



引文格式:任丽丹,耿锋,韩强,等.塔里木盆地塔河油田奥陶系油田水地球化学特征及其伴生资源分布特征[J].西北地质,2026,59(4):322–338. DOI: 10.12401/j.nwg.2025057

Citation: REN Lidan, GENG Feng, HAN Qiang, et al. Geochemical Characteristics and Distribution of Associated Resources in Ordovician Oilfield Water of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 322–338. DOI: 10.12401/j.nwg.2025057

塔里木盆地塔河油田奥陶系油田水地球化学特征 及其伴生资源分布特征

任丽丹¹,耿锋¹,韩强¹,孙同成¹,史冀忠^{2,*},姜亭²,邵小明¹,李渭²,范焱²,李忠煜²

(1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心),陕西 西安 710119)

摘 要:塔里木盆地塔河油田奥陶系赋存有丰富的油田水,因其富含较高经济价值的钾、锂等微量元素,是塔里木盆地除油气资源之外的又一种重要的战略资源。笔者通过采集和分析塔河油田奥陶系油田水样品,研究其地球化学特征及其伴生资源分布特征。结果表明:塔河油田奥陶系油田水主要阳离子为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} ,主要阴离子为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- ;矿化度介于140~260 g/L,平均值为216.56 g/L,属于中等矿化度;油田水类型为 CaCl_2 型。特征系数显示油田水经历了阳离子交替吸附和强烈的水岩相互作用,为溶滤油田水,还原彻底、油藏封闭性好、变质程度较高,油田水中的离子主要来源于岩盐、石膏和碎屑黏土矿物等。油田水中富含的 K^+ 、 Li^+ 、 Br^- 、 Sr^{2+} 等有用组分能达到综合利用的工业指标, K^+ 含量为556~2 740 mg/L,平均值为1 781.19 mg/L; Li^+ 含量为2.9~18.5 mg/L,平均值为11.16 mg/L; Br^- 含量为45~323 mg/L,平均值为230.77 mg/L; Sr^{2+} 含量为341~605 mg/L,平均值为473.31 mg/L。开展与油气资源共生的油田水研究,对其中的伴生资源进行综合开发利用,对拓展油气田的资源价值具有重要意义。

关键词:塔里木盆地;油田水;地球化学;微量元素;锂;钾

中图分类号: P641.4+62

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0322-17

Geochemical Characteristics and Distribution of Associated Resources in Ordovician Oilfield Water of Tahe Oilfield, Tarim Basin

REN Lidan¹, GENG Feng¹, HAN Qiang¹, SUN Tongcheng¹, SHI Jizhong^{2,*}, JIANG Ting²,
SHAO Xiaoming¹, LI Wei², FAN Yan², LI Zhongyu²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

收稿日期: 2025-03-11; 修回日期: 2025-06-09; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司项目“塔里木盆地中石化探区油田水伴生资源调查与综合利用规划研究”(202402ZB0001), 中石化重大科技攻关项目“中西部三大叠合盆地及周缘十四五资源评价”(P23244)和中石化科技攻关项目“油气勘查区块分类分级评价与矿权策略研究”(P24235)联合资助。

作者简介: 任丽丹(1986–), 女, 副研究员, 主要从事油气勘探规划、地震综合解释等方面的工作。E-mail: 252225464@qq.com。

* 通讯作者: 史冀忠(1983–), 男, 正高级工程师, 主要从事沉积学及油气基础地质调查研究。E-mail: shijizhong0241@sina.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

2. Xi'an Center of China Geological Survey(Northwest China Center for Geoscience Innovation), Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The water resources of the Ordovician oilfield in the Tarim Basin's Tahe Oilfield are characterized by a high concentration of potassium, lithium, and other trace elements with significant economic value. These resources represent an important strategic asset in the Tarim Basin, alongside oil and gas resources. In this paper, Ordovician oilfield water samples from the Tahe oilfield were collected and analyzed to study its geochemical characteristics and its associated resource distribution pattern. The results demonstrate that the primary cations present in the Ordovician oilfield water of the Tahe Oilfield are Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , and Mg^{2+} , while the primary anions are Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , and NO_3^- . The mineralization of the oilfield water ranges from 140 to 260 g/L, with an average value of 216.56 g/L, indicating a medium level of mineralization. The oilfield water can be classified as a CaCl_2 type. The characteristic coefficients indicate that the oilfield water undergoes alternating cation adsorption and robust water-rock interactions. It is a solution-filtered oilfield water, exhibiting complete reduction, optimal reservoir confinement, and a notable degree of metamorphism. The ions present in the oilfield water are predominantly derived from rock salt, gypsum, and crumbly clay minerals. The useful components, including K^+ , Li^+ , Br^- , and Sr^{2+} , exist in oilfield water can meet the industrial indicators of comprehensive utilization: the K^+ content ranging from 556 to 2 740 mg/L with an average value of 1 781.19 mg/L; the Li^+ content varying from 2.9 to 18.5 mg/L with an average concentration of 11.16 mg/L; the concentration of Br^- ranging from 45 to 323 mg/L with an average concentration of 230.77 mg/L; The concentration of Sr^{2+} ranging from 341 to 605 mg/L with an average of 473.31 mg/L. Conducting research on oilfield water that coexists with oil and gas resources, and comprehensively developing and utilizing the associated resources, is of significant importance for enhancing the resource value of oil and gas fields.

Keywords: Tarim basin; oilfield water; geochemistry; trace element; lithium; potassium

油田水是指与油、气毗邻伴生,同时具有特殊物理、化学性质的地下水,是油、气藏流体系统的重要组成部分(高锡兴,1994;高娟琴等,2019)。与普通地下水相比,油田水的化学成分相对复杂,具有更高的微量组分含量,尤其油田水中富含的锂、钾等资源,是中国紧缺的矿产资源,对国家能源产业和新兴产业的发展具有重大意义(高娟琴等,2019;牛新生等,2021;王东晖等,2024;李进步等,2024)。

中国油田水资源分布广,主要分布在柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地、塔里木盆地等沉积盆地(林耀庭等,1997;付建龙等,2006;穆延宗等,2016;刘雪等,2024)。柴达木盆地西部古近系和新近系油田水中富集 K^+ 、 Li^+ 、 Br^- 、 Rb^+ 、 Sr^{2+} 等多种有用组分,且普遍达到工业开采品位,其中南翼山油田水中 Li^+ 含量均高于 200 mg/L(谭红兵等,2007)。四川盆地发现气田水的气藏占开发气藏的 84%,主要层位为嘉陵江组和雷口坡组,其中黄金口背斜群中气田水 Li^+ 含量最高者达 323 mg/L(林耀庭等,2008),伴生有用组分多,尤其是 Na^+ 、 K^+ 远超工业品位(高娟琴等,2019)。江汉盆地江

陵凹陷产出沙市组及新沟嘴组的油田水 Li^+ 含量可达 52~65 mg/L,高于油田水的工业品位,同时含有丰富的 Na^+ 、 K^+ 等伴生资源(黄华等,2014)。

前人对塔里木盆地油田水的研究主要集中在元素组成(蔡春芳等,1996;张敏等,1998;周晓芬,2000;钱一雄等,2003;刘建伟等,2005)、同位素特征(贾存善等,2007)、平面分布(钱一雄等,2005;张金川等,2007)、成因与演化(蔡春芳等,1997;蔡春芳,2000;蔡立国等,2002;李鹏春等,2007)等方面。塔河油田不同地质时代的油田水成分差异较大,矿化度总体较高,塔河油田奥陶系油田水的可溶物质主要成分与海水一致(刘建伟等,2005)。关于奥陶系油田水的成因,钱一雄等(2003,2005)认为主要受原始海水控制,早期存在大气水淋滤-淋溶作用;贾存善等(2007)认为是古大气降水和原生沉积水的混合水,并以古大气水为主。关于油田水中达到综合利用工业品位的伴生资源未进行综合评价。

笔者通过探讨塔里木盆地塔河油田奥陶系油田水的地球化学特征,进而研究油田水中富含的伴生资

源(钾、锂、硼、溴、碘、锶等)的分布特征,开展与油气资源共生的富钾、锂油田水研究,加强油田水中伴生资源的综合开发利用,不仅可以弥补中国钾盐、锂矿的资源短缺,获取显著的社会效益和经济效益,而且对拓展油气田的资源价值具有重要意义。

1 地质概况

塔河油田是中国第一大古生界海相油田,位于塔里木盆地北部,沙雅隆起中段(图1),北接库车坳陷,南部与顺托果勒低隆起相邻。塔河油田古生界各层系均有油气分布,以中—下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏为主(高玉飞等,2013)。

塔河油田奥陶纪整体为碳酸盐岩台地背景,中下奥陶统发育蓬莱坝组、鹰山组和一间房组;上奥陶统发育吐木休克组、良里塔格组和桑塔木组(陈轩等,2023;张长建等,2024)。蓬莱坝组主要为灰褐、灰色灰岩、云质灰岩夹灰质云岩、白云岩;鹰山组以浅褐、褐灰、灰色灰岩为主夹灰色灰质云岩、云质灰岩;一间房组主要为灰色灰岩、泥晶灰岩、生屑灰岩等;吐木休克组以棕灰色泥晶灰岩、紫红色瘤状灰岩为主;良里塔格组主要为灰褐、褐灰色灰岩、泥质灰岩,夹

生屑灰岩、砂屑灰岩;桑塔木组主要以灰、深灰色泥岩为主,夹泥质粉砂岩及泥灰岩(刘文等,2002;史江涛等,2022;郭春涛等,2024)。

2 样品采集与测试分析

本次研究共采集塔河油田奥陶系油田水样品64件,采样点为塔河油田奥陶系生产油井的井口(图2),各井的生产井段及产水量见表1。将含有原油的油田水样品初步分离后装入干净的聚乙烯采样瓶,每个样品采集1500 mL,在实验室用滤纸将原油过滤除去,在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行水质常规分析和伴生资源分析。

检测依据为DZ/T 0064.49-2021、DZ/T 0064.51-2021、GB/T 5750.6-2023和HJ700-2014等地下水分析行业标准,质量控制执行DZ/T 0130-2006地质矿产实验室测试质量管理规范要求。矿化度采用重量法; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用电感耦合等离子体发射光谱法; B^{3+} 、 Li^+ 、 Sr^{2+} 、 Rb^+ 采用电感耦合等离子体质谱法; SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Br^- 、 NO_3^- 采用离子色谱法; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 采用滴定法; I^- 采用硫酸铈催化分光光度法分别进行测试分析。

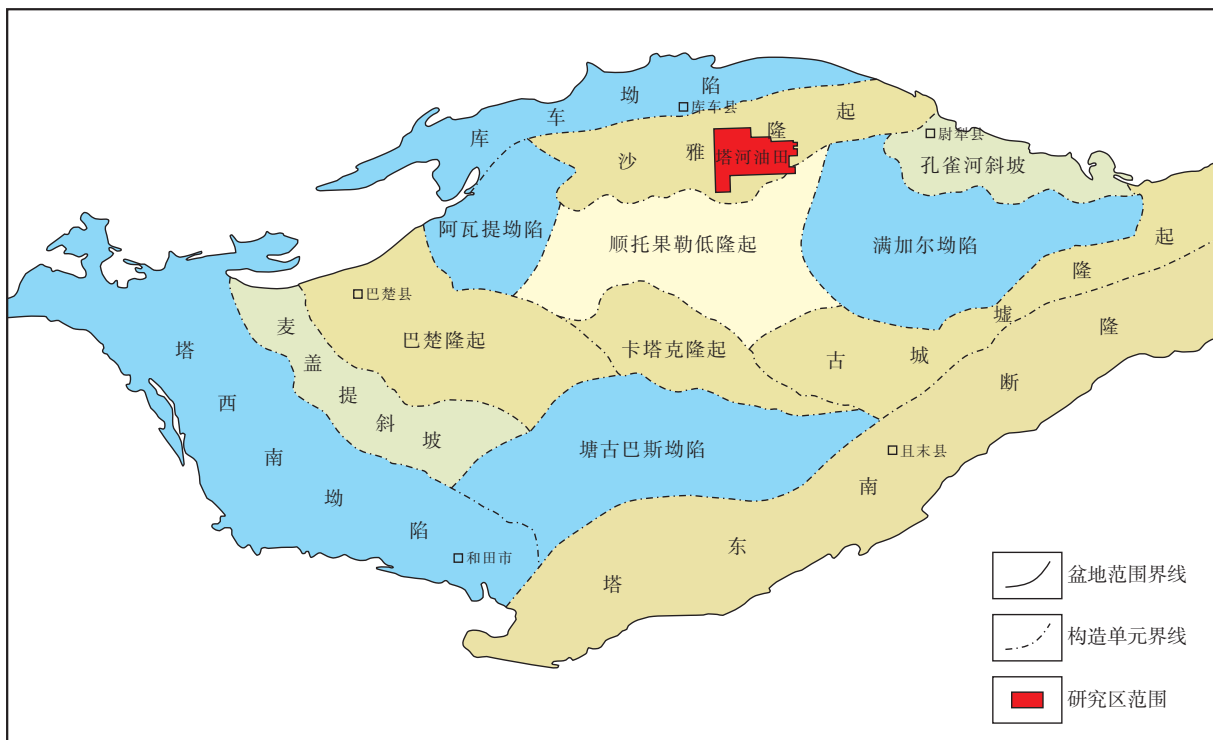


图1 塔里木盆地构造单元划分及研究区位置

Fig. 1 Tectonic units of Tarim Basin and location of study area

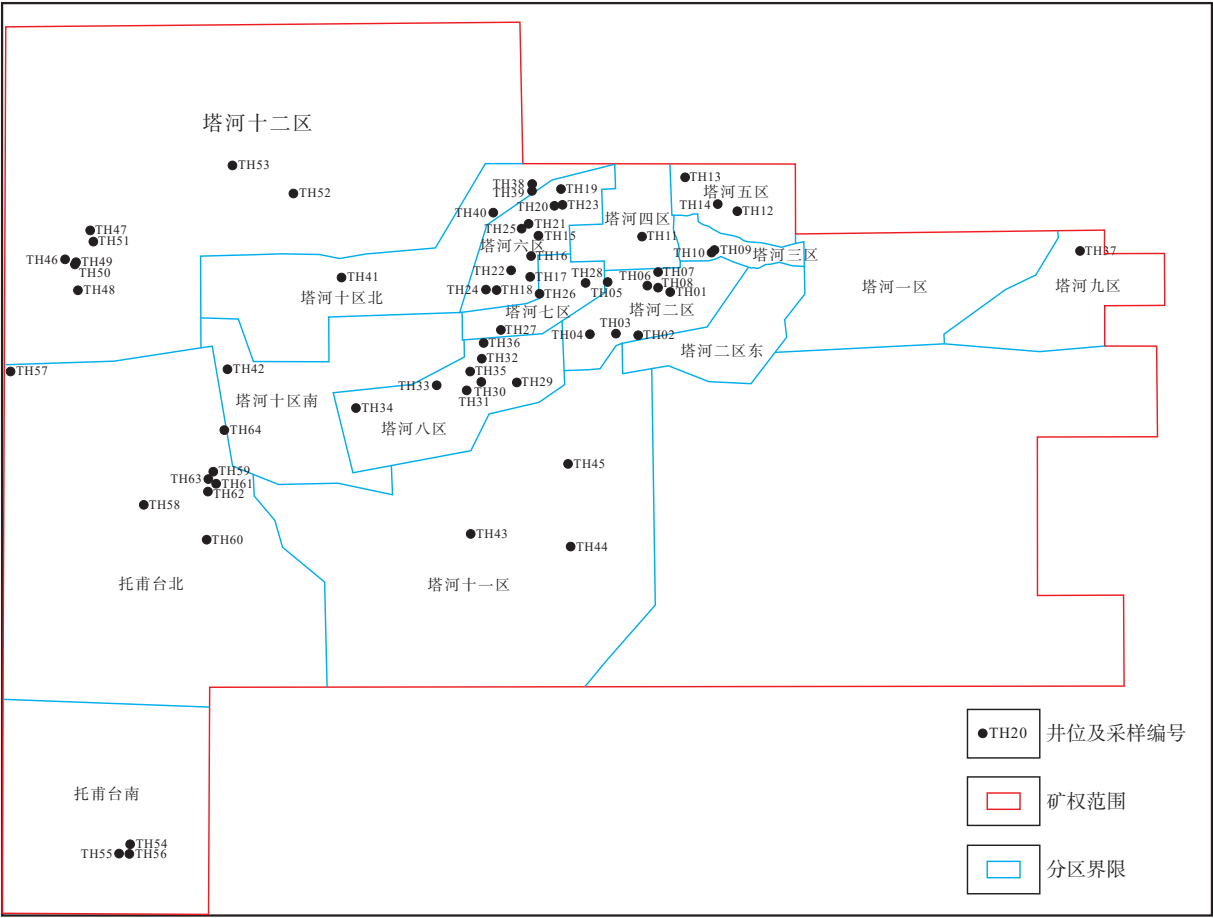


图2 塔河油田奥陶系油田水采样井分布图

Fig. 2 Sampling well distribution map of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

表 1 塔河油田奥陶系油田水化学组分

Tab. 1 Chemical composition of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

样品 编号	生产井段 (m)	产水量 t/d	矿化度 g/L	Na ⁺ g/L	Ca ²⁺ g/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ g/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	B ³⁺ mg/L	Br ⁻ mg/L	Sr ²⁺ mg/L	Rb ⁺ mg/L	I ⁻ mg/L	pH值
TH01	5 494.0~5 913.8	/	210	65.1	10.8	1 400	806	133	431	145	< 0.02	5.6	52.3	212	410	2.10	< 0.02	6.0
TH02	5 600.2~5 694.0	41.7	230	69.2	13.9	1 550	753	144	259	159	< 0.02	5.5	45.6	221	437	2.05	< 0.02	6.0
TH03	5 815.2~5 890.0	68.7	210	66.6	9.6	1 640	587	134	371	151	< 0.02	6.2	51.1	218	371	2.29	< 0.02	6.0
TH04	5 609.0~5 685.0	37.1	230	68.4	12.3	1 960	959	143	223	188	< 0.02	6.5	49.2	241	429	2.09	< 0.02	6.0
TH05	5 488.5~5 560.0	32.0	220	65.7	12.2	1 290	862	138	358	145	< 0.02	5.4	54.6	207	444	1.86	< 0.02	5.5
TH06	5 390.0~5 949.1	/	220	66.1	11.2	1 170	892	136	304	174	< 0.02	5.1	48.3	196	419	1.78	< 0.02	6.0
TH07	5 435.7~5 520.4	282.7	220	66.2	11.6	1 420	953	142	242	159	< 0.02	6.2	53.3	227	449	1.91	< 0.02	6.0
TH08	5 491.0~5 510.6	63.5	220	67.2	11.4	1 400	927	139	234	172	< 0.02	6.2	61.6	221	449	1.98	< 0.02	5.5
TH09	5 468.6~5 667.3	81.3	220	66.3	11.0	1 660	982	136	371	188	< 0.02	11.3	79.3	295	452	2.02	< 0.02	5.5
TH10	5 481.0~5 704.0	49.1	210	65.7	10.9	1 540	981	138	189	126	< 0.02	7.0	89.1	245	436	2.12	< 0.02	6.0
TH11	5 372.0~5 451.0	44.8	210	60.7	11.0	1 320	921	131	485	232	< 0.02	4.9	50.8	194	412	1.62	< 0.02	6.0
TH12	5 444.0~5 506.0	/	210	64.6	11.4	1 700	1 010	137	216	197	< 0.02	7.4	87.9	259	449	2.07	7.21	5.5
TH13	5 337.0~5 430.0	/	210	64.4	11.4	1 440	1 030	136	232	203	11.3	7.2	88.1	253	483	1.52	< 0.02	6.0
TH14	5 420.0~5 472.0	24.4	210	65.3	11.5	1 470	1 040	137	202	159	< 0.02	6.4	76.1	224	456	1.97	< 0.02	6.0
TH15	5 464.0~5 614.0	15.9	210	61.8	11.7	1 680	1 040	132	312	238	21.8	7.2	49.5	217	477	1.84	< 0.02	6.0
TH16	5 479.0~5 498.3	12.7	220	65.1	11.2	1 720	1 050	133	286	209	22.4	11.2	44.0	223	481	1.89	< 0.02	6.0
TH17	5 526.4~5 534.1	29.5	230	65.0	11.3	1 870	1 060	139	282	174	22.1	12.6	53.2	239	558	2.11	< 0.02	6.0

续表 1

样品 编号	生产井段 (m)	产水量 t/d	矿化度 g/L	Na ⁺ g/L	Ca ²⁺ g/L	K ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Cl ⁻ g/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Li ⁺ mg/L	B ³⁺ mg/L	Br ⁻ mg/L	Sr ²⁺ mg/L	Rb ⁺ mg/L	I ⁻ mg/L	pH值
TH18	5 550.0~5 588.3	21.9	220	66.8	11.2	1 760	1 060	136	319	172	19.4	7.1	45.2	228	492	1.66	< 0.02	6.0
TH19	5 452.9~5 491.1	12.7	220	63.0	9.7	1 650	737	132	331	197	21.7	10.8	53.3	218	472	2.00	< 0.02	5.5
TH20	5 476.2~5 595.1	18.3	220	66.5	11.2	1 610	1 100	138	286	174	19.1	7.3	61.4	223	489	1.99	< 0.02	5.5
TH21	5 512.0~5 720.0	21.4	220	63.8	10.8	1 940	1 060	135	257	238	25.7	12.7	49.6	236	544	2.09	< 0.02	6.0
TH22	5 494.8~5 546.8	23.6	230	66.3	11.8	1 830	1 110	137	314	151	20.5	12.8	53.4	236	516	2.13	< 0.02	5.5
TH23	5 469.5~5 577.1	58.3	230	65.5	11.2	1 870	1 050	139	265	186	20.0	12.9	57.8	240	535	2.06	< 0.02	6.0
TH24	5 529.0~5 600.0	/	240	65.8	11.2	1 970	1 100	147	278	177	15.0	12.2	62.7	260	545	2.06	< 0.02	6.0
TH25	5 506.0~5 580.0	18.5	230	67.9	11.2	1 930	1 140	139	255	180	18.0	13.0	44.1	234	534	2.18	< 0.02	6.0
TH26	5 527.0~5 587.0	34.3	220	63.5	11.3	1 480	1 070	133	278	203	21.9	11.9	24.6	223	515	1.81	< 0.02	6.0
TH27	5 533.0~5 627.5	110.9	230	66.0	11.6	1 820	1 100	141	317	162	220.0	13.0	57.8	239	562	2.24	< 0.02	6.0
TH28	5 710.7~5 998.9	15.0	220	61.4	11.3	1 470	1 050	133	284	139	15.6	10.9	47.7	215	501	2.04	< 0.02	5.5
TH29	5 173.0~6 161.0	54.1	220	62.9	9.4	1 790	1 010	131	144	226	24.9	11.2	33.3	197	476	2.31	< 0.02	5.5
TH30	5 811.9~5 891.0	26.9	230	63.7	10.8	1 840	998	139	350	214	39.6	12.2	46.9	239	496	2.16	< 0.02	5.5
TH31	5 862.4~5 883.9	194.1	230	69.7	10.9	1 780	1 150	143	309	139	23.8	11.1	46.7	215	488	2.15	< 0.02	5.5
TH32	6 047.9~6 073.5	55.1	240	69.4	11.2	2 020	1 050	148	320	209	31.4	12.7	92.5	261	605	2.52	< 0.02	5.5
TH33	5 619.9~5 693.0	53.1	190	53.6	9.3	1 450	1 020	118	208	244	18.1	10.6	38.4	192	448	1.82	< 0.02	5.5
TH34	6 104.2~6 207.0	96.5	200	58.2	9.5	1 590	1 040	121	98	203	26.3	13.7	41.5	210	504	2.32	< 0.02	5.5
TH35	5 522.0~5 545.2	35.4	220	62.8	10.4	1 820	803	132	305	58	20.4	12.2	47.6	215	505	2.44	< 0.02	6.0
TH36	5 520.0~5 554.8	162.8	240	69.5	11.1	1 970	1 080	146	294	174	14.5	13.1	47.8	255	584	2.44	< 0.02	5.5
TH37	5 563.0~5 859.6	58.8	150	45.8	7.4	2 580	785	94	28	246	< 0.02	16.2	347.0	260	341	3.19	16.60	5.5
TH38	5 585.0~6 051.6	/	220	63.9	10.2	1 980	920	134	278	209	20.4	11.5	46.9	230	461	1.95	< 0.02	6.0
TH39	5 560.0~5 645.0	32.3	220	64.3	11.1	2 030	1 130	138	251	220	26.1	13.2	43.9	243	546	2.26	< 0.02	6.0
TH40	5 601.5~5 879.4	/	230	64.7	11.8	1 880	1 200	141	208	284	20.8	13.5	22.4	263	496	2.02	< 0.02	6.0
TH41	6 173.0~6 481.1	41.1	220	66.4	10.6	2 240	937	144	219	209	< 0.02	14.4	25.5	290	488	2.91	< 0.02	6.0
TH42	6 098.0~6 174.0	76.5	200	59.2	8.6	1 610	856	121	216	255	21.8	13.3	52.4	201	404	2.31	< 0.02	5.7
TH43	6 132.0~6 240.0	27.7	200	59.7	8.9	1 710	964	124	100	209	13.1	13.2	40.9	231	454	2.41	7.48	5.5
TH44	5 878.0~6 066.0	189.5	240	71.4	12.0	2 630	1 070	154	148	99	12.3	14.2	73.9	323	593	3.38	7.79	5.5
TH45	5 823.5~5 978.0	111.8	240	71.4	10.4	1 770	992	148	172	174	13.4	12.4	50.3	234	537	2.58	< 0.02	5.5
TH46	6 529.0~6 538.0	/	220	57.1	16.8	1 180	1 130	137	292	73	< 0.02	6.4	10.3	145	529	2.32	< 0.02	5.5
TH47	6 475.0~6 570.0	375.3	220	67.2	10.4	2 460	807	144	131	58	< 0.02	14.7	21.3	296	436	3.16	< 0.02	6.0
TH48	6 516.0~6 600.0	8.4	200	59.5	11.4	556	1 540	129	663	17	< 0.02	2.9	25.0	45	480	1.15	16.60	6.0
TH49	6 702.3~6 807.1	45.4	210	60.9	10.6	1 320	868	134	86	290	< 0.02	16.0	20.9	237	436	2.26	< 0.02	6.0
TH50	6 519.5~6 602.0	31.0	200	59.6	10.4	1 380	873	124	135	304	13.5	15.1	22.7	217	433	2.25	< 0.02	6.0
TH51	6 427.9~6 915.0	11.8	220	67.9	10.4	2 460	819	136	163	226	< 0.02	15.2	28.1	248	461	3.17	< 0.02	6.0
TH52	6 102.0~6 164.0	31.4	220	69.8	10.6	1 930	933	139	152	130	18.6	14.2	22.3	252	443	2.43	< 0.02	6.0
TH53	6 205.0~6 780.4	57.1	210	64.1	10.1	1 110	987	130	123	232	11.9	13.3	19.2	230	391	1.70	< 0.02	6.0
TH54	6 862.0~7 323.0	51.2	150	44.0	7.8	1 710	698	94	429	130	< 0.02	15.0	58.6	215	421	2.26	33.90	6.0
TH55	6 903.4~7 328.6	55.6	140	43.8	5.9	1 900	570	88	392	246	< 0.02	18.5	83.3	193	448	2.77	44.60	6.0
TH56	6 847.2~7 023.0	47.7	180	54.9	8.4	2 540	736	113	372	174	12.1	18.4	76.0	214	570	3.55	25.30	6.0
TH57	6 753.0~6 840.0	179.4	250	71.0	12.4	2 740	958	155	179	116	12.8	12.2	34.9	266	419	4.98	< 0.02	5.5
TH58	6 400.4~6 681.7	31.0	210	59.8	10.6	1 710	1 050	131	263	86	11.9	14.0	45.3	220	475	2.34	< 0.02	5.5
TH59	6 172.0~6 249.8	/	250	70.9	11.4	2 190	961	152	184	139	15.7	10.6	20.3	263	406	2.86	< 0.02	5.5
TH60	6 238.0~6 687.0	73.2	200	59.8	9.5	2 080	882	128	211	174	17.8	13.6	46.4	249	492	2.51	12.30	6.0
TH61	6 544.6~6 642.0	76.1	250	72.9	11.7	2 280	995	153	186	151	15.2	12.4	26.1	266	482	3.31	< 0.02	5.5
TH62	6 214.0~6 249.0	54.4	230	67.4	11.1	2 110	971	145	207	145	18.8	11.6	35.4	239	415	3.08	< 0.02	5.5
TH63	6 195.4~6 333.0	42.5	180	53.4	8.2	1 710	788	112	150	203	23.4	12.9	36.5	202	371	2.25	< 0.02	5.5
TH64	6 265.0~6 395.7	/	260	73.0	12.4	2 380	964	156	193	110	398.0	12.3	43.8	269	441	3.48	< 0.02	5.5

3 油田水地球化学特征

3.1 油田水化学组分

塔河油田奥陶系油田水主要阳离子浓度高低为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, Na^+ 平均值为 63.81 g/L, Ca^{2+} 平均值为 10.79 g/L, K^+ 平均值为 1 781.19 mg/L, Mg^{2+} 平均值为 968.20 mg/L; 主要阴离子浓度高低为: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$, Cl^- 平均值为 134.58 g/L, SO_4^{2-} 平均值为 255.31 mg/L, HCO_3^- 平均值为 177.70 mg/L, NO_3^- 平均值为 33.12 mg/L。未检测出 CO_3^{2-} , 这是因为油田水样品 pH 值介于 5.5~6.0 之间, 呈弱酸性, 因此未检测出 CO_3^{2-} 是合理的(表 1)。由于封闭环境下普遍存在的细菌还原作用, 油田水中 SO_4^{2-} 含量不高可能和细菌还原作用有关。

3.2 矿化度特征

油田水的总矿化度(TDS)是指水中各种离子、分子、化合物的总含量, 一般用在 110 °C 下把水分蒸干所剩残渣的量来计量(钱一雄等, 2005)。测试结果表明, 塔河油田奥陶系油田水普遍拥有较高的矿化度含

量, 介于 140~260 g/L, 平均值为 216.56 g/L, 根据《矿产地质勘查规范 盐类》(DZ/T 0212—2020), 属于中等矿化度; 达到正常海水(35 g/L)矿化度的 6.19 倍, 主体分布于 210~240 g/L(表 1, 图 3)。

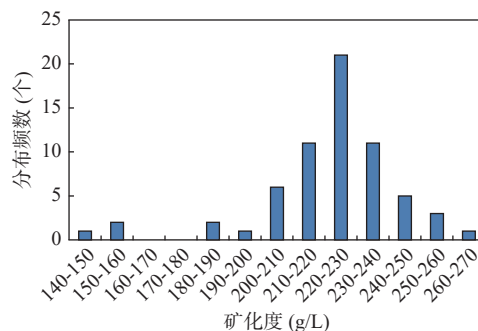


图3 塔河油田奥陶系油田水矿化度分布频率图

Fig. 3 TDS distribution frequency diagram of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

油田水矿化度的大小主要受油田水中 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 等主要离子的影响, 与 Cl^- 的相关系数为 0.936 (图 4a), 与 $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 的相关系数为 0.894 (图 4b), 说明塔河油田奥陶系油田水的矿化度主要受这两类离子浓度控制。

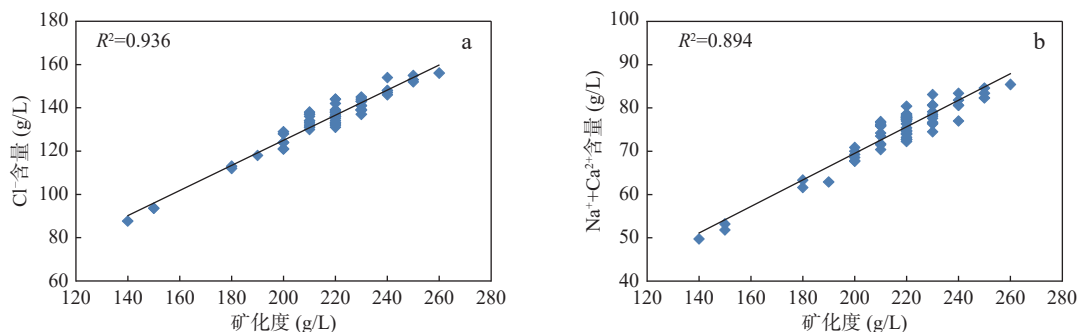


图4 塔河油田奥陶系油田水矿化度与 Cl^- 和 $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 相关性

Fig. 4 Relationship between TDS and Cl^- , $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

纵向上, 随着深度的增加, 塔河油田奥陶系油田水矿化度总体先有增大趋势, 后又略降(图 5)。油田水中伴生资源含量与矿化度的相关性均不强, K^+ 、 Li^+ 、 B^{3+} 、 Br^- 、 Rb^+ 、 Sr^{2+} 与矿化度的相关系数分别为 0.037、0.047、0.173、0.134、0.021 和 0.142(图 6)。

3.3 油田水类型

各国学者对于油田水分类方法不同, 其中使用最多的是苏林分类(张金来, 1979; 汪蕴璞, 1983)。苏林分类法是根据油田水中的盐类离子组成及含量差异, 依据 Na^+/Cl^- 、 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)/\text{SO}_4^{2-}$ 和 $(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)/\text{Mg}^{2+}$ 成因系数将油田水划分为 Na_2SO_4 型、 NaHCO_3 型、 MgCl_2 型

和 CaCl_2 型 4 种(表 2)。

根据塔河油田油田水测试结果计算其成因系数(表 3), Na^+/Cl^- 值介于 0.42~0.50, 平均值为 0.47, 全部小于 1; $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)/\text{SO}_4^{2-}$ 值介于 -1 707.14~-104.83, 平均值为 -342.96, 全部小于 0; $(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)/\text{Mg}^{2+}$ 值介于 45.13~114.82, 平均值为 74.27, 全部大于 1。依据苏林分类法塔河油田奥陶系油田水均为氯化钙型, 说明塔河油田奥陶系油田水埋藏较深、不受大气降水补给。

3.4 油田水特征系数

除了常用到的矿化度、水型外, 特征系数常用来反映油田水的成因、赋存状态以及演化规律。常用的

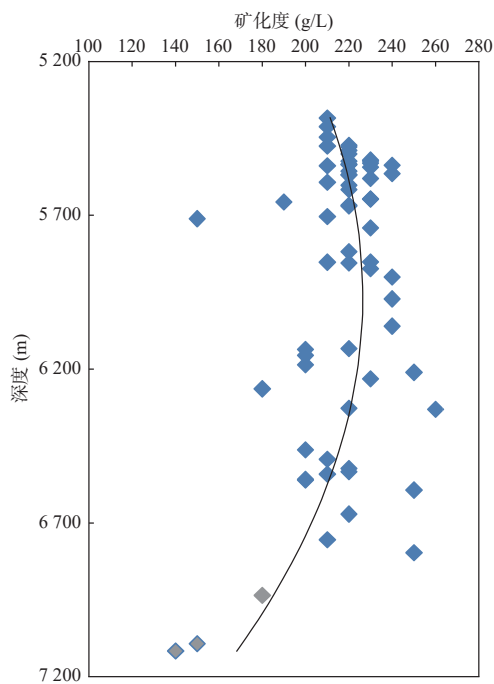


图5 塔河油田奥陶系油田水矿化度与深度关系

Fig. 5 Relationship between TDS and depth of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

特征系数有钠氯系数(Na^+/Cl^-)_c、溴氯系数($1\,000\times\text{Br}^-/\text{Cl}^-$)_p、脱硫系数($100\times\text{SO}_4^{2-}/2\times\text{Cl}^-$)_c、钙镁系数($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$)_c、钾氯系数($1\,000\times\text{K}^+/\text{Cl}^-$)_p和硼氯系数($1\,000\times\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$)_c等(Davis et al., 1998, 林晓英等, 2012; 韩佳君等, 2013; 李建森等, 2014; 杨丽杰等, 2018; 牛新生等, 2021; 赵雪松等, 2024), 其中c代表相关组分的物质质量浓度, p代表相关组分的质量浓度。

(1) 钠氯系数(Na^+/Cl^-)_c可以判断油田水的来源、浓缩变质程度及水动力条件等。通常正常海水钠氯系数为0.85~0.87; 岩盐层溶滤形成的地下水接近1; 受大气降水淋滤作用影响的地下水一般大于1; 受阳离子交替吸附和强烈的水岩相互作用的地下水一般小于0.85(李雯霞等, 2016; 石国成等, 2016)。研究区油田水的钠氯系数为0.64~0.77, 平均值为0.73(表4, 图7), 说明塔河油田奥陶系油田水经历了阳离子交替吸附和强烈的水岩相互作用。塔河油田奥陶系油田水在长时间的埋藏过程中与各种矿物及岩石发生反应或进行交换作用, 特别表现在碳酸盐岩的溶解和再成岩中钙离子进入到油田水溶液中, 这也是塔河油田

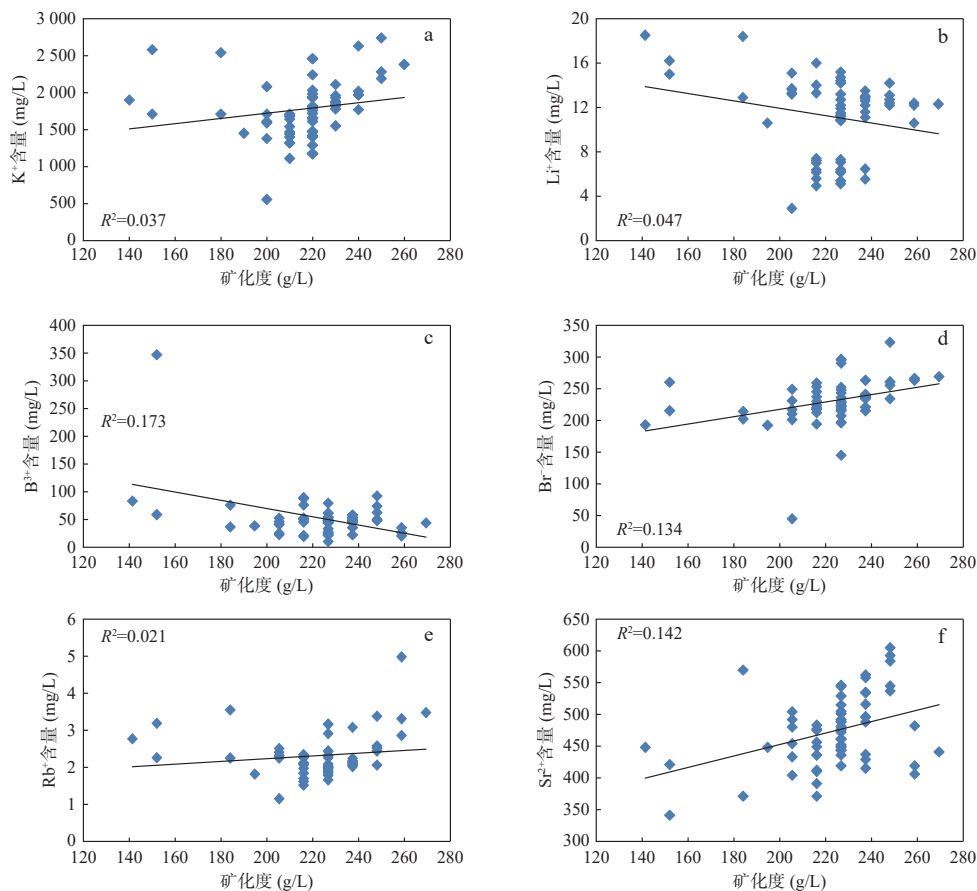
图6 塔河油田奥陶系油田水矿化度与 K^+ 、 Li^+ 、 B^{3+} 、 Br^- 、 Rb^+ 、 Sr^{2+} 含量关系Fig. 6 Relationship between TDS and K^+ 、 Li^+ 、 B^{3+} 、 Br^- 、 Rb^+ 、 Sr^{2+} content of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

表 2 油田水的苏林分类法

Tab. 2 A classification method of oilfield water by Sulin

水类型		成因系数(质量浓度比)		
		Na^+/Cl^-	$(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)/\text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Cl}^--\text{Na}^+)/\text{Mg}^{2+}$
大陆水	Na_2SO_4	> 1	< 1	< 0
	NaHCO_3	> 1	> 1	< 0
海水	MgCl_2	< 1	< 0	< 1
深层水	CaCl_2	< 1	< 0	> 1

表 3 塔河油田奥陶系油田水成因系数

Tab. 3 Genetic coefficient of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

样品编号	Na^+/Cl^-	$(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)/\text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Cl}^--\text{Na}^+)/\text{Mg}^{2+}$	样品编号	Na^+/Cl^-	$(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)/\text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Cl}^--\text{Na}^+)/\text{Mg}^{2+}$
TH01	0.49	-157.54	84.24	TH33	0.45	-309.62	63.14
TH02	0.48	-288.80	99.34	TH34	0.48	-644.10	60.38
TH03	0.50	-181.67	114.82	TH35	0.48	-226.89	86.18
TH04	0.48	-334.53	77.79	TH36	0.48	-260.20	70.83
TH05	0.48	-201.96	83.87	TH37	0.49	-1 707.14	60.89
TH06	0.49	-229.93	78.36	TH38	0.48	-252.16	76.20
TH07	0.47	-313.22	79.54	TH39	0.47	-293.63	65.22
TH08	0.48	-306.84	77.45	TH40	0.46	-366.83	63.58
TH09	0.49	-187.87	70.98	TH41	0.46	-354.34	82.82
TH10	0.48	-382.54	73.70	TH42	0.49	-286.11	72.20
TH11	0.46	-144.95	76.33	TH43	0.48	-643.00	66.70
TH12	0.47	-335.19	71.68	TH44	0.46	-558.11	77.20
TH13	0.47	-308.62	69.51	TH45	0.48	-445.35	77.22
TH14	0.48	-354.95	68.94	TH46	0.42	-273.63	70.71
TH15	0.47	-225.00	67.50	TH47	0.47	-586.26	95.17
TH16	0.49	-237.41	64.67	TH48	0.46	-104.83	45.13
TH17	0.47	-262.41	69.81	TH49	0.45	-848.03	84.22
TH18	0.49	-216.93	65.28	TH50	0.48	-477.04	73.77
TH19	0.48	-208.46	93.62	TH51	0.50	-417.79	83.15
TH20	0.48	-250.00	65.00	TH52	0.50	-455.26	74.17
TH21	0.47	-277.04	67.17	TH53	0.49	-535.77	66.77
TH22	0.48	-225.16	63.69	TH54	0.47	-115.85	71.20
TH23	0.47	-277.36	70.00	TH55	0.50	-111.99	77.02
TH24	0.45	-292.09	73.82	TH56	0.49	-156.18	78.94
TH25	0.49	-278.82	62.37	TH57	0.46	-469.27	87.68
TH26	0.48	-250.00	64.95	TH58	0.46	-270.72	67.81
TH27	0.47	-236.59	68.18	TH59	0.47	-440.76	84.39
TH28	0.46	-252.11	68.19	TH60	0.47	-323.22	77.32
TH29	0.48	-472.92	67.43	TH61	0.48	-430.65	80.50
TH30	0.46	-215.14	75.45	TH62	0.46	-374.88	79.92
TH31	0.49	-237.22	63.74	TH63	0.48	-390.67	74.37
TH32	0.47	-245.63	74.86	TH64	0.47	-430.05	86.10

表 4 塔河油田奥陶系油田水特征系数

Tab. 4 Characteristic coefficient of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

样品编号	钠氯系数	溴氯系数	脱硫系数	钙镁系数	钾氯系数	硼氯系数
TH01	0.75	1.59	0.06	8.13	10.53	1.29
TH02	0.74	1.53	0.03	11.19	10.76	1.04
TH03	0.77	1.63	0.05	9.93	12.24	1.25
TH04	0.74	1.69	0.03	7.78	13.71	1.13
TH05	0.73	1.50	0.05	8.58	9.35	1.30
TH06	0.75	1.44	0.04	7.61	8.60	1.16
TH07	0.72	1.60	0.03	7.38	10.00	1.23
TH08	0.75	1.59	0.03	7.46	10.07	1.45
TH09	0.75	2.17	0.05	6.79	12.21	1.91
TH10	0.73	1.78	0.03	6.74	11.16	2.12
TH11	0.71	1.48	0.07	7.24	10.08	1.27
TH12	0.73	1.89	0.03	6.84	12.41	2.10
TH13	0.73	1.86	0.03	6.71	10.59	2.12
TH14	0.74	1.64	0.03	6.71	10.73	1.82
TH15	0.72	1.64	0.04	6.82	12.73	1.23
TH16	0.75	1.68	0.04	6.47	12.93	1.08
TH17	0.72	1.72	0.04	6.46	13.45	1.26
TH18	0.76	1.68	0.04	6.41	12.94	1.09
TH19	0.74	1.65	0.05	8.01	12.50	1.32
TH20	0.74	1.62	0.04	6.17	11.67	1.46
TH21	0.73	1.75	0.04	6.18	14.37	1.20
TH22	0.75	1.72	0.04	6.45	13.36	1.28
TH23	0.73	1.73	0.04	6.47	13.45	1.36
TH24	0.69	1.77	0.03	6.17	13.40	1.40
TH25	0.75	1.68	0.03	5.96	13.88	1.04
TH26	0.74	1.68	0.04	6.40	11.13	0.61
TH27	0.72	1.70	0.04	6.40	12.91	1.34
TH28	0.71	1.62	0.04	6.53	11.05	1.18
TH29	0.74	1.50	0.02	5.62	13.66	0.83
TH30	0.71	1.72	0.05	6.56	13.24	1.11
TH31	0.75	1.50	0.04	5.75	12.45	1.07
TH32	0.72	1.76	0.04	6.47	13.65	2.05
TH33	0.70	1.63	0.03	5.54	12.29	1.07
TH34	0.74	1.74	0.01	5.54	13.14	1.12
TH35	0.73	1.63	0.04	7.85	13.79	1.18
TH36	0.73	1.75	0.04	6.23	13.49	1.07
TH37	0.75	2.78	0.01	5.70	27.56	12.16
TH38	0.74	1.72	0.04	6.72	14.78	1.15
TH39	0.72	1.76	0.03	5.96	14.71	1.04
TH40	0.71	1.87	0.03	5.96	13.33	0.52
TH41	0.71	2.01	0.03	6.86	15.56	0.58
TH42	0.75	1.66	0.03	6.10	13.31	1.42
TH43	0.74	1.86	0.01	5.57	13.79	1.08
TH44	0.71	2.10	0.02	6.80	17.08	1.57
TH45	0.74	1.58	0.02	6.36	11.96	1.11
TH46	0.64	1.06	0.04	9.02	8.61	0.25
TH47	0.72	2.06	0.02	7.82	17.08	0.49
TH48	0.71	0.35	0.09	4.49	4.31	0.64
TH49	0.70	1.77	0.01	7.41	9.85	0.51
TH50	0.74	1.75	0.02	7.22	11.13	0.60
TH51	0.77	1.82	0.02	7.70	18.09	0.68
TH52	0.77	1.81	0.02	6.89	13.88	0.53

续表 4

样品编号	钠氯系数	溴氯系数	脱硫系数	钙镁系数	钾氯系数	硼氯系数
TH53	0.76	1.77	0.02	6.21	8.54	0.48
TH54	0.72	2.29	0.08	6.80	18.25	2.05
TH55	0.77	2.20	0.08	6.32	21.66	3.11
TH56	0.75	1.89	0.06	6.93	22.48	2.21
TH57	0.71	1.72	0.02	7.85	17.68	0.74
TH58	0.70	1.68	0.04	6.12	13.05	1.13
TH59	0.72	1.73	0.02	7.19	14.41	0.44
TH60	0.72	1.95	0.03	6.51	16.25	1.19
TH61	0.73	1.74	0.02	7.13	14.90	0.56
TH62	0.72	1.65	0.03	6.93	14.55	0.80
TH63	0.74	1.80	0.02	6.33	15.27	1.07
TH64	0.72	1.72	0.02	7.80	15.26	0.92

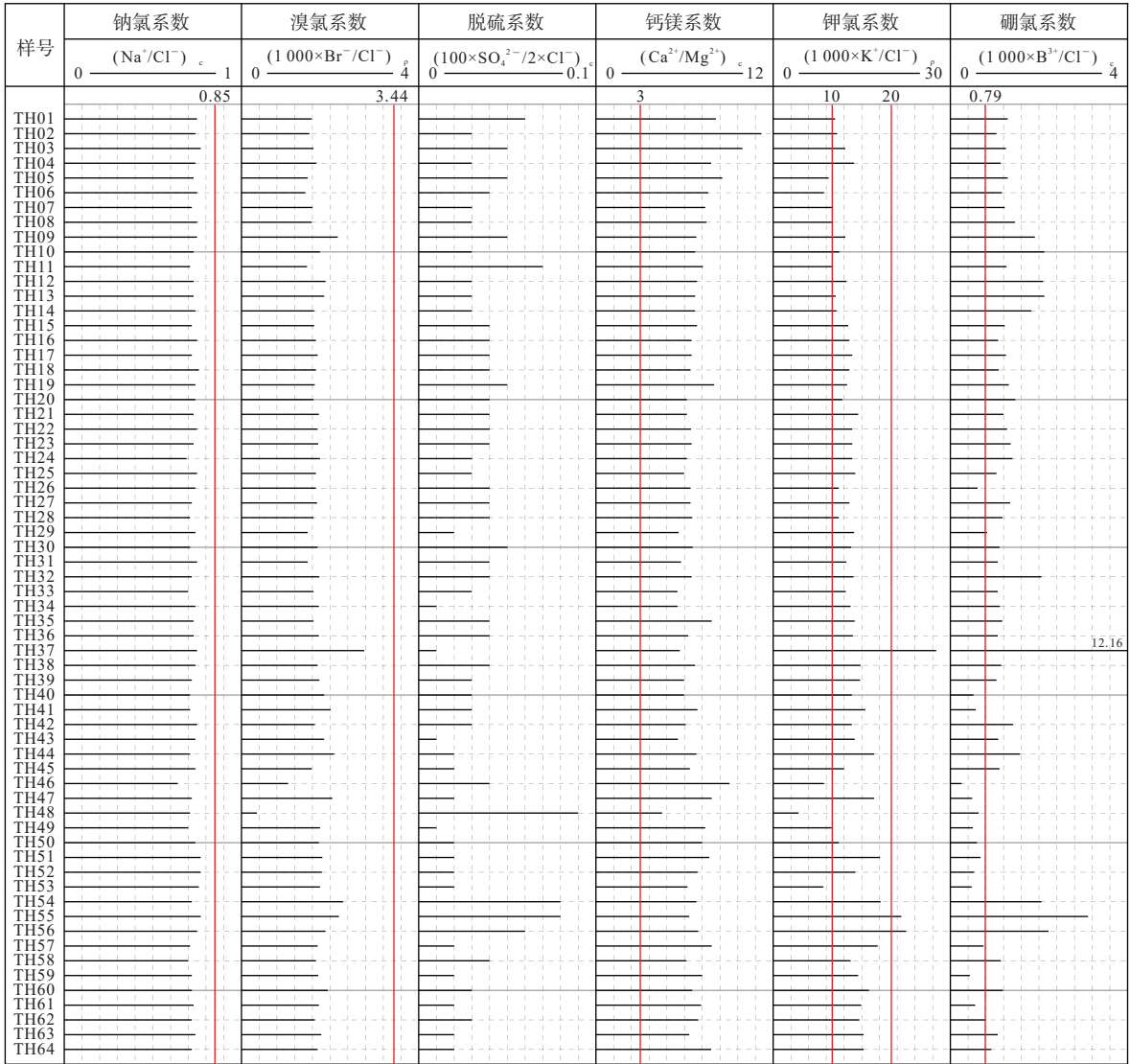


图7 塔河油田奥陶系油田水特征系数判别图

Fig. 7 Characteristic coefficient of Ordovician oilfield water in Tahe Oilfield

奥陶系油田水 Ca^{2+} 含量较高的原因。

成因。自然界中溴主要赋存在海洋中,在海水中的浓

(2) 溴氯系数 $(1\,000 \times \text{Br}^-/\text{Cl}^-)_p$ 可以判断油田水的

度为 65 mg/L,海水具有稳定的 Cl 和 Br 含量(Fontes et

al., 1986; Alcalá et al., 2008)。正常海水溴氯系数约为 3.44, 而溶滤油田水的溴氯系数通常较低(赵雪松等, 2024)。研究区油田水的溴氯系数为 0.35~2.78, 平均值为 1.72(表 4, 图 7), 远远低于 3.44, 说明塔河油田奥陶系油田水为溶滤油田水。

(3) 脱硫系数($100 \times \text{SO}_4^{2-} / 2 \times \text{Cl}^-$)。反映油田水所处的封闭程度, 封闭性越好还原性越强, 其值越小。通常用 1 作为脱硫作用彻底与否的界限值, 脱硫系数小于 1, 表明地层水还原彻底, 油藏封闭性好; 其值大于 1, 则表明还原不彻底, 可能受浅表层氧化作用的影响(李雯霞等, 2016)。研究区油田水的脱硫系数为 0.01~0.09, 平均值为 0.04(表 4, 图 7), 说明塔河油田奥陶系油田水还原彻底、油藏封闭性好。

(4) 钙镁系数($\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$)。反映油田水的变质程度和封闭性, 封闭性越好, 则变质程度越高, 其值越高。判断标准值为 3, 深层油田水此系数一般大于 3(李廷伟等, 2006; 韩佳君等, 2013)。研究区油田水的钙镁系数为 4.49~11.19, 平均值为 6.85(表 4, 图 7), 均大于 3, 说明塔河油田奥陶系油田水的封闭性好, 且变质程度较高。

(5) 钾氯系数($1000 \times \text{K}^+ / \text{Cl}^-$)_p。反映钾的富集和油田水的浓缩程度。通常钾氯系数在 10~20 时为异常, 大于 20 时为异常显著, 大于 75 时达到钾盐沉积阶段(李建森等, 2014)。研究区油田水的钾氯系数为 4.31~27.56, 平均值为 13.36(表 4, 图 7)。钾氯系数除 TH48-TH46-TH49、TH53 和 TH05-TH06 等 3 个井区外, 其余井的钾氯系数均大于 10, 达到异常; TH37 和 TH55-TH56 两个井区的钾氯系数达到 20 以上, 为异常显著。

(6) 硼氯系数($1000 \times \text{B}^{3+} / \text{Cl}^-$)。可以判断油田水所溶解的固体盐类物质来源(韩继龙, 2018; 赵雪松等, 2024), 海相地层水硼氯系数值为 0.79(吴双等, 2024)。研究区油田水的硼氯系数为 0.25~12.16, 平均值为 1.35(表 4, 图 7), 远高于海相该系数特征值, 说明油田水中的离子并非来源于海相物质, 而是来源于

岩盐、石膏和碎屑黏土矿物等。一般认为富氯油田水主要是由盐岩矿物溶解造成的(蔡立国等, 2002), 这与前述塔河油田奥陶系油田水矿化度主要受 $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 、 Cl^- 的控制一致。

4 油田水伴生资源分布特征

根据《矿产地质勘查规范 盐类》(DZ/T 0212—2020)、矿产资源工业要求参考手册及前人研究成果(宋鹤彬, 1997; 樊启顺等, 2007), 总结油田水中伴生资源单独开采及综合利用指标(表 5)。塔河油田奥陶系油田水中 K^+ 含量大多为 1 400~2 000 mg/L(图 8a), 平均值为 1 781.19 mg/L; Li^+ 含量主大多为 10~16 mg/L(图 8b), 平均值为 11.16 mg/L; Br^- 含量大多为 200~260 mg/L(图 8c), 平均值为 230.77 mg/L; Sr^{2+} 含量大多为 430~510 mg/L(图 8d), 平均值为 473.31 mg/L, 均能达到综合利用的工业指标。 B^{3+} 含量大多为 40~60 mg/L(图 8e), 平均值为 52.59 mg/L, TH13、TH24 等 13 口井能达到综合利用指标; Γ 含量大部分井小于 0.02 mg/L, 只有 TH37、TH48、TH54、TH55、TH56、TH60 井能达到综合利用的指标(图 8f), 平均值为 2.70 mg/L; Rb^+ 含量普遍较低, 介于 1.15~4.98 mg/L, 平均值为 2.32 mg/L, 未达到综合利用的指标。

4.1 K 元素平面分布特征

塔河油田奥陶系油田水 K^+ 含量为 556~2 740 mg/L, 平均值为 1 781.19 mg/L(表 1, 图 8a), 除 TH48 井外, 其余井 K^+ 含量均大于综合利用的工业指标。平面上 K^+ 含量低值区位于 TH48-TH46、TH53、TH33 和 TH05-TH06 井区; 高值区位于 TH57、TH44、TH37、TH56 和 TH47-TH51 井区(图 9)。

4.2 Li 元素平面分布特征

塔河油田奥陶系油田水 Li^+ 含量为 2.9~18.5 mg/L, 平均值为 11.16 mg/L(表 1, 图 8b)。平面上 Li^+ 含量与 K^+ 含量分布具有相似的特征, 高值区与低值区基本一

表 5 油田水单独开采及综合利用指标(mg/L)

Tab. 5 Index of individual exploitation and comprehensive utilization of oilfield water (mg/L)

组分	K^+	Li^+	B^{3+}	Br^-	Γ	Rb^+	Sr^{2+}
单独开采	3 100	16.4	300	300	30	20	44.2
综合利用	1 054	8.2	60	50-60	10	10	22.1
塔河油田奥陶系	1 781.19	11.16	52.29	230.76	2.70	2.32	473.31

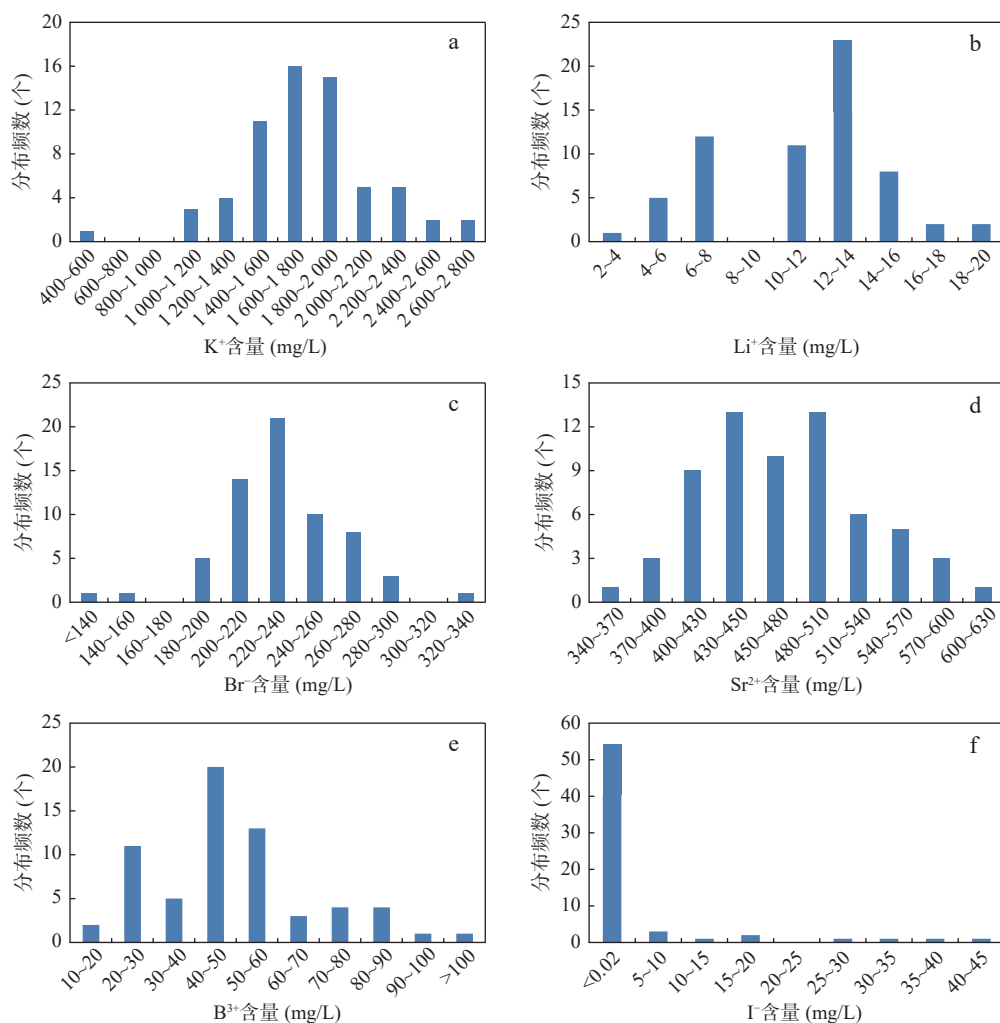


图8 塔河油田奥陶系油田水伴生资源含量分布频率图

Fig. 8 Distribution frequency of water-associated resources in Ordovician oilfield water of Tahe Oilfield

致。低值区位于 TH48-TH46、TH18、TH15、TH03-TH06-TH11 井区; 高值位于 TH37、TH56、TH47-TH51 和 TH41-TH52 井区(图 10)。

4.3 Br 元素平面分布特征

塔河油田奥陶系油田水 Br^- 含量为 45~323 mg/L, 平均值为 230.77 mg/L(表 1, 图 8c), 除 TH48 井外, 其余井 Br^- 含量均大于综合利用的工业指标。平面上 Br^- 含量与 K^+ 、 Li^+ 含量分布具有相似的特征, 高值区与低值区基本一致。低值区位于 TH48-TH46、TH33-TH29-TH06-TH11 井区; 高值位于 TH44、TH61、TH57、TH09、TH41 和 TH47 井区(图 11)。

4.4 Sr 元素平面分布特征

塔河油田奥陶系油田水 Sr^{2+} 含量为 341~605 mg/L, 平均值为 473.31 mg/L(表 1, 图 8d), Sr^{2+} 在平面上总体呈现北东低, 向南西增高的趋势, 低值区位于

TH37、TH03 和 TH53-TH42-TH63 井区, 高值区位于 TH32-TH27-TH23、TH46、TH44 和 TH56 井区(图 12)。

5 结论

(1) 塔河油田奥陶系油田水主要阳离子浓度高低为: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 主要阴离子浓度高低为: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$, 矿化度为 140~260 g/L, 平均值为 216.56 g/L, 属于中等矿化度, 达到正常海水矿化度的 6.19 倍。

(2) 塔河油田奥陶系油田水均为氯化钙型, 经历了阳离子交替吸附和强烈的水岩相互作用, 为溶滤油田水, 还原彻底、油藏封闭性好、变质程度较高, 油田水中的离子主要来源于岩盐、石膏和碎屑黏土矿物等。

(3) 塔河油田奥陶系油田水中富含的 K^+ 、 Li^+ 、 Br^- 、

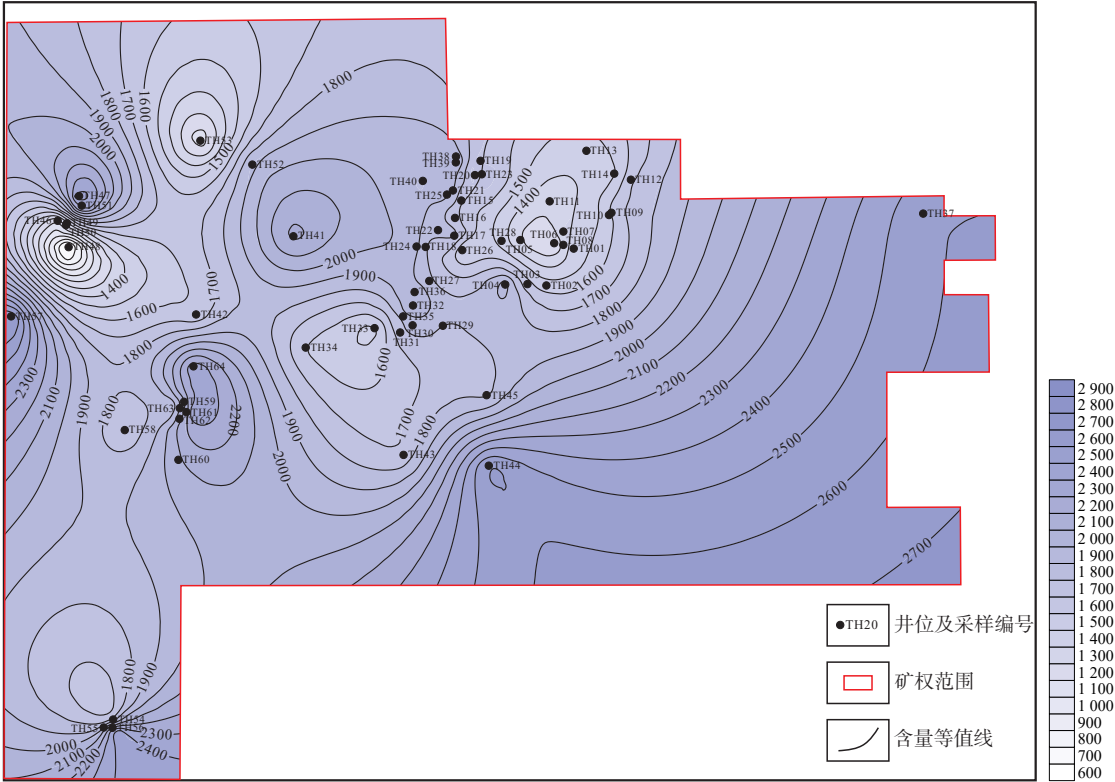


图9 塔河油田奥陶系油田水钾含量(mg/L)等值线图

Fig. 9 Contour diagram of potassium content(mg/L) in Ordovician oilfield water of Tahe Oilfield

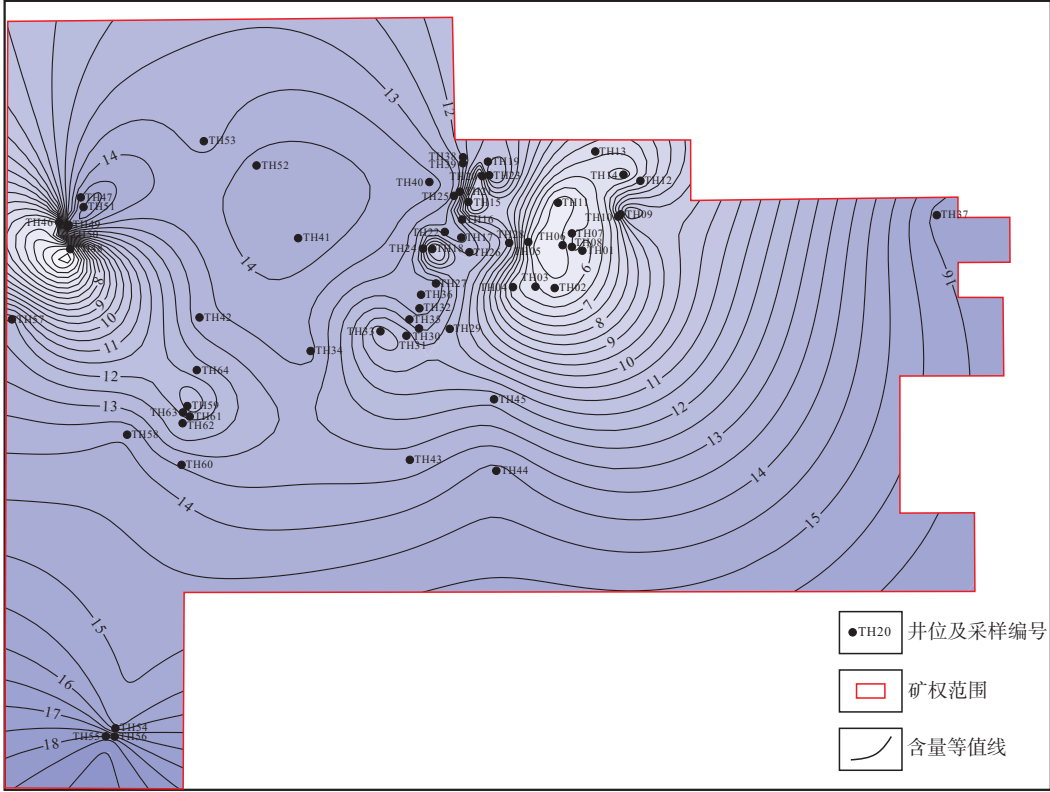


图10 塔河油田奥陶系油田水锂含量(mg/L)等值线图

Fig. 10 Contour diagram of lithium content(mg/L) in Ordovician oilfield water of Tahe Oilfield

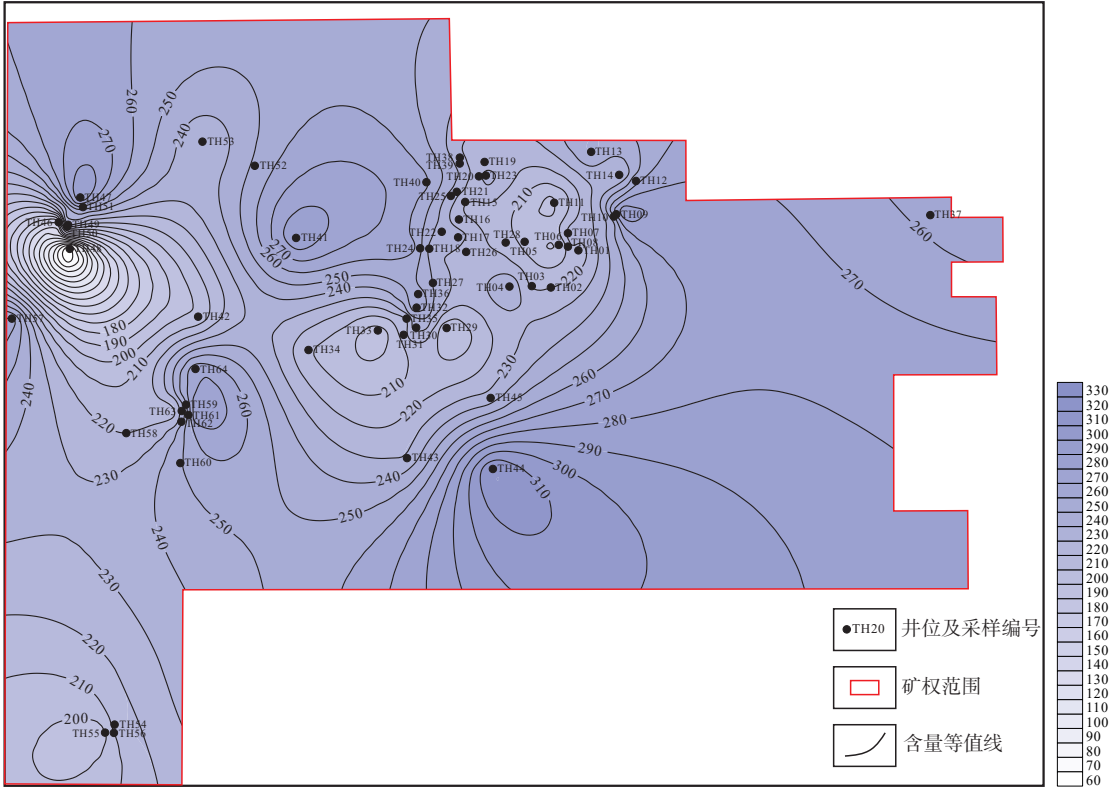


图 11 塔河油田奥陶系油田水溴含量(mg/L)等值线图

Fig. 11 Contour diagram of bromine content (mg/L) in Ordovician oilfield water of Tahe Oilfield

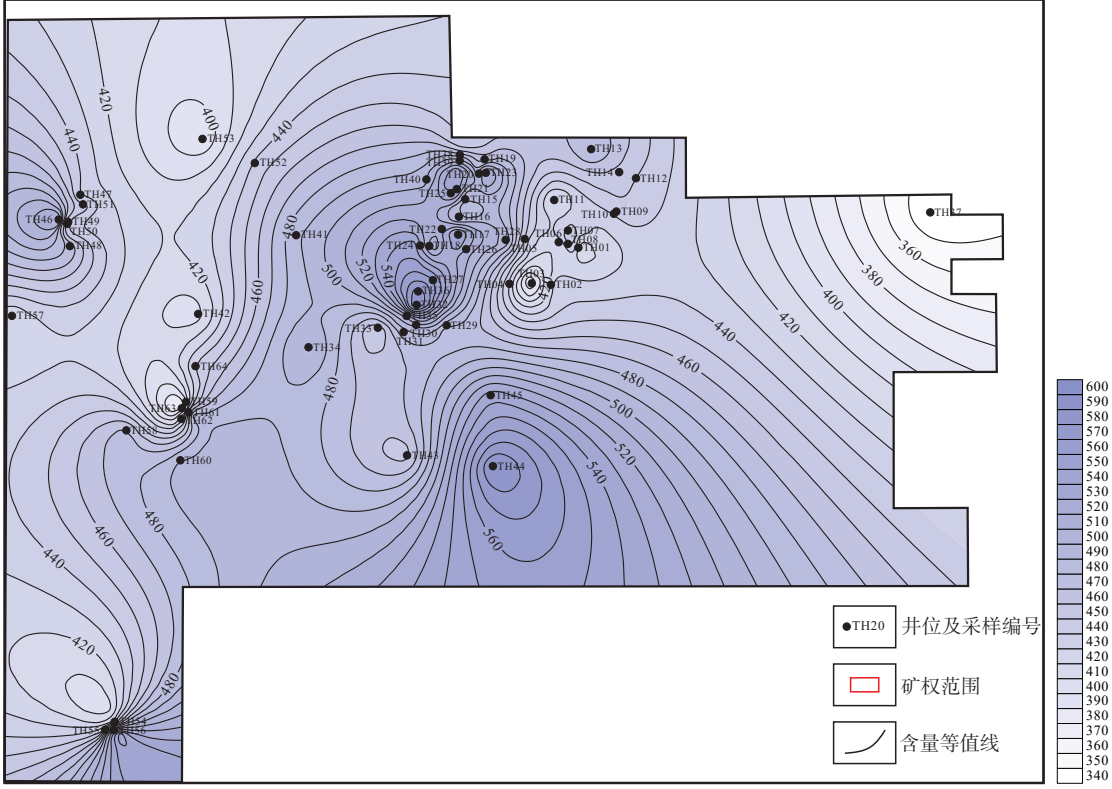


图 12 塔河油田奥陶系油田水锶含量(mg/L)等值线图

Fig. 12 Contour diagram of strontium content (mg/L) in Ordovician oilfield water of Tahe Oilfield

Sr^{2+} 等伴生资源达到综合利用的工业指标,且 K^+ 、 Li^+ 和 Br^- 在平面上具有相似的分布规律。

致谢: 油田水样品由中国地质调查局西安地质地质调查中心实验测试室(自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室)完成, 在此表示衷心感谢!

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 蔡春芳, 梅博文, 李伟. 塔里木盆地油田水文地球化学[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 614–623.
- CAI Chunfang, MEI Bowen, LI Wei. The Hydrogeochemistry of Oil-fields in Tarim Basin[J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 614–623.
- 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 塔里木盆地油田水的成因与演化[J]. 地质论评, 1997, 43(6): 650–657.
- CAI Chunfang, MEI Bowen, MA Ting, et al. Origin and evolution of oilfield waters in the Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 1997, 43(6): 650–657.
- 蔡春芳. 塔中古生界油田水的成因和混合的证据[J]. 地球化学, 2000, 29(5): 504–510.
- CAI Chunfang. Evidence for origin and mixing of oilfield waters from Paleozoic strata in Tazhong area[J]. *Geochimica*, 2000, 29(5): 504–510.
- 蔡立国, 钱一雄, 刘光祥, 等. 塔河油田及邻区地层水成因探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 57–60.
- CAI Ligu, QIAN Yixiong, LIU Guangxiang, et al. Origin of formation water in Tahe oilfield and adjacents[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(1): 57–60.
- 陈轩, 刘王涵, 鲍典, 等. 塔河油田奥陶系古岩溶洞穴充填物时代鉴别特征及其储集意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 65–75.
- CHEN Xuan, LIU Wanghan, BAO Dian, et al. Ordovician palaeokarst caves in the Tahe Oilfield: Burial age of cave fills and its implication for hydrocarbon reservoirs[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 65–75.
- 付建龙, 吴蝉, 舒树兰, 等. 柴达木盆地西部油田水钾硼锂富集规律及影响因素研究[J]. 盐湖研究, 2006, 14(4): 22–25.
- FU Jianlong, WU Chan, SHU Shulan, et al. Study on the characteristics and influencing factor for the enrichment of potassium, lithium, and boron in the oil field waters of Western Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, 14(4): 22–25.
- 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部典型地区油田卤水水化学异常及资源评价[J]. 盐湖研究, 2007, 15(4): 6–12.
- FAN Qishun, MA Haizhou, TAN Hongbing, et al. Hydrochemical anomaly and resources evaluation of the oil field brines in the typical area of Western Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15(4): 6–12.
- 高娟琴, 王登红, 王伟, 等. 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.
- GAO Yuanqin, WANG Denghong, WANG Wei, et al. Current status and prospects of lithium extraction in major domestic and foreign oil(gas)field waters[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1489–1500.
- 高锡兴. 中国含油气盆地油田水[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- 高玉飞, 钟建华. 塔河油田四区奥陶系储层裂缝特征及其意义[J]. 西北地质, 2013, 46(2): 186–194.
- GAO Yufei, ZHONG Jianhua. The Characters of Fractures and Its Significance of the Reservoir in Ordovician in the Forth Block of Tahe Oil Field[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(2): 186–194.
- 郭春涛, 史江涛, 刘亮, 等. 塔里木盆地塔河地区中下奥陶统沉积特征及其演化模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 68–82.
- GUO Chuntao, SHI Jiangtao, LIU Liang, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of Middle and Lower Ordovician in Tahe aear, Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(1): 68–82.
- 韩继龙. 青海南部含盐盆地卤水水化学及其地质意义研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- HAN Jilong. Hydrochemical of brines and their geological significances from Southern Qinghai, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018.
- 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.
- HAN Jiajun, ZHOU Xun, JIANG Changlong, et al. Hydrochemical characteristics, origin and evolution of the subsurface brines in Western Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 2013, 27(6): 1454–1464.
- 黄华, 刘成林, 张士万, 等. 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[J]. 矿床地质, 2014, 33(5): 1101–1107.
- HUANG Hua, LIU Chenglin, ZHANG Shiwan, et al. Application of geophysical detection method to exploration of deep potassium-rich brine formation: A case study of Jiangling Depression[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(5): 1101–1107.
- 贾存善, 马旭杰, 饶丹, 等. 塔河油田奥陶系油田水同位素特征及地质意义[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 292–297.
- JIA Cunshan, MA Xujie, RAO Dan, et al. Isotopic characteristics of oil filed waters from Ordovician oil accumulations in Tahe oil-field and its geological significances[J]. *Petroleum Geology &*

- Experiment, 2007, 29(3): 292–297.
- 李建森, 李廷伟, 彭喜明, 等. 柴达木盆地西部第三系油田水文地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 50–55.
- LI Jiansen, Li Tingwei, Peng Ximing, et al. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in the Tertiary in western Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 50–55.
- 李进步, 刘志军, 张晨, 等. 鄂尔多斯盆地靖边地区马家沟组气田水地球化学特征及锂来源[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(5): 651–662.
- LI Jinbu, LIU Zhijun, ZHANG Chen, et al. Geochemical characteristics of gas field water and sources of lithium from Majiagou Formation in Jingbian area of Ordos Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(5): 651–662.
- 李鹏春, 刘春晓, 张渊, 等. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 802–808.
- LI Pengchun, LIU Chunxiao, ZHANG Yuan, et al. Geochemical behaviors of the Ordovician formation water in the Tazhong area and its origin and evolution[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 802–808.
- 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, 14(4): 26–32.
- LI Tingwei, TAN Hongbing, FAN Qishun. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the underground brines in West Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2006, 14(4): 26–32.
- 李雯霞, 张西营, 苗卫良, 等. 柴达木盆地北缘冷湖三号构造油田水水化学特征[J]. 盐湖研究, 2016, 24(2): 12–18.
- LI Wenxia, ZHANG Xiyong, MIAO Weiliang, et al. Hydrochemical characteristics of oilfield waters in Lenghu No. 3 structure area of North Edge of Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(2): 12–18.
- 林晓英, 曾溅辉, 杨海军, 等. 塔里木盆地哈得逊油田石炭系地层水化学特征及成因[J]. 现代地质, 2012, 26(2): 377–383.
- LIN Xiaoying, ZENG Jianhui, YANG Haijun, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water from the Carboniferous in Hadson Oil Field, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(2): 377–383.
- 林耀庭, 颜仰基, 吴应林. 四川盆地西部富钾富矿卤水的发现及其地球化学特征和意义[J]. 地质地球化学, 1997, 3(3): 31–39.
- LIN Yaoting, YAN Yangji, WU Yinglin. Discovery of potassium-rich and high-grade brines in western Sichuan basin: geochemistry and significance[J]. Geology and Geochemistry, 1997, 3(3): 31–39.
- 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, 16(1): 1–7.
- LIN Yaoting, CHEN Shaolan. Exploration and development prospect of underground brine in Sichuan Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2008, 16(1): 1–7.
- 刘建伟, 张峭楠. 塔河油田奥陶系油田水特征离子及意义[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(1): 40–46.
- LIU Jianwei, ZHANG Shaonan. Characteristic ions of Ordovician oil field water in Tahe oilfield and its significations[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2005, 20(1): 40–46.
- 刘文, 李永宏, 张涛, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩沉积相及地层学研究[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 104–109.
- LIU Wen, LI Yonghong, ZHANG Tao, et al. Study on the sedimentary facies and sequence stratigraphy of the Ordovician carbonate rock in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(2): 104–109.
- 刘雪, 王春连, 刘学龙, 等. 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J]. 中国地质, 2024, 51(3): 811–832.
- LIU Xue, WANG Chunlian, LIU Xuelong, et al. Main types, distribution, development and utilization of lithium deposits in China[J]. Geology in China, 2024, 51(3): 811–832.
- 穆延宗, 乜贞, 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.
- MU Yanzong, NIE Zhen, BU Lingzhong, et al. Progress in study of potash resources of oil(gas) field brine in China[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(2): 147–160.
- 牛新生, 黄华, 郑绵平. 江汉盆地潜江凹陷地下卤水地球化学特征和分布规律[J]. 地学前缘, 2021, 28(6): 56–65.
- NIU Xinsheng, HUANG Hua, ZHENG Mianping. Geochemical characteristics and distribution patterns of subsurface brines in Qianjiang Depression, Jianghan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(6): 56–65.
- 钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 塔里木盆地塔河油田水元素组成与形成[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 751–757.
- QIAN Yixiong, CAI Ligu, GU Yi. The oilfield water in Tahe area, Tarim Basin: constraints from its element composition[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 751–757.
- 钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 塔里木盆地塔河油田水离子组合及参数的平面分布与油气运移[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 82–87.
- QIAN Yixiong, CAI Ligu, GU Yi. Ion related parameters of formation water distribution in the Taihe oilfield and its relationship to petroleum migration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 82–87.
- 石国成, 张西营, 李永寿, 等. 柴达木盆地北缘冷湖四号构造油田水水化学组成及其分布特征[J]. 盐湖研究, 2016, 24(2): 19–25.
- SHI Guocheng, ZHANG Xiyong, LI Yongshou, et al. Hydrochemical components and their distribution characteristics of oilfield waters in No. 4 structure of Lenghu, Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(2): 19–25.
- 史江涛, 郝君明, 王小雷. 塔河地区奥陶系鹰山组储层特征及其主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 348–362.

- SHI Jiangtao, HAO Junming, WANG Xiaolei. Reservoir characteristics and controlling factors of Lower-Middle Ordovician Yingshan Formation in Tahe Area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 348–362.
- 宋鹤彬. 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[J]. 地球学报, 1997, 18(3): 282–289.
- SONG Hebing. The Hydrochemistry and isotope geochemistry of brines which enrich in potash, boron and bromine in Pinlopa Well 4 in Chengdu Sold Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(3): 282–289.
- 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等. 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[J]. 古地理学报, 2007, 9(3): 313–320.
- TAN Hongbing, CAO Chengdong, LI Tingwei, et al. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(3): 313–320.
- 汪蕴璞. 试论解决油田水化学成分分类的途径和方法[J]. 水文地质工程地质, 1983(6): 14–16.
- WANG Yunpu. Discussion on the ways and methods to solve the classification of oil chemical composition in oilfields[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1983(6): 14–16.
- 王东晖, 李致伟, 李德宗, 等. 黔西地区二叠系梁山组沉积型锂矿的物质来源及富集规律[J]. 地质论评, 2024, 70(S1): 57–58.
- WANG Donghui, LI Zhiwei, LI Dezong, et al. Material source and enrichment law of sedimentary lithium deposits of Permian Liangshan Formation in western Guizhou[J]. Geological Review, 2024, 70(S1): 57–58.
- 吴双, 王峻, 张春光, 等. 普光地区下三叠统富锂钾卤水成因与分布规律[J]. 断块油气田, 2024, 31(1): 96–105.
- WU Shuang, WANG Jun, ZHANG Chunguang, et al. Genesis and distribution law of rich lithium-potassium brine in the Lower Triassic of Puguang area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(1): 96–105.
- 杨丽杰, 侯读杰, 陈晓东, 等. 东海盆地西湖凹陷中部古近系地层水化学特征及地质意义[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(4): 559–571.
- YANG Lijie, HOU Dujie, CHEN Xiaodong, et al. Chemical characteristics and geological significance of Palaeogene formation water in central Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(4): 559–571.
- 张金川, 唐玄, 边瑞康, 等. 塔河地区奥陶系油田水分布与运动学特征研究[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1135–1142.
- ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, BIAN Ruikang, et al. Distribution and kinetic characteristics of hydrothermal fluid from Ordovician oil field in the Tahe Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1135–1142.
- 张金来. 我国油田水的基本特征及其分类讨论[J]. 地质论评, 1979, 25(2): 64–69.
- ZHANG Jinlai. The basic characteristics and classification of oilfield water in China[J]. Geological Review, 1979, 25(2): 64–69.
- 张敏, 张俊. 塔里木盆地轮台断隆油田水组成特征及其意义[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(3): 210–212.
- ZHANG Min, ZHANG Jun. Compositional characteristics of oilfield water from Luntai fault-uplift in Tarim basin and its significance[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(3): 210–212.
- 赵雪松, 周豹, 朱金, 等. 潜江凹陷潜北断裂西南缘深层卤水化学和储层特征及成因分析: 以潜江组四段为例[J]. 资源环境与工程, 2024, 38(5): 574–585.
- ZHAO Xuesong, ZHOU Bao, ZHU Jin, et al. Hydrochemical and reservoir characteristics and genetic analysis of deep brines in the southwest margin of Qianbei Fault, Qianjiang Depression: A case study of the 4th Qianjiang Formation[J]. Resources Environment & Engineering, 2024, 38(5): 574–585.
- 周晓芬. 塔里木盆地北部油田水特征离子及意义[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 372–374.
- ZHOU Xiaofen. Characteristic ions of oilfield water in Northern Tarim basin and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 372–374.
- 张长建, 邓光校, 王震, 等. 碳酸盐岩岩溶古河道发育特征与成因演化: 以塔里木盆地塔河油田 12 区中—下奥陶统为例[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 150–160.
- ZHANG Changjian, DENG Guangxiao, WANG Zhen, et al. Development Characteristics and Genetic Evolution of Carbonate Karst Ancient River: Example from the Middle-Lower Ordovician in Block-12 of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 150–160.
- Alcalá F J, Custodio E. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal[J]. Journal of Hydrology, 2008, 359(1-2): 189–207.
- Davis S N, Whittemore D O, Fabryka-Martinj. Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water[J]. Ground Water, 1998, 36(2): 338–350.
- Fontes J C, Yousfi M, Allison G B. Estimation of long-term, diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in soil water[J]. Journal of Hydrology, 1986, 86(3): 315–327.