

文章编号: 1009-3850(2015)01-0057-11

羌塘盆地冻土结构特征及其对天然气水合物成藏的影响

王平康¹, 祝有海¹, 张旭辉², 张 帅¹, 庞守吉¹, 肖 睿³, 李 冰⁴

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 羌塘盆地是青藏高原最大的含油气盆地, 多年冻土广泛分布, 具备良好的天然气水合物形成条件和找矿前景。基于羌塘盆地天然气水合物钻探试验井资料, 从影响天然气水合物成藏角度提出了羌塘盆地 3 种主要的冻土结构类型, 其中由冻融层、含冰沉积物冻土层、含冰基岩冻土层、非含冰基岩冻土层所组成的冻土结构最为常见。研究表明, 冻土层结构对天然气水合物温压条件具有一定影响, 当非含冰基岩冻土层存在时, 其下伏的非冻土层的孔隙流体压力与上部冻土层的微孔和微裂隙特征紧密相关, 有利于浅层烃类气体的封存和水合物的成藏。含冰冻土层冰地球化学特征指示冻土层形成的过程是大气降雪融化成水后未经蒸发作用直接渗入地下, 受气候变冷影响, 地层由浅往深逐渐冻结形成。同时, 矿化度和阴、阳离子浓度的高低在一定程度上反映了不同深度沉积物的物化性质。含冰冻土层对于浅层烃类气体封盖作用的定量评价显示, 随着含冰饱和度的增加, 甲烷气体渗透率降低, 当含冰饱和度达到 80% 时, 冻土层能完全有效地限制甲烷气体运移。由于在气候变暖因素的驱动下, 冻土层不仅能通过温压条件来控制天然气水合物矿藏存在的空间范围, 而且还限制着来自部分水合物分解所产生的烃类气体向浅部运移。因而推测, 在青藏高原冻土区可能存在一个由断裂体系相关联的深部烃类储层、中部天然气水合物储层和浅部天然气藏组成的油气系统。

关键词: 羌塘盆地; 冻土结构; 含冰饱和度; 天然气水合物

中图分类号: P642.14

文献标识码: A

天然气水合物是由具有相对较低分子质量的气体(如甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳、氮气等)与水在一定温度和压力条件下形成的一种内含笼形结构的固态类冰状物质。天然气水合物作为一种“非

传统”能源, 主要赋存于极区的永冻层、陆缘海域和一些深水湖泊底部沉积物中。一般认为全球天然气水合物中所含的天然气资源量远远超过全球已探明的天然气储量, 据估算, 总可采量达 3×10^{13}

收稿日期: 2014-08-29; 改回日期: 2014-09-30

作者简介:



王平康, 男, 1982 年生, 硕士, 助理研究员。主要从事沉积学和冻土区天然气水合物研究。主持国家自然科学基金项目 1 项、“天然气水合物资源勘查与试采工程”国家专项下设工作项目 1 项、中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目 1 项、国家海洋局“极地资源利用战略研究专题”下设课题 1 项。近年来, 在《Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology》、《Marine and Petroleum Geology》、《Cold Regions Science and Technology》、《SCIENCE CHINA Earth Sciences》等期刊上发表专业论文 30 余篇(第一作者 9 篇), 其中国际 SCI 检索论文 11 篇(第一作者 4 篇)

资助项目: “天然气水合物资源勘查与试采工程”国家专项(GZHL20110308, GZH201400301)、国家自然科学基金(41102021, 11102209, 11272314)和南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2014-04-05)

m^3 ^[1-2]。天然气水合物因其能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅,已被视为21世纪的一种潜在能源^[3]。2008~2009年,我国在青藏高原祁连山冻土区成功钻获天然气水合物实物样品,实现了我国陆域天然气水合物找矿的重大突破,使得我国成为第一个在中纬度高山冻土区发现天然气水合物的国家^[4]。与祁连山冻土区相比,西藏羌塘盆地具有更低的年平均地温、相对较厚的冻土层、较低的地温梯度和较好的成油气成气条件,因而具有更好的天然气水合物形成的温压条件和烃类气源条件^[5]。因此,尽快实现羌塘盆地天然气水合物找矿突破,对于完善我国冻土区天然气水合物成藏理论具有重要的研究意义,同时对于我国能源安全也具有重大的战略意义。

有关西藏羌塘盆地天然气水合物的科学研究始于20世纪90年代中后期。大量学者基于羌塘盆地冻土层厚度、地温梯度、生烃等条件,从不同方面进行了研究讨论,认为羌塘盆地有条件形成天然气水合物矿藏^[6-17]。自2011年起,中国地质调查局启动羌塘盆地天然气水合物资源勘查项目,先后开展了区域地质、地球物理和地球化学调查并实施完成了数口天然气水合物钻探试验井,虽然尚未获取到天然气水合物存在的直接证据,但发现了一些可能与天然气水合物有关的异常标志。由于羌塘盆地特殊的地理位置、复杂的烃类成藏条件以及多期的构造运动,致使该地区天然气水合物成藏系统有着一定的特殊性和复杂性。截止目前,羌塘盆地天然气水合物成藏控制因素仍然不明确。由于冻土是羌塘盆地天然气水合物形成的必要条件,不仅可以通过 $P-T$ 条件来控制天然气水合物稳定带的空间范围,而且还能限制浅层烃类气体向上运移,因而对于冻土结构特征的研究至关重要。本文基于羌塘盆地5口天然气水合物钻探试验井资料,归纳了羌塘盆地冻土结构特征,并进一步分析和讨论其对天然气水合物成藏的影响。

1 区域地质概况

羌塘盆地位于青藏高原中北部,介于昆仑山、冈底斯山、唐古拉山之间,南北宽约300km,东西长640km,平均海拔4500m以上,是青藏高原年平均地表温度最低和冻土最发育的地区,该区发育大片连续的多年冻土,面积约 $18.5 \times 10^4 \text{km}^2$ 。地质构造上位于拉竹龙-金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间^[18-20],由北向南分为北羌塘拗陷带、中央隆起带、

南羌塘拗陷带3个二级构造单元^[21](图1)。盆地具有长期复杂的演化历史,其构造演化过程可分为前奥陶纪基底形成阶段、古生代被动大陆边缘演化阶段和白垩纪—新近纪陆相盆地形成、演化、改造阶段^[22-23],是发育在前泥盆纪结晶基底之上以中生界海相沉积为主体的一个残留盆地^[24],其中侏罗系是沉积盖层中发育最全、分布最广泛的海相地层^[25]。盆地内共发育12套烃源岩,其中上侏罗统索瓦组(J_3s)、中侏罗统夏里组(J_2x)、布曲组(J_2b)和上三叠统肖茶卡组(T_3x)为分布最广的4套烃源岩,具有良好的油气形成条件。目前,这4套烃源岩也是天然气水合物资源勘探的主要目标层位。

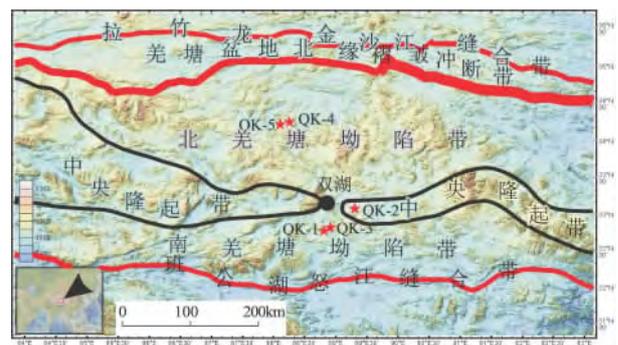


图1 羌塘盆地简略构造图及天然气水合物钻探试验井位置

Fig. 1 Simplified tectonic map and location of the test wells for the gas hydrates in the Qiangtang Basin

2011~2013年间,中国地质调查局在羌塘盆地组织实施了5口天然气水合物钻探试验井,分别为QK-1、QK-2、QK-3、QK-4和QK-5井。QK-1和QK-3井位于南羌塘拗陷带北部,QK-2井位于中央隆起带中部,QK-4和QK-5井位于北羌塘拗陷带中北部(图1)。这5口井钻遇的地层由老往新有上三叠统土门格拉组(T_3t)、下侏罗统曲色组(J_1q)、中侏罗统布曲组(J_2b)、夏里组(J_2x)、上侏罗统索瓦组(J_3s)、白龙冰河组(J_3b)、古近系始新统康托组(E_2k)、喇叭湖组(E_2s)以及第四系(Q)(图2)。钻井评价结果显示:(1)羌塘盆地冻土厚度明显受纬度因素控制,北羌塘较南羌塘具有更好的冻土条件,厚度可达155.0m;(2)曲色组深灰-黑色泥岩见淡灰黄色液态油苗,布曲组砂糖状白云岩见油迹显示,索瓦组上覆地层白龙冰河组多层段见遇黑色沥青脉,指示曲色组、布曲组和索瓦组均具备一定程度的生排烃能力;(3)土门格拉组见遇浅层气体异常且 R_o 测试结果显示该组具备较强的生排烃能力。可见,羌塘盆地具备天然气水合物形成的冻土和烃类气源条件,

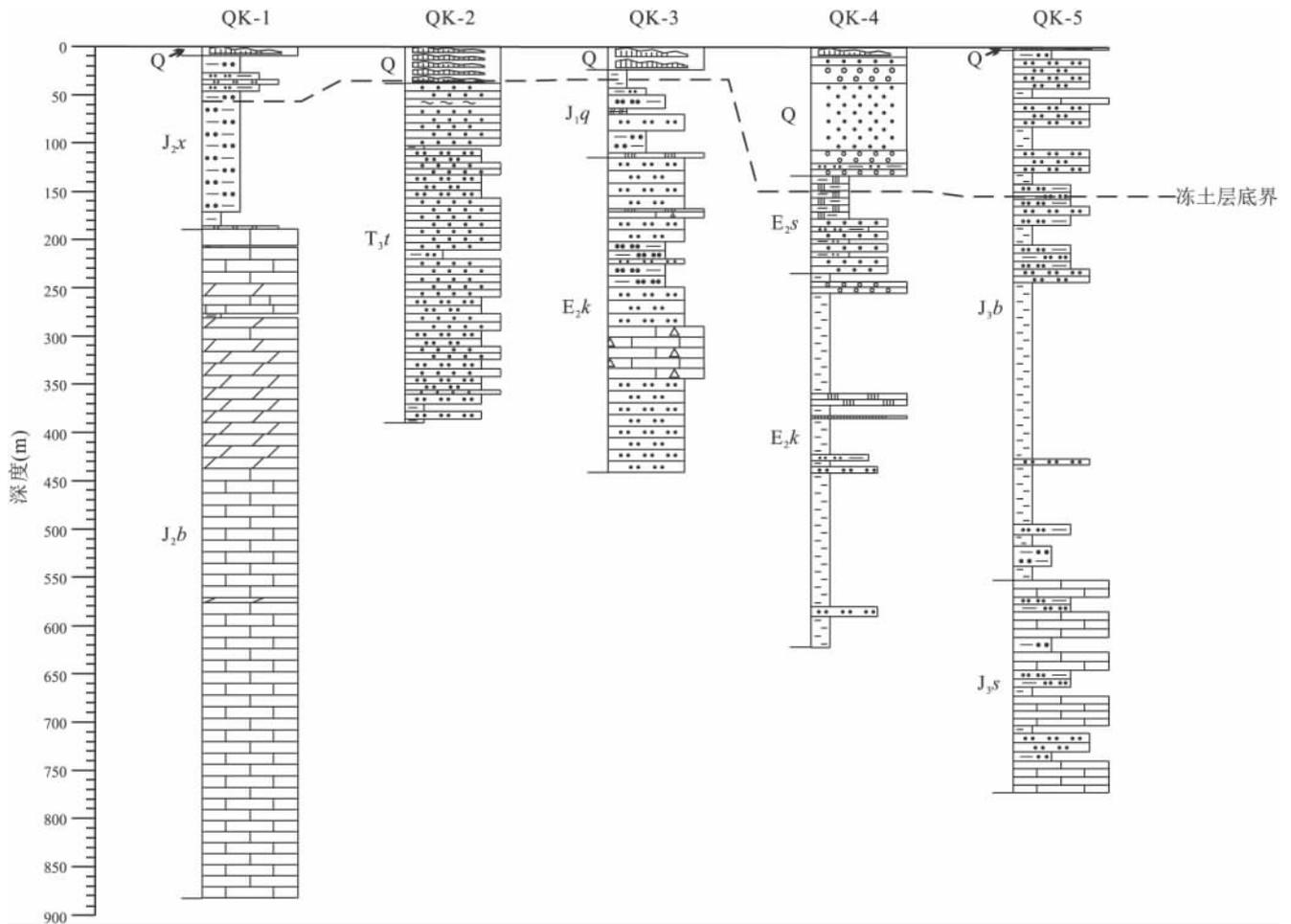


图2 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井岩性柱状图及各钻井冻土层底界

Fig.2 Lithologic column and basal boundary of the permafrost layers of individual test wells for the gas hydrates in the Qiangtang Basin

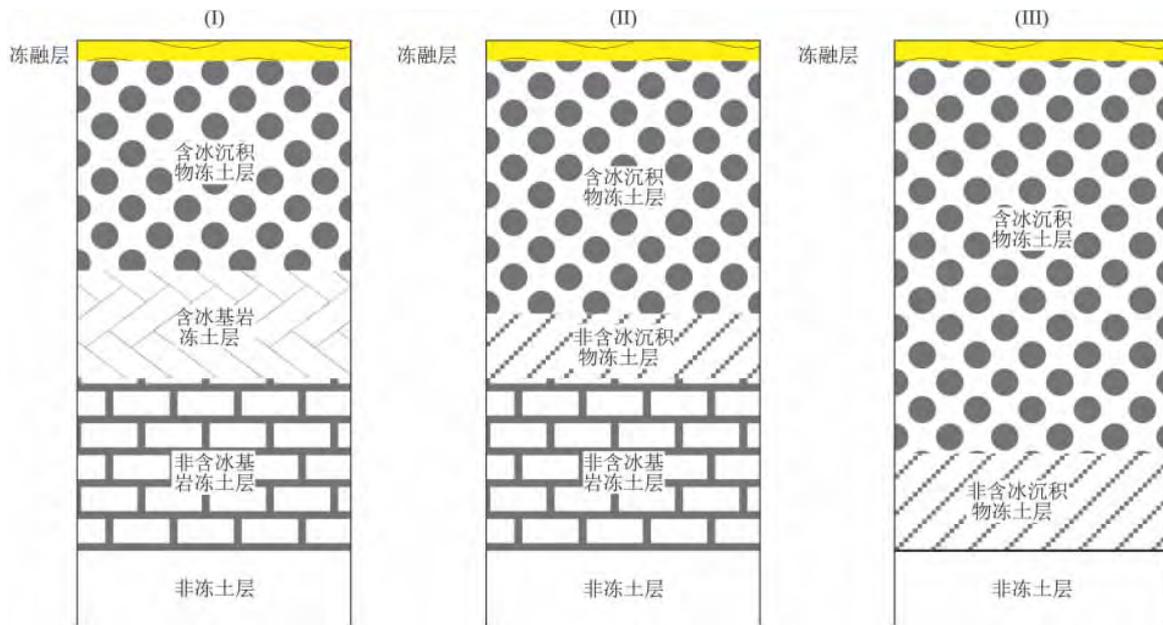


图3 羌塘盆地多年冻土区冻土层主要结构类型

Fig.3 Main types of the permafrost structures in the Qiangtang Basin

2 冻土结构及冰地球化学特征

因而在适宜的冻土覆盖条件下,通过寻找下伏有利烃(气)源岩和查明有效断裂系统,将有助于实现羌塘盆地天然气水合物找矿突破。

2.1 冻土结构类型及表征

在冻土的分类方面,不同国家分类标准有所差异。在我国,冻土,一般是指温度在 0°C 或 $^{\circ}\text{C}$ 以下,并含有冰的各种岩土和土壤;将温度在 0°C 或 0°C 以下,但不含冰的岩土和土壤,称作寒土^[26]。而在北美则将低于 0°C 的岩石或土壤,不管是否含冰,均称为冻土。由于在青藏高原多年冻土区冻土层多由未固结成岩的沉积物和基岩组成,考虑到冻土层内岩土类型以及含冰情况不同会引起地层压力的变化,进而影响天然气水合物成藏,我们依据冻土层岩土类型和含冰情况将沉积物覆盖区的冻土层划分为3种主要的结构类型(图3)。第一种类型为羌塘盆地主要的冻土结构类型,即冻土层自上而下由冻融层、含冰沉积物冻土层、含冰基岩冻土层、非含冰基岩冻土层组成(图3I)。天然气水合物钻探试验井实测冻土层结构参数见表2,其中QK-1、QK-2、QK-3和QK-4井钻探过程中未发现含冰基岩冻土层。当沉积物厚度较大时,含冰沉积物冻土层以下会存在非含冰沉积物冻土层和非含冰基岩冻土层(图3II);当沉积物厚度大于冻土层厚度时,则冻融

层以下冻土层主要由含冰沉积物冻土层和非含冰沉积物冻土层组成(图3III)。但是目前这两种冻土结构类型尚未获得钻井验证。除此之外,由于羌塘盆地属高山冻土区,除沉积物覆盖区外,还存在大面积的基岩出露区和高山区。在这些地区,冻土主要由含冰基岩冻土层和非含冰基岩冻土层组成。由于基岩出露区和高山区不利于天然气水合物成藏,因而,本文对于此种冻土结构类型不做讨论。

冻融层又称“活动层”,是指夏季融化、冬季冻结的土层,位于冻土层表层。该层厚度是夏季末年最大融化深度,在沿北极海岸连续冻土区冻融层厚度一般小于30cm,在西伯利亚南部不连续冻土区冻融层厚度一般2m或更大,而在欧洲阿尔卑斯和我国青藏高原冻土区冻融层厚度一般数米^[27]。在羌塘盆地实施天然气水合物钻探的时间每年集中在5月~11月之间,相对其它月份平均地表温度较高,例如,实测QK-2井钻探区7月份白天地表(12cm深处)温度介于 $6.6\sim 20.1^{\circ}\text{C}$ 。由于地表温度直接影响着冻融层纵向深部变化,地表温度升高,冻融层厚度则会变深,因此,夏秋季钻井实测冻融层厚度则较能更好的反映钻探区冻融层的最大厚度。钻井实测结果表明,冻融层最大厚度为1.0~2.40m(表1),南羌塘冻融层厚度明显大于北羌塘。冻融层在岩心上主要表现为,在细粒粘土层段呈淤泥状,在粗粒砂砾层段呈分选差的混杂堆积。

表1 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井实测冻土层结构参数

Table 1 Parameters for the permafrost structures in the Qiangtang Basin based on the test well data for the gas hydrates in the Qiangtang Basin

井号	冻融层			含冰沉积物冻土层			含冰基岩冻土层			非含冰基岩冰土层		
	顶深(m)	底深(m)	厚度(m)	顶深(m)	底深(m)	厚度(m)	顶深(m)	底深(m)	厚度(m)	顶深(m)	底深(m)	厚度(m)
QK-1	0	2.30	2.30	2.30	8.20	5.90	-	-	0	8.20	58.00	49.80
QK-2	0	2.40	2.40	2.40	7.37	4.97	-	-	0	7.37	38.00	30.63
QK-3	0	1.00	1.00	1.00	4.35	3.35	-	-	0	4.35	23.60	19.25
QK-4	0	1.70	1.70	1.70	132.95	131.25	-	-	0	132.95	150.00	17.05
QK-5	0	1.02	1.02	1.02	3.08	2.06	3.08	4.00	0.92	4.00	155.00	151.00

含冰沉积物冻土层是指由冰胶结沉积物或在沉积物层中发育脉状冰、网状冰、块状、层状冰和裂隙冰的永冻层(图4)。该层厚度与第四系沉积物厚度、沉积物粒度有关。钻探结果显示,在含冰沉积物冻土层,含冰量与沉积物粒度密切相关,粗沙、砾沉积物中的含冰量明显多于细沙和粘土中的含冰量;粗粒沉积物中冰产状主要以脉状、网状、块状为主,而细粒沉积物中冰产状主要为浸染状、层状和

裂隙状为主,这主要与细粒粘土层均质性程度要高于粗粒砂砾层有关。QK-1、QK-2、QK-3和QK-5井含冰沉积物冻土层较薄,厚度介于2.06~5.90m, QK-4井含冰沉积物冻土层厚度达131.25m。

含冰基岩冻土层是指在基岩孔隙或裂隙中赋存有冰的冻土层。冰的含量与基岩的孔隙度和裂隙发育及充填程度有关。钻井砂岩孔隙度、渗透率测试结果显示,大多砂岩属于低孔或特低孔储层类

型。例如,QK-2井砂岩样品,孔隙度介于1.7%~8.7%,平均5.28%;QK-3井砂岩样品,孔隙度介于1.0%~14.9%,平均7.6%。同时,基岩局部层段裂隙虽然较为发育,但多被泥质或方解石充填,因

而致使水分无法进入到基岩孔隙或裂隙中并冻结成冰。除在QK-5井中发现厚度为0.92m的以含裂隙型冰为主的含冰基岩冻土层(图5)外,其余钻井肉眼均未识别出含冰基岩冻土层。

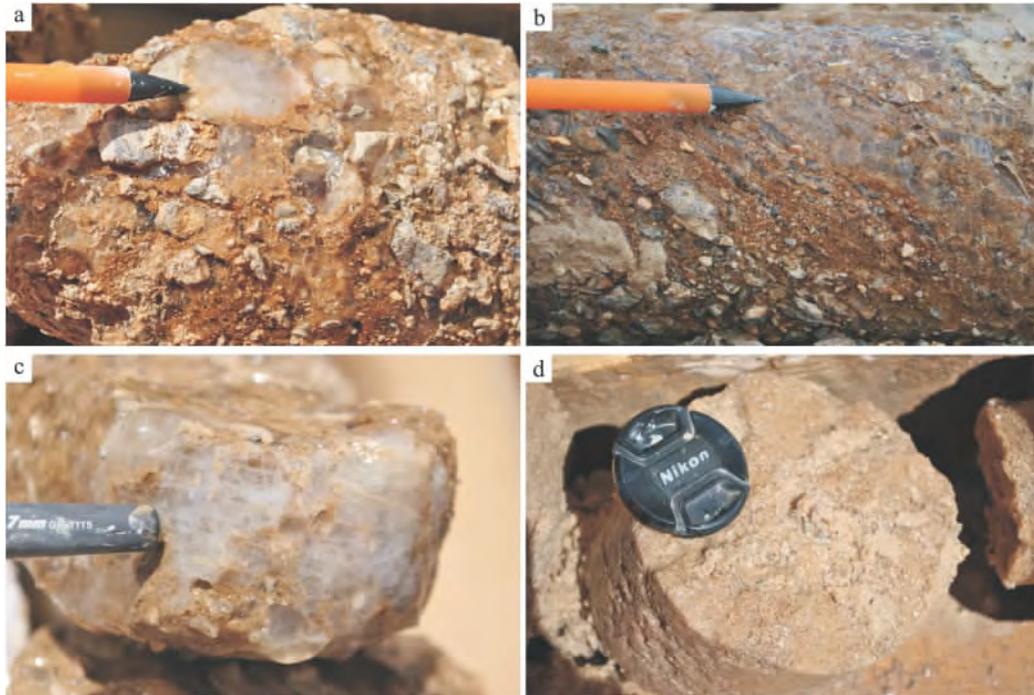


图4 QK-4井岩心中含冰沉积物冻土层特征

a. 块状冰; b. 脉状冰; c. 层状冰; d. 浸染状冰

Fig. 4 Characteristics of the ice-bearing sediments permafrost layers from the QK-4 well in the Qiangtang Basin



图5 QK-5井粉砂质泥岩裂隙中充填可见冰

Fig. 5 Visible ice filled in the fractures of the silty mudstones in the cores from the QK-5 well in the Qiangtang Basin

非含冰基岩冻土层是指基岩中虽不含冰,但温度处在 0°C 或 0°C 以下的一种冻土层。基岩低孔或特低孔的储层类型以及裂隙充填特征决定了非含冰基岩冻土层成为钻探区普遍存在的一种冻土层。该冻土层厚度的确定只能依靠井温测井获得。测

井结果显示,QK-1、QK-2、QK-3和QK-4井非含冰基岩冻土层厚度介于17.05~49.80m,QK-5井非含冰基岩厚度达151.0m。

2.2 冻土层冰地球化学特征

冻土层冰地球化学特征研究,对于了解含冰冻土层形成时水的来源以及与冻土层间的离子相互作用至关重要。在QK-4井我们采集到7个不同深度的含冰沉积物样品,待冰融化后在国土资源部地下矿泉水及环境监测中心进行了水地球化学分析,分析结果见表2。

冰融水的氢、氧同位素分析结果显示,氢同位素 δD 值介于 -122.0‰ ~ -114.0‰ ,平均 -119.7‰ ;氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -15.0‰ ~ -13.7‰ ,平均为 -14.6‰ 。对比各种不同水体的氢、氧同位素分布范围^[28,29]可以发现,冰融水的氢、氧同位素值指示水的来源于大气降雪。水的氢、氧同位素随深度变化曲线(图6)显示,氢、氧同位素变化具有同步性,而且它们随深度均具有逐渐增大的趋势。由于大气降

表2 QK-4井含冰沉积物样品融化后水地球化学分析结果

Table 2 Geochemical analyses of the water from the melted ice-bearing sediments samples from the QK-4 well in the Qiangtang Basin

样品号	QK4-I-01	QK4-I-02	QK4-I-03	QK4-I-04	QK4-I-05	QK4-I-06	QK4-I-07
深度(m)	9.8	12.1	25.3	61.0	64.0	65.2	86.3
δD (‰)	-122.0	-120.0	-122.0	-120.0	-119.0	-121.0	-114.0
$\delta^{18}O$ (‰)	-15.0	-14.5	-15.0	-14.7	-14.5	-14.7	-13.7
总溶解固体(mg/L)	741.700	787.600	1598.000	787.300	816.200	391.700	1330.000
矿化度(mg/L)	561.100	580.900	1149.000	606.600	608.300	330.000	988.700
K^+	4.030	10.950	6.670	3.550	3.640	1.940	4.410
Na^+	54.310	109.300	147.000	141.500	144.600	50.090	208.700
Ca^{2+}	113.600	83.170	186.600	61.790	65.210	40.740	126.900
Mg^{2+}	50.500	56.220	142.900	53.940	59.150	28.450	65.340
Cu	<0.01	<0.01	<0.01	0.023	0.016	<0.01	<0.01
Fe	0.107	0.082	0.061	0.173	0.120	<0.01	0.155
Mn	0.003	0.003	0.074	0.004	0.131	0.002	0.004
Li	0.057	0.126	0.136	0.099	0.103	0.049	0.386
Sr	3.920	2.405	5.852	1.780	1.757	0.966	5.574
Ba	0.029	0.063	0.025	0.110	0.084	0.108	0.027
Mo	<0.006	<0.006	<0.006	0.015	0.010	0.007	0.010
V	<0.006	0.036	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006
HCO_3^-	85.420	109.800	73.220	164.800	134.200	122.000	134.200
SO_4^{2-}	288.000	125.400	409.000	88.990	111.300	41.860	705.200
NO_3^-	34.460	12.150	68.260	39.620	53.650	27.870	62.680
Cl^-	153.200	333.200	598.400	312.700	308.500	137.900	86.230
Br^-	<0.10	0.100	0.130	0.220	0.260	0.200	0.160
I^-	<0.020	0.240	0.100	0.270	0.300	0.180	0.140

水在渗入地下之前,如果进入地表水体,经蒸发过程会使氢、氧同位素分子具有不同的扩散速度,从而导致 δD 和 $\delta^{18}O$ 值升高幅度不一致^[28]。因此,较为同步的氢、氧同位素变化表明,该地区大气降雪融化成水后未经过蒸发作用直接渗入地下。氢、氧同位素随深度逐渐增大的趋势提示了含冰冻土层形成的一般过程。当大气降雪将地表覆盖时,与地表接触的雪首先融化成水下渗入地下,随着水下渗的深度越深,地层温度越高,使得 $\delta^{18}O$ 和 δD 值越大。由此可见,含冰冻土层先是大气降雪融化成的水直接下渗入地下,再受气候变冷影响,地层由浅往深逐渐冻结形成。在浅层12.1m处出现 $\delta^{18}O$ 和 δD 高值,主要可能与冻土层形成后,冻融层季节性融化,使得具有较高 $\delta^{18}O$ 和 δD 值的融化水再次下渗入冻土层后改造所致。

冰融水的矿化度介于330~1149mg/L,平均689.229mg/L,主要表现为淡水特征,仅QK4-I-03样品为微咸水。矿化度随深度变化不具有明显的规律性(图7),表明矿化度的不同主要是在冻土层形

成前,雪融水与围岩物质发生作用的结果。除此之外,雪融水在下渗的过程中,还会对所渗透地层起到一定的淋滤作用,也可能引起矿化度的变化。7个样品中阳离子主要由 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 和少量的 K^+ 组成,其中 Na^+ 浓度介于50.09~208.7mg/L,平均122.214mg/L; Ca^{2+} 浓度介于40.74~186.6mg/L,平均96.859mg/L; Mg^{2+} 浓度介于28.45~142.9mg/L,平均65.214mg/L。阴离子主要由 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 组成,并含有微量的 Br^- 和 I^- ,其中 Cl^- 浓度介于86.23~598.4mg/L,平均275.733mg/L; SO_4^{2-} 浓度介于41.86~705.2mg/L,平均252.821; HCO_3^- 浓度73.22~164.8mg/L,平均117.663mg/L; NO_3^- 浓度12.15~68.26mg/L,平均42.67mg/L。除此之外,样品中还检出少量的Sr和微量的Fe、Ba、Li和Mn等元素(表2)。QK-4井含冰沉积物冻土层主要由灰黄色弱固结的砾石层、含砾粗沙层、细沙层和泥质粉沙层组成,局部夹薄层状灰色粘土层(图7);沉积物多由冰和泥质胶结,冰

融化后,岩心呈松散状。结合阴、阳离子浓度随深度变化曲线可以看出,离子浓度变化明显与沉积物类型有关。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度在砾石层段明显高于在沙层段,并在粘土层段浓度达到最低。 Na^+ 浓度在砾石层段略高于在沙层段和粘土层段,而 K^+ 浓度在沙层段高于在砾石层段, HCO_3^- 浓度在沙层段和粘土层段略高于在砾石层段。究其原因主要是因为砾石层相比沙层和粘土层具有更广泛的物质来源,所含的离子组成较为丰富。再加上该层孔隙度大,当雪融水下渗进入该层后,水与其接触面积较大,离子交换作用便会增强。而粘土层主要是由含水硅酸盐矿物组成,离子组分相对单一,孔隙度小,水仅能沿裂隙渗入其中,接触面积较小,因而离子交换作用较弱。沙层的离子丰度和孔隙度大小则介于砾石层和粘土层之间。由此可见,冰融水中的阴、阳离子浓度的高低在一定程度上反映了不同深度沉积物的物化性质。

3 讨论

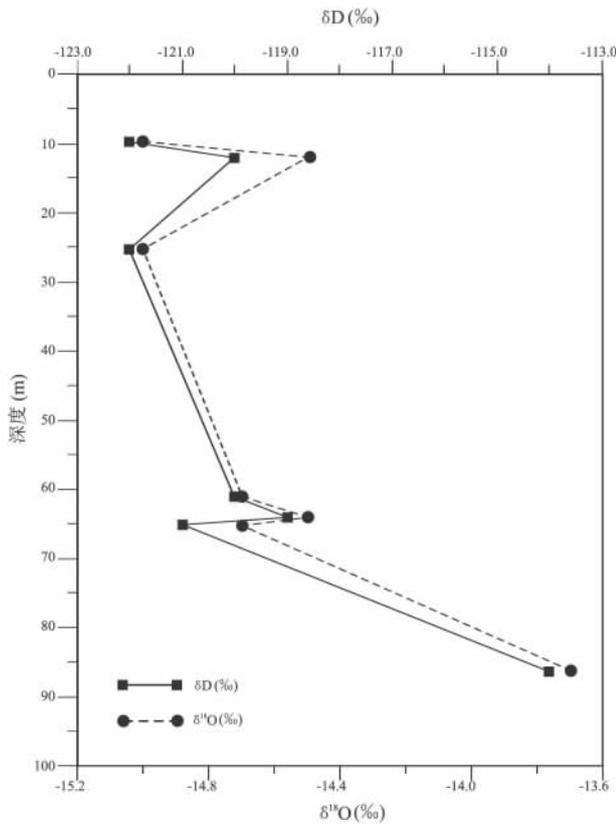


图6 QK-4井含冰沉积物样品融化后水氢、氧同位素随深度变化曲线

Fig. 6 Plots showing the variations in hydrogen and oxygen isotopic values as a function of depths for the water from the melted ice-bearing sediments samples from the QK-4 well in the Qiangtang Basin

3.1 冻土结构类型对于天然气水合物温压条件的影响

目前,陆地冻土区和海底沉积物中水合物稳定带的孔隙流体压力大多是按照上部静水压力计算^[30-31],但前提需要保证地层中孔隙连通性。静水压力的计算公式为:

$$p = \rho_w gh \tag{1}$$

羌塘天然气水合物钻探区具有复杂的冻土结构,冻土层分为冻融层、含冰沉积物冻土层、含冰基岩冻土层和非含冰基岩冻土层的特殊的冻土层结构类型。尤其是非含冰沉积物冻土层和非含冰基岩冻土层的存在,隔断了上下孔隙的连通性,因此,非冻土层孔隙流体不能简单的用上部流体压力计算。

若考虑上部静岩压力引起的非冻土层的孔隙流体压力,需要首先计算上部总的应力,然后根据有效应力原理和非冻土层的力学参数计算孔隙流体压力。这里暂时假定下部非冻土层承载力弱而主要由孔隙流体承担上部静岩压力。静岩压力计算公式分别为:

$$p = \rho_s gh_1 + \rho_{is} gh_2 + \rho_{ir} gh_3 + \rho_{nir} gh_4 + \rho_w gh_5 \tag{2}$$

也即:

$$\frac{p}{\rho_w gh} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \frac{h_1}{h} + \frac{\rho_{is}}{\rho_w} \cdot \frac{h_2}{h} + \frac{\rho_{ir}}{\rho_w} \cdot \frac{h_3}{h} + \frac{\rho_{nir}}{\rho_w} \cdot \frac{h_4}{h} + \frac{h_5}{h} \tag{3}$$

其中, ρ_w 、 ρ_s 、 ρ_{is} 、 ρ_{ir} 、 ρ_{nir} 分别表示水、冻融层、含冰沉积物冻土层、含冰基岩冻土层、非含冰基岩冻土层的平均密度,在计算中分别取为 1.0 g/cm^3 、 2.0 g/cm^3 、 2.0 g/cm^3 、 2.7 g/cm^3 、 2.5 g/cm^3 。总深度 $h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$,分别根据现场钻探结果而定。由公式(3)可知,如果冻土层的总厚度相等,静岩压力大于静水压力,且含冰基岩冻土层和非含冰基岩冻土层厚度越大,按照静岩压力计算公式得到的下部非冻土层孔隙流体压力越大。图8给出了羌塘盆地天然气水合物钻探试验井(QK-1~QK-5)的井温随深度的变化曲线以及根据静水压力和静岩压力分别计算的甲烷水合物相平衡曲线。从图中可以看出,根据静水压力计算非冻土层孔隙流体压力和冻土层厚度50m时,5个井位不具备形成天然气水合物的条件;而根据静岩压力计算,QK-4和QK-5井位冻土层厚度约150m,具备天然气水合物成藏的温度压力条件。若考虑深部流体运移引起的非冻土层的孔隙流体压力,根据非

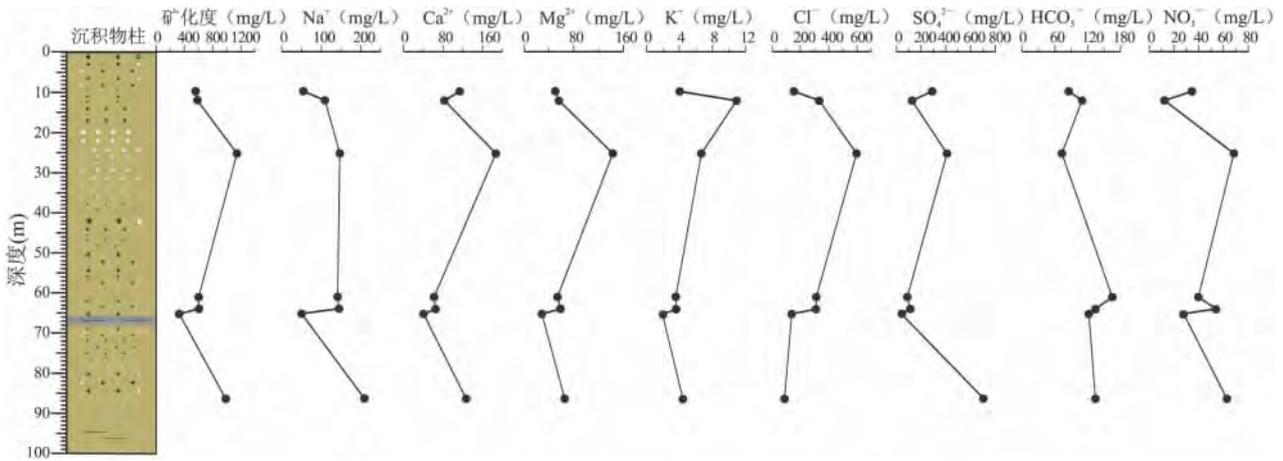


图7 QK-4井含冰沉积物样品融化后水的矿化度及阴、阳离子浓度随深度变化曲线

Fig. 7 Plots showing the variations in mineralization degrees and anions and cations concentrations as a function of depths for the water from the melted ice-bearing sediments samples from the QK-4 well in the Qiangtang Basin

含冰基岩低孔或特低孔以及微裂隙充填等岩性特征,同时考虑到钻探过程中,穿过非含冰基岩层时出现水涌现象,证实了这一层位出现了高于静水压力的超静孔隙流体压力。这一压力应小于或等于该层的突破压力,只有超过这一压力,流体在岩石中渗透才能开始^[32]。假定该层岩石最大孔隙对应的毛细管半径 r ,它所对应的毛细管压力称为突破压力:

$$p = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (4)$$

式(1)中, σ 为界面张力系数, θ 为润湿角。对于主流孔隙尺度为 $10\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 量级的岩层,其突破压力量级为 $0.1 \sim 10\text{MPa}$ 。由于直接获得岩层的微纳米尺度孔隙分布十分困难,而根据统计资料突破压力与岩层孔隙度呈现线性关系,突破压力可由岩层孔隙度确定。此外,若非含冰基岩具有微裂隙分布特征,那么其应力历史中满足开裂的条件。因此,当非含冰基岩冻土层的存在时,其下伏的非冻土层的孔隙流体压力与上部冻土层的微孔和微裂隙特征紧密相关,有利于浅层烃类气体的封存和水合物的成藏。

冻土结构类型对于下部天然气水合物层温度的影响主要取决于各个类型冻土自身的传热系数、密度、厚度分布等。而冻土区环境温度与深部地层流体运移、地热向上传输等共同决定了冻土层和天然气水合物层的温度梯度和温度场分布。这一温度演化实际上是一个包括多源、相变等复杂物理化学过程的移动界面问题。

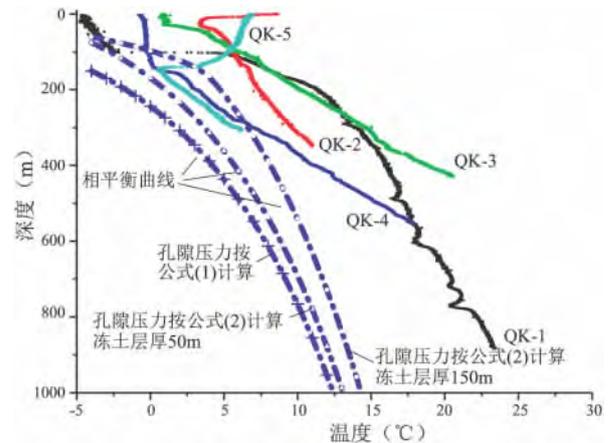


图8 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井井温随深度变化曲线及预测的甲烷水合物相平衡曲线

Fig. 8 Temperature-depth curves for the QK1 to QK5 wells and predicted phase equilibrium curves for the methane hydrates from the Qiangtang Basin

3.2 含冰冻土层对于浅层烃类气体的封盖作用

冻土层结构对于天然气水合物温压条件具有一定影响外,冻土层对于浅层烃类气体的封盖作用也不容忽视。为了定量评价含冰冻土层对于浅层烃类气体的封盖性,我们在实验室利用人工合成的沉积物样品(干密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$,孔隙度40%),进行了在不同含冰饱和度条件下的甲烷气体渗透率测定。测定结果(表3)显示,随着含冰饱和度的增加,渗透率降低,而且渗透率的衰减过程还具有一定的阶段性(图9)。当含冰饱和度超过50%时,甲烷气体渗透率急剧下降;当含冰饱和度达到60%时,渗透率降至初始值的1/100;当含冰饱和度达到80%时,渗透率降至初始值的 10^{-6} ,几乎接近于零。

表3 沉积物样品在不同含冰饱和度条件下甲烷气体渗透率测定结果

Table 3 Determinations of the methane permeability in the sediments with different ice saturation

实验编号	含冰饱和度	渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
1	0	2.7000
2	0.09	1.5000
3	0.17	0.9430
4	0.36	0.5350
5	0.47	0.4000
6	0.48	0.3980
7	0.59	0.0259
8	0.61	0.0267
9	0.71	0.0255
10	0.72	0.0259
11	0.81	0.0000213
12	0.88	0
13	0.91	0

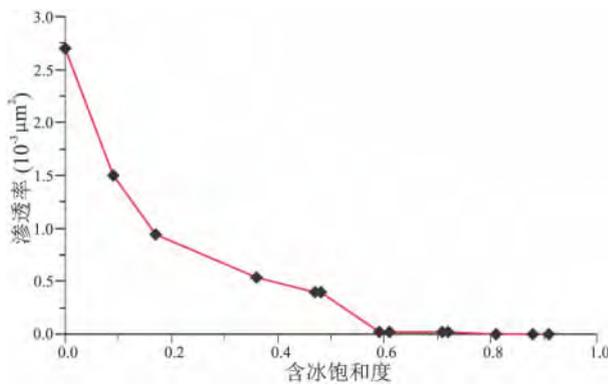


图9 甲烷气体渗透率随含冰饱和度的变化曲线

Fig. 9 Curve showing the variations in the methane permeability as a function of ice saturation

钻探结果表明,羌塘盆地含冰沉积物冻土层是由冰胶结沉积物或含脉状冰、网状冰、块状、层状冰和裂隙冰的沉积物组成,其中层状冰的含冰饱和度几乎能达到了100%,因而,这种含冰沉积物冻土层对于浅层类气体具有非常强的封盖作用。这也就证明了为什么在QK-2和QK-4井冻土层内钻遇到了浅层气体异常。然而,在一般情况下,冻土层内的浅层气体主要有3种来源,一是来自浅层的微生物气,二是来自深部烃源岩产生的热解气,再一个来源则是天然气水合物矿藏二次分解所产生的烃类气体。对于后一种气体来源,青藏高原祁连山冻土区已有证据证实。受气候变暖影响,天然气水合物稳定带发生缩变,即天然气水合物稳定带顶界会下移,底界会上升^[11, 33, 34],位于顶界的天然气水合

物发生分解并释放出甲烷气体。当甲烷气体沿断裂系统向上运移至含冰沉积物冻土层时,受到含冰冻土层的封盖作用进而逐渐会形成一个浅层的天然气藏。这可能便是祁连山冻土区DK-40井在52.9m深度发生井喷的原因,当时火焰高达3~4m,孔口气体流速达4800m³/d。因此,在气候变暖因素的驱动下,冻土层不仅能通过P-T条件来控制天然气水合物矿藏存在的空间范围,而且含冰冻土层还限制着浅层烃类气体的向上运移,由此在青藏高原冻土区会形成一个由断裂系统相关联的深部烃类储层、中部天然气水合物储层和浅部天然气藏组成的含油气系统。对于该含油气系统的深入理解,将有助于更好的了解羌塘盆地天然气水合物控矿因素以及与环境气候变化间的响应关系。

4 结论

(1) 结合实际钻探资料,从影响天然气水合物成藏角度提出了羌塘盆地3种主要的冻土结构类型,其中由冻融层、含冰沉积物冻土层、含冰基岩冻土层、非含冰基岩冻土层所组成的冻土结构最为常见。冻土层结构对天然气水合物温压条件具有一定的影响,当非含冰基岩冻土层存在时,其下伏的非冻土层的孔隙流体压力与上部冻土层的微孔和微裂隙特征紧密相关,有利于浅层烃类气体的封存和水合物的成藏。

(2) 含冰冻土层冰地球化学特征能有效地指示冻土层形成的一般过程。氢、氧同位素结果表明,形成冰的水来自于大气降雪,并且雪融化成水后未经蒸发作用直接渗入地下,受气候变冷影响,地层由浅往深逐渐冻结形成冻土层。矿化度主要表现为淡水特征,矿化度的不同主要是在冻土层形成前,雪融水与围岩物质发生作用的结果。阴、阳离子浓度的高低在一定程度上反映了不同深度沉积物的物化性质。

(3) 含冰冻土层对于浅层烃类气体封盖作用的定量评价显示,随着含冰饱和度的增加,甲烷气体渗透率降低,当含冰饱和度达到80%时,能完全有效地封盖住甲烷气体。在气候变暖因素的驱动下,冻土层不仅能通过温压条件来控制天然气水合物矿藏存在的空间范围,而且含冰冻土层还限制着浅层烃类气体的向上运移,由此推测,在青藏高原冻土区可能存在一个由断裂体系相关联的深部烃类储层、中部天然气水合物储层和浅部天然气藏组成的油气系统。

参考文献:

- [1] COLLETT T S ,DALLIMORE S R. Detailed analysis of gas hydrate induced drilling and production hazards [A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates [C]. Yokohama , Japan 2002. 47 - 52.
- [2] BOSWELL R ,COLLETT T S. Current perspectives on gas hydrate resources [J]. Energy & Environmental Science. 2011 ,4: 1206 - 1215.
- [3] MAKOGON Y F ,HOLDITCH S A ,MAKOGON T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering ,2007 ,56(1 - 3) : 14 - 31.
- [4] 祝有海 ,张永勤 ,文怀军 ,等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报 2009 ,83(11) : 1761 - 1770.
- [5] 祝有海 ,卢振权 ,谢锡林. 青藏高原天然气水合物潜在分布区预测[J]. 地质通报 2011 ,30(12) : 1918 - 1926.
- [6] 徐学祖 ,程国栋 ,俞祁浩. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议 [J]. 地球科学进展 ,1999 ,14(2) : 201 - 204.
- [7] 张立新 ,徐学祖 ,马巍. 青藏高原多年冻土区与天然气水合物 [J]. 天然气地球科学 2001 ,12(1/2) : 22 - 26.
- [8] 黄朋 ,潘桂棠 ,王立全 ,等. 青藏高原天然气水合物资源预测 [J]. 地质通报 2002 21(11) : 794 - 798.
- [9] 伊海生 ,时志强 ,刘文军. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景 [J]. 西藏地质 2002 20(1) : 46 - 49.
- [10] 刘怀山 ,韩晓丽. 西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测 [J]. 西北地质 2004 ,37(4) : 33 - 38.
- [11] 陈多福 ,王茂春 ,夏斌. 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 ,2005 ,48(1) : 165 - 172.
- [12] 吴青柏 ,蒋观利 ,蒲毅彬 ,等. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系 [J]. 地质通报 2006 25(1/2) : 29 - 33.
- [13] 库新勃 ,吴青柏 ,蒋观利. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究 [J]. 天然气地球科学 2007 ,18(4) : 588 - 592.
- [14] 祝有海 ,赵省民 ,卢振权. 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 2011 ,31(1) : 13 - 19.
- [15] 郭祖军 ,陈志勇 ,胡素云 ,等. 天然气水合物分布及青藏高原有利勘探区 [J]. 新疆石油地质 2012 ,33(3) : 266 - 271.
- [16] HE J ,WANG J ,FU X ,et al. Assessing the conditions favorable for the occurrence of gas hydrate in the Tuonamu area Qiangtang Basin ,Qinghai-Tibetan , China [J]. Energy Conversion and Management 2012 53(1) : 11 - 18.
- [17] FU X ,WANG J ,TAN F ,et al. Gas hydrate formation and accumulation potential in the Qiangtang Basin ,northern Tibet , China [J]. Energy Conversion and Management. 2013 ,73: 186 - 194.
- [18] 刘增乾 ,徐宪 ,潘桂棠. 青藏高原大地构造与形成演化 [M]. 北京: 地质出版社. 1990. 9 - 34.
- [19] 余光明 ,王成善. 西藏特提斯沉积地质 [M]. 北京: 地质出版社. 1990. 94 - 98.
- [20] 赵政璋 ,李永铁 ,叶和飞 ,等. 青藏高原羌塘盆地石油地质 [M]. 北京: 科学出版社 2001. 1 - 367.
- [21] 王剑 ,谭富文 ,李亚林 ,等. 青藏高原重点沉积重地油气资源潜力分析 [M]. 北京: 地质出版社 2004. 140 - 198.
- [22] 赵政璋 ,李永铁 ,叶和飞 ,等. 青藏高原大地构造特征及盆地演化 [M]. 北京: 科学出版社 2000.
- [23] 王成善 ,伊海生 ,李勇 ,等. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价 [M]. 北京: 地质出版社 2001. 224 - 225.
- [24] 王成善 ,伊海生 ,刘池洋 ,等. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义 [J]. 石油与天然气地质 2004 25(2) : 139 - 143.
- [25] WANG CHENGSHAN ,CHANG E Z ,ZHANG SHAONAN. Potential oil and gas bearing basins on the Qinghai-Tibet Plateau of China [J]. International Geological Review ,1997 ,39(10) : 876 - 890.
- [26] 周幼吾 ,郭东信 ,邱国庆 ,等. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社 2000.
- [27] HUGUES L ,VLADIMIR E R ,EDWARD A G S. Policy Implications of Warming Permafrost [M]. UNEP 2012.
- [28] 杨润田 ,林凤桐. 多年冻土区水文地质及工程地质学 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社 1986. 134.
- [29] 陈俊 ,王鹤年. 地球化学 [M]. 北京: 科学出版社 2004. 116.
- [30] KVENVOLDEN K A ,LORENSEN T D. The global occurrence of natural gas hydrate [J]. Geophysical Monograph Series ,2001 ,124: 3 - 18
- [31] FISK B ,COLLETT T ,CLOUGH J. Assessment of Alaska north slope gas hydrates [R]. USBLM-USGS-DGGS , A cooperative energy resource assessment project report 2004.
- [32] 张旭辉 ,郝委 ,刘庆杰. CO₂ 地质埋存后的逃逸问题研究进展 [J]. 力学进展 2010 ,40(5) : 517 - 527.
- [33] 王平康 ,祝有海 ,卢振权 ,等. 祁连山冻土区天然气水合物成藏体系中自生黄铁矿地球化学特征与成因探讨 [J]. 中国科学(地球科学) 2014 ,44: 1283 - 1297.
- [34] WANG PINGKANG ,ZHU YOUHAI ,LU ZHENQUAN ,et al. Gas hydrate stability zone migration occurred in the Qilian mountain permafrost ,Qinghai ,Northwest China: Evidences from pyrite morphology and pyrite sulfur isotope [J]. Cold Regions Science and Technology 2014 98: 8 - 17.

Permafrost structures and their effects on the accumulation of the natural gas hydrates in the Qiangtang Basin , northern Xizang

WANG Ping-kang¹ , ZHU You-hai¹ , ZHANG Xu-hui² , ZHANG Shuai¹ , PANG Shou-ji¹ , XIAO Rui³ , LI Bing⁴

(1. *Oil and Gas Survey , China Geological Survey , Beijing 100029 , China*; 2. *Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China*; 3. *Institute of Mineral Resources , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037 , China*; 4. *College of Construction Engineering , Jilin University , Changchun 130021 , Jilin , China*)

Abstract: The permafrost regions constitute much of the Qiangtang Basin on the Qinghai-Xizang Plateau , and are considered to be favourable areas for the accumulation of the natural gas hydrates with a great potential. Based on the data from the test drillings , three structural types are recognized for the permafrost regions , of which the most common one is the structural type composed of the active layers , ice-bearing sediments permafrost layer , ice-bearing basement permafrost layer , and ice-free basement permafrost layer. While in the case of the ice-free basement permafrost layer , the pore fluid pressures in the underlying ice-free permafrost layers tend to be closely related to the structures of the micropores or microfractures in the overlying the ice-bearing permafrost layers , which may facilitate the sealing of the near-surface hydrocarbon gas and accumulation of gas hydrates. The geochemical signatures of ice in the ice-bearing permafrost layers have reflected that the water from the melted atmospheric snowfall directly percolates into the soil and rock layers , and results in the gradually freezing of the strata from shallower to deeper depths due to the decrease of temperatures. Meanwhile , the mineralization degrees and anion and cation concentrations in water may give a reference for the assessment of physical and chemical properties of the sediments. As indicated by the experimental simulation , the methane permeability tends to decrease with the increase of ice saturation in the ice-bearing permafrost layers , and may go into ice-free permafrost layers as the ice saturation exceeds 80% . Influenced by the climatic changes , the permafrost layers may exercise a major control not only on the accommodation spaces of the gas hydrates but also on the migration of the near-surface hydrocarbon gases. It follows that within the permafrost regions in the Qiangtang Basin on the Qinghai-Xizang Plateau , there may be the petroleum systems composed of the fault-controlled deep-seated hydrocarbon reservoirs , medium-deep gas hydrate reservoirs and shallow-seated gas reservoirs.

Key words: Qiangtang Basin; permafrost structure; ice saturation; gas hydrates