

# 钾盐储层预测方法研究进展与展望

胡景怡<sup>1, 2)</sup>, 卢志远<sup>1, 2)</sup>, 李茜<sup>1, 2)</sup>, 朱光有<sup>1, 2)</sup>,

何一鸣<sup>1, 2)</sup>, 徐焯柠<sup>1, 2)</sup>, 付诗钰<sup>1, 2)</sup>

1) 长江大学地球科学学院, 武汉, 430100;

2) 南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室, 武汉, 430100



**内容提要:**钾盐作为重要的战略性矿产资源,其主要勘探技术手段与油气勘探类似或相通。笔者等系统梳理了钾盐储层预测和“油钾共探”的技术进展,研究表明:①在地球物理技术方面,测井技术已形成针对固、液相钾盐的成套识别标志,地震勘探通过波阻抗反演技术刻画储层空间分布,重磁电方法则利用物性差异圈定盐体范围;②在人工智能技术方面,机器学习在样本充足区分类效果良好,深度学习通过特征提取在复杂储层预测中展现出潜力;③地球化学方法融合了元素地球化学和同位素地球化学,并通过多项地球化学参数的成因判别与综合应用,有效揭示了成钾机理并直接支撑勘查预测。基于典型盆地实践,笔者等指出未来技术发展需围绕“深部、智能、融合”三大方向突破,旨在为攻克深部探测、数据融合等关键技术难题,保障我国钾盐资源安全提供系统的理论依据与可行的技术参考。

**关键词:**钾盐储层;“油钾共探”;多源数据;预测方法;富钾重点盆地

钾盐作为我国最为紧缺的矿产资源之一,在农业、化工、医药等诸多领域具有重要的应用价值(郑绵平等,2010;Su Kelu et al., 2025)。当前全球钾盐资源分布极不均衡(孙宏伟等, 2023;陈志勇等, 2025),据美国地质调查局(United States Geological Survey, 简称 USGS) 2023 年数据统计,全球钾盐总储量达 36 亿吨( $K_2O$  计)(樊馥等, 2025),俄罗斯、加拿大、白俄罗斯、巴西、德国、美国、乌兹别克斯坦等国钾盐储量占比大,其中加拿大、俄罗斯、白俄罗斯钾盐储量占世界总量最多。这种资源格局使得钾盐成为各国资源安全保障的重点关注对象(毛翔等, 2017)。

我国作为全球最大的钾盐消费国,其消费量占全球总消费量的 20%,但储量仅占全球的 5%,钾盐对外依存度长期维持在 50%左右,供需矛盾非常突出(邢万里等, 2013;张永生等, 2024;王淑丽等, 2024;陈秀法等, 2025)。立足国内,解决钾盐的严重短缺问题势在必行(张永生等, 2021)。自 20 世纪中叶以来,以袁见齐先生为代表的地质学家为我国

钾盐勘查奠定了重要基础,在察尔汗盐湖实现国内找钾零突破,几代学者持续探索,推动了钾盐找矿理论和方法的发展(宣之强等, 1999)。袁见齐(1961)开创性地提出了中国陆相成钾理论,为内陆盐湖找钾提供理论支撑;郑绵平等(2006)进一步丰富了盐湖学与成矿系列理论,指导了高原盐湖钾盐勘查并取得了重要成果;张玉君于 1963 年开创了利用自然伽马能谱测井直接探测钾元素的方法,为含钾地层的识别奠定了技术基础(Zhang Yujun et al., 2014)。这些传统方法为我国钾盐资源潜力评价提供了关键手段。然而,我国钾盐资源存在分布不均、类型单一、开发难度大等挑战(赵元艺等, 2010;张永生等, 2024),随着科学技术不断发展,勘探目标逐步聚焦于地球深部与复杂构造区,传统找钾方法逐渐暴露出了识别误差较大,速度慢,预测精度低,适用性弱等技术难题。

需作说明的是,本文中的“储层”为广义用法,指代赋存钾盐资源的地质体或层段。近年来,为突破钾盐储层勘探瓶颈,前人通过勘查理论提升及技

注:本文为深地国家科技重大专项课题“重点盐盆关键成盐期层序岩相古地理演化与聚盐成钾”(编号:2025ZD1008901)和新型油气勘探开发国家科技重大专项课题“志留系—中三叠统常规—非常规油气有序分布规律及增储区带评选”(编号:2025ZD1400403)的成果。

收稿日期:2025-11-18;改回日期:2026-01-19;网络首发:2026-02-15;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.031

作者简介:胡景怡,女,2002年生,硕士研究生,石油天然气地质学专业;Email: geohujingyi@163.com。通讯作者:朱光有,男,1973年生,教授,博士生导师,主要从事深层油气地质与成藏研究;Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn。

术创新,在钾盐勘探领域涌现出诸多新方法,苗忠英等(2024)将三维地震应用到钾盐找矿实践中;慎国强等(2024)根据地震特征构建投影卷积神经网络,从而预测新型杂卤石矿藏;陈科贵等(2016a,2018)在测井、地质等资料的基础上,应用BP神经网络方法分别实现固、液体钾矿识别;Ren Qianhui等(2018)采用硼同位素和微量元素分析法对Savannakhet盆地钾盐成矿流体来源进行研究。这些创新方法显著提升了勘探成效,为钾盐勘探开辟了新途径。

当前,我国矿产资源勘探开发不断向深部拓展。在四川、塔里木等大型叠合盆地中,油气与钾盐等蒸发岩矿产在垂向上多套共生、空间上有序分布。发展“油钾共探”技术体系,对于借鉴成熟的油气勘探技术方法、实现深部资源的协同评价与综合利用,从而缓解我国钾盐供需矛盾,具有重要的现实意义。深部钾盐资源潜力亟待探明,而钾盐储层预测技术正是识别深部隐伏固、液相钾盐矿体的关键。笔者

等从地球物理、地球化学等方面详细梳理了钾盐储层预测的技术及方法,并围绕四川盆地、羌塘盆地和萨斯喀温温盆地3个国内外重点钾盐盆地储层分布及其预测现状,展望了这些技术方法未来的发展方向,以期为国内外钾盐资源勘探和钾盐储层预测方法的创新集成提供参考与启示。

### 1 地球物理预测方法

地球物理方法在钾盐资源勘查中主要发挥间接识别与约束建模的作用。其核心优势在于能够高效、大范围地探测和刻画含盐地层的空间展布、构造格架及岩性物性差异,为圈定成矿有利区带提供关键地球物理依据。然而,由于钾盐矿体与围岩的物性差异有时不甚显著,且矿体品位受复杂的沉积与成岩后生作用控制,现有地球物理方法尚难以独立、精确地直接预测钾盐矿体的三维空间展布与矿石品位。当前的有效预测模式,仍需以钻井的精细标定和可靠的地质类比为基础,将地球物理异常信息转

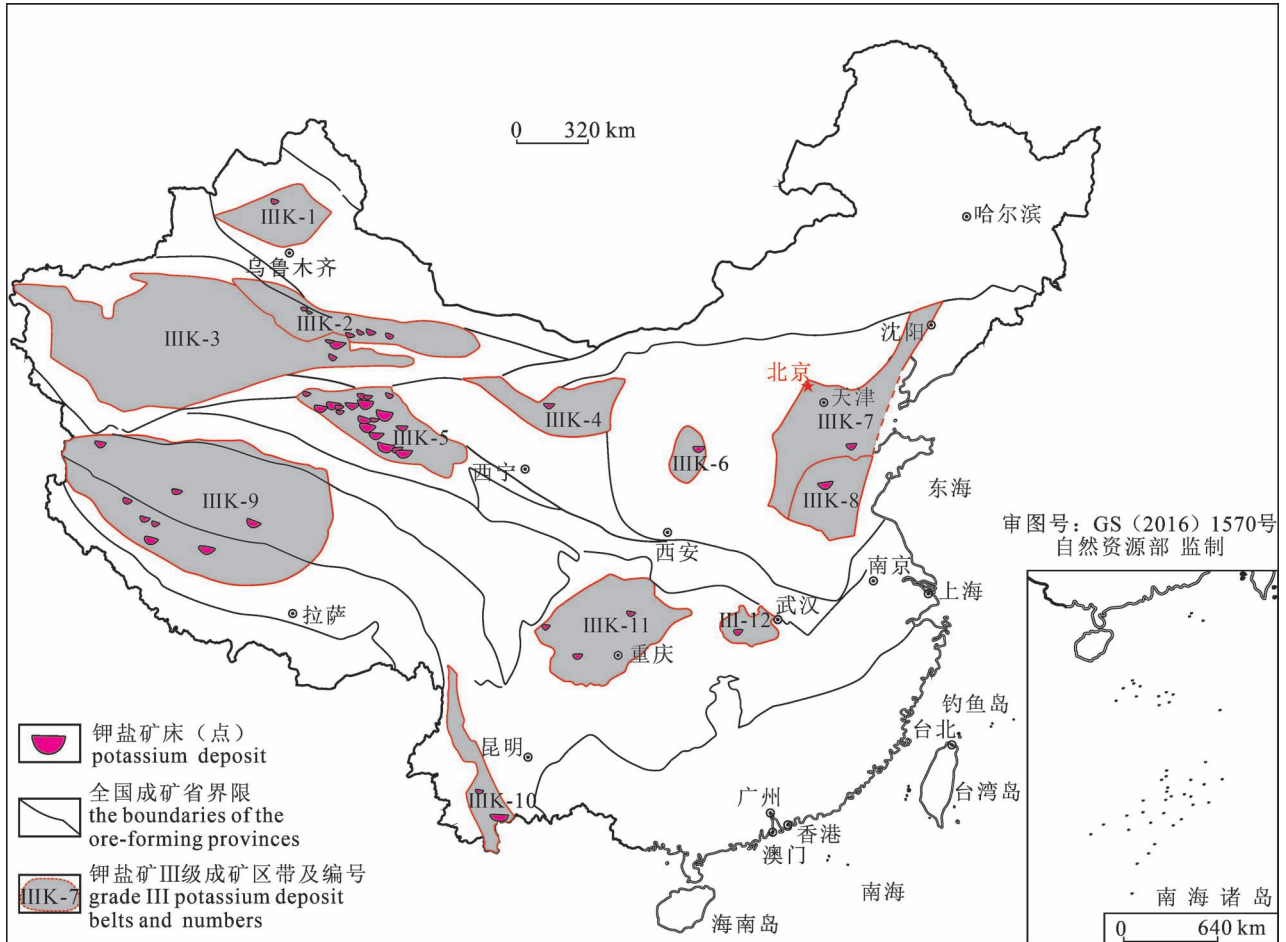


图1 中国钾盐矿Ⅲ级成矿区带初步划分(据商朋强等,2019修改)

Fig. 1 Preliminary map of III level potash metallogenetic units in China (modified from Shang Pengqiang et al., 2019&)

化为地质认识。

### 1.1 富钾卤水储层测井识别

地球物理测井是通过测量岩石的电化学、声学、放射性等物理参数来识别岩性地层的一种勘探方法(梁光河,2016),在钾盐勘探中的作用主要包括划分钾盐层、识别钾盐矿物类型,区分钾盐层、泥质钾盐层、泥岩层,判断钾盐纯度,计算钾含量等。通过井间对比还能判断矿体厚度及横向延伸情况(陈科贵等,2012;胡挺,2012)。钾盐储层测井响应特征具有明显的识别标志,常规测井系列包括自然伽马( $GR$ )、自然电位( $SP$ )、井径( $CAL$ )等岩性曲线,深浅双侧向电阻率( $LLD$ 、 $LLS$ )等电阻率曲线,以及中子( $CNL$ )、密度( $DEN$ )、声波( $AC$ )等孔隙度曲线,自然伽马能谱测井( $NGS$ )可定量测定地层中铀、钍、钾含量。基于钾盐矿物的独特物理性质,综合多参数测井响应特征,可有效识别和评价不同类型钾盐储层(郭木石,2023)。

国内外学者综合利用多种测井方法,分析钾盐储层的测井响应特征,建立了钾盐储层的识别与评价体系。1950年,石油勘探公司开始利用 $\gamma$ 射线测井法测量钻井穿过岩层的天然放射性来寻找钾盐(连云港化工矿山设计研究院六连情报组,1972)。然而,钾盐储层预测面临多种含钾岩石和岩性不纯、杂卤石识别难度较大的问题。陈科贵等(2013)提出利用测井曲线综合分析法、测井曲线重叠法、交会图分析法及自然伽马能谱测井判别模型等识别杂卤石层。黄长兵(2017)通过把交会图法、Fisher判别法、BP神经网络法和支持向量机法4种方法对比分析,发现支持向量机法识别潜伏性钾矿的效果较好。张妍等(2015)将测井组合法和测井旋回地层学法结合运用,指出四川盆地三叠系4个有利成钾区。王元昊等(2016)选择放射性测井、视电阻测井和井径测井在老挝钾盐矿矿区进行综合测井,王建波(2018,2021)利用敏感曲线重叠法、交会图法、钾—电乘积法和钾—钍比值法等方法开展杂卤石测井识别研究,发现钾—钍比值法对杂卤石的识别效果最好。王彬玮等(2021)通过综合分析自然伽马、自然电位、中子、电阻率、密度、声波时差等常规测井曲线的响应特征,识别出南图尔盖盆地Aryskum坳陷的钾盐储层,并借助地层对比和等厚图分析,确定钾盐有利勘探区。Huang Changbing等(2022)在川西南盆地采用孔隙率—电阻率重叠法、孔隙率—电阻率交叉图法、孔隙度重叠法和含水饱和度法有效识别了富钾卤水层。李进等(2025)构建了地质—测

井—地震三位一体的富钾卤水层识别方法,依托高自然伽马、低电阻率等测井响应和自然伽马能谱的高钾、低钍钍特征识别钾盐层,再通过井约束波阻抗与伽马反演预测其空间展布,在平落坝构造取得良好应用(图2、图3)。

测井技术作为钾盐储层预测的关键手段,在钾盐勘探领域已经取得一定成果(韩璐等,2023)。从国内外研究实践来看,测井预测钾盐储层的方法已经通过多参数综合解释形成了一套较为成熟的识别体系,固相钾盐普遍表现为高自然伽马、高电阻率、高密度的“三高”特征,而富钾卤水则以高中子孔隙度、高声波时差、低电阻率为典型标志。然而,不同地区、不同类型的钾盐储层在测井响应上存在一定差异。当前测井技术发展的趋势是更加注重多方法融合,包括曲线重叠法、交会图技术、定量计算模型等,并与地震、地质等资料相结合,形成多尺度、多信息的综合识别体系。随着测井仪器精度的提升和解释方法的创新,测井技术在钾盐储层识别中的精度和可靠性将进一步提高,为深部钾盐资源的勘探开发提供更加有力的技术支撑。

### 1.2 富钾卤水地震预测

地震勘探是地球物理勘探的重要方法之一,其通过人工方法激发与接收地震波信号,研究地震波信号在地下地层的传播特征,以此来推断地下地质构造并寻找矿产资源。地震法在寻找钾盐中的技术应用主要包括:地震资料落实钾盐层的构造、利用地震特征或地震波速识别钾盐层、利用地震技术预测卤水储层等(任瑞军等,2021)。地震勘探技术凭借其深层探测能力和高分辨率的优势,在国内外钾盐资源勘查中日益凸显重要作用,为钾盐储层的识别与圈定提供了可靠的地球物理依据(钱光华,1987)。

在钾盐地震勘探的早期研究中,杨飞等(2011)结合江汉盆地江陵凹陷高精度地震资料与钻井数据,利用波阻抗反演技术识别富钾卤水储层;杨晓玉等(2012)主要利用地震资料储层预测和流体识别技术,尝试了直接进行卤水的识别和预测工作。在老挝万象平原钾盐矿区,地震探测查明了底辟构造特征,并根据盐构造与钾盐矿的厚度变化关系,圈定了有利开采靶区(周国兴,2012),但早期勘探过程都忽略了钾盐与油气资源的赋存地质条件的差异,并未形成一套有效的地震评价手段和流程(罗晶等,2018)。

随着勘探技术的进步,钾盐地震预测技术逐步

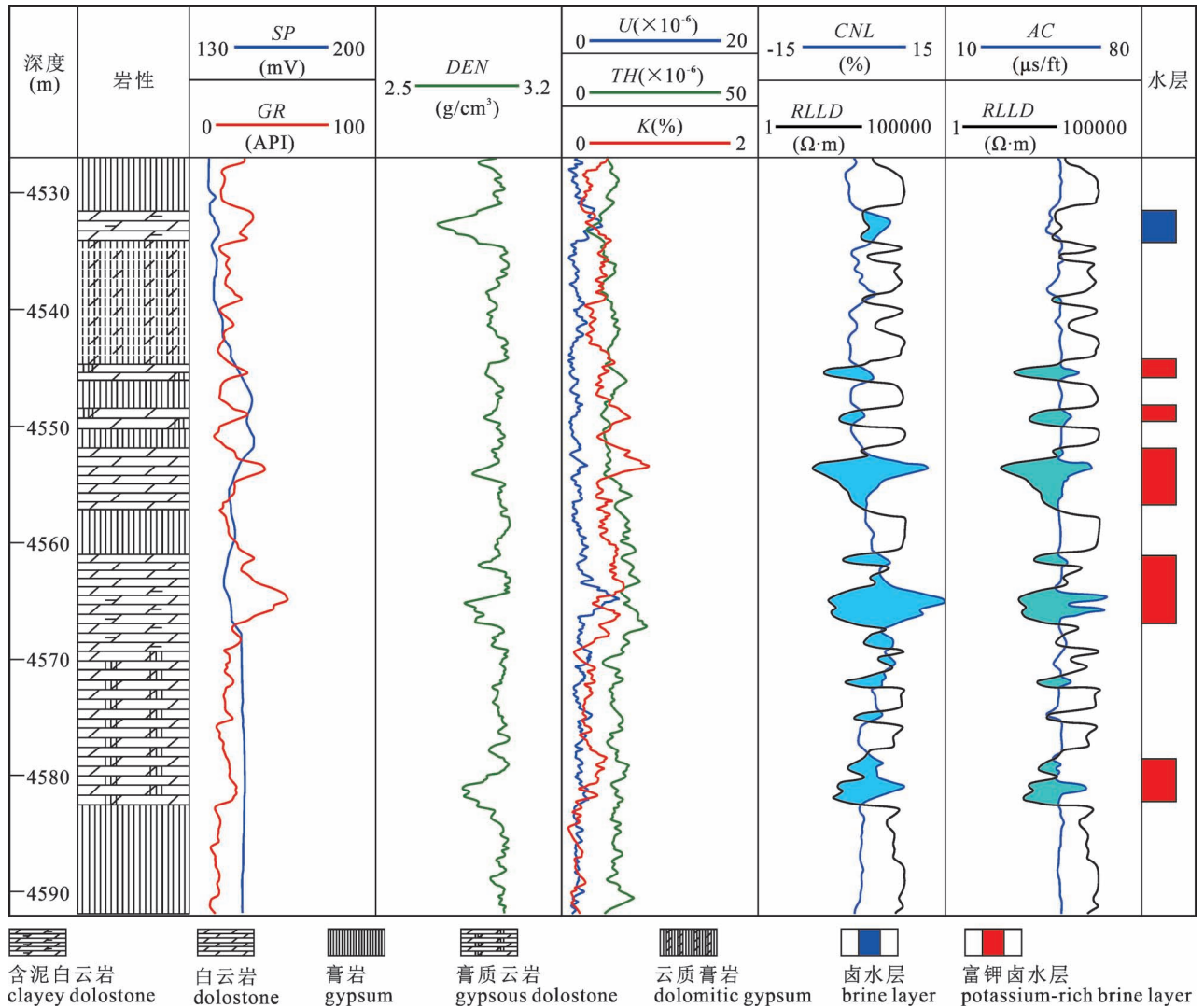


图2 地球物理测井识别富钾卤水层(据李进等,2025 修改)

Fig. 2 Identification of potassium rich brine layer by geophysical logging (modified from Li Jin et al. , 2025&)

向多方法融合、高精度处理方向发展。王健等(2018)对库车凹陷的三维地震和测井资料进行二次开发,通过波阻抗—伽马反演解译确定出成钾有利层位。罗晶等(2018)以三维地震资料为依托,形成了一套以矿体空间分布、敏感测井曲线分析、多属性分析、数字高程模型应用、波形复杂程度和微细裂缝刻画、精细储层描述以及矿体综合评价分析为核心的地震综合识别技术,落实了有利目标 111.41km<sup>2</sup>。邓小林等(2019)在对盐屑采样、化学分析的基础上,采用地震波阻抗和测井伽马反演结合的方法,在塔里木盆地库车凹陷英买区圈定成钾远景区和找钾靶区(邓小林等,2013)。徐永清等(2019)利用老挝万象平原钾盐的流变特征、盐构造成因,结合对三维地震资料的研究,得出钾盐的赋存规律。

梁光河(2020)则在老挝超大型钾盐矿的研究中创新了基于相位叠加的动校拉伸恢复技术和浅层高分辨率处理技术,将最新的各向异性叠前偏移方法应用于地震资料处理,使超浅层地震勘探资料质量显著提高。针对罗布泊地震资料低分辨率、低信噪比的问题,王伟等(2021)采用高保真高分辨率去噪方法保护中浅层反射信息,提高深层钾盐储层的信噪比与分辨率。侯献华等(2021)总结了柴达木盆地黑北凹地砂砾型卤水钾盐储层的地震响应特征,建立了砂砾储卤层的地球物理识别标志。任瑞军等(2021)通过井震联合对比和地震正演分析,提出了利用杂卤石在高、低频地震体上的幅频差异特征,通过体属性运算预测杂卤石分布的技术方法。Yue Hanyu 等(2025)利用音频大地电磁法和浅层地震方

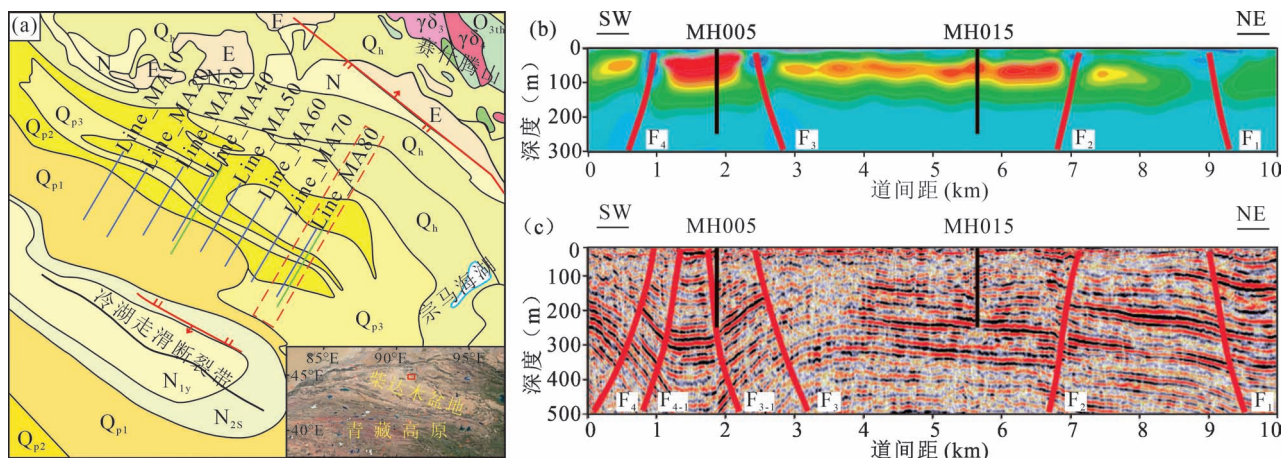


图3 富钾卤水的地质—测井—地震响应模式(a)和富钾卤水厚度预测(b)(据李进等,2025 修改)

Fig. 3 Geological—logging—seismic response model of potassium-rich brine (a) and prediction of potassium-rich brine thickness in western Sichuan Basin (b) (modified from Li Jin et al., 2025&)

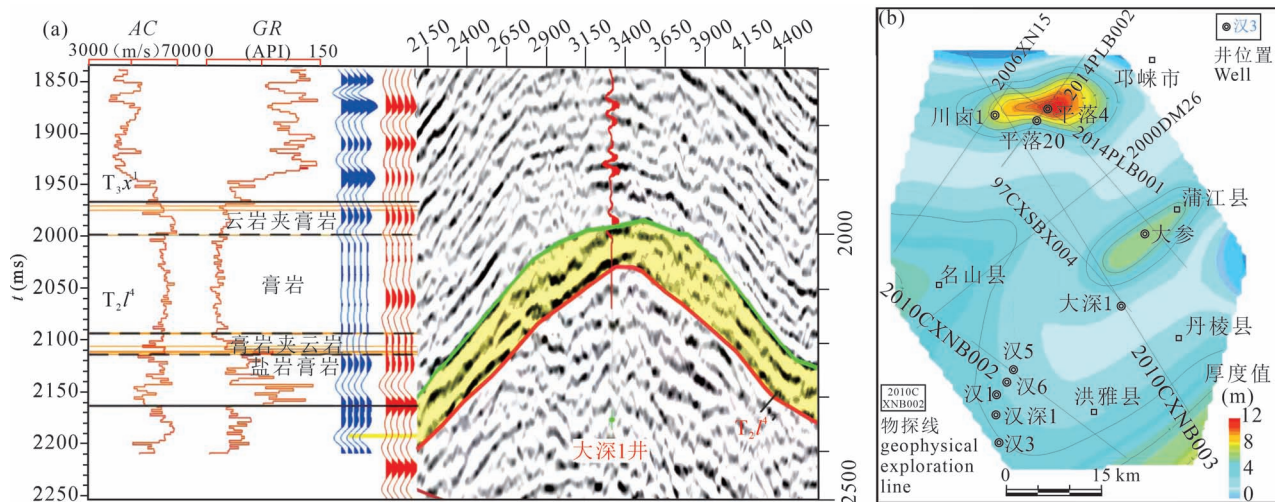


图4 塔里木盆地研究区(a)音频大地电磁法反演剖面(b)和浅层地震剖面(c)(据 Yue Hanyu et al., 2025 修改)

Fig. 4 Location map of the study area in the Tarim Basin (a), AMT inversion profile (b) and shallow seismic section (c) for Line\_MA80 (modified from Yue Hanyu et al., 2025)

法,对柴达木盆地东北缘浅层地质构造及构造特征进行了详细识别(图4),结果表明,陡倾角卤水储集模式丰富度较高,具有较好的卤水型钾盐资源勘探潜力。

地震探测方法在地层划分和构造识别方面效果显著(梁光河,2016)。然而,由于卤水储层与非卤水储层在速度等物性参数上差异较小,且目前对卤水储层特征及其含水性在地震响应和波场特征中的表现尚缺乏定量认识,地震手段在直接识别储层物性方面仍存在较大局限(李广才等,2024)。因此,未来需重点突破复杂地形与复杂波场“双复杂”条件下的高精度地震偏移成像技术,并在此基础上,结

合地质、测井及电磁等多学科资料,为实现深部隐伏固、液相钾盐矿的有效探测提供更加可靠的技术支持(张永生等,2021)。

### 1.3 重力、磁法和电方法勘探

重力勘探具有经济实用、方法简便、勘探深度大、应用效率高等优点。其主要是以盐体与围岩存在密度差异为基础前提,通过建立盐系地层构造地质模型,对由盐体引起的重力异常进行模型正演分析,以此可推断盐体在平面的分布位置并估算其埋藏深度,相对密度差异越大勘探效果越好(苗忠英等,2024)。

钾盐矿产与周围地层存在明显的密度差,应用

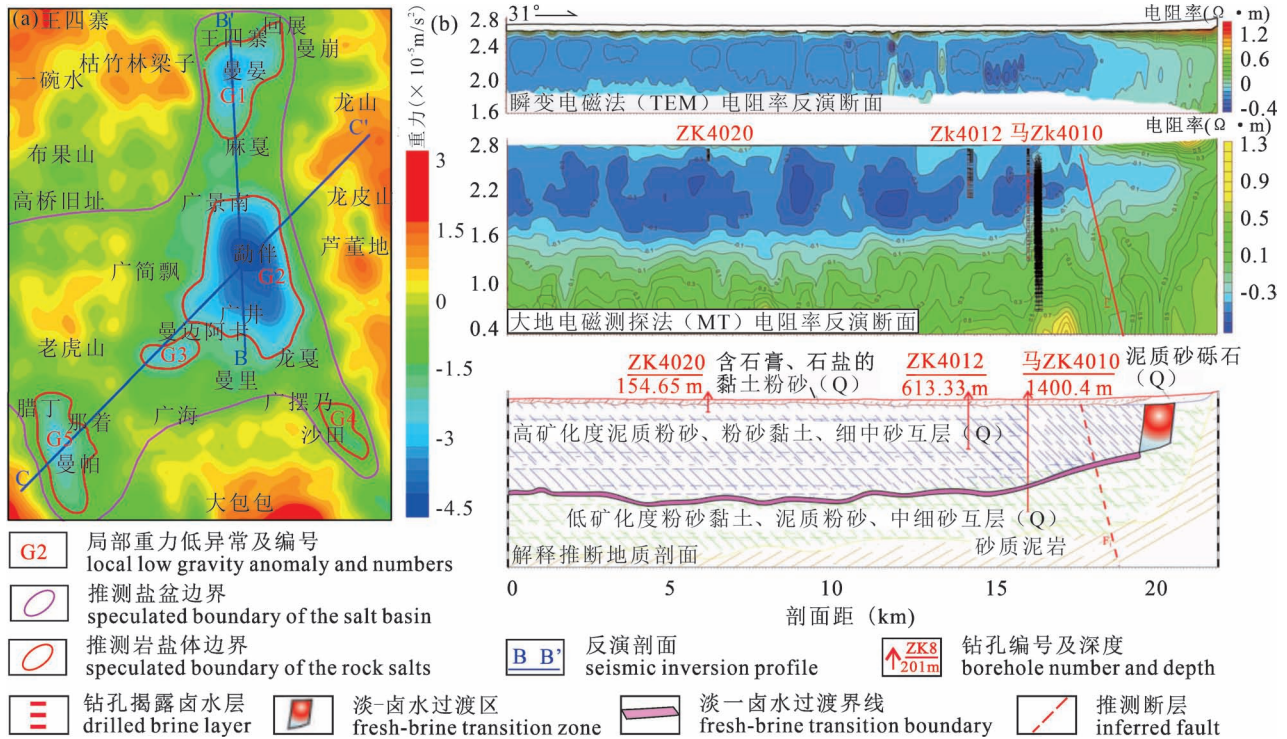


图5 重力法推断盐岩体(a)和电磁法成果图(b) (据宋旭锋等,2014;何胜等,2021 修改)

Fig.5 Gravity-inferred salt rock bodies (a) and electromagnetic survey results map (b)

(modified from Song Xufeng et al., 2014& He Sheng et al., 2021&)

重力勘探具有良好的找矿效果(郇恒飞,2013;明圆圆等,2021)。在老挝万象(王少华,2012)、昆明中生界盆地(钟寿华,1992)、伊拉克塞马沃盐矿(AL-Rawi et al., 1990, 1991)、安宁盆地(蔡立权等, 1983;王炳玉,1985;信和培,1988)、云南勐腊地区(宋旭锋等,2012,2014)(图5a)、江城勐野井地区(王宝禄,1997;郑绵平等,2014;刘璿等,2015,2019)、罗布泊盆地(牛雪等,2019)等地均有应用重力方法进行钾盐勘探的经典案例。牛雪等(2019)对罗布泊罗北凹地西部重点区域进行了1:5万高精度重力勘探,利用高精度重力解译断裂构造结果,推断出有利的深层卤水富集区。宋晓蛟等(2020)对老挝万象北班根钾盐勘察区实施高精度重力勘察,进行重力异常、断裂和剖面解释,利用重力资料反演三维密度界面,综合分析圈定成矿远景区。梁光河(2020)在研究中创新了重力异常分离和延拓的三维视密度反演方法,首次提出运用Canny算子自动识别重力斜导数图中的地质体边界的方法,成功地圈闭出钾盐矿的水平分布范围。明圆圆等(2021)在罗布泊罗北凹地西部进行重震联合反演解释,减少了重力反演深层构造界面的多解性。

磁法勘探技术基于地下地质体对外部磁场的反

应,利用地质体的磁性物质与地球自然磁场之间的相互作用,产生磁异常并对矿体的存在和位置进行精确识别,因其非接触式、探测深度大、分辨率高、成本低廉等优势应用于地质勘查工作(兰超歌,2025)。

电法勘探主要是结合围岩和矿体存在的电性差异为前提,对人工稳定电流场在地下传导分布规律进行研究,来掌握矿体和围岩具体分布情况(周权等,2021)。焦鹏程等(2005)利用电法勘探手段进行富钾锂卤水储层预测,依据卤水岩层具有低电阻率的特性,论证了卤水储层的电学机理和探测可行性,并采用大地电磁测深方法和自然电场法预测研究区盐矿层的赋存状态。由于钾矿没有磁性,通常使用磁法与电法结合的电磁方法进行钾盐勘探。

电磁法是地球物理电法勘探的重要分支,该方法主要利用地下介质的导电性、导磁性和介电性的差异,应用电磁感应原理观测和研究人工或天然形成的电磁场的分布规律,进而解决有关地质问题。20世纪90年代,河北省地矿局第四水文地质工程地质大队对电测深法找卤水矿床进行了可行性分析和推断(李耀民,1993)。赵文龙等(2014)通过大地电磁法(Magnetotellurics,简称MT)和音频大地电磁

法(Audio-frequency Magnetotellurics,简称AMT),以天然电磁场为场源,测量地下介质的电阻率差异,结合岩石物性分析对川东地区三叠系雷口坡组和嘉陵江组进行二维反演和正演模拟。通过对比视电阻率曲线、相位断面图及钻井数据,圈定了富钾卤水层的纵向分布和横向展布特征,验证了该方法在预测钾盐储层中的有效性。朱自串等(2019)通过AMT,结合钻孔资料和岩石物性分析,对老挝万象盆地古近系塔贡组进行二维反演。通过识别电阻率等值线和局部高阻凸起,圈定了钾盐矿体的埋深、厚度及构造分布,验证了AMT在复杂构造区间接找矿的有效性,为靶区优选和钻孔选址提供了依据。何胜等(2021)通过综合瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method,简称TEM)和MT,利用TEM对低阻异常敏感、分辨率高的特点探测浅中层,结合MT深部探测优势,在柴达木盆地盐湖区识别出低阻异常区,反映高矿化度卤水钾矿层(图5b)。钻孔验证表明该方法组合能有效克服浅部高矿化度屏蔽效应,为深层卤水钾盐资源勘查提供了可靠依据。

重力方法在筛查浅层钾盐目标区时经济高效,但同时对于深部地层以及复杂构造界面具有多解性(明圆圆等,2021);磁法能够有效识别地下磁性矿体并提供深度信息,但其对岩盐、石膏等非磁性地质体及深部矿体的探测能力有限,同时在实际应用中容易受到仪器误差、环境干扰、地质背景复杂性等因素的影响;电磁法能直接识别钾盐的电性差异,兼具多深度探测优势,但深部分辨率有限且受高阻层屏蔽,需结合重磁数据降低多解性。总体而言,重、磁、电方法在钾盐储层预测中各具优势,但需辅以其他地球物理手段进行综合解释。

## 2 人工智能地球物理预测技术

### 2.1 传统机器学习与浅层智能方法

通过建立敏感地震属性与钾含量之间的映射关系,机器学习可以充分提取地震数据中蕴含的富钾地层特征,从而有效实现杂卤石储层的精准预测。钾盐储层预测中用到的机器学习方法主要有BP神经网络和支持向量机(Support Vector Machine,简称SVM)等。BP神经网络方法通过输入测井数据,构建多层前馈网络模型,利用误差反向传播算法动态优化权值,建立测井参数与固、液态钾盐储层的非线性映射关系。通过数据归一化处理消除量纲差异,以Sigmoid函数激活神经元,实现对富钾卤水层和杂卤石层的自动识别与分类,显著提升薄层和复杂

岩性界面的预测精度,优于传统测井解释方法;SVM方法通过选取测井曲线作为输入特征,利用RBF核函数构建分类模型。相较于其他机器学习方法,SVM在计算方法、理论方法和有效性等方面都具有优势(罗建容,2009),该方法基于统计学习理论,以结构风险最小化为原则,通过参数寻优建立决策边界,实现对不同岩性特征的杂卤石层的精确分类识别,其正确率达90%以上,显著优于传统测井解释方法。

杂卤石常与石膏、白云石等矿物伴生,很难单纯利用测井曲线特征将其他地层分辨开来。随着智能计算的发展,神经网络结合测井数据的识别模型在岩性识别领域得到了广泛应用。陈科贵等(2018)利用BP神经网络实现对川东地区深层卤水层、富钾卤水层和川中地区杂卤石层的识别,显著提升了传统测井解释的效率与精度,为液态钾盐勘探提供了可靠的技术支持。但神经网络也存在一些缺陷(张治国,2006),主要体现在:在泛化过程中容易造成局部极值且泛化能力较弱、网络结构设置具有定的人为主观因素以及收敛速度不好控制。相比之下,SVM作为一种监督学习方法,在解决此类问题上展现了不同的特点。陈科贵等(2016b)基于SVM方法,通过交叉验证法优化参数,构建预测模型对川中地区下中三叠统杂卤石储层进行分类识别,取得了良好的效果。但是交叉验证算法不仅存在着计算量大、复杂程度高,在参数寻优时需要花费大量时间,样本数量偏大时性能表现不佳等问题,而且在优选参数时局限于全局的角度而忽略局部信息,从而导致分类识别的效果不理想(曹旭,2018);吴刘磊(2017)通过把常规测井识别方法与SVM、BP神经网络、极限学习机(Extreme Learning Machine,简称ELM)模式识别法进行对比,发现模式识别法能精确识别杂卤石储层并分类。陈科贵等(2017)通过主成分分析(Principal Component Analysis,简称PCA)、ELM和测井解释相结合的方法,建立杂卤石精确识别模型PCA-ELM。在此背景下,杨福强等(2019)提出利用粒子群算法(Particle Swarm Optimization,简称PSO)来优选SVM参数,然后以测井数据为基础,通过优选参数创建更高准确度的SVM分类模型应用于四川盆地钾盐识别之中,实验中选用林智仁等开发的LIBSVM工具箱来实现杂卤石的识别(陆宁等,2011)。PSO-LIBSVM模型不仅可以解决常规测井解释中存在人为性的问题,还可以极大地提高测井解释的精度,具有很好的应用前景。

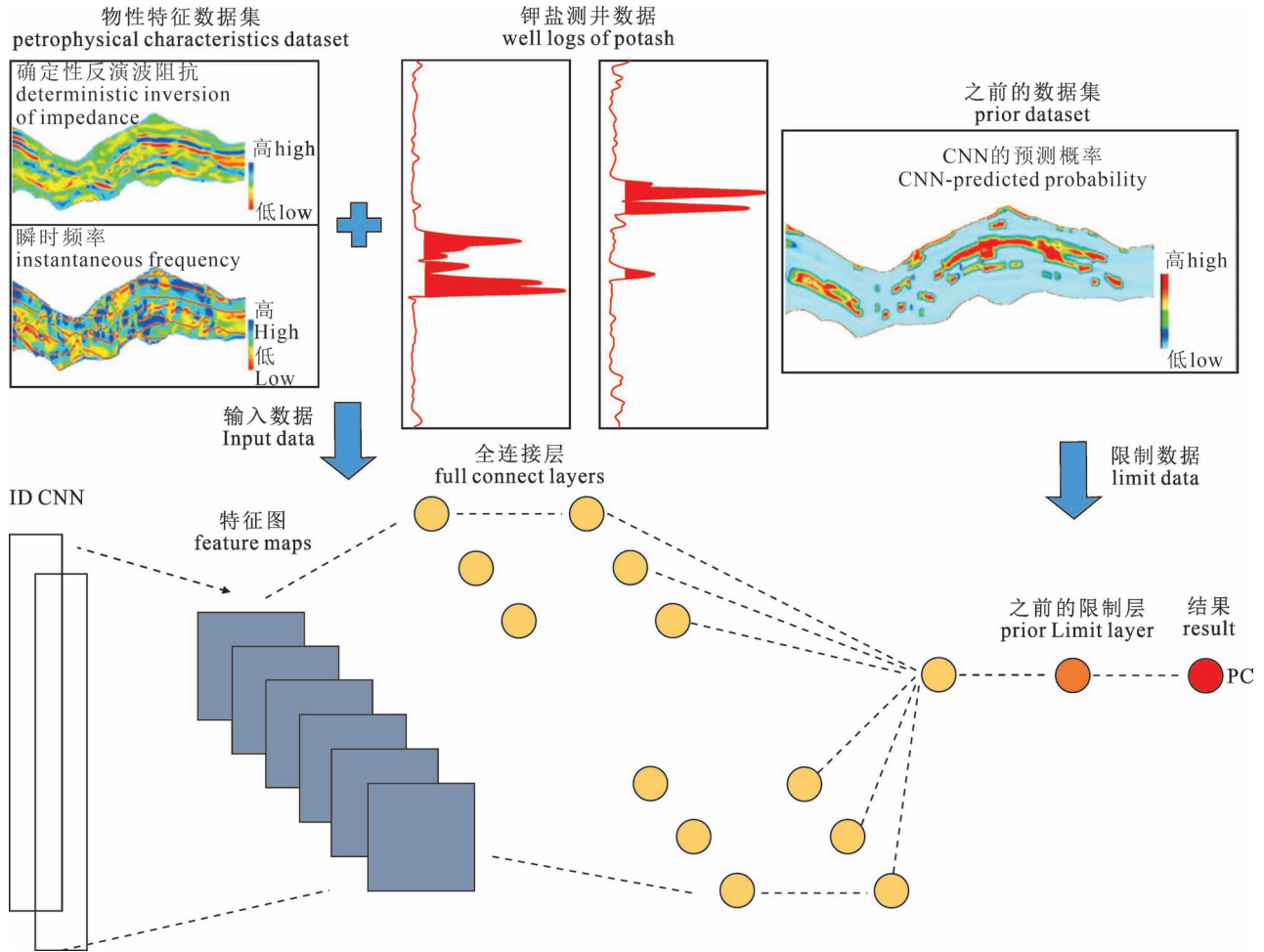


图6 用于PC预测的CNN结构(据 Zhu Lei et al., 2023)

Fig. 6 Structure of the CNN used for PC prediction (modified from Zhu Lei et al., 2023)

机器学习通过网络模型可以学习地震数据与井曲线之间的映射关系。与地球物理反演需要明确正演方程不同,这种数据驱动方法可直接预测矿层参数的空间展布(赵改善,2019)。典型应用包括:张繁昌等(2004)的三维地震反演、慎国强等(2021)在川东北钾盐识别的突破性工作等。这些研究为深度学习在储层预测中的应用提供了重要范式。

## 2.2 深度学习方法与前沿进展

深度学习凭借其多层神经网络架构,显著提升了传统机器学习在特征提取和非线性建模方面的能力。相较于Wiener等(1991)提出的早期单层预测模型,现代深度学习方法在处理地球物理数据的高维、非线性映射问题上表现出明显优势。例如,卷积神经网络(Convolutional Neural Network,简称CNN)通过分析钾盐储层的地震波形特征与岩石物理属性,可构建双分支网络结构,并借助波形约束损失函数实现双向映射优化。在钾盐储层预测的特定应用

中,Zhu Lei等(2023)提出的双分支CNN架构创新性地融合了地震波形与岩石物理两种不同模态的数据(图6),有效解决了钾盐预测中的多解性难题,在验证井中预测钾盐含量的相关系数超过80%,且预测的富钾区与地震波形特征高度吻合,显著提升了复杂地质条件下钾盐储层空间展布与富集程度的识别精度。

近年来,CNN在地球物理储层预测中取得多项重要进展:张繁昌等(2014)和刘汉卿等(2015)率先将CNN引入地震高分辨率反演;吴正阳(2018)实现了裂缝型储层的智能识别与评价;陈科贵(2018)成功将其应用于卤水储层评价。除CNN外,循环神经网络(Recurrent Neural Network,简称RNN)因其对时序数据的高效建模能力,被广泛用于测井曲线的垂向关系提取;Transformer架构则凭借其强大的多模态融合能力,实现了地震、测井与地质属性的协同建模。这种端到端的训练模式不仅克服了传统人

工特征工程的局限性,还在川东北复杂钾盐储层(慎国强等,2021)及非均质储层预测中展现出显著效果,如林年添(2018)的小样本学习方法与陈蕾(2020)提出的 U-Net 碳酸盐岩识别模型均验证了其实际应用价值。

针对传统方法与经典深度学习模型在小样本、高噪声等实际条件下的局限,一系列结构创新的神经网络变体逐渐涌现。例如,投影卷积神经网络(Projective Convolutional Neural Network, 简称 PCNN)通过引入投影变换层,增强了对钾盐矿层有效特征的抽取能力,更好地适应了测井数据与地震响应之间的局部非线性映射关系(图 7、图 8a)。慎国强等(2021)通过构建含投影层的 PCNN 模型,结合地质先验与多尺度地震样本,在川东北地区实现了钾盐含量预测吻合率超过 80%,并进一步根据电阻率与钾含量差异有效区分固、液相矿层(图 8b)。

另一方面,多技术融合成为提升钾盐预测精度的重要路径。侯献华等(2022)利用神经网络联合反演技术,融合感应测井与地震数据,建立非线性映射关系并生成三维感应数据体,显著提高了南翼山地区富钾锂卤水储层的识别精度。宋飞(2022)提出融合 CNN 与进化极限学习机(ELM)的混合模型,通过一维 CNN 提取测井深层特征,再经改进鸟群算法(MMSBSA)优化 ELM 参数,最终在气层识别中达到 96.21%的准确率,该框架经适配后亦具备迁移至钾盐储层预测的潜力。

尽管卷积神经网络在地震反演中已取得系列成果,但其在新型杂卤石等特殊钾盐矿种预测中的应用仍较为有限,表明该领域尚存较大研究空间与发展潜力。

### 3 地球化学预测方法

地球化学方法主要用于成因解析与成矿潜力指示。它通过精细分析蒸发岩系及卤水中的元素与同位素组成,旨在揭示钾盐的物质来源、反演古环境、示踪成矿流体演化,从而为判断区域成钾潜力和圈定有利找矿靶区提供关键的地球化学依据(刘成林等,2024;石海岩等,2024)。该方法在无钻井控制区的直接、大范围空间预测能力有限,通常作为一种重要的辅助手段。长期以来,国内外学者开展了系统性研究,其方法体系以元素地球化学为基础,通过建立 Br/Cl 等关键指标来判别卤水蒸发阶段与成钾潜力(郑绵平等,2010)。同位素地球化学为示踪流体来源与迁移路径提供了不可替代的示踪依据(谭红兵等,2004),而钾同位素( $\delta^{41}\text{K}$ )等非传统稳定同位素的应用,则为高精度示踪提供了新的前沿手段(He Maoyong et al., 2025)。通过综合判别多项地球化学参数成因,有力支撑了典型钾盐矿床的成矿模式建立与有利区带圈定(刘成林等,2010;张永生等,2021)。三者共同构成了支撑勘查实践的关键方法链条。

元素地球化学标志是识别与评价钾盐储层的基

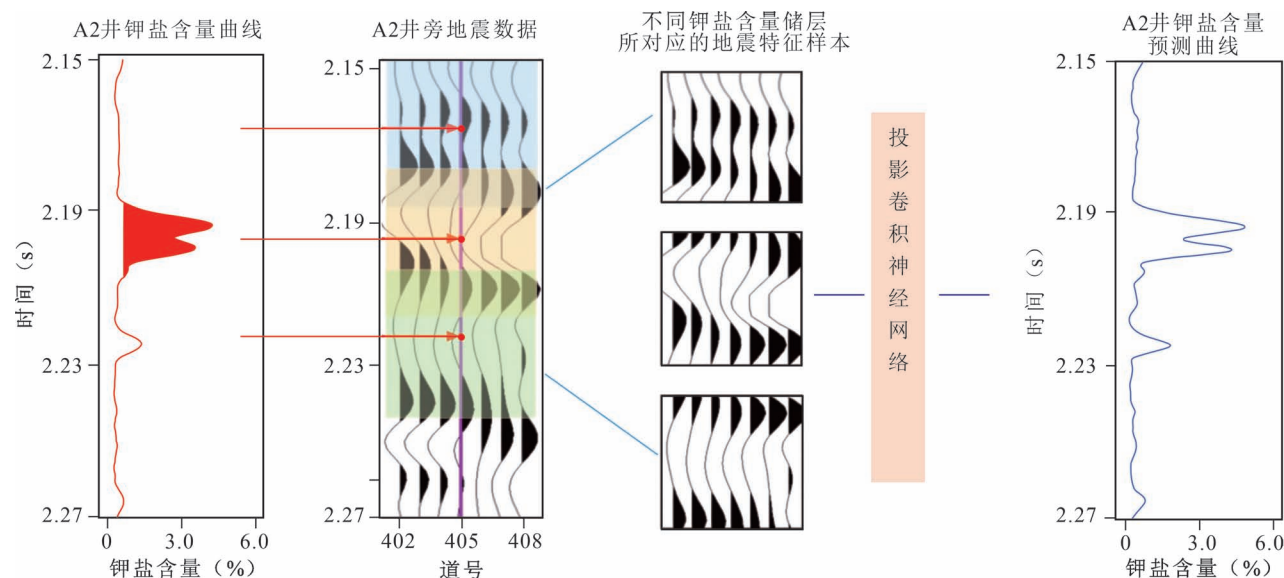


图 7 川东北地区钾盐矿层地震特征样本集的构建及训练(据慎国强等,2024)

Fig. 7 Constructing and training of seismic features for potash reservoirs in northeast Sichuan area (modified from Shen Guoqiang et al., 2024&)

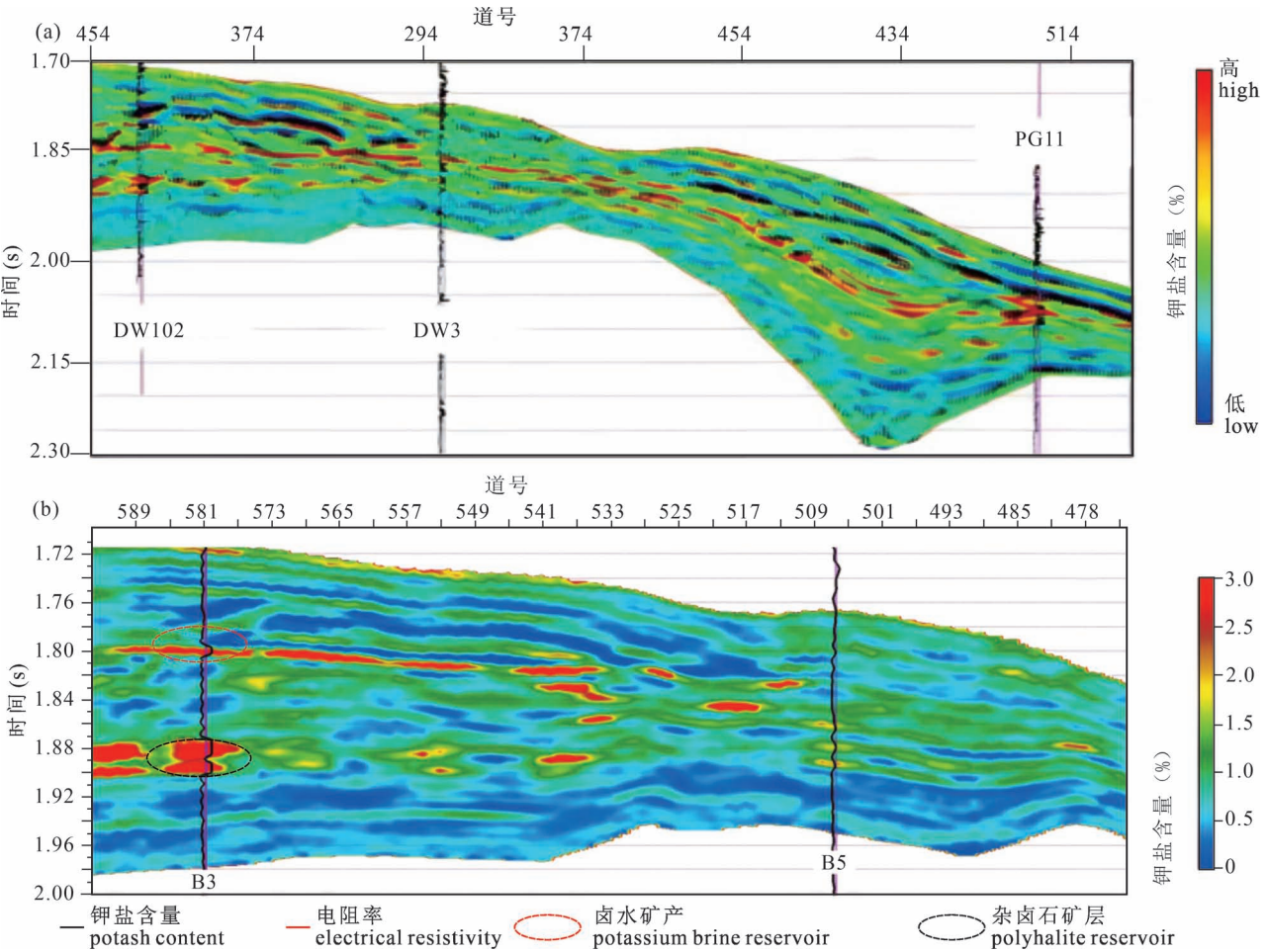


图 8 极限学习机 (a) 和投影卷积神经网络预测的钾盐含量剖面 (b) (据慎国强等, 2021, 2024)

Fig. 8 K-rich layers predicted by limit learning machine (a) and projected CNN-predicted K-rich profile (b) (modified from Shen Guoqiang et al., 2021&, 2024&)

础。钾盐储层通常表现出特定的元素组合特征,如高含量的  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Br^-$  以及 B 等微量元素。刘锦磊等(2015)对江陵凹陷 SK3 井的研究通过系统分析  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $Br^-$  等离子垂向变化(图 9),重建了盐湖浓缩—淡化旋回,精准定位了层段 I 是该区域的钾盐富集层段,为成钾潜力评估提供了定量指标。

同位素地球化学示踪为解决钾盐物源和成因提供精确手段。稳定同位素 ( $\delta^{34}S$ 、 $\delta^{11}B$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) 及放射性同位素在示踪卤水源地、演化过程及成钾时代方面具有独特优势(张大文等, 2023)。Ren Qianhui 等(2018)对萨瓦纳凯特盆地钻孔的研究通过硼同位素 ( $\delta^{11}B$  值 18.17‰~28.65‰) 及微量元素 (Br、B) 耦合分析,揭示了海水与淡水混合、热液阶段性输入的成矿过程,并划分出四个成矿阶段。此外,硫同位素 ( $\delta^{34}S$ ) 可用于判断硫酸盐沉积环境,硼同位素 ( $\delta^{11}B$ ) 有助于识别流体来源和演化过程。

多同位素示踪技术的应用彰显了地球化学方法在解决复杂物源问题上的能力。苗忠英等(2023)对思茅盆地的研究通过 Sr—S—K 同位素联合示踪,不仅证实成钾物质的海源属性,还通过  $\delta^{34}S$  与  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值的负相关揭示了陆源淡水混合作用,并利用端元模型定量评估混合比例(对 Sr 的贡献 < 35.2%),凸显了多同位素联用技术在克服横向对比难题、精确约束成因机制方面的优势。在柴达木盆地的研究中,He Maoyong 等(2025)通过测定  $\delta^{41}K$  值并结合  $\delta^7Li$ 、 $\delta^{11}B$  等多同位素体系,有效区分了盐类物质的多元来源,并揭示了卤水蒸发浓缩过程中的钾同位素分馏行为,为判断卤水演化阶段和钾盐沉淀潜力提供了新的地球化学指标。

地球化学方法的综合应用与成因判别,是将基础指标与示踪信息转化为勘探方向与靶区优选的关键环节。在库车盆地的研究中,伯英等(2016)提出

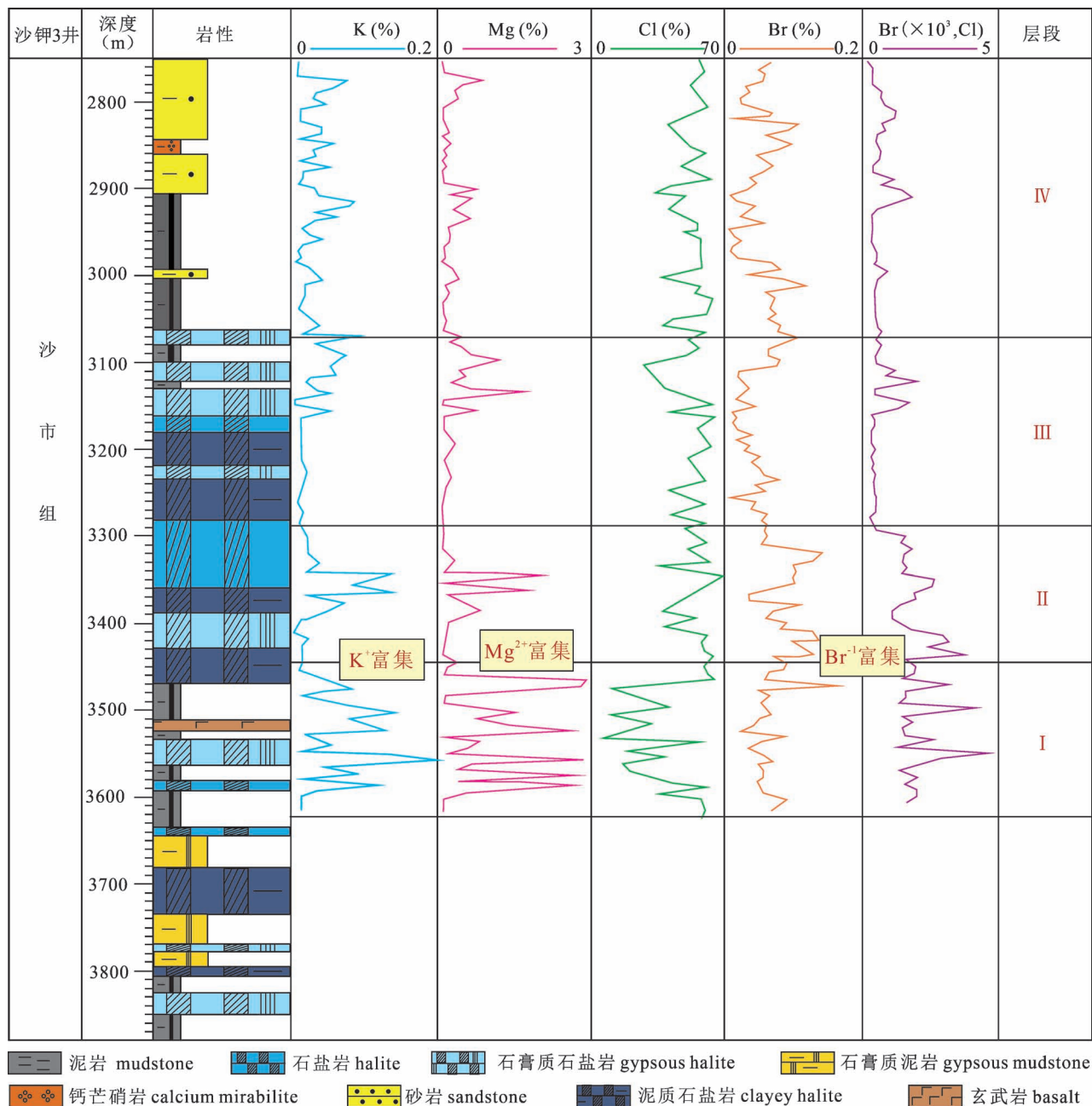


图9 沙钾3井内微量元素随深度变化趋势图(据刘锦磊等,2015修改)

Fig. 9 Profile of Trace Elements versus Depth in Well Shajia-3 (modified from Liu Jinlei et al. , 2015&)

了断裂带地球化学深穿透技术,该工作通过地表元素测量圈定异常,结合稀有气体同位素示踪其深部来源,并最终构建了氢氧同位素与离子含量的深度预测模型。类似地, Li Junyang 等(2025)通过深穿透地球化学技术在塔里木盆地库车坳陷南缘系统采集地下卤水样品,发现  $K^+$  含量介于  $0.04 \sim 0.22$  g/L, 部分剖面点  $K^+$ 、 $Cl^-$  等盐分含量显著高于周边,指示深部断裂段可能存在钾盐异常,进一步验证了该技术在识别深部钾盐异常方面的有效性与实用性。

曹养同等(2021)在莎车盆地通过岩石地球化学测量发现乌帕地区地表卤水具有高溴氯系数和钾异常,再结合地表盐壳中光卤石的发现,预测出该区为有利找钾靶区,体现了多指标综合判别在钾盐勘查中的有效性。在揭示卤水成因与建立成因—预测模型方面,姜长龙(2013)对四川盆地平落坝构造富钾卤水的研究发现,其  $K^+$ 、 $B_2O_3$ 、 $Li^+$ 、 $Sr^{2+}$  异常富集,  $Na/Cl$  系数(0.74)和  $Cl/Br$  系数(40.98)指示卤水经历深度变质及固态钾矿溶滤作用。 $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  同

位素进一步确认其源自古海水但经历复杂演化。通过对四川盆地三叠纪富钾卤水进行研究,周游(2014)发现地球化学体系存在同位素指示海水来源但 K/Br 比值异常高的矛盾,并提出了高品位富钾卤水形成与固体钾盐矿物溶滤密切相关的综合成因模式。

地球化学方法在精细成因研究和局部异常查证中效果显著,是评价成钾潜力和辅助圈定找矿靶区不可或缺的工具,但仍面临取样成本高、横向对比难、模型依赖性强等挑战。单一同位素难以对卤水地球化学问题进行深入解析,未来更需要依赖多种同位素的联合应用,从而开展多维度的同位素示踪研究,以全面系统地揭示地球化学规律,支撑勘探实践(Meixner et al., 2022; Yu Xiaocan et al., 2022; 李建森等, 2022; 饶辉辉等, 2025)。

## 4 重点盆地钾盐研究进展

### 4.1 四川盆地

四川盆地位于扬子板块西部,面积约  $1.8 \times 10^5$

$\text{km}^2$  (Zi Jinping et al., 2017),是在扬子板块和克拉通地台上形成并发育的复合型盆地 (Zhang Yueqiao et al., 2011) (图 10a)。该盆地发育多套海相蒸发岩系,其中,下三叠统嘉陵江组 ( $T_{2j}$ ) 和中三叠统雷口坡组 ( $T_{2l}$ ) 是钾盐成矿的主要层位 (王凯莹, 2019)。具体而言,  $T_{2j}^2$ 、 $T_{2j}^4$ 、 $T_{2j}^5$ 、 $T_{2l}^1$ 、 $T_{2l}^3$  和  $T_{2l}^4$  为成盐期,  $T_{2j}^4$ 、 $T_{2j}^5$ — $T_{2l}^1$  和  $T_{2l}^4$  是与海平面波动有关的钾形成期。嘉陵江组以碳酸盐岩与蒸发岩互层为特征,厚度 200~500 m,在川东北地区已识别出多层钾盐矿化显示 (张雄等, 2025); 雷口坡组则以白云岩和硬石膏岩为主,局部有钾盐矿物产出。此外,上三叠统须家河组 ( $T_{3xj}$ ) 的碎屑岩层段也展现出良好的找钾潜力 (图 10b)。

近年来,国内外学者围绕四川盆地钾盐储层预测开展了系统性的研究,逐步形成了一套多技术融合的找钾技术体系。例如,郭强 (2020) 将地质资料与测井、三维地震资料相结合,通过岩相古地理重建、测井交会图分析和人工智能多参数反演,实现了对川东北地区富钾卤水分布规律的精细预测。刘铸

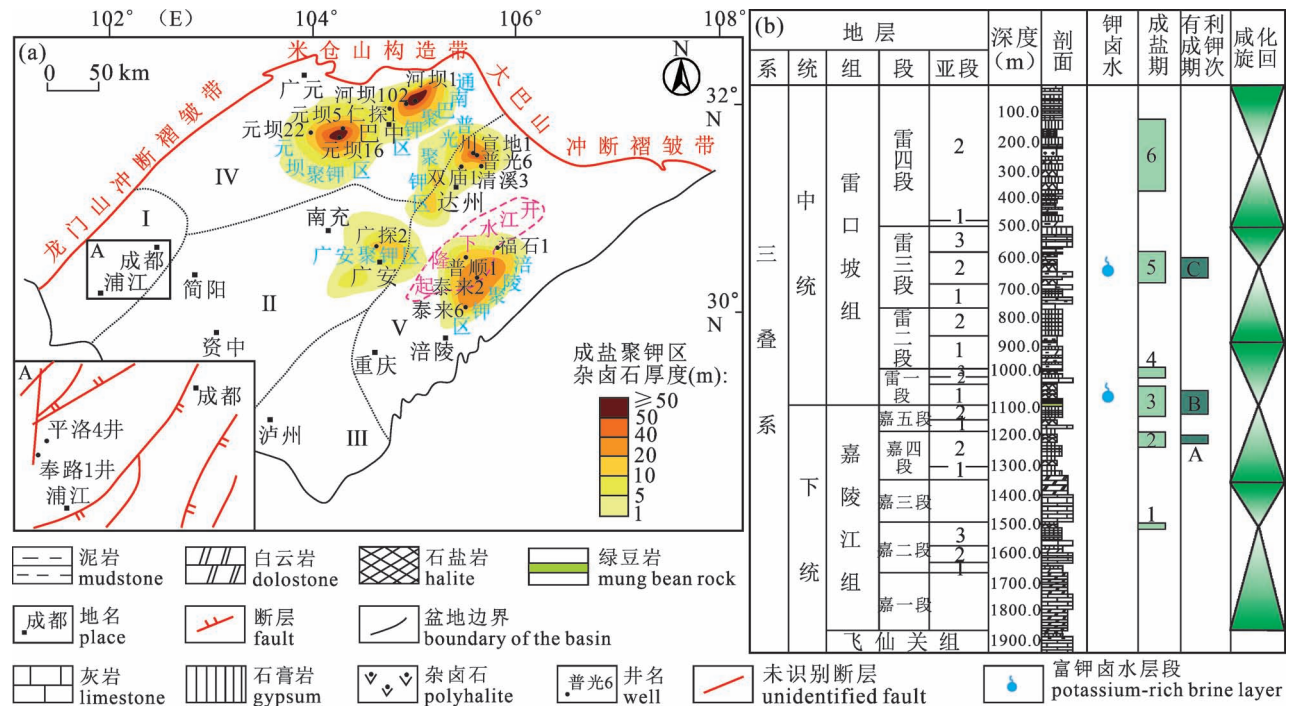


图 10 四川盆地构造地质图及  $T_{2j}/T_{2l}$  柱状图 (据 Zhang Bing et al., 2018; Su Kelu et al., 2025 修改)

Fig. 10 Tectonic geological map of the Sichuan Basin and the synthesis histogram of  $T_{2j}$  and  $T_{2l}$

(modified from Zhang Bing et al., 2018; Su Kelu et al., 2025)

I—四川盆地西部的低梯度拗陷区; II—四川盆地中部平缓的古隆起区; III—四川盆地南部低梯度老拗陷区内的类似区域;

IV—四川盆地北部平缓的拗陷区; V—四川盆地东部的高陡裂褶褶皱区

I—Low gradient depression in the western Sichuan Basin; II—Smooth old uplift in the central Sichuan Basin; III—Somelike zone in the lower gradient old depression in the southern Sichuan Basin; IV—Smooth depression in the northern Sichuan Basin; V—High and steep zone of bruchfallen in the eastern Sichuan Basin

等(2020)则聚焦测井技术,通过交会图、曲线重叠法和多参数综合识别模式,系统建立了固态钾盐与富钾卤水层的测井响应标志,高自然伽马、高电阻率等特征识别为“油钾共探”提供了基础支撑。王彬玮等(2020)将自然伽马能谱和 XRD 实验引入找钾

中来,明确了杂卤石的典型测井与元素特征,提升了深部钾盐识别的精度和可靠性。此外,岳云宝(2013)和崔志伟等(2019)利用 MT 和 AMT 两种电磁方法进行电性结构反演与低阻异常识别,通过结合地质与钻探数据,有效揭示了川中和垫江等地区

表 1 主要钾盐储层预测方法对比及典型实例

Table 1 Summary of potassium salt reservoir prediction methods

大类	小类	原理	优势	劣势	经典应用
地球物理方法	测井技术	通过测量井孔岩石的电、声、放射性等物理参数响应来识别岩性和流体	纵向分辨率高,可定量计算钾含量,识别矿物类型,判断矿体纯度	对薄互层和复杂岩性分辨不足;仅为井点信息,需插值推测井间情况	陈科贵等,2013;张研等,2015;王元昊等,2016;黄长兵,2017;王建波,2018,2021;王彬玮等,2021;Huang Changbing et al.,2022;李进等,2025
	地震勘探	通过人工激发地震波,分析其在地下地层传播的反射、折射等信号,反演地下构造和物性	横向连续性好,能精细刻画储层空间结构和展布,深层探测能力强	直接识别流体和物性难度大;受复杂构造和噪声影响大;成本高昂	钱光华,1987;杨飞等,2011;杨晓玉等,2012;周国兴,2012;邓小林等,2013,2019;罗晶等,2018;王健等,2018;徐水清等,2019;梁光河,2020;侯献华等,2021;任瑞军等,2021;王伟等,2021;Yue Hanyu et al.,2025
	重力法	基于盐体与围岩之间存在密度差异的前提,测量由密度差引起的重力异常,从而推断盐体分布范围和埋藏深度	经济、快速、勘探深度大,覆盖范围广,对圈定盐丘和盆地范围效果显著	反演存在严重的多解性;垂向分辨率低;易受浅部干扰和区域背景场影响	蔡立权等,1983;王炳玉,1985;信和培,1988;AL-Rawi等,1990,1991;钟寿华,1992;王宝禄,1997;王少华,2012;宋旭锋等,2012,2014;郑绵平等,2014;刘璿等,2015;刘璿等,2019;牛雪等,2019;宋晓蛟等,2020
	磁法	基于地下岩矿石的磁性差异与地球磁场的相互作用,通过测量磁异常来推断磁性地质体的存在和分布	对磁性矿物探测有效;可提供深度信息;非接触式测量,效率高	钾盐无磁性,直接探测能力弱;主要用于辅助构造填图;易受环境电磁干扰	兰超歌,2025
	电法	基于岩矿石的电性差异,通过观测人工或天然电磁场的分布规律来探测地下电性结构	对流体反应敏感,能直接探测低阻卤水储层;探测深度大;种类多,可适应不同勘探需求	深部分辨率有限;受浅部高导层屏蔽效应影响;反演多解性较强	李耀民,1993;焦鹏程,2005;赵文龙等,2014;朱自申等,2019;何胜等,2021
人工智能地球物理方法	机器学习	从测井/地震数据中自主学习特征与钾盐标签之间的复杂非线性映射关系,完成分类预测	解释性强,计算效率高,在样本充足时分类精度优于传统方法	依赖人工特征工程;泛化能力有限;小样本性能不佳	张治国,2006;陆宁等,2011;陈科贵等,2016b,2017,2018;吴刘磊,2017;曹旭,2018;杨福强等,2019
	深度学习	利用深层神经网络自动提取地震波形、测井曲线中的深层特征,实现端到端的储层参数预测	自动特征提取能力极强,能融合多模态数据,解决复杂非线性问题,预测精度高	对算力和数据量要求高;模型为“黑箱”,可解释性差;小样本下易过拟合	Wiener et al.,1991;张繁昌等,2014;刘汉卿等,2015;林年添等,2018;吴正阳等,2018;陈蕾等,2020;Zhu Lei et al.,2023
地球化学方法	元素地球化学	分析岩芯/卤水中 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Br^-$ 等元素含量及 $Br \times 10^3 / Cl$ 、 $K / Mg$ 等特征系数,判断蒸发阶段和成钾潜力	是指示成钾阶段和古环境最直接、最可靠的证据	仅为“点”信息,横向对比难;取样成本高,受后期改造影响	刘锦磊等,2015
	同位素地球化学	利用同位素“指纹”示踪成矿流体来源和演化过程	能精确揭示物源和成因机制,解决地球化学模型的多解性问题	测试成本高昂;解释需要多学科知识;模型构建依赖地质背景	Ren Qianhui et al.,2018;苗忠英等,2023;He Maoyong et al.,2025
	综合应用	集成元素与同位素等多参数信息,建立成因模型,将地球化学异常转化为勘探靶区	克服单一方法局限,提升机理认识与预测能力;可有效识别深部异常并构建定量预测模型	高度依赖地质背景认知;模型复杂且解释具主观性;深部探测成本高、实施难。	伯英等,2016;Li Junyang et al.,2025;曹养同等,2021;姜长龙,2013;周游,2014

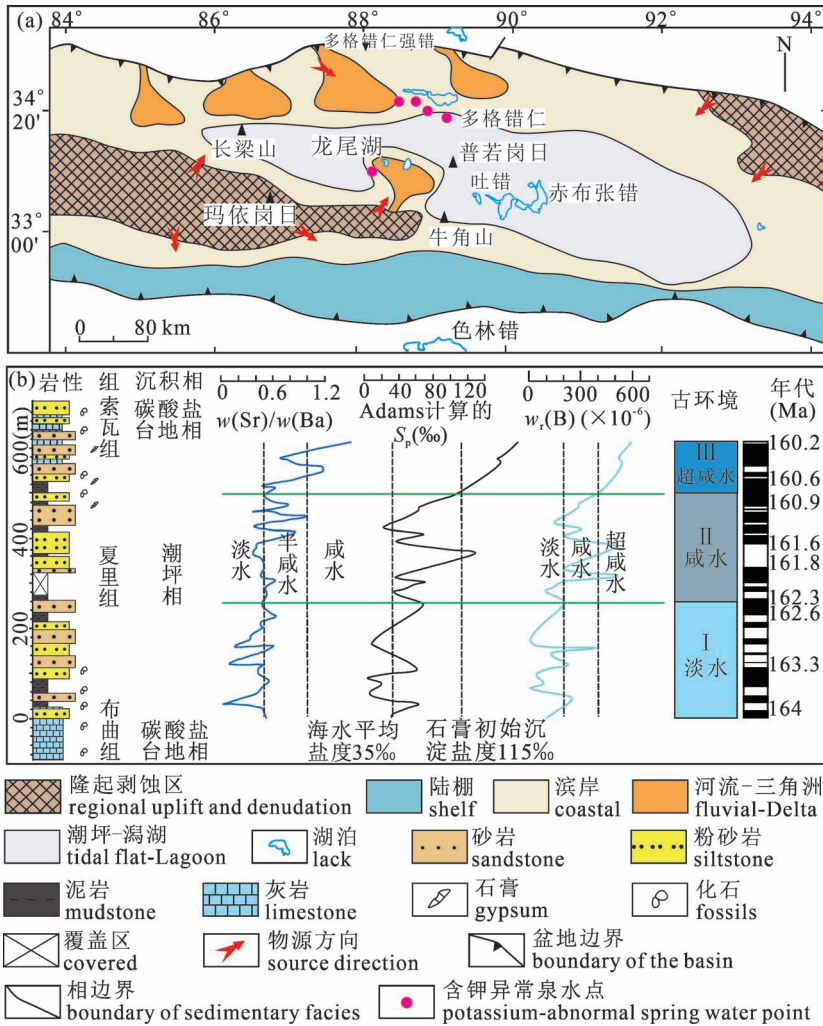


图 11 羌塘盆地夏里期岩相古地理图、含钾异常泉水点位置及古盐度垂向变化曲线 (据牛新生等,2014;曾永耀等,2019 修改)

Fig. 11 Lithofacies-paleogeographical map of Xiali Stage of the Qiangtang Basin, showing locations of springs with potash anomalies and vertical paleosalinity profile (modified from Niu Xinsheng et al., 2014& Zeng Yongyao et al., 2019&)

的富钾卤水储集构造与分布规律,证实了电磁方法在深部钾盐勘探中的有效性。这些研究为四川盆地复杂储层中钾资源的综合勘查提供了理论与实践依据。

数据显示,四川盆地卤水总资源量达  $1.925 \times 10^{12} \text{ m}^3$  (李春斌等,2019)。2017年来,通过“气钾共探”技术,郑绵平团队在宣汉普光地区发现了超大型“新型杂卤石钾盐矿”,共圈定富矿区块  $179 \text{ km}^2$ ,估算推断和潜在氯化钾资源量分别为  $2.45 \times 10^8 \text{ t}$  和  $4.65 \times 10^8 \text{ t}$ ,并探明深部富钾卤水中氯化钾  $5.60 \times 10^7 \text{ t}$  的潜在资源 (周飞飞,2025)。2024年以来,四川省第二地质大队负责的川宣 2-1 井已探获 55 m 厚的石盐型杂卤石矿层与 54 m 厚的高品位富钾卤

水,卤水钾含量达  $39 \text{ g/L}$ ,取得了可喜的阶段性找矿成果。然而,尽管资源潜力巨大,四川盆地钾盐开发仍面临储层低孔渗、构造复杂等挑战。未来需通过加强地球物理—地质一体化研究,深入揭示成矿与运移机理,明确石盐型杂卤石与卤水储层的差异性,优化勘探开发策略,为国家钾盐资源安全提供科学保障。

### 4.2 羌塘盆地

羌塘盆地位于青藏高原北部,夹持于班公湖—怒江缝合带与可可西里—金沙江缝合带之间,面积约  $1.85 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,是中国陆域第二大海相沉积盆地,以中央隆起带为界分为北羌塘拗陷和南羌塘拗陷两个次级单元 (和钟铎,2000;王剑,2004)。盆地整体海拔超过 5000 m,自然环境恶劣,勘探程度极低,是目前我国钾盐勘探的前沿与难点区域 (徐其辉等,2023)。

羌塘盆地中生代地层以三叠系—侏罗系为主,蒸发岩沉积分布广泛,大部分区域已经达到硫酸盐析出阶段,部分预测有利区已达到钾石盐析出阶段。其中,侏罗系夏里组 ( $J_2x$ ) 为关键的蒸发岩赋存层位,形成于中侏罗世海退背景下的潮坪—潟湖环境,岩性以紫红色砂泥岩夹石膏层为特征。古地理与古气候研究表明,夏里组沉积期处于副热带高压控制的干旱环境,古纬度约为北纬  $24.3^\circ$ ,碳氧同位素及孢粉组合均指示炎热干燥条件,具备成钾潜力。中央隆起带的存在阻隔了南侧广海,形成半封闭环境,有利于卤水浓缩。曾永耀等 (2019) 通过对雁石坪剖面夏里组的古盐度研究,发现数十处厚层石膏岩丘,地表盐泉水  $\delta^{34}\text{S}$  同位素 ( $14.6\text{‰} \sim 15.8\text{‰}$ ) 与夏里组蒸发岩吻合,证实了古卤水活动 (图 11b)。北羌塘盆地友谊泉等地的盐泉水化学分析结果显示明显的含钾异常 (牛新生等,2014,图 11a)。羌塘高原盐湖以碳酸盐—硫酸盐型为主,钾盐主要赋存于卤水中,固体钾盐矿化程度较低 (高小芬等,2013)。地球化学分析显示部分层位钾钠异常显著,安多县北西侧预测区面积约为

8000 km<sup>2</sup>,可能存在钾石盐析出阶段,远景资源量估算约  $1.10 \times 10^9$  t。

最新勘探成果显示,羌塘盆地胜利河凹陷中侏罗统夏里组已钻获数百米厚的盐层(吴珍汉等, 2025),这一发现显著提升了其海相钾盐找矿潜力与资源远景,尽管如此,目前尚未发现具工业开采价值的钾盐矿体,整体钾盐勘探工作仍处于探索阶段。地震勘探因膏盐岩反射模糊和复杂构造干扰,难以有效识别深部钾盐层;大地电磁测深法(MT/AMT)在刻画深部电性结构和推断卤水储集构造方面展现出一定潜力,但分辨率和解释精度仍需提升;遥感与地球化学方法在识别地表膏盐丘和盐泉方面发挥了辅助作用。近年来,梁光河(2022)通过结合地震解释、构造演化恢复与沉积相分析,提出逆冲推覆构造下盘可能是钾盐矿保存的有利部位,并基于石膏厚度与海水蒸发析出规律,初步估算了资源潜力,为勘探提供了方向。

#### 4.3 萨斯喀彻温盆地

萨斯喀彻温盆地位于加拿大中部,是世界上最大的钾盐产区之一,其钾盐资源主要赋存于泥盆系“草原蒸发岩”(Prairie Evaporite Formation)顶部约90 m范围内。该蒸发岩系可划分为4个主要的钾盐段,自下而上依次为:Esterhazy段、White Bear段、Belle Plaine段和Patience Lake段(马黎春,2014)。各钾盐段厚度一般为数米至十余米,段间以石盐层分隔,每个钾盐段内又可进一步细分出多个独立的钾盐层,单层厚度可达十几米。这种多层结构反映了泥盆纪时期复杂的多期蒸发沉积过程。

该超大型钾盐矿床的形成与泥盆纪特提斯洋海水周期性侵入北美地台密切相关。海水自北向南侵入Elk Point盆地系统(图12),在萨斯喀彻温次盆地中因强烈蒸发作用形成巨厚蒸发岩序列。成矿过程受多因素耦合控制:古地理方面,地台内部的生物礁和地形隆起形成了多级分隔的次级盆地,限制了海水流通并促进卤水浓缩;古气候方面,当时该区域位于赤道附近,高温干旱提供了持续的强烈蒸发条件;沉积学上表现为3个明显的蒸发旋回(Lotsberg、Cold Lake和Prairie蒸发岩),其中“草原蒸发岩”作为最上部的旋回在萨斯喀彻温次盆地发育最为完整,钾石盐与光卤石富集程度高。

尽管该区钾盐资源潜力巨大,开采仍面临诸多挑战:①深层矿体(埋深通常超过1000 m)开采面临高地温、高地压及井巷稳定性问题;②地下水溶蚀导致钾盐层局部溶解,形成溶塌角砾岩,影响地质稳定

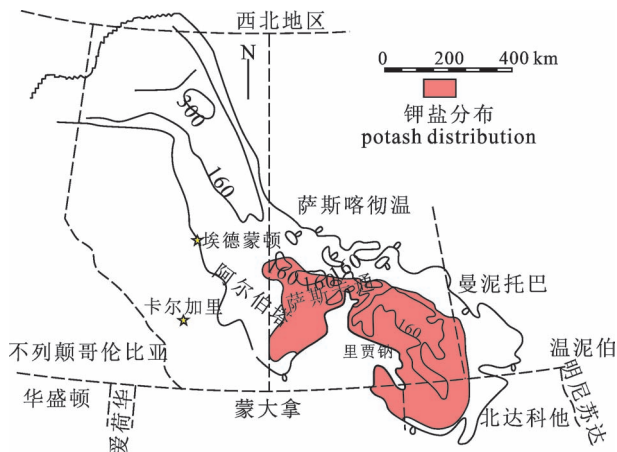


图12 ELK Point盆地沉积与钾盐分布(据罗晓峰,2017)

Fig. 12 ELK Point basin deposition and potash distribution

(modified from Luo Xiaofeng, 2017&)

性和开采安全。未来勘探应重点关注盆地向斜构造的核部区域,这些部位因构造沉降较深,可能保存更完整的钾盐序列;同时需加强三维地震、高分辨率测井及电磁法等技术对深部矿体精细预测中的应用,以准确评估资源空间分布并优化开采方案。此外,针对该区特有的钾盐矿物组合(钾石盐与光卤石混杂),需研发更高效的选择性浮选、溶解结晶等选矿工艺,以提高资源综合利用率和经济效益。

## 5 结论与展望

笔者等系统梳理了钾盐储层预测的主要方法,并结合典型盆地实践进行剖析,得出以下结论:

(1)测井技术已形成针对固、液相钾盐的成套识别标志;地震勘探能有效刻画储层空间展布;重磁电方法在快速筛查盐体方面具有经济高效的优势。然而,这些方法均存在固有不确定性:测井对薄互层分辨不足,地震深部精度有限,重磁电反演则具有多解性。因此,必须结合钻井标定、多种物性参数联合约束及地质模型进行综合解释与可靠性评估,以降低勘探风险。

(2)机器学习在样本充足区分类效果良好,深度学习通过特征提取在复杂储层预测中展现出潜力。但其应用面临小样本泛化能力不足、模型“黑箱”可解释性差等核心挑战。模型的可靠性需通过交叉验证、盲井测试及SHAP等可解释性工具进行系统评估,目前尚未形成标准化流程,对其预测结果的采纳需持审慎态度。

(3)地球化学方法通过元素与同位素指标揭示

成钾机理,并借助深穿透技术与成因建模直接支撑勘查预测。然而,该方法受限于取样成本高、模型依赖性强及横向对比难等问题,其预测结论通常作为圈定有利靶区的辅助依据,需与地球物理等证据深度融合以提高可靠性。

(4)典型盆地的实践验证了“因地制宜、技术融合”的路径:四川盆地依托“油钾共探”形成了成熟的综合预测体系;羌塘盆地受限于环境与勘探程度,以基础地面调查为主,深部探测处于试验阶段;萨斯喀彻温盆地则展示了高精度地球物理在成熟矿区的关键作用。三者共同说明了地质认识与先验信息在融合多方法、约束多解性中的核心价值。

(5)未来技术发展需围绕“深部、智能、融合”寻求突破:①发展适应深部复杂环境的高分辨率探测技术;②强化人工智能在小样本下的泛化能力与可解释性;③着力攻克多方法融合的现实瓶颈,包括建立统一的数据标准与平台、研发跨模态数据对齐的智能算法,以解决数据格式不一、尺度不匹配与解释冲突等问题,从而构建更精细、可靠的“油钾共探”技术体系。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

AL-Rawi F R, 曲赞. 1990. 微重力测量在伊拉克塞马沃盐矿上的应用. 地质科学译丛, (1): 67~70.

AL-Rawi F R, 张树林. 1991. 微重力测量在伊拉克 Samawa 盐矿上的应用. 国外地质勘探技术 (3): 37.

伯英, 刘成林, 曹养同. 2016. 断裂带地球化学深穿透理论与方法在钾盐找矿中的应用. 矿床地质, 35(6): 1281~1292.

蔡立权, 王炳玉, 李能. 1983. 安宁盆地应用重力法找盐的效果. 云南地质, 2(2): 163~168.

曹旭. 2018. 基于素描式交叉验证的轮廓提取算法. 导师: 李桂清、聂勇伟. 广州: 华南理工大学硕士学位论文 1~79.

曹养同, 刘成林, 焦鹏程, 伯英, 张华, 姚佛军. 2021. 新疆莎车盆地钾异常发现及有利找钾区预测. 地质学报, 95(7): 2099~2108.

陈科贵, 李春梅, 李利, 黄羽, 朱一鸣. 2013. 四川盆地含钾地层的地球物理测井标志、判别模型与应用——以川中广安地区为例. 地球学报, 34(5): 623~630.

陈科贵, 李春梅, 张杰, 吴迎章, 李航. 2012. 运用测井资料进行  $K_2O$  视含量计算方法研究. 石油天然气学报, 34(3): 96~100.

陈科贵, 李进, 陈愿愿, 王刚. 2017. 基于主成分分析的极限学习机方法开展杂卤石识别. 盐湖研究, 25(4): 8~13.

陈科贵, 李进, 黄长兵, 陈愿愿, 王刚, 刘阳. 2018. BP 神经网络在富钾卤水中的应用研究. 地球科学进展, 33(6): 614~622.

陈科贵, 李利, 王刚, 王林, 陈愿愿, 林新, 常浩. 2014. 四川盆地南充盐盆下、中三叠统测井响应特征及成钾条件分析. 矿床地质, 33(5): 1069~1080.

陈科贵, 刘利, 陈愿愿, 韦航, 王刚. 2016a. BP 神经网络在钻孔测井资料分类识别杂卤石中的研究. 中国石油大学学报(自然科学

学版), 40(4): 66~72.

陈科贵, 吴刘磊, 陈愿愿, 王刚. 2016b. 基于支持向量机的川中杂卤石分类识别研究. 地球科学进展, 31(10): 1041~1046.

陈蕾, 唐金良, 孙振涛, 曹辉兰. 2020. 基于 U-Net 深度卷积神经网络的碳酸盐岩储层自动识别方法. 内蒙古石油化工, 46(5): 50~52.

陈秀法, 何学洲, 张振芳. 2025. 全球钾盐资源分布特征与勘查开发格局. 矿产勘查, 16(1): 16~26.

陈志勇, 朱清, 武海炜, 邹谢华, 聂大海, 马黎春, 孙宏伟, 顾本杰. 2025. 全球钾盐资源特征及市场发展态势分析[OL]. [2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250121.1800.007>.

崔志伟, 朱正杰, 张雄, 刘振. 2019. 大地电磁测深对深部可溶性海相钾盐找矿的探索研究——以垫江盐盆为例. 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会. 中国浙江杭州.

邓小林, 王凡, 韦钊, 王健, 王占文. 2019. 以塔里木盆地钾盐资源快速评价为例践行“透明地球”建设理念. 中国煤炭地质, 31(11): 19~25.

邓小林, 韦钊, 赵玉海, 王健. 2013. 塔里木盆地古近纪钾盐矿层的发现及其意义. 矿物学报, 33(S2): 755~756.

樊馥, 孟凡巍, 刘吉强. 2025. 中亚含盐盆地钾盐资源潜力及开发利用展望[OL]. [2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/63.1026.P.20250612.1356.004>.

高小芬, 林晓, 张智勇, 向树元, 张克信. 2013. 青藏高原第四纪钾盐矿时空分布特征及成矿控制因素. 地质通报, 32(1): 186~194.

郭木石. 2023. 川东北普光地区嘉陵江组杂卤石分布预测. 导师: 王峻、祖克威. 成都: 成都理工大学硕士学位论文; 1~89.

郭强. 2020. 川东北地区三叠系富钾卤水分布规律预测. 导师: 张兵、陈灵君. 成都: 成都理工大学硕士学位论文; 1~62.

韩璐, 邹长春, 彭诚. 2023. 战略性非金属矿产钾盐储层特征及测井评价方法. 2023 年中国地球科学联合学术年会, 中国广东珠海.

何胜, 苏世杰, 侯利朋. 2021. 综合物探在柴达木盆地盐湖深层卤水钾矿勘查中的应用. 地质与资源, 30(5): 628~636.

和钟铎, 李才, 杨德明, 陈光权. 2000. 西藏羌塘盆地的构造沉积特征及演化. 长春科技大学学报, 30(4): 347~352.

侯献华, 冯磊, 郑绵平, 王伟, 樊馥, 赵为永, 高雪峰. 2022. 南翼山富钾锂卤水储层识别方法. 地球科学, 47(1): 45~55.

侯献华, 王伟, 郑绵平, 樊馥, 李洪普, 高雪峰. 2021. 柴达木盆地西部黑北凹地—大浪滩深层卤水钾盐储层地震响应特征研究. 地学前缘, 28(6): 134~145.

胡素华, 冯迎辉, 申潜玲, 赵秀英, 陈丽, 陈秋红. 2008. 成都盐盆富钾卤水储层测井解释方法初探. 中国井矿盐, 39(6): 11~14.

胡挺. 2012. 识别与评价钾盐的测井方法研究. 导师: 张占松、张超谟. 荆州: 长江大学硕士学位论文; 1~70.

郇恒飞. 2013. 重力数据综合处理与解释在钾盐矿区的应用研究. 导师: 吴燕冈. 长春: 吉林大学硕士学位论文; 1~64.

黄华, 张士万, 张连元, 于嫦娥. 2013. 潜江凹陷潜江组砂岩卤水矿床测井识别方法研究. 化工矿产地质, 35(2): 65~71.

黄长兵. 2017. 四川盆地三叠系隐性钾矿测井识别与评价研究. 导师: 颜其彬. 成都: 西南石油大学博士学位论文; 1~128.

姜长龙. 2013. 四川盆地平落坝构造富钾卤水水化学特征及资源量评价. 导师: 周训. 北京: 中国地质大学(北京) 硕士学位论文; 1~64.

焦鹏程, 刘成林, 白大明, 王弭力, 陈永志. 2005. 应用自然电场法寻找地下富钾卤水的探讨. 地球学报, 26(4): 381~385.

兰超歌. 2025. 磁法勘探技术在复杂地质构造区矿产资源调查中的应用研究. 世界有色金属, (1): 37~39.

李春斌, 侯元昌, 应辉, 曹亚楠. 2019. 西部钾矿资源分布特征与开

- 发前景. 世界有色金属, (1): 97~99.
- 李广才, 雍凡, 王小江, 王凯, 王通, 刘建勋, 王刚. 2024. 柴达木盆地大浪滩—黑北凹地钾盐地震探测与成果初探. 中国地质调查, 11(5): 39~45.
- 李建森, 李廷伟, 马云麒, 陈福坤. 2022. 柴达木盆地卤水型 Li、Rb 关键金属矿产元素分布特征及富集机制. 中国科学(地球科学), 52(3): 474~485.
- 李进, 范翔宇, 熊鸿鸽, 王红军, 侯学文, 钟霆堃, 喻显涛. 2025. 四川盆地富钾卤水地球物理特征及预测方法研究: 以川西地区为例. 地质科学, 60(2): 607~618.
- 李耀民. 1993. 电测深法在地下卤水矿床勘查中的应用. 地质与勘探, 29(5): 42~44.
- 连云港化工矿山设计研究院六连情报组. 1972. 钾盐矿床核测井法评价. 化工矿山技术, 1(4): 56~62.
- 梁光河. 2016. 老挝超大型钾盐矿勘探方法. 化肥工业, 43(3): 72~76.
- 梁光河. 2020. 老挝超大型钾盐矿勘探重大突破与地球物理技术创新. 2020年中国地球科学联合学术年会, 中国重庆.
- 梁光河. 2022. 羌塘盆地中生代钾盐矿成矿预测. 盐湖研究, 30(2): 110~117.
- 林年添, 张栋, 张凯, 王守进, 付超, 张建彬, 张冲. 2018. 地震油气储层的小样本卷积神经网络学习与预测. 地球物理学报, 61(10): 4110~4125.
- 刘成林, 曹养同, 徐洋, 焦鹏程, 姚佛军. 2024. 新疆库车盆地古近纪—新近纪盐湖成钾与靶区预测. 地质学报, 98(3): 941~956.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨. 矿床地质, 29(4): 581~592.
- 刘汉卿, 张繁昌, 代荣获. 2015. 基于神经网络的井间地震数据外推及多尺度反演. 物探化探计算技术, 37(3): 348~354.
- 刘锦磊, 王春连, 刘成林, 陈波, 徐海明, 余小灿, 李皓楠. 2015. 江陵凹陷沙坪3井古近系沙市组地球化学特征及成钾指示. 地质学报, 89(11): 2196~2202.
- 刘瓔, 郑绵平, 于常青, 张震, 高磊. 2019. 云南省江城地区盐盆地重力勘探与深部找钾启示. 中国地质调查, 6(6): 88~97.
- 刘瓔, 郑绵平, 于常青, 张震. 2015. 高精度重力在勐野井盐构造与钾盐勘探中的研究与应用. 地质论评, 61(S1): 349~350.
- 刘铸, 唐学渊, 仲佳爱, 盛德波, 王富明, 庞博. 2020. 川东中下三叠统含钾地层测井识别研究. 科技与创新(9): 54~57.
- 陆宁, 武本令, 刘颖. 2011. 基于自适应粒子群优化的SVM模型在负荷预测中的应用. 电力系统保护与控制, 39(15): 43~46.
- 罗建容. 2009. 多类统计模式识别模型及应用研究. 导师: 钟波. 重庆: 重庆大学硕士学位论文: 1~60.
- 罗晶, 章雄, 徐敏, 张洞君, 朱亚东, 郑虹, 曹琳昱. 2018. 四川盆地 LH 地区杂卤石地震综合识别技术研究. 物探化探计算技术, 40(3): 290~297.
- 罗晓峰. 2017. 加拿大萨斯喀彻温海相钾盐矿床特征及钾矿勘探开发研究. 导师: 郑绵平. 北京: 中国矿业大学(北京)博士学位论文: 1~152.
- 马黎春, 马建强, 韩继秋, 刘成林, 牛磊, 张琪. 2014. 加拿大萨斯喀彻温省索西(Southey)钾盐矿床特征及成因. 矿床地质, 33(5): 964~976.
- 毛翔, 李江海, 刘金侠. 2017. 全球钾盐资源分布规律及其构造成因. 高校地质学报, 23(1): 63~71.
- 苗忠英, 郑绵平, 黄元溢, 严加永, 朱永山, 娄鹏程, 刘圆应. 2024. 三维地震和重力在思茅盆地固体钾盐勘探中的应用. 矿床地质, 43(5): 1149~1163.
- 苗忠英, 郑绵平, 李伟强, 徐其辉, 夏芝广, 娄鹏程, 张雪飞, 陈嘉阳. 2023. Sr-S-K 同位素示踪思茅盆地深部富钾盐体的物源. 地质学报, 97(6): 1987~2001.
- 明圆圆, 李秋辰, 牛雪, 谢兴隆, 郭淑君. 2021. 重震联合解释技术在新疆罗布泊罗北凹地西部的应用. 华北地质, 44(1): 52~55.
- 牛新生, 刘喜方, 陈文西. 2014. 西藏北羌塘盆地友谊泉水化学特征及成盐指示. 矿床地质, 33(5): 1003~1010.
- 牛雪, 明圆圆, 李秋辰, 谢兴隆. 2019. 基于重力勘探成果的罗北凹地深部钾盐盆地沉积特征. 科学技术与工程, 19(26): 83~87.
- 钱光华, 周长祥. 1987. 地震资料在钾盐找矿工作中的应用. 物探与化探, 11(2): 139~143.
- 饶辉辉, 潘彤, 贺茂勇, 侯殿保, 陈建洲, 周江迪. 2025. 青藏高原柴达木盆地盐湖 K、Li、B 等盐类资源研究进展. 地球学报, 46(2): 376~396.
- 任瑞军, 苗永康, 王延光. 2021. 川东北嘉陵江组嘉四—五段杂卤石地震识别及属性预测方法. 地学前缘, 28(6): 125~133.
- 商朋强, 祁才吉, 焦森, 熊先孝, 关炳庭, 张杨. 2019. 中国钾盐矿产预测评价模型和资源潜力分析. 地质通报, 38(10): 1758~1767.
- 慎国强, 王玉梅, 张繁昌, 张洪, 王希萍, 陈松莉. 2021. 基于人工智能的川东北三叠系杂卤石地震识别. 地学前缘, 28(6): 155~161.
- 慎国强, 朱磊, 王希萍, 张繁昌, 葛星, 王雅俐. 2024. 投影卷积神经网络固、液相钾盐矿层预测. 地质学报, 98(10): 2946~2955.
- 石海岩, 樊启顺, 王利文, 王明祥, 刘万平, 李泽仁, 李庆宽, 陈天源. 2024. 柴达木盆地东陵湖水化学特征与钾盐分布研究. 地质学报, 98(10): 2902~2915.
- 时林, 高东林, 张从伟, 张玉淑. 2012. 地球化学研究方法在钾盐找矿中的应用. 盐湖研究, 20(1): 57~63.
- 宋飞. 2022. 融合 CNN 的进化极限学习机及其在测井储层识别中的应用. 导师: 夏克文. 天津: 河北工业大学硕士学位论文: 1~84.
- 宋晓蛟, 张宏建, 何琴娥. 2020. 老挝万象北班根钾盐勘查区重力场特征及其成矿远景评价. 矿产勘查, 11(4): 790~796.
- 宋旭锋, 曹涛, 付彦平, 黄钊, 侯召雷. 2012. 高精度重力法精确圈定磨蚀地下盐体范围. 云南地质, 31(2): 233~237.
- 宋旭锋, 代达龙, 曹涛, 付彦平, 杨照河. 2014. 高精度重力测量在云南勐腊地区某岩盐矿勘查中的应用. 地质找矿论丛, 29(3): 445~449.
- 孙宏伟, 任军平, 许康康, 吴兴源, 唐文龙, 贺福清. 2023. 非洲钾盐矿床地质特征及资源潜力. 地质通报, 42(8): 1390~1401.
- 谭红兵, 马海州, 马万栋, 董亚萍, 张西营, 许建新. 2004. 塔里木盆地西部古岩盐地质地球化学特征与成钾条件分析. 矿物岩石地球化学通报, 23(3): 194~199.
- 王宝禄. 1997. 云南勐野井岩盐(钾)矿床物探方法的找矿效果. 地球物理与中国建设——庆祝中国地球物理学会成立 50 周年文集, 中国北京.
- 王彬玮, 艾尼·买买提, 卢志明, 马崇尧, 陈科贵. 2021. 南图尔盖盆地 Arysium 拗陷钾盐的测井响应特征及其分布. 地学前缘, 28(6): 162~170.
- 王彬玮, 陈科贵, 张娅会, 齐文. 2020. 宣达地区中、下三叠统杂卤石蒸发岩测井响应及岩性识别. 矿床地质, 39(5): 945~958.
- 王炳玉. 1985. 平均重力差值异常法在寻找盐类矿床中的应用. 云南地质, 4(4): 404~408.
- 王建波, 冯明刚, 王昆, 周依南. 2021. 四川盆地普光地区三叠系杂卤石测井评价与发育规律. 科学技术与工程, 21(1): 61~67.
- 王建波. 2018. 川东北地区三叠系富钾盐层测井评价技术研究. 2018年中国地球科学联合学术年会, 中国北京.
- 王剑, 谭富文, 王小龙, 杜佰伟, 陈明. 2004. 藏北羌塘盆地早侏罗世中侏罗世早期沉积构造特征. 沉积学报, 22(2): 198~205.
- 王健, 王凡, 王占文, 刘星旺, 韦钊. 2018. 地震—测井解译在库车坳

- 陷古近系盐岩层找钾中的应用. 2018年中国地球科学联合学术年会, 中国北京.
- 王凯莹. 2019. 四川盆地三叠系卤水富钾机理研究. 导师: 王黎栋, 刘清俊. 北京: 中国地质大学(北京); 1~63.
- 王少华. 2012. 老挝万象平原重力异常及其地质体特征. 化工矿产地质, 34(1): 39~46.
- 王淑丽, 祁才吉, 崔博京, 李雪, 李东星, 张必欣, 周月, 刘万平, 孙小虹, 丁晓姜, 张明明. 2024. 中国钾盐资源勘查趋势分析与展望. 地质学报, 98(10): 2978~2988.
- 王伟, 侯献华, 郑绵平, 高星, 樊馥, 刘青. 2021. 深层钾盐矿高分辨率地震处理关键技术应用: 以罗布泊为例. 地学前缘, 28(6): 146~154.
- 王元昊, 石国成, 叶成. 2016. 地球物理测井在老挝钾盐矿勘查中的应用. 价值工程, 35(12): 180~182.
- 吴刘磊. 2017. 基于模式识别法的川中杂卤石分类识别研究. 导师: 陈科贵. 成都: 西南石油大学硕士学位论文.
- 吴珍汉, 杨宁, 吴燕, 陈云, 杨兴科, 季长军, 刘志伟, 王茜, 张莉莉. 2025. 羌塘北部胜利河凹陷侏罗系海相盐岩及资源量 [OL]. [2026-01-21]. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2025.11.032>.
- 吴正阳, 莫修文, 柳建华, 胡国山. 2018. 裂缝性储层分级评价中的卷积神经网络算法研究与应用. 石油物探, 57(4): 618~626.
- 信和培. 1988. 重力及电测深方法在石膏矿床普查中的效果. 物探与化探, 12(4): 308~311.
- 邢万里, 陈其慎. 2013. 中国钾盐资源安全简析. 中国矿业, 22(12): 11~14.
- 徐其辉, 苗忠英, 娄鹏程, 郑绵平, 陈文西. 2023. 北羌塘坳陷中侏罗统夏里组蒸发岩硫同位素特征及其钾盐成矿意义. 矿床地质, 42(2): 366~380.
- 徐永清, 吴守华. 2019. 根据三维地震资料研究老挝万象平原钾盐矿赋存规律. 能源技术与管理, 44(6): 159~161.
- 宣之强, 王连第. 1999. 中国钾盐 50 年. 化工矿产地质, 21(3): 181~187.
- 杨飞, 潘源墩, 章学刚, 潘喻斌, 叶建中, 雷海飞. 2011. 利用三维地震资料追踪富钾卤水储层. 化工矿产地质, 33(1): 54~57.
- 杨福强, 陈科贵, 黄长兵, 陈愿愿, 李进, 马小林. 2019. PSO-LIBSVM 在钾盐矿层识别中的应用研究. 地球科学进展, 34(7): 757~764.
- 杨晓玉, 阎建国, 侯磊, 顾雯. 2012. 地震勘探在四川盆地富钾卤水资源评价中的应用效果分析. 地质找矿论丛, 27(4): 509~515.
- 袁见齐. 1961. 略谈我国钾肥资源的找矿方向和找矿方法. 中国地质, (6): 27~33.
- 岳元宝. 2013. 川中地区三叠纪富钾卤水大地电磁探测应用研究. 导师: 王绪本. 成都: 成都理工大学硕士学位论文; 1~73.
- 曾永耀, 王建设, 张伟. 2019. 羌塘盆地中晚侏罗世雁石坪剖面夏里组古盐度与成盐意义. 矿物学报, 39(5): 539~548.
- 张大文, 王友郡, 柴广路. 2023. 东特提斯域兰坪盆地含盐系地层云龙组研究: 进展与问题. 地质论评, 69(2): 648~668.
- 张繁昌, 刘汉卿, 钮学民, 代荣获. 2014. 褶积神经网络高分辨率地震反演. 石油地球物理勘探, 49(6): 1165~1169.
- 张繁昌, 印兴耀. 2004. 用多层前馈网络进行三维储层参数反演的的方法. 石油大学学报(自然科学版), 28(1): 31~35.
- 张雄, 魏玉燕, 罗旭, 涂岩, 李凤梅, 张瑞刚, 栾进华. 2025. 岩芯 XRF 扫描在川东合川地区含盐地层找钾中的应用. 地质论评, 71(S1): 355~356.
- 张研, 李萌, 龚大兴, 陈科贵, 丁峰. 2015. 四川盆地三叠系隐伏钾盐层识别与预测方法研究. 地质学报, 89(11): 1970~1979.
- 张永生, 邢恩袁, 郑绵平, 苏克露, 桂宝玲, 仲佳爱, 左璠璠, 商雯君, 牛新生, 苏奎, 王宁军, 慎国强, 唐兵, 彭渊, 纪德宝, 张兵, 盛德波, 刘铸, 王建波, 葛星. 2024. 川东北宣汉地区海相“新型杂卤石钾盐矿”的发现、突破与前景. 地质学报, 98(10): 2823~2846.
- 张永生, 郑绵平. 2021. 中国钾盐矿产基地成矿规律与深部探测技术示范. 地学前缘, 28(6): 1~9.
- 张治国. 2006. 人工神经网络及其在地学中的应用研究. 导师: 杨毅恒. 长春: 吉林大学博士学位论文; 1~138.
- 赵改善. 2019. 石油物探智能化发展之路: 从自动化到智能化. 石油物探, 58(6): 791~810.
- 赵文龙, 王绪本, 张兵, 岳元宝, 朱红锦, 黄涛. 2014. 川东地区大地电磁法在富钾卤水研究中的应用. 物探化探计算技术, 36(5): 560~565.
- 赵元艺, 焦鹏程, 李波涛, 钱作华. 2010. 中国可溶性钾盐资源地质特征与潜力评价. 矿床地质, 29(4): 649~656.
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析. 地质通报, 25(11): 1239~1246.
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景. 地质学报, 84(11): 1523~1553.
- 郑绵平, 张震, 尹宏伟, 谭筱虹, 于常青, 施林峰, 张雪飞, 杨尖絮, 焦建, 武国朋. 2014. 云南江城勐野井钾盐成矿新认识. 地球学报, 35(1): 11~24.
- 支霞臣. 1981. 钾盐地球化学中的溴法. 化工地质, 3(1): 33~47.
- 钟寿华. 1992. 浅谈昆明地区中生界盆地重力异常与盐类矿床关系. 1992年中国地球物理学会第八届学术年会, 中国云南昆明.
- 周云飞. 2025. 我国钾盐勘探走向“海陆并重”中国自然资源报, 02-10(7).
- 周国兴. 2012. 老挝万象平原钾盐矿床沉积特征地震解释. 中国煤炭地质, 24(8): 70~72.
- 周权, 王莉蓉. 2021. 地球物理勘探技术的发展及应用. 中国金属通报 (5): 240~241.
- 周游. 2014. 四川盆地三叠纪富钾卤水资源量评价方法. 导师: 倪师军. 成都: 成都理工大学博士学位论文; 1~113.
- 朱自申, 周丹, 李德文, 余润龙. 2019. 音频大地电磁测深法在老挝万象盆地钾镁盐矿产勘探中的运用效果. 物探与化探, 43(6): 1268~1276.
- AL-Rawi F R, Qu Zan. 1990#. Application of microgravity measurement in Semavo salt mine in Iraq. Translation Collection of Geological Science, (1): 67~70.
- AL-Rawi F R, Zhang Shulin. 1991#. Application of microgravity measurement in Samawa salt mine in Iraq. Foreign Geoexploration Technology, (3): 37.
- Bo Ying, Liu Chenglin, Cao Yangtong. 2016#. Fault belt geochemical deep-penetration theories and techniques for potassium prospecting. Mineral Deposits, 35(6): 1281~1292.
- Cai Liquan, Wang Bingyu, Li Neng. 1983#. Effect of gravity method on salt prospecting in Anning basin. Yunnan Geology, 2(2): 163~168.
- Cao Xu. 2018#. Contour extraction algorithm based on sketch cross-validation. Guangzhou: South China University of Technology Master Thesis.
- Cao Yangtong, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Bo Ying, Zhang Hua, Yao Fojun. 2021#. Discovery of abnormal value of potassium enrichment and prediction of favorable areas for potassium exploration in the Yarkand basin, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2099~2108.
- Chen Kegui, Li Chunmei, Li Li, Huang Yu, Zhu Yiming. 2013#. Geophysical logging criteria and discriminant model for the potassium-rich strata and their application to Sichuan Basin: A case study of Guang'an area of central Sichuan. Acta Geoscientia Sinica, 34(5): 623~630.

- Chen Kegui, Li Chunmei, Zhang Jie, Wu Yingzhang, Li Hang. 2012&. Calculating the apparent content of  $K_2O$  with logging data. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(3): 96~100+167.
- Chen Kegui, Li Jin, Chen Yuanyuan, Wang Gang. 2017&. Based on the principal component analysis and the extreme learning machine method to identify the polyhalite. *Journal of Salt Lake Research*, 25(4): 8~13.
- Chen Kegui, Li Jin, Huang Changbing, Chen Yuanyuan, Wang Gang, Liu Yang. 2018&. Application research of BP neural network in potassium-rich brine. *Advances in Earth Science*, 33(6): 614~622.
- Chen Kegui, Li Li, Wang Gang, Wang Lin, Chen Yuanyuan, Lin Xin, Chang Hao. 2014&. Analysis of logging response characteristics and potassium-forming conditions of Early and Middle Triassic strata in Nanchong Basin. *Mineral Deposits*, 33(5): 1069~1080.
- Chen Kegui, Liu Li, Chen Yuanyuan, Wei Hang, Wang Gang. 2016a&. Research on classification and discrimination of polyhalite with drilling and logging data by BP neural network. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 40(4): 66~72.
- Chen Kegui, Wu Liuei, Chen Yuanyuan, Wang Gang. 2016b&. Classification and recognition of polyhalite in Chuanzhong based on support vector machine. *Advances in Earth Science*, 31(10): 1041~1046.
- Chen Lei, Tang Jinliang, Sun Zhentao, Cao Huilan. 2020&. Automatic identification method for the carbonate reservoir with deep convolution neural network method based on EMD. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 46(5): 50~52+57.
- Chen Xiufa, He Xuezhou, Zhang Zhenfang. 2025&. Distribution characteristics and exploration & development patterns of global potash resources. *Mineral Exploration*, 16(1): 16~26.
- Chen Zhiyong, Zhu Qing, Wu Haiwei, Zou Xiehua, Nle Dahai, Ma Lichun, Sun Hongwei, Gu Benjie. 2025&. Characteristics and market development trend of global potash resources. [OL]. [2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250121.1800.007>.
- Cui Zhiwei, Zhu Zhengjie, Zhang Xiong, Liu Zhen. 2019#. Exploration of deep soluble marine potash by magnetotelluric sounding: A case study of Dianjiang Salt Basin. *Proceedings of the 17th Annual Conference of the Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Hangzhou.
- Deng Xiaolin, Wang Fan, Wei Zhao, Wang Jian, Wang Zhanwen. 2019&. Practice“transparent earth” Construction idea through a case study of Tarim Basin potash salt resource fast assessment. *Coal Geology of China*, 31(11): 19~25.
- Deng Xiaolin, Wei Zhao, Zhao Yuhai, Wang Jian. 2013#. Discovery of Paleogene potash deposit in Tarim Basin and its significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 755~756.
- Fan Fu, Meng Fanwei, Liu Jiqiang. 2025&. Potassium salt resource potential and exploitation prospects in the central asian salt basin. [OL]. [2026-01-21]. <https://link.cnki.net/urlid/63.1026.P.20250612.1356.004>.
- Gao Xiaofen, Lin Xiao, Zhang Zhiyong, Xiang Shuyuan, Zhang Kexin. 2013&. Spatial-temporal distribution characteristics and ore-controlling factors of Quaternary potash deposits on the Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 186~194.
- Guo Mushi. 2023&. Distribution prediction of polyhalite in Jialingjiang Formation in Puguang area of northeast Sichuan. Chengdu: Chengdu University of Technology Master Thesis.
- Guo Qiang. 2020&. Prediction of distribution law of Triassic potassium-rich brine in northeast Sichuan. Chengdu: Chengdu University of Technology Master Thesis.
- Han Lu, Zou Changchun, Peng Cheng. 2023#. Characteristics and logging evaluation methods of strategic non~metallic mineral potash reservoirs. *Proceedings of 2023 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union*. Zhuhai.
- He Maoyong, Cheng Yuan yuan, Chen Jianzhou, Li Zheng yan, Deng Li, Ren Tong xiang, Luo Jia xin, Rao Hui hui. 2025. Potassium isotope constraints on brine sources and evolution in Qaidam Basin, Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, 181: 106632.
- He Sheng, Su Shijie, Hou Lipeng. 2021&. Application of comprehensive geophysical prospecting in deep brine potassium deposit exploration in salt lake of Qaidam basin. *Geology and Resources*, 30(5): 628~636.
- He Zhonghua, Li Cai, Yang Deming, Chen Guangquan. 2000&. The tectonic-sedimentary feature and evolution of Qiangtang basin in northern Tibet. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(4): 347~352.
- Hou Xianhua, Feng Lei, Zheng Mianping, Wang Wei, Fan Fu, Zhao Weiyong, Gao Xuefeng. 2022&. Recognition method of potassium-rich lithium brine reservoir in nanyishan. *Earth Science*, 47(1): 45~55.
- Hou Xianhua, Wang Wei, Zheng Mianping, Fan Fu, Li Hongpu, Gao Xuefeng. 2021&. Seismic response characteristics of the Heibei Concave Dalangtan potassium-rich deep brine reservoir in western Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 134~145.
- Hu Suhua, Feng Yinghui, Shen Qianling, Zhao Xiuying, Chen Li, Chen Qiuhong. 2008&. Preliminary approach on the explanatory method of well logging in the potassium-rich brine reservoir in Chengdu salt basin. *China Well and Rock Salt*, 39(6): 11~14.
- Hu Ting. 2012&. Study on logging method for identifying and evaluating potassium salt. Jingzhou: Yangtze University Master Thesis.
- Huan Hengfei. 2013&. Study on the application of comprehensive processing and interpretation of gravity data in potash mining area. Changchun: Jilin University Master Thesis.
- Huang Changbing, Chen Kegui, Hei Wei, Fan Linxiao. 2022. Identification of deep-buried potassium-rich brines in evaporate basin with aid of geophysical logging methods in co-exploration of oil and potash: A case study of Southwestern Sichuan Basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9): 869.
- Huang Changbing. 2017&. Logging identification and evaluation of Triassic concealed potash deposits in Sichuan Basin. Chengdu: Southwest Petroleum University Doctoral Dissertation.
- Huang Hua, Zhang Shiwan, Zhang Lianyuan, Yu Chang'e. 2013&. Logging identification of brine mineral bed in the sandstone of Qianjiang formation, Qianjiang depression. *Geology of Chemical Minerals*, 35(2): 65~71.
- Jiang Changlong. 2013&. Hydrochemical characteristics and resource evaluation of the K-rich brines in the pingluoba structure of the Sichuan Basin. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis.
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Bai Daming, Wang Mili, Chen Yongzhi. 2005&. Application of self-potential technique to the exploration of potassium-rich brine in lop nur, Xinjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(4): 381~385.
- Lan Chao. 2025&. Application of magnetic exploration technology in mineral resource investigation in complex geological structure areas. *World Nonferrous Metals*, (1): 37~39.
- Li Chunbin, Hou Yuanchang, Ying Hui, Cao Yanan. 2019&. Distribution characteristics and exploitation prospect of potassium

- resources in western China. *World Nonferrous Metals*, (1): 97~99.
- Li Guangcai, Yong Fan, Wang Xiaojiang, Wang Kai, Wang Tong, Liu Jianxun, Wang Gang. 2024#. Seismic exploration of potassium salt in Dalangtan-Heibei concave of Qaidam Basin and its preliminary results. *Geological Survey of China*, 11(5): 39~45.
- Li Jansen, Li Tingwei, Ma Yunqi, Chen Fukun. 2022#. Distribution characteristics and enrichment mechanism of key metal mineral elements of brine Li and Rb in Qaidam Basin. *Scientia Sinica (Terrae)*, 52(3): 474~485.
- Li Jin, Fan Xiangyu, Xiong Hongge, Wang Hongjun, Hou Xuewen, Zhong Tingkun, Yu Xiantao. 2025#. Research on geophysical characteristics and prediction method of potassium-rich brine in western Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geology*, 60(2): 607~618.
- Li Junyang, Zhou Yu, Liu Chengling, Zhang Songyang, Yao Fujun, Yang Guoliang, Hou Wenbin. 2025. Geochemical exploration techniques with deep penetration; Implications for the exploration of concealed potash deposits in the Covered Area on the Southern Margin of the Kuqa Basin. *Water*, 17(3): 298~298.
- Li Yaomin. 1993#. Application of electrical sounding in exploration of underground brine deposits. *Geology and Exploration*, 29(5): 42~44.
- Liang Guanghe. 2016#. The exploration method of ultra large potassic salt ore in Laos. *Chemical Fertilizer Industry*, 43(3): 72~76.
- Liang Guanghe. 2020#. Major breakthrough in exploration of super-large potash deposit in Laos and innovation of geophysical technology. *Proceedings of 2020 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union*. Chongqing.
- Liang Guanghe. 2022#. Metallogenic prediction of Mesozoic potash deposits in Qiangtang Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 30(2): 110~117.
- Lin Niantian, Zhang Dong, Zhang Kai, Wang Shoujin, Fu Chao, Zhang Jianbin, Zhang Chong. 2018#. Predicting distribution of hydrocarbon reservoirs with seismic data based on learning of the small-sample convolution neural network. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 4110~4125.
- Liu Chenglin, Cao Yangtong, Xu Yang, Jiao Pengcheng, Yao Fojun. 2024#. Potash formation and target area prediction of Paleogene and Neogene salt lake in Kuqa basin, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 941~956.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili. 2010#. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China. *Mineral Deposits*, 29(4): 581~592.
- Liu Hanqing, Zhang Fanchang, Dai Ronghuo. 2015#. Extrapolating of the cross-well seismic data based on the neural network and multi-scale seismic joint inversion. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(3): 348~354.
- Liu Jinlei, Wang Chunlian, Liu Chenglin, Chen Bo, Xu Haiming, Yu Xiaocan, Li Haonan. 2015#. Geochemical characteristic of the Shashi Formation in Sha 3well of the Jiangling depression and its indication for potash formation. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2196~2202.
- Liu Ying, Zheng Mianping, Yu Changqing, Zhang Zhen, Gao Lei. 2019#. Salt basin gravity exploration and enlightenment of deep potassium ore prospecting in Jiangcheng area of Yunnan Province. *Geological Survey of China*, 6(6): 88~97.
- Liu Ying, Zheng Mianping, Yu Changqing, Zhang Zhen. 2015#. Research and application of high-precision gravity in salt structure and potash exploration of Mengyejing. *Geological Review*, 61(S1): 349~350.
- Liu Zhu, Tang Xueyuan, Zhong Jia'ai, Sheng Debo, Wang Fuming, Pang Bo. 2020#. Study on logging identification of Middle-Lower Triassic potassium-bearing strata in northeastern Sichuan. *Science and Technology & Innovation*, (9): 54~57.
- Liuyan Intelligence Group of Lianyungang Chemical Mine Design and Research Institute. 1972#. Evaluation of potash deposits by nuclear logging method. *Industrial Minerals & Processing*, 1(4): 56~62.
- Lu Ning, Wu Benling, Liu Ying. 2011#. Application of support vector machine model in load forecasting based on adaptive particle swarm optimization. *Power System Protection and Control*, 39(15): 43~46.
- Luo Jianrong. 2009#. Study on multi-class pattern statistical recognition model and application. Chongqing: Chongqing University Master Thesis.
- Luo Jing, Zhang Xiong, Xu Min, Zhang Dongjun, Zhu Yadong, Zhang Hong, Cao Linyu. 2018#. Study on seismic comprehensive recognition technology of polyhalite in LH area of Sichuan Basin. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(3): 290~297.
- Luo Xiaofeng. 2017#. Saskatchewan marine potash deposits' characteristics and the exploration & development of potash. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing Doctoral Dissertation.
- Ma Lichun, Ma Jianqiang, Han Jiqiu, Liu Chenglin, Niu Lei, Zhang Qi. 2014#. Characteristics and genesis of Southey potash deposit, Saskatchewan, Canada. *Mineral Deposits*, 33(5): 964~976.
- Mao Xiang, Li Jianghai, Liu Jinxia. 2017#. Tectonic genetic study of global potash resource and its distribution. *Geological Journal of China Universities*, 23(1): 63~71.
- Meixner A, Alonso R N, Lucassen F, Korte L, Kasemann S A. 2022. Lithium and Sr isotopic composition of salar deposits in the Central Andes across space and time: The Salar de Pozuelos, Argentina. *Mineralium Deposita*, 57(2): 255~278.
- Miao Zhongying, Zheng Mianping, Huang Yuanyi, Yan Jiayong, Zhu Yongshan, Lou Pengcheng, Liu Yuanying. 2024#. Application of 3D seismic and gravity survey in solid potash exploration in Simao Basin, Southwest China. *Mineral Deposits*, 43(5): 1149~1163.
- Miao Zhongying, Zheng Mianping, Li Weiqiang, Xu Qihui, Xia Zhiguang, Lou Pengcheng, Zhang Xuefei, Chen Jiayang. 2023#. Sr, S and K isotopes to tracing material sources of the deep potassium-bearing salt body in the Simao basin, southwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 97(6): 1987~2001.
- Ming Yuanyuan, Li Qiuchen, Niu Xue, Xie Xinglong, Guo Shujun. 2021#. Application of joint interpretation of gravity and seismic in west Luobei depression of Lop Nur. *North China Geology*, 44(1): 52~55.
- Niu Xincheng, Liu Xifang, Chen Wenxi. 2014#. Hydrochemical characteristics and evaporate-generating indicators of Youyiquan area in North Qiangtang Basin, Tibet. *Mineral Deposits*, 33(5): 1003~1010.
- Niu Xue, Ming Yuanyuan, Li Qiuchen, Xie Xinglong. 2019#. The sedimentary characteristics of Luobei depression deep potash basin based on the results of gravity exploration. *Science Technology and Engineering*, 19(26): 83~87.
- Qian Guanghua, Zhou Changxiang. 1987. The application of seismic data to sylvinitic prospecting. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 11(2): 139~143.
- Rao Huihui, Pan Tong, He Maoyong, Hou Dianbao, Chen Jianzhou, Zhou Jiandi. 2025#. Progress in the study of potassium, lithium,

- and boron salt resources in salt lakes of the Qaidam Basin on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, 46(2): 376~396.
- Ren Qianhui, Du Yongsheng, Gao Donglin, Li Binkai, Zhang Xiyang, Liu Xiuting, Yuan Xiaolong. 2018. A multi - fluid constrain for the forming of potash deposits in the savannakhet basin; Geochemical evidence from halite. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(2): 755~768.
- Ren Ruijun, Miao Yongkang, Wang Yanguang. 2021&. Seismic identification and attribute prediction of polyhalite in the 4th and 5th members of the Jialingjiang Formation in Northeast Sichuan. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 125~133.
- Shang Pengqiang, Qi Caiji, Jiao Sen, Xiong Xianxiao, Guan Bingting, Zhang Yang. 2019&. Potash assessment models and resource potential analysis in China. *Geological Bulletin of China*, 38(10): 1758~1767.
- Shen Guoqiang, Wang Yumei, Zhang Fanchang, Zhang Hong, Wang Xiping, Chen Songli. 2021&. Identification of Triassic polyhalite in northeast Sichuan by AI-based seismic inversion. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 155~161.
- Shen Guoqiang, Zhu Lei, Wang Xiping, Zhang Fanchang, Ge Xing, Wang Yati. 2024&. Prediction of solid and liquid phase potash reservoirs with projected convolutional neural network. *Acta Geologica Sinica*, 98(10): 2946~2955.
- Shi Haiyan, Fan Qishun, Wang Liwen, Wang Mingxiang, Liu Wanping, Li Zeren, Li Qingkuan, Chen Tianyuan. 2024&. Study on water chemical characteristics and potash distribution of Dongling Lake in Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 98(10): 2902~2915.
- Shi Lin, Gao Donglin, Zhang Congwei, Zhang Yushu. 2012&. Application of geochemical research method to the prospecting of potash deposit. *Journal of Salt Lake Research*, 20(1): 57~63.
- Song Fei. 2022&. Evolutionary extreme learning machine with CNN and its application in logging reservoir identification. Tianjin: Hebei University of Technology Master Thesis.
- Song Xiaojiao, Zhang Hongjian, He Qine. 2020&. Gravity field characteristics and its metallogenic prospect evaluation of Ban keun potash exploration area in north Vientiane, Laos. *Mineral Exploration*, 11(4): 790~796.
- Song Xufeng, Cao Tao, Fu Yanping, Huang Zhao, Hou Zhaolei. 2012&. The precise outlining of mohan underground salt body by high precision gravity method. *Yunnan Geology*, 31(2): 233~237.
- Song Xufeng, Dai Dalong, Cao Tao, Fu Yanping, Yang Zhaohe. 2014&. Application of high precision gravity survey to a rock salt mine in Mongla county, Yunnan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(3): 445~449.
- Su Kelu, Zhong Jiaai, Wang Wei, Shi Wenbin, Chen Zuqing, Li Yuping, Fan Zhiwei, Wang Jianbo, Liu Yong, Pan Bei, Liu Zhicheng, Jiang Yanxia, Liang Zirui, Zhang Yuying, Wang Fuming. 2025. Enrichment conditions and metallogenic model of potassium and lithium resources in the Lower - Middle Triassic, northeastern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(1): 272~284.
- Sun Hongwei, Ren Junping, Xu Kangkang, Wu Xingyuan, Tang Wenlong, He Fuqing. 2023&. Geological characteristics and resource potential analysis of potash deposits in Africa. *Geological Bulletin of China*, 42(8): 1390~1401.
- Tan Hongbing, Ma Haizhou, Ma Wandong, Dong Yaping, Zhang Xiyang, Xu Jianxin. 2004&. Research on geological and geochemical characteristics of paleo-salt rock and its potash ore formation in western Tarim Basin. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 23(3): 194~199.
- Wang Baolu. 1997#. Prospecting effect of geophysical methods in Mengyejing rock salt (potash) deposit, Yunnan.
- Wang Bingyu. 1985#. Application of average gravity difference anomaly method in searching for salt deposits. *Yunnan Geology*. *Yunnan Geology*, 4(4): 404~408.
- Wang Binwei, Aini Maimaiti, Lu Zhiming, Ma Chongyao, Chen Kegui. 2021&. Logging response characteristics and distribution of potash salt in Arysium Depression, South Turgay Basin. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 162~170.
- Wang Binwei, Chen Kegui, Zhang Yahui, Qi Wen. 2020&. Logging response and lithologic identification of Middle-Lower Triassic polyhalite evaporites in Xuanda area. *Mineral Deposits*, 39(5): 945~958.
- Wang Jian, Tan Fuwen, Wang Xiaolong, Du Baiwei, Chen Ming. 2004&. The sedimentary and tectonic characteristics of Qiangtang Basin in the Early Jurassic in northern Xizang (Tibet). *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 198~205.
- Wang Jian, Wang Fan, Wang Zhanwen, Liu Xingwang, Wei Zhao. 2018#. Application of seismic-logging interpretation in potash exploration of Paleogene salt rocks in Kuqa Depression. *Proceedings of 2018 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union*. Beijing.
- Wang Jianbo, Feng Minggang, Wang Kun, Zhou Yanan. 2021&. Logging evaluation and distribution rule of the Triassic polyhalite in puguang area of Sichuan Basin. *Science Technology and Engineering*, 21(1): 61~67.
- Wang Jianbo. 2018#. Study on logging evaluation technology of Triassic potassium-rich salt layers in northeastern Sichuan. *Proceedings of 2018 Annual Meeting of Chinese Geoscience Union*. Beijing.
- Wang Kaiying. 2019&. Study on potassium-rich mechanism of brines in Triassic of Sichuan Basin.
- Wang Shaohua. 2012&. Gravity anomaly and geologic body characteristics of Vientiane plain of Laos. *Geology of Chemical Minerals*, 34(1): 39~46.
- Wang Shuli, Qi Caiji, Cui Bojing, Li Xue, Li Dongxing, Zhang Bixin, Zhou Yue, Liu Wanping, Sun Xiaohong, Ding Xiaojiang, Zhang Mingming. 2024&. Analysis and prospect of exploration trends of potassium salt resources in China. *Acta Geologica Sinica*, 98(10): 2978~2988.
- Wang Wei, Hou Xianhua, Zheng Mianping, Gao Xing, Fan Fu, Liu Qing. 2021&. Key technology application in high resolution seismic data processing for deep potash deposits: An example from Lop Nur. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 146~154.
- Wang Yuanhao, Shi Guocheng, Ye Cheng. 2016&. Application of geophysical well logging in Laos potash deposit exploration. *Value Engineering*, 35(12): 180~182.
- Wiener J M, Rogers J A, Rogers J R, Moll R F. 1991. Predicting carbonate permeabilities from wireline logs using a back-propagation neural network. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 285~288.
- Wu Zhengyang, Mo Xiuwen, Liu Jianhua, Hu Guoshan. 2018&. Convolutional neural network algorithm for classification evaluation of fractured reservoirs. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(4): 618~626.
- Wu Zhenhan, Yang Ning, Wu Yan, Chen Yun, Yang Xingke, Ji Changjun, Liu Zhiwei, Wang Qian, Zhang Lili. 2025&. Jurassic marine salt and its resource in the Shenglihe Sag, northern Qiangtang Basin [ OL ]. [ 2026-01-21 ]. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2025.11.032>.

- Wu Liulei. 2017#. Classification and identification of polyhalite in central Sichuan based on pattern recognition method. Chengdu: Southwest Petroleum University Master Thesis.
- Xin Hepei. 1988#. The effectiveness of gravity and electrical sounding in the prospecting for the Hekou gypsum deposit. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 12(4): 308~311.
- Xing Wanli, Chen Qishen. 2013#. Analysis of potash resource security in China. *China Mining Magazine*, 22(12): 11~14.
- Xu Qihui, Miao Zhongying, Lou Pengcheng, Zheng Mianping, Chen Wenxi. 2023#. Sulfur isotope characteristics of evaporite and its metallogenic significance of potassium salts from Middle Jurassic Xiali Formation in North Qiangtang depression. *Mineral Deposits*, 42(2): 366~380.
- Xu Yongqing, Wu Shouhua. 2019#. Study on occurrence regularity of potash deposits in Vientiane Plain of Laos based on 3D seismic data. *Energy Technology and Management*, 44(6): 159~161.
- Xuan Zhiqiang, Wang Liandi. 1999#. 50 years of Chinese potassium industry. *Geology of Chemical Minerals*, 21(3): 181~187.
- Yang Fei, Pan Yuandun, Zhang Xuegang, Pan Yubin, Ye Jianzhong, Lei Haifei. 2011#. Tracing potassium resources by 3d seismic data. *Geology of Chemical Minerals*, 33(1): 54~57.
- Yang Fuqiang, Chen Kegui, Huang Changbing, Chen Yuanyuan, Li Jin, Ma Xiaolin. 2019#. Application of PSO-LIBSVM in recognition of potassium salt deposits. *Advances in Earth Science*, 34(7): 757~764.
- Yang Xiaoyu, Yan Jianguo, Hou Lei, Gu Wen. 2012#. Application of seismic exploration to potassium-rich brine resources evaluation in Sichuan Basin and the effects analysis. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 27(4): 509~515.
- Yu Xiaocan, Liu Chenglin, Wang Chunlian, Wang Jiuyi, Li Qiang, Meng Lingyang. 2022. Origin of Li brine-type deposits in the Cretaceous gypsum-bearing formation of the Jitai Basin, South China: Constraints from geochemistry and H, O, Li, B, and Sr isotopes. *Applied Geochemistry*, 139: 105257.
- Yuan Jianqi. 1961#. Some thoughts on the exploration directions and approaches for potash resources in China. *Geology in China*, (6): 27~33.
- Yue Hangyu, Guo Peng, Zhang Tingyan, Huang Xiaobing, Pi Jinjun, Xu Hao, Zhang Fengguo. 2025. Integrated geophysical exploration of favorable potassium salt mineralization on the northeastern margin of Qaidam Basin, China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 22(3): 889~900.
- Yue Yunbao. 2013#. The study on the magnetotelluric sounding method in research for brine rich in potassium of central Sichuan area. Chengdu: Chengdu University of Technology Master Thesis.
- Zeng Yongyao, Wang Jianshe, Zhang Wei. 2019. The paleosalinity of the middle-Late Jurassic xiali formation in the yanshiping section, Qiangtang Basin and its significance for salification. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(5): 539~548.
- Zhang Bing, Yang Kai, Wang Xuben, Xu Zhenqi, Yang Hongyu, Zhang Saimin, Chen Jinchao, Zhang Mingming, Liu Wei. 2018. Salt-gathering and potassium formation of potassium-rich Brine during the Triassic in the Sichuan Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 92: 2233~2250.
- Zhang Dawen, Wang Youjun, Chai Guanglu. 2023#. The research on the salt-bearing Yunlong Formation in the Lanping Basin, eastern Tethyan domain: Progresses and problems. *Geological Review*, 69(2): 648~668.
- Zhang Fanchang, Liu Hanqing, Niu Xuemin, Dai Ronghuo. 2014#. High resolution seismic inversion by convolutional neural network. *Oil Geophysical Prospecting*, 49(6): 1165~1169+5~6.
- Zhang Fanchang, Yin Xingyao. 2004#. Three-dimensional seismic inversion with a fast multi-layer feed-forward neural network. *Journal of the University of Petroleum, China*, 28(1): 31~35.
- Zhang Xiong, Wei Yuyan, Luo Xu, Tu Yan, Li Fengmei, Zhang Ruigang, Luan Jinhua. 2025#. Application of core XRF scanning in potassium prospecting in salt-bearing strata in Hechuan area, eastern Sichuan. *Geological Review*, 71(S1): 355~356.
- Zhang Yan, Li Meng, Gong Daxing, Chen Kegui, Ding Feng. 2015#. Research on identification and prediction method of the Triassic potash deposits in Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1970~1979.
- Zhang Yongsheng, Xing Enyuan, Zheng Mianping, Su Kelu, Gui Baoling, Zhong Jia'ai, Zuo Fanfan, Shang Wenjun, Niu Xinsheng, Su Kui, Wang Ningjun, Shen Guoqiang, Tang Bing, Peng Yuan, Ji Debao, Zhang Bing, Sheng Debo, Liu Zhu, Wang Jianbo, Ge Xing. 2024#. Discovery, breakthrough and prospect of "new type polyhalite potash deposit" in the Puguang area, northeastern Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 98(10): 2823~2846.
- Zhang Yongsheng, Zheng Mianping. 2021#. Metallogenic models of potassium ore deposits in China and demonstration of deep exploration technology. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 1~9.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Shi Wei. 2011. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan Basin. *Geology in China*, 38: 233~250.
- Zhang Yujun, Yao Fojun. 2014. Taking full use of achievements of remote sensing and geophysics in exploration of potash deposit in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(s2): 1331~1333.
- Zhang Zhiguo. 2006#. Study on artificial neural networks and their applications in geoscience. Changchun: Jilin University Doctoral Dissertation.
- Zhao Gaishan. 2019#. Road to intelligent petroleum geophysical exploration: From automatic to intelligent. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 58(6): 791~810.
- Zhao Wenlong, Wang Xuben, Zhang Bing, Yue Yunbao, Zhu Hongjin, Huang Tao. 2014#. The application on the magnetotelluric sounding method in study of brine rich in potassium of Sichuan eastern area. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(5): 560~565.
- Zhao Yuanyi, Jiao Pengcheng, Li Botao, Qian Zuohua. 2010#. Geological characteristics and resource potential of soluble potash in China. *Mineral Deposits*, 29(4): 649~656.
- Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng. 2006#. Present situation of potash resources and direction of potash search in China. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1239~1246.
- Zheng Mianping, Yuan Heran, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Chen Wenxi, Li Jinsuo. 2010#. Regional distribution and prospects of potash in China. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1523~1553.
- Zheng Mianping, Zhang Zhen, Yin Hongwei, Tan Xiaohong, Yu Changqing, Shi Linfeng, Zhang Xuefei, Yang Jianxu, Jiao Jian, Wu Guopeng. 2014#. A new viewpoint concerning the formation of the mengyejing potash deposit in Jiangcheng, Yunnan. *Acta Geoscientifica Sinica*, 35(1): 11~24.
- Zhi Xiachen. 1981#. Bromine method in potassium salt geochemistry. *Geology of Chemical Minerals*, 3(1): 33~47.

Zhong Shouhua. 1992. Discussion on the relationship between gravity anomaly and salt deposits in Mesozoic basins of Kunming area. Proceedings of the 8th Annual Conference of Chinese Geophysical Society. Kunming.

Zhou Feifei. 2025. China's potash exploration moves towards "equal emphasis on land and sea". 2025-02-10.

Zhou Guoxing. 2012. Seismic interpretation of potash deposit sedimentary characteristics in Vientiane Plain, Laos. *Coal Geology of China*, 24(8): 70-72+76.

Zhou Quan, Wang Lirong. 2021. Development and application of geophysical exploration technology. *China Metal Bulletin*, (5): 240-241.

Zhou You. 2014. Study of potassium-rich brine resources evaluation methods in Sichuan Basin. Chengdu: Chengdu University of

Technology Doctoral Dissertation.

Zhu Lei, Zhang Fanchang, Xu Xunrong, Xu Wanglin. 2023. Identifying the potash reservoirs from seismic data by using convolution neural network, constrained by the waveform characteristics of potash reservoirs. *Acta Geophysica*, 71(6): 2699-2714.

Zhu Zichuan, Zhou Dan, Li Dewen, Yu Runlong. 2019. The application of natural field audio magnetotellurics sounding to the exploration of the Vientiane basin potassium salt deposit in Laos. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(6): 1268-1276.

Zi Jinping, Dong Jia, Wei Guoqi, Yang Zhenyu, Zhang Yong, Hu Jing, Shen Shuxin. 2017. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of volcanoclastic beds of the third member of the Sinian (Ediacaran) Dengying Formation in Leshan, Sichuan, and a discussion on the rift evolution in the basin. *Geological Review*, 63(4): 1040-1049.

## Advances and prospects in prediction methods for potash reservoirs

HU Jingyi<sup>1, 2)</sup>, LU Zhiyuan<sup>1, 2)</sup>, LI Xi<sup>1, 2)</sup>, ZHU Guangyou<sup>1, 2)</sup>, HE Yiming<sup>1, 2)</sup>,  
XU Xuanning<sup>1, 2)</sup>, FU Shiyu<sup>1, 2)</sup>

1) School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, 430100;

2) Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Yangtze University, Wuhan, 430100

**Abstract:** Potash, as a critical strategic mineral resource, shares significant similarities with oil and gas exploration in its primary technical approaches. This paper systematically reviews the technological advances in potash reservoir prediction and the integrated oil-potassium exploration. The study indicates that: ① In terms of geophysical technologies, well logging has established a suite of identification markers for both solid and liquid potash deposits; seismic exploration characterizes the spatial distribution of reservoirs through impedance inversion; while gravity, magnetic, and electrical surveys delineate salt bodies based on physical property contrasts. ② Regarding artificial intelligence (AI) technologies, machine learning demonstrates good classification performance in data-sufficient areas, and deep learning shows potential in predicting complex reservoirs through feature extraction. ③ Geochemical methods, which integrate elemental and isotopic geochemistry along with the causative discrimination and comprehensive application of multiple geochemical parameters, effectively reveal potash-forming mechanisms and directly support exploration prediction. Based on practices in typical basins, this paper concludes that future technological development must focus on breakthroughs in three key directions: "deep exploration, intelligence, and integration". It aims to provide a systematic theoretical foundation and practical technical references for tackling key challenges such as deep detection and data fusion, thereby ensuring the security of potash resources in China.

**Keywords:** potash reservoir; integrated oil-potash exploration; multi-source data; prediction methods; potassium-enriched key basins

**Acknowledgements:** This study was supported by the National Science and Technology Major Project on Deep Earth (No. 2025ZD1008901) and the National Science and Technology Major Project on New Oil and Gas Exploration and Development (No. 2025ZD1400403)

**First author:** HU Jingyi, female, born in 2002, master's candidate; Email: geohujingyi@163.com

**Corresponding author:** ZHU Guangyou, male, born in 1973, professor, is mainly engaged in deep oil and gas geology and reservoir formation research; Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

**Manuscript received on:** 2025-11-18; **Accepted on:** 2026-01-19; **Published online on:** 2026-02-15

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2026.02.031

**Edited by:** LIU Zhiqiang



