

冯延强, 布和, 乔永成, 等. NDL461型数字综合测井仪研制及应用[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(2): 219-229. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.001

FENG Yanqiang, BU He, QIAO Yongcheng, et al. Development and application of NDL461 digital comprehensive logging tool[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 219-229 (in Chinese).

NDL461型数字综合测井仪研制及应用

冯延强^{1,2,3}, 布和^{1,2,3}, 乔永成^{1,2,3}, 黄笑⁴, 邵帅^{1,2,3}, 余弘龙⁴, 赵旭⁵,
刘磊⁶, 刘富强⁶

- 1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 北京 100029
- 2 核工业北京地质研究院, 北京 100029
- 3 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029
- 4 核工业二四三大队, 内蒙古 赤峰 024000
- 5 核工业二〇三研究所, 陕西 西安 710086
- 6 核工业二一六大队, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要 随着我国砂岩型铀矿勘查快速发展, 生产测井工作量逐年增加, 同时随着“第二找矿空间”的勘查突破, 测井深度正在逐步向超1000 m迈进, 现有测井装备完成铀矿地球物理测井需2~3次下井作业, 测井时间长, 且存在塌孔、卡管等风险。通过开发模块化多参数井下短节, 解决电参数、声波参数以及放射性参数在测井应用中的相互制约与干扰问题, 形成根据实际需求而灵活组合应用的井下探管, 开发地面一体化控制平台与配套测井数据采集处理软件, 形成集成度高、抗噪能力强和响应速度快的数字化操控系统, 完成了新一代NDL461型数字综合测井仪的研制。该测井仪通过了第三方检定, 并在松辽、柴达木、伊犁以及塔里木等盆地进行现场测井试验应用, 验证该测井仪的稳定性、准确性和适用性, 为我国第四代铀矿勘查技术体系提供技术装备支撑。

关键词 砂岩铀矿; 地球物理测井; 测井仪; 多参数组合

中图分类号 P631.8*17 **文献标志码** A **文章编号** 1672-0636 (2025) 02-0219-11

Development and application of NDL461 digital comprehensive logging tool

FENG Yanqiang^{1,2,3}, BU He^{1,2,3}, QIAO Yongcheng^{1,2,3}, HUANG Xiao⁴, SHAO Shuai^{1,2,3},
YU Honglong⁴, ZHAO Xu⁵, LIU Lei⁶, LIU Fuqiang⁶

- 1 National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China
- 2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China
- 3 CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Techniques, Beijing 100029, China
- 4 Geological Party No. 243, Chifeng 024000, China
- 5 Research Institute No. 203, Xi'an 710086, China
- 6 Geological Party No. 216, Urumqi 830011, China

Abstract: With the rapid development of sandstone-type uranium exploration in China, the workload of

基金项目: 中核集团“井下伽马能谱直接测铀技术与装备研发”项目(编号:物KB2201)资助

收稿日期: 2024-12-26 **改回日期:** 2025-02-18

第一作者: 冯延强, 男, 1984年生, 正高级工程师, 核地球物理仪器研发。E-mail: fengyanqiang_2005@163.com

Supported by Research and Development of Technology and Equipment for Direct Uranium Measurement Using Gamma Spectroscopy of CNNC (No. 物KB2201)

Received date: 2024-12-26 **revised date:** 2025-02-18

First author: FENG Yanqiang, male, born in 1984, senior engineer, focusing on nuclear geophysical instrument R & D. E-mail: fengyanqiang_2005@163.com

production logging has been increasing year by year. Simultaneously, with breakthroughs in the exploration of the “second prospecting space”, the logging depth is gradually increasing to 1 000 meters. The existing logging equipment requires 2–3 downhole operations to complete uranium geophysical logging, resulting in long logging times and risks such as borehole collapse and pipe sticking. By developing a modular multi-parameter downhole sub, we have addressed the issues of mutual constraints and interference among electrical, acoustic, and radioactive parameters in logging applications. This has led to the creation of a flexible downhole probe that can be combined according to actual application needs. We have also developed an integrated ground control platform and accompanying logging data acquisition and processing software, forming a highly integrated, noise-resistant, and fast-responding digital control system. This has culminated in the development of the new-generation NDL461 digital integrated logging tool. This logging tool has passed third-party verification and has been field-tested in the Songliao, Qaidam, Yili, and Tarim basins, demonstrating its stability, accuracy, and applicability. The developed logging tool provides technical equipment support for China’s fourth-generation uranium exploration technology system.

Keywords: sandstone type uranium deposit; geophysical logging; logging tool; multi parameter combination

地球物理测井是铀矿勘查中实现地层岩性划分、地层孔隙度研究、渗透率计算^[1-2]以及圈定铀矿体位置、厚度及品位等工作的重要技术手段之一^[3-4]。目前我国铀矿勘查主攻方向为可地浸砂岩型铀矿,测井深度主要集中在 500~1 000 m 的深度^[5],测井任务工作量及难度逐步增加。

为适应砂岩型铀矿勘查高质量发展需求,国内小口径测井仪相关企业、科研单位就如何提高综合测井工作效率与数据质量开展了相关研究,其中核工业北京地质研究院马艳芳、焦仓文等人开发了 ZH404 多参数组合测井探管,探管直径为 40 mm、长度为 1 930 mm^[6-8],实现 1 根探管同时测量 γ 总量、钻孔方位角、钻孔顶角、自然电位、视电阻率和单点电阻等 6 种参数,提高测井工作效率,降低测井成本^[9-10];新疆中核天山铀业杨正伟与东华理工大学周义朋等人开展了 JCX3-3019 多参数组合测井探管研制,优选组合了三侧向电阻率、单臂井径、自然电位和 FD-3019 定量 γ 等 4 种参数,提高了测井作业效率、降低了风险^[11-14];核工业航测遥感中心孙海仁、管少斌等人开展了铀矿探采多参数组合测井探管设计,通过分析北方地浸砂岩钻孔特点和成孔测井需求,设计井温、井径、三侧向电阻率、自然电位和测斜等 5 参数组合和定量 γ 、密度 2 种参数的组合探管^[15-17]。

综上所述,铀矿测井技术与装备随着铀矿

测井需求不断改善提高,但在勘查阶段裸孔测井、生产阶段固井测井和成孔测井的不同阶段,需求参数不同,现有测井产品仍需 1 至 3 种不同参数组合的探管来完成测井作业^[18-19]。随着钻孔深度的增加,多次下井测量占钻耗时增加,成本随之增大;另外长时间多次下井作业,需要数据校对处理的同时还存在塌孔、卡管等风险^[20-21]。为满足新形势发展需要,提高铀矿测井技术装备水平,在中核集团“第四代铀矿勘查关键技术研究”项目支持下,提出研发 NDL461 型新一代数字综合测井系统,在项目第 1 阶段主要是实现铀矿勘查测井中井斜、井温、井径、定量 γ 、自然伽马、声速时差、自然电位和三侧向电阻率等 8 种参数的模块化高效组合测井技术^[22-23],并研发新一代数字化测井技术平台,提升我国铀矿测井技术水平,为构建我国第四代铀矿勘查技术体系提供关键核心技术与装备支撑。

1 NDL461 型数字综合测井仪研制

NDL461 型数字综合测井仪包含井下探管、地面操控主机与数据采集控制软件,其中井下探管部分主要针对各参数模块化、小型化、集成化以及解决参数间的干扰问题开展研究工作;地面操控主机主要针对系统控制器与电脑系统集成,形成一体化操控平台,提高抗噪抗干扰能力以及使用便捷性;数据采集控制软件部分设计了系统控制、数据传输协议,并

实现测井数据的实时显示、预处理与存储功能。

1.1 多参数模块化井下探管研制

NDL461 型数字综合测井仪井下探管测量各参数设计为独立单元模块,具体各单元模块工作原理与实现方式可参考《砂岩型铀矿多参

数组合测井探管研制》^[24],文中详细阐述了井斜、井温、井径、定量 γ 、自然 γ 、声速时差、自然电位和三侧向电阻率等 8 种参数的设计与模块化实现。井下模块化探管与地面主机、总成以及总体系统集成后工作控制、流程如图 1 所示。其中:

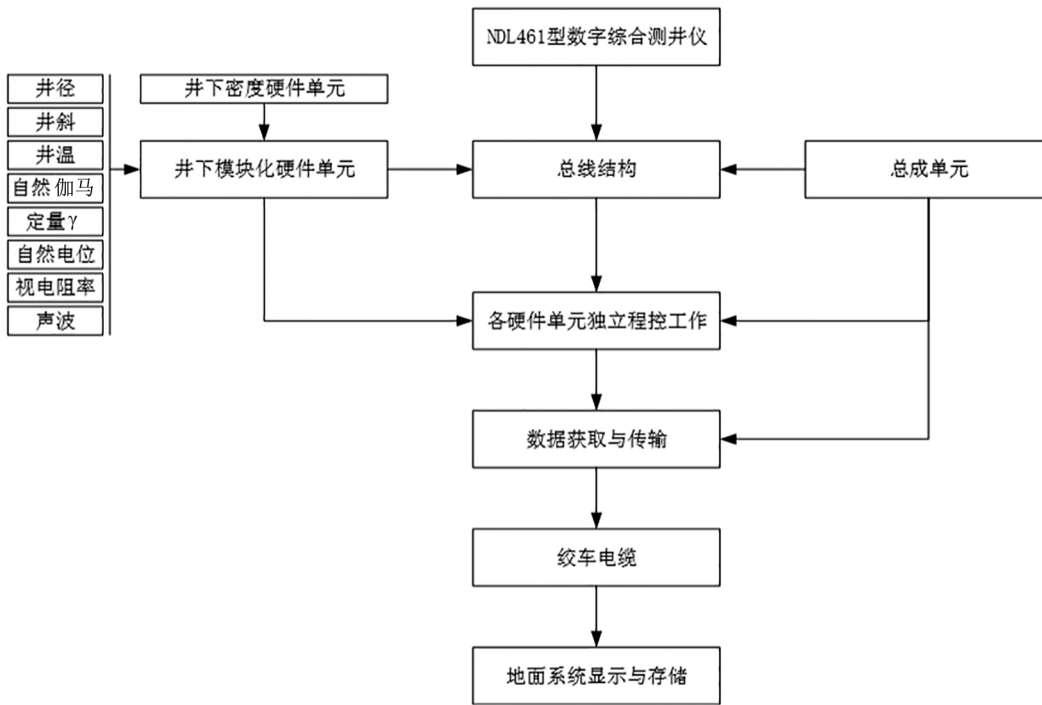


图 1 NDL461 数字综合测井仪系统工作原理流程图

Fig. 1 Working principle flowchart of NDL461 digital comprehensive logging tool system

系统采用总线结构方式,井下各参数模块单元与总成单元之间采用 CAN 总线方式,均可独立接收命令与独立运行;总成单元在发送程控指令的同时,可接收各参数单元返回的测量数据,总成单元对数据打包后经绞车电缆传输至地面系统显示与存储。

NDL461 型数字综合测井仪地面操作台、地面绞车以及井下参数模块化单元之间采用图 2 所示接线定义方式,实现了全系统数字化指令控制与数据获取,井下各单元采用并行工作机制,解决了模块之间相互干扰问题。

井下各参数模块化单元在 V1.0 版本基础上^[23],进行了参数组合方式的优化调整,将自然电位 M 电极设计于探管组合最底端,外管采用 PEEK 绝缘材质与上部其他参数隔离,较好降低外部电极的干扰;井温传感器设计于 M 电极底部,确保了井温测量数据准确有效;整个

组合探管采用上、下 2 只扶正器结构设计,其中上扶正器在随孔径大小变化收缩时将伸缩量传导至井径位移传感器,进而实现井径参数测量。

1.2 放射性参数模块研制

定量 γ 与自然伽马是铀矿测井中重要的放射性参数,其中定量 γ 测井数据主要用于确定铀矿体位置、厚度、品位以及资源量计算;自然伽马测井数据主要用于数据预处理深度校正、岩性划分识别和地层孔渗参数研究等。

研究中设计定量 γ 、自然伽马复合探测技术,基于内嵌²⁴¹Am 自稳源的 NaI(Tl)探测器,采用数字化多道技术实现 γ 射线的全谱采集,在多道中设计了不同的 ROI 能区 (Region of Interest),利用 ROI 能区高、低阈值可实现 γ 射线全谱的精准划分与统计,进而实现定量 γ 与自然伽马(30~3 000 keV)的数字化复合探测技术。

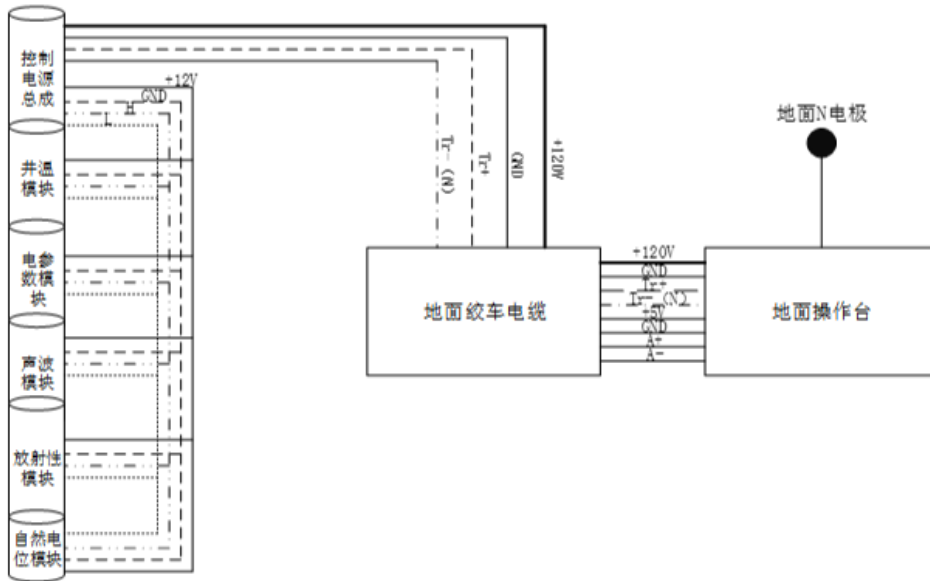


图 2 NDL461 数字综合测井仪接线定义与工作方式示意图

Fig. 2 Wiring definition and working mode diagram of NDL461 digital comprehensive logging tool



图 3 NDL461 数字综合测井仪井下模块化单元组合方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of modular unit combination for NDL461 digital comprehensive logging tool

研制放射性测井模块已通过国防科技工业 1313 二级计量站的计量检定, 检定结果数据如表 1 所示, 实测模型误差统计如表 2 所示, 模块在镅点源不同距离响应数据与该距离下空气比释动能率值的线性关系如图 4 所示, 线性

响应规律较好。检定数据计算显示, 测量结果重复性为 0.8 %、死时间为 2.92 μ s、铀含量灵敏度为 $280.38(0.01 \%eU \cdot s)^{-1}$ 、照射量率换算系数为 $0.108 0(nC \cdot s)/(kg \cdot h)$, 符合 JJG(军工) 27-2012 γ 测井仪检定规程要求。

表 1 放射性模块计量检定数据统计表

Fig. 1 Statistics on radioactive module metrological verification data

模型编号	实测数据/cps										平均值/cps
UF-0.03	800	799	812	803	806	808	822	814	805	797	807
UF-0.2	5 560	5 564	5 527	5 534	5 535	5 580	5 560	5 488	5 564	5 470	5 538
UF-0.5	14 308	14 320	14 311	14 300	14 318	14 249	14 273	14 268	14 266	14 240	14 285
UF-1.0	26 572	26 562	26 552	26 478	26 412	26 490	26 503	26 508	26 645	26 643	26 537
UF0.01-ThF0.03	578	586	584	586	580	582	570	567	567	574	577
ThF-0.05	514	517	531	528	524	521	537	538	530	531	527
K6	43	42	40	41	41	41	40	38	39	40	41
本底 F0	9	11	11	12	10	11	11	12	11	10	11

1.3 一体化地面控制平台研制

地面控制平台是测井仪的核心组成部分,

本研究设计了一体化地面控制平台尺寸与实物如图 5 所示, 将系统工作电源、控制电路板、

表 2 检定模型实测误差统计表

Fig. 2 Statistics on calibration model measured error

模型编号	标称铀含量/ 10^{-6}	测量铀含量/ 10^{-6}	相对示值误差/%
UF0.01-ThF0.03	99.0	97.6	-1.4
UF-1.0	10 930.0	10 934.1	0.0

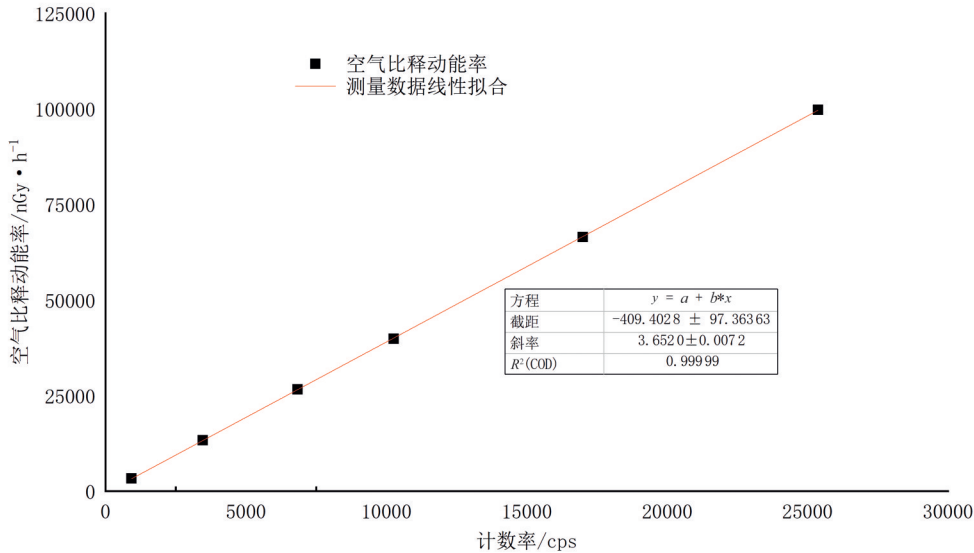


图 4 放射性模块点源实测数据线性拟合图

Fig. 4 Radioactive module point source measured data linear fitting graph

深度记录单元以及电脑主机、显示屏等集成于一体,系统采用统一供电系统,且在平台内部实现了部件之间的连接,系统集成度更高、连接稳定可靠,且抗干扰能力更强。

该平台通过数据采集控制软件控制测井仪工作,具有电源开关、测试和复位等机械控制与电源、运行状态与警报提示指示灯,系统采用 Windows 操作系统、外置 USB 接口、触屏和软键盘等功能,操作简单,应用便捷。

1.4 地球物理测井数据采集控制软件开发

NDL461 型数字综合测井仪数据采集控制软件是基于 QT 平台开发,软件具有数据采集实时曲线显示、刻度标定系数设置、接收数据实时缩放查看、测井作业过程动作自动记录、数据自动存储和意外中断后自启恢复等功能。具体各功能及特点如下:

1) 数据采集有时间采样模式和深度间隔采样模式 2 种可供选择。时间采样模式为固

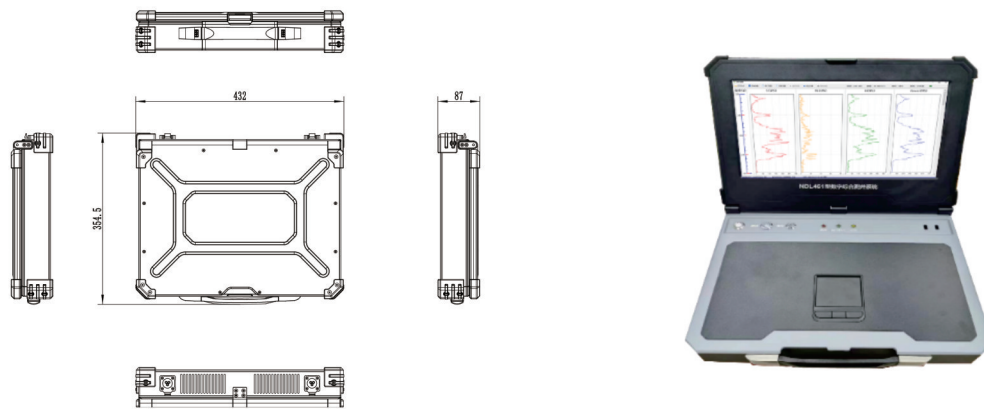


图 5 NDL461 数字综合测井仪一体化主机设计结构与实物图

Fig. 5 Design structure and photo of integrated host computer for NDL461 digital comprehensive logging tool

定 100 ms 采样间隔连续采样,对于需要加密测量的目标层位采样效果较好,且该时间参数可根据需求软件设置调节;深度间隔模式下测量数据的间隔可选,可根据实际测井需要选择采集数据的深度间距为 1、5、10、20 和 50 cm 等。

2) 井下各参数模块自动识别功能。软件能自动识别出井下可用的参数模块,并对可用参数模块的测量数据曲线界面进行自动布局排列,能够适应井下参数多种组合方式的应用需求。

3) 数据实时监测功能。测量过程中会实时显示 28 字节状态信息数据,便于对设备状态、数据信息进行核验。

4) 自动记录功能。软件会自动记录并保存测井作业过程的所有操作,包括操作动作、时间、当前设备工作状态以及测井深度、速度

等信息,可完全复原整个工作过程。

5) 异常断电自恢复功能。作业中如发生断电等异常停止情况,系统上电后会自动恢复至断电前作业状态,其中测量深度、速度、参数数据以及上提、下放等基本信息均能够恢复显示并可直接继续启动作业。

1.5 总体系统组成

NDL461 型数字综合测井仪总体系统组成如图 6 所示,包括了车载测井平台、自动化测井绞车、井下模块化参数短节和一体化操控平台等 4 部分,其中多参数组合探管能够实现顶角、方位、井径、三侧向电阻率、声速时差、声幅、自然 γ 、定量 γ 、自然电位以及井温等组合测井,密度与井径为单独 1 根探管,能够满足铀矿勘查阶段测井需求;系统可集成固井质量检测探管、电流测井探管等参数,可满足砂岩铀矿生产成孔测井需求。



图 6 NDL461 数字综合测井仪总体组成图

Fig. 6 Overall composition diagram of NDL461 digital comprehensive logging system

2 性能指标

NDL461 型数字综合测井仪总体技术性能指标如下:

1) 地面操作台

- (1) 工作电源: AC220 V \pm 20%, 50 Hz \pm 10%
- (2) 深度误差: \leq 0.4 ‰
- (3) 操作软件: QT 平台数据采集控制软件

2) 井下探管

- (1) 耐温: $-10 \sim 85$ °C

- (2) 耐压: \geq 20 MPa

- (3) 多参数组合探管长度: 3.1 m

- (4) 定量 γ : $100 \times 10^{-6} \sim 50\,000 \times 10^{-6}$

- (5) 自然伽马: 本底 $\sim 100\,000$ cps

- (6) 井温: $0 \sim 85$ °C

- (7) 倾角: $0 \sim 90^\circ$ ($\leq \pm 0.2^\circ$)、方位角 $0 \sim 360^\circ$ ($\leq \pm 2^\circ$)

- (8) 井径: $50 \sim 450$ mm

- (9) 声速时差: $125 \sim 555 \mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$

- (10) 三侧向电阻率: $1 \sim 1\,000 \Omega\text{m}$ 和 $1 \sim$

10 000 Ωm 可选

(11) 自然电位: -1 200~+1 200 mV

(12) 密度: 1.0~3.0 g·cm⁻³

3 测井应用

3.1 定量 γ 测井应用

研制的 NDL461 型数字综合测井仪在某钻

孔定量 γ 测井与现有在用设备的测井对比曲线如图 7 所示, 对比可见测井响应表现正常, 曲线形态、放射性强度变化深度位置、异常段厚度等与现有设备一致, 定量 γ 测井解释结果对比如表 3 所示, 可见研制测井仪与现有设备测量解释结果相对误差均在 ±10 以内, 满足 γ 测井规范中不同仪器一致性允许误差的要求。

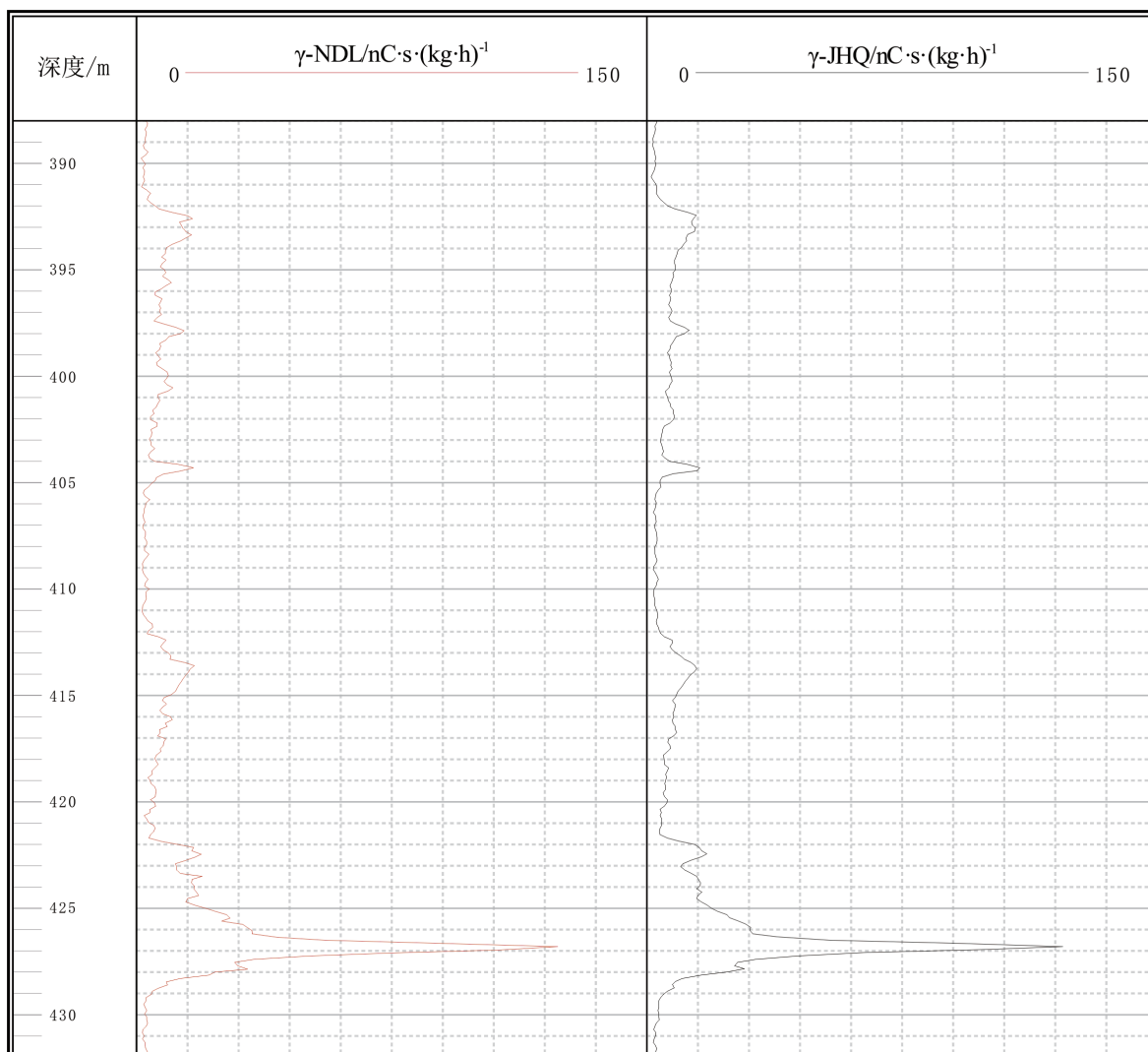


图 7 NDL461 测井仪与现有设备定量 γ 测井曲线对比图

Fig. 7 Comparison diagram of quantitative gamma logging curves between NDL461 logging system and existing equipment

3.2 不同地区综合测井应用

目前, NDL461 型新一代数字综合测井仪已在松辽、柴达木、伊犁和塔里木等盆地实际测井应用超 20 000 m, 并与现有设备测井结果进行了对比分析, 对比图中 NDL-代表研制的 NDL461 型新一代数字综合测井仪测井数据 (黑色曲线)、JHQ-代表现有在用测井仪的测井

数据 (红色曲线)。图 8 所示为松辽盆地南部某钻孔测井数据对比柱状图, 图 9 为伊犁盆地中部某钻孔测井数据对比柱状图, 研制测井仪各参数总体响应规律与现有设备一致, 个别参数如自然电位、自然伽马及声波等指示效果较现有设备更加明显、灵敏度更高。

通过综合测井数据对比与地质岩心编录

表 3 定量 γ 测井解释结果对比统计表

Fig. 3 Statistics on the error of quantitative gamma logging interpretation results

对比设备	矿段位置		钻孔直径/ mm	冲洗液吸收系数/ %	解释结果				岩性	相对偏差/ %
	顶深/ m	底深/ m			矿层厚度/ m	矿石品位/ 0.01 %	矿石米百分数/ m·%	平米铀量/ (kg·m ⁻²)		
					H	C	C·H	C·H· ρ		
NDL461	392.30	393.10	221.32	31.85	0.80	1.20	0.009 6	0.20	粉砂质泥岩	0.00
现有设备	392.35	393.10	221.43	31.86	0.75	1.27	0.009 5	0.20		
NDL461	413.35	414.80	213.28	31.26	1.45	1.17	0.017 0	0.36	细砂岩	-2.34
现有设备	413.40	414.75	212.89	31.23	1.35	1.28	0.017 2	0.37		
NDL461	422.85	426.95	211.78	31.14	4.10	2.76	0.113 2	2.41	细砂岩	2.12
现有设备	422.90	426.95	211.69	31.13	4.05	2.74	0.110 8	2.36		
NDL461	426.95	428.30	236.74	32.72	1.35	3.39	0.045 8	0.97	粉砂质泥岩	-2.52
现有设备	426.95	428.30	235.99	32.68	1.35	3.48	0.047 0	1.00		

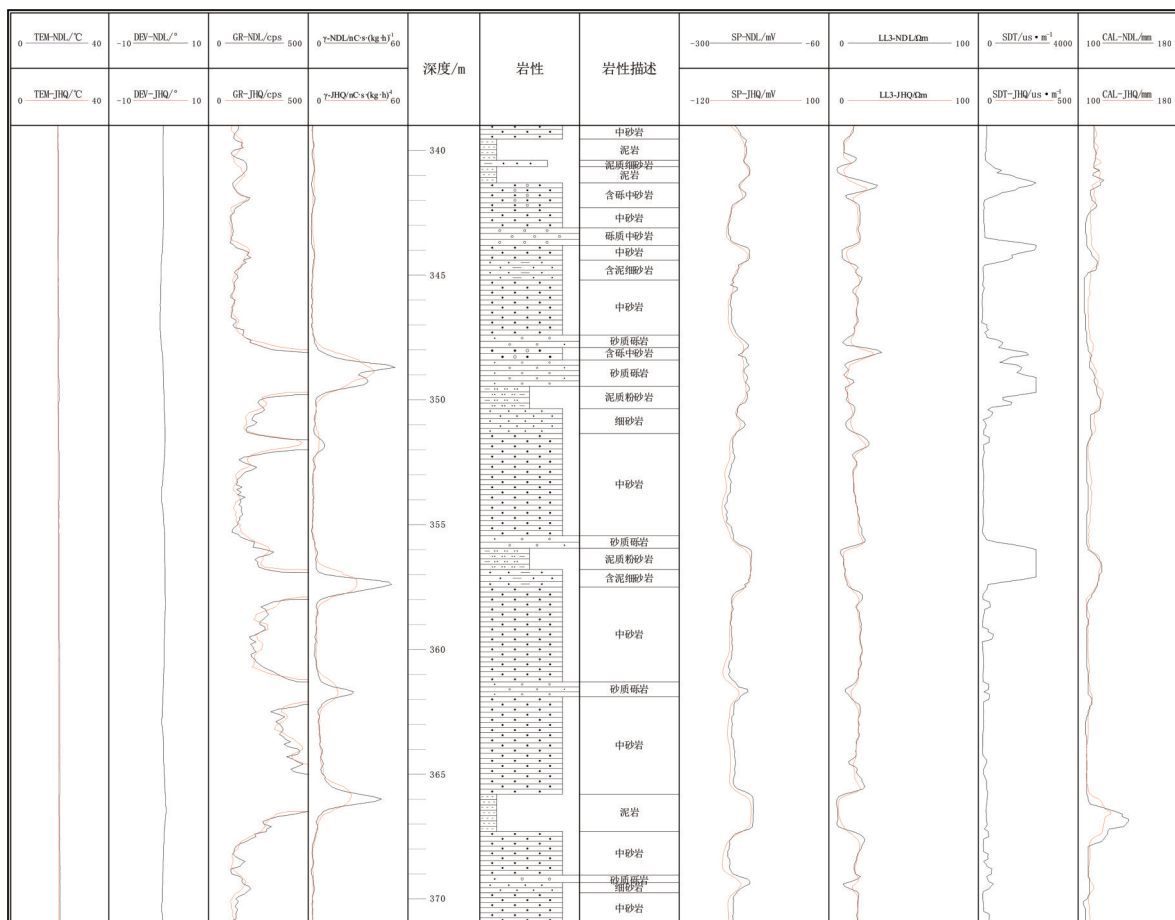


图 8 NDL461 数字综合测井仪与现有设备在松辽盆地某钻孔测井数据对比柱状图

Fig. 8 Comparison of logging data of a borehole in Songliao basin by NDL461 digital comprehensive logging tool and existing equipment

数据结合分析可见：NDL461 型新一代数字综合测井仪在松辽、柴达木和伊犁等不同盆地地区数据表现有效，数据响应与钻孔岩心地质编

录结果基本一致，能够适应不同地区测井需求。具体各参数表现为：

- 1) 顶角、方位，井径、自然伽马、定量 γ 以及

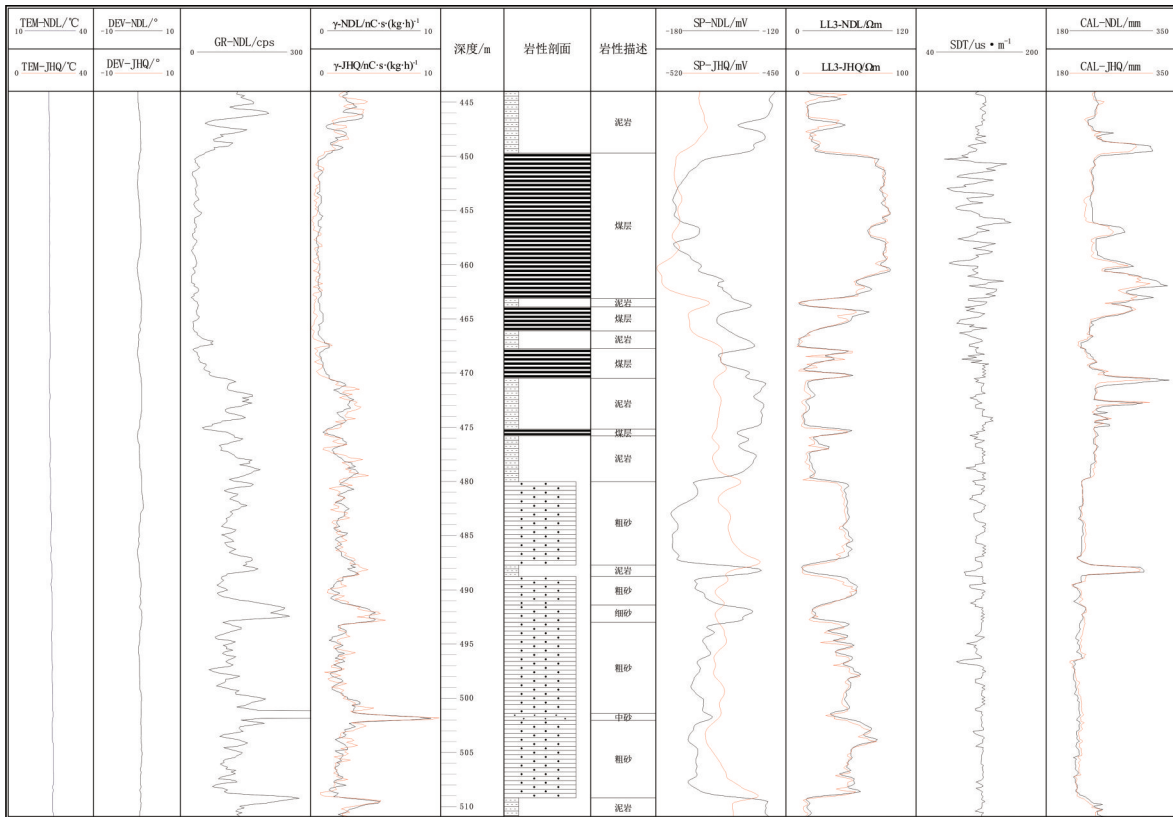


图 9 NDL461 数字综合测井仪与现有设备在伊犁盆地某钻孔测井数据对比柱状图

Fig. 9 Comparative histogram of logging data between NDL461 digital integrated logging tool and existing equipment in a borehole in the Yili basin

三侧向电阻率参数, 响应表现正常, 与现有设备测井结果基本一致, 轴矿段深度位置、厚度与现有设备一致, 测量数据无漏测、跑测和量程不够等现象, 其中 NDL461 测井仪未开展平滑处理, 数据局部响应细节更加明显。

2) 井温参数, 总体响应表现正常, 灵敏度更高, 局部响应更加明显;

3) 自然电位参数, 测井响应表现正常, 在各个盆地测井数据与岩心编录对应关系较好, 在伊犁盆地测量效果优于现有设备;

4) 声波参数, 测井响应表现正常, 在不同岩性均有明显响应。

4 结 论

NDL461 型数字综合测井系统具有模块化、数字化、平台化以及高集成、高效率等特点, 是在天然铀产业高质量发展需求背景下研发的全新一代地球物理综合测井系统, 对推动我国铀矿测井技术装备进步具有重要意义。

1) 实现了多种参数模块化井下探管, 可依据实际需求灵活组合应用, 1 次下井作业可获取多种参数数据, 提高了铀矿测井作业效率。

2) 性能指标国内领先, 能够满足砂岩型铀矿探采不同阶段的测井需求。

3) 目前已在国内多个盆地地区实际应用, 其稳定性、准确性和适用性得到充分验证, 能满足不同地区的应用需求。

致谢: 本文研究工作得到中核铀业有限公司、核工业二四三大队、核工业二〇三研究所、核工业二一六大队、中核新疆矿业有限公司以及核工业航测遥感中心等单位领导、专家的指导和帮助, 提供了宝贵的试验现场和经验反馈, 在此一并表示诚挚的感谢!

参考文献

1 核工业标准化研究所. 地浸砂岩型铀矿地质勘查规范: EJ/T 1157—2018[S]. 北京: 中国标准出版

- 社, 2018.
Nuclear Industry Standardization Research Institute. Exploration specifications on in-situ leaching sandstone type uranium deposits: EJ/T 1157—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- 2 核工业标准化研究所. 地浸砂岩型铀矿地球物理测井规范: EJ/T 1162—2018 [S]. 北京: 核工业标准化研究所, 2018.
Nuclear Industry Standardization Research Institute. Specifications for geophysical logging on in-situ leaching sandstone type uranium deposits: EJ/T 1162—2018 [S]. Beijing: Nuclear Industry Standardization Research Institute, 2018.
- 3 核工业标准化研究所. 铀矿资源储量估算指南: EJ/T 20015—2021 [S]. 北京: 中国原子能出版社, 2021.
Nuclear Industry Standardization Research Institute. Guidelines on resources and reserves estimation for uranium deposits: EJ/T 20015—2021 [S]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2021.
- 4 核工业标准化研究所. γ 测井规范: EJ/T 611—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Nuclear Industry Standardization Research Institute. Specification for γ logging: EJ/T 611—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- 5 李子颖, 秦明宽, 郭庆银, 等. 渗出砂岩型铀矿成矿预测与找矿标志 [J]. 铀矿地质, 2024, 40(1): 1–15.
LI Ziyang, QIN Mingkuan, GUO Qingyin, et al. Metallogenic prediction and exploration indication of exudative sandstone-type uranium deposit [J]. Uranium Geology, 2024, 40(1): 1–15 (in Chinese).
- 6 王殿学, 余水泉, 黄笑. 我国 γ 测井技术发展的回顾与展望 [J]. 铀矿地质, 2023, 39(1): 124–132.
WANG Dianxue, YU Shuiquan, HUANG Xiao. Review and prospect of gamma logging technology in China [J]. Uranium Geology, 2023, 39(1): 124–132 (in Chinese).
- 7 陆士立, 袁明, 焦仓文, 等. HD-4002 型综合测井仪 [J]. 铀矿地质, 2005, 21(3): 183–192.
LU Shili, YUAN Ming, JIAO Cangwen, et al. Logging system Model HD-4002 [J]. Uranium Geology, 2005, 21(3): 183–192 (in Chinese).
- 8 马艳芳, 焦仓文. HD-4002 型综合测井仪伽马总量测井探管研制 [J]. 铀矿地质, 2018, 34(2): 99–104.
MA Yanfang, JIAO Cangwen. The development of γ logging probe of HD-4002 logging system [J]. Uranium Geology, 2018, 34(2): 99–104 (in Chinese).
- 9 马艳芳, 焦仓文. ZH404 多参数组合测井探管研制 [J]. 铀矿地质, 2018, 34(6): 360–365.
MA Yanfang, JIAO Cangwen. The development of ZH404 multi-parameter probe [J]. Uranium Geology, 2018, 34(6): 360–365 (in Chinese).
- 10 焦仓文, 邓明, 陆士立, 等. 小口径 γ 能谱测井仪研制 [J]. 核技术, 2015, 38(4): 37–42.
JIAO Cangwen, DENG Ming, LU Shili, et al. Research and development of slim borehole gamma ray spectrometry logger [J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(4): 37–42 (in Chinese).
- 11 杨正伟, 周义朋, 魏宝军, 等. JCX3-3019 多参数组合测井探管研制及其在地浸铀矿山中的应用 [J]. 铀矿冶, 2018, 37(1): 20–25.
YANG Zhengwei, ZHOU Yipeng, WEI Baojun, et al. JCX3-3019 multi-parameter combined logging probe and its application in in-situ leaching uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018, 37(1): 20–25 (in Chinese).
- 12 冯延强, 杨建涛, 乔宝强, 等. 基于 UC3845 反激式开关电源设计及其在测井仪的应用 [J]. 铀矿地质, 2019, 35(3): 165–169.
FENG Yanqiang, YANG Jiantao, QIAO Baoqiang, et al. Design of UC3845 fly-back switching power supply and its application in logging instrument [J]. Uranium Geology, 2019, 35(3): 165–169 (in Chinese).
- 13 焦仓文, 乔宝强, 唐晓川, 等. 伽马能谱测井分层解释特征参数的应用研究 [J]. 世界核地质科学, 2023, 40(3): 787–795.
JIAO Cangwen, QIAO Baoqiang, TANG Xiaochuan, et al. Study on digital inverse filter parameter with spectral gamma-ray logging deconvolution for uranium exploration [J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(3): 787–795 (in Chinese).
- 14 冯延强, 焦仓文, 邵帅, 等. 小口径高温伽马能谱测井仪关键技术及应用 [J]. 世界核地质科学, 2023, 40(3): 796–804.
FENG Yanqiang, JIAO Cangwen, SHAO Shuai, et al. Key technology of small caliber gamma spectrum logger and application in high temperature [J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(3): 796–804 (in Chinese).
- 15 孙海仁, 管少斌, 唐晓川. 铀矿探采多参数组合测井探管设计 [J]. 铀矿地质, 2022, 38(4): 798–809.
SUN Hairen, GUAN Shaobin, TANG Xiaochuan.

- Design of the multi-parameters combination probing pipe for uranium exploration and production logging [J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(4): 798-809 (in Chinese).
- 16 LIU Xiaobo, CHEN Jingyi. Electric field and potential distribution in layered homogeneous borehole fluids and its logging responses of resistivity logging through casing[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 224(4): 211532.
- 17 王浩锋,刘波,彭云彪,等.一种综合地球物理测井数据处理方法:中国,201811579260.3[P]. 2020.6.30
- 18 徐传国,陆士立,焦仓文,等.HD-4002B综合测井仪在铀矿科学深钻中的应用[J].*世界核地质科学*, 2015, 32(2): 91-95.
XU Chuanguo, LU Shili, JIAO Cangwen, et al. Application of integrated HD-4002B well logger in deep scientific drilling project of uranium [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2015, 32(2): 91-95 (in Chinese).
- 19 贺亚飞,魏李梅,王晶朴.盐水泥浆电阻率测井影响因素分析[J].*中国石油和化工标准与质量*, 2023, 43(4): 138-140.
HE Yafei, WEI Limei, WANG Jingpu. Analysis of factors affecting the resistivity logging of saltwater mud [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2023, 43(4): 138-140 (in Chinese).
- 20 马东来,蔡煜琦,孙远强.基于随机森林算法的塔然高勒地区测井数据岩性识别[J].*世界核地质科学*, 2023, 40(1): 46-67.
MA Donglai, CAI Yuqi, SUN Yuanqiang. Random forest algorithm based lithology identification of geophysical logging data in Tarangaole area [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2023, 40(1): 46-67 (in Chinese).
- 21 王伟,王贵,剡鹏兵,等.基线拟合-差值法在砂岩型铀矿自然电位测井曲线校正中的应用——以二连盆地桑根达来地区为例[J].*铀矿地质*, 2023, 39(1): 133-142.
WANG Wei, WANG Gui, YAN Pengbing, et al. Application of baseline fitting-difference method in spontaneous potential logging curves correction of sandstone type uranium deposit: A case study in Sangendalai area, Erlian basin [J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(1): 133-142 (in Chinese).
- 22 冯延强,刘富强,布和,等.恒流源三侧向电阻率测井模块研制及应用[J].*世界核地质科学*, 2024, 41(1): 23-32.
FENG Yanqiang, LIU Fuqiang, BU He. et al. Development and application of a constant current source three lateral resistivity logging module [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(1): 23-32 (in Chinese).
- 23 冯延强,焦仓文,布和,等.砂岩型铀矿多参数组合测井探管研制[J].*世界核地质科学*, 2024, 41(3): 522-530.
FENG Yanqiang, JIAO Cangwen, BU He. et al. Development of the multi-parameter combination logging probe for sandstone type uranium deposits [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(3): 522-530 (in Chinese).