

# 一种冻土区天然气水合物地球化学勘查新技术 ——惰性气体氦氖分析

张富贵<sup>1,2)</sup>, 唐瑞玲<sup>1)</sup>, 周亚龙<sup>1,2)</sup>, 张舜尧<sup>1,2)</sup>, 孙忠军<sup>1,2)</sup>, 王惠艳<sup>1,2)</sup>

1) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊, 065000;

2) 地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 河北廊坊, 065000

**内容提要:**开发不受沼泽微生物影响的地球化学勘查技术是提高中纬度冻土区天然气水合物探井预测成功率的重要课题之一。本文选择在祁连山聚乎更天然气水合物已知区进行惰性气体勘查技术实验,研究了氦氖的测试方法,实验区为高寒沼泽景观,面积150km<sup>2</sup>,采样密度2点/km<sup>2</sup>,采样深度60cm,采集土壤顶空气样品300件和DK-3井岩芯样品400件,应用色谱反吹技术对顶空气样品进行了惰性气体氦氖的分析。结合地质和地球化学勘查成果进行了综合解释,认为惰性气体异常与天然气水合物矿藏关系密切,与烃类异常浓度范围一致,为顶部异常模式。实验区天然气水合物矿藏11个水合物发现井有10个位于He、Ne异常内,1个井位于异常外。分析了天然气水合物岩芯顶空气轻烃和氦氖指标的垂向分布特征,提出了天然气水合物矿藏上方土壤惰性气体的地气迁移机理。研究区近地表氦氖异常源于深部水合物矿藏和断裂构造,不受沼泽微生物的影响,是冻土区天然气水合物勘查的一种有效技术。

**关键词:**惰性气体;天然气水合物;高寒沼泽;冻土区;祁连山

天然气水合物是由水和气体分子(主要是甲烷)在低温、高压等条件下形成的一种结晶状固体物质,广泛的分布于海底沉积物和陆地永久冻土层中(Collett et al., 1983, 2009, 2010, 2011),是21世纪重要的潜在能源(Makogon et al., 2007; Cao Daiyong et al., 2009; Zou Caineng et al., 2015; Fu Piaoer et al., 2016)。国外研究表明,冻土区天然气水合物主要分布于俄罗斯、美国、加拿大等国的高纬度环北冰洋冻土区(Dallimore et al., 1999, 2005; Collett, 2010),环北冰洋冻土区多年平均地温低,可为天然气水合物形成提供适宜的温压条件和良好的圈闭作用。青藏高原是世界上最大的中纬度湿地冻土区,多年冻土面积约150万km<sup>2</sup>,占世界多年冻土面积的7%(Zhou Youwu et al., 2000),大多数冻土区都具备形成天然气水合物的条件(Zhu Youhai et al., 2009, 2011; Lu Zhenquan et al.,

2011)。

国外环北冰洋冻土区天然气水合物勘查的主要技术是地震和测井,在阿拉斯加北坡和马更些三角洲得到很好的应用(Collett et al., 1983; Schmitt et al., 2005; Riedel et al., 2009)。国内学者在青藏高原冻土区也进行了地震和测井的研究,并没有发现类似于“BSR”界面(Han Jianguang et al., 2016; Fang Hui et al., 2017),青藏高原冻土区天然气水合物类型与墨西哥湾海底水合物相似,为II型结构水合物,通常呈团块状、薄片状分布在粉砂岩、细砂岩、泥岩裂隙中,产出状态有两种:“裂隙型”和“孔隙型”(Wang Pingkang et al., 2011),仅仅依靠地震和测井难以满足要求。地球化学技术作为一种有效的补充手段,受到了学者们的重视(Yang Zhibin et al., 2011; Sun Zhongjun et al., 2014a),但是传统的油气指标受当地煤矿的影响,难以解释清楚烃类

注:本文为国家“127”专项项目(编号GZHL20110324, GZH201400302)、中国地质调查局地质调查项目(编号DD20160224)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号AS2016Y01)联合资助的成果。

收稿日期:2018-04-12; 改回日期:2018-10-18; 网络发表日期:2018-11-30; 责任编辑:周健。

作者简介:张富贵,男,1980年生。硕士,高级工程师,主要从事油气和天然气水合物研究与勘查工作。Email:zhangfugui@igge.cn。通讯作者:唐瑞玲,女,1985年生。硕士,工程师,主要从事分析测试方面的研究。Email:tangruiling@igge.cn。

**引用本文:**张富贵, 唐瑞玲, 周亚龙, 张舜尧, 孙忠军, 王惠艳. 2019. 一种冻土区天然气水合物地球化学勘查新技术——惰性气体氦氖分析. 地质学报, 93(3):751~761, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019050.  
Zhang Fugui, Tang Ruiling, Zhou Yalong, Zhang Shun Yao, Sun Zhongjun, Wang Huiyan. 2019. A new tool for natural gas hydrate exploration in permafrost regions: analysis of inert gas helium neon. Acta Geologica Sinica, 93(3):751~761.

气体来源(Sun Zhongjun et al., 2014b)。

惰性气体因其化学活性弱、强挥发性和弱吸附性的特点,是判别气体来源的重要示踪剂(Fang Zhong, 1996; Wang Denghong et al., 2002; Li Xiaofeng et al., 2003; Sun Xiaoming et al., 2006)。中国科学院兰州地质研究所将惰性气体引入到天然气地球化学研究中,在判别天然气水合物成因和来源方面取得了许多认识(Shen Ping et al., 1995; Xu Yongchang et al., 1996, 2003)。但是利用惰性气体判别气藏边界国内未见报道,利用惰性气体作为一种天然气水合物的地球化学勘查手段也未见类似研究。甲烷碳同位素表明,祁连山冻土区天然气水合物烃类异常是热解成因和土壤微生物的混合成因(Sun Zhongjun et al., 2014b; Lu Zhenquan et al., 2015)。为了强化微渗漏信息,排除沼泽微生物对天然气水合物地球化学勘查技术的影响,提高天然气水合物地球化学勘查的成功率,本文探索性研究了惰性气体勘查新技术,探讨惰性气体异常与烃类异常分布特征,分析钻孔中惰性气体组分垂向分布特征以及与甲烷的相关关系,进一步提出天然气水合物惰性气体地球化学异常形成机理。

## 1 惰性气体应用天然气水合物勘查的原理

惰性气体包括氦、氖、氩、氪、氙六种气体,惰性气体通常与核过程有关,主要来源于地壳放射和幔源物质放射,常用来揭示各种地质体及天体物质的来源、成因机理和各种地质-地球化学过程(Xu Yongchang et al., 2003; Tang Huayun et al., 2004)。惰性气体化学性质不活泼,但其物理活动性强,能从壳幔层垂向微渗漏至地表,惰性气体都是典型的亲气元素(Zhu Yuenian, 1994),容易被天然气吸附,是天然气中常见的非烃类组分(Wang Peng, 2014)。惰性气体异常是油气藏勘查的指示剂(Roberts, 1981; Elliot et al., 1993; Pinti and Marty, 1995),也是海域和陆域天然气水合物矿藏的痕量组分(Gisburg et al., 1993; Prasofov et al., 1999),气体垂向微渗漏理论是惰性气体应用于油气勘探的理论基础(Xie Xuejin, 1992),天然气水合物与常规油气在物源及运移机制上非常相似(Zhang Fugui et al., 2013),可以借用油气勘探的惰性气体方法,来探讨惰性气体对深部天然气水合物的响应和指示意义。

## 2 区域地质背景

### 2.1 地质概况

研究区地处祁连山木里煤田聚乎更矿区内,整体为一复式背向斜构造,由一个背斜和两个向斜组成,其中北向斜分布有三井田、二井田和一露天三个井田,南部向斜由四井田、一井田、三露天和二露天组成(Fu Junhui et al., 1998)。矿区出露的地层主要包括中侏罗统江仓组( $J_2j$ )和木里组( $J_2m$ ),均含多个含煤地层(Xie Qifeng et al., 2015; Niu Zhixin et al., 2015)(图1)。

中侏罗统木里组下岩性段为辫状河冲积平原沉积,岩性为中一粗粒碎屑岩,偶夹薄层碳质泥岩或薄层煤,木里组上岩性段为湖泊-沼泽环境沉积相,岩性为深灰色粉砂岩、细砂岩及灰色细一中粒砂岩、粗粒砂岩夹两层主煤层;中侏罗统江仓组下岩性段为三角洲-湖泊环境的灰色细粒砂岩、中粒砂岩和深灰色泥岩、粉砂岩,含煤2~6层,江仓组上岩性段为厚层油页岩段,是一套浅湖-半深湖环境的细碎屑泥岩、粉砂岩;上侏罗统是半干旱和干旱气候下形成的一套红色碎屑岩(Wang Pingkang et al., 2011)。

### 2.2 实验区天然气水合物矿藏特征

祁连山聚乎更天然气水合物分布在140~330m深度区间,厚度将近200m(Lu Zhenquan et al., 2015)。深度较极地冻土区浅(Collett et al., 2011),天然气水合物矿藏的稳定带厚度受冻土厚度分布制约。钻孔烃源岩镜质组反射率 $R_o$ 值为0.78%~1.1%,最高热解峰峰温 $T_{max}$ 为470℃,处于热演化成熟并大量生成油气的阶段(Zhang Jiazheng, 2017)。海域天然气水合物气体主要为生物成因(Cong Xiaorong et al., 2018),祁连山天然气水合物气体来源主要为混合成因(Wang Tong et al., 2009, 2012; Huang Xia et al., 2011; Tan Furong et al., 2017),气体快速监测系统结果显示(Li Song et al., 2017),甲烷含量为54%~76%,乙烷含量为8%~15%,丙烷含量为4%~21%,并有少量的丁烷、戊烷等, $CO_2$ 含量一般为1%~7%,高的可达15%~17%。水合物光谱曲线与墨西哥海底水合物样品相似,属于II型水合物(Wang Pingkang et al., 2011)。碳同位素研究表明,祁连山天然气水合物的气源主要在深部,气源岩生成的气体沿断裂运移至浅部,直接或间接由较晚形成具有压性断裂带封堵形成浅部气体聚集,经晚更新世以来的冰期作用,形成水合物或仍以游离或吸附气存

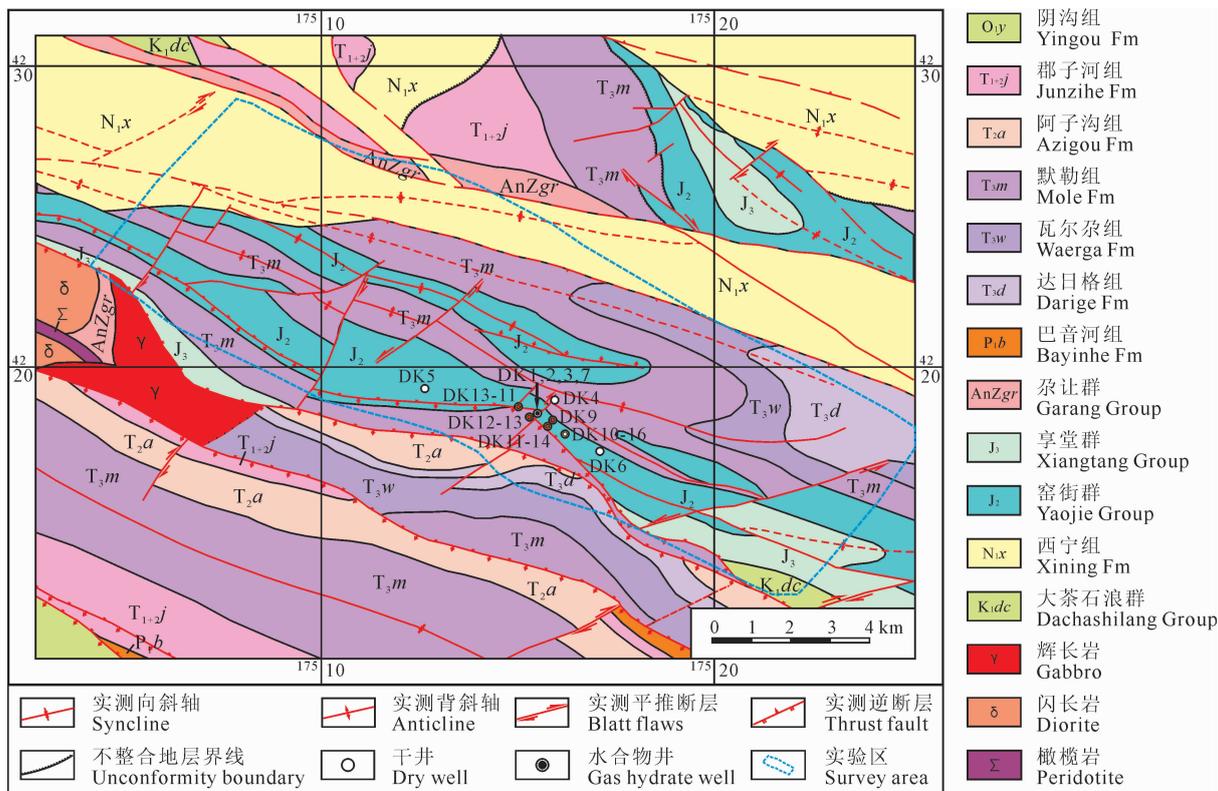


图 1 祁连山聚乎更矿区天然气水合物矿藏地质简图(据青海煤炭地质 105 队, 2006<sup>①</sup> 修改)

Fig. 1 Geological map of the gas hydrate deposits in Juhugeng in the Qilian Mountain

(modified from Qinghai No. 105 Coal Geological Exploration Team, 2006<sup>①</sup>)

在于地层中(Zhang Fugui et al., 2017)。

### 3 样品采集和测试

选择祁连山冻土区三露天天然气水合物矿区进行了方法试验, 采样季节在 2012 年 9~10 月。测区面积 150km<sup>2</sup>, 采样密度 2 个点/km<sup>2</sup>, 样品采集深度 60cm, 采集土壤顶空气样品 300 件, 采集 DK-3 井岩芯顶空气样品 400 件。野外在预装 200mL 饱和盐水的瓶中装入土样, 使饱和盐水的液面升至 400mL 刻度。装完样品的瓶子拧紧螺丝和瓶盖, 在室内倒置摆放, 最大限度地保存样品中的顶空间气体。

惰性气体分析测试由中石化合肥培训测试中心完成, 应用色谱反吹技术测定惰性气体氦、氡。通过试验对气相色谱分析条件进行了优选, 分子筛填充柱作为分析柱, Porapak-Q 填充柱为预分析柱, 高纯氮气(99.999%)作载气, 采用定量环进样。分析条件为: 载气流速 22mL/min, 热导检测器温度 150℃, 柱温箱的温度 40℃, 反吹电磁四通转换阀的切换时间为 0.78min。按分析测试的要求, 对 10% 的样品进行了基本测量和检查测量, 基本测量和检查测量的相对误差小于 10%, 分析质量可靠。

## 4 结果

### 4.1 惰性气体(氦、氡)与烃类气体分布特征

祁连山聚乎更矿区土壤酸解烃数据来源于中国地质科学院物化探所<sup>②</sup>, 取样深度 40~60cm, 样品由中石化合肥培训测试中心完成, 分析 C<sub>1</sub>~C<sub>5</sub> 5 种烃组分浓度。本文利用酸解烃甲烷和酸解烃重烃数据使用 EXCEL 软件进行原始分析, 通过分组频率统计及数据分布特征, 利用对数间隔划分为 15 级, 运用克里金方法进行插值处理, 制作地球化学图, 成图软件为地学信息处理研究应用系统(GeolPAS)。

图 2 为惰性气体氦地球化学图, 土壤顶空气 He 含量的变化范围为 5.92~10.36μL/L, 平均值 7.99μL/L, 标准偏差为 0.61, 高于大气中 He 的含量(5220×10<sup>-9</sup>±15×10<sup>-9</sup>) (Ozima et al., 1983; Mamyrin et al., 1984; Holland et al., 1990) (表 1)。利用频率与含量、双对数法确定异常下限 8.20μL/L。在天然气水合物矿藏上方出现高值异常, 异常平均值 8.38μL/L, 异常衬值 1.05, 异常点数 10 个, 异常强度中等, 异常面积近 4.25km<sup>2</sup>, NAP(规格化面金属量)值 4.46(表 1)。天然气水

合物矿藏以西约 3km 处,发育测区面积最大、异常浓度最高的氦异常,异常值变化范围在 8.46~8.93 $\mu\text{L/L}$ ,异常点数 22 个,异常面积约 12.33 $\text{km}^2$ ,异常平均值 8.82 $\mu\text{L/L}$ ,异常衬值为 1.10, NAP 值也最大,为 13.62(表 1)。

祁连山聚乎更矿区 Ne 的含量范围为 13.53~28.05 $\mu\text{L/L}$ ,平均值 20.80 $\mu\text{L/L}$ ,高于大气中 Ne 的含量 18.20 $\mu\text{L/L}$ 。氦异常分布与氦分布高度一致(图 3),在天然气水合物矿藏上方出现高值异常,异常平均值 23.17 $\mu\text{L/L}$ ,异常衬值 1.11,异常点数 20 个,异常浓集强度很高,异常面积近 6.25 $\text{km}^2$ , NAP(规格化面金属量)值 6.96(表 1)。与氦异常分布相

似,天然气水合物矿藏以西约 3km 处,也发育氦异常,但异常面积小于 He 的异常。异常平均值 25.21 $\mu\text{L/L}$ ,异常衬值 1.21,异常点数 18 个,异常浓集强度很高,异常面积 5.78 $\text{km}^2$ , NAP(规格化面金属量)值 7.0(表 1)。

上述两个异常区冻土厚度大于 65m<sup>⑥</sup>,满足天然气水合物形成的温压条件(Zhu Youhai et al., 2011)。水合物勘探井显示 DK-4 井、DK-5 井均为干井,是水合物边界。惰性气体氦、氦在水合物边界区为低值异常,与水合物勘探井结果相吻合。根据本次地球化学调查(包括惰性气体)推断出的水合物有利区,布置了 DK-9 井、DK13-11 井、DK12-13 井

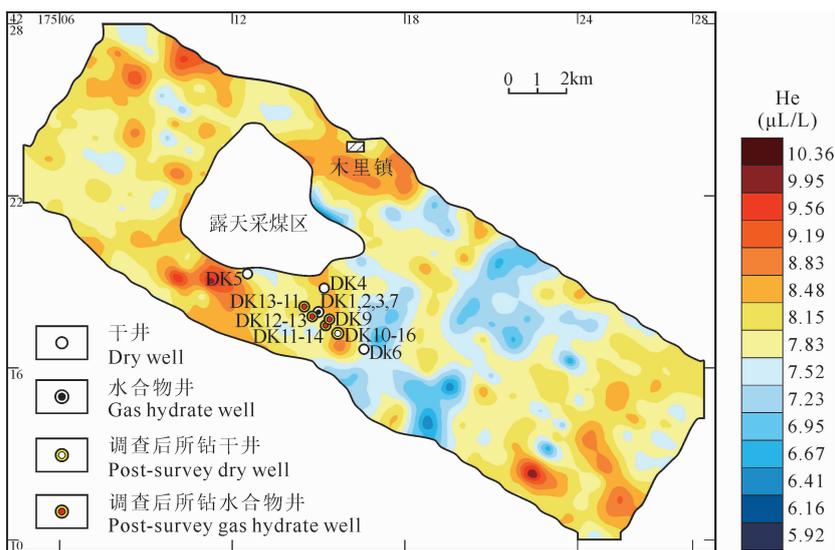


图 2 祁连山聚乎更矿区顶空气 He 地球化学图

Fig. 2 Contour map of He in Juhugeng in the Qilian Mountain

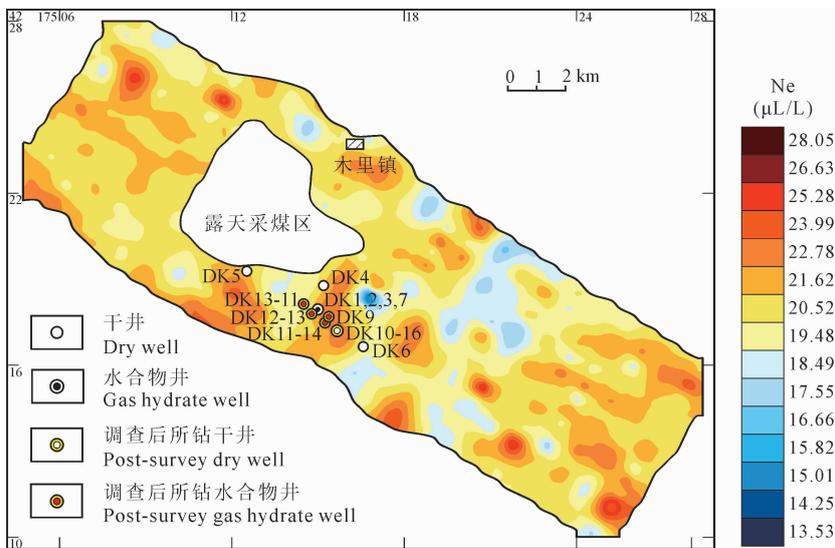


图 3 祁连山聚乎更矿区顶空气 Ne 地球化学图

Fig. 3 Contour map of Ne in Juhugeng in the Qilian Mountain

和 DK11-14 井等 4 口井,均发现天然气水合物(图 2、图 3)。研究区惰性气体其它异常没有发现烃类异常,AMT 测量结果显示冻土厚度小于 60m<sup>⑥</sup>,不利于天然气水合物矿藏的形成,这些异常可能是由深部断裂构造引起的。

图 4 和图 5 分别为土壤酸解烃甲烷、重烃地球化学图,酸解烃甲烷、重烃异常分布有相似之处,主要表现在:①在测区西北部煤田区呈顶部异常,酸解烃甲烷浓度出现多个大于 1000 $\mu\text{L}/\text{kg}$  的异常点,重烃浓度较高,可达到 90 $\mu\text{L}/\text{kg}$ ,异常面积较大;②在天然气水合物上方酸解烃甲烷、重烃均有异常分布,且分布具有较大的相似性,与惰性气体异常重合度很高,二者均有异常面积大,强度高的特点;③测区东部及东南部酸解烃甲烷有点异常分布,对应的惰性气体异常呈北西西向展布的椭圆状(图 2、图 3)。

#### 4.2 He、Ne 气体含量的分形特征

分形理论是以分维数、自相似性、统计自相似性和幂函数等特点被引进到地质学领域(Li

Changjiang et al., 1999; Cheng Qiuming et al., 1999),成秋明等研究发现地质成矿过程中,某一尺度条件下,具有自相似或统计自相似场的分布规律和描述场值的奇异性(Cheng Qiuming et al., 1994, 1999; Cheng Qiuming, 2001),分形理论是揭示成矿体系时空结构特征的有效方法(Cheng Qiuming, 2001; Sheng Wei, 2002)。

分形统计模型:  $N(r) = Cr^{-D}$ ,  $r > 0$  (Sheng Wei, 2002),其中  $r$  表示 He、Ne 和  $\text{CH}_4$  的含量,  $C > 0$  称为比例常数,  $D > 0$  称为分维(或分维数),  $N(r)$  表示岩芯顶空气中 He、Ne 和  $\text{CH}_4$  含量大于等于  $r$  的数目。

图 6 是三露天 DK-3 井钻孔岩芯顶空气 He、Ne 和  $\text{CH}_4$  的分形图。从图中可以看出:①He 的分维数最大,为简单分形,分维数为 19.01,由于惰性气体分子结构简单,分子半径很小,地球化学性质很强,可以容易穿过上覆岩层和冻土层;②Ne 也是简单分形,分维数也很大,为 11.52,说明数据离散性

表 1 祁连山聚乎更矿区土壤地球化学指标特征值

Table 1 Values of soil geochemical indications of Juhugeng in the Qilian Mountain

指标	位置	最大值	最小值	平均值	衬值	异常面积(km <sup>2</sup> )	NAP
酸解烃甲烷	全区	1687.86	1.17	55.5	—	—	—
酸解烃重烃	全区	487.39	5.45	29.35	—	—	—
He	全区	10.36	5.92	7.99	—	—	—
	水合物上方	8.25	8.67	8.38	1.05	4.25	4.46
	西部异常区	8.93	8.46	8.82	1.10	12.33	13.62
Ne	全区	28.05	13.53	20.80	—	—	—
	水合物上方	21.29	25.87	23.17	1.11	6.25	6.96
	西部异常区	23.22	26.96	25.21	1.21	5.78	7.0

注:酸解烃单位为  $\mu\text{L}/\text{kg}$ ;惰性气体单位为  $\mu\text{L}/\text{L}$ ;NAP 值(规格化面金属量值)为异常衬值与异常面积的乘积。

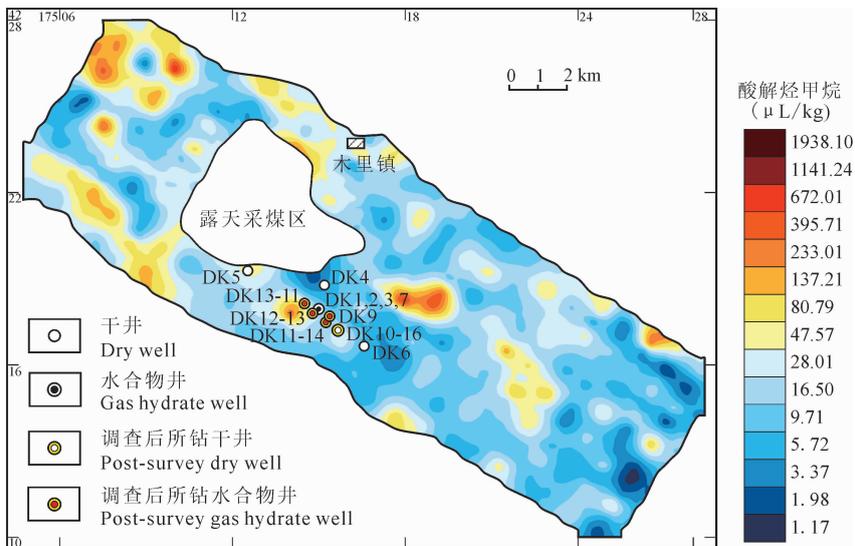


图 4 祁连山聚乎更矿区土壤酸解烃甲烷地球化学图

Fig. 4 Contour map of acid extracted methane in Juhugeng in the Qilian Mountain

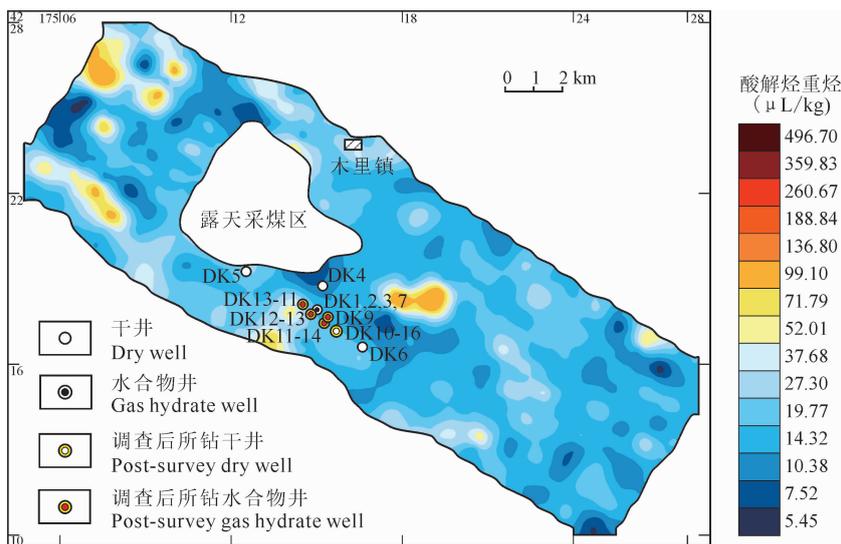


图5 祁连山聚乎更矿区土壤酸解烃重烃地球化学图

Fig. 5 Contour map of acid extracted heavy hydrocarbons in Juhugeng in the Qilian Mountain

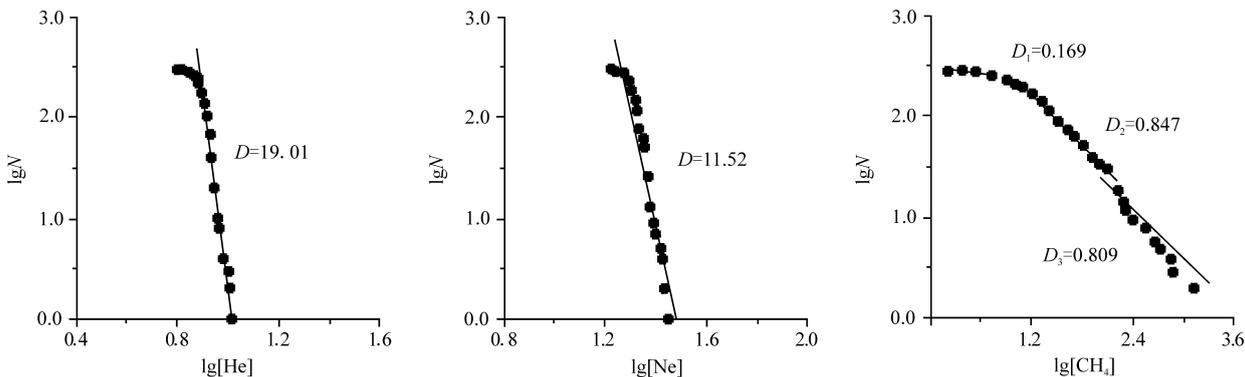


图6 祁连山聚乎更矿区DK-3井钻孔岩芯顶空气He、Ne和CH<sub>4</sub>的分形图

Fig. 6 Fractal graphs of He, Ne, and CH<sub>4</sub> in the drill core headspace gas at well DK-3 in Juhugeng in the Qilian Mountain

较小,地球化学作用单一;③ 甲烷呈现多重分形,分维数 $D_1$ 为0.169, $D_2$ 为0.847, $D_3$ 为0.809,分维数较少,说明甲烷垂向迁移过程中发生了微渗漏和微生物氧化等多种地球化学作用;④ 对比惰性气体和甲烷的分形特征,可以明显看出,CH<sub>4</sub>在垂向迁移过程中由于地球化学场和环境的改变,容易在近地表被土壤微生物氧化,呈现复杂的分形模式,而惰性气垂向迁移不受以上因素的影响,因而呈现简单分形。

综上所述,惰性气体具有很强的物理活动性,可以很容易穿过上覆冻土层,分形分维数较大,在已知水合物矿藏和水合物远景区能形成非常明显的地球化学异常,预测天然气水合物钻井的成功率高达91%,是冻土区天然气水合物勘查的一种很好的辅助手段。

## 5 讨论

为了研究惰性气体的迁移机理,采集了DK-3井天然气水合物钻井岩芯样品400件,分析了顶空气He、Ne和顶空气轻烃。

### 5.1 DK-3井惰性气体的垂向分布

岩芯地球化学显示(表2):① 钻孔岩屑顶空气中的He和Ne的含量高于大气含量;② 水合物矿层上方围岩中He和Ne的含量高于水合物矿层,呈现明显的前缘晕特征;③ 水合物矿层中He和Ne的含量水平与水合物的厚度成正比;④ 钻孔中He/Ne为0.36~0.40,高于大气的0.288。综合浅表层土壤He和Ne的地球化学异常特征和钻孔中与水合物矿层的关系,可以得出祁连山水合物形成过程中惰性气体发生了分异和垂向微渗漏,可以根据浅表层

土壤惰性气体的地球化学异常寻找地下天然气水合物矿藏。

表 2 祁连山聚乎更天然气水合物矿藏惰性气体含量及其对比特征

Table 2 Inert gas content in the gas hydrate deposits and relevant characteristics in Juhugeng in the Qilian Mountain

地区	深度(m)	He/Ne	He ( $\mu\text{L/L}$ )	Ne ( $\mu\text{L/L}$ )
大气 <sup>①</sup>		0.288	5.22	18.2
三露天水合物	水合物矿层上岩层	0.40	9.70	24.4
	水合物矿层 150~155	0.37	7.45	20.4
	水合物矿层上岩层	0.37	9.07	24.7
	水合物矿层 227~236	0.36	8.12	22.5

注：①大气数据来源于 Ozima and Podosek (1983); Mamyrin and Tolstikhin (1984); Holland and Emerson (1990)。

### 5.2 钻孔中惰性气体与甲烷相关关系

利用 DK-3 井的 400 件岩芯测量数据，制作了 He、Ne 和 CH<sub>4</sub> 的相关图(图 7)。惰性气体 He、Ne 相关程度非常高( $r^2=0.5055$ )，说明在水合物成藏和微渗漏过程两种气体具有相似的地球化学行为。进一步研究惰性气体与甲烷的相关关系，发现 CH<sub>4</sub> 与 He、Ne 呈现负相关(图 7c、d)，原因有三个：①甲烷与惰性气体垂向迁移的机理不同，烃类气体在水合物形成过程中发生了地球化学分异，这是因为 II 型水合物的结构不允许过多的重烃进入笼状结构，在水合物稳定带进行分异，惰性气体由于分子小，可以直接进入笼状结构；②甲烷气体垂向迁移到近地表生化带受到了微生物的氧化，而惰性气体化学性

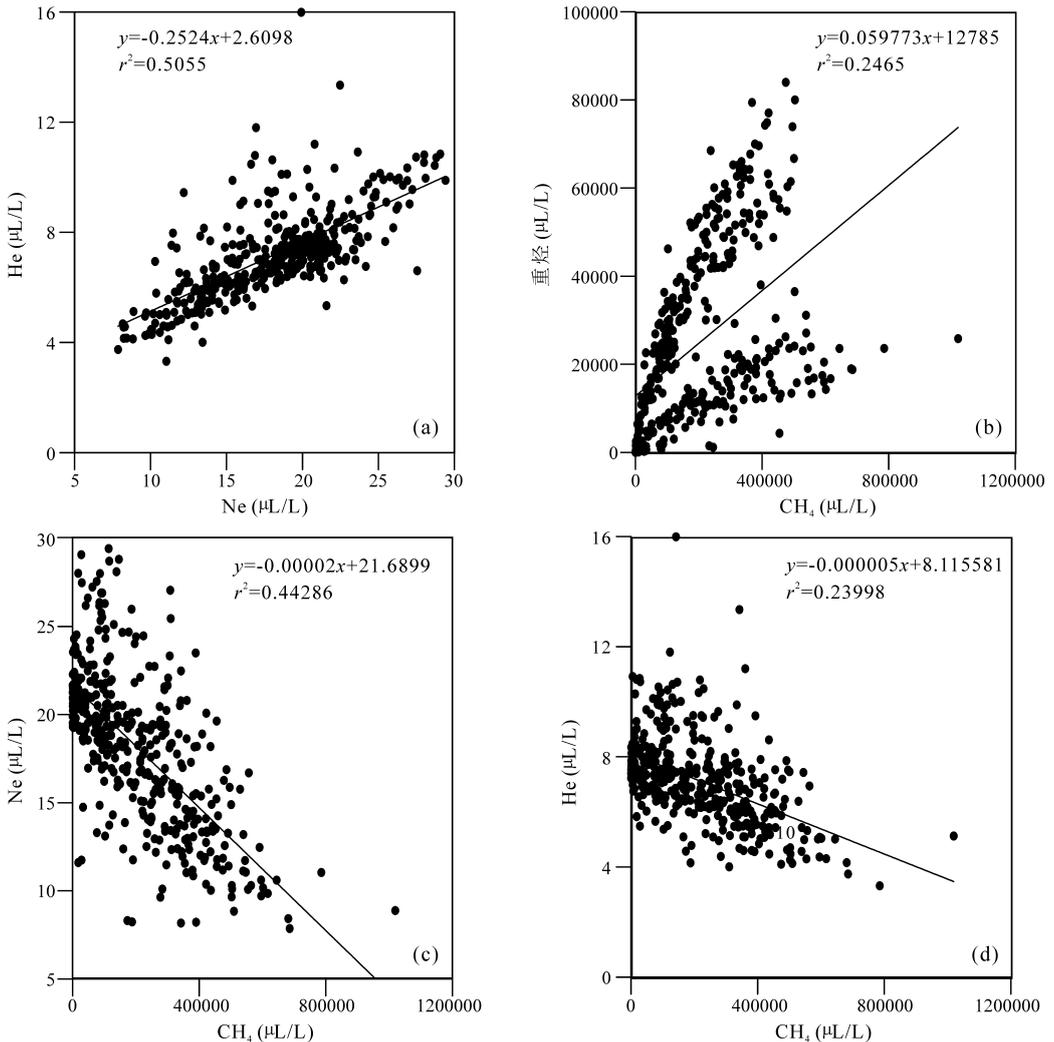


图 7 祁连山聚乎更矿区 DK-3 井顶空气体类和惰性气体相关图

Fig. 7 Correlation between Inert gas and hydrocarbon in the headspace gas of well DK-3 in Juhugeng in the Qilian Mountain

(a)—He 与 Ne 相关图；(b)—甲烷与重烃相关图；(c)—Ne 与 CH<sub>4</sub> 相关图；(d)—He 与 CH<sub>4</sub> 相关图

(a)—Correlation between He and Ne; (b)—correlation between heavy hydrocarbon and CH<sub>4</sub>; (c)—correlation between Ne and CH<sub>4</sub>; (d)—correlation between He and CH<sub>4</sub>

质稳定,不受微生物氧化作用的影响;③烃类的渗漏引起地表沉积物中碳酸盐含量的增加,油气藏上方大多分布微量元素异常(铁、铜、锰、钙等)<sup>⑥</sup>,这些微量元素是惰性气体的淬灭剂(Pinti and Marty, 1995),这可能是甲烷与惰性气体呈负相关的主要原因。

### 5.3 惰性气体地气迁移机理

惰性气体分子半径小, He 的分子直径为 2.28Å, Ne 的分子直径为 2.97Å (Sloan et al., 2008), 化学性质稳定, 不受近地表微生物影响。在冻土带水合物矿藏上方呈现前缘晕, 在水合物矿藏上方土壤中形成顶部异常。钻孔中顶空气 He 和 Ne 与甲烷呈现负相关关系, He 和 Ne 异常的形成与甲烷存在机理上的差异。关于 He 异常形成一些学者提出了断层和裂隙迁移机制 (Duddridge et al., 1991; Zhiguan et al., 1991; Klusman et al., 1993; Lombardi et al., 1996; Ciotoli et al., 1999, 2004), 主要依据是异常与断裂系统的关系。但是这种机理难以解释天然气水合物矿藏的惰性气体异常。本文提出了冻土区水合物矿藏惰性气体地气迁移的机理: ①惰性气体由于半径小可以进入水合物笼状结构中, 是冻土区水合物矿藏的微量组分; ②深部上来的地气流很容易携带惰性气穿过上覆岩石和冻土层, 在水合物矿藏上方形成稳定的岩石和土壤地球化学异常; ③控制惰性气体迁移的主要因素是水合物矿藏规模、深部地气流强度、地温梯度和惰性气体活动性。

## 6 结论

(1) 实验表明, 顶空气 He 和 Ne 在祁连山冻土区三露天天然气水合物矿藏预测水合物钻井的成功率为 91%, He、Ne 异常可以排除地表沼泽地微生物、煤层气的干扰, 与天然气水合物吻合关系很好, 是一种天然气水合物勘查的有效补充技术, 与烃类异常、冻土和控矿断裂进行综合解释, 可以提高天然气水合物勘探的成功率, 值得推广使用。

(2) 惰性气体的地气迁移机理比较复杂, 地气迁移是水合物矿藏惰性气体的微渗漏机制, 控制惰性气体迁移的主要因素是水合物矿藏规模、深部地气流强度和惰性气体活动性, 惰性气体能有效圈定、预测天然气水合物有利地区。

**致谢:**衷心感谢中国地质调查局青藏高原天然气水合物木里野外科学观测研究站提供的野外工作便利, 感谢中国地质调查局油气资源调查中心祝有

海研究员、卢振权研究员、王平康博士、庞守吉博士、张帅博士, 吉林大学李冰博士等提供的大力帮助, 分析测试数据由中石化李广之研究员完成, 均深表感谢。

### 注 释

- ① 文怀军, 邵龙义, 张永红. 2006. 青海省天峻县木里煤田聚乎更矿区构造轮廓和地层格架成果报告. 青海煤炭地质 105 队.
- ② 孙忠军, 方慧, 刘建勋. 2017. 中纬度冻土区天然气水合物物化勘探技术成果报告. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所.
- ③ 方慧, 裴发根, 徐明才. 2016. 陆域天然气水合物勘查技术研究与集成成果报告. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所.

### References

- Cao Daiyong, Liu Tianji, Wang Dan, Wang Tong, Wen Huaijun, Pan Yuelu. 2009. Analysis of formation condition of natural gas hydrate in Muli coalfield, Qinghai Province. *Coal Geology of China*, 21(9): 3~6 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Qiuming, Agterberg F P, Ballantyne S B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109~130.
- Cheng Qiuming. 1999. Multifractality and spatial statistics. *Computers & Geosciences*, 25(9): 949~961.
- Ciotoli G, Etiope G, Guerra M, Lombardi S. 1999. The detection of concealed faults in the Ofanto basin using the correlation between soil-gas fracture surveys. *Tectonophysics*, 301(3-4): 321~332.
- Ciotoli G, Lombardi S, Morandi S, Zarlenga F. 2004. A multidisciplinary, statistical approach to study the relationships between helium leakage and neotectonic activity in a gas province: The Vasto basin, Abruzzo-Molise (central Italy). *The American Association of Petroleum Geologists*, 88: 355~372.
- Collett T S, Ehligio-Economides C A. 1983. Detection and evaluation of the in-situ natural gas hydrates in the North Slope Regn, Alaska. *Society of Petroleum Engineers California Regional Meeting*, spe 11673.
- Cong Xiaorong, Su Ming, Wu Nengyou, Qiao Shaohua, Sha Zhibin, Lu Hailong, Su Pibo. 2018. Contribution of thermogenic gases to hydrate accumulation under the marine hydrocarbon-rich depression setting. *Acta Geologica Sinica*, 92(1): 170~183 (in Chinese with English abstract).
- Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, Boswell R. 2009. Natural gas hydrates: a review. natural gas hydrates-energy resource potential and associated geologic hazards. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 89: 274~297.
- Collett T S. 2010. Permafrost-associated gas hydrate accumulations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 715(1): 247~269.
- Collett T S, Lee M W, Agena W F, Miller J J, Lewis K A, Zyrianova M Y, Boswell R. 2011. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 279~294.
- Craig H, Lupton J E. 1978. Helium isotope variations. *Trans. Am. Geophys. Union*, 59: 1194.
- Craig H, Lupton J E, Primordial N. 1976. Primordial neon, helium, and hydrogen in oceanic basalts. *Earth & Planetary Science Letters*, 31(3): 369~385.
- Dallimore S R. 1999. Regional gas hydrate occurrences, permafrost conditions, and Cenozoic geology, Mackenzie Delta area.

- Bulletin of the Geological Survey of Canada, 544: 31~43.
- Dallimore S R, Collett T S. 2005. Summary and implications of the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program. In: Dallimore S R, Collett T S, eds. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin 585: 1~36.
- Duddridge G A, Grainger P, Durrance E M. 1991. Fault detection using soil gas geochemistry. *Quaternary Journal of Engineering Geology*, 24: 427~435.
- Elliot T, Ballentine C J, O'Nions R K, Ricciuto T. 1993. Carbon, helium, neon and argon isotopes in a Po basin natural gas field. *Chemical Geology*, 106: 429~440.
- Fang Hui, Xu Mingcai, Lin Zhenzhou, Zhong Qing, Bai Dawei, Liu Jianxun, Pei Fagen, He Meixing. 2017. Geophysical characteristics of gas hydrate in the Muli area, Qinghai Province. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 37: 539~550.
- Fang Zhong. 1996. A new direction in the study of isotope geology in China: Progress in isotope geochemistry of noble gas in minerals and rocks. *Geological Review*, 42(4): 329~333 (in Chinese with English abstract).
- Fu Junhui, Zhou Lifa. 1998. Carboniferous-Jurassic stratigraphic provinces of the southern Qilian basin and their petro-geological features. *Northwest Geoscience*, 19(2): 47~54.
- Fu Piaoer, Cao Jun, Liu Jiyong, Wang Yanmei, Zhang Xin, Cheng Sihai. 2016. Tracing the gas hydrate reservoirs in the northern South China Sea by iodine concentrations in pore waters from marine sediments. *Geological Review*, 62(5): 1344~1351 (in Chinese with English abstract).
- Ginsburg G D, Soloviev V A, Cranston R E, Lorenson T D, Kvenvolden K A. 1993. Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea. *Geo-Marine Letters*, 13: 41~48.
- Han Jianguang, Yu Changqing, Zhang Xiaobo, Gu Binglao, Wang Yan, Chen Peng. 2016. Multiwave seismic numerical simulation study on terrestrial gas hydrate in permafrost area. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2502~2512 (in Chinese with English abstract).
- Holland P W, Emerson D E. 1990. The global helium-4 content of near-surface atmospheric air, in geochemistry of gaseous elements and compounds. Athens, Theophrastus Publications SA, 15: 97~113.
- Huang Xia, Zhu Youhai, Wang Pingkang, Guo Xingwang. 2011. Hydrocarbon gas composition and origin of core gas from the gas hydrate reservoir in Qilian permafrost. *Geological Bulletin of China*, 30(12): 1851~1856 (in Chinese with English abstract).
- Klusman R W. 1993. Soil gas and related methods for natural resource exploration. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 1~483.
- Li Song, Liu Chen, Rao Zhu, Tong Bailing, Deng Jian, Yang Feng. 2017. Establishment of gas rapid monitoring system and its application in well MK-2 for scientific drilling and exploration of gas hydrates in Mohe permafrost, China. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2131~2138 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Mao Jingwen, Wang Yitian, Wang Denghong. 2003. Evidence of noble gas isotopes and halogens for the origin of ore-forming fluids. *Geological Review*, 49(5): 513~521 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhenquan, Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Li Yonghong, Liu Changling. 2011. Gas hydrate occurrences in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai Province, China. *Cold Regions Science & Technology*, 66(2-3): 93~104.
- Lu Zhenquan, Tang Shiqi, Wang Weichao, Tan Panpan, Li Qinghai, Liu Wenjin, Liu Changling, Li Yonghong. 2015. Study on the nature of the gas source for permafrost associated gas hydrate in Sanlutian of Muli, Qinghai. *Geoscience*, 29: 995~1001 (in Chinese with English abstract).
- Mamyrin B A, Tolstikhin I N. 1984. Helium Isotopes in Nature. Amsterdam: Elsevier, 1~173.
- Makogon Yuri F, Holditch S A, Makogon T Y. 2007. Natural gas hydrates-A potential energy source for the 21st Century. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56: 14~31.
- Niu Zhixin, Geng Qingming, Dou Lu. 2015. Palaeogeographic analysis of Muli coalfield Juhugeng coalmine area in Qinghai Province. *Geological Review*, 61(s1): 158~159 (in Chinese).
- Ozima M, Podosek F A. 1983. Noble Gas Geochemistry. Cambridge, London, New York: Cambridge University Press.
- Pinti D L, Marty B. 1995. Noble gases in crude oils from the Paris basin, France: Implication of the origin of fluids and constraints on oil-water-gas interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3389~3404.
- Prasolov E M, Tokarev I V, Ginsburg G D. 1999. Helium and other noble gases in gas-hydrate sediments of the Hakon Mosby Mud Volcano. *Geo-Marine Letter*, 19: 84~88.
- Riedel M, Bellefleur G, Mair S. 2009. Acoustic impedance inversion and seismic reflection continuity analysis for delineating gas hydrate resources near the Mallik research sites, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geophysics*, 74(5): 125~137.
- Roberts A A. 1981. Helium emanometry in exploring for hydrocarbons: Part II. In: Ottlieb B M, ed. *Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas*, II. Dallas: Southern Methodist University Press, 135~149.
- Schmitt D R, Welz M, Rokosh C D. 2005. High-resolution seismic imaging over thick permafrost at the 2002 Mallik drill site. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 585: 1~13.
- Sloan E D, Koh C A. 2008. Clathrate Hydrate of Natural Gases, third ed. New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, Publishers, 554~555.
- Shen Ping, Xu Yongchang, Liu Wenhui, Tao Mingxin. 1995. Applied models of rare gas geochemistry in the research of natural gases. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(2): 48~58 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaoming, Xue Ting, He Taowen, Ye Xianren, Zhang Mei, Lu Hongfeng, Wang Shengwei. 2006. Noble gases isotopic compositions and sources of cobalt-rich crusts from west Pacific Ocean seamounts. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2331~2340 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhongjun, Yang Zhibin, Meihai, Mei Hai, Qin Aihua, Zhang Fugui, Zhou Yalong, Zhang Shunyao, Mei Bowen. 2014a. Geochemical characteristics of the shallow soil above the Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of the Qilian Mountains, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 139: 160~169.
- Sun Zhongjun, Yang Zhibin, Qin Aihua, Zhang Fugui, Zhou Yalong. 2014b. Geochemical exploration technology of natural gas hydrate in middle-latitudes permafrost zone. *Journal of Jinlin University: Earth Science Edition*, 44(4): 1063~1070 (in Chinese with English abstract).
- Tan Furong, Liu Shiming, Cui Weixiong, Wan Yuqing, Yang Chuang, Zhang Guangchao, Liu Weigang, Du Fangpeng, Fan Yuhai. 2017. Origin of gas hydrate in the Juhugeng mining area of Muli coalfield. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1158~1167 (in Chinese with English abstract).
- Tang Huayun, Zheng Jianping. 2004. Significance of noble gas study in deep process research. *Global Geology*, 23(1): 20~27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pingkang, Zhu Youhai, Lu Zhenquan, Guo Xingwang, Huang Xia. 2011. Gas hydrate in the Qilian Mountain permafrost and its distribution characteristics. *Geological Bulletin of China*, 30(12): 1839~1850 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Yu Jinjie, Yang Jianmin, Yan Shenghao, Xue Chunji, Chen Yuchuan. 2002. Inert gas isotopic studies and dynamic background of Cenozoic ore-forming process in China. *Mineral Deposits*, 21(2): 179~186 (in Chinese with English abstract).

abstract).

Wang Peng, Shen Zhongmin, Liu Sibing, Lv Zhengxiang, Wang Lewen. 2014. Geochemical characteristics of nonhydrocarbon in natural gas in west Sichuan depression and its implications. *Natural Gas Geoscience*, 25(3): 394~401 (in Chinese with English abstract).

Wang Tong, Liu Tianji, Shao Longyi, Cao Daiyong, Guo Jinning, Liu Yifen, Wen Huaijun, Wang Dan. 2009. Characteristics and origins of the gas hydrates in the Muli coalfield of Qinghai. *Coal Geology and Exploration*, 37(6): 26~30 (in Chinese with English abstract).

Xie Qifeng, Zhou Lifa, Cai Yuanfeng, Liu Yu, Liu Zhiwu, Liang Shiwei, Zhang Kai, Zhao Junhui. 2015. Geochemical characteristics of Permian marine source rocks and its constraints of the provenance and paleoenvironment in the South Qilian basin, Qinghai Province. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1288~1301 (in Chinese with English abstract).

Xie Xuejin. 1992. Local and regional surface geochemical exploration for oil and gas. *Journal of Geochemical Exploration*, 42: 25~42.

Xu Yongchang. 1996. The mantle noble gas of natural gases. *Earth Science Frontiers*, 3(3): 63~71 (in Chinese with English abstract).

Xu Yongchang, Liu Wenhui, Shen Ping, Tao Mingxin, Zheng Jianjing. 2003. An important branch of gas geochemistry-noble gas geochemistry. *Natural Gas Geoscience*, 14(3): 157~165 (in Chinese with English abstract).

Yang Zhibin, Sun Zhongjun, Li Guangzhi, Zhang Fugui, Qin Aihua, Zhou Haitao, Deng Yanlong. 2011. Near-surface soil geochemistry of Muli natural gas hydrate area, Tianjun County, Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 30(12): 1883~1890 (in Chinese with English abstract).

Zhang Fugui, Tang Ruiling, Yang Zhibin, Sun Zhongjun, Zhou Yalong, Zhang Shunyao. 2013. Experimental research on geochemical methods for prospecting gas hydrates in permafrost area. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 37(6): 1043~1047 (in Chinese with English abstract).

Zhang Fugui, Zhang Shunyao, Tang Ruiling, Wang Huiyan, Yang Zhibin, Zhou Yalong, Sun Zhongjun. 2017. Methane emission of active layer in Qinghai-Tibet wetland permafrost area. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 41(6): 1027~1036 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jiazheng, Zhu Youhai, Huang Xia, Wang Mingjun, Zhao Guangzhen, Wang Pingkang, Zhang Shuai, Pang Shouji. 2017. Characterization and evaluation on the source rock of gas hydrate in Muli permafrost area, Nanqilian basin. *Geological Bulletin of China*, 36(4): 634~643 (in Chinese with English abstract).

Zhiguan S. 1991. A study on the origin of fault gases in western Yunnan. *Earthquake Researches in China*, 5: 45~52.

Zhu Yuenian. 1994. Developments in geochemistry of non-hydrocarbon constituents of natural gas. *Advance in Earth Sciences*, 9(4): 50~57 (in Chinese with English abstract).

Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, Cheng Guodong, Li Shude. 2000. *China's Permafrost*. Beijing: Science Press, 329~353 (in Chinese with English abstract).

Zhu Youhai, Lu Zhenquan, Xie Xilin. 2011. Potential distribution of gas hydrate in the Qinghai-Tibetan plateau. *Geological Bulletin of China*, 30(12): 1918~1926 (in Chinese with English abstract).

Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Jia Zhiyao, Li Yonghong, Li Qinghai, Liu Changling, Wang Pingkang, Guo Xingwang. 2009. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1762~1771 (in Chinese with English abstract).

Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, Zhang Guosheng, Hou Lianhua, Wu Songtao, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Dong Dazhong, Wang Yuman, Wang Lan, Huang Jinliang, Wang

Shufang. 2015. Progress in China's unconventional oil and gas exploration and development and theoretical technologies. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 979~1007 (in Chinese with English abstract).

## 参 考 文 献

曹代勇, 刘天绩, 王丹, 王佟, 文怀军, 潘语录. 2009. 青海木里地区天然气水合物形成条件分析. *中国煤炭地质*, 21(9): 3~6.

成秋明. 2001. 多重分形与地质统计学方法用于勘查地球化学异常空间结构和奇异性分析. *地球科学—中国地质大学学报*, 26(2): 55~60.

丛晓荣, 苏明, 吴能友, 乔少华, 沙志彬, 卢海龙, 苏丕波. 2018. 富生烃凹陷背景下热成因气对水合物成藏的贡献探讨. *地质学报*, 92(1): 170~183.

符俊辉, 周立发. 1998. 南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征. *西北地质科学*, 19(2): 47~54.

傅飘儿, 曹璐, 刘纪勇, 王彦美, 张欣, 程思海. 2016. 南海北部孔隙水碘与天然气水合物成藏关系研究. *地质论评*, 62(5): 1344~1351.

方中. 1996. 开拓我国同位素地质研究新方向: 评矿物岩石惰性气体同位素地球化学进展. *地质论评*, 42(4): 329~333.

韩建光, 于常青, 张晓波, 谷丙洛, 王赟, 陈鹏. 2016. 陆域冻土区天然气水合物多波地震数值模拟研究. *地质学报*, 90(9): 2502~2512.

黄霞, 祝有海, 王平康, 郭星旺. 2011. 祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组成的特征和成因. *地质通报*, 30(12): 1851~1856.

李长江, 麻士华. 1999. 矿产勘查中的分形、混沌与 ANN. 北京: 地质出版社.

李松, 刘晨, 饶竹, 赵省民, 佟柏龄, 邓坚, 杨峰. 2017. 气体快速监测系统的组建及其在漠河冻土区天然气水合物钻探工程 MK-2 孔中的应用. *地质学报*, 91(9): 2131~2138.

李晓峰, 毛景文, 王义天, 王登红. 2003. 惰性气体同位素和卤素示踪成矿流体来源. *地质论评*, 49(5): 513~521.

牛志新, 耿庆明, 窦路. 2015. 青海省木里煤田聚乎更矿区古地理岩相分析. *地质论评*, 61(z1): 158~159.

沈平, 徐永昌, 刘文汇, 陶明信. 1995. 天然气研究中的稀有气体地球化学应用模式. *沉积学报*, 13(2): 48~58.

申维. 2002. 分形混沌与矿产预测. 北京: 地质出版社.

孙晓明, 薛婷, 何高文, 叶先仁, 张美, 陆红锋, 王生伟. 2006. 西太平洋海底海山富钴结壳惰性气体同位素组成及其来源. *岩石学报*, 22(9): 2331~2340.

孙忠军, 杨志斌, 秦爱华, 张富贵, 周亚龙. 2014. 中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(4): 1063~1070.

谭富荣, 刘世明, 崔伟雄, 万余庆, 杨创, 张光超, 刘伟刚, 杜芳鹏, 范玉海. 2017. 木里煤田聚乎更矿区天然气水合物气源探讨. *地质学报*, 91(5): 1158~1167.

汤华云, 郑建平. 2004. 稀有气体在深部地质研究中的意义. *世界地质*, 23(1): 20~27.

王登红, 余金杰, 杨建民, 闫升好, 薛春纪, 陈毓川. 2002. 中国新生代成矿作用的惰性气体同位素研究与动力学背景. *矿床地质*, 21(2): 179~186.

王平康, 祝有海, 卢振权, 郭星旺, 黄霞. 2011. 祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征. *地质通报*, 30(12): 1839~1850.

王鹏, 沈忠民, 刘四兵, 吕正祥, 王乐闻. 2014. 川西坳陷天然气中非烃气地球化学特征及应用. *天然气地球科学*, 25(3): 394~401.

王佟, 刘天绩, 邵龙义, 曹代勇, 郭晋宁, 刘益芬, 文怀军, 王丹. 2009. 青海木里煤田天然气水合物特征与成因. *煤田地质与勘探*, 37(6): 26~30.

谢其锋, 周立发, 蔡元峰, 刘羽, 刘志武, 梁士伟, 张凯, 赵俊辉. 2015. 南祁连盆地二叠系海相烃源岩地球化学特征及其对物源属性和古环境的约束. *地质学报*, 89(7): 1288~1301.

徐永昌. 1996. 天然气中的幔源稀有气体. *地学前缘*, 3(3): 63~71.

徐永昌, 刘文汇, 沈平, 陶明信, 郑建京. 2003. 天然气地球化学的重

- 要分支——稀有气体地球化学. 天然气地球科学, 14(3):157~165.
- 杨志斌, 孙忠军, 李广之, 张富贵, 秦爱华, 周海涛, 邓艳龙. 2011. 青海省天峻县木里地区天然气水合物发现区浅表地球化学特征. 地质通报, 30(12):1883~1890.
- 张富贵, 唐瑞玲, 杨志斌, 孙忠军, 周亚龙, 张舜尧. 2013. 陆域天然气水合物地球化学勘查技术试验研究. 物探与化探, 37(6):1043~1047.
- 张富贵, 张舜尧, 唐瑞玲, 王惠艳, 杨志斌, 周亚龙, 孙忠军. 2017. 青藏高原湿地冻土区活动层甲烷排放特征. 物探与化探, 41(6):1027~1036.
- 张家政, 祝有海, 黄霞, 王明君, 赵广珍, 王平康, 张帅, 庞守吉. 2017. 祁连盆地木里冻土区天然气水合物烃源岩特征及评价. 地质通报, 36(4):634~643.
- 朱岳年. 1994. 天然气中非烃组分地球化学研究进展. 地球科学进展, 9(4):50~57.
- 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 程国栋, 李树德. 2000. 中国冻土. 北京: 科学出版社.
- 祝有海, 张永勤, 文怀军, 卢振权, 贾志耀, 李永红, 李清海, 刘昌岭, 王平康, 郭星旺. 2009. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物. 地质学报, 83(11):1762~1771.
- 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. 地质通报, 30(12):1918~1926.
- 邹才能, 杨智, 朱如凯, 张国生, 侯连华, 吴松涛, 陶士振, 袁选俊, 董大忠, 王玉满, 王岚, 黄金亮, 王淑芬. 2015. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展. 地质学报, 89(6):979~1007.

## A new tool for natural gas hydrate exploration in permafrost regions: analysis of inert gas helium neon

ZHANG Fugui<sup>1,2)</sup>, TANG Ruiling<sup>\*1)</sup>, ZHOU Yalong<sup>1,2)</sup>, ZHANG Shun Yao,  
SUN Zhongjun<sup>1,2)</sup>, WANG Huiyan<sup>1,2)</sup>

1) Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei, 065000;

2) Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Langfang, Hebei, 065000

\* Corresponding author: tangruiling@igge.cn

### Abstract

The development of geochemical exploration technologies unaffected by marsh microorganisms is one of the important issues to improve the prediction and exploration for natural gas hydrates in mid-latitude permafrost areas. The potential of inert gases as a new tool for the investigation of gas hydrates in permafrost areas using He and Ne test methods was investigated in this paper. The study area with a size of 150 km<sup>2</sup> is located in the alpine-arctic swamp landscape of the Qilian Mountains. The sampling density and depth are 2 points/km<sup>2</sup> and 60 cm, respectively. In total, 300 headspace gas samples and 400 core samples were collected and the chromatographic backflush technique was used to analyze the inert gases (helium and neon) in the headspace gas samples. Combined with the comprehensive interpretation of geological and geochemical exploration, our study indicates that the anomalies of inert gases have close relationship to natural gas hydrate reservoir, and are within the range of hydrocarbon anomalous concentration, suggesting an atop anomalous mode. Ten of the 11 gas hydrate wells discovered in the experimental area of Juhugeng are located within the anomalous area of He and Ne; only one well is outside of the anomalous area. This study analyzed the vertical distribution pattern of light hydrocarbon, helium, and neon in the headspace gas of hydrate drilling. We propose a geogas migration mechanism of inert gases in the soil above the natural gas hydrate deposits. The He and Ne anomalies near the ground surface of the Muli coalfield in the Qilian Mountains, derived from the deep hydrate deposits and fault structure, are not affected by marsh microorganisms; they are the effective tools for natural gas hydrate exploration in permafrost areas.

**Key words:** inert gas; natural gas hydrate; alpine swamp; permafrost; Qilian Mountain regions

## 《地质学报》(中文版)征稿简则

《地质学报》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物。《地质学报》反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)分别独立刊载论文。

### 一、《地质学报》编辑部与作者约定如下:

1. 作者应保证稿件不一稿两投,并对所投稿件拥有无可争议的著作权。

2. 所有文章均需通过网上办公系统投稿,《地质学报》中文版请投 <http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>;《地质学报》英文版: <http://www.geojournals.cn/dzxben/ch/index.aspx>;《地质论评》: <http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>。

网上投稿,请将文、图、表放入同一个 Microsoft Word 文件中(请作者自留原始文件,以备修改,详细投稿办法见网站说明)。投稿被接收与否以编辑部网上收妥回信为准。

3. 不得将投向本编辑部的稿件同时投至其他刊物,否则视为一稿两投。

4. 编辑部承诺一般在 90 日内给出刊用与否的通知。作者在 90 日内,不应将稿件另投他刊。

5. 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交论文 Word 文档、清绘好的 CorelDRAW 图件。

6. 稿件文责自负,若做实质性修改,须征得作者同意。

7. 稿件刊出后,将按规定支付稿酬。

### 二、对投稿内容的要求:

每篇文章需包含下列要素:文章题目(不多于 25 个汉字)、作者、作者单位、内容提要(不少于 400 个汉字)、关键词(5 个左右)、引言(本刊不标“引言”字样,但必须有引言节)、正文、图表、致谢、参考文献、注释、英文摘要(同中文摘要)、作者简介。重要内容说明如下:

1. **正文:**长度不限。应有地质背景、研究方法、研究结果、讨论、结论等几部分。

投向《地质学报》(英文版)的稿件,行文必须规范、通顺,请附相应的中文稿,以备准确理解原文含意。

2. **图件:**① 凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上。② 图件请用 CorelDraw X4 版本格式最好(且不是导入的)。若为其他软件编成的图件,需提供 600 dpi 的 TIF 格式的文件。彩色照片(包括图版)需提供 600 dpi 以上的 JPG 格式文件。③ 图件大小:排半栏时:图宽不超过 80mm,最高

245mm;排通栏:图宽不超过 168mm,最高 245mm;整版卧排:图宽不超过 235mm,最高 170mm(以上高度均含中英文图名和说明)。中文字体请用宋体,英文和数字请用 Time New Roman,字号为 6~8p 大小。④ 图件不同区域可用通用地质花纹(或符号)区分,除照片外,一般不用灰度图。若必须用灰度图表示不同区域时,灰阶应尽量少,阶差应尽量地大。⑤ 图件若为彩色照片者,可选择集中制成图件。⑥ 图名、图说明、图例注释都应有相应的英文说明。

3. **参考文献:**本刊采用著者-年制,正文中用圆括号列出第一作者和年代,均用英文名或华人西文名,例:“(Li Siguang, 1945)”、“(Huang Jiqing, 1978, 1984; Huang Jiqing et al., 1983; Смирнов, 1986; Smith et al., 1990, 1992, 1996; Иванов и др., 1999)”,“Song Biao et al. (2002)指出采样方法……”(同时列出多篇文献时,次序按年代先后)。

中文文献均需提供英译,所有英文文献均放在“References”标题之下。英文文献按“第一作者字母序十年代”排列,其后其他文种放在“参考文献标题之下,按中文、日文、西文、俄文、其他文排列。中文文献按“第一作者姓名汉语拼音字母十年代”先后排列。其他文均按各自第一作者姓名字母顺序排列。若是投《地质学报(英文版)》无须考虑上述情况。

文章请列出全部作者。但专著可按原书封面样式给出,其中的论文写“见:XXX 主编。”项时,指明主编一人即可(“见:XXX 等主编。”)。每一条文献的列出格式请参照我刊 2016 年以来的文章。书籍的引用,分两种情况:a、书籍本身有相应英文名的,引用按正常要求;b、书籍本身没有相应英文名的,尽量不引用此文献,若必须引用,则仅在中文参考文献中列出,正文中的出现用中文引用。

4. **注释:**引用非公开出版物时在文后单列注释一栏,格式与参考文献相同。参考文献及注释详细格式可见《地质学报》修改注意事项。

5. **英文摘要:**在《地质学报》中文版和《地质论评》上发表的论文必须提交英文摘要,包括题名、作者、作者单位、内容提要和关键词。作者和作者单位均应为全名,内容提要要与相应中文提要一致,最好更为详细。

6. **作者简介:**主要介绍作者的学术经历,自 1998 年起增加了电话、电子信箱、传真等,便于读者与作者直接联系。