

国内外主要油(气)田水中锂提取现状及展望

高娟琴^{1,2)}, 王登红²⁾, 王伟³⁾, 于泐^{1,2)}, 于扬²⁾

- 1) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083;
2) 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;
3) 四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所, 成都, 610036

内容提要:油(气)田中常伴生油(气)田水,与自然界其他水体相比常具有较高的锂含量,部分可达工业品位。我国油(气)田水储量大,锂资源量可观,但在过去却长期被忽视。近年来,在盐湖卤水型液体锂资源提取技术不断取得突破的大背景下,卤水型锂资源产量占比逐年升高,油(气)田水型锂资源也应当受到重视。本文通过研究大量国内外主要油(气)田中伴生的油(气)田水锂含量及分布特征,归纳国内外油(气)田水提锂技术现状,为我国油(气)田水中锂的综合利用提供参考。

关键词:油(气)田水;锂资源;分布特征;地球化学;综合利用

锂(Li, Lithium)是 21 世纪的能源金属(Wang Denghong et al., 2016, 2018),现已广泛应用于通讯、航天、新能源汽车等高科技领域。随着可控核聚变技术不断取得突破,其战略地位进一步提高(Wang Denghong et al., 2018),世界各国对锂的需求量逐年增长。Li 在自然界中属于微量元素,地表河流及淡水湖泊中锂含量多低于 0.01mg/L(Han Fengqing, 2001; Gaillardet et al., 2003);地下水由于发生水岩反应的强度更高, Li 含量通常略高于地表水;海洋中 Li 含量约为 0.02mg/L(Han Fengqing, 2001);Li 在水体中的含量与水体温度、蒸发程度、储存条件及经历的演化过程密切相关,一般来说随着温度的升高流体溶解岩石中锂的能力增强,故自然界中温泉与常温地下水相比锂含量通常更高,可达 1mg/L 以上(Ball et al., 2001, 2002);盐湖卤水由于受到地表强蒸发作用及周边丰富的物源补给, Li 含量通常较高,多数高于 10mg/L(Han Fengqing, 2001; Lin Yaoting, 2006; Chen Xiaowei et al., 2016; Zhan Hanyu et al., 2018), Li 含量极高者可达 1000mg/L 以上(Zhang Baoquan, 2000);

而油(气)田水在油气成藏阶段与烃类物质共同经历了漫长的演化,发生了复杂的物理化学反应,这个过程中油(气)田水更大程度上溶解了地层中的锂,导致一些油(气)田水的锂含量远远高于自然界地表河流、湖泊等水体,部分甚至高于盐湖卤水,具有潜在的开采利用价值(Gao Xixing, 1994)。

有用组分达到工业品位的油(气)田水可以看做是一种具有开发潜力的液态资源。直至上世纪末,我国储量极多的油(气)田水中的锂资源都未被重视,也未提取,造成了资源的浪费(Zhong Hui et al., 1994)。经评估,工业上可开采的油(气)田水提锂技术可以借鉴已有的卤水提锂技术经验,资源开发利用前景很好。本文在搜集国内外主要油(气)田水锂含量数据的基础上,总结国内外主要油(气)田水中锂资源及分布特征,探讨国内外从油(气)田水中提取锂的技术进展及突破,以期对我国油(气)田水中锂资源的综合利用提出可行性建议。

1 油(气)田水的概念和内涵

油(气)田水是天然水系中由于与油、气毗邻伴

注:本文为国家重点研发计划“深地资源勘查开发”专项课题(编号 2017YFC0602701)、中国地质调查局二级项目“松潘-甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”(编号 DD20190173)资助成果。
收稿日期:2019-04-26; 改回日期:2019-05-31; 网络发表日期:2019-06-03; 责任编辑:周健。
作者简介:高娟琴,女,1993 年生。在读博士研究生,主要从事环境地球化学方向研究工作。Email: gaojuanqinmail@sina.com。通讯作者:王登红,男,1967 年生。博士生导师,研究员,现主要从事矿产资源研究工作。Email: wangdenghong@sina.com。

引用本文:高娟琴,王登红,王伟,于泐,于扬. 2019. 国内外主要油(气)田水中锂提取现状及展望. 地质学报, 93(6):1489~1500, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019180.
Gao Juanqin, Wang Denghong, Wang Wei, Yu Feng, Yu Yang. 2019. Current status and prospects of lithium extraction in major domestic and foreign oil (gas) field waters. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1489~1500.

生而具有特殊物理、化学性质的地下水,其与油、气藏的形成关系密切,是油、气藏流体系统的重要组成部分(Gao Xixing, 1994)。油(气)田卤水也是油(气)田水的一种,可以理解为与储集层中油气藏伴生的盐类矿物含量超过 5%(即矿化度大于 50g/L)的地下水。

油(气)田水与普通地下水相比其化学组分更复杂,通常具有更高的微量组分含量(如 Br, I, B, NH₃, Li, Rb, Cs, Sr, Ni, V, Mn, Cu, Co, Cr, Zn, Mo),其特殊性质可以看作反映油、气组分的标志。研究油(气)田水的性质特征,对理解油气藏形成史、进行油气远景评价、做出勘探开发决策有重要意义,因此油(气)田水的研究热度多年不减(Zhang Jintang et al., 1992; Li Xianqing et al., 2001; Fu Jianlong et al., 2006; Mu Yanzong et al., 2016; He Xiaoqu et al., 2017)。

各国学者对于油(气)田水分类方法略有不同(Zhang Jinlai, 1979; Wang Yunpu, 1983),这是因为各个国家的油(气)田水具有其特殊性质。常见的油(气)田水分类方法有三种,矿化度分类、苏林分类及绍勒尔分类(Zhang Zhibo et al., 2017),其中使用最多的是苏林分类。苏林分类法是认为水的不同化学组分取决于其所处的环境,不同环境的水中所含的盐类不同,故根据油(气)田水中的盐类离子(Ca²⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺)组成及含量差异,依据 3 个成因系数将油(气)田水划分为硫酸钠型、氯化钠型、氯化钙型、重碳酸钠型四种类型(表 1)。

表 1 油(气)田水的苏林分类法

水类型		成因系数(质量浓度比)		
		$\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Cl}^-)$	$[\rho(\text{Na}^+) - \rho(\text{Cl}^-)]/\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$[\rho(\text{Cl}^-) - \rho(\text{Na}^+)]/\rho(\text{Mg}^{2+})$
大陆水	硫酸钠型	>1	<1	<0
	重碳酸钠型	>1	>1	<0
海水	氯化镁性	<1	<0	<1
深层水	氯化钙型	<1	<0	>1

2 国内外主要油(气)田水锂含量及分布特征

国内外主要油(气)田水中的锂含量、所处地层及埋深见表 2。由于目前没有针对油(气)田水锂资源评价的工业指标,故暂采用盐湖卤水工业品位作为对比,常用的盐湖卤水工业品位标准见表 3。

我国油(气)田水资源分布广,海相(四川盆地三

叠系、渤海湾盆地等)、海陆混合相(北部湾盆地三涸 10-3 油气田、珠江口西部文昌 9-2 油气田)、陆相(江汉盆地、渤海湾盆地南端、柴达木盆地、塔里木盆地等)沉积盆地中均有油(气)水产出(Gao Xixing, 1994)。

国外富锂的油(气)田水也较多,美国、加拿大、德国、法国、意大利、伊朗、印度、以色列、科威特等国家均有分布,其中加拿大、美国油(气)田水中锂含量相对较高且已经投入开采利用。

按照苏林分类法,已搜集的油(气)田水多属于氯化钙型水,即深层地下水,多出于 1000m 以下地层深部,部分产出层位较浅的有重碳酸钠型水,如出于 500m 深度的开特里米克油田水为重碳酸钠型水,也有很小一部分为氯化镁型水,如出于 1000~1500m 深度小梁山油田水。目前暂未发现油(气)田水 Li 含量与赋存的深度及水型的关系。

2.1 柴达木盆地

柴达木盆地广泛存在油田水,但矿化程度不一。柴达木盆地西部的油田水可称为油田卤水,富集 Li、B、Rb、Sr 等多种有用组分且普遍达到工业品位,其中柴达木盆地西部南翼山油田水中 Li 含量均高于 200mg/L,最高可达 983mg/L,伴生油田水中 Li 资源价值不容忽视;柴达木盆地北缘的含油气系统以中下侏罗统煤系地层为烃源岩, Li 含量普遍偏低,例如柴达木盆地北缘的冷湖构造油(气)田水中各组分含量均低,不具有工业开采的价值,其中 Li 仅为 0.7mg/L。

2.2 塔里木盆地

塔里木盆地油气资源丰富,已有研究表明,塔河油田产出于三叠系、石炭系、奥陶系的油田水 Li 含量分别为 3.54 mg/L、3.12 mg/L、8.55mg/L(Qian Yixiong et al., 2003),塔里木盆地 120 个油田水 Li 含量主要集中在 2~10mg/L(Cai Chunfang et al., 1996)。总的来说 Li 含量不高,只有极少数油田水可达到可综合利用的工业品位。塔里木盆地塔河气田亦有气田水产出,28 件气田水样品 Li 含量介于 0.06~94.1mg/L,部分 Li 含量较高的气田水可以考虑综合利用。

2.3 四川盆地

四川盆地气田水广泛分布,遍布川渝两地。至 1999 年盆地中已发现的含气田水的构造达 180 余个(Lin Yaoting, 1999),多赋存于 1000~5000m 深处,盆地发现气田水的气藏占开发中气藏的 84%,

表 2 国内外主要油(气)田水锂含量、所处地层及埋深

Table 2 A list of lithium concentration of water in domestic and foreign oil (gas) field

国家	地点	位置	所处地层	埋深(m)	Li (mg/L)	数据来源	
中国	柴达木盆地	冷湖三号构造			0.7	Li Wenxia et al. , 2016	
		小梁山构造			36		
		油泉子构造			115		
		油墩子构造			98		
		开特米里克构造			70		
		南翼山构造			104		
		南翼山油田南 13 井	渐新世下干柴沟组	2600~2700	230.2	Li Hongpu et al. , 2015	
		南翼山油田南 6 井			254		
		南翼山油田南 2-3 井		2972.2~2978.3	255.8		
		南翼山油田-南 5 井			200	Han Jiajun, 2013	
		开特米里克油田	新近系	500	48	Tan Hongbing et al. ,2007	
		油泉子油田		500~1000	90		
		小梁山油田	古近系	1000~1500	36		
		南翼山油田			983		
		盆地西部			36.7	Li Jiansen et al. , 2014	
		盆地西部第三系	上新统		115.43	Fu Jianlong et al. , 2005	
			中新统		154		
			渐新统		206		
		四川盆地	卧龙河储卤构造	嘉陵江组		5.5~32.6	Cao Qin et al. , 2015
			普光气田黄金口背斜群	嘉陵江组及雷口坡组	2800~3265	323	Lin Yaoting et al. , 2008
	雷口坡组			3000	10.56	Gao Juanqin et al. , 2019	
				3483.61~3593.2	286.73	本文	
	平落 4 井			4600	89.8	Lin Yaoting et al. , 2002	
	平落 20 井				96	Mu Yanzong et al. , 2016	
		威远气田			97.5	Zhong Hui, 2000	
	塔里木盆地	塔河油田	三叠系		3.54	Qian Yixiong et al. , 2003	
			石炭系		3.12		
			奥陶系		8.55		
		塔里木盆地各油田			2~10	Cai Chunfang et al. , 1996	
		和田气田		877~5436	0.1~94	Cai Chunfang et al. , 2006	
	江汉盆地	江陵凹陷沙 4 井	沙市组		65	Huang Hua et al. , 2014	
		江陵凹陷路 9 井	新沟嘴组		62		
		江陵凹陷岗钾 1 井			52	Li Ruiqin et al. , 2014	
	鄂尔多斯盆地	靖边气田	奥陶系		23	Fan Fu et al. , 2012	
			石炭一二叠系		6		
	南襄盆地	泌阳凹陷	核桃园组一段		0.07	Zhu Yanyun et al. , 1986	
			核桃园组二段		0.14		
			核桃园组三段		1.95		
		双河			0.82		
		赵凹和安棚			3.47		
		下二门			0.2		
		王集		0.37			
	珠江口盆地	珠三拗陷文昌 A 凹陷	珠江组		6.3	Xiao Cong et al. , 2015	
		珠三拗陷文昌 B 凹陷			6.41		
					4.74		
		珠三拗陷神狐隆起			7.01		
		珠三拗陷琼海凸起		3.41			
		涠西南凹陷东区 B 洼陷	角尾组		1.63		
		涠西南凹陷	涠洲组		1.13		
		涠西南低凸起			0.79		
		涠西南凹陷 2 号断裂带东段			1.46		
	松辽盆地	扶余油田			1.35	Yang Zhonghui et al. , 1982	
	河北省任丘市	任丘油田	雾迷山组		4.7	Feng Qiyan et al. , 2001	

续表 2

国家	地点	位置	所处地层	埋深(m)	Li (mg/L)	数据来源
美国	加利福尼亚州	费尔菲尔德郡(Fairfield)		726. 95	2. 7	Breen et al. , 1985
	俄亥俄州	霍金郡(Hocking)		775. 72	1. 6	
				807. 72	2. 2	
				847. 34	2. 5	
				993. 65	3. 8	
		科肖克顿(Coshocton)		1027. 18	4. 1	
				952. 2	4. 4	
		阿什塔比拉郡(Ashtabula)		1017. 12	6	
				1077. 16	6. 6	
			1605. 69	10		
	纽约州	卡罗尔郡(Carroll)		1634. 64	11	
				1667. 26	12	
				1011. 33	3. 2	
	佛罗里达州	霍尔姆斯郡(Holmes)		1046. 99	3. 2	
				1052. 47	3. 1	
				1263. 09	5	
				4740	81	
		圣罗莎郡(Santa Rosa)		4783	102	
				1897	50	
		阿肯色州	尤宁郡(Union)		1997~1998	75
			拉斐特郡(Lafayette)		2533~2621	404
	哥伦比亚(Columbia)			2544~2635	423	
				2559~2654	462	
				2572~2662	481	
				2583~2675	442	
				2588~2682	481	
				2591~2614	308	
				2603~2667	462	
				2610~2697	462	
				2624~2713	519	
				2638~2721	481	
				3326~3364	86	
	路易斯安那州	克莱本郡(Claiborne)		3048	80	
			3048	101		
韦伯斯特郡(Webster)			3363~3369	66		
亚拉巴马州	乔克托郡(Choctaw)		3560	61		
密西西比州	韦恩郡(Wayne)		3867	80		
	琼斯郡(Jones)		3959	75		
	史密斯郡(Smith)		4834	67		
得克萨斯州	卡斯郡(Cass)	Smackover 组		3063	473	
				3198	404	
	富兰克林郡(Franklin)			3712	293	
	霍普金斯郡(Hopkins)			3888	99	
	范赞德郡(Van Zandt)			3897	100	
	雷亚尔郡伍德营(Wood)			3591~3901	692	
	雷恩斯郡(Rains)			4188~4206	224	
	罗伯森郡(Robertson)			4351	624	
北达科他州	伯克郡(Burke)		Madison 群	1890	164	
				1935~1942	345	
	威廉斯郡(Williams)		泥盆系	3106~3210	400	
	迪韦德郡(Divide)		Saskatchewan 群	3317~3323	118	
俄克拉何马州	卡特郡(Carter)		Arbuckle 群	942	51	
	诺布尔郡(Noble)		Wilcox 组	1564	70	

续表 2

国家	地点	位置	所处地层	埋深(m)	Li (mg/L)	数据来源	
美国	犹他州	达盖特郡(Daggett)	Madison 群		85		
		圣胡安郡(San Juan)		1478	58		
			密西西比系	2553	56		
		杜申郡(Duchesne)	Green River 组	1799	68		
		格兰德郡(Grand)	Leadville Ls. 地层	2623	58		
	怀俄明州	甘霖郡(Sweetwater)	Rock Springs 组	2676	98		
		坎贝尔郡(Campbell)	Minnelusa 组		2939		70
					2939		90
					3031		75
				3031	75		
加拿大	艾伯塔省	鲟鱼湖油田(Sturgeon lake)	Woodbend 群		55.4~83.7	Eccles et al. , 2012	
		鲟鱼湖油田南			140		
		MGX 公司子项目所在各油田 水富集区		1664~3639	46~140		
			三叠系	992	26		
			Elk Point 群	1734	76		
			Wabamun 群	1951~3304	79~94		
			Winterbum 群	2070~2687	74~115		
			Beavehill Lake 群	3304	89		
				130			
德国	下萨克森州盆地	Husum-Schneeren 气田			9~78	Lüders et al. , 2010	
	Altmark 拗陷南	PermianAltmark 气田			52~375		
法国	巴黎盆地	Chaunoy 油田	三叠系		27	Fan Wei et al. , 2012	
		LaTorche 油田			41	Millot et al. , 2011	
		Champotran 油田			48		
		巴黎盆地边缘补给区 Châteauroux			36.3		
		巴黎盆地边缘补给区 Santenay			0.23		
					19.54		
意大利	北亚平宁盆地	意大利温泉(Salsomaggiore spa)			78.5	Boschetti et al. , 2011	
		费列雷市(Salsominore Ferriere)			11.3		
		其他地下水			0.1~4.2		
伊朗	康安盆地	康安气田勘探井 No. 3		2434~3175	0.01~7.7	Bagheri et al. , 2014	
				2473	13.4		
				2473	16.7		
				2519	11		
				2633	25.8		
				2658	8.39		
				2670	17.2		
				2670	21.9		
		康安含水层		2850	129		
				2850	152.7		
				2850	132.7		
印度	古吉拉特邦 肯帕德盆地	艾哈迈达巴德(Ahmedabad Asset)			0.2	Rebary et al. , 2014	
		安克尔西瓦港(Ankleshwar Asset)			0.63		
		马赫萨纳(Mehsana Asset)			0.63		
	阿萨姆盆地	阿萨姆盆地油井			15~33	Tapan et al. , 2018	
以色列		Heletz - Kokhav 油田			0.97~2.28	Chan et al. , 2002	
科威特		Rawdatayn 油田			0.09~6.48	Alfarhan et al. , 2012	
		Sabriyah 油田			0.05~6.83		

表 3 盐湖卤水工业品位标准

Table 3 The evaluation standard of brine from saltlake

标准			Li(mg/L)	LiCl(mg/L)	资料来源
标准 1	单独开采	工业品位	24.6	147.6	Song Hebin, 1997
	综合利用	边界品位	16.4	98.4	
		工业品位	13.1	78.6	
		边界品位	8.2	49.2	
标准 2	工业品位		50	300	矿产资源工业要求手册编委会, 2012
	边界品位		25	150	

发现气田水的层位较柴达木盆地油田水层位要深。四川盆地的气田水品质优异,常能实现气水同采,综合开发利用条件好。

川东北黄金口背斜群与普光气田距离甚近,该背斜群多处钻井发现了具工业价值的气田卤水,例如 2017 年布设于普光镇的钾盐勘探井 ZK001 中采出的气田卤水 Li 含量为 10.56mg/L(Gao Juanqin et al., 2019),与其相距 7km 左右的土主镇 ZK601 井中产出的气田卤水含 Li 286.73mg/L,黄金口背斜群中气田水 Li 含量最高者达 323mg/L(Lin Yaoting et al., 2008),伴生有用组分多,尤其是 Na、K 均远超盐湖卤水工业品位。成都凹陷西南的平落坝构造与气藏关系密切,其中平落 4 井和平落 20 井的卤水 Li 含量分别为 89.8 mg/L 及 96mg/L,其他有用组分(K^+ 、 B^{3+} 、 Br^- 、 I^- 、 Sr^{2+} 、 Rb^+ 等)也具有开采价值。此外,四川威远气田亦有具提锂价值的气田水(含 Li 达 97.5mg/L)产出,并且早在 1983 年我国就针对该处气田水提出了效果较好的提锂技术。

四川盆地天然气、页岩气开采过程中无法避免气田水的干扰,开采后期常常有气田水因气压减小沿构造裂隙进入气藏,造成井口压力减小致天然气减产,故必须进行排水,但四川气田水中常具有较高的 S^{2-} 、COD(化学需氧量)、油、SS(固体悬浮物)等,不符合排污标准(Ye Yan et al., 2001)。若能对气田水进行合理开采利用不仅可解决排污对环境造成的问题,还可以避免气田水中优质资源的浪费。

2.4 国内其他盆地

我国的南襄盆地、珠江口盆地、北部湾盆地、松辽盆地均有油(气)田水分布,但 Li 含量普遍偏低(0.07~7.01mg/L),已报道数据中几乎没有达到工业品位的。

江汉盆地的油田水研究历史已久,江陵凹陷中产出于沙市组及新沟嘴组的油田水 Li 含量可观(52~65mg/L),高于盐湖卤水的工业品位,且江汉盆地卤水储量丰富,达 101.7 亿 m^3 (Huang Geng, 1989),同时含有丰富的 Na、K 盐资源,该盆地油田水具有可观的提取利用价值。

新疆的准噶尔盆地油气资源丰富,克拉玛依油田、火烧山油田、彩南油田、呼图壁气田、石西油田均在准噶尔盆地中,据报道克拉玛依油田的油田水中发现了具提取价值的 Li,具体含量未见详细说明(Dong Guanghua, 1991),其他油(气)田则未见有油(气)田水产出的报道。

鄂尔多斯盆地靖边气田有气田水产出,其中奥陶系地层 3 处气田水中的 Li(Li 分别为 45.16mg/L、29.15mg/L、26.68mg/L)达到可单独开采工业品位,石炭—二叠系中产出的气田水 Li 偏低,远未达到工业品位。子洲气田也有气田水产出,但未见该气田水的 Li 含量数据报道(An Wenhong et al., 2014)。

2.5 国外主要油(气)田

从国外已报道的油(气)田水数据资料来看,美国、德国、加拿大油(气)田中产出的油气田水具有较好的锂资源,且美国和加拿大的部分油气田水已经在进行提锂项目并已产生收益。

美国油(气)田水 Li 含量数据较丰富,各州油(气)田水 Li 含量地域差异大(变化范围为 1.6~692mg/L),阿肯色州、北达科他州及得克萨斯州发现的油(气)田水具有相当高的 Li 含量,其他地区相对较低,但均达到了单独开采的工业品位,油(气)田水中的 Li 资源相当可观。据估计美国得克萨斯州 Smackover 组中油田卤水约含有 75 万吨锂资源(Collins, 1978),开采价值较大。美国佛罗里达州及俄亥俄州已发现的油田水中 Li 含量有向深部富集的趋势,在产出油田水的一定深度范围内,随深度加深 Li 含量明显升高(图 1),在其他地区油(气)田水中并未发现此规律。

加拿大鲟鱼湖油田产出于 Leduc 地层的油田水 Li 平均含量为 67mg/L(43 件油田水均值),该处油田水已经被作为提锂资源由加拿大的 MGX Minerals 公司负责开采。据报道,Leduc 地层水 Li 含量高至 130~140mg/L,Swan Hills 地层水中亦含有 130mg/L 的 Li。

法国正在运营的油气田有 60 余个,主要集中在巴黎盆地和阿基坦盆地,法国巴黎盆地主要的油田有 Villeperdue 油田和 Chaunoy 油田,开发时间均在 20 世纪 80 年代初。巴黎盆地三叠系普遍有油田水产出,温度多处于 80~100℃,Li 含量介于 27~48mg/L,高于可单独开采的工业品位,边缘补给区地层水 Li 含量较油田水略低,但高者也可达 19.54mg/L(Millot et al, 2011)。

意大利北亚平宁盆地(Apennine Basin)高盐地下水与油气藏形成有关,至今已有多年的研究历史。盆地内 Salsomaggiore 温泉 Li 含量为 78.5mg/L,超过盐湖卤水工业品位,盆地内其余 30 余件水样品(地下水,其中一部分为温泉水)Li 含量介于 0.1~4.2mg/L,单从 Li 资源来看,不具备开采价值

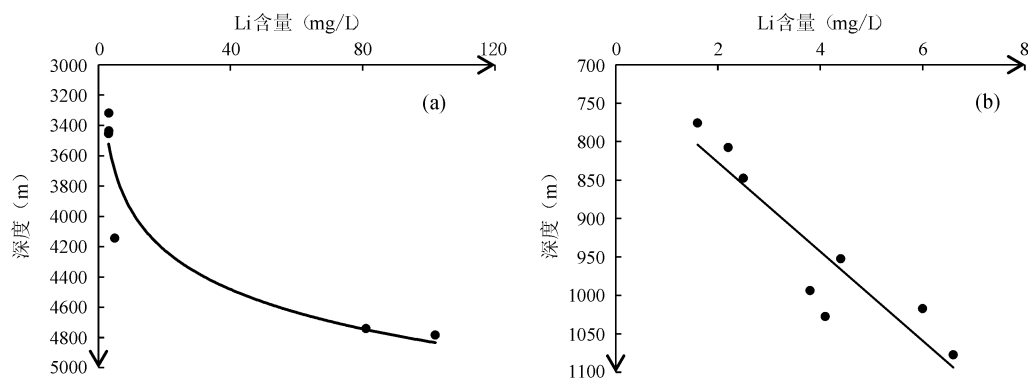


图 1 美国部分油田水 Li 含量随深度变化图

Fig. 1 Relationship between Li concentration and depth of oilfield water from two states of America

(a)—佛罗里达州油田卤水 Li 含量随深度变化;(b)—俄亥俄州油田水 Li 含量随深度变化

(a)—Li concentration in oil field brines at different depth in Florida; (b)—Li concentration in oil field brines at different depth in Ohio

(Boschetti et al. , 2011)。

德国下萨克森州盆地的 Husum-Schneeren 气田产出的气田水 Li 含量介于 9~78mg/L,Altmark 拗陷南缘的 Permian Altmark 气田中气田水 Li 含量介于 52~375mg/L (Lüders et al. , 2010)。

伊朗康安盆地由康安含水层和康安气藏组成,其背斜构造中有丰富的气藏,康安含水层盐度较高, Li 含量为 129~152.7mg/L。康安气田勘探 3 号井中采得的气田水 Li 含量介于 0.01~25.8mg/L,该气田已在开采,加之该盆地含水层盐水资源较好,可以考虑气田废水的再利用及含水层的开发。

科威特的 Rawdatayn 油田和 Sabriyah 油田存在油田水,Rawdatayn 油田的 51 口井的油田水样品 Li 含量介于 0.09~6.48mg/L,Sabriyah 油田的 40 口井的油田水 Li 含量介于 0.05~6.83 mg/L,此两处油田的油田水中 Li 资源基本无提取价值。

印度报道的油气田水 Li 含量数据较少,肯帕德盆地油(气)田水中 Li 含量较低(0.2~0.63mg/L),不具有工业利用价值。阿萨姆盆地大多数正在生产的油井含水量大于 85%,该盆地油气井采得的 5 件油气水 Li 含量介于 15~33mg/L,可以考虑综合利用。

以色列 Heletz-Kokhav 油田产出的油田水中 Li 含量介于 0.97~2.28mg/L,不具提取利用价值。

3 油(气)田水锂提取技术现状

从油(气)田水中提取锂的技术研究进展较少,但是鉴于油(气)田水与盐湖卤水同属液体锂矿产,或可借鉴盐湖卤水提取锂的技术。据 2011 年的统计,全球锂资源的 66% 均来自于卤水型矿产

(Gruber et al. , 2011),且我国 80% 以上的碳酸锂产品产自于盐湖卤水提锂(Wang Jingliang, 1999; Liu Xianglei et al. , 2009),我国在卤水提锂方面已经积累了宝贵的技术经验。

3.1 国内盐湖提锂技术

国内盐湖提锂主要在青海、西藏两地进行,青海及西藏盐湖卤水差异较大,青海为典型的高镁锂比型卤水,提锂难度较大;西藏盐湖锂浓度高且镁锂比值低,非常有利于锂的提取,故两地盐湖卤水提锂工艺差别较大。

青海盐湖属硫酸盐型卤水,Mg、Li 分离是提锂难题,中国科学院盐湖提锂团队提出的提锂工艺为:于盐田利用太阳能将卤水进行日晒浓缩,析盐、析钾,随后通过酸化萃取提硼,以煅烧法生产 Li_2CO_3 产品,该工艺可以较高效地实现镁锂分离。

西藏盐湖中 Li 以碳酸锂的形式存在,可以直接从盐湖中沉淀出来,但是也存在 Li 分阶段沉淀、难以收集的问题,再加上当地交通不便、物料不充足、冬季气候不适宜开展生产等不利因素。为此,中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心提出了“冬储卤—冷冻—日晒—集热沉锂—水浸碳化提纯”新工艺,从卤水中集中沉淀 Li_2CO_3 ,随后按照不同盐类溶解度不同的特点,使用淡水选择性地富集 Li_2CO_3 精矿,有效地解决了当地条件制约生产等问题(Zheng Mianping et al. , 2007)。

3.2 国外盐湖提锂技术

国外现在进行的卤水提锂主要有三处,美国 CyprusFoote 矿物公司开发美国 Silver Peak 卤水,FMC 公司开发阿根廷的 Hombre Muerto 盐湖,智利的 SQM 公司和德国的 Chemetall 公司开发智利

的 Atacama 盐湖。

SQM 公司开采 Atacama 盐湖卤水以生产碳酸锂所采取的工艺为：卤水 NaCl 沉淀池中沉淀出 NaCl，剩余卤水蒸发结晶析出 KCl，经浮选干燥为 KCl 产品，将剩余盐卤于锂蒸发池中进行日光蒸发，使 Li 浓度富集至 6%，使用有机溶剂去除硼，先后加苏打及石灰分别除去 80% 及 60% 的 Mg，再加苏打即可生产出纯度 99% 的碳酸锂产品。

美国 CyprusFoote 矿物公司开发美国 Silver Peak 卤水资源提锂工艺为：通过天然蒸发将卤水 Li 浓缩约 20 倍，加入苏打沉淀出碳酸锂。

美国 FMC 公司开发阿根廷 Hombre Muerto 盐湖采用的是选择性净化吸附法，直接提取氯化锂和碳酸锂，该方法的核心技术及内容未见报道 (Zhong Hui et al., 2003; Zheng Mianping et al., 2007)。

3.3 油(气)田水提锂进展

3.3.1 国内油(气)田水提锂现状

油(气)田水提锂可以根据其化学性质，参照国内外盐湖卤水提锂技术进行改进并优化。我国正在探索油(气)田水提锂新技术，初步取得了较好的成果。

1983 年自贡市井盐设计研究所首次使用 MR-2 新技术实现四川威远气田水的锂提取，该技术获得业界一致认可。其提锂技术基于粉状二氧化锰离子筛从低锂卤水中直接提锂的研究成果，将二氧化锰离子筛替换为用聚乙烯醇粘结二氧化锰成型的 MR-2 离子筛，经柱式交换、洗脱富集锂，用洗脱液制取碳酸锂，钟辉 (Zhong Hui, 2000) 采用偏钛酸型锂离子记忆交换体技术对四川威远气田水分离锂，取得了较好的效果，但是威远气田水后期工业开采状况如何未见报道。2019 年潘磊等针对某高钙油田卤水，采用冷冻结晶/芒硝兑卤复合工艺提取碳酸锂，制备的碳酸锂中主含量可达 96.73% (Pan Lei et al., 2019)。

柴达木盆地南翼山油水湖油田卤水提锂实验是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% 的合格碳酸锂产品 (Li Qinglin, 2006)。该方法基于国内多数盐湖卤水的提锂方法，经改进后在柴达木盆地油田卤水提锂研究中获得成效，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。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，2015 年青海省科技支撑计划中就指出，使用蒸发—冷冻联合法，预计在南翼山油田简称万吨级油田水资源综合利用一体化生产线，实现年产氯化钾 100 万吨、硼酸 8 万吨、碳酸锂 2 万吨、碳酸铯 5 万吨、溴 100 吨、碘 1000 吨。

我国油(气)田水锂的提取实验及相关研究很多，且均取得了较好的提取效果，但是各处油(气)田水真正进入工业开采阶段的却少之又少。通常油(气)田水均可以实现油水同产或者气水同采，开采成本应该较深层井卤要低很多，我国目前对油(气)田水工业开采很少的原因可能是各地油(气)田水化学成分差异较大，提锂需要研究新的提锂工艺或者至少在已有工艺基础上进行改进，成本较高。

3.3.2 国外油(气)田水提锂现状

国外在从事油田水提锂的公司主要是 MGX Minerals 公司，总部位于加拿大温哥华，该公司涉及的项目有盐湖卤水 (智利、美国)、地热水、油田水 (加拿大、美国) 以及含锂废水中提锂，亦从事一些新型电池的研发。目前在开展的油田水提锂项目有加拿大鲑鱼湖油田水提锂、美国犹他州油田水提锂，该公司下一步计划勘探、收购美国科罗拉州、得克萨斯州及阿肯色州的高 Li 油田水。该公司设计了快速提取油田水中锂的新工艺，传统盐湖卤水提锂的太阳能蒸发浓缩环节通常需要数月，该公司新技术仅需数小时采用纳米过滤技术从复杂的盐水中提取锂，避免了长时间浓缩的时间成本，使得以前无法实现锂提取的部分资源 (油田水，油田废水等) 已经投入生产利用，该技术已申请专利，MGX Minerals 公司因此屡获殊荣，但其核心技术暂未对外公开。

该公司 2016 年起获得加拿大鲑鱼湖油田项目的许可证，该项目面积 132,773.74 公顷，其中产出于 Leduc 地层的油田水 Li 平均含量为 67mg/L；同年获得艾伯塔省 Redwater 和 Swan Hills 油田的油田水勘探及开采许可证；2017 年收购了位于犹他州 Paradox 盆地的里斯本谷石油锂项目，涵盖了里斯本谷石油和天然气田的大部分。

4 结论

(1) 我国油(气)田水分布广泛，化学性质不一，含锂情况也各不相同。其中锂含量达工业品位的油(气)田水资源量较可观，且多可实现油水同采、气水同采，开采成本较普通深层井卤要低得多，是不可忽视的优质液体锂矿产。

(2) 我国油(气)田水资源量可观，品质优异，尤

其是高矿化度盐卤水湖相沉积盆地的油(气)田水,不但含锂,还含有其他多种有用组分,如钾、溴、锶、钼、碘、硼等,通常可以与油、气藏一同被开采,非常适合综合利用,在此条件下应当加大综合利用研究。

(3)目前我国油(气)田水的主要处理方式是回注地层或者净化后做灌溉用水,综合利用考虑地较少。油(气)田水提锂的难点之一就是可行的提锂技术支撑,我国盐湖卤水提锂技术虽然较为成熟,但将其应用至油(气)田水领域仍需优化及革新。近年来针对油(气)田水提锂的关键技术也在不断提出或改进,丰富的油(气)田水资源加上可行的提锂技术,将有助于增加我国液体锂资源储量并实现产业化。

致谢:文章撰写过程中得到自然资源部矿产勘查技术指导中心王瑞江研究员及中国地质科学院杨岳清等老专家的支持和指导,另外感谢审稿老师和本刊编辑提出的宝贵修改意见,在此表示由衷的感谢。

References

- Alfarhan A A, Duane M J. 2012. Geochemistry and modification of oilfield brines in surface pits in northern Kuwait. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(5): 1055~1068.
- An Wenhong, Shi Xiaohu, Liu Shixin, Chen Hongfei, Jiao Tingkui. 2014. Study on the pattern of gas-water distribution in Zizhou gasfield. *Petrochemical Industry Application*, 33(7): 14~17 (in Chinese with English abstract).
- Bagheri R, Nadri A, Raeisi E, Kazemi G A, Eggenkamp H G M, Montaseri A. 2014. Origin of brine in the Kangan gasfield: isotopic and hydrogeochemical approaches. *Environmental Earth Sciences*, 72(4): 1055~1072.
- Ball J W, Nordstrom D K, McCleskey R B, Schoonen M A, Xu Y. 2001. Water-chemistry and on-site sulfur-speciation data for selected springs in Yellowstone National Park, Wyoming, 1996~1998. US Geological Survey.
- Ball J W, McCleskey R B, Nordstrom D K, Holloway J M, Verplanck P L, Sturtevant S A. 2002. Water-chemistry data for selected springs, geysers, and streams in Yellowstone National Park, Wyoming, 1999~2000. US Geological Survey.
- Boschetti T, Toscani L, Shouakar Stash O, Iacumin P, Venturelli G, Mucchino C, Frappe S K. 2011. Salt waters of the northern Apennine Foredeep Basin (Italy): origin and evolution. *Aquatic Geochemistry*, 17(1): 71~108.
- Breen K J, Angelo C G, Masters R W, Sedam A C. 1985. Chemical and isotopic characteristics of brines from three oil-and gasproducing sandstones in eastern Ohio, with applications to the geochemical tracing of brine sources. *Water-Resources Investigation Report*.
- Cai Chunfang, Mei Bowen, Li Wei. 1996. The hydrogeochemistry of oilfield in Tarim Basin. *Geochimica*, 25(6): 614~623 (in Chinese with English abstract).
- Cai Chunfang, Peng Licai, Mei Bowen, Xiao Yingka. 2006. B, Sr, O and H isotopic compositions of formation waters from the Bachu Bulge in the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 80(4): 550~556.
- Cao Qin, Zhou Xun, Zhang Huan, Chen Ting, Zhang Yongshuai, Wang Lidong, Huang Xi, Shen Ye. 2015. Hydrochemical characteristics and genesis of the subsurface brines in the Wologhe brine-bearing structure of Sichuan Basin. *Geological Bulletin of China*, 34(5): 990~997 (in Chinese with English abstract).
- Chan L H, Starinsky A, Katz A. 2002. The behavior of lithium and its isotopes in oilfield brines: evidence from the Heletz-Kokhav field, Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(4): 615~623.
- Chen Xiaowei, Zhou Kenken, Mu Chuanlong, Li Xiaoguang, Ma Hongman, Wu Hao, Li Zhidan. 2016. Analysis of the potential of underground brine lithium resource in the typical brine-reserve structures in Sichuan Basin. *Light Metals*, (10): 7~11 (in Chinese with English abstract).
- Dong Guanghua. 1991. Oilfield water will be the second resource of the Karamay oilfield. *Xinjiang Petroleum Geology*, (1): 17 (in Chinese with English abstract).
- Eccles D R, Dufresne M B. 2012. Ageological introduction to the lithium-brine potential at MGX Minerals Inc.'s Sturgeon Lake Sub-Property, West-Central Alberta. Technical Report Completed on behalf of MGX Minerals Inc, 2016.
- Fan Fu, Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Bao Hongping, Zhang Zhen, Gong Wenqiang. 2012. Discovery of oil field water with high content of Br^- , I^- , Li^+ , K^+ as the indication of finding potash in Jingbian gas field. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 141~147 (in Chinese with English abstract).
- Feng Qiyang, Han Baoping. 2001. Occurrence of trace elements in reservoir, oilfield water, and scaling of Wumishan Formation, Renqiu, China. *Journal of China University of Mining & Technology*, 30(2): 122~125 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianlong, Yu Shengsong, Li Shijin, Ren Haiyan. 2005. Analysis of the availability of brine water resources in the Tertiary oilfields in the western Qaidam Basin. *Salt Lake Research*, 13(3): 17~21 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianlong, Wu Chan, Shu Shulan, Shi Tiancheng, Zhang Zhian. 2006. Study on the characteristics and influencing factor for the enrichment of potassium, lithium, and boron in the oil field waters of western Qaidam Basin. *Salt Lake Research*, 14(4): 22~25 (in Chinese with English abstract).
- Gaillardet J, Viers J, Dupré B. 2003. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*.
- Gao Juanqin, Yu Yang, Zhong Jiaai, Liu Zhu, Zhang Sai, Pang Bo. 2019. Geochemistry and lithium-bearing characteristics of fluids from borehole in Huangjinkou anticline of the northeastern Sichuan, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(2): 197~208 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xixing. 1994. Oil (Gas) Field Water in Chinese Oil (Gas) Basin. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Gogoi S B, Sen R K, Rajbongshi A, Hazarika K. 2015. Characterization of oil field produced waters of Upper Assam Basin, India. *Int. J. New Technol. Sci. Eng.*, 2(1): 1~7.
- Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Kesler S E, Everson M P, Wallington T J. 2011. Global lithium availability: A constraint for electric vehicles? *Journal of Industrial Ecology*, 15(5): 760~775.
- Han Fengqing. 2001. The geochemistry of lithium in salt lake on Qinghai-Tibetan plateau. *Journal of Salt Lake Research*, 9(1): 55~61 (in Chinese with English abstract).
- Han Jiajun. 2013. Hydrochemical characteristics, origin, evolution and resources of the subsurface brines in Western Qaidam Basin. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- He Xiaoku, Kang Ni. 2017. Application of oilfield water data in oil and gas exploration and development. *Industrial & Science Tribune*, 16(9): 93~94 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hua, Liu Chenglin, Zhang Shiwan, Xu Haiming, Ye Jianzhong, Wang Chunlian, Peng Wei, Wen Hui. 2014. Application of geophysical detection method to exploration of deep potassium-rich brine formation: A case study of Jiangling

- Depression. *Mineral Deposit*, 33(5): 1101~1107 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongpu, Zheng Mianping, Hou Xianhua, Yan Lijuan. 2015. Control factors and water chemical characteristics of potassium-rich deep brine in Nanyishan structure of western Qaidam Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(1): 41~50 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiansen, Li Tingwei, Peng Ximing, Han Yuanhong, Li Zhongping, Ma Haizhou. 2014. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in the Tertiary in western Qaidam Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(1): 50~55 (in Chinese with English abstract).
- Li Qinglin. 2006. Extraction of lithium from oil field brine in Chaidamu Basin. *Industrial Minerals & Processing*, (8):16~17 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Chen Xia, Liu Chenglin, Ma Lichun. 2014. Study on loss mechanism of rubidium during potassium crystallization from potassium-rich brine of Jiangling sunken area. *Inorganic Chemicals Industry*, 46(2): 18~20 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenxia, Zhang Xiyang, Miao Weiliang, Li Yongshou, Tang Qiliang, Wang Bo, Li Yuan, Zhu Guangqin. 2016. Hydrochemical Characteristics of Oilfield Waters in Lenghu No. 3 Structure Area of North Edge of Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 24(2): 12~18 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianqing, Hou Dujie, Zhang Aiyun. 2001. Advancement of the geochemical study of oilfield water. *Geological Science and Technology Information*, 20(2): 51~54 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 1999. Sichuan gas field water comprehensive development prospects. *Chinese Geology*, (5): 23~24 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 2006. Resource advantages of the underground brines of Sichuan Basin and the outlook of their comprehensive exploitation. *Journal of Salt Lake Research*, 14(4):1~8 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, He Jinquan, Wang Tianding, Ye Maocai. 2002. Geochemical characteristics of potassium rich brine in middle triassic Chengdu salt basin of Sichuan basin and its prospects for brine tapping. *Chemical Mineral Geology*, 24(02): 72~84 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, Chen Shaolan. 2008. Exploration and development prospect of underground brine in Sichuan Basin. *Journal of Salt Lake Research*, (1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xianglei, Zhong Hui, Tang Zhongjie. 2009. Current status and existing problems of lithium extraction technology from salt lake. *Inorganic Chemicals Industry*, 41(6):4~6 (in Chinese with English abstract).
- Lüders V, Plessen B, Romer R L, Weise S M, Banks D A, Hoth P, Duisi P, Schettler G. 2010. Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin. *Chemical Geology*, 276(3-4): 198~208.
- Millot R, Guerrot C, Innocent C, Négrel P, Sanjuan B. 2011. Chemical, multi-isotopic (Li-B-Sr-U-H-O) and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin. *Chemical Geology*, 283(3-4): 226~241.
- Mineral Resources Industry Requirements Manual Editorial Committee. 2012. *Mineral Resources Industry Requirements Manual*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Mu Yanzong, Mie Zhen, Bu Lingzhong, Wang Yunsheng, Wu Qian. 2016. Progress in study of potash resources of oil (gas) field brine in China. *Advances in Earth Science*, 31(2):147~160 (in Chinese with English abstract).
- Pan Lei, Li Longtao, Tang Yaochun. 2019. Research on Li⁺ enriching technology in oilfield brine with high Ca²⁺. *Inorganic Chemicals Industry*, 51(2): 42~44 (in Chinese with English abstract).
- abstract).
- Qian Yixiong, Cai Liguang, Gu Yi. 2003. The oilfield water in Tahe area, Tarim Basin—constraints from its element composition. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(6):751~757 (in Chinese with English abstract).
- Rebary B, Raichura M, Mangukia S R, Patidar R. 2014. Mapping of iodine, lithium and strontium in oilfield water of Cambay basin, Gujarat. *Journal of the Geological Society of India*, 83(6): 669~675.
- Song Hebin. 1997. The hydrochemistry and isotope geochemistry of brines which enrich in potash, boron and bromine in Pinlopa well 4 in Chengdu Sold Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 18(3):282~289 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongbing, Cao Chengdong, Li Tingwei, Fan Qishun. 2007. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 313~320 (in Chinese with English abstract).
- Tapan G J, Subrata G B, Shilpi S. 2018. A green approach for oil field produced waters of upper Assam Basin, Springer, Cham., 276(3-4): 151~171.
- Vine J D. 1976. Lithium resources and requirements by the year 2000. Geological Survey, Denver, Colo. (USA).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Fu Xiaofang, Sun Yan, Wang Chenghui, Hao Xuefeng, Liu Lijun, Pan Meng, Hou Jianglong, Dai Jingjing, Tian Shihong, Yu Yang. 2016. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: a case study of the Jiajika large lithium mineral resource base. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 471~480 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Sun Yan, Liu Xifang, Tian Shihong, Dai Jingjing, Liu Lijun, Ma Shengchao. 2018. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal. *Geological Survey of China*, 5(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingliang. 1999. The present status of lithium extraction from li-bearing brines. *Industrial Minerals & Processing*, (12):1~5 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yunpu. 1983. Discussion on the ways and methods to solve the classification of oil chemical composition in oilfields. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (6): 14~16 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Cong, Du Yao, Chen Liuzhu, Jiang Ping, Ma Teng. 2015. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the oilfield water in the north part of the sedimentary basins in the South China Sea. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 42(2): 16~23 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhonghui, Zhou Jingtian, Li Shuqin. 1982. Hydrogeochemical indicators and its application to petroleum exploration. *Oil & Gas Geology*, 3(4): 327~334 (in Chinese with English abstract).
- Ye Yan, Gao Lixin. 2001. Some views on the water treatment of Sichuan gas field. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 30(5): 263~265 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Hanyu, Ma Hongman, Wu Wenhui, Qin Yulong, Wu He, Yi Shengli. 2018. Mineralization characteristics and target area prediction of underground brine lithium mine in Zigong area, Sichuan Province. *Geological Survey of China*, 5(4):17~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baoquan. 2000. Survey of lithium extraction from salt lake brine in Qaidam Basin. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 29(4):9~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinlai. 1979. The basic characteristics and classification of oilfield water in China. *Geological Review*, 25(2): 64~69 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jintang, Zhang Ping. 1992. A primary study on the hydrochemical properties of the brines from an oil field in Hubei. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology*, 14

(1); 61~67 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhibo, Huang Jing, Li Lirong, Li Songyu, Ning Qiangqiang, Jin Tengrui. 2017. Research progress of oil field water classification method and application. *Energy Research and Management*, (2): 21~23 (in Chinese with English abstract).

Zheng Mianping, Liu Xifang. 2007. Lithium resources in China. *New Materials Industry*, (8): 13~16 (in Chinese with English abstract).

Zhong Hui. 2000. Property of H₂ TiO₃ type ion-exchangers and extraction of lithium from brine of natural gas wells. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 17(3): 307~309 (in Chinese with English abstract).

Zhong Hui, Guo Linghong. 1994. A brief review of the development and application of lithium resources in oil and gas fields. *Sichuan Nonferrous Metals*, (2): 26~29 (in Chinese with English abstract).

Zhong Hui, Zhou Yanfang, Yin Huian. 2003. Progress in technology for extracting lithium from Li-bearing brine resources. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1: 23~28 (in Chinese with English abstract).

Zhu Yanyun, Yang Xueliang. 1986. The distribution characteristics of trace element in oilfield water of Biyang Depression and its relationship to oil and gas. *Experimental Petroleum Geology*, 8(4): 375~385 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

安文宏, 石小虎, 刘士鑫, 陈红飞, 焦廷奎. 2014. 子洲气田气水分布规律研究. *石油化工应用*, 33(7): 14~17.

蔡春芳, 梅博文, 李伟. 1996. 塔里木盆地油田水文地球化学. *地球化学*, 25(6): 614~623.

曹琴, 周训, 张欢, 陈婷, 张永帅, 王黎栋, 黄熙, 沈晔. 2015. 四川盆地卧龙河储卤构造地下卤水的水化学特征及成因. *地质通报*, 34(5): 990~997.

陈小炜, 周昱昱, 牟传龙, 李效广, 马红嫚, 伍皓, 李志丹. 2016. 浅析四川盆地典型储卤构造地下卤水型锂资源潜力. *轻金属*, (10): 7~11.

董广华. 1991. 油田水将是克拉玛依油田的第二资源. *新疆石油地质*, (1): 17.

樊巍, 郑绵平, 张永生, 包洪平, 张震, 龚文强. 2012. 靖边气田富 Br⁻、I⁻、Li⁺、K⁺ 油田水的发现及对找钾的启示. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 42(2): 141~147.

冯启言, 韩宝平. 2001. 任丘雾迷山组储层、水、结垢中微量元素赋存特征. *中国矿业大学学报*, 30(2): 122~125.

付建龙, 于升松, 李世金, 任海燕. 2005. 柴达木盆地西部第三系油田卤水资源可利用性分析. *盐湖研究*, 13(3): 17~21.

付建龙, 吴蝉, 舒树兰, 石天成, 张志安. 2006. 柴达木盆地西部油田水钾硼锂富集规律及影响因素研究. *盐湖研究*, 14(4): 22~25.

高娟琴, 于扬, 仲佳爱, 刘铸, 张塞, 庞博. 2019. 川东北黄金口背斜 ZK001 钻孔流体地球化学及含锂特征. *地球科学与环境学报*, 41(2): 197~208.

高锡兴. 1994. 中国含油气盆地油田水. 北京: 石油工业出版社.

韩凤清. 2001. 青藏高原盐湖 Li 地球化学. *盐湖研究*, 9(1): 55~61.

韩佳君. 2013. 柴达木盆地西部地下卤水起源演化与资源量评价. 中国地质大学(北京).

何小曲, 康妮. 2017. 油田水资料在油气勘探与开发中的应用. *产业与科技论坛*, 16(9): 93~94.

黄华, 刘成林, 张士万, 徐海明, 叶建中, 王春连, 彭伟, 文辉. 2014. 深层富钾卤水的地球物理探测技术及应用——以江陵凹陷为例. *矿床地质*, 33(5): 1101~1107.

矿产资源工业要求手册编委会. 2012. 矿产资源工业要求手册. 北京: 地质出版社.

李洪普, 郑绵平, 侯献华, 闫立娟. 2015. 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. *地球学报*, 36(1): 41

~50.

李建森, 李廷伟, 彭喜明, 韩元红, 李中平, 马海州. 2014. 柴达木盆地西部第三系油田水文地球化学特征. *石油与天然气地质*, 35(1): 50~55.

李青林. 2006. 柴达木盆地油田卤水提锂实验研究. *化工矿物与加工*, (8): 16~17.

李瑞琴, 陈侠, 刘成林, 马黎春. 2014. 江陵富钾卤水析钾过程中铷流失机理研究. *无机盐工业*, 46(2): 18~20.

李雯霞, 张西营, 苗卫良, 李永寿, 唐启亮, 王波, 李园, 朱广琴. 2016. 柴达木盆地北缘冷湖三号构造油田水水化学特征. *盐湖研究*, 24(2): 12~18.

李贤庆, 侯读杰, 张爱云. 2001. 油田水地球化学研究进展. *地质科技情报*, 20(2): 51~54.

林耀庭. 1999. 四川气田水综合开发前景展望. *中国地质*, (5): 23~24.

林耀庭. 2006. 四川盆地地下卤水资源优势及综合开发前景. *盐湖研究*, 14(4): 1~8.

林耀庭, 何金权, 王田丁, 叶茂才. 2002. 四川盆地中三叠统成都盐盆富钾卤水地球化学特征及其勘查开发前景研究. *化工矿产地质*, 24(02): 72~84.

林耀庭, 陈绍兰. 2008. 四川盆地地下卤水勘探开发前景展望. *盐湖研究*, (1): 1~7.

刘向磊, 钟辉, 唐中杰. 2009. 盐湖卤水提锂工艺技术现状及存在的问题. *无机盐工业*, 41(6): 4~6.

穆延宗, 乜贞, 卜令忠, 王云生, 伍倩. 2016. 我国油(气)田水钾资源研究进展. *地球科学进展*, 31(2): 147~160.

潘磊, 李龙涛, 唐耀春. 2019. 高钙油田卤水富锂工艺研究. *无机盐工业*, 51(2): 42~44.

钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 2003. 塔里木盆地塔河油区油田水元素组成与形成. 25(6): 751~757.

宋鹤彬. 1997. 川西成都盐盆平落 4 井富钾硼溴浓卤水水化学同位素地球化学特征及形成机制. *地球学报: 中国地质科学院院报*, 18(3): 282~289.

谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 樊启顺. 2007. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化. *古地理学报*, 9(3): 313~320.

王登红, 王瑞江, 付小方, 孙艳, 王成辉, 郝雪峰, 刘丽君, 潘蒙, 侯江龙, 代晶晶, 田世洪, 于扬. 2016. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨——以四川甲基卡大型锂矿基地为例. *地球学报*, 37(4): 471~480.

王登红, 孙艳, 刘喜方, 田世洪, 代晶晶, 刘丽君, 马圣钊. 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向. *中国地质调查*, 5(1): 1~9.

汪镜亮. 1999. 卤水锂资源提锂现状. *化工矿物与加工*, (12): 1~5.

汪蕴璞. 1983. 试论解决油田水化学成分分类的途径和方法. *水文地质工程地质*, (6): 14~16.

肖聰, 杜尧, 陈柳竹, 姜平, 马腾. 2015. 南海北部沉积盆地油田水水化学特征及其成因分析. *水文地质工程地质*, 42(2): 16~23.

杨忠辉, 周景田, 李淑琴. 1982. 油气田的水文地球化学标志及其应用. *石油与天然气地质*, 3(4): 327~334.

叶燕, 高立新. 2001. 对四川气田水处理的几点看法. *石油与天然气化工*, 30(5): 263~265.

詹涵钰, 马红嫚, 武文辉, 秦宇龙, 吴和, 易胜利. 2018. 四川自贡地区地下卤水锂矿化特征及靶区预测. *中国地质调查*, 5(4): 17~24.

张宝全. 2000. 柴达木盆地盐湖卤水提锂研究概况. *海湖盐与化工*, 29(4): 9~13.

张金来. 1979. 我国油田水的基本特征及其分类讨论. *地质论评*, 25(2): 64~69.

张进荣, 张平. 1992. 湖北某油田卤水水化学特性初探. *武汉化工学院学报*, 14(1): 61~67.

张治波, 黄敬, 李丽荣, 李松倬, 宁强强, 金腾瑞. 2017. 油田水分类方法及应用的研究进展. *能源研究与管理*, (2): 21~23.

郑绵平, 刘喜方. 2007. 中国的锂资源. 新材料产业, (8): 13~16.
钟辉, 郭灵虹. 1994. 油气田水中的锂资源开发应用简评. 四川有色金属, (2): 26~29.
钟辉. 2000. 偏钛酸型锂离子交换剂的交换性质及从气田卤水中提锂. 应用化学, 17(3):307~309.
钟辉, 周燕芳, 殷辉安. 2003. 卤水锂资源开发技术进展. 矿产综合利用, 1: 23~28.
朱沿云, 杨学良. 1986. 泌阳凹陷油田水微量元素分布特征及其与油气的关系. 石油实验地质, 8(4): 375~385.

Current status and prospects of lithium extraction in major domestic and foreign oil (gas) field waters

GAO Juanqin^{1,2)}, WANG Denghong²⁾, WANG Wei³⁾, YU Feng^{1,2)}, YU Yang²⁾

1) *Department of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing, 100083;*

2) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

3) *Geology and Mineral Resources Scientific Institute of Sichuan Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu, 610036*

** Corresponding author: wangdenghong@vip.sina.com*

Abstract

Oil (gas) fields are often accompanied by oil (gas) field water, which usually has high lithium concentration than some other waters in natural environment, and some of them even can reach lithium industrial grades. Chinese oil (gas) field has large water reserves and lithium resources. However, it has been neglected for a long time. Under the background of a series of breakthroughs were made in extracting lithium from salt lake brine, the proportion of brine-type lithium resources has increased year by year. Lithium resources in oil (gas) field water should also be taken into account seriously. Lithium concentration and distribution characteristics of oil (gas) fields water and summarizes the current status of water extraction technology in the main domestic and foreign oil (gas) fields were summarized in this study to providing advices for the comprehensive utilization of oil (gas) fields water in China.

Key words: oil (gas) field water; lithium resources; distribution characteristics; geochemistry; comprehensive utilization