doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.11.002

地浸采铀井网设计与优化研究进展

陈梅芳[1,2]，阙为民[3]，赵利信[1,2]，苏学斌[2,4]

(1. 核工业北京化工冶金研究院，北京 101149；
2. 铀资源探采与核遥感全国重点实验室，北京 101149；
3. 南华大学 资源环境与安全工程学院，湖南 衡阳 421001；
4. 中国铀业股份有限公司，北京 100013)

摘要：随着砂岩型铀矿地浸开发逐步向深部、低渗透及复杂非均质矿体拓展，地浸采铀井网在矿体适配、水动力控制及生产动态调控等方面面临新的挑战，井网设计与优化已成为制约地浸高效开发的关键因素。本文系统综述了地浸采铀井网设计与优化研究进展。首先，梳理五点型、七点型和行列式等典型井型的结构特征、适用条件及工程应用，分析矿体几何形态、含矿层渗透性能和单井抽注能力对井型选择的影响；其次，总结井距设计与抽注流量调控研究情况，指出井距设计应由以平面几何距离为依据，转向兼顾浸出剂运移时间、有效反应程度和技术经济条件的有效井距优化；进一步综述水动力模拟、反应性溶质运移、快速行进法、代理模型、多目标优化及生产期井网动态重构等研究进展，分析非均质性及渗透性能动态演化对井网有效性的影响。综合已有研究，形成了几何结构适配—抽注能力适配—浸出反应适配—生产过程动态适配的井网设计与评价理念，未来应加强含矿层非均质精细表征、流动—反应—渗透性演化耦合、现场长期验证及智能化动态调控，推动地浸采铀井网由静态设计向全生命周期的动态优化发展。

关键词：砂岩型铀矿床；地浸采铀；井网设计；井网优化；非均质性；反应性溶质运移；动态调控

中图分类号：TL212.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1007-7545(2026)11-2283-11

引用格式：陈梅芳，阙为民，赵利信，等. 地浸采铀井网设计与优化研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分)，2026(11): 2283-2293. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.11.002.

Chen Meifang, Que Weimin, Zhao Lixin, et al. Research Progress in Well-Pattern Design and Optimization for In-Situ Uranium Leaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(11): 2283-2293. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.11.002.

铀是重要战略资源，砂岩型铀资源的地浸开发占比已超过全球天然铀生产的50%。地浸(原地浸出)开发工艺通过抽、注液钻井构建人工地下水动力场，将浸出剂输送至含矿含水层，并将含铀浸出液汇集至抽液井。国内外工程实践表明，井网布置及抽注液量调控需同时满足矿体可浸性、含矿层渗透性、水动力边界和环境控制等要求[1-4]。因此，地浸采铀的井网并非单纯的钻井几何组合，而是需要综合考虑矿体地质条件、地下水流动、水岩反应和生产运行的核心工程，具体涉及抽注液井的空间组合(井型、井距)及抽注运行构成的水动力控制系统。

井网控制着地浸采区水动力边界和浸出剂运移过程。抽、注液井的空间位置、数量配置、井距及运行流量共同决定水力梯度、渗流路径、浸出剂到达时间和有效控制范围。我国早期研究主要围绕抽注平衡、井型配置和钻井密度展开[1,5-7]，随后逐步引入Visual-MODFLOW软件，采用粒子追踪等地下水动力数值模拟技术，对井距、溶浸范围和流场控制进行定量评价[8-17]。相关研究推动了井网设计由经验布置向参数化、可计算和可比较的工程设计转变，但不少

收稿日期：2026-09-07　　**修回日期：**2026-10-07　　**录用日期：**2026-10-08

基金项目：铀资源探采与核遥感全国重点实验室基金项目(NKLUR-2025-ZD-011)

作者简介：陈梅芳(1983—)，女，博士，正高级工程师；**通信作者：**苏学斌(1968—)，男，中国工程院院士

©Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy) Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

研究仍将均质地层、固定渗透参数和规则井网作为基本假设。

随着开发对象逐步向低渗透、深埋藏和复杂非均质砂岩铀矿体拓展，传统井网应用的局限性日益突出。砂体的岩相、粒度、胶结程度及泥质隔夹层的空间变化可造成渗透率在平面和垂向上的差异，并可形成优势通道或低渗透区[18]；与此同时，矿物溶解与沉淀、胶体和细颗粒运移以及近井堵塞等过程还会引起渗透性能和单井注液能力的动态变化[19-20]。因此，即使初始井网具有较好的水动力匹配性，生产中后期仍可能因含矿层性质和铀剩余资源空间分布的变化而发生失配。已有抽注液井功能转换实践表明，通过改变既有钻井的抽注功能可重构局部流场、改善低效浸出区[21]；国内亦提出了基于原有井网功能互换与重组的二次开发方法[22]。

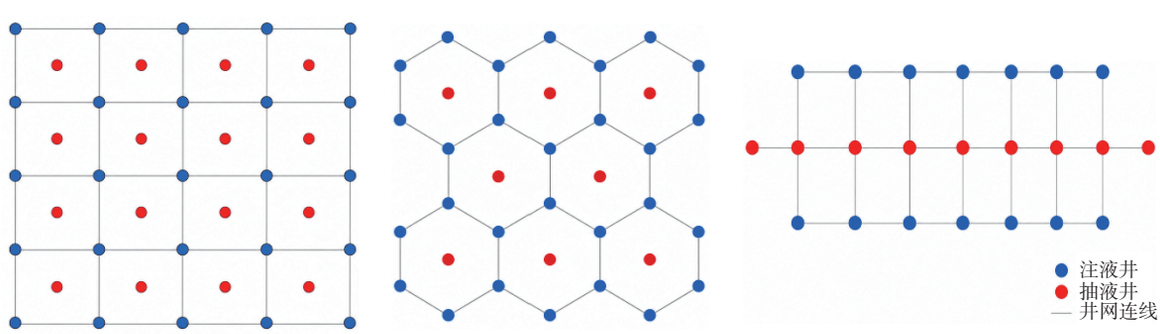
近年来，井网研究逐步由既定方案评价转向非均质与不确定条件下的优化设计。快速行进法(Fast marching method，FMM)可用于快速识别溶浸死角和筛选候选井位[18]，机器学习代理模型可降低反应性溶质运移模型反复调用的计算成本[23]，多目标优化则可同时处理资源回收、经济性及环境约束[24]。Qiu等[25]进一步将深度学习、距离聚类和多地质实现用于现场尺度七点型井场控制策略优化。这些研究表明，井网优化的重点已由单纯比较井型优劣，转向识别井网失配原因、针对性重构流场并利用现场数据验证优化效果。

基于上述认识，本文围绕井型选择、井距与抽注流量调控、非均质流动—反应过程、自适应井位优化等关键问题，对国内外相关研究进行系统梳理，重点比较不同技术方法的适用条件、应用效果及局限，探讨地浸采铀井网优化面临的主要问题与发展方向。

1 井型类型及工程应用

1.1 井型类型及流场的水动力特征

地浸采铀常用井型主要包括五点型、七点型和行列式等，布置形式如图1所示。不同井型的本质差异在于抽、注液井数量关系及其空间组合，由此形成不同的汇流、补给和定向渗流浸出特征[1,6]。井型选择应服从矿体几何形态、含矿层渗透性与各向异性、单井抽注液能力及地表工程条件，而不宜脱离场地条件比较其绝对优劣。



(a)五点型 (b)七点型 (c)行列式

图1 典型地浸采铀井网布置

Fig. 1 Typical wellfield patterns of in-situ leach uranium mining

五点型(图1(a))以1个抽液井和周围4个注液井构成基本单元，规则条件下具有浸出响应快、浸采单元组合灵活等特点[1,6,14]。对于渗透性较好、注液能力能够满足生产需求的矿体，五点型便于形成较高的抽液井密度和生产能力；但在非均质条件下，规则等距布置仍可能因优势通道造成局部短路，使几何覆盖范围与实际有效浸出范围出现偏离。

七点型(图1(b))以1个抽液井与外围6个注液井组成，通常通过增加注液井配置强化对中心抽液井的补给，在注液能力受限、需提高抽液井周边注入能力的条件下具有一定优势[1,6,14]。其较高的注液井数量配置有利于扩大水动力控制范围，但在相同钻井总数下抽液井数量占比相对较低，采区生产能力及经济性需结合单井抽注能力、井距和矿体连续性综合评价。

行列式井型(图1(c))将抽液井与注液井按排或列相间布置，主要形成近似定向的井间渗流浸出，可顺应狭长矿体、古河道方向或边界复杂矿体的展布[1,6,11]。该井型对主渗透方向较为敏感，当井行列排布方向与优势渗流方向匹配时，有利于形成较连续的推进前缘；若方向选择不当，则可能加剧沿高渗带

的优先运移和低渗区旁路。

1.2　典型矿山井型及工程应用

美国Smith Ranch、澳大利亚Honeymoon等矿山以五点型为主[2-4]；哈萨克斯坦Tortkuduk等矿山采用行列式[26]；我国钱家店铀矿采用七点型[22]，蒙其古尔、库捷尔太等铀矿以五点型为主，郎卡等深部铀矿床则开始探索水平注入—垂直抽出的复合井型[27]。国内外典型砂岩铀矿井网布置及案例见表1。根据我国地浸矿山发展历程，在条件试验、扩大试验和工业生产阶段，五点型、七点型、行列式及组合井型均有实际应用，井型选择表现出明显的场地适配特征[28]。

1.3　井型适用性与选择原则

井型选择需综合矿体几何形态、允许注液压力与单井抽注液能力等条件，且主要选择依据是保证采区抽注液量能基本平衡，几种井型适用条件见表2。

表1　国内外典型砂岩铀矿井型对比

Table 1　Comparison of typical sandstone uranium deposit well patterns at home and abroad

项目/矿区	国家	矿床或含矿层特点	井型类型
Smith Ranch等[2-3]	美国	层间氧化带型砂体，渗透性良好	五点型为主
Honeymoon[4]	澳大利亚	古河道砂体，渗透性良好	五点型为主
Tortkuduk[26]	哈萨克斯坦	Chu-Sarysu大型砂岩型矿床	行列式为主
内蒙古钱家店[22]	中国	高承压含矿层，注液难度大	七点型为主
新疆蒙其古尔、库捷尔太[28]	中国	中等渗透，浅部及中等深度铀矿	五点型为主
新疆郎卡[27]	中国	中等渗透，埋藏深度达到800~1 100 m	竖井体系及水平注入—垂直抽出

表2　几种井型的工程特征与适用条件

Table 2　Engineering characteristics and applicable conditions of several typical well patterns

井型	基本结构	主要优势	局限	生产期可调整性
五点型	中心1抽液井+外围4注液井	汇流强、响应快	含矿层渗透性低时单井注入量小	高，可转多种组合井型
七点型	中心1抽液井+外围6注液井	注液井数量多，满足低渗透条件下的注液问题	相同钻井总数下抽液控制点较少，运行效果受井距影响明显	中等，可调整为错开式行列式
行列式	抽液井与注液井行列相间	适应条带状矿体	对主渗透方向匹配度敏感，方向选取不当易加剧高渗带优先运移	中等，宜抽注井的行列反转
混合/不规则	按地质单元差异化配置	匹配非均质性	设计、施工和调度复杂	高，依非均质单元动态配置

井型选择应遵循“先几何形态匹配、后抽注液能力匹配、再浸出反应匹配”的顺序：首先根据矿体宽度、连续性和矿体展布方向确定网格式或行列式；其次依据渗透性能力及单井可持续抽、注能力确定抽注液井配置比例；再结合浸出剂体系、反应速率和经济目标确定井距与抽注液量。由此，井型应被视为开采单元的动态属性，而不应作为整个采区长期不变的方案。

2　井距设计与抽注流量调控

2.1　井距选择与研究进展

井距直接影响钻井密度、水力梯度、流线长度和浸出剂运移时间。缩小井距通常可缩短注液井至抽液井的运移路径，提高采区启动响应速度并减少规则几何条件下的低控制区，但同时会增加钻井数量和地表管网投资；增大井距可降低前期工程投入，却可能延长浸出剂到达时间，并使偏离优势流线的资源长期处于低效浸出状态。因此，合理井距实质上是资源回收程度、生产周期与工程投资之间的综合权衡[6,27,29-30]。

井距优化的关键难点在于，平面几何距离并不能直接表征实际的有效浸出距离。受非均质性和各向异性影响，相同井距可对应不同的渗流路径、流速和浸出剂到达时间；同时，酸法与CO_2+O_2等中性浸出体系在反应速率、酸耗或耗氧过程、主要元素迁移及化学沉淀方面存在差异[30-35]。因此，水力连通并不必然意味着有效浸出：当浸出剂停留时间不足，或有效组分在到达含铀矿石前被围岩反应大量消耗时，即使抽注井之间连通良好，也可能形成浸出反应受限区。

现有井距研究主要从技术经济分析、水动力数值模拟和室内长距离浸出试验等角度开展。阙为民[7]从投入产出关系讨论经济井网密度；徐强等[8]利用Visual-MODFLOW比较了23、27、30 m井距，并在技术-经济综合评价后选择27 m；张建华等[11]通过行列式和七点型模拟比较了不同井距下的水头、铀浓度分布和流线；王辎鹏[14]以净现值模型比较了五点型、七点型及不同井深方案；陈梅芳等[30]利用长距离管状浸出试验讨论井距对铀浸出路径的影响。上述研究为井距设计提供了依据，但尚未形成适用于不同矿床条件的统一井距优化流程。

2.2 抽注流量调控研究进展

抽注流量控制主要针对采区总量平衡与局部有效平衡问题。为了限制浸出剂向采区外扩,采区运行通常维持总抽液量略大于总注液量,但抽大于注过多会引入天然地下水、稀释浸出液,并增加蒸发处理负荷[9-11]。相关研究表明,洗井恢复注液能力后,抽液井铀浓度可随有效注液量恢复而提高[10];刘正邦等[12]提出依据外围渗流损失控制抽注量,Zhang等[36]则利用水动力模拟说明注液流量调节能改变溶浸范围。因此,抽注液流量配置取决于采区的边界条件、单井注入极限和环境控制目标,不应采用固定比例。

2.3 井距及抽注流量调控存在的问题

现有井距优化研究多采用固定渗透参数或均质化地层模型,难以充分反映实际地浸过程中渗流路径、优势通道与反应路径的差异。同时,抽注平衡通常以采区总量进行核算,容易掩盖局部高渗区短路循环与低渗区浸出剂供给不足等问题。

因此,可将“有效井距”定义为在满足浸出剂运移时间、有效反应程度和技术经济边界条件下形成的等效抽注控制距离,而不宜以平面几何间距表征。相应地,抽注运行控制也应由采区总量平衡进一步细化为浸采单元局部平衡,并综合利用流量、压力、水位、井间示踪及特征离子浓度等动态响应识别实际井间联系,使井距和单井抽注能力配置由固定设计参数逐步转变为根据生产反馈动态修正的可调控变量。

3 井网模拟、优化与动态重构研究进展

3.1 非均质约束下的数值模拟与反应性溶质运移

井网与矿体失配的重要原因之一是含矿层具有显著的多尺度非均质性。宏观尺度上,砂体边界、矿体形态及泥岩隔夹层控制可浸空间;中观尺度上,岩相和胶结程度差异造成渗透性及各向异性变化;生产过程中,矿物溶解与二次沉淀、胶体及细颗粒迁移又会持续改变孔隙结构和近井渗透性能[17-19,32]。在此条件下,规则等距井网易在高渗区形成优势通道和低效循环,而低渗区则可能因浸出剂通量不足长期处于低效浸出状态。陈梅芳等[37]基于多源信息融合开展了地浸采区三维建模,将地质、矿体及生产相关信息纳入统一空间模型,为含矿层非均质性精细表征、井网局部调整及后续动态更新提供了建模基础。针对生产过程中含矿层渗透性演化问题,刘石玉等[34]从矿物黏土化蚀变、化学沉淀等方面分析了地浸过程中含矿层堵塞特征;王伟豪等[38]通过井间示踪揭示了地浸过程中不同渗流通道渗透性的差异化演化;刘雪峰等[35]进一步指出,酸法地浸过程中部分通道渗流速度随开采时间明显降低,表明浸出反应会持续改变钻井间的孔隙结构及渗流条件。

需要强调的是,水动力覆盖并不等同于浸出反应的有效覆盖。高渗区虽然能够快速获得浸出剂补给,但过短的停留时间可能导致反应不充分;低渗区虽具有较长停留时间,却可能因浸出剂通量不足而受到浸出剂传质限制。因此,非均质条件下的低效浸出区既包括流场控制不足形成的水动力低效区,也包括反应时间或浸出剂供给不足形成的反应低效区,二者共同决定实际有效浸出范围。

3.1.1 主要难题与基础方法

地下水流数值模拟是识别井网是否适配的基础。MODFLOW将抽、注液井作为源汇项,通过达西定律和质量守恒求解渗流场,并利用空间变异的渗透率和边界条件表达含矿层的非均质特性[39-40];国内已将Visual-MODFLOW软件应用于井距、抽注比和溶浸范围评价[8,11,13,15-17]。MODPATH可进一步获得渗流路径、运移时长和汇水范围[9,41],井间示踪则能够对模型中钻井之间的连通性和优势通道进行现场约束[42-43]。这些方法解决了浸出剂向哪里流、多长时间到达的问题。

为进一步探讨浸出剂到达后能否有效浸出,地浸井网研究引入了反应性溶质运移模型。PHREEQC、MT3DMS和HYTEC等工具可分别处理水化学平衡、多组分迁移和流动—反应性溶质运移耦合[26,43-45]。阙为民[31]较早将水动力、化学动力学与溶质迁移联系起来;Tortkuduk大型井场三维HYTEC模型通过现场生产数据进行校准,实现了工业尺度生产预测[26]。这类模型使井网评价由溶浸范围覆盖扩展到铀浓度、浸出剂消耗和反应前锋推进。在耦合模拟方面,牛庆合等[46]建立了渗流—化学—应力多场耦合模型,用于分析CO_2+O_2地浸条件下渗流场与化学反应的相互作用;张传飞等[47]采用COMSOL+PHREEQC耦合方法,将渗流过程与浸出反应联系起来。上述研究表明,井网评价正在由固定渗透场条件下的水动力或反应性溶质运移模拟,向能够考虑反应过程及多孔介质性质变化的多场耦合模拟发展。

3.1.2 反应性溶质运移研究进展与计算瓶颈

反应性溶质运移模型的主要瓶颈是参数可识别性和计算成本。矿物成分与动力学参数、比表面积、

孔隙度、弥散度及空间渗透性能均存在不确定性，在三维大井场中反复调用模型代价极高。Kurmanseiit等[43]采用流线分解将三维反应问题转化为沿流线的一维求解，在保持较小误差的同时提高计算效率；Wang等[23]进一步采用BPNN代理反应性溶质运移模型，在含水层参数和价格不确定条件下优化酸浓度与注入速率；Qiu等[24]将深度学习、多目标优化和地质统计结合，使地浸优化开始由确定性的单一优化方案转向不确定性下的鲁棒决策。井网数值模拟与优化方法比较详见表3。

表3　地浸井网数值模拟评价与优化方法比较

Table 3　Comparison of numerical simulation evaluation and optimization methods for in-situ leach well networks

方法	主要输入	评价内容	计算效率	适合阶段	主要局限
解析/经验模型	渗透系数、井距、流量	井距、抽注能力、经济密度	很高	方案初筛	难表达复杂边界和非均质
MODFLOW/粒子追踪	渗流场、水头、井流量	水头、流线、到达时间、控制范围	中等	井网比选/生产评价	不直接描述水岩反应
反应性溶质运移RTM	渗流场+矿物、水化学、动力学	铀浓度、浸出试剂消耗、反应前锋	较低	精细预测/历史拟合	参数多、计算量大
FMM/流线降维	渗流场、井位、扩散/速度函数	覆盖过程、盲区、到达时间	很高	大尺度井位快速筛选	化学反应表达有限

总体而言，水动力数值模型适合快速识别流场结构和溶浸死角，反应性溶质运移模型适合评价铀溶解与浸出剂利用，现场示踪和生产数据则用于约束和校准模型。砂岩铀矿地浸开发未来井网评价至少应联合四类指标：浸出剂的有效覆盖体积、浸出剂到达时间离散度、反应前锋同步性和浸出液铀浓度响应；对于酸法浸出还需考虑围岩矿物溶解与沉淀堵塞，而对于中性CO_2+O_2浸出则应进一步考虑耗氧与碳酸盐/碳酸氢盐络合对有效反应距离的限制。

3.2　自适应井位与多目标优化

3.2.1　优化难点与技术路径

传统数值模拟适用于对预设井网方案进行对比和评价，但当井位、井型、井距以及单井抽注液量同时作为待优化变量时，候选方案数量将呈指数级增长；若进一步考虑多种非均质地质情况，反复调用三维流动—反应模型进行全局搜索将产生极大的计算负担。因此，自适应井网优化的关键不仅在于提高模型精度，而在于建立兼顾计算效率与工程约束的分层筛选机制，从大规模候选空间中快速识别出具有可实施性的方案。

针对这一问题，近年形成了三类互补路径：一是利用FMM和流线方法快速估算钻井影响范围和到达时间；二是利用聚类方法减少非均质地质模型的计算冗余；三是以代理模型替代高成本数值模型，并与粒子群、遗传算法和多目标优化耦合。

3.2.2　快速筛选、代理模型与多目标优化

FMM以Eikonal方程描述压力或扩散前沿的到达时间，可在不重复求解完整地下水方程的情况下快速估算钻井影响范围。Jia等[18]将抽、注液井相互作用引入改进FMM算法，在均质和非均质模型中取得与传统流线模拟较一致的结果，并用于识别物理溶浸死角；其工程算例中，井位优化后流场覆盖性能提高约10%。这表明FMM适合承担大尺度井场的候选方案快速筛选。

聚类与代理模型主要用于处理地质不确定性和高计算成本。以空间距离、岩性、品位、渗透率和矿体厚度构造广义距离后，可利用K-means等方法将复杂采区划分为性质相近的开采单元[48]。Qiu等[25]将ResNet-LSTM代理模型与距离聚类结合，从多组非均质地质模型中选取代表性子集，并用于松辽盆地中性地浸采铀的七点型井场控制策略优化，相较未优化方案净现值提高15.2%，利用该模拟方法可为现场决策提供依据。

优化变量也开始突破传统垂直井规则井型。Li等[27]针对新疆深部砂岩铀矿提出“水平井注入—垂直井抽出”模式，利用井+含矿层耦合模型、粒子追踪和多目标算法优化了抽注参数与垂直井间距。在算法层面，PSO适于求解非线性、多峰问题[49]，NSGA-II能够给出回收率、成本与环境约束之间的Pareto最优解[50]，地质统计方法则为不确定性实现提供了基础[51]。

3.2.3　方法适用性与工程约束

上述方法显著提高了井网方案的搜索效率，但同时带来了模型外推和工程不可实施的风险。当代理模型训练样本不能覆盖真实地质状态，或优化目标仅采用流场覆盖率等单一指标时，所得方案可能在数学意义上最优，却难以满足现场实施条件。因此，钻井施工条件、地表管网布置、抽注单元完整性、单井抽注液能力上限以及环境控制边界均应作为显式约束纳入优化。较为合理的技术路线是：首先利用FMM或聚类方法缩小候选空间，再通过代理模型开展多目标搜索，随后采用高保真的非均质反应性溶

质运移模型验证少量候选方案,最终利用现场生产数据进行校准与迭代。

3.3 生产期井网动态重构与调控

3.3.1 井网重构难点

初始井网优化主要回答钻井如何布置,而在役采区更需要解决既有井网如何持续控制剩余铀资源的问题。随着浸出推进,高效浸出区逐渐贫化,剩余铀资源向低效浸出区集中;与此同时,近井堵塞、矿物反应和细颗粒迁移等过程会改变局部渗透性能及单井抽注液能力,使初始流场与剩余资源分布逐步失配。若长期维持固定的抽注功能和流量配置,高渗优势通道可能形成重复循环,而低渗区仍难以获得足够的浸出剂供给,最终需要通过井网调整、局部补井或二次开发方可加快剩余铀资源回收。近期研究进一步表明,含矿层堵塞及渗透性演化具有明显的空间差异和时间累积效应[34-35,38],这意味着生产期井网失配也可能来自抽注井间的优势通道、低渗区及近井地带水力性质的持续变化。

因此,生产期井网优化的核心并非重新寻找一套静态“最优井型”,而是充分利用现有钻井,通过抽注功能转换和流量再分配重构地下水渗流场,使浸出剂控制范围能够匹配剩余铀资源分布和含矿层渗透状态的演化。

3.3.2 抽注功能转换与调控

抽注井功能转换是最经济的流场重构和调控方式。Shayakhmetov 等[21]比较了不同井型及反转时机后指出,同功能井之间可能形成停滞区,对九点型井网实施抽注井功能反转可使生产效率提高 3%~18%,且在浸出液平均铀浓度达到峰值后实施反转具有较好的经济性。国内学者在井网优化重组方面也提出,在五点型、七点型和行列式基础上互换抽注井功能,可改变液流方向和降低溶浸死角[22]。

抽注井功能转换的前提是有效识别低效溶浸区。单纯依赖浸出液铀浓度作为唯一判定依据具有局限性,因为铀浓度下降既可能意味着矿体已充分浸出,也可能是由天然地下水稀释、流场绕流或低效溶浸造成的;更可靠的判别应联合井间示踪、单井流量、注入压力、水位、pH/E_h、累计液固比和三维流场反演。对于边界浸采单元应优先维持向采区内部的水力梯度,低渗区可适当增强周边注液或降低相邻抽液井强度,高渗通道则可通过流量再分配或功能转换延长反应路径。

3.3.3 井网可重构性评价

现有井网设计通常侧重抽注液总量、初始控制范围和钻井数量,对生产中后期能否利用既有钻井重构流场关注不足。对于全生命周期开发而言,井网可重构性应与初始水动力效率共同评价。初始阶段水动力效率略低、但具备多种抽注功能转换路径的井网,比难以调整的静态井网具有更好的长期适应性。因此,新采区设计阶段应预留抽注功能互换、局部钻井加密和流量再分配空间,并将生产后期对剩余铀资源的再控制能力纳入井网评价体系。

4 结论与展望

4.1 结论

砂岩型铀矿地浸开发井网研究已由早期以五点型、七点型和行列式等规则井型及几何井距为核心的经验设计,逐步发展为综合考虑含矿层非均质性、水动力过程、浸出反应及生产动态变化的系统优化。主要进展与认识可归纳为以下三个方面。

1)井型和井距不存在脱离矿床条件的统一最优化方案。五点型、七点型和行列式等井型各具特点,其适用性受矿体几何形态、含矿层渗透性及各向异性、单井抽注能力和浸出工艺等因素共同制约。井距也不应仅以平面几何距离确定,而应综合考虑浸出剂运移时间、有效反应程度和工程经济条件。

2)井网评价已由几何覆盖、水动力模拟、反应性溶质运移模拟向协同评价和不确定决策转变。单纯满足抽注井之间的水力连通,并不意味着能够形成有效浸出。含矿层非均质性以及浸出过程中的矿物反应、堵塞和渗透性能变化均会影响实际浸出范围。因此,井网设计应兼顾水动力控制、浸出剂有效供给和铀矿物反应过程,抽注调控也应由采区总量平衡逐步向局部有效平衡发展。

3)井网优化正在由开发初期的静态设计向生产期动态调控发展。数值模拟、反应性溶质运移、快速筛选、代理模型和多目标优化等方法提高了井网评价与方案搜索能力,而生产过程中剩余铀资源分布和含矿层渗透性能持续变化,又要求井网具备动态调整和重构能力。由此,可将地浸采铀井网设计与评价概括为几何结构适配—抽注能力适配—浸出反应适配—生产过程动态适配四个层次。

4.2 展望

当前井网研究已由单一几何参数优化逐步转向

多因素、多过程协同优化，但在非均质含矿层精细表征、渗透性能动态演化、现场长期验证及生产期实时调控等方面仍存在不足。未来地浸采铀井网研究应重点围绕以下几个方面展开。

1)加强含矿层非均质精细表征及参数动态更新。综合地质、测井、水文试验、井间示踪和生产动态等多源信息，提高对砂体展布、渗透性差异及优势渗流通道的识别能力，并利用生产数据持续修正井网模型，逐步形成静态地质建模—动态水动力反演—生产数据更新的迭代建模方法。

2)完善流动—反应—渗透性演化耦合模型。将矿物溶解与沉淀、细颗粒迁移和孔隙结构变化引入井网模拟，重点揭示浸出反应对含矿层渗透性能及钻井间流场的反馈作用，提高生产中后期井网有效开采能力。

3)加强现场长期验证与综合评价。建立典型采区长期对照试验，统一水动力控制、浸出效果、铀资源回收、工程经济和环境约束等评价指标，提高不同井型、井距及优化方法之间的可比性。

4)发展智能化动态井网调控技术。将在线监测、机理模型、代理模型和多目标优化相结合，动态识别低效浸出区和优势渗流通道，通过流量调整、抽注功能转换及局部井网重构，实现井网全过程优化。

综上，未来地浸采铀井网研究应由追求浸出剂的几何覆盖最大化逐步转向提高有效浸出体积和资源回收效率转变，并由开发初期的静态井网设计向可更新与可重构的全生命周期动态优化发展。

参考文献

[1] 王海峰，谭亚辉，杜运斌，等. 原地浸出采铀井场工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 1-60.
Wang Haifeng, Tan Yahui, Du Yunbin. In-situ leaching uranium mining well site technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 1-60.

[2] International Atomic Energy Agency. In situ leach uranium mining: an overview of operations: No. NF-T-1.4[R]. Vienna: IAEA, 2016. (IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-1.4).

[3] Mudd G M. Critical review of acid in situ leach uranium mining: 1. USA and Australia[J]. Environmental Geology, 2001, 41(3): 390-403.

[4] Bush P D. Development considerations for the Honeymoon ISL uranium project[J]. CIM Bulletin, 2000, 93: 65-73.

[5] 王海峰，苏学斌. 新疆伊宁地浸矿山井场抽注平衡问题的咱议[J]. 铀矿冶, 1999, 18(3): 145-149.
Wang Haifeng, Su Xuebin. Discussion of push pull equilibrium in well field at Yining in situ leaching mine, Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1999, 18(3): 145-149.

[6] 姚益轩. 原地浸出采铀井型研究[J]. 铀矿冶，2000，19(3): 153-160.
Yao Yixuan. Study on well patterns of in-situ leaching for uranium mining[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(3): 153-160.

[7] 阙为民. 原地浸出采铀井网密度的确定[J]. 金属矿山, 2002, 31(4): 17-20.
Que Weimin. Determination of well-network density for in-situ uranium leaching[J]. Metal Mine, 2002, 31(4): 17-20.

[8] 徐强，雷明信. 某地浸矿床抽注液井距研究：Visual-MODFLOW在某地浸矿山井距确定中的应用[J]. 中国矿业, 2012, 21(增刊1): 628-630.
Xu Qiang, Lei Mingxin. The research on interval between pump and affusion well of insite uranium mine[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(S1): 628-630.

[9] 周义朋，沈照理，孙占学，等. 应用粒子示踪模拟技术确定地浸采铀溶浸范围[J]. 中国矿业, 2015, 24(2): 117-120.
Zhou Yipeng, Shen Zhaoli, Sun Zhanxue, et al. Application study on particle tracer technique to calculate the in-situ leaching area of uranium mining[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(2): 117-120.

[10] 李兵，郝志华，陈勇. 钻孔抽注液量增大对浸出液铀浓度的影响分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊2): 286-289.
Li Bing, Hao Zhihua, Chen Yong. The effect of the pumping and pouring volume rising on the uranium concentration[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(S2): 286-289.

[11] 张建华，朱新铖，史骥. 某原地浸出铀矿井型及井距优化数值模拟[J]. 金属矿山, 2017, 46(3): 25-30.
Zhang Jianhua, Zhu Xincheng, Shi Ji. Optimization numerical simulation on well pattern and well spacing of an in-situ leaching uranium mine[J]. Metal Mine, 2017, 46(3): 25-30.

[12] 刘正邦，王海峰，闻振乾，等. 地浸采铀井场溶液运移特征与抽注液量控制研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(1): 23-26, 33.
Liu Zhengbang, Wang Haifeng, Wen Zhenqian, et al. Study on the characteristics of solution migration and drawing and injection control at well field in-situ leaching uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(1): 23-26, 33.

[13] 徐强. 地浸矿山抽注比对溶浸范围影响研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(增刊1): 93-97.
Xu Qiang. Study on influence of the ratio of drawing-injection

to in-situ leaching solution diffusion range[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(S1): 93-97.

[14] 王辎鹏. 可地浸砂岩型铀矿井型井距优化：以5点型和7点型为例[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(9): 171-174.
Wang Zipeng. Optimization of well spacing for leachable sandstone type uranium mine: taking 5-point and 7-point patterns as examples[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(9): 171-174.

[15] 常云霞，谭凯旋，张翀，等. 地浸采铀井场溶浸范围的地下水动力学控制模拟研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2020, 34(5): 29-36.
Chang Yunxia, Tan Kaixuan, Zhang Chong, et al. Simulation study on groundwater dynamics control of leaching range of in-situ uranium well field[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2020, 34(5): 29-36.

[16] 霍晨琛，肖诗伟，陈帅，等. 某地浸铀矿山开采条件下地下水流场特征分析[J]. 铀矿冶, 2022, 41(4): 359-367.
Huo Chenchen, Xiao Shiwei, Chen Shuai, et al. Analysis of groundwater flow field characteristics under mining conditions of an in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4): 359-367.

[17] 吴慧，罗跃，李寻，等. 利用数值模拟确定地浸采铀过程中溶浸范围[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4): 28-37.
Wu Hui, Luo Yue, Li Xun, et al. Determining the leaching range of in-situ uranium mining by numerical simulation[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(4): 28-37.

[18] Jia Mingtao, Luo Bosheng, Lu Fang, et al. Improved FMM for well locations optimization in in-situ leaching areas of sandstone uranium mines[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(9): 3750-3757.

[19] Zeng Sheng, Song Jiayin, Sun Bing, et al. Seepage characteristics of the leaching solution during in situ leaching of uranium[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(2): 566-574.

[20] 李晓剑，姜岩，姚益轩，等. 提高地浸采铀钻孔涌水量的技术措施及其应用[J]. 铀矿冶, 2010, 29(2): 57-60, 69.
Li Xiaojian, Jiang Yan, Yao Yixuan, et al. Technical measures of reinforcing the discharge of in-situ leaching drillholes and applications[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2010, 29(2): 57-60, 69.

[21] Shayakhmetov N M, Alibayeva K A, Kaltayev A, et al. Enhancing uranium in-situ leaching efficiency through the well reverse technique: a study of the effects of reversal time on production efficiency and cost[J]. Hydrometallurgy, 2023, 219: 106086. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106086.

[22] 苏学斌，李喜龙，刘乃忠，等. 一种地浸采铀井网优化重组方法: CN201710059397.5[P]. 2017-07-07.
Su Xuebin, Li Xilong, Liu Naizhong, et al. A method for optimization and reconfiguration of an in-situ leaching uranium well pattern: CN201710059397.5[P]. 2017-07-07.

[23] Wang Bing, Luo Yue, Qian Jiazhong, et al. Machine learning-based optimal design of the in-situ leaching process parameter (ISLPP) for the acid in-situ leaching of uranium[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130234. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130234.

[24] Qiu Wenjie, Yang Yun, Song Jian, et al. A deep-learning-based multiobjective optimization for the design of in-situ uranium leaching system under multiple uncertainties[J]. Journal of Hydrology, 2025, 651: 132576. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132576.

[25] Qiu Wenjie, Liu Dianguang, Yang Yun, et al. Integrating deep learning and distance-based clustering to optimize the field scale in situ uranium leaching system in heterogeneous reservoirs[J]. Water Resources Research, 2026, 62(3): e2025WR041741. DOI: 10.1029/2025wr041741.

[26] Collet A, Regnault O, Ozhogin A, et al. Three-dimensional reactive transport simulation of uranium in situ recovery: large-scale well field applications in Shu Saryssu Bassin, Tortkuduk deposit (Kazakhstan)[J]. Hydrometallurgy, 2022, 211: 105873. DOI: 10.1016/j.hydromet.2022.105873.

[27] Li Zhaokun, Su Xuebin, Jiao Yangquan, et al. A new comprehensive model to simulate and optimize fluid flow in complex well-formation system for in situ leaching uranium[J]. Energy Science & Engineering, 2025, 13(3): 1089-1102.

[28] 王海峰. 中国原地浸出采铀发展史——第二部分：知行合一, 百花齐放[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(12): 221-232.
Wang Haifeng. History of in-situ leaching of uranium in China: Part Ⅱ: combine theory with practice, all flowers bloom together[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(12): 221-232.

[29] 姚益轩，阙为民，苏学斌，等. 地浸采铀工程技术经济分析[J]. 铀矿冶, 1999, 18(4): 230-237.
Yao Yixuan, Que Weimin, Su Xuebin, et al. Techno economic analysis for uranium mining by in situ leaching[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1999, 18(4): 230-237.

[30] 陈梅芳，苏学斌，陈箭光，等. 基于管状浸出实验的地浸

开采井间距研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(7): 181-186.
Chen Meifang, Su Xuebin, Chen Jianguang, et al. Study on well spacing in in-situ leaching mining based on the tubular leaching experiment[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(7): 181-186.

[31] 阙为民. 原地浸出采铀地球化学动力学模型研究[J]. 铀矿冶, 2004, 23(1): 1-8.
Que Weimin. Geochemical kinetics and mass transport of in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2004, 23(1): 1-8.

[32] 袁新, 周义朋. 地浸采铀水岩作用数值模拟研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(1): 53-58.
Yuan Xin, Zhou Yipeng. Progress of numerical simulation for water-rock interaction of in-situ uranium leaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(1): 53-58.

[33] 吉宏斌, 孙占学, 周义朋, 等. 不同地浸采铀工艺主要元素迁移强度与饱和状态研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(8): 1386-1393.
Ji Hongbin, Sun Zhanxue, Zhou Yipeng, et al. Research on migration intensity and saturation state of main element in different in-situ leaching of uranium processes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(8): 1386-1393.

[34] 刘石玉, 刘金辉, 周义朋, 等. 地浸采铀过程中含矿层堵塞特征研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(8): 65-75.
Liu Shiyu, Liu Jinhui, Zhou Yipeng, et al. Study on characteristics of ore-containing layer blockage during in-situ leaching of uranium mining[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(8): 65-75.

[35] 刘雪峰, 刘金辉, 何挺, 等. 酸法地浸采铀过程中含矿层渗透性时空演化规律[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(5): 78-88.
Liu Xuefeng, Liu Jinhui, He Ting, et al. Spatiotemporal evolution of permeability of ore-bearing layer during acid in-situ leaching of uranium[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(5): 78-88.

[36] Zhang Chong, Xie Tingting, Tan Kaixuan, et al. Hydrodynamic simulation of the influence of injection flowrate regulation on in-situ leaching range[J]. Minerals, 2022, 12(7): 787. DOI: 10.3390/min12070787.

[37] 陈梅芳, 贾明涛, 苏学斌, 等. 基于多源信息融合的地浸采区三维建模与应用研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(增刊2): 364-372.
Chen Meifang, Jia Mingtao, Su Xuebin, et al. Research and application of 3D modeling in in-situ leaching area based on multi-source information fusion[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(S2): 364-372.

[38] 王伟豪, 刘金辉, 阳奕汉, 等. 地浸采铀过程中含矿层渗透性演化的示踪试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(2): 72-82.
Wang Weihao, Liu Jinhui, Yang Yihan, et al. Tracer test of permeability evolution of ore-bearing layer during in-situ leaching of uranium[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(2): 72-82.

[39] Harbaugh A W. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process[R]. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.

[40] Bear J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Elsevier, 1972.

[41] Pollock D W. User guide for MODPATH Version 7: a particle-tracking model for MODFLOW: 2016-1086[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, 2016.

[42] 王晓东, 吴黎武, 段柏山, 等. 井间示踪在新疆某地浸采铀中的试验研究[J]. 铀矿冶, 2014, 33(3): 130-133.
Wang Xiaodong, Wu Liwu, Duan Baishan, et al. Interwell tracer test in in-situ leaching uranium in one place of Xinjiang[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2014, 33(3): 130-133.

[43] Kurmanseiit M B, Tungatarova M S, Royer J J, et al. Streamline-based reactive transport modeling of uranium mining during in-situ leaching: advantages and drawbacks[J]. Hydrometallurgy, 2023, 220: 106107. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106107.

[44] Parkhurst D L, Appelo C A J. Description of input and examples for PHREEQC Version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations[R]. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chap. A43, 2013.

[45] Zheng Chunmiao, WANG P P. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems[R]. Vicksburg: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.

[46] 牛庆合, 何佳彬, 王伟, 等. 基于渗流-化学-应力多场耦合的砂岩型铀矿CO_2+O_2地浸开采的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(6): 144-152.
Niu Qinghe, He Jiabin, Wang Wei, et al. Numerical simulation of CO_2+O_2 in-situ leaching of sandstone type uranium deposit based on multifield coupling of seepage-chemistry-

stress[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(6): 144-152.

[47] 张传飞，何斌，骆桂君，等. 基于COMSOL+PHREEQC耦合数值模拟的浸出试验：以内蒙古某铀矿浸出工艺试验为例[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(1): 110-118.
Zhang Chuanfei, He Bin, Luo Guijun, et al. Leaching test study based on COMSOL+PHREEQC coupled numerical simulation: a case study of uranium leaching process in Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(1): 110-118.

[48] Macqueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]//Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley: University of California Press, 1967: 281-297.

[49] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia. IEEE, 1995: 1942-1948.

[50] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[51] Deutsch C V, Journel A G. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1998.

Research Progress in Well-Pattern Design and Optimization for In-Situ Uranium Leaching

Chen Meifang[1,2], Que Weimin[3], Zhao Lixin[1,2], Su Xuebin[2,4]

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China;
2. National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 101149, China;
3. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;
4. China National Uranium Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In-situ leaching (ISL) has become an important technology for the exploitation of sandstone-hosted uranium deposits because it enables uranium recovery through injection and production wells without conventional excavation of the orebody. The wellfield pattern is the core engineering system that establishes the artificial groundwater flow field, controls lixiviant migration, and determines the effective recovery of uranium-bearing solutions. As ISL development extends toward deeper, lower-permeability, and more heterogeneous sandstone uranium deposits, conventional regular well patterns face increasing difficulties in adapting to variations in orebody geometry, reservoir permeability, single-well injection-production capacity, leaching reactions, and production-induced changes in hydraulic properties. Well-pattern design and optimization have therefore evolved from simple geometric arrangement toward integrated regulation of flow, reaction, and production processes. This review systematically summarizes recent advances in well-pattern design and optimization for in-situ uranium leaching. First, the structural characteristics, applicable conditions, and engineering features of five-spot, seven-spot, and line-drive patterns were compared. Their suitability is shown to depend on orebody geometry, permeability and anisotropy, and sustainable injection-production capacity rather than on geometric configuration alone. Second, progress in well-spacing design and injection-production regulation were reviewed. Existing studies indicate that geometric well spacing cannot fully represent the actual transport and reaction distance in heterogeneous ore-bearing aquifers because identical spacing may correspond to different flow paths, lixiviant travel times, and local fluxes. Well-spacing evaluation should therefore shift toward an effective well spacing jointly constrained by hydraulic connectivity, lixiviant migration time, effective reaction extent, and techno-economic conditions. Injection-production regulation should likewise move from field-scale volumetric balance toward local effective balance at the leaching-unit scale. Third, advances in numerical simulation and optimization were summarized. Groundwater-

flow simulation and particle-tracking methods are useful for characterizing hydraulic heads, flow paths, travel times, and capture zones, whereas reactive transport modeling further incorporates aqueous chemistry, mineral reactions, reagent consumption, and uranium migration. More recently, the Fast Marching Method (FMM), streamline-based approaches, clustering, machine-learning surrogate models, and multi-objective optimization have improved the efficiency of candidate-well screening and optimization under geological uncertainty. Meanwhile, field observations and coupled modeling studies increasingly demonstrate that mineral dissolution and precipitation, clay alteration, fine-particle migration, and near-well clogging can modify permeability during production. Such dynamic changes, together with progressive uranium depletion, may cause the initial well pattern to become mismatched with the evolving hydraulic field and residual uranium distribution. Therefore, wellfield optimization should extend from initial static design to production-stage adjustment through flow-rate redistribution, injection-production function conversion, local infill, and model updating constrained by monitoring data. On the basis of these advances, a four-level framework of geometric configuration adaptability–injection-production capacity adaptability–leaching reaction adaptability–production-process dynamic adaptability is proposed for well-pattern design and evaluation. Future research should focus on high-resolution characterization and dynamic updating of reservoir heterogeneity, coupled flow–reaction–permeability evolution, long-term field validation, standardized multi-criteria evaluation, and intelligent dynamic control. These developments are expected to promote the transition of ISL wellfields from geometric coverage-oriented design toward effective leached-volume optimization, and from static initial design toward adaptive, life-cycle wellfield management.

Key words: sandstone-hosted uranium deposit; in-situ leaching; well-pattern design; well-pattern optimization; heterogeneity; reactive solute transport; dynamic regulation

Received date: 2026-09-07 **Revised date:** 2026-10-07 **Accepted date:** 2026-10-08

Foundation item: Project(NKLUR-2025-ZD-011) supported by the Foundation of National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing

First author: Chen Meifang; Tel: +86-010-51674327; E-mail: chenmf@cnmstc.com

Corresponding author: Su Xuebin; Tel: +86-010-64270269; E-mail: suxuebin@cnuc.cn