西藏南部地热型锂资源特征与分布规律

罗璐,周总瑛,朱霞,何春艳,刘慧盈

(中国石化集团新星石油公司,中国石化集团地热资源开发利用 重点实验室,北京 100083)

摘要:这是一篇矿业工程领域的论文。西藏南部是我国高温地热带的主要分布区之一,拥有丰富的地热 资源。地热水化学分析测试结果显示,西藏南部高温地热带地热水中的锂含量最高可达 34.51 mg/L,地热锂的 相对丰度明显优于北美西部高原的克莱顿谷和南美安第斯高原的乌尤尼等世界典型的高原型盐湖卤水锂的相对 丰度的盐湖卤水,镁锂比大部分小于 3,有利于卤水提锂。西藏南部高温地热带地热水中锂含量较高的区域均 分布在雅鲁藏布江缝合带及其以南地区,与富锂岩石的分布范围一致,同时雅鲁藏布江缝合带及其以南地区地 热水的 Cl-Na 型地热水比北部的更多,南部地热水的 TDS 更高,循环路径更长。根据地热水的氢氧稳定同位素 和周围富锂盐湖卤水中锂的物源推断了地热水锂的物源主要有两种,分别是地热水对富锂岩石的溶滤作用和岩 浆分异过程中形成的富锂岩浆热液。

关键词:矿业工程;西藏南部;高温地热带;地热型锂资源

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.005

中图分类号: TD953 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)04-0035-08

引用格式:罗璐,周总瑛,朱霞,等.西藏南部地热型锂资源特征与分布规律[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 35-42. LUO Lu, ZHOU Zongying, ZHU Xia, et al. Characteristics and distribution of geothermal-type lithium resources in southern xizang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 35-42.

近年来,随着新技术和新能源汽车等行业锂 离子电池消费量的快速增长,锂在新技术行业的 消费量正在高速增长,这种趋势对全球锂矿资源 的供应提出更高的要求^[1-3],硬岩型、卤水型和锂 云母型三种类型的锂矿提锂技术近些年也愈发成 熟^[4-6]。盐湖卤水锂为世界锂的需求贡献了 3/4 的 产量,其中,作为卤水型锂矿之一的地热型锂资 源越来越受到关注,地热水是富锂盐湖卤水中锂 的重要来源^[7]。因此,许多学者开展了富锂地热水 的研究工作,认为地热型锂资源有望成为一种可 有效开发利用的锂矿床新类型^[8-9]。

1 区域构造背景

西藏南部是我国高温地热带的主要分布区之 一,拥有丰富的地热资源,共有地热显示区约 400 处,包括热泉、沸泉、温泉和间接沸泉^[10]。西 藏的热水活动是青藏高原碰撞造山过程的产物, 区域断裂构造控制了水热活动的分布和规模,而 纵横交错的活动构造组成的构造断裂系统,为地 下流体提供了储集空间和运移通道^[11]。研究区活 动构造的规模明显地控制了水热活动区,东西向 展布的班公-怒江缝合带、雅鲁藏布江缝合带及二 者之间的嘉黎-喀喇昆仑右行走滑断裂,是明显的 水热活动分区的界限。以北部的班公错-怒江缝合 带为边界,向南水热活动逐渐增强,同时该断裂 存在明显的壳幔热交换作用^[12]。本研究区主要位 于班公错-怒江缝合带以南和嘉黎-喀喇昆仑断裂以 西的西藏南部高温水热活动区。

青藏高原深部构造运动后引起的地壳物质的 部分熔融体作为热源,沿构造裂隙上涌在上地壳

收稿日期: 2023-11-13

基金项目:中国石化集团科技项目 (No.JKL21005)

作者简介:罗璐(1989-),女,博士,高级工程师,主要从事地热资源勘探工作。

形成局部熔融体,不连续地分布于 15~35 km 深 度,为西藏南部地热带提供主要热源[12]。在挤压 背景下,东西向伸展的近南北向地堑在青藏高原 内广泛分布,且都为第四纪地堑[13]。其中,分布 于班公错-怒江缝合带以南的南北向地堑是西藏南 部高温地热带最主要的分布区, 与东西走向的缝 合带相垂直。这些地堑及断陷盆地由于应力的释 放而成为构造薄弱区,进而使中下地壳熔融体及 岩浆物质的上涌成为可能并为其提供了构造通 道,在地堑内沉积的中新生代沉积地层以及中新 生代的侵入岩及火山碎屑岩由于疏松多孔,渗透 率及导热性好而成为了优质的地热储层,在张性 正断层及基岩裂隙的共同作用下,地壳浅部的流 体被加热并发生对流最终形成了隆起山地对流型 高温地热系统^[14]。申扎-定结、那曲-亚东、日多-错那这三条地堑就是地表地热显示最强烈的地 区。据水热显示区的疏密、活动构造发育的规 模,水热活动区可以划分不同的带,界线基本与

相应的活动构造带一致,即申扎-定结地热带、亚 东-谷露地热带、错那-沃卡地热带。这三个水热型 地热活动带也是西藏南部三条近南北向地堑主要 发育的地区。申扎-定结高温地热带(定结-申扎地 堑)呈北东-南西向延伸 200 km,东距日喀则市约 50 km。亚东-谷露高温地热带(亚东-羊八井地 堑)呈北东-南西向延伸 590 km,为最具开发潜力 的地区,羊八井、羊易等地热田均位于此区。错 那-沃卡高温地热带(错那地堑)呈北东-南西向延 伸 250 km。

2 采样及分析测试方法

为开展西藏南部地热水锂资源分布规律及地 球化学特征研究,笔者于 2020 年、2021 年采集多 个地热水样品,且均为温泉水样。采样点分布点 主要集中于西藏南部的三条高温地热带,即申扎-定结地热带,亚东-谷露地热带和错那-沃卡地热 带,水化学测试结果见表1。

表 1 西藏南部代表性地热水化学组分分析结果 Table 1 Chemical composition analysis results of representative geothermal water in Southern Xizang

	-				_		-					-	
样品 编号 pH	nU估	温度/℃	水化学类型	浓度/(mg/L)									
	рпш			TDS	Na ⁺	K^+	Mg^{2+}	Ca ²⁺	Cl	HCO ₃ -	SO4 ²⁻	CO3 ²⁻	Li
G101	9.17	86.0	Na-Cl·HCO ₃	2 211	561.50	72.44	1.23	3.88	595.43	416.24	30.83	143.58	17.65
G102	9.27	82.0	$Na-SO_4 \cdot HCO_3$	418	101.32	4.03	0.33	1.97	29.76	88.13	77.25	14.29	0.339
G103	8.21	84.0	Na-HCO ₃ ·Cl	1 612	422.61	48.68	0.11	3.11	276.07	635.68	83.56	0.00	10.78
G104	8.04	69.0	Na-HCO ₃	814	226.07	22.83	3.02	25.96	64.28	529.42	79.88	0.00	0.96
G105	7.18	77.0	Na-HCO ₃	988	291.37	23.01	9.25	36.67	91.88	782.13	48.39	0.00	1.12
G106	6.77	59.0	Na-Cl·HCO ₃	2 929	680.00	70.78	11.95	107.68	797.00	774.10	165.43	0.00	23.84
G107	6.86	28.5	Na-Cl·HCO ₃	2 614	584.88	68.08	9.78	120.16	660.25	755.53	144.92	0.00	20.74
G108	7.68	28.2	Na-Cl·HCO ₃	3 241	719.08	70.27	16.28	164.18	873.81	867.54	189.60	0.00	23.67
G109	7.25	44.5	Na-Cl·HCO ₃	2 503	576.22	59.82	7.80	104.52	682.28	682.39	139.39	0.00	20.1
G110	7.68	47.6	Na-HCO ₃ ·Cl	419	120.29	6.36	1.50	19.26	47.97	287.31	25.60	0.00	0.352
G111	7.86	62.0	Na-HCO ₃	653	181.17	9.55	2.27	25.01	56.77	345.22	88.05	0.00	0.593
G112	7.64	60.1	Na-HCO ₃	623	182.18	9.73	1.59	20.63	57.53	352.10	67.62	0.00	0.577
G113	8.29	40.3	Na-HCO ₃	601	184.33	9.82	0.85	14.88	56.67	365.56	35.31	8.88	0.621
G114	7.91	60.2	Na-HCO ₃ ·Cl	417	121.21	6.76	0.56	15.73	47.59	259.27	30.89	0.00	0.427
G201	8.7	75.0	Na-SO ₄ ·Cl	608	142.93	7.73	0.21	10.57	88.57	72.39	123.80	10.73	1.45
G202	8.44	77.0	$Na\text{-}SO_4\text{-}Cl\text{-}HCO_3$	613	157.80	7.36	0.46	8.91	93.22	93.91	129.31	10.98	1.475
G203	7.34	49.0	$Na\text{-}Cl{\cdot}SO_4{\cdot}HCO_3$	2 767	731.57	34.84	10.13	164.51	573.88	597.05	696.37	0.00	4.015
G204	8.83	50.0	Na-SO ₄ ·Cl	805	215.91	4.77	0.09	13.52	141.15	27.71	235.13	6.80	0.524
G205	7.64	86.9	Na-Cl·HCO ₃	1 385	391.16	42.73	0.10	2.41	339.44	413.42	53.96	0.00	9.068
G206	9.5	82.3	Na-SO ₄ ·Cl·HCO ₃	1 295	329.76	21.08	0.41	2.76	145.47	242.16	202.91	86.50	8.511
G207	8.77	79.8	Na-Cl·HCO ₃	1 313	357.49	42.35	0.22	2.82	331.65	289.48	45.98	40.05	0.425
G208	9.11	-	$\text{Na-HCO}_3{\cdot}\text{Cl}{\cdot}\text{SO}_4$	1 454	360.45	33.44	0.10	3.79	152.29	389.91	203.32	53.55	13.31
	样品 G101 G102 G103 G104 G105 G106 G107 G108 G109 G110 G111 G112 G113 G114 G201 G202 G203 G204 G205 G206 G207 G208	 特品 ウ.H伯G1019.27G1029.27G1038.21G1048.04G1057.18G1066.77G1076.86G1087.25G1107.25G1107.68G1117.86G1127.61G1138.29G1147.91G2018.71G2028.44G2037.34G2048.83G2057.64G2069.51G2078.77G2089.11	 	 指品 编号 い い い い いG1019.1786.0Na-Cl·HCO3G1029.2782.0Na-SO4·HCO3G1038.2184.0Na-HCO3·ClG1048.0469.0Na-HCO3G1057.1877.0Na-HCO3G1066.7759.0Na-Cl·HCO3G1076.8628.5Na-Cl·HCO3G1087.6828.2Na-Cl·HCO3G1097.2544.5Na-Cl·HCO3G1107.6847.6Na-HCO3·ClG1117.8662.0Na-HCO3G1127.6460.1Na-HCO3G1138.2940.3Na-HCO3G1147.9160.2Na-HCO3·ClG2018.7775.0Na-SO4·ClG2028.4477.0Na-SO4·ClG2037.3449.0Na-Cl·HCO3G2048.8350.0Na-SO4·ClG2057.6486.9Na-Cl·HCO3G2069.582.3Na-SO4·Cl·HCO3G2078.7779.8Na-Cl·HCO3G2089.11-Na-HCO3·Cl·SO4		 指令 编令 過度/ 水化学类型 TDSNa*G1019.1786.0Na-Cl·HCO32.211561.50G1029.2782.0Na-SO4·HCO3418101.32G1038.2184.0Na-HCO3·Cl1.612422.61G1048.0469.0Na-HCO3814226.07G1057.1877.0Na-HCO3988291.37G1066.7759.0Na-Cl·HCO32.929680.00G1076.8628.5Na-Cl·HCO32.614584.88G1087.6828.2Na-Cl·HCO32.614584.88G1097.2544.5Na-Cl·HCO32.503576.22G1107.6847.6Na-HCO3·Cl419120.29G1117.8662.0Na-HCO3613181.17G1127.6460.1Na-HCO3613182.18G1138.2940.3Na-HCO3·Cl417121.21G2018.7775.0Na-HCO3·Cl417121.21G2028.4477.0Na-SO4·Cl608142.93G2037.3449.0Na-Cl·HCO32.163515.19G2048.8350.0Na-Cl·HCO31.315391.16G2057.6486.9Na-Cl·HCO31.315329.74G2069.582.3Na-SO4·Cl·HCO31.315329.74G2057.6486.9Na-Cl·HCO31.315329.74G2069.582.3N	 描記 水化学类型 TDSNa ⁺ K ⁺ G1019.1786.0Na-Cl·HCO32.211561.5072.44G1029.2782.0Na-SO4·HCO3418101.324.03G1038.2184.0Na-HCO3·Cl1.612422.6148.68G1048.0469.0Na-HCO3814226.0722.83G1057.1877.0Na-HCO3988291.3723.01G1066.7759.0Na-Cl·HCO32.614584.8868.08G1076.8628.5Na-Cl·HCO32.614584.8868.08G1087.6828.2Na-Cl·HCO32.614576.2259.82G1097.2544.5Na-HCO3·Cl419120.296.36G1107.6847.6Na-HCO3·Cl419120.296.36G1117.8662.0Na-HCO3·Cl419120.296.36G1127.6460.1Na-HCO3·Cl419120.296.36G1138.2940.3Na-HCO3·Cl417121.216.76G1147.9160.2Na-HCO3·Cl417121.216.76G2038.4477.0Na-SO4·Cl608142.937.31G2048.8350.0Na-SO4·Cl613157.8073.57G2057.6486.9Na-Cl·HCO3138391.1642.73G2048.8350.0Na-SO4·Cl80521.5914.74	特品 納決化学教科TDSNa*K*Mg2*G1019.1786.0Na-Cl·HCO32.211561.5072.441.23G1029.2782.0Na-SO4'HCO3418101.324.030.33G1038.2184.0Na-HCO3·Cl1.61242.6148.680.11G1048.0469.0Na-HCO3·814226.0722.833.02G1057.1877.0Na-HCO3·988291.3723.019.25G1066.7759.0Na-Cl·HCO3·2.929680.0070.7811.95G1076.8628.5Na-Cl·HCO3·2.614584.8868.089.78G1087.5828.25Na-Cl·HCO3·2.61454.6868.089.78G1097.5544.5Na-Cl·HCO3·2.50357.6259.827.80G1107.6862.0Na-HCO3·Cl·419120.296.301.51G1117.8662.0Na-HCO3·Cl·419120.296.301.51G1117.8662.0Na-HCO3·Cl·419120.296.301.51G1117.8662.0Na-HCO3·Cl·419120.296.301.51G1117.8460.1Na-HCO3·Cl·613181.179.522.21G1117.8460.1Na-HCO3·Cl·613151.897.360.41G1127.8460.2Na-HCO3·Cl·613151.914.141.15 <t< td=""><td>PH由 ·································</td><td>精晶 編集予用 融集予用 水化学类水化学类Na*K*Mg2*Ca2*CIG1019.1786.0Na-Cl·HCO32.211561.5072.441.233.88595.43G1029.2782.0Na-SO4·HCO3418101.324.030.331.9729.76G1038.2184.0Na-HCO3·Cl1.61242.6148.680.113.11276.07G1048.0469.0Na-HCO3·1.61242.6148.680.113.11276.07G1057.1877.0Na-HCO39.88291.3723.019.2536.6791.88G1066.7759.0Na-Cl·HCO32.92968.0070.7811.95107.68797.00G1076.8628.5Na-Cl·HCO32.614584.8868.089.78120.16660.25G1087.6828.2Na-Cl·HCO32.503576.2259.827.80104.52682.28G1107.6847.6Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5019.2647.97G1117.6862.0Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5019.2657.53G1137.6460.1Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5019.2657.53G1147.9160.2Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5014.8556.77G1117.8460.1Na-HCO3·Cl419121.216.76<t< td=""><td>Phere 編件決決決決大化学学ビビレンCIDSNa*K*Mg2*Ca2*CLHCGG1009.1786.0Na-Cl-HCG321151.057.241.233.8859.5441.624G1029.2782.0Na-GQ-4(HCG3418101.324.030.331.9729.7688.13G1038.2184.0Na-HCO3(C)1.61242.6148.680.113.1127.60785.8G1048.0469.0Na-HCO31.61242.6148.680.0225.9664.2852.94G1057.187.00Na-HCO39.8829.172.015.0256.6791.8878.21G1057.187.00Na-HCO32.9268.007.781.9510.7677.0077.16G1066.775.90Na-Cl-HCO32.9268.0070.781.9510.6877.0077.16G1076.862.8.5Na-Cl-HCO32.9268.0070.781.9510.6487.8087.10G1087.682.8.5Na-Cl-HCO32.9157.6259.827.8010.4187.8087.10G1087.684.76Na-HCO36.9112.026.361.5015.9147.9187.91G1097.684.76Na-HCO36.9112.025.827.801.501.501.501.511.51G1197.686.02Na-HCO36.5<</td><td>Phe 決決 決決 大化学学 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「スロ 「スロ<td>Preprint Preprint Preprint Preprint Preprint Nate Preprepreprint Nate Preprint</td></td></t<></td></t<>	PH由 ·································	精晶 編集予用 融集予用 水化学类水化学类Na*K*Mg2*Ca2*CIG1019.1786.0Na-Cl·HCO32.211561.5072.441.233.88595.43G1029.2782.0Na-SO4·HCO3418101.324.030.331.9729.76G1038.2184.0Na-HCO3·Cl1.61242.6148.680.113.11276.07G1048.0469.0Na-HCO3·1.61242.6148.680.113.11276.07G1057.1877.0Na-HCO39.88291.3723.019.2536.6791.88G1066.7759.0Na-Cl·HCO32.92968.0070.7811.95107.68797.00G1076.8628.5Na-Cl·HCO32.614584.8868.089.78120.16660.25G1087.6828.2Na-Cl·HCO32.503576.2259.827.80104.52682.28G1107.6847.6Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5019.2647.97G1117.6862.0Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5019.2657.53G1137.6460.1Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5019.2657.53G1147.9160.2Na-HCO3·Cl419120.2963.61.5014.8556.77G1117.8460.1Na-HCO3·Cl419121.216.76 <t< td=""><td>Phere 編件決決決決大化学学ビビレンCIDSNa*K*Mg2*Ca2*CLHCGG1009.1786.0Na-Cl-HCG321151.057.241.233.8859.5441.624G1029.2782.0Na-GQ-4(HCG3418101.324.030.331.9729.7688.13G1038.2184.0Na-HCO3(C)1.61242.6148.680.113.1127.60785.8G1048.0469.0Na-HCO31.61242.6148.680.0225.9664.2852.94G1057.187.00Na-HCO39.8829.172.015.0256.6791.8878.21G1057.187.00Na-HCO32.9268.007.781.9510.7677.0077.16G1066.775.90Na-Cl-HCO32.9268.0070.781.9510.6877.0077.16G1076.862.8.5Na-Cl-HCO32.9268.0070.781.9510.6487.8087.10G1087.682.8.5Na-Cl-HCO32.9157.6259.827.8010.4187.8087.10G1087.684.76Na-HCO36.9112.026.361.5015.9147.9187.91G1097.684.76Na-HCO36.9112.025.827.801.501.501.501.511.51G1197.686.02Na-HCO36.5<</td><td>Phe 決決 決決 大化学学 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「スロ 「スロ<td>Preprint Preprint Preprint Preprint Preprint Nate Preprepreprint Nate Preprint</td></td></t<>	Phere 編件決決決決大化学学ビビレンCIDSNa*K*Mg2*Ca2*CLHCGG1009.1786.0Na-Cl-HCG321151.057.241.233.8859.5441.624G1029.2782.0Na-GQ-4(HCG3418101.324.030.331.9729.7688.13G1038.2184.0Na-HCO3(C)1.61242.6148.680.113.1127.60785.8G1048.0469.0Na-HCO31.61242.6148.680.0225.9664.2852.94G1057.187.00Na-HCO39.8829.172.015.0256.6791.8878.21G1057.187.00Na-HCO32.9268.007.781.9510.7677.0077.16G1066.775.90Na-Cl-HCO32.9268.0070.781.9510.6877.0077.16G1076.862.8.5Na-Cl-HCO32.9268.0070.781.9510.6487.8087.10G1087.682.8.5Na-Cl-HCO32.9157.6259.827.8010.4187.8087.10G1087.684.76Na-HCO36.9112.026.361.5015.9147.9187.91G1097.684.76Na-HCO36.9112.025.827.801.501.501.501.511.51G1197.686.02Na-HCO36.5<	Phe 決決 決決 大化学学 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「大田 「スロ 「スロ <td>Preprint Preprint Preprint Preprint Preprint Nate Preprepreprint Nate Preprint</td>	Preprint Preprint Preprint Preprint Preprint Nate Preprepreprint Nate Preprint

第	4 🕽	抈	
2024	年	8	月

此故世 样品 以传 温度 (20 上小光光型)				浓度/(mg/L)										
地热审	编号 PH	рн	沮 温度/C	水化字尖型	TDS	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl	HCO3 ⁻	SO4 ²⁻	CO3 ²⁻	Li
	G209	8.02	85.4	Na-HCO ₃ ·Cl	817	179.31	13.34	9.57	33.49	84.28	422.26	85.96	0.00	4.88
	G210	7	26.5	$Na\text{-}HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$	1 517	398.75	36.73	0.22	9.76	151.65	606.10	202.67	0.00	10.71
	G211	7.75	85.0	$Na\text{-}HCO_3\text{-}Cl\text{-}SO_4$	1 244	364.46	20.08	0.74	16.00	149.88	529.17	200.08	0.00	12.52
	G212	9.32	79.8	$Na\text{-}SO_4{\cdot}HCO_3{\cdot}Cl$	1 264	326.17	23.50	0.57	3.07	149.40	258.27	208.88	65.87	12.28
	G213	9.2	86.1	$Na-HCO_3 \cdot SO_4 \cdot Cl$	1 249	322.99	18.61	0.09	3.26	146.67	281.90	205.45	54.12	12.33
亚东-谷露	G214	8.5	85.8	$Na\text{-}HCO_3\text{-}Cl\text{-}SO_4$	1 1 1 5	291.53	15.51	0.09	2.23	143.12	262.30	191.49	20.73	9.744
地热带	G215	9.59	50.4	$Na\text{-}SO_4\text{-}Cl\text{-}HCO_3\text{-}CO_3$	1 431	374.81	20.72	0.10	1.97	170.66	242.20	231.87	102.02	13.01
	G216	9.2	46.3	$Na\text{-}HCO_3\text{-}Cl\text{-}SO_4$	1 214	316.32	16.55	0.22	6.78	147.00	270.95	196.92	60.61	10.38
	G217	8.87	50.2	Na-HCO ₃	245	46.10	3.42	0.04	1.36	10.23	88.26	7.43	9.57	0.064
	G218	9.02	51.8	Na-SO ₄ ·Cl	669	174.36	7.09	0.10	6.34	100.41	66.05	153.30	20.57	1.872
	G219	6.92	54.7	Na-HCO ₃	2 335	801.63	37.96	4.88	53.50	161.53	1 592.19	344.02	0.00	4.352
	G220	9.1	44.0	Na-Cl	552	173.05	1.77	0.09	7.11	191.03	37.81	60.30	15.18	0.3
	G301	6.95	80.0	Na-HCO ₃ ·Cl	1 602	459.57	46.31	8.04	49.42	276.56	867.86	88.19	0.00	3.928
	G302	8.34	73.8	Na-Cl·HCO ₃	2 875	673.25	67.06	0.24	4.59	591.50	460.24	142.23	53.20	23.94
	G303	8.83	74.9	Na-Cl·HCO ₃	2 828	648.05	73.19	0.49	4.22	574.94	373.27	131.38	114.52	24.4
	G304	8.33	87.3	Na-Cl·HCO ₃	2 856	638.55	83.13	0.57	3.91	588.62	393.06	146.59	52.86	23.38
	G305	7.61	43.1	Na-HCO ₃	917	339.52	16.04	2.06	14.11	35.41	948.61	18.13	0.00	0.562
	G306	7.66	72.1	Na-Cl·HCO ₃	2 459	563.14	72.56	0.21	9.45	539.21	457.70	147.03	0.00	20.68
	G307	7.83	80.02	Na-Cl·HCO ₃	2 329	535.50	68.60	0.20	4.36	533.89	318.82	148.90	21.53	19.16
	G308	8.78	82.0	Na-Cl	1 954	471.81	56.55	0.81	5.16	479.27	189.80	151.02	68.41	17.51
错那-沃卡	G309	8.7	72.1	Na-Cl	1 994	480.01	65.79	0.82	5.61	491.40	211.43	154.07	60.81	17.49
地热带	G310	7.69	60.4	Na-Cl·HCO ₃	1 856	463.14	51.26	0.54	18.72	464.82	326.12	148.11	0.00	16.35
	G311	6.78	56.3	Na-Cl·HCO ₃	2 513	581.56	67.19	11.64	81.07	625.84	780.68	130.44	0.00	23.71
	G312	6.99	67.0	Na-Cl·HCO ₃	2 090	480.76	50.86	14.33	87.20	458.02	779.45	145.21	0.00	16.52
	G313	6.5	30.0	Ca·Na-HCO ₃ ·Cl	1 496	159.23	27.23	39.15	237.27	207.74	821.91	203.71	0.00	8.815
	G314	6.91	53.0	Na-Cl·HCO ₃	3 089	720.52	79.66	9.66	98.37	921.83	872.09	91.27	0.00	34.51
	G315	7.06	64.2	Na-Cl·HCO ₃	2 958	671.50	91.29	13.92	122.86	844.08	823.35	119.99	0.00	31.67
	G316	6.6	32.8	Na-Cl·HCO ₃	3 053	680.65	93.40	13.88	133.12	862.38	834.95	132.96	0.00	31.53
	G317	6.87	63.0	$Ca{\cdot}Na\text{-}SO_4{\cdot}HCO_3{\cdot}Cl$	1 512	217.69	27.38	20.05	195.78	189.40	382.83	503.10	0.00	2.855
	G318	8.14	80.0	Na-HCO3 · Cl	1 557	529.87	12.00	3.05	12.36	185.89	1 032.90	94.21	0.00	1.372

水样的温度和 pH 值采用 Hach 便携式双通道 多参数水质分析仪(HQ400)现场测定。水样的 阴阳离子测试在中国石化地热资源开发利用重点 实验室完成,阴阳离子的测试仪器为离子色谱 (ICS-1100),测试精度是 3%,检测限是 0.05 mg/L。HCO₃的测试仪器为瑞士万通全自动电位滴 定仪 905,滴定精度 0.1 μL,检测限是 1.65 mg/L。 地热水中的 Li 元素用电感耦合等离子发射光谱仪 (ICP-OES)测定,测试相对标准偏差是 0.73%, 检出限为 0.004 1 mg/L。

水样的稳定同位素在中国科学院地质与地球 物理研究所水同位素与水岩相互作用实验室完 成,测试仪器为 Picarro L1102-I 同位素水-液分析 仪。测试结果为 δ^{2} H 和 δ^{18} O (δ = (Rsample/Rstandard×1)×1000),以维也纳标准平均海水为标 准。 δ^{2} H 和 δ^{18} O 的分析精度分别为±0.5‰和 0.1‰。

3 西藏南部地热水的地球化学特征

地热水中离子的成分和组合特征是水岩相互作用的结果,而这个过程中主要的影响因素包括:储层岩性及其矿物组成、补给区岩性及其矿 物组成、储层温度、相互作用时间(即地下水年龄)等^[15]。西藏地热水 TDS(总溶解固体 Total dissolved solid)大都小于 3 g/L,属于微咸水,阳 离子以 Na⁺为主, 阴离子主要为 Cl、HCO₃⁻、CO₃²、SO₄⁻², 水化学类型复杂。申扎-定结地热带的地热 水水化学类型主要为 Na-Cl·HCO₃、Na-SO₄·HCO₃、 Na-HCO₃, TDS 为 337~3 241 mg/L; 亚东-谷露地 热带的地热水水化学类型主要为 Na-HCO₃、Na-Cl、Na-Cl·HCO₃、Na-SO₄·Cl·HCO₃, TDS 为 552~ 3 933 mg/L; 错那-沃卡地热带的地热水水化学类 型主要为 Na-HCO₃、Na-Cl·HCO₃、Na-Cl、Na-SO₄·Cl·HCO₃, TDS 为 400~2 828 mg/L。三个地 热带的地热水没有明显的规律性。

一般使用锂元素的相对丰度(锂的浓度与卤水 TDS 的比值)来开展盐湖卤水锂的资源评价^[7,16]。

将西藏南部三个典型地热带的地热水锂的相对丰 度和世界典型的高原型盐湖卤水锂资源进行比较 (表2),发现地热水中的锂浓度明显低于盐湖卤 水的锂浓度,但是地热水中锂的相对丰度明显优 于盐湖卤水,其镁锂比均小于10,大部分小于 3,地热水镁锂比也显著优于盐湖卤水(图1)。 镁锂比高会大大的增加提锂的成本,一般镁锂比 低于10的盐湖卤水划分为中低镁锂比盐湖卤水, 其成本显著低于高镁锂比的盐湖卤水(表3)^[7,17]。 从资源相对丰度的角度来看,西藏南部地热锂的 潜力较大,低镁锂比也可降低提取成本。

表 2 地热锂和全球典型盐湖卤水锂的资源比较^[7,18]

Table 2 Comparison of geothermal Li and global typical salt lake brine Li resources ^{17,18]}								
地点	盐湖/地热田	TDS/ (g/L)	Li/%	Li/TDS (相对丰度)	Mg/Li			
	克莱顿谷	186	0.023	0.001 237	1.43			
北美西部高原	大盐湖	202	0.004	0.000 198	2.50			
	索尔顿海	293	0.026 6	0.000 908	0.16			
	乌尤尼	231	0.05	0.002 165	8.40			
南美安第斯高原	阿塔卡玛	206	0.15	0.007 282	6.40			
	霍姆布雷托	254	0.062	0.002 441	1.40			
	班戈湖	68.5	0.010 4	0.104	0.64			
中国丰富主国	扎仓茶卡	210	0.042 6	0.002 029	15.96			
中国月殿同床	察尔汗盐湖	358	0.012 4	0.000 346	517.34			
	一里坪	327	0.026 2	0.000 801	92.30			
	谢通门	2.929	0.002 384	0.008 139	0.50			
西藏南部地热水	措美-古堆	2.875	0.002 394	0.008 327	0.01			
	羊易	3.089	0.003 451	0.011 172	0.28			



图 1 西藏南部地热水中 Li 和 Mg 的相关性 Fig.1 Correlation between Li and Mg in geothermal water in Southern Xizang

4 西藏南部地热锂异常分布规律

根据地热水中锂的含量绘制了锂异常平面分 布图(图2),可以看出,平面上,地热水的锂异 常主要出现在雅鲁藏布江缝合带以南,并以该缝 合带为界,南侧明显是高异常区(>10 mg/L), 北部地热水中的锂含量偏低。三条地热带对比, 东西两侧的申扎-定结和错那-沃卡地热带在雅鲁藏 布江缝合带以南地区地热水锂浓度偏高。

从地热水的水化学特征出发,来分析地热水的锂分布规律。整体上看,西藏南部地热水可分为两大类(图3),A组地热水水化学类型较复杂,B组地热水以Na-Cl型为主,溶解组分含量较高,这与地热水循环深度和水岩相互作用时间相关,在相同或相似的储层岩性前提下,循环深度越大,水岩相互作用时间越长^[15]。此外,浅层冷水的混入也会导致水化学类型改变,类型更多样。进一步的,根据水化学类型的平面分布图可以看出,阴离子以Cl为主的地热水主要分布在雅鲁藏布江缝合带的南边,而所有地热水的阳离子

	表 3	盐湖囟水钼	设源分突和推	定取上艺及	具 成不 ¹⁰¹⁷		
	Table 3 Classificati	on, extraction t	echnology and	cost of Li re	sources in salt	lake brine ^[18-19]	
盐湖卤 水分类	富锂、低镁锂比 碳酸盐型卤水	中低镁锂 比盐湖卤水		高镁锂比	比盐湖卤水		低锂、高镁锂 比盐湖卤水
Mg/Li比	小于0.1	0.1~10		10~100			
合适的提锂技术	盐梯度太阳池 提锂法(盐析法)	分步沉淀法	煅烧法	萃取法	电渗析膜法	纳滤膜法	吸附法
代表盐湖	青藏高原扎 布耶盐湖	智利阿塔 卡玛盐湖	青海西台 吉乃尔盐湖	青海大柴 旦盐湖	青海东台吉 乃尔盐湖	青海西台 吉乃尔盐湖	青海察尔汗盐湖
成本	2万元/t	2万元/t	/	5万元/t	3万元/t	3万元/t	3万元/t





都是 Na⁺型,所以 Na-Cl 型地热水主要分布在雅鲁 藏布江缝合带的南部(图 2c),以雅鲁藏布江缝 合带作为分界线,南部的 Na-Cl 型地热水多于北 部。根据地热水 TDS 和锂浓度的相关性(图 4), 也可以看出同样的规律,地热水的 TDS 和锂含量 成正相关,证明雅鲁藏布江缝合带以南的地热水 TDS 整体较高。雅鲁藏布江缝合带附近及其以南 的地热水 TDS 值更高,Na-Cl 型地热水更多可以 推断该地区的深部和浅部的断裂系统更发育,地 热水循环路径和深度较大,能够为地热系统带来 更多的深部物质,这也是雅鲁藏布江缝合带附近 及其以南地区地热水中锂含量较高的原因之一。

此外,从物源角度分析,雅鲁藏布江缝合带 以南地区的富锂岩石分布也显著的多于南部,喜 马拉雅淡色花岗岩带具有大面积的铍-锂地球化 学异常^[21],其中琼嘉岗和库曲地区锂元素丰度最 高^[22-23],这两个地区与三条地热带的雅鲁藏布江缝 合带以南地区高度重合。由此可知,雅鲁藏布江 缝合带以南地区的地热水更靠近物源,有丰富的 富锂岩石,这是该地区地热水中锂含量偏高的主 要原因。

5 西藏南部地热锂的来源

岩石中的锂是地热水中锂的主要来源之一, 可以通过水岩反应进入到地热水中^[9]。从全国的岩 石锂含量背景值来看,青藏高原具有较高的锂地 球化学背景值^[21]。西藏南部具有较高的锂丰度, 与地球上各类岩石相比,比绝大部分岩石的锂含 量高数倍至十余倍^[19,24]。其中,喜山期的壳源酸性 岩中锂含量最高,主要分布于雅江缝合带两侧, 成因与洋-陆俯冲或陆-陆碰撞造山所引发的大规模 岩浆活动带来的挥发分矿物质有密切关系^[19]。由



geothermal water in Southern Xizang

于锂等稀碱金属元素受离子半径、电荷和化合键 的限制,难以进入矿物的晶体结构中形成矿物 相,均是在岩浆结晶晚期易赋存于残余熔体相中 的典型不相容元素。岩浆分异过程中,随着岩浆 从超基性到酸性的演化顺序,锂元素在熔体中含 量逐渐升高,在岩浆分异后期的酸性岩浆中富集^[25]。 这部分结晶分异后的富锂岩浆形成了富锂岩石, 少部分以岩浆热液进入地下水循环系统。

除此之外,岩浆分异过程中的岩浆热液也是 主要来源之一^[9],西藏南部 15 km 以深分布的熔融 体沿深大断裂上升进入到浅层的地热水循环系统 中,通过地热水的氢氧同位素可以看到明显证 据显示,地热水中存在岩浆来源的物质,雅鲁藏 布江缝合带南侧的部分地热水的氢氧稳定同位素 落在岩浆水和大气降水的混合线的区域范围内 (图 5)。

国内外众多学者均认为地热水中的锂是盐湖

卤水中的锂的重要来源之一,多数的富锂地热系 统都赋存在富锂盐湖卤水的周边^[9],所以,可以根 据盐湖卤水的锂的物源来分析确定地热水锂的物 源。根据多数学者的观点,地热水中锂的物源主 要有两种,一种是高温地热水与富锂围岩发生水 岩反应,溶滤了其中的锂,另一种是岩浆分异带 来的富锂岩浆热液^[26],这种岩浆热液可以是沿着 断裂带上升与地下水混合后出露地表形成富锂温 泉水,也可以是直接排入地表径流中^[9]。



Fig.5 Stable isotope characteristics of hydrogen and oxygen in geothermal water

6 结 论

(1)西藏南部高温地热带地热水中的锂含量 最高可达 34.51 mg/L,虽然从含量上看远低于世界 三大高原的典型盐湖卤水锂资源,但是地热水中 锂的相对丰度明显优于三大高原的盐湖卤水,同 时,地热水的镁锂比均小于 10,大部分小于 3, 这将有利于提取成本的降低。

(2)西藏南部高温地热带地热水中锂含量较高的区域均分布在雅鲁藏布江缝合带及其以南的地区,与富锂岩石的分布范围一致,同时雅鲁藏布江缝合带及其以南地区地热水的 Cl-Na 型地热水比北部的更多,南部地热水的 TDS 更高,循环路径更长。

(3)根据富锂盐湖卤水中锂的物源以及地热水的氢氧稳定同位素结果推断西藏南部高温地热带地热水中锂的物源,确定了地热水锂的物源主要有两种:一是地热水对富锂岩石的溶滤作用导致的岩石中的锂进入地热水中,形成富锂地热水;二是岩浆分异过程中形成的富锂岩浆热液通

过断裂系统上升进入浅部的地热水循环系统,形 成富锂地热水。

参考文献:

[1] 王芳. 锂矿资源研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2001.

WANG F. Research on lithium mineral resources[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2001.

[2] 李成秀,程仁举,刘星.我国锂辉石选矿技术研究现状及 展望[J].矿产综合利用,2021(5):1-8.

LI C X, CHENG R J, LIU X. Research status and prospects of spodumene ore beneficiation technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):1-8.

[3] 李晓波, 许浩, 王航, 等. 江西某钽铌尾矿中锂云母的浮选 实验研究[J]. 矿产综合利用, 2023(5):36-40.

LI X B, XU H, WANG H, et al. Flotation research on recovery of lithionite from Ta-Nb tailing in Jiangxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(5):36-40.

[4] 吴西顺, 王登红, 杨添天, 等. 碳中和目标下的锂矿产业创 新及颠覆性技术[J]. 矿产综合利用, 2022(2):1-8.

WU X S, WANG D H, YANG T T, et al. Lithium mining industry innovation and disruptive technology under the goal of carbon neutrality[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2):1-8.

[5] 何飞, 高利坤, 饶兵, 等. 从锂云母中提锂及综合利用的研 究进展[J]. 矿产综合利用, 2022(5):82-89.

HE F, GAO L K, RAO B, et al. Research progress on lithium extraction and comprehensive utilization from lepidolite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(5):82-89.

[6] 徐璐, 杨耀辉, 颜世强, 等. 我国黏土型锂矿提锂研究现状 及前景展望[J]. 矿产综合利用, 2023(4):12-18.

XU L, YANG Y H, YAN S Q, et al. Lithium extraction from clay-type ore in China: status and prospects[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4):12-18.

[7] 刘成林, 余小灿, 袁学银, 等. 世界盐湖卤水型锂矿特征、 分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 2021, 95(7):2009-2029.

LIU C L, YU X C, YUAN X Y, et al. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine-type Li deposits in salt lakes in the world[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7):2009-2029.

[8] 韩凤清. 青藏高原盐湖 Li 地球化学[J]. 盐湖研究, 2001, 9(1):55-61.

HAN F Q. The geochemistry of lithium in salt lake on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of salt lake research, 2001, 9(1):55-61.

[9] 王晨光,郑绵平,张雪飞,等. 青藏高原南部地热型锂资

源[J]. 科技导报, 2020, 38(15):24-36.

WANG C G, ZHENG M P, ZHANG X F, et al. Geothermaltype lithium resources in Southern Tibetan Plateau[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(15):24-36.

[10] 王贵玲,等.中国地热志(西南卷三)[M].北京:科学出版社,2018:145-150.

WANG G L, et al. Geothermal records of China (southwest Volume III) [M]. Beijing: Science Press, 2018: 145-150.

[11] 王鹏, 陈晓宏, 沈立成, 等. 西藏地热异常区热储温度及 其地质环境效应[J]. 中国地质, 2016, 43(4):1429-1438

WANG P, CHEN X H, SHEN L C, et al. Reservoir temperature of geothermal anomaly area and its environmental effect in Tibet[J]. Geology in China, 2016, 43(4):1429-1438.

[12] 金胜. 青藏高原的壳幔电性结构特征及其动力学意义 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2009.

JIN S. The characteristics of crust-mantle electrical structure and dynamics within Tibetan Plateau [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.

[13] 李亚林, 王成善, 伊海生, 等. 青藏高原新生代地堑构造研究中几个问题的讨论[J]. 地质论评, 2005, 51(5):493-501.

LI Y L, WANG C S, YI H S, et al. Current status and existing problems of lithium extraction technology from salt lake[J]. Geological Review, 2005, 51(5):493-501.

[14] 刘昭. 西藏尼木—那曲地热带典型高温地热系统形成机 理研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2014.

LIU Z. A Study on the formation mechanism of typical high temperature geothermal system in Nymu Naqudi Tropical Zone, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.

[15] 周训, 胡伏生, 何江涛, 等. 地下水科学概论[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 96-114.

ZHOU X, HU F S, HE J T, et al. General outline of groundwater science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 96-114.

[16] 郑绵平. 青藏高原盐湖资源研究的新进展[J]. 地球学报, 2001, 22(2):97-102.

ZHENG M P. Study advances in Saline Lake resources on the Qinghai Tibet Pleteau[J]. Acta Geoscientica Scinica, 2001, 22(2):97-102.

[17] 李增荣, 刘国旺, 唐发满. 青海盐湖锂资源及提锂技术概述[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(5):94-97.

LI Z R, LIU G W, TANG F M. Overview of lithium resources and lithium extraction technology in Qinghai Salt Lake[J]. Resource information and engineering, 2017, 32(5):94-97.

[18] 高峰,郑绵平, 乜贞,等. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. 地球学报, 2011, 32(4):483-492.

GAO F, ZHENG M P, MIE Z, et al. Brine lithium resource in

the salt lake and advances in its exploitation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(4):483-492. 3286. [19] 李正山. 青海锂矿资源可持续开发路径研究-以柴达木-[23] 赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 等. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟 里坪项目为例[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2017. 晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征[J]. 岩石学报, LI Z S. Study of Qinghai lithium mineral resources sustainable 2021, 37(11):3325-3347. ZHAO J X, HE C T, QIN K Z, et al. Geochronology, source development path-in Qaidam a ping project as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017. [20] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of wateranalyses. Eos Trans. Transactions American Geophysical Union, 1944, 25 (6), 914-928. http://dx. 37(11):3325-3347. doi.org/10.1029/TR025i006p00914. [24] 中国青藏高原综合科学考察队著. 西藏盐湖[M]. 北京: [21] 王学求, 刘汉粮, 王玮, 等. 中国锂矿地球化学背景与空 科学出版社, 1988: 30. 间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 2020, 41(6):797-806. Research team of tibetan plateau comprehensive science. 1988. WANG X Q, LIU H L, WANG W, et al. Geochemical Tibet Salt Lake[M]. Beijing: Science Press, 1988: 30. abundance and spatial distribution of lithium in China: [25] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, implications for potential prospects[J]. Acta Geoscientica 1997: 55. Scinica, 2020, 41(6):797-806. ZHAO Z H. 1997. Principles of trace element geoche-[22] 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 等. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟 mistry[M]. Beijing: Science Press, 1997: 55. 晶岩型锂矿的发现及意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(11):3277-[26] WANG C G, ZHENG M P, ZHANG X F, et al. O, H, and 3286.

QIN K Z, ZHAO J X, HE C T, et al. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(11):3277-

features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qiongjiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet[J]. Acta Geoscientica Scinica, 2021,

Sr isotope evidence for origin and mixing processes of the Gudui geothermal system, Himalayas, China[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 11:1175-1187.

Characteristics and Distribution of Geothermal-type Lithium Resources in Southern Xizang

LUO Lu, ZHOU Zongying, ZHU Xia, HE Chunyan, LIU Huiying

(SINOPEC Key Laboratory of Geothermal Resources Exploitation and Utilization, SINOPEC Star

Petroleum Company, Beijing 100083, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. The Southern Xizang is one of the main distribution areas of high temperature geothermal zones in China with rich geothermal resources. The chemical analysis and test results of the geothermal water show that the lithium content in the geothermal water of the high temperature geothermal zone in Southern Xizang can reach 34.51 mg/L, and the relative abundance of geothermal lithium is obviously better than that of the world's typical plateau Salt Lake brines, such as Clayton Valley in the Western Plateau of North America and Uyuni in the Andes Plateau of South America. The lithium magnesium ratio is mostly less than 3, which is conducive to lithium extraction from brine. The areas with high lithium content in the geothermal water of the high temperature geothermal zones in Southern Xizang are all distributed in the the Yarlung Zangbo River suture zone and the areas to the south, consistent with the distribution range of lithium rich rocks. At the same time, the Yarlung Zangbo River suture zone and its south area have more Cl-Na geothermal water than the north, and the south has higher TDS and longer circulation path. Based on the stable isotopic composition of hydrogen and oxygen in geothermal water and the provenance of lithium in the surrounding lithium-rich Salt Lake brine, it is inferred that the main sources of lithium in the geothermal water are leaching of lithium-rich rocks by geothermal water and lithium-rich magmatic hydrothermal solutions formed during magmatic differentiation.

Keywords: Mining engineering; Southern Xizang; High temperature geothermal zone; Geothermal-type lithium resources