

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08001

羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区泉水 水化学特征及其地质意义

曾胜强¹, 陈文彬^{1,2}, 冯兴雷^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要: 泉水的水化学特征可以反映氧化-还原环境和水动力条件, 近年来被广泛地用于石油、天然气以及天然气水合物的找矿工作中。本文对羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区 37 处泉水和 13 件地表水进行了水化学特征、水溶性烃类气体特征和水中氢氧同位素特征分析, 结果表明, 羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区的水型主要为 Na_2SO_4 型和 MgCl_2 型, 其次为 NaHCO_3 型和 CaCl_2 型。矿化度普遍较高, 说明该区具有较好的保存条件。铵根离子的平均含量为 $0.895 \mu\text{g/g}$, 在藏夏河地区高达 $7.381 \mu\text{g/g}$, 表明在藏夏河东部地区有机质相对较为丰富, 这与区域上发育的富有机质页岩结果一致。氢氧同位素结果显示, 该区水体的氢氧同位素落在了大气降水线附近, 表明水体的来源主要受大气降水的补给。另外, 采集的 9 个泉水样品中均检测出一定含量的水溶甲烷, 在白云湖地区的甲烷含量相对较高, 显示出较好的油气潜力。综合研究表明, 藏夏河东和白云湖地区具有良好的油气烃源岩条件, 保存条件较好, 显示出良好的油气和天然气水合物资源前景。

关键词: 羌塘盆地; 泉水; 水化学特征; 氢氧同位素

中图分类号: P618.13; P641.5

文献标识码: A

0 引言

含油气盆地内所发生的一切地质-地球化学作用都是在水的参与下进行的, 因此, 水化学是沉积盆地流体研究中不可分割的一部分, 也是油气地球化学勘查的主要方法之一。从水文地质观点探讨石油与天然气的成藏规律, 查明油田的水文地球化学特征, 可为正确地认识油气富集规律、地层流体的性质和加速油气勘探步伐提供依据。水文地质地球化学研究方法在石油、天然气找矿方面应用十分广泛, 而且取得了较好的效果(张志攀等, 2011)。

水动力场与水化学场时空变化的一致性和连续性, 是盆地水文地球化学研究的基础; 沉积凹陷控制着水化学成分演变的方向, 形成不同风貌的水文地质单元, 地下水锋面内侧, 由于滞流的还原环境, 是油气成藏的主要场所; 近地表水化学异常的

形成是深部油气水影响和作用的结果。因此, 根据水化学异常的分布规律, 可以预测盆地含油气远景, 指示油气富集有利地区(赵克斌等, 2008)。

2014—2015 年期间, 笔者等人在羌塘盆地北部热觉茶卡—藏夏河一带开展天然气水合物调查过程中, 在该区发现了大量的泉点(图 1, 图 2), 共计 37 处, 均为冷泉, 大多以下降泉为主, 这些泉眼主要分布在热觉茶卡、玛尔果茶卡、白云湖和藏夏河一带, 这为评价该区的油气及天然气水合物的保存条件提供了良好的研究素材。另外, 为了更好地进行参数对比, 还采集了 13 处地下水样品, 包括热融洼地、沟水和湖水。本文在对该区泉水和地下水开展水化学特征、水中烃类气体特征以及水中氢氧同位素特征研究的基础上, 结合该区的烃源岩发育条件等, 探讨羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区油气保存条件, 并初步预测油气和天然气水合物有利远景区。

收稿日期: 2020-12-23 改回日期: 2021-4-15

作者简介: 曾胜强(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事羌塘盆地沉积地质和能源地质研究。E-mail: zengshengq@126.com

资助项目: 中国地质调查局调查项目(编号: GZH201400301、DD20190116)资助的成果

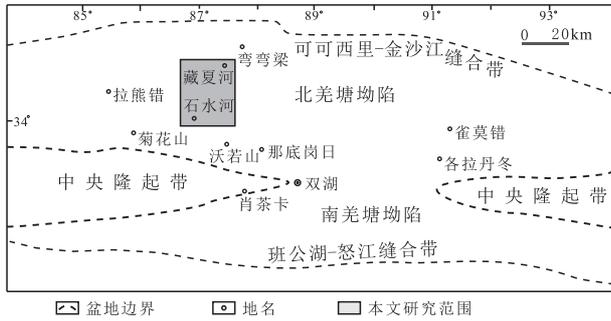


图1 羌塘盆地构造单元划分及研究区位置图

Fig. 1 Tectonic units of the Qiangtang Basin and the location of study area

1 地质背景

羌塘盆地位于青藏高原腹地,属青海省和西藏自治区管辖,地理坐标为北纬 $32^{\circ} \sim 35^{\circ}$,东经 $84^{\circ} \sim 93^{\circ}$,大地构造位于可可西里—金沙江缝合带和班公湖—怒江缝合带之间,为一个呈东西向展布的长条形盆地,其南北宽约300km,长约650 km,面积约 $22 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。羌塘盆地具有两坳一隆的构造格局,北部为北羌塘拗陷,中部为中央隆起,南部为南羌塘拗陷(李忠雄等, 2019)。羌塘盆地是建立在前奥陶系结晶基底之上发育形成的一个大型叠合盆地,是我国目前陆域新区油气勘探程度最低、面积最大、地层沉积序列最完整的中生代海相含油气盆地(王剑等, 2020; 付修根等, 2020)。羌塘盆地在中生代时期经历了前陆盆地、裂谷盆地、被动大陆边缘盆地、活动大陆边缘盆地的演化阶段,最后在早白垩世萎缩消亡(王剑和付修根, 2018)。

羌塘盆地具有较好的成烃条件,主力的烃源岩包括:早白垩世含油页岩层系、早中侏罗世黑色岩系、晚三叠世含煤系地层以及古生代二叠纪—石炭纪泥页岩,其中,晚三叠世含煤系地层,气源条件最为有利,地层厚度大,资源量雄厚,是羌塘盆地常规油气有望取得突破的层位。本次研究的地区涉及了有早白垩世、晚三叠世和古生代二叠纪—石炭纪烃源岩地层,这些烃源岩大多具有有机质含量高、热演化程度中等的特点(陈文彬等, 2015; 冯兴雷等, 2018),为盆地内油气的成藏提供了良好的基础。另外,近年来,很多学者认为羌塘盆地的多年冻土区具备天然气水合物形成的温压条件(张立新, 2001; 黄朋等, 2002; 陈多福等, 2005; 祝有海等, 2010, 2011; 冯兴雷等, 2015),因此,这些烃源岩的发育还为天然气水合物成藏提供了良好的物

源条件。油气的保存条件一直是羌塘盆地常规和非常规油气勘探开发过程中研究的难点和薄弱环节,而且相关研究较少。研究表明,地下水可以反映氧化—还原环境和水动力条件,其水化学特征、水溶性烃类气体特征和水中氢氧同位素特征等对于盆地内油气的保存条件具有很好的指示意义。本文试图通过地下水(主要为泉水)的水化学特征的分析,对研究区的油气保存条件进行初步的讨论,以对该区的油气和天然气水合物的成藏条件提供辅助的地质证据。

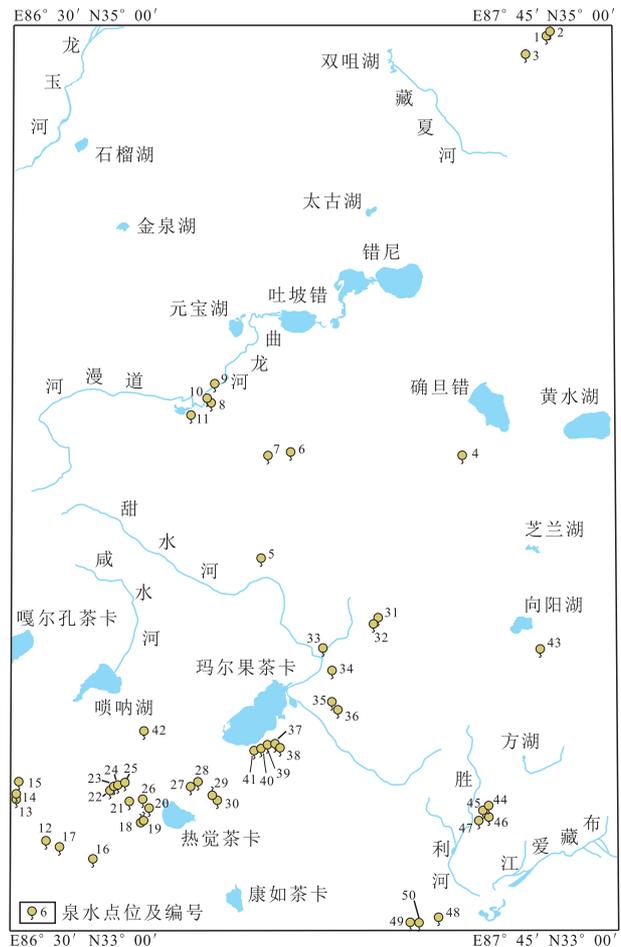


图2 羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区泉水及地表水取样位置图

Fig. 2 Sampling sites of spring water and surface water in the Rejue Chaka-Zangxiahe area, Qiangtang Basin

羌塘盆地泉点星罗棋布,主要有冷泉($0 \sim 10^{\circ}\text{C}$)、低温温泉($10 \sim 20^{\circ}\text{C}$)、中低温温泉($20 \sim 30^{\circ}\text{C}$)、中温温泉($30 \sim 40^{\circ}\text{C}$)、中高温温泉($40 \sim 50^{\circ}\text{C}$)温泉和高温温泉(温度 $> 50^{\circ}\text{C}$,包括喷泉;成都地质矿产研究所, 2014)。此外,该盆地还发育钙

华等温泉遗迹,反映该区昔日水热活动强烈。区域上,羌塘盆地水温 $>10^{\circ}\text{C}$ 的温泉以南羌塘坳陷最发育,中央隆起带次之,北羌塘坳陷最少且主要集中于其南部地区。横向上,总体表现为西部地区相对冷泉集中,向东温泉逐步增多的特点。从局部构造上来看,区内大多数温泉主要发育于断裂带上,尤其以南北向断层最为发育。本次研究区发现的泉点主要为冷泉,分布在热觉茶卡、玛尔果茶卡、白云湖和藏夏河一带,以下降泉为主,其次为断层上升泉。

2 样品采集与实验方法

羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区泉水丰富,大都以下降泉为主,见表1。其中,泉水共37处,大多为冷泉,温度在 $4\sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间,另外还采集了13处地下水,包括热融洼地、沟水和湖水。这些水样主要采集于羌塘盆地北部的热觉茶卡、玛尔果茶卡、白云湖和藏夏河一带,取样位置见图2。采样前,先用泉水将空矿泉水瓶清洗 $3\sim 5$ 遍,再将泉水装入瓶中密封保存等待测试。样品的分析测试在核工业北京地质研究所实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

本文对50个样品进行了离子含量的测试分析,包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等(表2),通过这些离子含量可以对水样进行化学类型分类,判断地下水化学环境,初步判断与天然气水合物和油气的关系。

3.1.1 水型

水化学成分的形成主要取决于它所处的环境,在不同的环境中,可以形成各种不同性质的水,其中含有不同的盐类。反之,某些典型盐类或特有组分出现,可以反映水所形成的环境。根据水中 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 四种离子之间的当量比例,苏林将水划分为硫酸钠型(Na_2SO_4)、重碳酸钠型(NaHCO_3)、氯化镁型(MgCl_2)、氯化钙型(CaCl_2)四种水型(B. A. 苏林,王成义译,1956)。

按照苏林分类的原则,对研究区水样进行化学类型分类,其中硫酸钠型(Na_2SO_4)有31件,占62%;氯化镁型(MgCl_2)14件,占28%;重碳酸钠型(NaHCO_3)3件,占6%;氯化钙型(CaCl_2)2件,占4%。 Na_2SO_4 水型通常表示地壳的水文地质封闭性

差, CaCl_2 水型则常出现在水文地质封闭性良好的地壳内部;而 NaHCO_3 和 MgCl_2 水型则常为过渡型。油气田的水型往往以 CaCl_2 型和 NaHCO_3 型为主。

研究区内, Na_2SO_4 型水占62%,可能与大部分水为地表水有关,也可能与该区广泛分布的古近系喇嘛湖组的石膏层有关。 MgCl_2 型水有14件,矿化度均比较高,为咸水和盐水,可能为海洋成因的地下水。 NaHCO_3 型水有3件,样品采集自热觉茶卡的西北侧和东北侧,可能与地下油气藏有关。 CaCl_2 型水有2件(Sh-1和Sh-2),位于研究区东北部藏夏河以东,反映藏夏河地区地下水良好的封闭性。

3.1.2 矿化度

一般来讲,埋藏较深,水交替强度较弱,地层水矿化度较高,为油气藏保存的有利环境,矿化度的评价对油气远景方面具有一定指示意义。研究区矿化度平均值为 6475mg/L ,根据矿化度的大小,可以将热觉茶卡—藏夏河地区的泉水类型分为淡水、咸水和盐水三类,其中,淡水16件,占32%;咸水23件,占46%;盐水11件,占22%。研究区的矿化度普遍较高,说明该区具有较好的保存条件。

3.1.3 铵根离子

铵的来源主要来自于有机质,为缺氧环境中形成的,且与油气关系密切。研究区的铵根离子,平均含量为 $0.895\mu\text{g/g}$,其中藏夏河东部地区的样品SH-02的铵含量最高,达 $7.381\mu\text{g/g}$,表明在该区有机质相对丰富,这与在区域上的研究结果基本一致(Zeng et al., 2020)。

3.1.4 变质系数、脱硫系数

变质系数(Na^+/Cl^-)、脱硫系数($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- \times 100$)可以反映地层水化学环境和水动力条件,与油气藏的分布和保存有密切关系。

现代海水变质系数($\gamma_{\text{Na}^+}/\gamma_{\text{Cl}^-}$)为0.87。地下水的变质系数若小于此值,表明发生了浓缩变质作用,代表保存条件好;反之,保存条件差(表3)。研究区有13件水样的变质系数小于0.87,主要位于藏夏河以东和玛尔果茶卡东部两个地区,说明这两个地区处于水交替停滞带,对油气保存有利;其它37件样品的变质系数大于0.87,保存条件相对较差。

另外,脱硫系数($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- \times 100$)越小,表示地下水脱硫作用越强,处于还原环境。样品Sh-1、Sh-2的脱硫系数小于1,表明藏夏河东部一带处于还原环境;8件样品为弱还原环境,大多位于热觉茶卡以

表1 研究区水样采集统计表

Table 1 Statistical table of the water samples from study area

取样位置	水化学样 编号	气体样 编号	氢氧同位素 编号	水样描述	取样位置	水化学样 编号	气体样 编号	氢氧同位素 编号	水样描述
Q1	Sh-01			下降泉	Q26	Sh-26			下降泉
Q2	Sh-02			热融洼地	Q27	Sh-27			下降泉
Q3	Sh-03			湖水	Q28	Sh-28			下降泉
Q4	Sh-04	SC-01	ST-01	上升泉	Q29	Sh-29	SC-09	ST-09	上升泉
Q5	Sh-05	SC-02	ST-02	下降泉	Q30	Sh-30			上升泉
Q6	Sh-06	SC-03	ST-03	上升泉	Q31	Sh-31			下降泉
Q7	Sh-07			下降泉	Q32	Sh-32			湖水
Q8	Sh-08	SC-04	ST-04	下降泉	Q33	Sh-33			沟水
Q9	Sh-09			湖水	Q34	Sh-34			下降泉
Q10	Sh-10	SC-05	ST-05	下降泉	Q35	Sh-35			下降泉
Q11	Sh-11			下降泉	Q36	Sh-36			下降泉
Q12	Sh-12			沟水	Q37	Sh-37			热融洼地
Q13	Sh-13	SC-06	ST-06	上升泉	Q38	Sh-38			热融洼地
Q14	Sh-14			上升泉	Q39	Sh-39			热融洼地
Q15	Sh-15			上升泉	Q40	Sh-40			热融洼地
Q16	Sh-16			上升泉	Q41	Sh-41			热融洼地
Q17	Sh-17			上升泉	Q42	Sh-42			湖水
Q18	Sh-18	SC-07	ST-07	上升泉	Q43	Sh-43			下降泉
Q19	Sh-19	SC-08	ST-08	上升泉	Q44	Sh-44			下降泉
Q20	Sh-20			下降泉	Q45	Sh-45			下降泉
Q21	Sh-21			下降泉	Q46	Sh-46		ST-10	下降泉
Q22	Sh-22			下降泉	Q47	Sh-47			下降泉
Q23	Sh-23			下降泉	Q48	Sh-48			湖水
Q24	Sh-24			下降泉	Q49	Sh-49			下降泉
Q25	Sh-25			下降泉	Q50	Sh-50			沟水

表2 研究区水样水化学特征表

Table 2 Chemical compositions of the water samples from study area

样品 编号	mg/L								$\mu\text{g/g}$	水的化学类型		Na ⁺ / Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻ ×100	TDS (mg/l)
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		NH ₄ ⁺	苏林分类			
Sh-01	16742	220	345	/	9126	224	178	991	0.394	氯化钙型	盐水	0.81	0.49	27826
Sh-02	43912	531	377	/	24143	781	528	2508	7.381	氯化钙型	盐水	0.81	0.45	72780
Sh-03	5640	916	581	/	2832	202	716	114	2.067	氯化镁型	盐水	0.74	6.01	11001
Sh-04	8000	4893	120	/	4313	422	1153	965	1.243	氯化镁型	盐水	0.80	22.62	19866
Sh-05	338	460	173	/	299	27	47	78	<0.15	硫酸钠型	咸水	1.31	50.33	1421
Sh-06	1488	3415	79	/	1382	33	343	520	1.231	硫酸钠型	咸水	1.37	84.87	7260
Sh-07	625	1559	65	/	454	13	191	344	<0.15	硫酸钠型	咸水	1.07	92.24	3251
Sh-08	37	40	182	/	33	2	14	50	0.375	硫酸钠型	淡水	1.32	39.35	359
Sh-09	12	65	100	/	17	2	13	32	0.175	硫酸钠型	淡水	2.09	197.12	240
Sh-10	20	113	115	/	31	3	18	38	<0.15	硫酸钠型	淡水	2.35	213.20	337
Sh-11	26	153	603	/	33	3	93	96	0.507	硫酸钠型	咸水	1.87	215.13	1008
Sh-12	35	409	272	/	38	4	77	104	0.197	硫酸钠型	淡水	1.63	434.61	939
Sh-13	9182	5382	235	/	5165	326	1280	803	1.754	氯化镁型	盐水	0.83	21.68	22373

续表 2

Sh-14	5409	4114	622	628	3831	211	1322	39	3.128	硫酸钠型	盐水	1.05	28.13	15548
Sh-15	1035	393	584	55	716	97	162	23	0.401	硫酸钠型	咸水	1.02	14.04	3010
Sh-16	1652	785	332	382	1250	32	340	16	1.151	硫酸钠型	咸水	1.12	17.57	4407
Sh-17	6942	3925	923	656	5259	128	1145	35	1.512	硫酸钠型	盐水	1.12	20.91	18357
Sh-18	31	48	356	/	41	3	27	73	<0.15	硫酸钠型	淡水	1.99	58.44	579
Sh-19	27	193	841	/	39	4	141	110	<0.15	硫酸钠型	咸水	2.16	268.31	1354
Sh-20	42	299	361	/	35	4	89	91	<0.15	硫酸钠型	淡水	1.23	262.63	920
Sh-21	261	103	250	/	181	15	38	33	0.202	硫酸钠型	淡水	1.03	14.59	881
Sh-22	263	34	170	/	179	11	16	30	0.225	硫酸钠型	淡水	1.01	4.84	704
Sh-23	330	40	213	/	211	15	16	48	0.248	硫酸钠型	淡水	0.95	4.53	873
Sh-24	375	37	238	/	274	17	19	38	<0.15	重碳酸钠型	淡水	1.08	3.60	998
Sh-25	492	40	255	/	309	21	24	44	<0.15	硫酸钠型	咸水	0.93	2.98	1184
Sh-26	84	57	321	21	120	13	24	41	<0.15	重碳酸钠型	淡水	2.12	24.99	659
Sh-27	1016	1617	275	/	928	73	204	156	0.310	硫酸钠型	咸水	1.35	58.85	4269
Sh-28	308	503	251	/	268	29	82	82	1.006	硫酸钠型	咸水	1.29	60.39	1522
Sh-29	206	188	728	/	330	14	44	79	0.336	重碳酸钠型	咸水	2.37	33.75	1588
Sh-30	68	108	228	23	93	9	39	26	0.330	硫酸钠型	淡水	2.02	58.90	571
Sh-31	1543	2257	410	/	773	68	641	168	1.960	氯化镁型	咸水	0.74	54.09	5860
Sh-32	4181	5689	208	/	2645	294	1208	542	1.874	氯化镁型	盐水	0.94	50.32	14767
Sh-33	182	256	210	/	148	9	44	55	0.347	硫酸钠型	淡水	1.20	52.01	904
Sh-34	549	477	196	/	318	21	52	191	0.156	氯化镁型	咸水	0.86	32.13	1803
Sh-35	1107	285	367	31	716	37	122	68	0.397	氯化镁型	咸水	0.96	9.52	2702
Sh-36	3636	1111	187	/	1855	41	287	497	1.375	氯化镁型	咸水	0.75	11.30	7614
Sh-37	662	1202	129	/	180	26	204	351	0.974	氯化镁型	咸水	0.40	67.14	2754
Sh-38	1351	2855	193	/	571	70	496	580	1.807	氯化镁型	咸水	0.63	78.15	6116
Sh-39	3304	7633	383	/	1683	238	1635	664	1.963	氯化镁型	盐水	0.75	85.43	15540
Sh-40	358	1181	131	/	138	13	229	185	1.033	氯化镁型	咸水	0.57	121.99	2235
Sh-41	2565	7059	353	/	1020	87	1740	515	2.173	氯化镁型	盐水	0.59	101.77	13339
Sh-42	960	10966	275	/	1259	66	2159	471	2.592	硫酸钠型	盐水	1.94	422.41	16156
Sh-43	82	289	172	/	62	6	45	87	0.472	硫酸钠型	淡水	1.11	130.01	743
Sh-44	104	424	148	/	64	3	43	152	0.657	氯化镁型	咸水	0.92	150.76	1038
Sh-45	22	750	146	/	22	2	88	194	0.463	硫酸钠型	咸水	1.52	1272.22	1225
Sh-46	10	746	151	/	13	2	67	229	0.354	硫酸钠型	咸水	1.91	2652.54	1218
Sh-47	11	827	132	/	14	2	62	257	0.487	硫酸钠型	咸水	1.96	2831.65	1305
Sh-48	475	239	54	14	324	22	36	34	0.557	硫酸钠型	咸水	1.01	18.61	1183
Sh-49	56	44	194	/	54	4	21	30	0.490	硫酸钠型	淡水	1.44	28.97	403
Sh-50	326	155	84	/	222	18	20	39	0.457	硫酸钠型	淡水	1.01	17.58	864

注:TDS 为溶解性固体总量

表 3 地下水化学环境分区指标

Table 3 Discrimination index of the chemical environment of groundwater

环境分区	$SO_4^{2-}/Cl^- \times 100$	γ_{Na}/γ_{Cl}	水动力条件
弱氧化区	15 ~ 50	2 ~ 5	交替较强
弱还原区	1 ~ 15	1 ~ 2	交替缓慢
还原区	< 1	< 1	交替阻滞

西;40 件样品脱硫系数大于 15,表明研究区主要为弱氧化—氧化环境。

3.2 水中烃类气体特征

挑选部分水样的水溶性烃类气体进行测试分析,为了更好地进行对比,还采集了喷呐湖泥火山湖中的样品 SC-10 样品,测试结果见表 4。

表 4 研究区水样烃类气体含量

Table 4 Hydrocarbon gas contents of the water samples from study area

样品编号	测试结果汇总(μL/L)							备注
	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	
SC-01	0.30	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
SC-02	0.32	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
SC-03	0.21	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	
SC-04	0.97	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
SC-05	1.10	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
SC-06	0.14	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	
SC-07	0.24	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	
SC-08	0.19	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
SC-09	0.27	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	
SC-10	6.50	0.61	0.23	0.02	0.03	0.02	0.02	喷呐湖泥火山湖

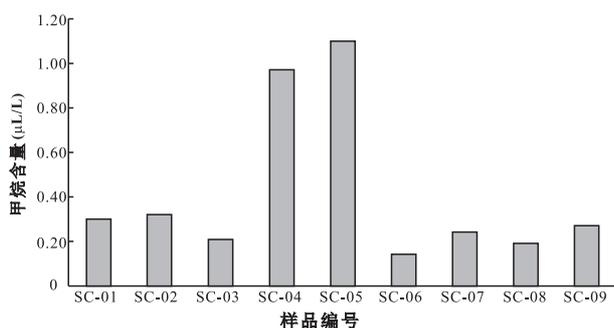


图 3 研究区水样甲烷含量对比图

Fig. 3 Methane contents of the water samples from study area

在测试的水样中,甲烷平均含量 $0.42\mu\text{L}/\text{kg}$,以平均含量作为研究区甲烷含量的背景值,以背景值的两倍作为异常值。从图 3 可以看出,研究的水样中仅 SC-04、SC-05 达到了异常,位于白云湖一带,表明该地区甲烷含量相对较高。烃类气体以甲烷为主,其它组分含量极少,且各组分之间无明显规律。相对于喷呐湖组泥火山群中泥浆样品的 $459 \sim 2279\mu\text{L}/\text{kg}$ 之间(平均为 $1042\mu\text{L}/\text{kg}$)的数值还是较低。

3.3 水中氢氧同位素特征

地下水的稳定同位素,主要为地下水组成元素氢和氧的稳定同位素氘(D)和 ^{18}O ,可以很好地反映地下水的起源及形成过程(尹观等,2001)。研究区的各类地下水样品的氘(D)和 ^{18}O 同位素的分析结果如表 5。

结果表明,研究区所采水样的氢氧同位素变化较大,氢同位素 δD 值的变化范围为 $-108.0\text{‰} \sim -61.3\text{‰}$ 之间,平均值为 -81.7‰ ;氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰)的变化范围为 $-12.9\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$ 之间,平均

值为 -9.9‰ 。如图 4,对比各种水体的氢氧同位素分布范围可以发现,研究区的氢氧同位素落在了大气降水线附近,说明受到降水补给。

如图 4,样品氢氧同位素分区明显,ST-01、ST-02、ST-03、ST-04、ST-05、ST-06 等 6 件样品同位素偏正;ST-01、ST-02、ST-03、ST-04 等 4 件样品同位素偏负。偏正的样品除了 ST-06 外,其他均取自研究区中部,偏负的样品均取自研究区的南部,说明中部相对于南部蒸发量更大一些。

氘过量参数的大小可以直观地反映不同地区的分馏不平衡程度,计算公式为 $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ (王恒纯,1991;尹观等,2001)。对所采集样品的氘过量参数进行分析(表 5),10 个样品的 d 值均小于 10,d 值总体变化范围在 $-18.7 \sim 9.4$ 之间,表明当地的大气降水在下渗过程中与地表碳酸盐岩发生了广泛的同位素交换反应(张志攀等,2011)。

表 5 水样氢氧同位素测试结果

Table 5 Analysis results of isotopes of H and O of water samples

样品编号	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	d
ST-01	-63.9	-7.3	-5.5
ST-02	-71.3	-9.7	6.3
ST-03	-61.2	-8.0	2.8
ST-04	-64.2	-6.7	-10.6
ST-05	-77.9	-10.6	6.9
ST-06	-61.3	-6.7	-7.7
ST-07	-105.9	-10.9	-18.7
ST-08	-108.0	-12.5	-8
ST-09	-107.5	-12.9	-4.3
ST-10	-96.2	-13.2	9.4

3.4 有利区优选

研究区的图中湖—拉熊错一带的二叠系红脊山组深灰—黑色泥页岩、热觉茶卡—喷呐湖一带上二叠统热觉茶卡组的含煤系泥岩以及多色梁子—藏夏河一带的上三叠统藏夏河组泥岩,以及分布于沃若山—江爱达日那一带上三叠统土门格拉组含煤系泥岩是研究区中最有潜力的气源岩。其中,上三叠统藏夏河组和上二叠统热觉茶卡组有机质丰度相对较高,上三叠统藏夏河组有机碳含量平均为 1.2%、 $S_1 + S_2$ 平均为 1.11mg/g;上二叠统热觉茶卡组有机碳平均为 0.9%、 $S_1 + S_2$ 平均为 0.4mg/g,按残余有机碳标准达到较好—好烃源岩标准。二叠系红脊山组泥页岩 TOC > 0.4%、 $S_1 + S_2$ > 0.2mg/g,也达标烃源岩标准(待发数据)。

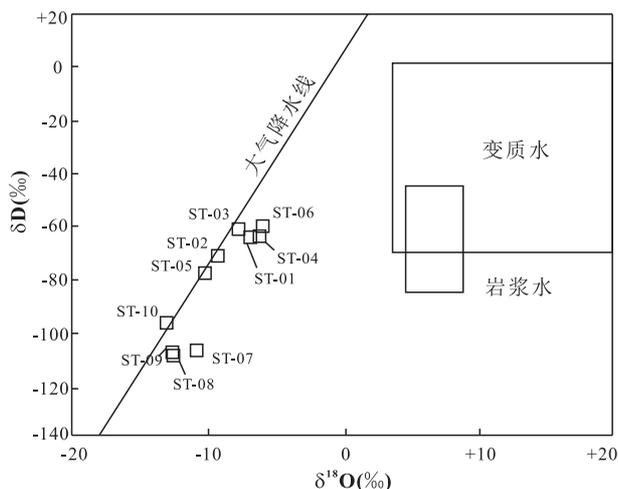


图4 研究区水样氢氧同位素组成

Fig. 4 Constitue of hydrogen and oxygen isotopes of the water samples in study area

结合上述水化学特征的分析,在研究区东北部的藏夏河一带,采集的 3 件水样中,有两件(Sh-01、Sh-02)为 $CaCl_2$ 水型,矿化度较高,为盐水,反映良好的保存条件,且样品 Sh-02 含有相对富集的铵根离子,说明研究区有机质含量较高;水样的变质系数和脱硫系数,均反映该有利区整体处于比较封闭的环境,为该区的油气的保存和天然气水合物的形成提供有利环境。在藏夏河一带,地层主要为中—下侏罗统雀莫错组、古近系康托组,上三叠统藏夏河组的露头零星分布,其中藏夏河组页岩为较好烃源岩,可为天然气水合物的形成提供气源(Zeng et al., 2020)。另外,该区冻土广泛分布,为大片连续多年

冻土,主要冻土地貌特征为冻胀草丘、热融洼地、冻胀丘、冻拔石等,手指湖、前进湖周围分布的湖积物,可以作为较好的天然气水合物盖层。因此,藏夏河一带可能成为有利的天然气水合物勘探区。另外,在研究区的白云湖一带,水样中 SC-04、SC-05 达到了异常,表明该地区甲烷含量相对较高,该区的冻土分布范围较广,也可能成为潜在的天然气水合物有利区。

4 结论

(1)通过对羌塘盆地热觉茶卡—藏夏河地区的水化学分析表明,该区的水型主要为硫酸钠型和氯化镁型,其次为重碳酸钠型和氯化钙型,矿化度普遍较高,说明该区具有较好的保存条件。

(2)研究区水样中均检测出一定含量的水溶甲烷,以白云湖地区的甲烷含量相对较高,其它烃类气体含量极低,并且各组分之间无明显的规律性。

(3)氢氧同位素结果表明,氢同位素 δD 值的变化范围为 $-108.0‰ \sim -61.3‰$ 之间,氧同位素 $\delta^{18}O$ 值(‰)的变化范围为 $-12.9‰ \sim -6.7‰$ 之间,氢氧同位素落在了大气降水线附近,说明受到降水补给。氘过量参数(d)结果显示大气降水在下渗过程中与地表碳酸盐岩发生了广泛的同位素交换反应。

(4)研究区藏夏河以东的水样具 $CaCl_2$ (或 $NaHCO_3$) 水型,矿化度高,变质系数较低,硫酸盐含量低,铵根含量高等特征,对油气保存条件最好,结合该区的发育的终年冻土地貌,可能为天然气水合物形成的有利地区;白云湖一带水样的水溶性烃类气体的异常结果也说明该区可能预示天然气水合物的存在。

致谢:在野外地质调查过程中得到了核工业二八〇研究所李金锋、刘君豪等高级工程师和杨开涛驾驶员的大力帮助,审稿专家和编辑部老师对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

- Zeng S Q, Wang J, Chen W B, et al., 2020. Organic-rich shales in the Upper Triassic Zangxiahe Formation, northern Qiangtang Depression, northern Tibet: Depositional environment and hydrocarbon generation potential [J]. Journal of Petroleum Geology, 43(2): 151 - 169.

- B A 苏林,王成义译,1956.天然水系中的油田水[M].北京:石油工业出版社:1-108.
- 陈多福,王茂春,夏斌,等,2005.青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J].地球物理学报,48(1):165-172.
- 陈文彬,付修根,占王忠,等,2015.藏北羌塘盆地角木茶卡地区下二叠统展金组烃源岩特征及意义[J].沉积与特提斯地质,35(1):43-49.
- 成都地质矿产研究所,2014.羌塘盆地石油地质条件综合研究成果报告[R].成都地质矿产研究所.
- 冯兴雷,付修根,谭富文,等,2015.羌塘盆地戈木错地区泥火山群沉积及浅表地球化学特征[J].沉积与特提斯地质,35(1):50-56.
- 冯兴雷,付修根,谭富文,等,2018.羌塘盆地沃若山地区上三叠统土门格拉组烃源岩沉积环境分析[J].沉积与特提斯地质,38(2):3-13.
- 付修根,王剑,宋春彦,等,2020.羌塘盆地第一口油气科学钻探井油气地质成果及勘探意义[J].沉积与特提斯地质,40(1):15-25.
- 黄朋,潘桂堂,王立全,等,2002.青藏高原天然气水合物资源预测[J].地质通报,21(11):794-798.
- 李忠雄,马龙,卫红伟,等,2019.羌塘盆地油气二维地震勘探进展综述[J].沉积与特提斯地质,39(1):96-111.
- 王恒纯,1991.同位素水文地质概论[M].北京:地质出版社:44-54.
- 王剑,付修根,2018.论羌塘盆地沉积演化[J].中国地质,45(2):237-259.
- 王剑,付修根,沈利军,等,2020.论羌塘盆地油气勘探前景[J].地质论评,66(5):1091-1113.
- 尹观,倪师军,张其春,2001.氡过量参数及其水文地质学意义——以四川九寨沟和冶勒水文地质研究为例[J].成都理工大学学报,28(3):251-254.
- 张立新,徐学祖,马巍,2001.青藏高原多年冻土与天然气水合物[J].天然气地球科学,12(1/2):22-26.
- 张志攀,祝有海,苏新,2011.羌塘盆地泉水地球化学特征及其意义[J].地质学报,85(7):1233-1238.
- 赵克斌,刘崇禧,李伟,2008.含油气盆地水文地球化学规律[J].石油实验地质,30(2):154-161.
- 祝有海,赵省民,卢振权,2010.中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J].天然气工业,31(1):13-19.
- 祝有海,卢振权,谢锡林,2011.青藏高原天然气水合物潜在分布区预测[J].地质通报,30(12):1918-1926.

Chemical characteristics of fountains in Rejuechaka-Zangxiahe area of the Qiangtang Basin and their geological implications

ZENG Shengqiang¹, CHEN Wenbin^{1,2}, FENG Xinglei^{1,2}

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610081, China)

Abstract: Recent years, the chemical characteristics of fountains, which can reflect the redox environment and hydrodynamic conditions, have been widely used in prospecting for petroleum, natural gas and natural gas hydrate. In this paper, 37 samples of fountains and 13 samples of surface water have been collected from Rejuechaka-Zangxiahe areas of the Qiangtang Basin to analyze their chemical compositions, isotopic compositions of hydrogen and oxygen, and contents of aqueous hydrocarbon gases. The results show that the water types are mainly Na₂SO₄ type and MgCl₂ type, with subordinate NaHCO₃ type and CaCl₂ type. The general high mineralized degrees of the fountains reveal a good preservation condition in the area. The average content of the ammonium ion is 0.895 μg/g. In Zangxiahe area, the ammonium ion content is up to 7.381 μg/g, which is consistent with the widespread organic-rich shale in the area, indicating the relatively high organic matter content. The isotopic results of hydrogen and oxygen show that the H and O isotopes of the water are near the precipitation line, indicating that the fountains originate from meteoric water. In addition, a certain content of aqueous methane has been detected in nine fountains, and the content is relatively high in Baiyun Lake area, showing a good hydrocarbon potential. The comprehensive study reveals that the Zangxiahe and Baiyun Lake areas in the Qiangtang Basin have good source rocks and good preservation conditions, showing a good prospect for oil, gas and gas hydrate resources.

Key words: Qiangtang Basin; Fountains; hydrochemistry; hydrogen and oxygen isotopes