

安迪尔工区KT1孔成井全流程工艺实践及关键技术

张 蕾, 康 剑, 张志栋, 田 伟, 王 伟, 江善斌

(新疆维吾尔自治区地质局水文环境地质调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对南疆塔克拉玛干沙漠腹地地下水资源勘查的战略需求, 以安迪尔工区KT1勘探孔为工程载体, 系统构建500 m深度“先取心、后成井”、分层抽水试验井全流程工艺体系, 实现深部松散薄互层地层的精准识别、动态成井设计、高精度分层止水与Packer分层抽水试验一体化实施。通过岩心、测井、颗粒分析、易溶盐测试、抽水试验等多源信息融合, 精准划分含水层系统, 独立求取各层水文地质参数, 揭示地下水垂向水质分异规律。实践表明, 该工艺体系可有效破解沙漠区深孔钻探、粉细砂地层护壁、薄互层止水、低渗透层参数求取等技术难题, 建成“一井多层”监测开采井, 为干旱沙漠区地下水精准勘查提供可复制的技术范式与数据支撑, 对边疆水资源安全保障具有重要意义。

关键词: 成井工艺; 分层抽水试验; 水文地质参数; 多源信息融合; 监测井; KT1勘探孔; 南疆沙漠区

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0368-07

Full-process well construction practice and key technologies for KT1 borehole in the Andir work area

ZHANG Lei, KANG Jian, ZHANG Zhidong, TIAN Wei, WANG Wei, JIANG Shanbin

(Hydrogeology and Environmental Geology Survey Center, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang 830091, China)

Abstract: In response to the strategic demand for groundwater resource exploration in the hinterland of the Taklamakan Desert in southern Xinjiang, this study takes exploration borehole KT1 in the Andir work area as the engineering carrier. A full-process technical system for 500 m-deep layered pumping test wells with the philosophy of "coring first, well completion later" is systematically established, enabling integrated implementation of accurate identification of deep loose thin interbedded strata, dynamic well design, high-precision layered water shutoff and Packer-based layered pumping tests. By integrating multi-source data including core samples, well logging, grain size analysis, soluble salt tests and pumping tests, the aquifer system is precisely delineated, hydrogeological parameters of each layer are obtained independently, and the vertical differentiation law of groundwater quality is revealed. Engineering practice demonstrates that the proposed technical system can effectively tackle technical challenges including deep borehole drilling in desert areas, borehole wall stabilization in silty-fine sand strata, water shutoff for thin interbeds, and parameter acquisition for low-permeability layers. A multi-aquifer monitoring and production well is constructed, providing a replicable technical paradigm and data support for precise groundwater exploration in arid desert regions, and carrying great significance for water resource security in border areas.

Key words: well completion technology; layered pumping test; hydrogeological parameters; multi-source information fusion; monitoring well; KT1 exploration borehole; desert area of southern Xinjiang

0 引言

水资源短缺是制约南疆经济社会发展与生态

安全的核心瓶颈。塔克拉玛干沙漠腹地地表水系匮乏, 地下水赋存于巨厚第四系松散沉积物中, 呈

收稿日期: 2026-08-26; 修回日期: 2026-09-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.049

第一作者: 张蕾, 男, 汉族, 1989年生, 探矿工程专业, 从事探矿工程施工技术与管理工作, 新疆昌吉市绿洲南路25号(831100), 1263071101@qq.com。

引用格式: 张蕾, 康剑, 张志栋, 等. 安迪尔工区KT1孔成井全流程工艺实践及关键技术[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 368-374.

ZHANG Lei, KANG Jian, ZHANG Zhidong, et al. Full-process well construction practice and key technologies for KT1 borehole in the Andir work area[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 368-374.

现含水层与隔水层薄互层交替、埋藏深、循环迟缓、矿化度垂向差异显著特征。传统浅部勘探与混合抽水手段难以精准刻画含水层结构、获取可靠参数,无法满足水资源精细化管理与可持续利用需求。

安迪尔工区作为南疆沙漠找水重点区域,亟需突破深部地下水勘查技术瓶颈。为此,“南疆沙漠区安迪尔和麻扎塔格山南找水及应用示范项目”布设KT1综合勘探孔,集地质取心、水文勘探、分层监测、分层试验功能于一体,目标深度500 m,旨在查明深部地层结构、识别含水层展布、获取分层水文地质参数与水质特征,构建长期监测井,为沙漠区地下水赋存规律研究与资源评价提供核心依据。

KT1孔施工面临沙漠极端环境与复杂技术双重挑战:极端干旱、风沙肆虐、后勤保障困难;深部粉细砂地层取心率低、井壁易坍塌、薄互层高精度止水难度大、低渗透层稳定流试验周期长。本文基于KT1孔全流程实践,提炼核心工艺、关键技术与质控要点,形成干旱沙漠区深部地下水勘查标准化体系,为同类工程提供借鉴。

1 工区概况与KT1孔总体设计

1.1 工区自然地理与水文地质背景

安迪尔工区位于新疆民丰县东北约50 km,属塔克拉玛干沙漠腹地,总面积约2600 km²,为暖温带极端干旱荒漠气候,年均降水量10~20 mm,蒸发量2500~3400 mm,地表温度最高超60℃,地形为复合型沙丘,地势南高北低,海拔1250~1350 m。

水文地质上,第四系松散沉积物孔隙水为唯一可利用水源,垂向分带明显^[1]:

(1)浅部潜水(30 m以浅):粉砂、细砂为主,富水性差,矿化度>3 g/L,水质恶劣。

(2)深部承压—半承压水(30 m以深):粉砂、细砂夹中砂、含砾粗砂,隔水层为黏土、亚黏土薄层,顶板埋深约30 m,水位埋深9~10 m,单井涌水量500~1000 m³/d,为低矿化度目标层,补给来源为南部山前侧向径流与古河道渗漏,水化学类型以Cl·SO₄-Na型为主。

1.2 KT1孔设计理念与目标任务

KT1孔布设于安迪尔乡东北约9.4 km的沙漠区,位于前期勘查孔MK1与MK2之间的空白地带,

具有重要的勘探控制意义。其设计理念体现了“探明结构、分层评价、一井多用、绿色勘查”的先进思路,符合《水文水井地质钻探规程》及相关规范要求^[2-3]。

设计孔深500 m,旨在控制区域地下水系统中具有供水意义的主要含水层段。其核心目标任务如下。

(1)地层结构探明:全孔连续取心,获取完整的地层岩性柱状图,进行详细的沉积学编录,系统采集第四纪年代学(光释光、古地磁)、环境代用指标(粒度、磁化率、易溶盐等)样品,服务于古气候与古环境重建^[4]。

(2)含水层精细刻画:通过岩心观测、颗粒分析和综合水文测井(视电阻率、自然电位、自然伽玛),精准划分含水层与相对隔水层的层位、厚度、岩性及空间组合关系^[5]。

(3)成井与分层试验:基于上述信息,设计并实施分层成井方案。采用Ø219 mm钢质井管,在目标含水层段下入滤水管,其间用黏土球可靠止水,建成“一井多层”的试验井。最终利用Packer栓塞系统对各目的层进行分层(段)稳定流抽水试验^[6]。

(4)水文地质参数获取:通过抽水试验数据,计算各含水层的渗透系数(K)、导水系数(T)、储水系数(S^*)、影响半径(R)及不同降深下的涌水量(Q)。

(5)水质评价与成因分析:在抽水试验过程中,分层采集地下水样品,进行全分析、微量元素及同位素($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, ^3H 等)测试,依据国家标准评价水质类别,并探讨水化学演化机理。

(6)长期监测功能:钻孔完工后,安装专用保护装置,预留为地下水长期动态监测井。

为实现上述目标,KT1孔采用了“一径到底”的终孔口径(Ø550 mm)和成井管径(Ø219 mm),但在施工工艺上,严格遵循“先取心探明地层,后扩孔优化成井”的递进式、动态化施工原则,确保工程决策始终建立在可靠的地质信息基础上。

2 成井全流程精细化工艺实践

KT1孔的顺利完工,依赖于一套环环相扣、层层递进的标准化工艺流程。该流程可概括为六个主要阶段,如图1所示,每个阶段均有其明确的目标、技术方法和严格的质量控制标准。

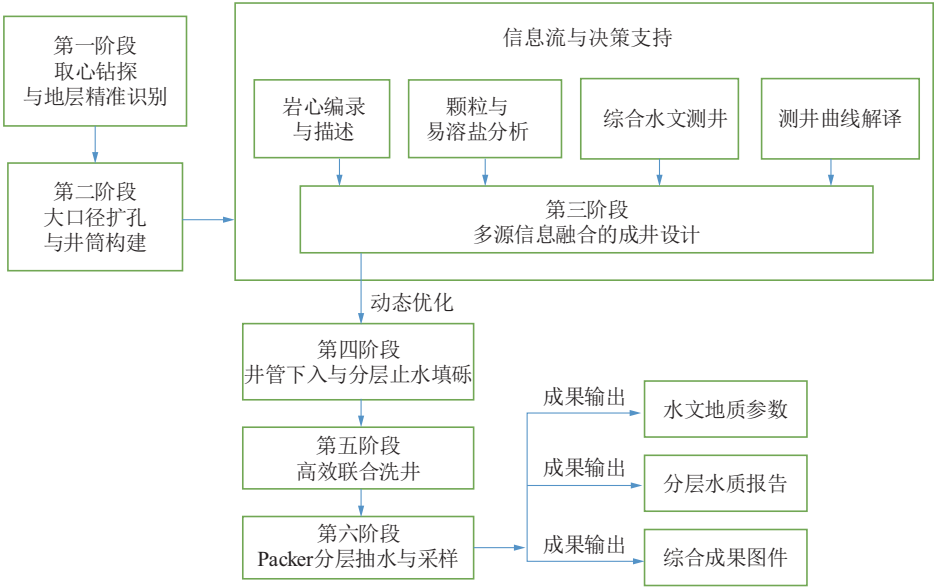


图1 KT1孔成井全流程工艺与决策支持系统

2.1 第一阶段:取心钻探与地层精准识别

本阶段成果质量直接决定后续所有工作的科学性与准确性,其核心目标是获取能够真实、完整反映地下地质信息的第一手实物资料^[7]。

(1)设备与工艺:采用XY-6N型岩心钻机、BW260型泥浆泵,三级变径,0~20 m $\varnothing$ 152 mm、20~230 m $\varnothing$ 133 mm、230~500 m $\varnothing$ 113 mm;砂层用单管钻具,粉细砂-黏土互层用双动双管钻具,减少岩心扰动。

(2)质量控制:黏性土层岩心采取率>75%、砂性土层>45%,无岩心间隔 $\leq$ 3 m;按2 m等间距采集颗粒分、易溶盐样品各253组。岩心测试成果统计及地质意义如表1所示。同步采集古地磁、光释光等科研样品;每100 m测斜1次,全孔顶角变化率 $\leq$ 1.5°/100 m,终孔深度502.37 m,井身质量达标。

(3)岩心管理:执行“一回次一牌”,规范摆放、覆膜防护,同步完成岩性编录。

2.2 第二阶段:大口径扩孔与井筒构建

在取心孔精确的地质导航下,进行大口径扩孔,形成满足下管、填砾要求的终孔井筒^[8]。

(1)扩孔工艺:采用 $\varnothing$ 500 mm三牙轮钻头+满眼钻具组合,一次性扩孔至501 m,钻压5~8 t,转速80~150 r/min,保障井壁规整。

(2)泥浆护壁:钠基膨润土+CMC+腐植酸钾

配制泥浆,密度1.06~1.10 g/cm³,黏度20~23 s,失水量<15 mL/30 min,兼顾护壁与后期洗井。

(3)冲孔换浆:扩孔后大泵量循环2个台班,替换高固相泥浆,返浆黏度近清水、含砂量<1%,为下管、填砾创造清洁环境。

2.3 第三阶段:基于多源信息融合的成井结构动态优化设计

这是将地质勘查成果转化为工程实施方案的智慧决策核心。基于第一阶段获取的“岩心-分析-

表1 KT1孔岩心测试成果统计及地质意义

测试类型	采样组数	主要成果范围	核心地质与水文地质指示意义
颗粒分析	253	粉黏粒(<0.075 mm)含量1%~100%	(1)定量划分岩性:<10%为砂土,10~50%为粉土质砂/砂质粉土,>50%为黏性土;(2)判断渗透性:粉黏粒含量是估算地层渗透系数(K)的关键指标,含量越低,潜在渗透性越好;(3)识别相对隔水层:高粉黏粒含量层段是划分止水层位的重要依据
易溶盐分析	253	易溶盐总量(ω)635~8444 mg/kg	(1)盐渍化程度判定:依据规范划分非盐渍土至中碱性盐渍土;(2)地下水矿化度预判:地层中易溶盐含量是地下水矿化度的物质基础,高值区(如205~211 m段、407~425 m段)可能预示高矿化度地下水,为成井段选择提供风险预警;(3)古环境指示:反映沉积时期的古气候干湿变化

测井”海量数据,经过综合研判后动态生成KT1孔的成井方案。

(1)信息解译逻辑:高阻、低自然伽玛、粗颗粒、低易溶盐层为富水层;高自然伽玛、高粉黏粒含量层为隔水/弱透水层;易溶盐高值区为水质风险层。基于上述分层解译结果,KT1孔分层成井工艺如图2所示。

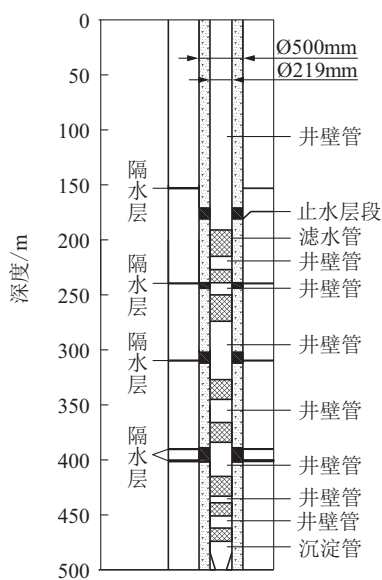


图2 KT1孔分层成井工艺示意

(2)方案确定:优选190~500 m井段4个取水试段进行成井结构动态优化,方案如表2所示;布设3层止水位置,滤水管总长138 m,占成井段27.6%,兼顾进水效率与成本控制。

2.4 第四阶段:井管下入与分层止水填砾工艺

此阶段是将设计方案物理实现的工程核心,其施工精度直接决定了分层抽水试验的成败^[6]。

(1)井管制备:Ø219×6 mm钢管,桥式滤水管孔隙率≥25%,包覆80目尼龙网防砂(图3);每15~20 m设钢制扶正器,保障井管居中;管口双面焊接,渗透检测合格后下放。



图3 滤水管包网照片

(2)填砾工艺:选用2~4 mm浑圆石英砂,动水填砾,小泵量返水保障砾料均匀下沉,逐段测量高度,避免“架桥”。

(3)止水工艺:采用5~8 mm 预制致密黏土球,投砾密实后均匀投放,测绳跟踪定位,投毕轻提密实;止水完成后静置24 h,保障黏土球膨胀密封。

2.5 第五阶段:高效联合洗井工艺

洗井目的是彻底清除钻井过程中在滤水管周围形成的泥皮,抽出渗入围填砾料中的细颗粒,疏通含水层通道,恢复其天然渗透能力。

采用“化学-机械-水力”三联洗井法。化学浸

表2 KT1孔成井结构动态优化方案

试段编号	滤水管分布深度/m	滤水管总长/m	对应主要岩性	设计核心依据与考量
试段一	191~215,227~239	36	含砾细砂、砂砾石、中粗砂	电阻率显著高值,颗粒最粗,推测为古河道主流相,富水性预期最佳,但其中205~211 m易溶盐高,兼具勘探(验证矿化度)与研究(盐分运移)价值
试段二	250~274	24	中砂、粗砂	清晰的相对高阻层,颗粒较粗,且对应易溶盐含量低值区,是寻找低矿化度水的重点层段
试段三	327~345,366~384	36	粉细砂与中粗砂互层	电阻率呈指状高值,显示砂体透镜体特征。虽自然伽玛值偏高(泥质含量较多),但为探索该深度富水性及验证易溶盐高值区水质,故下管
试段四	415~433, 439~451, 462~474	42	中砂、粉细砂	稳定的相对高阻段,颗粒分析显示砂质较纯,易溶盐含量中等偏低,是深部主要取水目标层
止水层位	171~181, 239~244, 302~312,389~402		黏土、亚黏土	根据岩心确认的黏土层及自然伽玛、粉黏粒含量峰值综合确定,确保上下含水层水力隔离

泡:注入焦磷酸钠溶液,浸泡 ≥ 24 h,破坏泥皮结构;机械振荡:活塞+提筒强力拉洗2个台班,剥离泥皮与细颗粒;水泵振荡:潜水泵间歇性抽停,反复冲刷渗流通道。

洗井合格标准:出水含砂量 $\leq 0.1\%$,同一降深单位涌水量波动 $<10\%$ 。

2.6 第六阶段:Packer分层抽水试验与综合采样

采用双封隔器 Packer 系统实现含水层独立隔离测试,系统工作原理如图4所示。

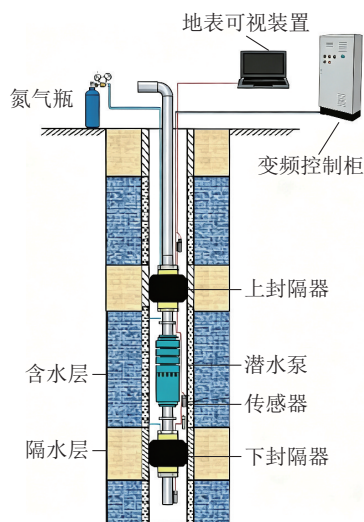


图4 Packer分层抽水试验系统工作原理示意

(1)试验顺序:由下至上(试段四→三→二→一→全孔混合),避免上层干扰。

(2)稳定流控制:每试段2~3个落程,大落程稳定16 h、小落程8 h,水位波动 $\leq$ 降深1%,流量波动 $\leq 5\%$ 。

(3)止水验证:同步监测封隔器上下水位,上部水位稳定即判定止水合格。

(4)样品采集:最大落程稳定后采集分层水样,完成全分析、微量元素与同位素测试。

3 关键技术创新与综合把控要点

3.1 面向深部薄互层的“取心-测井-化验”一体化精准识别技术

针对沙漠区粉细砂-黏土频繁互层特征,融合岩心直观性、化验定量性、测井连续性,实现含水层米级精准划分^[9]。单一测井易误判厚层砂体,结合岩心与颗分可识别夹层黏土,优化滤水管与止水位

置,避免层间“短路流”,为成井设计提供精准地质依据^[4]。

3.2 深孔高精度分层止水的“材料-工艺-检测”三重保障体系

KT1孔构建了从材料源头到最终验证的分层止水完整质控链。

(1)材料保障:预制黏土球均质、强度高、遇水膨胀密封效果优,替代手工土球^[6]。

(2)工艺保障:动水填砾+静投黏土球+二次密实,确保止水材料精准到位。

(3)检测保障:以Packer抽水试验水位响应为在线验证手段,水力法检测止水效果,精度优于传统温度、电导率对比法。

3.3 针对低渗透性含水层的Packer抽水试验优化与参数精确求取技术

沙漠深部含水层渗透系数多为 10^{-1} m/d量级,传统试验难以获取可靠参数,为此进行了Packer抽水试验优化与参数精确求取。

(1)延长稳定观测时间至16~20 h,保障渗流场充分扩展。

(2)选用承压水非完整井稳定流公式,结合井损校正剔除井管损耗影响(表3),获取真实地层参数。

表3 KT1孔试段一井损校正前后参数对比

计算类型	落程	实测降深/m	计算层流降深/m	井损/m	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	影响半径/m
未校正	S2	27.21			0.82	255
校正后	S2	27.21	21.03	6.18	1.06	223

(3)绘制 $Q-S$ 、 $S/Q-Q$ 曲线,量化井损,提升参数精度。

3.4 极端环境下绿色勘查与安全生产的全过程管理

在生态脆弱的沙漠腹地,KT1孔将绿色勘查理念贯穿始终。

(1)泥浆循环与固化:使用集成式泥浆净化罐循环系统,实现泥浆重复利用,零排放。废弃泥浆加入固化剂进行无害化处理^[10]。

(2)废弃物分类管理:对生活垃圾、可回收物、含油废弃物等严格分类收集,施工结束后全部运出沙漠,送至合规处理场。

(3)安全生产专项应对:针对沙漠高温、沙尘暴、交通迷失、野生动物等风险,制定了专项预案。营地配备卫星电话、GPS、充足给养和急救药品;实行严格的请销假和车辆外出报备制度;高温时段调整作业时间,确保人员安全^[8]。

4 综合成果与应用价值

通过上述全流程精细化工艺的实施与关键技术把控,KT1孔取得了远超常规钻孔的丰硕成果,形成了完整的数据链和知识产品。

4.1 建立了500 m深度内高分辨率地层-水文地质结构模型

依托全孔取心、颗粒及易溶盐测试、综合测井资料,首次揭示安迪尔工区深部地层由34个薄互层亚层构成,精准刻画各层岩性、厚度、颗粒组成、易溶盐特征与测井响应,构建工区第四系标准地层剖面,厘清浅部潜水含水层、多套深部承压含水层及相对隔水层的垂向结构。在此基础上于190~500 m深度范围内确定4个抽水试段,筛选得到3处可靠止水位置,既为区域第四纪地质、水文地质建模提供核心基础数据,也为Packer分层成井与分层抽水

试验奠定关键地质依据。

4.2 获取了各含水层可靠的定量水文地质参数

通过分层试验,量化各含水层富水性与渗透性,获取可靠的定量水文地质参数如下。

(1)试段一(191~239 m):含水层厚48 m,涌水量765.76 m³/d,渗透系数1.06 m/d(井损校正后),富水性中等,为古河道主流相富水层。

(2)试段二、三、四:富水性弱—中等偏弱,为深部主要可利用层段。

(3)全孔混合涌水量810 m³/d,富水性中等。该成果颠覆沙漠区地下水“资源丰富”的模糊认知,为水资源承载力评估提供精准依据。

4.3 揭示了地下水水质垂向分异规律并完成可利用性评价

分层水质测试表明(表4),各层地下水均为V类水,TDS、总硬度、Cl⁻、Na⁺严重超标,不宜直接饮用;矿化度呈现“浅部、深部高,中部略低”特征,盐分源于古老沉积环境与长期浓缩演化。经评价,处理后可用于工业冷却、抑尘、生态灌溉,实现“限定用途可用”的突破^[11]。

表4 KT1孔分层地下水主要指标与可利用性评价

试 段	水样指标/(mg·L ⁻¹)				综合评价类别	锅炉用水评价
	TDS	总硬度	Cl ⁻	Na ⁺		
试段一(191~239 m)	4402.2	840.7	1472.9	1228.8	V类	锅垢多,硬沉淀,起泡
试段二(250~274 m)	7023.5	1531.2	2403.5	1925.2	V类	锅垢多,硬沉淀,起泡
试段四(415~474 m)	6239.8	1681.3	2123.5	1615.0	V类	锅垢多,硬沉淀,起泡
GB/T 14848—2017 Ⅲ类限值	≤1000	≤450	≤250	≤200		
主要问题与可利用方向	严重超标,口感苦咸,不宜饮用	硬度极高,结垢倾向强	氯离子含量极高,腐蚀金属	钠吸附比高,不利于农业灌溉	不宜作为生活饮用水水源	经适当软化防垢处理后,可作为一般工业锅炉用水或冷却水

4.4 建成了一孔多用的长期监测与战略储备井

KT1孔在完成勘探使命后,井口安装了专用保护装置并上锁,转化为一座分层监测井。未来可定期对各层水位、水质进行监测,研究其动态变化规律,成为区域地下水监测网络的关键节点。同时,该井本身也是一口具备一定出水能力的生产井,在

极端情况下可作为应急供水水源,具有战略储备价值。

5 结论与展望

(1)KT1孔成功构建沙漠区500 m深部地下水“先取心、后成井”全流程工艺体系,突破深孔钻探、薄互层止水、低渗透层测试等技术瓶颈,形成可复

制、可推广的标准化技术范式。

(2)多源信息融合实现含水层精准识别,动态成井设计契合水文地质结构,Packer分层抽水获取可靠参数,揭示水质垂向分异规律,为沙漠区地下水精准评价提供核心支撑。

(3)工程践行绿色勘查理念,建成“勘探-试验-监测-储备”多功能井,破解南疆沙漠区水资源勘查技术难题,保障边疆水资源安全与生态可持续发展。

下一步应系统测试KT1孔第四系样品,反演地下水系统形成演化历史;基于精准参数构建水文地质数值模型,模拟开采动态响应;推进技术体系标准化、模块化,编制干旱区深部地下水勘查指南,推广至昆仑山-阿尔金山前沙漠盆地,为西北干旱区水资源开发提供持续技术支撑。

参考文献:

[1] 朱第植,徐洪晨,郑纲,等.遥感技术在新疆民丰区域寻找地下

水中的应用[J].煤田地质与勘探,2000(5):34-38.

- [2] 中华人民共和国自然资源部.地质岩心钻探规程:DZ/T 0227—2010[S].北京:地质出版社,2010.
- [3] 中华人民共和国自然资源部.水文水井地质钻探规程:DZ/T 0148—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [4] 张宏刚,李艳军,赵军.绳索取芯技术在沙漠区水文地质钻探中的应用[J].煤田地质与勘探,2018,46(S1):123-127.
- [5] 王稳祥,李建华,张敏.沙漠地区松散地层钻探取芯技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):45-50.
- [6] 杨金凤,燕乔,孙彪,等.沙漠地区回灌井成井工艺研究[J].建筑施工,2023,45(2):256-258,266.
- [7] 聂志勇.绳索取心钻进工艺在塔里木盆地岩心钻探中顺利成孔[R].江西省地质局,2024.
- [8] 李建国,张毅,王丽.塔里木盆地南缘细颗粒地层钻探事故预防与处理[J].西部探矿工程,2022,34(2):1-4.
- [9] 刘光廷,张伟,王鹏.细颗粒土水敏性对钻探孔壁稳定的影响及控制技术[J].地质与勘探,2019,55(3):789-796.
- [10] 陈明,王强,刘勇.植物胶冲洗液在松软地层钻探中的应用与优化[J].钻探工程,2021,48(6):67-73.
- [11] 中华人民共和国自然资源部.地下水采样技术规程:DZ/T 0420—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

(编辑 王文)