器学习优化算法，构建动态模拟与智能决策系统，实现注水参数的实时自适应优化，以及规模经济的弹性管理；比如借助数字孪生技术预测不同开发情景下的最优注水规模，在提升原油采收率的同时，达成全系统能效与经济效益的协同最大化。

8 结束语

综上所述，对油田注水增效做边际效益和规模经济性分析，是挖掘开发效益、节约资源的正确科学途径。对以上问题的研究可以指导行业找到最大的注水规模和注水措施组合，以防止过度投资，引导注水系统向低成本的规模转化。最后，该分析不仅能够指导当前的生产决策，而且为油田目前努力做到低碳、求效益，在长远上编制合理的开发指导思路提供了科学的理论依据和实践指导。

参考文献：

- [1] 王刚, 王恩茂, 程卫民, 倪冠华, 刘义鑫, 李钊. 深部低渗煤层注水增效技术与材料研究现状及挑战 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2025, 44(06): 1-16.
- [2] 于继飞, 李晓亮, 张晓彤, 杨阳, 陈斌, 孟繁涛. 渤海 P 油田多功能高效注水增效剂研制及性能评价 [J]. 当代化工, 2025, 54(11): 2579-2585.
- [3] 刘瑞雪. 大庆某油田地面系统提质增效探索与实践 [J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15(08): 44-48.
- [4] 冯钊. 石油开采提质增效工程中注水井合理配注优化设计研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(14): 48-50.
- [5] 王石. S 油田地面系统节能管理实践 [J]. 油气田地面工程, 2025, 44(03): 65-72.

作者简介：

赵青 (1988-), 女, 汉族, 陕西铜川人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 石油注水。

范春高 (1983-), 男, 汉族, 陕西志丹人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 石油注水。