

我国盐穴资源评价及调查技术研究

林振洲, 刘东明, 张乐, 蒋正中, 荆磊, 智庆全, 张杰, 周岳军, 贾定宇, 杨毅, 梁明星, 李洋, 欧洋, 翟景红

Evaluation and investigation technology of salt cavern resources in China

LIN Zhenzhou, LIU Dongming, ZHANG Le, JIANG Zhengzhong, JING Lei, ZHI Qingquan, ZHANG Jie, ZHOU Yuejun, JIA Dingyu, YANG Yi, LIANG Mingxing, LI Yang, OU Yang, and ZHAI Jinghong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究

Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China

刘琼, 李瑞敏, 王轶, 高萌萌, 李小磊, 孙超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 173-183

河北省地下水资源承载能力评价及预警方法研究

Research on evaluation and early warning of groundwater resources carrying capacity in Hebei Province

孙超, 王昕洲, 叶莹莹, 刘琼, 曹颀, 韩冲, 王轶 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 55-63

基于GIS的地下水资源分区研究及承载本底评价

Evaluation of natural carrying capacity and zoning of groundwater resources based on GIS

高萌萌, 李瑞敏, 刘琼, 王轶, 李小磊 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 184-190

“水文地质与水资源调查计划”进展

Achievements of Investigation Program on Hydrogeology and Water Resources of CGS

李文鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 1-6

高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

邢皓枫, 张好, 李浩铭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 102-109

城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法

Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization

董英, 张茂省, 李宁, 杨敏, 程秀娟, 朱才辉 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 161-168



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401051

林振洲, 刘东明, 张乐, 等. 我国盐穴资源评价及调查技术研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 53-65.

LIN Zhenzhou, LIU Dongming, ZHANG Le, et al. Evaluation and investigation technology of salt cavern resources in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 53-65.

我国盐穴资源评价及调查技术研究

林振洲^{1,2}, 刘东明^{1,2}, 张乐³, 蒋正中^{1,2}, 荆磊^{1,2}, 智庆全^{1,2}, 张杰^{1,2}, 周岳军³, 贾定宇^{1,2},
杨毅^{1,2}, 梁明星^{1,2}, 李洋^{1,2}, 欧洋^{1,2}, 翟景红^{1,2}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000; 2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北廊坊 065000; 3. 中盐勘察设计院有限公司, 湖南长沙 410027)

摘要: 在“双碳”目标大背景下, 盐穴是实现地质储能、碳封存的重要方式之一, 但我国盐穴资源数量、质量不明, 盐穴调查技术体系不完善, 严重制约盐穴资源开发利用。通过分析我国主要盐矿区地质勘探报告、储量核实报告、企业年报及文献报道等, 形成了我国盐穴资源数量、可利用性的科学认识和基本判断; 在盐穴集中区开展综合探测技术试验并结合前人试验成果, 初步构建了盐穴资源调查技术体系。结果表明: (1) 我国盐穴资源丰富, 储量大、分布广、埋深适宜、具备规模化开发利用条件, 其中华东和华中地区已有盐穴资源最为丰富。(2) 通过建立盐穴资源可利用性评价体系, 将全国盐穴资源分为 I、II、III 3 级, I 级已有盐穴资源占比约 29.4%, 主要分布在华东、华中地区的江苏、湖北、河南等省份, 是开发利用的优选区; II 级已有盐穴资源占比约 65.4%, 广泛分布于华中、西北和西南地区, 可作为开发利用远景区; III 级已有盐穴资源占比约 5.2%, 整体地质条件不适宜开发利用。(3) 地面物探可查明盐矿区区域地质、盐层地质、水文地质及盐腔分布情况, 指导盐穴建库选址; 井中物探精度高, 可获得盐矿品味、腔体结构等信息, 服务储库建设及运行监测。研究结果可为我国盐穴资源规划及开发提供基础数据和技术支撑。

关键词: 岩盐矿; 盐穴; 可利用评价; 调查技术; 地球物理探测

中图分类号: X141; P631.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0053-13

Evaluation and investigation technology of salt cavern resources in China

LIN Zhenzhou^{1,2}, LIU Dongming^{1,2}, ZHANG Le³, JIANG Zhengzhong^{1,2}, JING Lei^{1,2}, ZHI Qingquan^{1,2},
ZHANG Jie^{1,2}, ZHOU Yuejun³, JIA Dingyu^{1,2}, YANG Yi^{1,2}, LIANG Mingxing^{1,2}, LI Yang^{1,2},
OU Yang^{1,2}, ZHAI Jinghong^{1,2}

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang, Hebei 065000, China; 2. National Center for Geological Exploration Technology, Langfang, Hebei 065000, China; 3. China Salt Survey & Design Co. Ltd., Changsha, Hunan 410027, China)

Abstract: Under the background of the “carbon peaking and carbon neutrality goals”, the salt cavern is an important place for geological storage and carbon sequestration. The limited knowledge of the quantity and quality

收稿日期: 2024-01-24; 修订日期: 2024-04-07

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230548; DD20221639-03); 中央财政科研结余资金项目 (JY202108); 物化探所基本科研业务费项目 (AS2022J03)

第一作者: 林振洲 (1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地下空间探测及井中物探工作。E-mail: lzhenzhou@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 刘东明 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事测井及井中物探工作。E-mail: ldongming@mail.cgs.gov.cn

of the salt cavern and immature investigation technology constrains the development and utilization of salt cavern. After analyzing the geological exploration reports on major salt mines, reserves reports, enterprise annual reports, and research articles, a scientific understanding and basic judgment of the amount and utilizability of salt caverns in China are obtained; a technical system of salt cavern resource survey is established through a test with comprehensive detection technology in the concentrated area of salt cavern. The results show that salt cavern resources in China are characterized by abundant reserves, wide distribution, feasible burial depth, and convenient utilization on large scale. The most abundant salt cavern resources occur in the east and central regions. The national salt cavern resources are divided into levels I, II, and III by using an availability evaluation method system of salt cavern resource. Level I accounting for about 29.4%, is mainly distributed in Jiangsu, Hubei, Henan, and other provinces in east and central China. Salt cavern resources in level I are preferred for development and utilization. Level II accounting for about 65.4%, is widely distributed in southwest, northwest, and centra China, and can be used as a prospective area for development and utilization. Salt cavern resources in level III accounting for about 5.2%, are not suitable for development and utilization. Ground geophysical exploration, which can identify the characteristics of the regional geology, salt layer geology, hydrogeology, and salt cavity distribution of the salt mining area, guides the site selection on the salt cavern construction; geophysical exploration of high precision, which can obtain the information of salt mine levels and cavity structure, benefit the construction and operation detection of storage. This study provides the basic data and technical support for the planning and development of salt cavern resources in China.

Keywords: rock salt mine; salt cavern; utilizability evaluation; investigative techniques; geophysical exploration

盐穴即地下盐矿开采后形成的空间,是一种宝贵的、不可再生的地下空间资源^[1]。盐穴力学性质稳定、渗透率低、高压下具有塑性,且在产生局部地层裂缝条件下可自重结晶愈合,具有较好的密闭性,可作为天然气、石油、压缩空气、氢气等多种形式的能源^[2],以及二氧化碳、工业废料、采矿废渣、核废料等物质的大规模高效安全存储空间^[1]。

随着中国碳达峰、碳中和目标的提出,新能源、清洁能源将成为未来我国能源结构的重要组成部分,盐穴以其埋深大、封闭性好、安全性高、容量大、存取灵活等诸多优点,成为理想的地质储能和碳封存场所^[3]。我国盐穴资源丰富,合理开发利用盐穴,对保障我国能源储备安全,促进清洁能源利用,助力实现碳达峰碳中和目标具有重要意义。

国外有近千座地下盐穴用于存储多种形式的能源及物资^[4],苏联是利用盐穴资源最早的国家,1959年,苏联建成世界上第一座盐穴储气库,随后该项技术在欧美等国迅速发展,其中美国与德国是世界上该项技术利用水平最高的国家^[2],现在国外盐穴利用的最新方向为储存非常规物质:氢、无水氨、氦及二氧化碳等,以及在带有风力传送系统的盐穴中储存粮食^[1]。

20 世纪末,基于能源储备需求,我国开始研究建造盐穴储气库,中国盐业集团有限公司所属金坛公司和中国石油天然气集团有限公司合作于 2007 年建成投产国内第一座盐穴储库—西气东输金坛储气库。目前我国在役盐穴储库约 70 座,主要集中在江苏省常州市金坛区,用于天然气存储和压缩空气储能发电,除金坛地区之外,山东肥城、江苏徐州和淮安、河南平顶山、湖北潜江和应城、湖南衡阳、江西樟树、云南安宁等地区,都有在建或拟建的盐穴储库项目^[5-6]。

盐穴资源利用方式分为已有腔体改造和溶蚀建造新腔 2 种,开发利用前应首先掌握建库区地层、构造、岩性等基础地质信息。区别于欧、美等国的盐丘型矿床,我国盐矿产出形态以层状盐岩型为主,具有总盐层厚度小、单盐层厚度薄、夹层数量多且厚度大等特点^[1,7-8],致使造腔和资源评估难度远大于盐丘型矿床,故亟需探索出适宜我国盐矿区地质特点的盐穴资源评价方法和调查技术。

本文通过对全国 28 个主要成盐区地质背景和约 100 家井盐矿矿床地质特征等基础资料的研究,阐述了我国盐矿资源及盐穴资源的分布规律;初步构建了盐穴资源可利用性地质评价体系,首次划分出全国盐

穴资源可利用性等级;以江苏金坛盐穴集中区地球物理探测为例,结合文献调研,初步构建了盐穴资源地质地球物理调查技术体系,可为盐穴资源调查及储库建设提供技术支撑。

1 我国盐矿及盐穴资源状况

1.1 我国岩盐资源分布状况

我国幅员辽阔,海进海退频繁,地壳运动交错出现,干旱气候几乎遍布各个地质时期,盐类物质来源丰富,加上小陆块、微陆块、造山带的构造特征,为成盐提供了封闭屏障,使得盐矿广泛分布,自晚古生代至第四纪,每个地质时代均有各种盐类沉积矿产的形成。盐矿资源包括岩盐和卤水,本文只考虑岩盐,我国岩盐资源分布在18个省区,已发现157处矿床。岩盐埋藏于地下数十米至五千米左右,厚度从几十米到几百米不等,矿体一般为多夹层盐层,矿石易溶于水,盐矿品位较高,最高氯化钠浓度>95%,一般含氯化钠浓度为70%~95%^[1]。按地理位置可划分为华北、华东、华中、华南、西北、西南等6个区域。

华北地区岩盐矿床分布在河北中南部辛集—宁晋一带,区内仅有1家盐矿企业。盐矿属内陆湖相沉积岩盐矿床,盐层面积达1 000 km²,埋深2 510~3 190 m,累计厚度120~220 m。

华东地区岩盐矿床分布在江苏金坛、丰县和淮安,安徽东兴,江西樟树和会昌,山东泰安和东营等地区,主要分属于33个盐矿企业。盐矿属内陆湖相沉积岩盐矿床,盐层分布面积约1 756 km²,埋深218~4 217 m,累计厚度14~460 m。

华中地区岩盐矿床分布在河南濮阳、舞阳和叶县,湖北利川、枣阳、云应、天门和潜江,湖南澧县和衡阳等地区,主要分属于26个盐矿企业。除湖北利川建南盐矿属海相沉积岩盐矿床,其余均属内陆湖相沉积岩盐矿床,盐层分布面积约3 654 km²,埋深104~3 000 m,盐层累计厚度2~728 m。

华南地区岩盐矿床主要分布在广东广州、佛山、东莞等地区,区内有3家盐矿企业。盐矿属内陆湖相沉积岩盐矿床,盐层分布面积约230 km²,埋深480~640 m,累计厚度7~55 m。

西北地区岩盐矿床分布在陕西延安和榆林,宁夏固原、甘肃漳县,新疆塔里木盆地等区域,主要分属于8个盐矿企业,其中新疆塔里木盆地尚无开采井盐企业。陕北地区和塔里木盆地盐矿属海相沉积岩盐矿床,其余均属湖相沉积岩盐矿床,盐层分布面积约

20 km²,埋深100~7 000 m,累计厚度100~1 600 m。

西南地区岩盐矿床分布在四川盆地、滇中和滇西南等区域,主要分属于15个盐矿企业。该区域经历了多期次成盐过程,三叠系前以海相碳酸盐沉积为主,其后主要表现为陆相沉积。盐层分布面积约2.8×10⁴ km²,埋深300~5 000 m,累计厚度100~1 600 m。

1.2 我国盐穴资源分布状况

早期岩盐矿开采时,由于水溶技术落后及对盐穴规模、空间分布等未加关注等原因,形成了大量的未知盐穴,其容积仅能通过采卤量估算,具体的腔体形状、腔体顶底板埋深和矿柱宽度等详细信息有待勘查。

基于盐矿、化工企业的盐矿资源量、已采卤量和年采卤量,利用盐腔有效体积计算法,对各地区盐穴资源量进行了分类估算。其中,已有资源量是采卤后已形成的盐腔容积;潜在资源量是考虑盐层及夹层的性质、溶腔形状及矿柱安全距离等因素,以建库为目的造腔后形成的新盐腔容积;年增资源量是参考近年采卤量推导得出预计可形成的盐腔容积。评估结果表明,华东和华中地区已有盐穴资源丰富,年增资源量最大;西北和西南地区特别是陕北和四川,潜在盐穴资源量大,但普遍埋藏较深、地质构造相对复杂。公式如下:

$$V_f = \frac{1}{\left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha\beta}\right)\left(1-\frac{C_b}{\rho_s}\right)} V_p \quad (1)$$

式中: V_f ——盐腔有效体积/m³;

α ——溶蚀段不溶矿物/%;

β ——溶蚀段不溶矿物膨松系数;

C_b ——卤水浓度/%;

ρ_s ——纯盐密度/(kg·m⁻³);

V_p ——采出纯盐的体积/m³。

2 盐穴资源可利用性评价体系

盐穴资源主要产出于陆相碎屑岩系型和海相碳酸盐岩系型石盐矿床中,区别于欧、美等地区的盐丘型矿床,我国盐矿产出形态以层状盐岩型为主,盐层总体厚度小、单盐层厚度薄、夹层数量多且厚度大。完颜祺琪等^[9]从构造特征、盐层发育情况、盐层埋深、盐层厚度、盐岩品位、盖层性质及厚度、密封性等方面,系统、定量地阐述盐穴地下储气库库址的优选评价指标;井文君等^[10]应用层次分析法建立盐穴储气库选址综合评价体系的目标层次结构模型,提出了选址体系中各基本指标的适宜度等级划分标准;郑雅丽

等^[1]在分析气藏储气库地质体相关研究成果的基础上,提出盐穴储气库地质体概念,建立盐穴储气库地质体完整性管理体系;刘红樱等^[12]对长江经济带盐矿区岩盐矿床进行了综合研究和分析,建立了层次结构模型,评价了盐穴油气储库建设的可行性。

由于我国与国外盐穴资源形成的地质条件有所区别,且国内已建成的盐穴储库有限,因此尚无可供借鉴的评价标准,在咨询本领域专家及参考前人研究的基础上^[9-12],针对我国盐穴资源特点,突出地质属性特征,制定了相应的可利用性地质评价标准,可从宏观上划分我国盐穴资源等级。

2.1 盐穴资源可利用性评价标准

标准包括区域地质特征、盐层地质特征、水文地质特征 3 大因素,12 项指标。

区域地质特征。盐穴资源开发利用应优先选择沉积稳定、构造简单、断层少、盖层稳定、力学性质

好、地震活动弱的盐矿。区域地质特征选定区域沉积特征、断层发育特征、区域盖层特性以及区域地震特征 4 个指标。

盐层地质特征。盐穴开发利用是在盐层内进行人工造腔,应优先选择分布广、厚度大、埋深适宜、含矿率及品位高、夹层可溶性强的盐层。盐层地质特征选定盐岩分布范围、埋深、累计厚度、含矿率、氯化钠品位和夹层岩性等 6 个指标。

水文地质特征。水文地质条件也是盐穴资源评价的重要因素,从安全运行角度考虑应优先选择与地下水隔离条件好的盐层;从经济因素角度考虑应优先选择地表水资源充足的地区。水文地质特征选定地下水系分布和地表水源分布 2 个指标。

综合分析以上 3 大因素,制定了盐穴资源可利用性地质评价指标等级表(表 1)。

表 1 盐穴资源可利用性地质评价指标等级表

Table 1 Geological evaluation indexes and levels of salt cavern utilizability

目标	因素(分值范围)	因子	权重	等级标准	等级分值
盐穴资源 可利用性 地质评价	区域地质特征A (0~20)	区域沉积特征A ₁	5	海相盐丘、陆相少夹层 陆相多夹层	3~5 0~2
		断层发育特征A ₂	5	不发育 较发育	3~5 0~2
		区域盖层特性A ₃	5	稳定分布 不稳定分布	3~5 0~2
		区域地震特征A ₄	5	地震活动不活跃 地震活动活跃	3~5 0~2
	盐层地质特征B (0~60)	盐岩分布范围B ₁	10	≥50 km ² <50 km ²	6~10 0~5
		盐层埋深范围B ₂	10	500~3 000 m <500 m或>3 000 m	6~10 0~5
		盐层累计厚度B ₃	10	≥100 m <100 m	6~10 0~5
		含矿率B ₄	10	≥70% <70%	6~10 0~5
		NaCl平均品位B ₅	10	≥70% <70%	6~10 0~5
		夹层岩性B ₆	10	非致密岩性 致密岩性	6~10 0~5
	水文地质特征C (0~20)	地下水系分布C ₁	10	盐层与地下水系隔离 盐层与地下水系连通	6~10 0~5
		地表水源分布C ₂	10	淡水资源充足,且离矿区距离适中 淡水资源不足,或水源离矿区距离较远	6~10 0~5

根据不同盐矿地质情况赋予相应的分值,累加后总分 85 分以上且任一项指标评分均在该指标分值 60% 以上划为 I 级,总分 75~85 分划为 II 级,总分 75 分以下划为 III 级(表 2)。

2.2 全国主要盐矿区盐穴资源可利用性评价结果

对全国主要盐矿区地质条件进行分析,根据可利用性评价标准进行了评级(表 3),评价结果显示:

I 级已有资源量占全国已有资源量的 29.4%,主要

表 2 盐穴资源可利用性等级划分表
Table 2 Levels of salt cavern utilizability

可利用性分级	开发适宜性	地质情况
I 级	优选区	构造简单, 断层不发育, 地震活动弱, 盖层稳定, 盐层分布范围广、埋深适中、盐层厚度大、品质高, 夹层岩性易溶, 淡水资源丰富、水文地质条件简单
II 级	远景区	盐层分布范围中等, 盐层顶板埋深偏浅或偏深、累计厚度中等、品位不高, 但整体地质条件良好, 存在适宜开发的岩盐层段
III 级	不适宜区	盐层分布范围小, 埋深过浅或过深, 累计厚度小, 含矿率低, 多次出现采卤区地面冒卤、变形、塌陷等问题

分布在华中, 华东的江苏、湖北、河南等省份, 如金坛盐矿、潜江盐矿、叶舞盐矿、淮安盐矿、丰县盐矿、小板盐矿等。I 级资源盐矿区建库条件优质, 且地处我国人口密集、经济活跃地区, 能源存储市场需求大。

II 级已有资源量占全国已有资源量的 65.4%, 主要分布于华中、西北和西南等地区, 包括河南、湖北、湖南、江西、陕西、云南、四川、河北、山东等省份, 如濮阳盐矿、云应盐矿、衡阳盐矿、清江盐矿、陕北盐矿、辛集—宁晋盐矿、大汶口盐矿等。II 级资源赋存的地质条件整体上略逊于 I 级, 但某个深度段的盐层

也极具开发价值, 如云应盐矿古近系膏盐组含盐地层厚度大、可溶性强、夹层岩性致密, 可开发为盐穴储库。

III 级已有资源量占全国已有资源量的 5.2%, 华东、华中、西北、西南地区均有分布, 如东营盐矿、周田盐矿、东兴盐矿、建南盐矿、澧县盐矿、王城盐矿、固原硝口—上店子盐矿、漳县盐矿等。III 级资源可利用性较差: 埋深小于 500 m 的盐层埋深过浅, 存在采空区塌陷等地质灾害问题; 埋深大于 3 000 m 的盐层建腔成本过高, 且因埋藏过深蠕变速率加快会导致腔体的年收缩率增加。

表 3 我国主要盐矿床地质特征及可利用性等级

Table 3 Geological features and utilizability level of major salt deposit in China

序地号	盐矿/成盐区	区域沉积特征	断层发育特征	区域盖层特性	区域地震特征	盐岩分布范围/km ²	盐岩埋深范围/m	盐层累计厚度/m	含矿率/%	NaCl品位/%	夹层岩性	地下水系分布	地表水源分布	可利用性等级
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	C ₁	C ₂	综合评分
1	华北辛集—宁晋盐矿	陆相层状	新生界地层中未发现断层, 构造简单	横向分布稳定, 裂隙不发育, 岩性致密	地震活动较弱	1 000	1 000 ~ 3 600	120 ~ 220	80	93	灰质泥岩、含泥石膏岩等	盐层与地下水系隔离	有淡水资源	80 II 级
2	金坛盐矿	陆相层状	区内断层少, 主体部位未见断层	分布稳定, 岩性坚硬	地震活动较弱	61	888 ~ 1 236	160	84 ~ 95	80 ~ 85	含膏泥岩、白云质泥岩、含硝泥岩等	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	90 I 级
3	淮安盐矿	陆相层状	断层不发育, 构造简单	横向分布稳定, 裂隙不发育, 岩性致密坚硬	地震活动较弱	82	1 000 ~ 2 500	40 ~ 170	55 ~ 87	75 ~ 90	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	85 I 级
4	丰县盐矿	陆相层状	构造简单, 沉积稳定	横向分布稳定, 裂隙不发育, 岩性致密	地震活动较弱	116	800 ~ 1 355	20 ~ 460	69	70	泥岩、硬石膏岩和钙芒硝岩	盐层与地下水系隔离	有河流依托	85 I 级
5	华东东兴盐矿	陆相层状	构造简单, 断层不发育	横向分布稳定, 力学性质一般	地震活动较弱	61	218 ~ 594	14 ~ 198	90	20 ~ 95	泥岩、含膏泥岩、粉砂质泥岩、含钙芒硝泥岩等	隔离效果差, 矿区多次出现地面冒卤、变形、塌陷等地质灾害	水资源丰富	59 III 级
6	大汶口盐矿	陆相多薄层盐岩矿床	断裂较发育, 但断裂在盐矿范围内不发育	横向分布稳定, 岩性致密	地震活动较弱	36	840 ~ 1 640	30 ~ 150	20 ~ 56	87	硬石膏岩为主	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	76 II 级
7	东营盐矿	陆相层状	构造简单, 断层不发育	横向分布稳定, 岩性致密	地震活动较弱	200	2 935 ~ 4 400	71	12	94 ~ 99	泥岩、含盐泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	73 III 级
8	清江盐矿	陆相层状	构造简单, 褶皱平缓、规模小, 断裂少	横向分布稳定, 力学性质差	历史无地震记录	134	593 ~ 1 107	35 ~ 134	70 ~ 75	60 ~ 75	含盐、芒硝、石膏泥岩	老采区因过度开发导致溶腔通过顶板溶蚀裂隙与地下水层串通	水资源丰富	75 II 级
9	周田盐矿	陆相层状	部分区域断层构造发育	横向分布稳定, 力学性质差	地震活动较弱	7	800 ~ 1 200	75 ~ 204	75	54 ~ 64	泥岩	老采区因过度开发导致矿区地面变形塌陷, 部分盐层与地下水连通	水资源丰富	62 III 级

(续表)

序 号	地 区	盐矿/ 成盐区	区域沉积	断层发育	区域盖层	区域地震	盐岩分布	盐岩埋深	盐层累计	含矿率	NaCl品	夹层岩性	地下水系	地表水源	综合	可用
			特征	特征	特性	特征	范围/km ²	范围/m	厚度/m	%	位/%		分布	分布		
			A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	C ₁	C ₂		
10		叶舞盐矿	陆相层状	构造简单,部分区域断层发育,但可避开	分布稳定,厚度大,岩性致密	地震活动较弱	400	1 117 ~ 2 600	293 ~ 662	75	75 ~ 90	含硬石膏粉砂岩、粉砂岩等	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	89	I 级
11		濮阳盐矿	陆相盐丘	存在隐伏构造	分布稳定,厚度大,岩性致密	地震活动较弱	500	2 100 ~ 2 700	800 ~ 1 000	60	75 ~ 95	薄层泥岩和砂岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	84	II 级
12		云应盐矿	陆相层状	构造简单,褶皱、断裂和裂隙均不发育	分布稳定,厚度大,岩性致密	地震活动较弱	260	300 ~ 850	30 ~ 180	75	70 ~ 80	硬石膏岩、钙芒硝岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	79	II 级
13		潜江盐矿	陆相层状	构造简单,断层、裂隙不发育	分布稳定,厚度大	地震活动较弱	1 600	700 ~ 2 145	300 ~ 400	90	70 ~ 98	无水芒硝矿石和钙芒硝泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	92	I 级
14	华中	小板盐矿	陆相层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,厚度大	地震活动较弱	330	400 ~ 1 300	100 ~ 480	72	80 ~ 90	泥质钙芒硝岩、灰质泥岩、硬石膏质泥岩、粉砂质泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	88	I 级
15		建南盐矿	海相层状	构造较发育,节理裂隙发育	分布稳定,力学性质好	地震活动较弱	15	1 871 ~ 2 301	4 ~ 8	70	80	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	58	III 级
16		王城盐矿	湖相层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,厚度大	地震活动较弱	10	237 ~ 324	11	75	10 ~ 54	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源较丰富	54	III 级
17		衡阳盐矿	陆相薄层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,力学性质好	地震活动较弱	57	212 ~ 1 132	50 ~ 360	56	10 ~ 96	泥岩、含硬石膏泥岩、含钙芒硝硬石膏泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	79	II 级
18		澧县盐矿	陆相层状	局部有小褶皱和断层,节理、裂隙比较发育	分布稳定,力学性质差	地震活动较弱	8	220 ~ 500	11	40	81	泥岩、含硬石膏白云岩、泥质钙芒硝、无水芒硝	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	56	III 级
19		龙归盐矿	陆相层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,力学性质差	地震活动较弱	3	480 ~ 640	8 ~ 56	71	55 ~ 76	泥岩	盐层与地下水系连通	水资源丰富	56	III 级
20	华南	三水盐矿	陆相层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,力学性质差	地震活动较弱	0.9	1 244 ~ 1 278	76 ~ 115	40	49 ~ 70	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	68	III 级
21		东腾盐矿	陆相层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,密封性较好,力学性质一般	地震活动较弱	0.6	794 ~ 860	30	40	50	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	65	III 级
22		陕北盐矿	海相层状	构造简单,断层不发育	分布稳定,岩性致密,力学性质好	地震活动较弱	43 000	2 200 ~ 2 850	100 ~ 150	90	95 ~ 97	泥质白云岩、硬石膏岩,岩性致密	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	84	II 级
23	西北	固原硝口一上店子盐矿	陆相层状	断裂构造十分发育	分布稳定,岩性致密,力学性质好	历史和现代地震活动活跃	31	85 ~ 800	34 ~ 287	90	31 ~ 99	含盐泥岩,含盐量 10% ~ 29%	盐层与地下水系隔离	淡水资源匮乏	68	III 级
24		漳县盐矿	陆相层状	产状变化大,断层多,矿床开采比较复杂	分布稳定,结构致密	地震活动较弱	315	70 ~ 400	62	13 ~ 92	55 ~ 95	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源量较差	57	III 级
25		四川盆地	海相碳酸盐型	东部及东南部边缘大断裂对矿体有破坏	分布稳定,厚度大	历史和现代地震活动活跃	180 000	1 000 ~ 5 000	10 ~ 700	50	70	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	77	II 级
26	西南	滇中成盐区	陆相层状	构造不发育,无节理裂隙	分布稳定,岩性坚硬	地震活动较弱	>60	300 ~ 900	136 ~ 449	80	70	泥质岩、碳酸盐泥质岩,主要组分易溶	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	78	II 级
27		滇西成盐区	陆相层状	构造较复杂	分布稳定	地震活动较活跃	75	10 ~ 400	10 ~ 100	80	50 ~ 60	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	68	III 级
28		滇南成盐区	陆相层状	构造简单,呈褶皱状或单斜状产出	分布稳定	地震活动较活跃	400	10 ~ 400	10 ~ 100	80	50 ~ 90	泥岩	盐层与地下水系隔离	水资源丰富	74	III 级

3 盐穴资源调查技术体系

开发利用盐穴资源, 需详细掌握建库区地层、构造、矿层品味等地质信息。地球物理探测利用地下介质的速度、密度、电性等物性差异, 可查明盐层、盖层、断裂、盐腔等空间展布形态, 含水层分布特征, 矿物含量等, 有效支撑造腔建库。前人对盐穴或盐矿采空区开展过多种地球物理探测试验, Coskun 等^[13]对美国得州休斯敦附近盐丘进行了二维和三维地震勘探, 查明了盐丘的空间分布特征; Beutel 等^[14]利用二维地震和垂直地震剖面(VSP)技术查明英国 Byley 盐穴储气库周边断裂, 以推断盐穴壁与断裂的距离; Ezersky 等^[15]应用核磁共振(SNMR)、瞬变电磁(TEM)、面波多通道分析(MASW)、反射地震、微重力和磁性测量及其组合, 对死海周边盐层溶蚀后形成的采空区、天坑等进行了多方法研究, 评估了地下水侵蚀状况、圈定了采空区范围。耿春明^[16]、王琴等^[17]、王瑞贞等^[18]利用三维地震勘探技术, 识别出溶腔的发展方向、发育情况、内部连通情况、顶板破坏程度等; 李霖林等^[19]利用 VSP 资料, 分别从点、线、面、体的角度对石盐体进行研究, 描述了探区内石盐体的几何形态和断层分布, 预测了裂缝发育方向; 王志荣等^[20]利用可控源音频大地电磁法与大地电场岩性探测法, 圈定含盐地层及盐穴的分布情况; 徐小连等^[21]利用瞬变电磁法对低阻异常反应灵敏的特点, 基本查清了地下溶腔的分布情况; 李松洲^[22]通过高密度电法分析了地层及地下水的分布, 利用可控源音频大地电磁法推断出盐矿采空区的位置; 鲁辉等^[23]利用地球物理测井技术进行盐矿区岩性识别、岩石力学分析、腔体气密性评价等, 为盐穴储气库设计提供可靠的基础数据; 完颜祺琪等^[24]提出利用声波时差、补偿中子、体积密度 3 条测井曲线, 建立盐岩、硬石膏和钙芒硝的测井响应特征, 定量计算出矿物组分含量; 李锐敏等^[25]利用回归分析法, 构建了利用测井参数计算盐岩含量的经验公式。声呐扫描是目前测量盐穴腔体形态最直接有效的方法, 精度可达厘米级, 可应用于老腔改造、溶蚀建腔、运行监控等盐穴开发利用的各个阶段, 齐得山等^[26]、周冬林等^[27]、宫丹妮等^[28]利用声呐扫描技术, 针对盐穴腔体溶蚀形态、腔壁损伤规律及腔体稳定性等, 开展了数值模拟和评价研究, 有效推动了盐穴储库建设。

本文在江苏金坛盐穴集中区, 开展了二维地震、高精度重力、瞬变电磁法、测井等方法技术试验, 结合文献资料, 初步总结出针对盐盆、盐穴库址、盐腔

由大到小 3 个尺度的调查技术体系。

试验区位于江苏省常州市的金坛区西北、镇江市丹徒区东南的金坛盐矿, 该盐矿赋存在金坛盆地西侧的直溪桥凹陷(图 1), 凹陷内含盐层系地质构造相对简单, 区内断层一般, 主体部位未见断层^[1,7]。盐岩矿床平面形态呈肾状分布, 北东轴向, 长轴 12 km, 短轴 5.6 km, 含盐面积 60.5 km², 盐岩层埋深 800~1 200 m, 盐岩层厚度 67.85~232.29 m。盐岩层主要发育于阜宁组沉积末期(表 4), 在平面和纵向上分布都比较稳定, 最发育区域位于东北部的陈家庄一带, 其次为茅兴矿区。

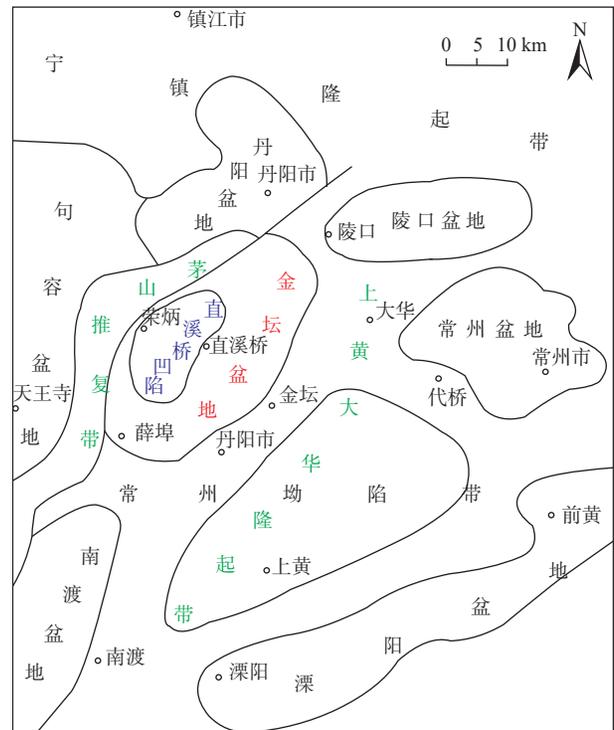


图 1 金坛盆地区域构造示意图^[7]

Fig. 1 Sketch map of Jintan Basin structure^[7]

表 4 金坛矿区地层简表^[7]

Table 4 Schematic diagram of Jintan Basin formation^[7]

地层					厚度/m
界	系	统	组	段	
新生界	第四系	全新/更新统	东台组	上段	0~79
				中下段	58~257
			三垛组	中段	0~496
				下段	
	古近系	渐新/始新统	戴南组	上段	75~319
				下段	63~340
			阜宁组	四段	54~315
				三段	33~255
				二段	51~236
				一段	41~445

3.1 二维地震勘探

二维地震勘探采用一线一炮的观测系统,震源使用 2 台 28 t 可控震源组合激发,激发参数为炮间距 10 m,扫描长度 16 s,扫描频率 10 ~ 120 Hz,震源出力 75%,2 次垂直叠加。采集为 Smartsolo 无缆系统,采集参数为:5 m 道间距、480 道接收、120 次覆盖,检波器前放增益 12 dB,采样率 1 ms,记录长度 4 s。

通过二维地震勘探,可以清晰刻画出盐层及上部一套玄武岩地层。测线经过直溪桥凹陷但未达凹陷北边界,从图中可以看出,盐层发育稳定且连续,盐层顶界面南部边缘埋深约 800 m,向北下倾最深约

920 m,并继续向测线外发育。玄武岩地层整体埋深较浅,最浅处约 100 ~ 160 m,且受一系列断层影响,地层呈阶梯状分布,北段分布较稳定,且发育一个小隆起,隆起顶约 310 m,向北下倾至 430 m 左右后保持稳定分布。测线走向与断裂带走向交角较大,测线横穿多条次生断裂,但断裂主要分布于测线南部,北部盐层未见断裂,溶蚀造腔后盐穴的密闭性强。测线中接近腔体的测点处,其叠加剖面有明显的响应,地震反射波组同相轴错断或弱化形成“蘑菇”状(图 2),其形态与前期正演模拟结果非常吻合(图 3),表明二维地震勘探可有效探测出盐穴腔体顶界面。

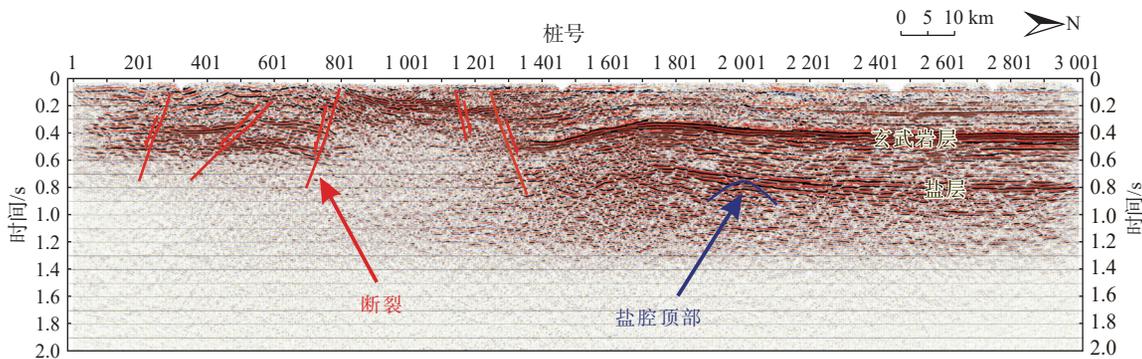


图 2 金坛盐矿区地震勘探时间剖面图

Fig. 2 Time profile of seismic survey in Jintan Mining area

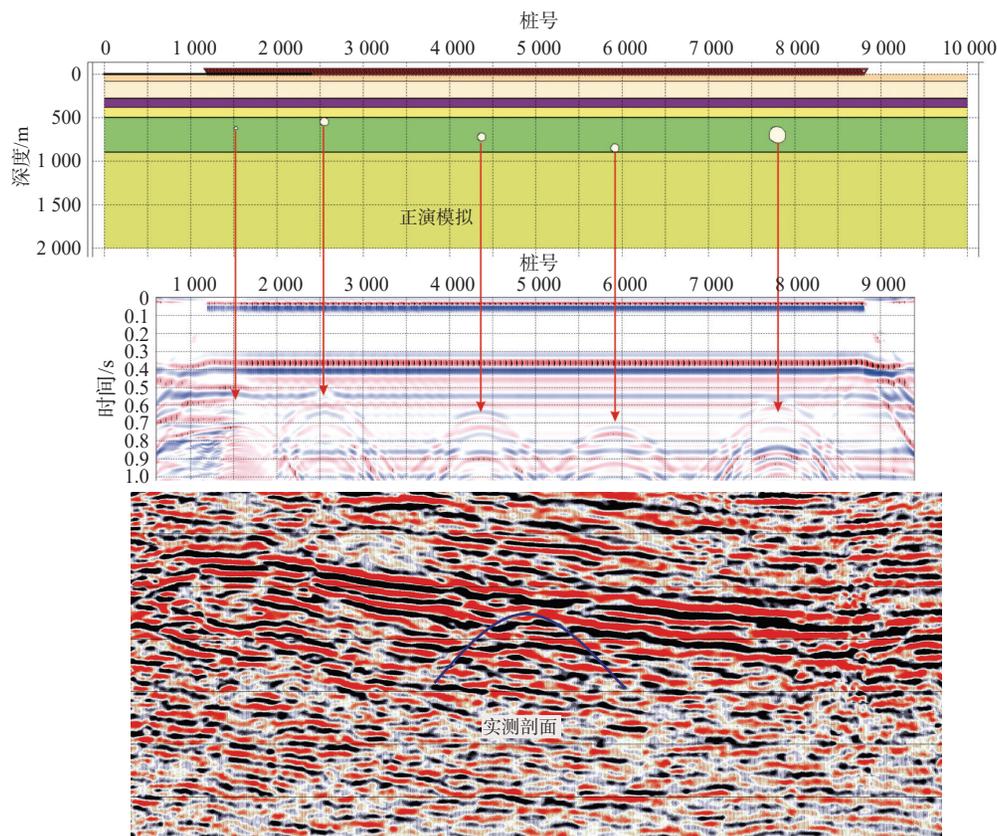


图 3 盐穴腔体弹性波正演与实测对比图

Fig. 3 Forward modeling and actual measurement of elastic wave in salt cavity

3.2 高精度重力勘探

重力观测采用单程观测法(基点—测点—基点), 仪器设备为 CG-5/6, 基点读数时间不小于 45 s, 读数 3 次, 测点读数时间为 40~60 s, 读数 3 次。

根据相对布格重力异常、重力异常水平导数及不同延拓高度的模量进行综合推断得到工作区断裂展布图(图 4)。图中有主断裂 1 条(F1), 呈北北西走向, 与重力主梯级带走向一致; 二级断裂 4 条(F2), 其中 F2-1 和 F2-2 呈南北走向, F2-3 和 F2-4 呈北东走向; 三级断裂(F3)6 条, 其中 F3-1 和 F3-2 呈南北走向, F3-3 和 F3-4 呈北东走向, F3-5 和 F3-6 呈北东东走向。从图中可以看出, 已知的盐穴基本位于断裂的旁侧, 仅 3 口井位于 F3-3 断裂上, 但 F3-3 断裂规模小。重力勘查识别出断裂横向展布特征, 为了进一步定量推断断裂的纵向埋深, 可考虑在重点地区开展其他物探工作来综合解译腔体周边断裂分布特征。

3.3 瞬变电磁法

采用 Crone PEM 瞬变电磁系统, 测量为定源回线装置, 发射电流 23A, 叠加次数 128 次, 观测时基 100 ms。

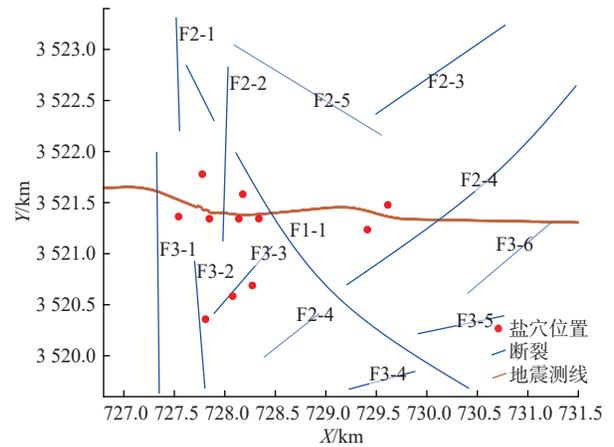


图 4 断裂推断图

Fig. 4 Interpretation map of fracture

结合该区地质资料和瞬变电磁(TEM)电阻率反演断面图(图 5)可以看出, 200 m 左右的低阻层为隔水层, 130 m 以上为含水组。根据岩心编录结果推断, 230~800 m 为泥岩, 800 m 以下为盐岩, 从右侧电阻率测井曲线可以看出, 反演的盐层顶界面与电阻率曲线高阻深度吻合, 这表明, 瞬变电磁法能客观反映地层的分

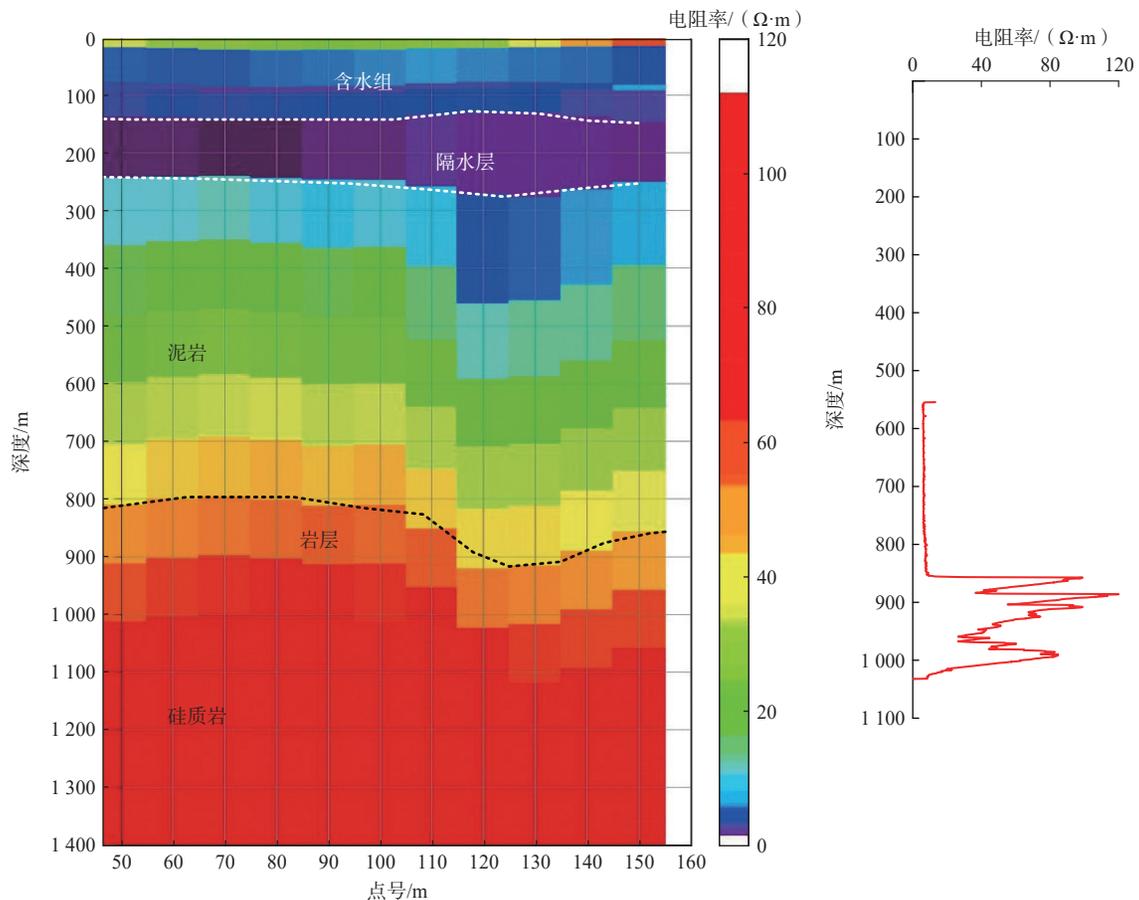


图 5 瞬变电磁电阻率反演断面

Fig. 5 Fracture section of transient electromagnetic resistivity

界面,清晰地反映含水层、隔水层与盐层顶界埋深情况。

对于盐矿区的低电阻率盖层,瞬变电磁法能够有效实现背景地层电阻率的垂向划分,能客观、真实地反映地下介质的电性变化情况,尤其在含水层、隔水层划分方面具备优势。

3.4 测井

测井采用的仪器设备为西安瑞达公司的 RD6600 型数字测井系统和英国 RG 公司 MicroLogger II 测井

系统。测井参数有自然伽马、声波时差、侧向电阻率、中子、超声成像等。通过测井曲线图(图 6)可以看出,盐层整体响应特征为低自然伽马,高电阻率,低声波时差,低铀、低钾,高中子计数率,超声成像呈暗色。

快速、准确地确定盐层工业品位,判断盐层可溶性,对盐穴储库选址具有重要的意义,本文利用自然伽马曲线与泥质含量之间的关系,建立石盐矿品位的计算公式,从而对石盐矿品位做出地质评价。

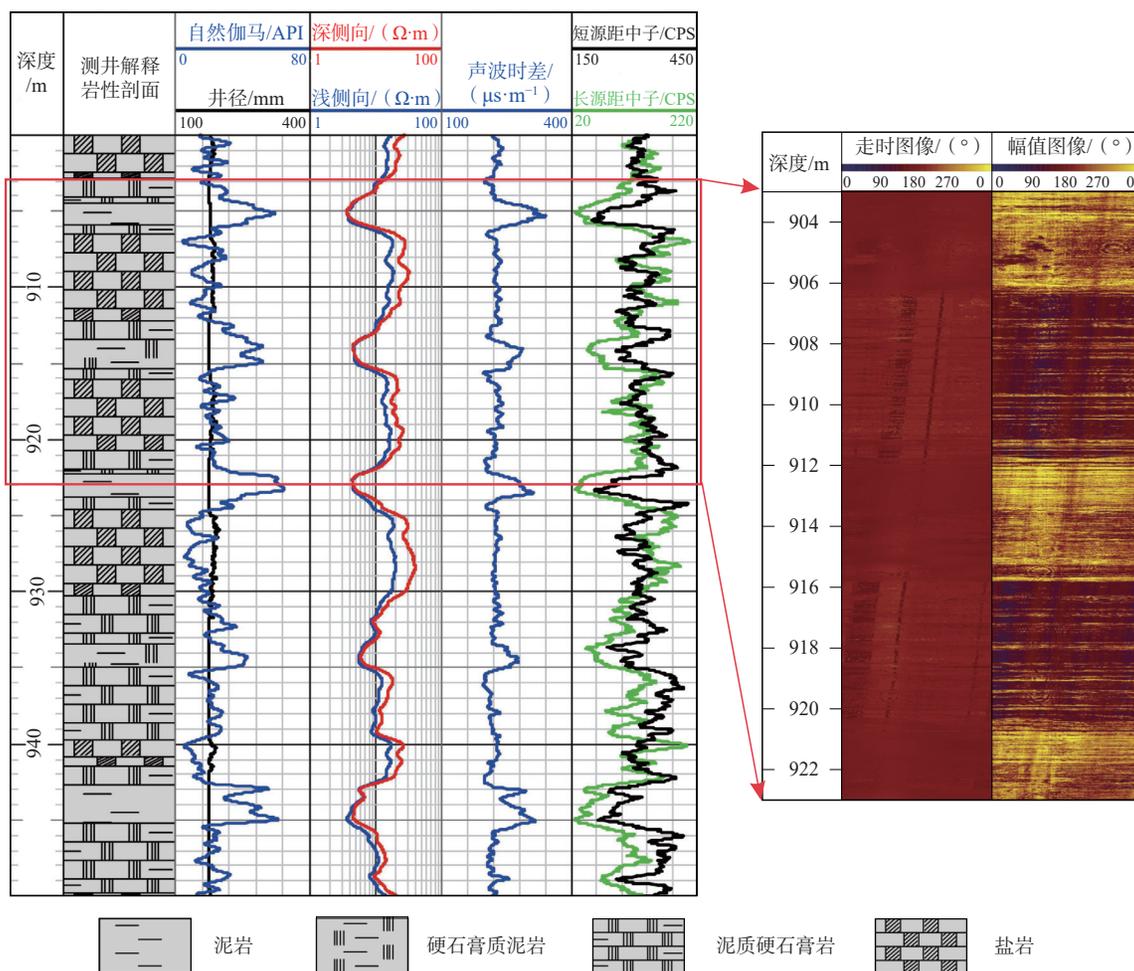


图 6 盐矿测井曲线图(左图:常规测井,右图:超声成像)

Fig. 6 Logging in salt mine (left: conventional logging, right: ultrasonic imaging)

自然伽马曲线估算石盐矿工业品位计算公式如下:

$$V_{sh} = \frac{2^{G_{CUR} \cdot SH} - 1}{2^{G_{CUR} \cdot SH} - 1} \quad (2)$$

其中:

$$SH = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (3)$$

$$V_{GR} = 1 - \frac{2^{G_{CUR} \cdot SH} - 1}{2^{G_{CUR} - 1} - 1} - \varphi \quad (4)$$

式中: V_{GR} ——自然伽马求得的石盐工业品位/%;

SH ——自然伽马相对值;

GR ——自然伽马测井值/API;

GR_{min} ——纯石盐层自然伽马值/API;

GR_{max} ——纯泥岩自然伽马值/API;

φ ——地层孔隙度/%;

V_{sh} ——泥质含量/%;

G_{CUR} ——希尔奇指数,对新地层常取 3.7,对老地层常取 2.0。

利用自然伽马曲线对金坛盐矿茅 X 井含盐地层

矿石品位进行了计算(图7),结果表明,该井14层盐层中,品位最高为93.97%,最低为83.55%,平均为92.36%。

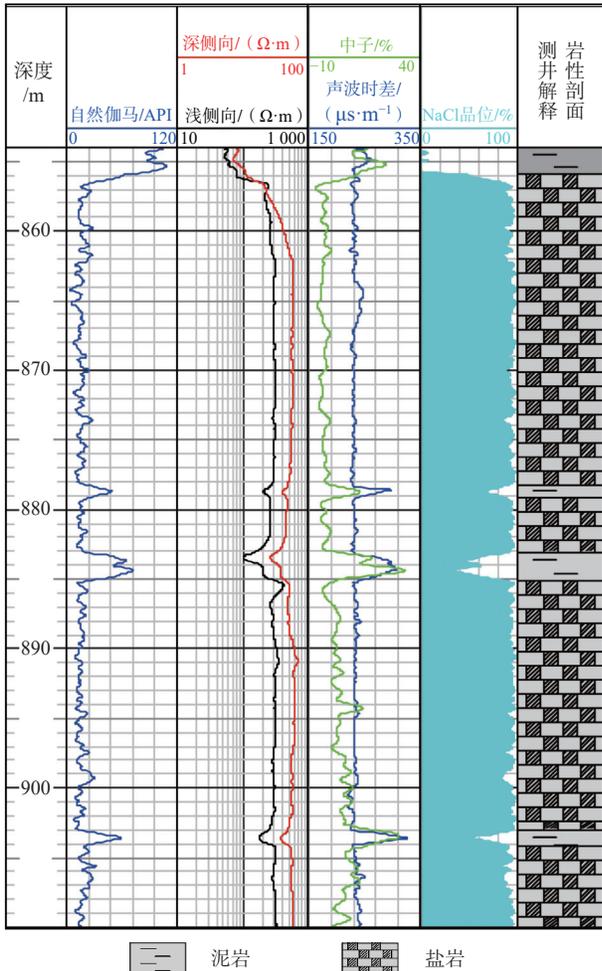


图7 金坛盐矿茅X井测井解释图

Fig. 7 Logging interpretation of X well of Jintan salt mines

总结各方法在江苏金坛盐矿区不同地质目标的调查效果,结合正演模拟和文献调研,初步形成了一套盐穴资源调查技术体系(表5):在盐盆尺度,以盐矿基础地质调查为主,主要解决区域地质构造、地表水、地下水、盐层分布等地质问题,采用的主要调查技术为地质路线调查、遥感、二维反射地震、大地电磁、重力、瞬变电磁、测井。在盐穴库址尺度,以优选建库靶区为目标,主要解决微断裂调查、含/隔水层评价、盖层评价、建库盐层选择、顶底板性质评价等地质问题,采用的主要调查技术为二/三维地震、高精度重力、瞬变电磁和测井。在盐腔尺度,以腔体探测为主,主要解决腔体识别、腔体溶蚀范围确定、腔体形态精细刻画等地质问题,采用的主要调查技术为井中声呐扫描、三维地震、井中充电法。

表5 盐穴资源调查技术体系

Table 5 Technical system of salt cavern survey

地质问题		调查方法组合
区域地质构造	地质路线调查、遥感、二维地震、大地电磁、重力	
盐盆尺度	地表水	地质路线调查、遥感
	地下水	瞬变电磁、测井
	盐层分布	二维地震、测井
微断裂调查		二/三维地震、高精度重力
盐穴库址尺度	含/隔水层评价	瞬变电磁、测井
	盖层评价	二/三维地震、测井
	建库盐层选择	二/三维地震、测井
	顶底板性质评价	二/三维地震、测井
盐腔尺度	腔体识别	三维地震
	腔体溶蚀范围确定	三维地震、井中充电法
	腔体形态精细刻画	井中声呐扫描

4 结论及建议

(1)我国盐穴资源丰富,储量大、分布广、埋深适宜,从地质角度推断优质盐穴占比高,且主要分布于经济发达但能源资源相对匮乏的中东部地区,具有开发盐穴资源用于能源存储的需求,但早期我国盐矿开采以采卤制盐为主要目的,对盐穴的规模、空间分布等未加关注,建议开展盐穴资源的精细化评价,进一步摸清我国盐穴资源现状。

(2)三维地震勘探可探测出地层信息及腔体空间展布特征,井中声呐扫描可精细刻画腔体结构(精度达厘米级),其他地球物理方法各有所长,因此多方法联合勘探可查明区域地质、盐层地质、水文地质及腔体形态等,适用于盐穴资源普查、详查的各个阶段,可实现由面到点、由粗到细的盐穴资源精细化评价,为盐穴资源开发利用提供技术支撑。

(3)随着我国“双碳”目标的提出,以及全球能源结构转型,盐穴资源利用越来越受到各国重视,因此亟待聚焦国际盐穴资源利用先进案例,依据我国盐矿区地质条件、技术水平和经济、产业结构及未来发展方向,探索出适宜我国国情的盐穴资源利用模式。

致谢: 本文研究得到中盐勘察设计研究院有限公司续培信、肖文科和中盐金坛盐化有限责任公司徐孜俊、赵云松等专家的支持和指导,在此深表感谢!

参考文献 (References) :

[1] 常小娜. 中国地下盐矿特征及盐穴建库地质评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. [CHANG Xiaona. Study on subsurface characteristics for salt deposits in china and geological eevaluation on salt cavern

- storage[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李娜娜, 赵晏强, 王同涛, 等. 趋势观察: 国际盐穴储能战略与科技发展态势分析 [J]. 资讯与观察, 2021, 36(10): 1248 - 1252. [LI Nana, ZHAO Yanqiang, WANG Tongtao, et al. Trends observation: Strategy and development of international salt cavern energy storage research, 2021, 36(10): 1248 - 1252. (in Chinese)]
- [3] 杨春和, 王同涛. 我国深地储能机遇、挑战与发展建议 [J]. 科学通报, 2023, 68(36): 4887 - 4894. [YANG Chunhe, WANG Tongtao. Opportunities, challenges, and development suggestions for deep underground energy storage in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(36): 4887 - 4894. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张博, 吕柏霖, 吴宇航, 等. 国内外盐穴储气库发展概况及趋势 [J]. 中国井矿盐, 2021, 52(1): 21 - 24. [ZHANG Bo, LV Bolin, WU Yuhang, et al. Development and trend of salt-cavern gas storage in domestic and abroad[J]. China Well and Rock Salt, 2021, 52(1): 21 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 马华兴. 国内盐穴储气库发展现状初探 [J]. 中国井矿盐, 2021, 52(6): 12 - 15. [MA Huaxing. A preliminary study on the development current situation of salt cavern gas storage in domestic[J]. China Well and Rock Salt, 2021, 52(6): 12 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 巴金红, 康延鹏, 姜海涛, 等. 国内盐穴储气库老腔利用现状及展望 [J]. 石油化工应用, 2020, 39(7): 1 - 5. [BA Jinhong, KANG Yanpeng, JIANG Haitao, et al. Present situation and prospect of the utilization of old cavity in domestic salt cavern gas storage[J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(7): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 完颜祺琪. 中国盐穴地下储气库建库地质条件评价及其对策研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [WANYAN Qiqi. Geological evaluation and countermeasure of the salt cavern of underground gas storage in china[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(9): 1729 - 1759. [YANG Chunhe, WANG Tongtao. Advance in deep underground energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(9): 1729 - 1759. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 完颜祺琪, 冉莉娜, 韩冰洁, 等. 盐穴地下储气库库址地质评价与建库区优选 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 57 - 64. [WANYAN Qiqi, RAN Lina, HAN Bingjie, et al. Study on site selection and evaluation of underground gas storage in salt cavern[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(1): 57 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 井文君, 杨春和, 李银平, 等. 基于层次分析法的盐穴储气库选址评价方法研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2683 - 2690. [JING Wenjun, YANG Chunhe, LI Yinping, et al. Research on site selection evaluation method of salt cavern gas storage with analytic hierarchy process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2683 - 2690. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郑雅丽, 邱小松, 赖欣, 等. 盐穴储气库地质体完整性管理体系 [J]. 油气储运, 2022, 41(9): 1021 - 1028. [ZHENG Yali, QIU Xiaosong, LAI Xin, et al. Integrity management system for geological body of salt-cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(9): 1021 - 1028. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘红樱, 姜月华, 杨国强, 等. 长江经济带岩盐矿特征与盐穴储库适宜性评价 [J]. 中国地质调查, 2019, 6(5): 89 - 98. [LIU Hongying, JIANG Yuehua, YANG Guoqiang, et al. Characteristics of rock salt mines and suitability evaluation of salt cave storages in Yangtze River Economic Zone[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(5): 89 - 98. (in Chinese with English abstract)]
- [13] COSKUN S, STEWART R R, BAYSAL E, et al. Optimum designs for 2-D and 3-D seismic surveys via modeling and reverse-time migration: Pierce Junction Salt Dome, Texas[J]. Surveys in Geophysics, 2021, 42(5): 1171 - 1196.
- [14] BEUTEL T, BLACK S. Salt deposits and gas cavern storage in the UK with a case study of salt exploration from Cheshire[J]. Erdoel Erdgas Kohle, 2005, 121(3): 31 - 35.
- [15] EZERSKY M, LEGCHENKO A, EPELBAUM L, et al. Overview of the geophysical studies in the Dead Sea coastal area related to evaporite Karst and recent sinkhole development[J]. International Journal of Speleology, 2017, 46(2): 277 - 302.
- [16] 耿春明. 三维地震勘探在盐岩溶腔探测中的建模及应用 [J]. 煤炭技术, 2020, 39(7): 62 - 64. [GENG

- Chunming. Modeling and application of three-dimensional seismic exploration in exploration of salt-Karst cavities[J]. Coal Technology, 2020, 39(7): 62 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王琴,徐峰,杨海军,等.地震勘探技术在金坛地区盐穴建库中的应用[J].西部探矿工程,2009,21(4):132–134. [WANG Qin, XU Feng, YANG Haijun, et al. Application of seismic prospecting technology in constructing salt cavern gas storages in Jintan[J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(4): 132 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王瑞贞,陈敬国,张朝华,等.基于地下盐穴储气库的高精度三维地震采集关键技术[J].非常规油气,2018,5(6):8–15. [WANG Ruizhen, CHEN Jingguo, ZHANG Chaohua, et al. Key technologies of high precision 3D seismic acquisition for underground salt cavern gas storage[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(6): 8 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李霖林,上官拴通,付检刚,等.VSP资料在盐穴储气库构造特征描述中的应用[J].石油地球物理勘探,2023,58(2):422–430. [LI Linlin, SHANGGUAN Shuantong, FU Jiangang, et al. Application of VSP data in describing structural characteristics of salt cavern gas storage[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(2): 422 – 430. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 王志荣,王泉更,张利民.CSAMT与CYT联合探测法在深部盐穴储气库建设中的应用[J].工程地质学报,2016,24(1):142–149. [WANG Zhirong, WANG Quangeng, ZHANG Limin. Application of both csamt and cyt electromagnetic method to detection of deep salt caves[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 142 – 149. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 徐小连,刘金涛.瞬变电磁法在地下溶腔探测中的应用——以湖北应城盐矿为例[J].人民长江,2017,48(5):56–60. [XU Xiaolian, LIU Jintao. Application of transient electromagnetic method in underground dissolved cavity detection: Case of salt mine in Yingcheng, Hubei Province[J]. Yangtze River, 2017, 48(5): 56 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李松洲.多种勘察技术在龙归硝盐矿采空区的应用研究[J].中国新技术新产品,2020(5):128–129. [LI Songzhou. Study on application of various exploration techniques in mined-out area of longgui nitrate mine[J]. New Technology & New Products of China, 2020(5): 128 – 129. (in Chinese)]
- [23] 鲁辉,王琼.盐穴地下储气库钻井地球物理测井参数选择及应用[J].中国井矿盐,2017,48(6):7–11. [LU Hui, WANG Qiong. Parameter selection and application of geophysical well logging of well drilling of underground salt cavern gas storage[J]. China Well and Rock Salt, 2017, 48(6): 7 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 完颜祺琪,丁国生,赵岩,等.盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J].天然气工业,2018,38(5):111–117. [WANYAN Qiqi, DING Guosheng, ZHAO Yan, et al. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(5): 111 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李锐敏,姜海涛,齐磊,等.盐岩地层精细测井解释方法研究[J].石油化工应用,2022,41(1):100–103. [LI Ruimin, JIANG Haitao, QI Lei, et al. Research of salt formation logging interpretation method[J]. Petrochemical Industry Application, 2022, 41(1): 100 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 齐得山,李淑平,王元刚.金坛盐穴储气库腔体偏溶特征分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(2):75–83. [QI Deshan, LI Shuping, WANG Yuangang. Characteristics of cavity differential dissolution of Jintan salt cave gas reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(2): 75 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 周冬林,焦雨佳,杜玉洁,等.水平对接采卤井腔体溶蚀形态分析[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(1):142–148. [ZHOU Donglin, JIAO Yujia, DU Yujie, et al. Morphological analysis of cavern leaching of horizontally butted wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(1): 142 – 148. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 宫丹妮,李景翠,万继方,等.多场作用下盐穴储气库腔体稳定性的数值模拟研究[J].石油科学通报,2023,8(6):787–796. [GONG Danni, LI Jingcui, WAN Jifang, et al. The numerical simulation of the stability of salt cavern gas storage considering multiple fields[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(6): 787 – 796. (in Chinese with English abstract)]