

韩佳欢,郑绵平,乜贞,等.我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景[J].盐湖研究,2024,32(2):90-100.

Han J H, Zheng M P, Nie Z, et al. Lithium and Potassium Resources of Oilfield Brine and Development Prospects in China[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(2): 90-100.

DOI: 10.12119/j.yhyj.202402012

我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景

韩佳欢¹, 郑绵平², 乜贞^{2*}, 郭廷峰³, 伍倩², 王云生², 崔政东⁴, 丁涛¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

3. 青海省地质矿产勘查开发局, 青海 西宁 810000; 4. 沈阳地震监测中心站, 辽宁 沈阳 110165)

摘要:我国已探明的钾、锂资源大多赋存于盐湖卤水矿床中,但经过多年生产地表盐湖资源消耗严重,海相地层寻找钾、锂的工作还未取得突破,深层地下卤水则可能成为解决我国锂钾资源需求的后续储备。我国深层地下卤水主要分布在柴西、四川、湖北、江西等地,资源丰富,其中富含高品位的钾、锂、硼等元素,具有很好的经济利用价值,但是目前工作程度还不够,并由于开采技术、成本等问题,还未实现工业开采。文章对我国重点区块深层地下卤水的水化学特征、分布规律等进行了总结,结合已有的深层卤水资源量评价等数据,提出了下一步重点研究的建议区块,可为后续我国深层卤水钾、锂资源评价、综合提取工艺研究等提供科技支撑。

关键词:深层地下卤水;油田水;锂资源;钾资源

中图分类号:TS322

文献标志码:A

文章编号:1008-858X(2024)02-0090-11

1 我国钾、锂资源现状

1.1 我国钾资源现状

作为一个农业大国,我国对钾肥的需求比较大。钾盐包括氯化钾、硫酸钾以及硫酸钾镁等,其 95% 被用于肥料,是植物、动物以及人类的必需营养素。目前没有发现可以替代的元素,剩余的 5% 则用于工业原料。世界范围内的钾资源储量非常丰富,但分布不均匀,主要集中在加拿大、俄罗斯、白俄罗斯、德国等少数几个国家。据 2021 年美国地质调查局统计数据(<https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>),世界钾资源总量约 $2\,500 \times 10^8$ t,已探明可开采储量超过 36×10^8 t(K_2O 当量计),我国可开采储量 3.5×10^8 t,位居全球第四,仅占世界的 9%。2021 年消费量 $4\,500 \times 10^4$ t,产量 $6\,230 \times 10^4$ t。亚洲和南美洲为主要消费地区,预计 2024 年全球钾盐产能增加到 $6\,900 \times 10^4$ t。表 1 是 2017—2021 年全球以及我国钾盐矿山产量和储量的数据。

根据中国钾盐网(KCl 计)的数据,我国钾盐产量虽然每年增加,但是仅有供应量的一半,仍有将近 50% 依靠进口,对外依存度从 2017 年的 51% 增加到 2020 年的 55%,并且还要受制于其他国家的对华政策。因此,钾矿被列为我国最紧缺矿产资源之一,我国要加大钾肥自给能力,发现并利用新资源,提高钾

表 1 2017—2021 年全球以及我国钾盐矿山产量以及储量
(K_2O 当量计,单位: $\times 10^4$ t)

Table 1 Global and chinese potashmine production and reserves in 2017—2021

	可开采储量		矿山产量	
	全球	中国	全球	中国
2017 年	390 000	36 000	4 140	551
2018 年	580 000	35 000	4 330	500
2019 年	>360 000	35 000	4 130	500
2020 年	>370 000	35 000	4 400	600
2021 年	>350 000	35 000	4 600	600

收稿日期:2022-09-01;修回日期:2022-10-24

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U20A20148, U21A2017);中国地质调查项目(DD20221913)

作者简介:韩佳欢(1996-),女,博士研究生,主要研究方向:盐湖资源综合利用。Email:1241376616@qq.com。

通讯作者:乜贞(1972-),男,研究员,主要从事盐湖资源综合利用的研究工作。Email:nieezhen518@163.com。

资源的保障能力。

我国找钾目前有三个方向:一是盐湖卤水,以青海柴达木盆地以及新疆罗布泊区域的盐湖地表卤水为主,多年来开展工业利用,盐湖工业应用技术成熟,开采潜力小,同时钾盐产量较国家需求供应不足;二是海相地层找钾,工作任务艰巨、难度大,到目前为止尚未取得突破性进展;三是深层地下卤水,也就是从油气田水中找钾,油气田盆地内卤水富含高品位的钾,且近年来已经取得丰硕的成果,在柴达木、四川、江汉及塔里木盆地等地均有所获。因此,油气田水钾矿是解决我国钾资源燃眉之急的最有效方法^[1]。

1.2 我国锂资源现状

锂是 21 世纪的新能源,也是市场需求增长最快的高科技金属之一。近年来,从消费领域来看,锂产品主要应用于充电电器锂电池、玻璃陶瓷、润滑脂、医药、空气处理、航空航天以及可控核聚变等领域,一直是行业关注的热点^[2]。根据美国地质调查局 2017—2021 年锂产品消费的占比数据显示,在锂的行业应用中,电池领域的锂需求比非电池领域要多。在电池领域,随着各国对电动自行车、新能源汽车、手机通讯以及电子计算机等设备的需求的增加,锂的需求也逐年增加,锂电池消费份额从 56% 增加至 74%。预计未来我国锂需求的增加主要源于锂电产业,而新能源汽车更是未来锂消费增加的主要领域。

全球锂资源十分丰富,已查明富含锂矿的国家就有 20 多个,包括智利、玻利维亚、中国、澳大利亚

等^[3]。根据美国地质调查局数据,2021 年全球已查明的锂资源量约为 $8\,900 \times 10^4 \text{ t}$,储量约 $1\,700 \times 10^4 \text{ t}$ (以金属锂当量计)。全球卤水锂主要分布在南美锂三角以及我国的青藏高原。经调查,全球锂盐生产主要靠卤水锂和矿石锂两种原料。综合对比,卤水锂资源储量大,且提锂技术能耗低,成本低,回收率高。因此,卤水提锂是未来锂矿的开发趋势。

我国卤水锂资源分布广泛,资源储量大,表 2 是近年来我国锂资源量的数据。我国锂资源大部分来自于国内的卤水和硬岩矿山,主要是从西藏和青海的含锂盐湖卤水中生产碳酸锂、氯化锂和氢氧化锂等,矿石锂生产大部分依赖进口锂辉石。我国盐湖产锂虽然技术相对成熟,但是青海盐湖卤水多数镁锂比高,分离难度大,开发程度低,产量不够(2018 年,察尔汗盐湖产能 $1 \times 10^4 \text{ t}$,西台吉乃尔 $0.5 \times 10^4 \text{ t}$,东台吉乃尔 $1 \times 10^4 \text{ t}$,扎布耶 5 000 t,一里坪预计 $1 \times 10^4 \text{ t}$);而我国矿石提锂技术成熟,但由于其地理环境差,开采成本高,且 2018 年以后我国基本停产矿石锂^[5];盐湖卤水提锂和矿石提锂的现状导致我国现有锂资源提取难度整体较高,多数依靠进口锂矿原材料。早在 20 世纪 70 年代,我国对地下卤水有用组分资源量以及经济效益进行了评价工作,发现在我国存在着拥有丰富资源的深层地下卤水,其资源储量巨大,卤水品位高,矿化度高,富含钾、锂、硼、溴等多种元素,但是由于技术、设备等条件限制,导致其无法进行开采利用。因此,为了解决我国长期依赖进口锂资源的现状,需尤为重视深层地下卤水提锂的开发及前景。

表 2 我国锂资源量数据
Table 2 Lithium resources data of China

年份	锂资源量	锂储量	数据来源
2014	714	383	中国有色金属工业协会
2015	卤水锂矿 388.9, 矿石锂 152.1		[4]
2016	961.46	456.17	[2]
2017		967.38(氧化物)	中国矿产资源报告
2018		1 092.0(氧化物)	中国矿产资源报告
2020		234.47(氧化物)	中国矿产资源报告
2021		404.68(氧化物)	中国矿产资源报告

2 我国深层卤水的分布

卤水是一种高矿化度水,按其埋藏深度分为地表和地下卤水。地表卤水(盐湖)存在于地表不深的含卤层中,甚至会出露地表,形成条件取决于自然地

理条件和气候特点。地下卤水则是埋藏于地下数百米至数千米的高矿化度的水,包括与古生盐矿有关的卤水和晶间卤水,以及与油气伴生赋存于深部的油田水,其具有封闭性,形成条件取决于古地质构造、古气候和水文地质条件等。表 3 是世界上目前

表 3 世界上部分已知地下卤水的成分特征及水化学数据^[6]

Table 3 The composition characteristics and water chemistry data of known underground brine in the world										mg·L ⁻¹
卤水名称	水化学类型	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	B ₂ O ₃	Br ⁻	Li ⁺
中国柴达木盆地油田水	氯化物型	11 140	4 542	12 888	13 902	1 732		1 773	107	151
中国四川盆地气田水		92 200	52 000	4 280	19 870	1 912	88	12 672	2 590	73
美国 Arkansas 油田水		64 200	11 100	44 600	20 270	234		800	5 440	382
美国 Texas 油田水		69 300	6 930	28 300	17 070	123		692	2 370	80
美国 Missisibi 油田水		55 200	7 560	45 200	18 550	95		534	2 100	48
俄罗斯 Udachinaya 油田水		12 908	15 656	61 202	17 909	44			4 910	493
俄罗斯 Kuturminsk 油田水		8 764	19 843	96 021	16 169	43			4 252	291
俄罗斯 Balaganskaya 油田水		2 775	15 141	11 988	20 578	27			5 135	318
伊朗 Marun 油田水		71 000	1 600	19 900	15 570			374	980	11.8

已知的地下卤水的成分特征。

我国地下卤水根据其储卤层的埋藏深度可以分为浅层地下卤水(<100 m)和深层地下卤水(>100 m)^[7]。深层地下卤水多处于封闭、埋藏深的环境,并且深层卤水资源具有天然补给和开采动态呈衰减型的资源特性,因此要实现资源综合利用的同时还要考虑技术、经济条件以及生态环境的影响^[8]。深层地下卤水富含高浓度的 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、CO₃²⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻和 Cl⁻等离子以及不同浓度的 I、Li、B、Fe 和 F 等部分微量元素。根据柴达木盆地深层卤水区域研究,深层卤水又可分为构造裂隙孔隙卤水(油田卤水)、化学类晶间卤水以及“砂砾型”孔隙卤水。构造裂隙孔隙卤水深度在 2 000 m 以下,水化学类型为氯化钙型,矿化度高,卤水层分布不均匀,富含 K、Na、B、Li、Br 等,LiCl 含量 230~255 mg/L;化学盐类晶间卤水一般赋存于盐类化学沉积物中,埋藏深度不等;卤水矿化度高,钠镁含量高,硼溴碘锂等微量元素含量较低,属硫酸镁亚型;“砂砾型”孔隙卤赋存于山前冲洪积物中,埋深可达 1 000 m 以下,钾含量高,硼锂溴碘含量低,但高于化学盐类晶间卤水,属卤化物型^[9]。

我国地下卤水资源丰富,开发历史悠久,但对于深层地下卤水的综合开发利用研究不足。主要分布在柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地、吉泰盆地以及塔里木盆地等区域,且每个地区的深层卤水特征不同(见表 4)。

除表 4 数据之外,据调查统计,钾资源在河北冀中平原区第三系地下卤水也有赋存,埋藏深度为 2 500~3 000 m,预测卤水资源分布面积约 1 670 km²,KCl 含量 2.86%~3.52%,超过钾最低工业品位≥0.5%~1%。锂资源除上述数据外,我国塔里木盆地区域的 120 个油田卤水 Li 含量在 2~10 mg/L 之间,锂资源整体含量不高,仅有极少数油田水达到开采;松辽盆

地扶余油田 1982 年查明锂含量 1.35 mg/L;1986 年南襄盆地查明油田水中锂含量在 0.07~3.47 mg/L 之间;2001 年河北任丘油田锂含量 4.7 mg/L;2012 年鄂尔多斯盆地靖边气田锂 23 mg/L;2015 年珠江口盆地的坳陷和隆起区域的油田水锂含量 0.79~7.01 mg/L^[13]。这些区域的调查研究较早,但是锂相对较低,达不到综合利用开采品位,不具备经济利用价值。

表 4 我国油田卤水锂、钾含量数据(平均值)

Table 4 Lithium and potassium content data of China oilfield brine				mg·L ⁻¹
地区	钾离子含量	锂离子含量	数据来源	
柴达木盆地	1 048	151	[6]	
吉泰盆地		100	[11]	
四川盆地	18 864	73	[6]	
江汉盆地	7 215	58.9	[12]	
塔里木盆地	233	2-10	[13]	

注:表中钾离子数据来源穆延宗等,2016。

因此对于我国钾、锂含量相对较高、卤水储量丰富的柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地以及江西吉泰盆地区域的油田卤水,应加大资源综合开采利用,为我国后续所需的大量锂资源产品提供原材料。

2.1 柴达木盆地深层地下卤水

位于我国西部的柴达木盆地,是封闭的山间断陷盆地。盆地内能源资源极为丰富,现已探明矿点两百多处,矿产类型五十余种,盆地内储油构造广布,西部有重要油气聚集带。除油气资源很丰富外,盐类矿产在柴达木盆地中的储量是最为丰富的^[14]。其西部有着丰富的第三系地下卤水资源,既有与石油、天然气共生的油田卤水,也有砂卵砾石型地下卤水,都富含储量巨大的钾及硼、锂资源,具有广阔的

综合开发利用前景。柴达木盆地由于印支期和燕山期形成的中酸性火山岩等岩石,经过长时间的风化淋滤作用,是K、B、Ca、Na、Li等元素进入水中富集,又由于火山活动形成的地热水将元素带入地下卤水中,由此蒸发形成富锂的深层地下卤水^[11],同时也与油气共伴生,称之为油田水。柴西区域的油田水主要集中在大浪滩、黑北凹地、小梁山、南翼山、开特米里克、油泉子、油墩子、狮子沟等构造中(图1)。

根据2006年直至现今所有学者对柴达木盆地油田卤水井位的取样分析数据,包括南翼山、油墩子、开特米里克、油泉子、花土沟、黑北凹地、涩北、尖顶山、大风山-小梁山、扎哈泉、七个泉等多个区域在内的钻井取样分析,发现柴西地区钾、锂的含量分布不均,即使同一地区,不同井位元素含量也有较大差

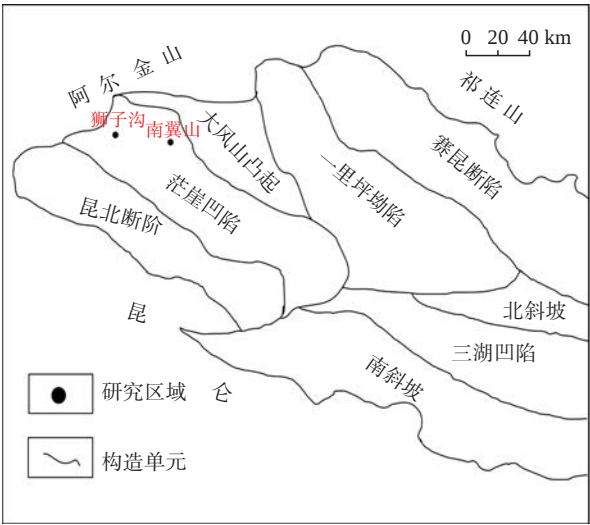


图1 柴西油田卤水区域图(改编自文献[14])
Fig. 1 Chaixi Oilfield brine area map

表5 柴西部分油田卤水水化学数据
Table 5 Brine water chemical data of some oil fields in western Qaidam basin g·L⁻¹

井位	海拔/层位	水化学类型	Li ⁺ /(mg·L ⁻¹)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	B ₂ O ₃	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Br ⁻ /(mg·L ⁻¹)	数据来源
南7-2#	2 795 m	氯化钙	180	4.21	105.71	12.92	2.48	2.82	0.66	194.44	80	[15]
南翼山	2 797 m	氯化钙	1 890	43.04	15.04	117.91	7.78	12.81	0.03	296.96	540	[15]
南翼山	2 797 m	氯化钙	1 120	35.75	44.84	69.10	5.05	10.73	0.16	237.73	280	[15]
南5		氯化钙	200	7.48	78.5	14.12	0.4	2.577	0.4	161.8		[16]
南6		氯化钙	253	7.52	85.68	15.86	1.09	2.246	0.22	169	46	[17]
南2-3		氯化钙	254	7.66	84.92	15.75	1.38	2.54	0.32	170.3	51	[17]
南13		氯化钙	230	5.21	87.58	14.73	1.49	2.531	0.27	172.2		[17]
南V9-2		氯化钙	224	12.05	71.14	18.37	2.18	3.54	2.37	166.59	99	[10]
南13井		氯化钙	238	5.27	89.02	15.03	1.47	2.49		174.58	38	[10]
翼坪1			123	5.17	54.9	8.94	0.958	4.55	1.104			2019自测
狮28井	E ₃ ¹ /4 068-4 153	硫酸钠	133	5.78	117.00	0.49	0.00	4.7	8.80	176.18	63	[10]
狮221	E ₃ g ²		1.3	7.08	93.5	0.117	0.118	8.18	52.2			2019自测
狮49H4	E ₃ g ²		149	3.52	58.3		0.111	6.70	12.24			2019自测
狮49H4-1-512	E ₃ g ²		130	3.63	70.3	0.598	0.11	6.33	15.03			2019自测
狮23-1			4.69	1.9	57.18	0.25	0.10	9.53	13.8			2019自测
狮新28			27.18	1.49	49.91	0.68	0.29	7.99	0.96			2019自测
狮20			77.5	4.66	121.10	0.50	0.09	32.39	7.89			2019自测
狮32-3			88.5	5.01	98.43	0.46	0.12	37.16	3.915			2019自测
狮47			88	7.02	98.35	0.56	0.09	27.95	7.755			2019自测
油墩子	2 792 m	氯化钙	20	2.5	117.77	4.84	0.84	1.56	1.34	192.2	60	[15]
开1#	2 780 m		40	0.18	124.27	2.25	1.68	0.61	4.08	81.39	100	[15]
油54#	2 902 m		90	0.75	178.31	13.29	2.54	0.67	0.23	179.32	0	[15]
花ZK-5034#	2 974 m		0	0.30	68.48	6.51	1.30	0.81	0.57	129.99	0	[15]
咸新6井	N ₁ /700-950	氯化钙	36	0.41	74.92	1.47	0.76	2.84	0.00	118.99	84.6	[10]
扎209井	N ₁ /3 575-3 584	硫酸钠	12.4	0.96	44.02	0.99	0.03	2.13	3.51	67.79	57	[10]
尖II3-7	N ₂ ¹ /200-600	氯化钙	102	0.83	78.85	7.26	2.66	1.544	0.02	142.85	36.05	[10]
七7-13	E ₃ ¹ /1 276.6-1 323	重碳酸钠	8	0.42	75.73	0.12	0.00	1.14	4.63	107.72	67.2	[10]
砂102井	E ₃ ¹ /3 912-3 922	氯化钙	23.6	1.23	39.5	4.34	0.62	0.807	0.90	73.35	34.2	[10]
砂102井	N ₂ ¹ /2 336-2 339	氯化镁	7	1.10	195.90	0.96	11.89	0.399	4.91	61.49	20.3	[10]
油3-68井	N ₂ ¹ /200-600	氯化钙	194	1.84	91.44	12.39	4.52	2.157	0.06	179.98	79	[10]
S29-3	1 229.4-1 238	氯化镁	91	0.947	13.66	0.737	4.25	0.316	4.01	32.52	17	[10]
风27-5-3	N ₂ ² /958-1 124	氯化钙	89	0.901	64.668	3.494	0.756	1.99	0.57	107.736	48	[10]
风5-5	N ₂ ² /866-959	氯化钙	71	0.761	65.157	2.73	0.798	1.867	0.377	107.267	56	[10]
风3-6		氯化钙	87	0.994	64.94	3.81	0.918	1.79	0.896	104.05	69	[10]

注:自测数据出自于自然资源部掩护与环境重点实验室,ICPS-7510

表 6 柴西地区深层地下卤水特征对比

Table 6 Comparison of characteristics of deep underground brine in western qaidam region			
地区	Li ⁺ [(10)]/(mg·L ⁻¹)	K ⁺ [(13)]/(g·L ⁻¹)	基本特征
南翼山	72 ~ 180 最高 237.5	0.92 ~ 7.88	矿化度高, 118.2 ~ 287.9 g/L, 构造裂隙孔隙卤水, 埋深 2 000 ~ 3 000 m, 氯化物型, 高溴、钾、钙、锂, 贫镁, 钾含量最高, 920 ~ 7 880 mg/L, 锂含量最高, 潜在资源量 691.06 × 10 ⁸ m ³ , KCl 0.66 × 10 ⁸ t, 有提锂工艺和综合开发利用路线
狮子沟	50 ~ 300		矿化度高, 构造裂隙孔隙卤水, 硫酸盐型, 埋深 2 000 ~ 3 000 m, 狮子沟仅处于资源量评价阶段
油墩子	3.16 ~ 4.87	0.324 ~ 0.598	矿化度高, 钾、硼含量最低, 锂离子含量未达工业开采品位
小梁山	0.67 ~ 3.84		矿化度低, 锂离子含量未达工业开采品位
大风山	33.2	0.76	矿化度低, 钾含量较高, 760 mg/L, 硼其次, 1 490 mg/L, 锂离子超边界品位, 未达工业开采品位
大浪滩、黑北 凹地向斜			“砂砾型”孔隙卤水, 氯化物型, 高钠、低硫酸、低硼、低锂, 化学成分单一, 仅 KCl、NaCl 达到工业开采品位, 易于开采
柴西向斜 凹地和断 陷凹地			化学盐类晶间卤水, 硫酸镁型, NaCl、MgSO ₄ 含量高, B、Li、Br、I 含量低, 开采难度大, 不易于开发利用

异。钾、锂含量南翼山地区最高, 锂含量其次为狮子沟地区, 大风山、尖顶山、油砂山等地区不同井位含量同样相差较大, 高者可接 200 mg/L, 低者近乎 0, 咸水泉、扎哈泉含量少且不同井位含量分布稳定, 小梁山也有一定含量的锂, 除此之外其它地区含量甚少^[1]。钾含量其次为油墩子、大风山、黑北凹地等, 其他区域含量较少。最终得出柴西地区南翼山区域钻井的钾、锂以及狮子沟背斜区域钻井的油田卤水中锂含量较高, 并达到工业开采品位, 应该进一步对钾、锂离子含量高的井位进行资源量的评估, 并开始进行卤水资源的综合利用。表 7 是盐湖卤水资源工业开采品位的数据。

表 7 盐湖卤水工业品位标准

Table 7 Industrial grade standard of Salt Lake brine				
标准	钾/(g·L ⁻¹)	Li ⁺ /(mg·L ⁻¹)	LiCl/(mg·L ⁻¹)	数据来源
工业品位	0.5% ~ 1%	50	300	2012 矿产资源
边界品位	1.5	25	150	工业要求手册编委会

1) 南翼山油田水

位于柴达木盆地西部的南翼山背斜构造, 卤水类型为构造裂隙孔隙卤水, 埋于地下 2 000 m 以下, 该区油田卤水为钾、硼、锂、碘的资源富集区, 水化学类型以苏林分类属氯化钙型, 主要特点为高矿化度、高钙、低镁和低硫酸根, 经过蒸发结晶能够得到钾盐产品和锂、硼、碘等多元素富集的卤水, 且钾含量达工业品位以及锂、硼等微量元素均达到最低工业品

位, 溴和碘含量达到综合利用指标, 具有极大的综合利用价值。

根据现有数据整理, 南翼山钾、锂含量普遍高, 锂资源除了南 105、南浅 23-17、南浅 II 12-10 之外的钻井, 锂离子含量均达到工业开采品位; 钾离子除南 V6-1、南浅 1-07-1、南浅 7-013、南浅 23-18 等钻井外, 钾离子均超过综合开采品位, 且油田卤水中富含多种元素, 具有很高的综合利用价值; 除南浅 23-17 卤水为硫酸钠型外, 其余均为氯化钙型卤水, 卤水分布层位多位于 N₂、N₂¹; 但是钾、锂含量较高、品质好的卤水分布于 2 000 ~ 3 000 m 之间。

2000—2002 年, 青海省地质调查院估算出了柴西地区油田水潜在油田水资源量为 691.06 × 10⁸ m³, 其中钾、硼、锂、碘的 334 资源量, 分别为: KCl: 11.3 × 10⁸ t, B₂O₃: 4.05 × 10⁸ t, LiCl: 1.21 × 10⁸ t, I: 488 × 10⁴ t^[14]; 针对南翼山油田水的研究, 2000—2004 年进行了采油自喷井卤水野外蒸发实验, 得到结晶析盐规律^[18]; 2011 年青海油田第一支钾盐试采队伍成立, 并投入到南翼山油田水提取钾盐的先导性试验中; 2012 年起, 进行连续 24 个月的盐田制卤和抽取钾混盐中试试验, 制定了南翼山盐田试验的控制参数^[14]; 2013 年进行了南翼山部分钻井卤水室内外蒸发实验, 选择了区域内 17 口老井, 优选出南 13、14、6#优质油田水, 钾含量 5.3 ~ 7.8 g/L, 采用容积法估算 E₃² 地层含水量 9 396 × 10⁴ m³, 同时在南翼山建立中试盐田, 选用南 13 井的卤水; 2015 年青海省科技支撑计划项目

表8 南翼山油田水水化学分析数据^[10]

Table 8 Water chemical analysis data of Nanyishan oilfieldm

g·L⁻¹

井位	层位/深度	矿化度	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B ₂ O ₃	Br ⁻ /(mg·L ⁻¹)	I ⁻	Li ⁺ /(mg·L ⁻¹)	Rb	Cs
南V6-1	N ₂ ¹ /1 439.1-1 688	235.18	84.406	0.070 5	5.016	1.038	141.461	0.797	2.274	48		70.4	0.000 68	0
南浅1-07-1	N ₂ ¹ /1 460.7-1 868.2	199.58	71.983	0.051	3.927	0.771	118.769	1.53	2.45	47		51	0.001 3	0
南浅7-013	N ₂ ² /876-1 435.8	250.36	82.267	0.153	10.751	0.740	152.4	0.756	2.703	62		153	0.009 2	0.005 1
南浅23-18	N ₂ ² /1 336.5-1 436.4	202.62	74.017	0.056	3.464	0.572	120.459	1.275	2.658	62		55.8	0.001 1	0
浅5-10		216.48	71.780	1.6	7.44	1.23	131.27	0.721	2.23	64	0.025	106	0.009 2	0.008 4
南6井		292.65	85.85	6.84	18.02	0.918	174.49	3.66	2.16	55	0.035	217	0.065	0.036
南105	N ₂ ² /2 380-2 390	232.93	75.55	2.87	8.29	0.699	139.03	3.47	2.77	80	0.026	105	0.026	0.018
南105	N ₂ ¹ /2 249.6-2 254.8	245.85	80.41	2.1	10.21	1.1	146.53	2.85	2.4	69	0.027	129	0.012	0.013
南105	N ₂ ¹ /1 332.4-1 333.9	252.24	83.32	1.92	10.46	1.1	150.28	2.52	2.38	72	0.028	131	0.016	0.014
南105	N ₂ ¹ /2 380-2 390	248.46	81.46	2.13	10.3	1.09	148.27	2.54	2.41	72	0.028	128	0.018	0.015
南浅23-17		205.83	78.47	6.43	2.09	0.315	118.62	3.23	2.34	93	0.021	9	0.002	<0.000 5
南V9-2		276.70	71.14	12.05	18.37	2.18	166.59	2.37	3.54	99	0.031	224	0.071	0.039
南浅II12-10		264.32	82.22	1.88	11.77	2.4	162.23	1.63	1.92	66	0.03	158	0.014	0.003

使用蒸发-冷冻联合法,预计在南翼山油田建成万吨级油田水资源综合利用一体化生产线,初步建成年产氯化钾 100×10^4 t、硼酸 8×10^4 t、碳酸锂 2×10^4 t、碳酸铯 5×10^4 t、溴 100 t、碘 1 000 t 的生产规模^[13]; 2016 年中国地质科学院对南翼山地区多个井位取样进行化学分析,研究南 13 井的成盐元素规律;2018 年根据室内及野外盐田等结果,中国地质科学院盐湖中心拟定了南翼山油田水综合利用工艺。通过自然蒸发得到浓缩老卤溶液,除去 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子后,加碳酸钠沉淀后得到含碳酸锂 98.34% 的合格产品^[10]。该方法基于国内多数盐湖卤水的开采工艺,经改进后在柴达木盆地油田卤水提钾、锂研究中获得成效,且同时获得钾(热溶冷结晶法)、硼(浮选及热溶冷结晶

法)、碘(离子交换树脂吸附法)产品。目前已初步加工出氯化钾、硼酸和碳酸锂等矿产品,具有成本低、收益高、工艺简单等特点。

2) 狮子沟深层卤水

柴西狮子沟背斜构造位于柴西隆起的茫崖凹陷内,该构造区内与油气共生的新近系深部卤水的研究程度尚浅。前人以“青海省茫崖狮子沟地区深层卤水钾盐资源调查评价项目”为依托,对狮子沟背斜构造区深部卤水的水化学特征及演化过程进行了调查研究。研究表明,该区域深层卤水具有高 B、Li、Ca、Sr,低 Mg 的特点,该地区深层卤水水化学类型由外到内依次为碳酸钠型、硫酸钠型和氯化钙型^[19]。

表9 狮子沟油田水水化学分析数据^[10]

Table 9 Water chemical analysis data of Shizigou oilfieldm

g·L⁻¹

井位	水化学类型	矿化度	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	B ₂ O ₃	Br ⁻ /(mg·L ⁻¹)	I ⁻	Li ⁺ /(mg·L ⁻¹)	Rb	Cs
狮子沟	硫酸钠	265.16	97.576	5.63	0.183	0.019 7	148.40	9.631	3.665	39		0.6	0.015	0.002 4
狮子沟	氯化钙	322.93	119.246	6.386	0.329	0.036	184.155	6.812	5.717	35.3		179	0.021	0.014
狮37井	重碳酸钠	352.89	134.9	2.06	0.267	<0.001 3	176.71	36.63	2.22	70	0.013 3	<0.1	0.013 2	0.003
狮37井	硫酸钠	326.12	121.4	0.947	0.627	<0.001 3	182.99	19.6	0.547	<5	0.002 5	<0.1	0.006 3	0.001 1
狮40井	硫酸钠	324.71	120.6	5.03	0.452	<0.001 3	180.2	14.78	3.39	<5	0.035 5	102	0.062 8	0.055 8
狮深8井	氯化钠	221.72	83.31	0.247	2.25	0.415	130.57	4.04	0.754	107	0.024 7	1.7	0.001 4	<0.000 5
狮24井	硫酸钠	331.97	122.9	6.85	0.333	<0.001 3	183.16	14.71	3.83	80	0.020	1.4	0.073	0.012
狮28井	硫酸钠	313.31	117	5.78	0.486	<0.001 3	176.18	8.8	4.7	63	0.028	133	0.083	0.059

狮子沟背斜地区整体来说,锂资源储量丰富,单井水量大,各成矿元素分布广并且含量高,但是不同井位元素含量却有较大差距,锂分布不均匀,目前已查明的井位有狮 40 井、狮 28 井、狮 49H4 井的锂达到工业开采品位,下一阶段应对狮子沟区域整体的油田卤水井位进行检测,需要有一个整体的方案。

狮子沟背斜构造东南部是 K、B、Li、I 资源的成

矿远景区,其深部岩盐层构造第三系地层油田卤水以钾硼锂碘资源为主,含水层地层年代为第三系渐新统下干柴沟组上段(E_3g^2)。2019 年对狮子沟第三系油田卤水进行了资源估算, E_3g^2 层卤水 334 资源量为 KCl: 135 807.49 t, B_2O_3 : 37 277.94 t, LiCl: 1 864.70 t, I: 172.98 t。对整个远景区资源量进行了一个预测, KCl: 1.55×10^6 t, B_2O_3 : 7.98×10^5 t, Br: 5 731.34 t,

I:11 738 t^[20]。

目前为止,对狮子沟背斜构造区都是处于调查评估阶段,通过对各类大量资料的整理统计分析,大致查明了远景区内钾、硼、锂、碘、溴资源的时空分布,矿床形态、规模,证实了资源的确存在,并且已达到工业开采品位,因此下一阶段应对狮子沟区域的深层卤水进行进一步的采样,并初步开展野外、室内蒸发实验以及提锂实验,研究该区地下卤水资源综合利用的提取工艺。

3) 大浪滩-黑北凹地深层卤水

2010—2013年,中国地质科学院矿产资源研究所联合青海省柴达木综合地质矿产勘查院在柴西大浪滩、黑北凹地发现了厚层的承压孔隙含钾卤水。经初步估算,新增液体 KCl(334)资源量 1.0×10^9 t^[14]。在此基础上,又进行了柴西区域深部卤水找钾工作,随后在大浪滩、昆特依2个矿区,新发现平均厚度 581.74 ~ 681.11 m 的“砂砾型”孔隙卤水矿层,卤水中氯化钾平均品位为 0.30% ~ 0.48%,单井涌水量最高超过 6 000 m³/t。

大浪滩、黑北凹地为向斜构造,卤水属于砂砾石层孔隙卤水,水化学类型为氯化物型,矿化度较高,一般在 280 ~ 300 g/L, KCl 品位一般在 0.30% 以上,化学成分单一,仅 KCl、NaCl 在边界品位或者工业品位以上,在抽卤中不易结盐,易于开采。2018年中国地质科学院专家学者对该区卤水进行了野外以及室内蒸发实验,获得卤水盐类析出顺序、结晶路线以及元素富集规律。蒸发试验发现,该含钾卤水盐类矿物组合比较简单,这为将来生产提取工艺带来便利。但氯化钠结晶周期长,也使得有益组分钾的收率较低。如何缩短石盐析出时间、提高钾盐收率是该地卤水利用的关键问题。目前,该地区正在进行卤水野外盐田试验,以期获得高品质浓缩卤水,掌握盐田制卤工艺参数,探索混盐中矿物的分离提取技术。

2.2 四川盆地深层地下卤水

四川盆地是我国的四大盆地之一,是一个大型自流盆地,地处我国西南部,周围是连结的山脉环绕而成,属于亚热带季风性湿润气候,冬天和春天比较干旱,夏季和秋季多雨。盆地内矿产资源丰富,包括天然气、煤、石油、盐、芒硝、卤水等,其中卤水矿产资源十分丰富^[21]。四川盆地地下卤水分布广泛,含锂卤水主要分布在盆地东西部,含水地层分布在震旦

纪到白垩纪之间,伴随着三叠纪海水蒸发的产物,将卤水埋藏于地层深部,随变质作用,卤水矿化度增加,锂元素富集程度越高,形成富锂卤水,卤水资源丰富,生产历史悠久。盆地内川东、川东北、川北、川西北、川南等地均有卤水资源,特别是在自贡、五通桥、蓬莱镇等地均有工业价值较高的卤水。四川盆地卤水潜在资源量高达 $1\,773 \times 10^9$ m³,有储量大、质量优、富集、适合联合开采四个特点^[10]。盆地卤水除 NaCl 含量较高外,普遍不同程度的含有 Br⁻、I⁻、B³⁺、K⁺、Li⁺等多种有用组分,其含量多数可达到工业品位,且四川盆地地处位置特殊,使得卤水富集在构造隆起部位,便于开采,适合综合利用,经济价值极高(图2)。

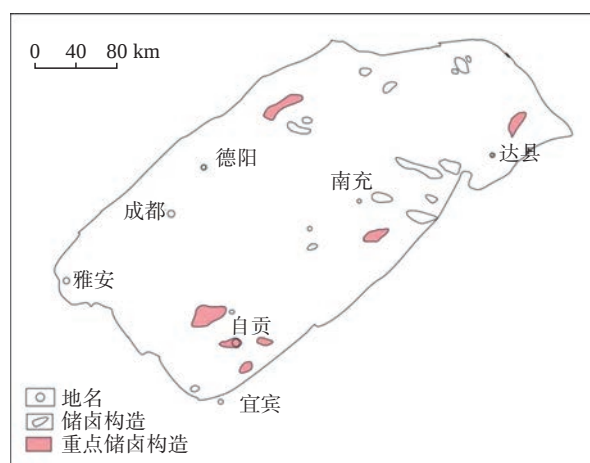


图2 四川盆地卤水资源分布图(改编自[22])

Fig. 2 Distribution map of brine resources in the Sichuan Basin

根据资料显示^[30-32],四川盆地卤水具有高矿化度(超过 250 g/L)、高钾、钠、氯离子的特点,各地抽样测试结果表明,多数地方卤水中的 K⁺、Li⁺含量均超过了其单独和综合开采工业品位。除表中数据外,2001年试验表明,川中钾含量 12.5 g/L,川东钾 7.183 g/L,川西钾 6.376 g/L,总体来说四川盆地油气田水中富钾离子,平均含量 18.864 g/L。该区域油田卤水与柴西南翼山背斜资源特点相似,资源普遍较好,综合利用价值高,卤水埋藏深度 1 000 ~ 4 500 m,较南翼山深,锂含量较南翼山低,开采成本高。结合测试数据(表 10 中自贡区域不同年份锂浓度的变化),可以发现,四川盆地深层卤水不仅不同地区卤水富集的锂含量有差异,尽管是同一地区但由于其现代开采工艺以及自然条件改变也会引起卤水锂资源的浓度发生改变。

表10 四川盆地深层地下卤水钾、锂离子含量

Table 10 Potassium and lithium ion content of deep underground brine in Sichuan basin				mg·L ⁻¹
区域,数据来源	K ⁺ /(g·L ⁻¹)	Li ⁺	Mg/Li	调查情况
川西北 ^[23]	53.267	89.8	35.25	
川西南 ^[23]	7.903	91	81.9	
川东北宣汉卤水 ^[24]	25.955	323		上二叠系长兴组(P ₁ c)和下二叠系茅口组(P ₁ m)
自贡邓关气田 ^[22]		52	23.8	—
自贡黄卤 ^[25]	0.78	30		1966年,产量如下,碘素10 t,溴素508 t,碳酸锂1 652 t,碳酸铯41.5 t,硼砂2 995 t,氯化钾10 660 t
自贡黑卤 ^[25]	2.64	60		
黄金口背斜川25# ^[25]	25.96	323		埋深2 800~3 625 m,卤层厚30 m
武胜龙女寺T _{3x} ^[25]	3.63	34.55		埋深1 100~2 100 m,此区域溴、碘、锂、铯含量最佳
自贡市区桑海井 ^[26]		8.95	183.35	—
富顺永年 ^[26]		26.6	20.1	—
平落4# ^[10]	58.95	70		富钾卤水,研究钠、钾、硼、溴等主元素的综合利用工艺
卧16# ^[10]	0.71	5.50		
女106# ^[10]	1.85			
磨208 ^[10]	0.77			
平落20# ^[10]	53.8	96		
长山盐矿 ^[27]		0.567	470.89	
自贡黄卤 ^[28]		41.72	34.32	
自贡黑卤 ^[28]		68.57	12.14	
川东北黄金口ZK001 ^[29]	25.955	10.556	33.92	埋深3 227 m,在0~500 m之间,锂浓度大小随深度成正比,镁锂比随深度成反比;3 000 m深度处采集的黄色卤水Na、K、Rb、Cs等有用组分达到卤水工业品位,Li质量浓度(10 556 μg/L)接近边界品位(24 599 μg/L)的一半,镁锂比值为33.92

上世纪80年代初期,四川自贡地区就开始油田卤水的综合利用,开采钾盐、利用水分级沉淀法从当地卤水中生产碳酸锂,虽然产量不够理想,但是比起锂矿石的加工提锂更加经济;1983年自贡市研究所采用MR-2技术提取威远气田水中的锂,用MR-2离子筛进行交换、洗脱低锂卤水中的锂,用洗脱液制备碳酸锂;2000年钟辉采用偏钛酸型锂离子交换技术分离威远卤水锂,有较好的效果,但是该卤水工业开采未见报道;2003年提出“改性-多元组合结晶法”进行四川盆地内油气田水资源综合利用,估算该区液态钾潜在资源量 $4\,374\times10^8\text{ m}^3$,预计建立规模为日处理 600 m^3 ,年产氯化钾 $1.8\times10^4\text{ t}$,溴素400 t,硼酸3 500 t;2006年统计四川盆地地下卤水潜在资源量达 $302.65\times10^8\text{ m}^3$,可采资源量达 $22.16\times10^8\text{ m}^3$ ^[10];2019年潘磊等采用冷冻结晶-芒硝兑卤复合工艺提取碳酸锂,含量可达96.73%^[13]。自贡市桑海井油田卤水迄今还在进行工业开采,而富顺永年井由于卤水产量下降已经停止采卤。最近几年,四川盆地地下卤水锂资源的开发仍处于缓慢发展的阶段,尤其是针对

地下卤水锂的开发提取方面报道较少,其主要是作为钾盐、食盐等卤水提取品的副产品来生产,多以制盐为主,开发利用单一,导致深层卤水资源浪费。

自贡地区地下卤水的开发程度相对四川盆地其他地区而言已经较高,但从目前的测试分析数据来看,虽然经过多年的开采,但其存留卤水的钾、锂含量在这些特殊储卤构造内仍超过边界品位,资源总储量仍十分可观,如果延伸到整个四川盆地而言,那么地下卤水开发程度低的地区的钾、锂资源储量将会更为庞大,根据最新的四川盆地卤水资源量与此次收集、分析的卤水锂资源平均品位粗略折算,2010年用体积法和钾盐/钠盐系数法估算得出四川盆地钾盐(以KCl计)最新储量为 $85.4\times10^8\text{ t}$,氯化锂的资源量可达 $137.4\times10^4\text{ t}$ 。近些年,四川盆地自贡、平落坝以及川东北区域也在计划有序地进行盐田中试试验,为资源综合开采提取作准备。简而言之,四川盆地三叠系古盐湖的卤水沉积,极可能成为未来我国钾、锂资源的又一大宝库,需要引起我们足够的重视^[32]。

2.3 江汉盆地深层地下卤水

江汉盆地位于湖北省中南部,是燕山运动晚期形成的中生代陆相断陷盆地,大地构造上属扬子准地台中部,是我国较典型的活化盆地之一,面积约

$2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地下部是前白垩系组成的海相碳酸盐岩,盖层为碎屑岩,上部为新近系以及第四系的地层。盆地内部发育多个凸起和凹陷带,构造样式复杂,断裂发育。目前已发现的深层地下卤水以江陵和潜江凹陷盆地为主。

表 11 江汉盆地油田卤水水化学数据

Table 11 Water chemistry data of oilfield brine in Jiangnan basin											g·L ⁻¹
井位	Li ⁺ /(mg·L ⁻¹)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	I ⁻	Cl ⁻	Br ⁻ /(mg·L ⁻¹)	Sr ²⁺	数据来源
沙 4 井	65	9.06	103.66	16.4	0.03		0.042	198.8	230	0.018	[10]
路 9 井	62	9.63	116.72	4.43	0.08	1.00	0.032	195.67	232	0.4	
沙 15 井		9.17	120.71	5.42		0.48	0.039	203.26	220		
岗钾 1 井	52	9.17	119.36	4.14	0.17	0.78	0.031	200	230		[10]
广 14#	113.5	5.93	120.43	4.09	0.45	0.79		198	506.4		[33]
浩 19 ²	87.7	3.59	126.33	0.000 5	0.000 1	7.24		193	455.4		
钟斜 6-17 井	15.3	1.48	83.6	0.9	0.336	2.524		168	10		
代 7-7#	8.6	0.212	39.7	0.117	0.057 4	8.15		78	31.4		

江汉盆地内发育的潜江凹陷和江陵凹陷区域的深层卤水,富含丰富的矿产资源,K、Ca、Rb、Cs、I、Li 等元素含量普遍较高,Mg²⁺、SO₄²⁻含量较低,镁锂比低。两者卤水均属于硫酸盐型沉积卤水,都是经过强烈的火山活动带出深层卤水中的物质和白垩纪-新近纪的海水侵入形成丰富的钾锂等资源,经过长时间深埋变质,其基本特征与内陆盐湖接近。

江陵凹陷古近系含盐系地层中蕴藏着富钾、锂的深层卤水,为高矿化度高温高压卤水,其中富含液态钾矿,赋存于地下深部,卤水浓度较高,K 含量异常高,并且铷、铯、溴、碘、硼元素已经达到工业或综合利用的品位,Li 含量为 60 mg/L,也已经超过综合利用品位^[34]。

潜江凹陷位于江汉盆地中部,是中国典型的中、新生代断陷盆地,面积 2 500 km²。卤水含水层埋深 600 ~ 3 900 m,含矿面积 1 630 km²,其卤水的平均矿化度为 280.9 g/L,常量元素平均含量占 99.4%,微量元素平均含量为 0.57%^[33]。潜江组部分层位自西北向东南卤水水化学类型依次为碳酸盐型水、硫酸镁亚型和氯化钙型卤水。且卤水中的锂、溴元素达到开采工业品位,钾硼碘元素达到综合利用工业品位,钾、硼、碘元素达到综合利用工业品位^[35]。

根据 2013 年中国地质科学院调查研究表明^[36],

江陵凹陷盆地深层卤水中,KCl 资源量约 $2 \times 10^8 \text{ t}$,Li₂O 预测资源量 $120.9 \times 10^4 \text{ t}$,B₂O₃ 预测 $209.7 \times 10^4 \text{ t}$,Br 预测资源量 $44.2 \times 10^4 \text{ t}$ 等^[37]。2019 年王春连等研究表明江陵凹陷白垩纪的风成砂岩是该区下一步探索富含钾、锂、硼等元素卤水的重要地层位^[37]。

2.4 江西吉泰盆地深层地下卤水

吉泰盆地位于江西省中部,盆地面积 4 550 km²,为坳陷构造,因盆地周围存在大量的断裂,深层地下水溶解火山岩中的 K、Na、Li、Rb、Cs 等离子,受地层压力沿着深大断裂向上运移,赋存于裂隙发育、孔隙度大的断层裂隙中。该盆地卤水形成于白垩纪中生代断裂中,经岩浆活动后,玄武岩与花岗岩侵入导致 K、Li 含量较高。该区发现的深层卤水有泰和凹陷以及梅岗富锂卤水。

泰和凹陷卤水埋深 569 ~ 598 m,锂含量 89 ~ 101 mg/L,卤水矿化度 271.08 ~ 291.21 g/L,Na⁺ 含量 113.0 ~ 120.0 g/L,Cl⁻ 含量 164.04 ~ 176.32 g/L,属于氯化物型,镁锂比 1.2^[39]。梅岗含锂卤水形成于白垩系上统周田组,埋深 250 m 以下,属于弱酸性高矿化度气体的氯化钠型水,矿化度高达 300 ~ 330 g/L。梅岗卤水中 NaCl 最高含量为 26.11%,约为工业品位

表 12 吉泰盆地部分钻井卤水水化学数据

Table 12 Brine water chemical data of some drilling in Jitai basin						mg·L ⁻¹
井位	LiCl	NaCl	KCl	MgCl ₂	CaCl ₂	数据来源
梅岗卤水	0.065 ~ 0.091	24.54 ~ 26.11	0.072 ~ 0.14	0.014 ~ 0.529	0.42 ~ 1.159	[38]
ZK8201-S1	610.48	307 200	832.87	3 728.75	11 381	[39]
ZK8201-S2	616.55	306 500	825.23	3 732.71	11 317.31	
ZK8401-S1	518.2	305 300	699.15	3 186.46	10 619.5	
ZK8401-S2	584.07	307 600	790.85	3 621.08	11 203.78	

的2.6倍;LiCl最高含量为1 136 mg/L,约为工业品位的3.8倍^[38]。

3 开发建议

1) 我国深层地下卤水分布广泛,化学性质不一,资源储量丰富,部分地区的油田卤水都有巨大的开发前景。其中,柴西南翼山、狮子沟,四川自贡、平落坝、川东北以及江汉盆地的油田卤水中钾、锂资源多数超过工业开采品位,但多是与油气共生,所以有望实现与油气共同开采,开采成本较低,资源量不可忽视,对深层卤水的研究与开发值得推进。

2) 目前我国多数地区关于地下卤水的开采处于调查研究阶段,均已证实该地区富含丰富的矿产资源,但是要做到资源单一开采还是综合提取利用,还是需要进一步实验证明,应加大力度进行新技术的开发,实现资源最大程度的回收利用。

3) 根据已有的深层地下卤水的钻井卤水水化学数据,我国在柴西南翼山、狮子沟区域已开展了油田卤水中试盐田环节,进一步对油气田卤水资源量进行评价工作,同时进行资源提取实验;而针对四川盆地与江汉盆地等富钾油气田水,则应开始设计相应的中试盐田试验,探究其盐类析出规律,为后续钾、锂资源提取开发提供基础。

4) 深层地下卤水提锂可以根据其化学性质,参照国内外盐湖卤水成熟的提锂技术以及国外油田卤水开发技术进行改进并优化。我国目前正在探索油田水提锂新技术,初步取得了较好的成果,但是真正进入工业开采阶段的目前还没有;且深层卤水于地表盐湖卤水相比,埋藏深,开采成本较高,考虑其资源综合利用与开采经济效益提高是下一步工作的重点。

5) 通过调查研究总结我国深层地下卤水的整体情况,对比资源量、开发环境、研究工作进展以及后续工业开采利用等方面,目前有较好开发前景的钻井有柴达木盆地西部南翼山南13井、狮子沟49H4、狮子沟205以及四川盆地平落4井、川东北等区域的深层地下卤水。

参考文献:

- [1] 穆延宗,卮贞,卜令忠等.我国油(气)田水钾资源研究进展[J].地球科学进展,2016,31(2):147-160.
- [2] 周园园.中国锂资源供需形势及对外依存度分析[J].资源与

产业,2019,21(3):46-50.

- [3] 刘丽君,王登红,刘喜方等.国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J].中国地质,2017,44(2):263-278.
- [4] 苏彤,郭敏,刘忠等.全球锂资源综合评述[J].盐湖研究,2019,27(3):104-111.
- [5] 杨卉凡,柳林,丁国峰.全球锂矿资源现状及发展趋势[J].矿产保护与利用,2019,39(5):26-40.
- [6] 李陇岗.四川平落海相沉积深层卤水主元素综合利用研究[D].成都理工大学,2016.06:1119-1143.
- [7] DZ/T 0212—2002.盐湖和盐类矿产地质勘查规范[S].
- [8] 马振民,雒芸芸,侯玉松.深层卤水资源的可持续开发利用[J].济南大学学报(自然科学版),2013,27(4):331-335.
- [9] 李洪普,郑绵平.柴达木盆地西部深层卤水钾盐矿成矿地质特征[J].矿床地质,2014,33(S1):935-936.
- [10] 穆延宗.柴达木盆地西部第三系油田水成盐元素分布规律与成因[N].中国地质科学院,2016.
- [11] Li R Q, Liu C L, Jiao P C, et al. The tempo-spatial characteristics and forming mechanism of Lithium-rich brines in China [J]. China Geology, 2018, 1(1): 72-83.
- [12] 于升松.湖北江汉盆地潜江凹陷深层地下卤水水文地球化学研究[J].盐湖研究,1994(1):6-1.
- [13] 高娟琴,王登红,王伟,于泓,于扬.国内外主要油(气)田水中锂提取现状及展望[J].地质学报,2019,93(6):1489-1500.
- [14] 刘颖,王云生,卮贞,伍倩,余疆江.柴西深层地下卤水资源及其综合利用研究进展[J].无机盐工业,2018,50(1):12-15+27.
- [15] 李廷伟,谭红兵,樊启顺.柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析[J].盐湖研究,2006(4):26-32.
- [16] 韩佳君,周训,姜长龙等.柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及其起源演化[J].现代地质,2013,27(6):1454-1464.
- [17] 李洪普,郑绵平,侯献华等.柴达木西部南翼山构造富钾深层卤水矿的控制因素及水化学特征[J].地球学报,2015,36(1):41-50.
- [18] 甘会春,袁世冲.柴达木盆地小梁山—大风山区域深层卤水水化学特征及成因分析[J].现代矿业,2020,36(1):28-34.
- [19] 刘溪溪,岳鑫,袁文虎等.柴达木盆地西部狮子沟背斜构造区深部卤水水化学特征及演化分析[J].盐湖研究,2019,27(1):73-81.
- [20] 毛建业,汪青川,王占巍,朱建鹏.青海茫崖狮子沟地区深层卤水钾盐成矿远景区矿产资源调查[J].中国锰业,2017,35(5):87-89+93.
- [21] 张永帅.四川盆地自流井构造深层地下卤水的富集和资源特征[D].北京:中国地质大学,2015.
- [22] 林耀庭,何金权,叶茂才.四川盆地卤水钾资源分布类型及其品质的研究[J].化工矿产地质,2002(4):215-221+247.
- [23] 周训,李慈君.“四川盆地深层地下卤水资源量评价及其方法的研究”成果[J].地质科技情报,1991(4):82.
- [24] 熊淑君,林耀庭.论四川盆地卤水分布及地质特点[J].中国井矿盐,1996(2):6-8.
- [25] 林耀庭,陈绍兰.四川盆地地下卤水勘探开发前景展望[J].盐湖研究,2008(1):1-7+21.
- [26] 李文鹏.四川盆地三叠系深层富钾卤水赋存区带预测[D].北京:中国地质大学,2015.
- [27] 唐起,李晓,王维等.四川盆地中下三叠统盐卤水水化学成分相关性分析[J].人民珠江,2017,38(4):70-73.

- [28] 詹涵钰,马红漫,武文辉等.四川自贡地区地下卤水锂矿化特征及靶区预测[J].中国地质调查,2018,5(4):17-24.
- [29] 高娟琴,于扬,仲佳爱等.川东北黄金口背斜ZK001钻孔流体地球化学及含锂特征[J].地球科学与环境学报,2019,41(2):197-208.
- [30] 王登红,付小方.四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破[J].岩矿测试,2013,32(6):987-987.
- [31] 罗莎莎,郑绵平.西藏地区盐湖锂资源的开发现状[J].地质与勘探,2004,40(3):11-14.
- [32] 陈小伟,周思恩,牟传龙等.浅析四川盆地典型储卤构造地下卤水型锂资源潜力[J].轻金属,2016(10):7-11.
- [33] 马黎春,黄华,张连元等.湖北潜江凹陷古近系深层富钾卤水矿床特征及成因[J].地质学报,2015,89(11):2114-2121.
- [34] 黄华,张士万,张连元等.潜江凹陷潜江组砂岩卤水矿床测井识别方法研究[J].化工矿产地质,2013,35(2):65-71.
- [35] 刘成林,余小灿,赵艳军等.华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探[J].矿床地质,2016,35(6):1119-1143.
- [36] 刘成林,徐海明,王春连.江陵凹陷中南部深层卤水氯化钾资源量报告[R].北京:中国地质科学院矿产资源研究所,2013,1-83.(1):73-81.
- [37] 李强,王春连,孟令阳等.江陵凹陷富钾硼锂卤水砂岩储层特征研究[J].化工矿产地质,2019,41(4):229-236.
- [38] 周敏娟,胡立,黄小年等.江西省泰和县梅岗含锂卤水矿成矿地质特征及开发利用前景[J].现代矿业,2017,33(11):61-64+82.
- [39] 廖达军,欧阳斌,张栋梁等.江西省吉泰盆地泰和凹陷含锂卤水矿成矿地质背景初步研究[J].世界有色金属,2019(23):178-179.

Lithium and Potassium Resources of Oilfield Brine and Development Prospects in China

HAN Jiahuan¹, ZHENG Mianping², NIE Zhen^{2*}, GUO Tingfeng³, WU Qian²,
WANG Yunsheng², CUI Zhengdong⁴, DING Tao¹

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083, China; 2. MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China;
3. Qinghai Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Xining, 81000, China;
4. Shenyang Earthquake Monitoring Center Station, Shenyang, 110165, China)

Abstract: Potash fertilizer is the fertilizer of grain. For a country with 1.4 billion population, the stable supply of potash products plays a very important role in national economy and security. Lithium is the “new energy rich in the 21st century”. In recent years, with the rapid development of the global new energy industry, lithium resources have been highly concerned by countries around the world. At present, two kinds of resources of China’s potassium, lithium depend on existence degree to be high externally, self-sufficiency is insufficient, need to raise China’s potassium, lithium resources guarantee degree by actively seeking ore, make full use of international resources and so on way. The proved potassium and lithium resources are mostly deposited in the salt lake brine deposit, but after years of surface salt lake production and serious consumption of surface salt lake resources, the search for potassium and lithium in the Marine stratum has not yet made a breakthrough. The deep underground brine can become the follow-up reserve of our lithium potassium resource requirement. China’s deep underground brine is mainly distributed in the west of Chaixi, Sichuan, Hubei, Jiangxi and other places. It has rich resources, rich potassium, lithium, boron and other high grade elements, and has very good economic value. However, the degree of work is not enough at present, and the industrial exploitation has not been realized due to the problems of mining technology and cost. In this paper, the key blocks in the deep underground brine water chemical characteristics and distribution regularities is summarized, based on deep brine resources evaluation of existing data, put forward the next key research proposal blocks, for subsequent deep brine potassium, lithium resources evaluation in our country, such as comprehensive extraction technology and research provide technology support.

Key words: Deep underground brine; Oil field brine; Lithium resources; Potassium resources