

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.39

袁永真,裴发根,张鹏辉,等.利用模糊统计法进行天然气水合物靶区预测——以青海木里地区为例[J].物探与化探,2017,41(6):1281-1286.

http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.39

Yuan Y Z, Pei F G, Zhang P H, et al. Fuzzy statistic method used to prediction of gas hydrate target area: A case study of Muli area in Qinghai Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1281-1286. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.39

利用模糊统计法进行天然气水合物靶区预测 ——以青海木里地区为例

袁永真^{1,2,3},裴发根^{1,2,3},张鹏辉^{1,2,3},张小博^{1,2,3}

(1.国土资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室,河北廊坊 065000;2.国家现代地质勘查技术研究中心,河北廊坊 065000;3.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)

摘要:运用模糊统计法,以木里地区的物化探资料为例,对木里地区的天然气水合物资源分布情况进行预测,结果表明,应用这种方法进行水合物预测是可行的,预测区域与已知钻遇到水合物的钻孔有很好的对应,且圈定了6个水合物有利区,这不仅对物化探方法技术优选、异常特征分析和评价指标确立等工作具有指导意义,而且对加速推进我国陆域冻土区天然气水合物资源勘查与潜力评价工作具有十分重要的意义。

关键词:模糊数学;隶属函数;水合物预测;青海木里

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-1281-06

0 前言

天然气水合物是在低温高压条件下由水和天然气形成的结晶物,是国际公认的最具商业开发前景的新型清洁能源,被视为21世纪煤、石油、天然气的潜在替代能源,其全球潜在资源量是已知煤、石油和天然气等化石燃料资源量总和的2倍。因此调查天然气水合物具有极为重要的能源意义。我国的天然气水合物调查技术目前尚不成熟,尤其是陆域冻土区的天然气水合物调查仍处于探索阶段,那么调查水合物资源分布情况,天然气水合物的预测工作显得尤为重要。

天然气水合物的预测方法,国内外有很少的文献记载,目前在天然气水合物成矿预测系统方面,广州海洋局已成功开发了一套海域的天然气水合物资源评价系统。但近几年的研究表明,陆域天然气水合物与海域天然气水合物有着不同的识别标志,这

套海域天然气水合物预测理论在陆域并不适用,需建立一套适合陆域天然气水合物的靶区预测技术。目前陆域水合物预测还处在不同勘探方法人为的简单叠加阶段,费时、费力,有必要引进计算机进行智能预测。矿产预测按照发展的前后顺序出现了几种预测方法,代表性的有:①矿产资源定量评价方法,适用范围:有大量、完善的基础数据,同时也要求预测人员有较高的技术水平;②“三步式”矿产资源评价方法已成为较完善的矿产资源评价体系,是根据不同矿床类型分别进行预测,但是地质上常会出现同一地质环境多种成矿类型共生的现象,据此圈定的不同类型、不同矿种的可能地段就会出现重复,使预测工作较为复杂;③成矿系列缺位预测法运用矿床的成矿系列和成矿系列缺位概念对矿床进行预测指导地质找矿的一项工作,其优点就是保证不漏矿,但圈定的预测地段范围会很大;④基于GIS的综合信息预测法是一种多元信息(地质、地球物理、地球化学、遥感等多学科)的定量综合方法,具有的多源

收稿日期:2017-09-08

基金项目:中央公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(AS2014J08, AS2014J09);国家127专项项目(GZHL20110324, GZH201400305);中国地质调查局地质调查项目(DD20160224)

作者简介:袁永真(1984-),女,硕士,工程师,主要研究方向为综合地球物理解释。Email:yuanyongzhen@igge.cn

信息融合、高效率等特点。

近几年在青海木里地区天然气水合物调查工作取得了一定的进展,尤其是物化探测量技术、水合物基本物性条件、控矿要素、成藏模式及物化探异常特征研究等方面。这就为天然气水合物预测工作提供了前提,特别是利用物化探资料确定的水合物井位(DK9),取得了不错的效果。也说明了物化探资料确定的井位是可靠的,运用物化探资料进行预测的方法技术是有效的、正确的。

笔者运用模糊统计的方法,利用木里地区的物化探资料,对木里地区的天然气水合物资源分布情况进行预测,这不仅对物化探方法技术优选、异常特征分析和评价指标确立等工作具有指导意义,而且对加速推进我国陆域冻土区天然气水合物资源勘查与潜力评价工作具有十分重要的意义。

1 木里地区地质背景及工作程度

木里地区所属祁连山地处青藏高原东北部,自震旦纪以来,祁连山先后经历了大陆裂谷阶段、洋底扩张及沟弧盆体系阶段、造山阶段等演化阶段^[4-5],形成了现今的地质构造格局。大地构造单元分为北祁连构造带、中祁连陆块和南祁连构造带等3大构造单元。木里坳陷在大地构造上属中祁连断隆带的一部分,具有特殊的区域地质背景和地质演化历史。坳陷总体走向为北西西—南东东向,海拔普遍在4000 m以上,冻土较发育,是陆域中低纬度天然气水合物首次发现的地区。

木里地区先后经历了三叠纪印支运动的抬升、

侏罗纪时期的沉积、晚中生代燕山运动盆地的挤压抬升剥蚀作用,使木里地区不同构造分区间呈现差异性沉积。

古地理分析认为木里地区在志留纪晚期受加里东运动影响,古洋盆封闭并隆升剥蚀,在木里坳陷下古生界形成一套碳酸盐岩和碎屑岩建造;石炭纪时开始下沉形成广阔的浅海陆棚沉积,形成一套海相和海陆交互相沉积建造;二叠系为海盆边缘相紫红色碎屑岩建造;三叠系遍布中祁连地区,中、下三叠统为海相—海陆交互相沉积建造;晚三叠纪末,受印支运动影响,使古特提斯海洋完全封闭,整个祁连山抬升成陆,成为剥蚀区,上三叠统形成一套陆相碎屑岩建造,夹有海相石灰岩薄层;早燕山运动使得祁连山地区局部拉伸,形成一些条带状的山间断陷盆地,并沉积了一套侏罗纪的山间河湖沼泽相含煤碎屑岩建造;白垩纪和第三纪以细粒红色碎屑岩,粘土岩为主;第四系在盆地内分布广泛,以冰水—洪积相和冰川堆积物为主^[6]。

为了探明水合物成藏模式、矿体空间位置及规模、评级水合物资源分布和资源量等工作,在木里地区开展了地球物理、地球化学等勘查方法,获得了大量的宝贵资料(图1)。

经过多年的调查研究认为,木里地区天然气水合物具有埋深浅、冻土层薄、储层致密、气体组分复杂、空间上分布非均质性较强等特征。且多年的综合实验结果提出冻土、气源、断裂构造、稳定的地下水环境是控制水合物成藏的重要因素^[7-8]。木里地区的深部烃源岩层生成的或先期遭受破坏的油气藏逸散的烃类气体沿活动断裂向上运移至浅部或断裂

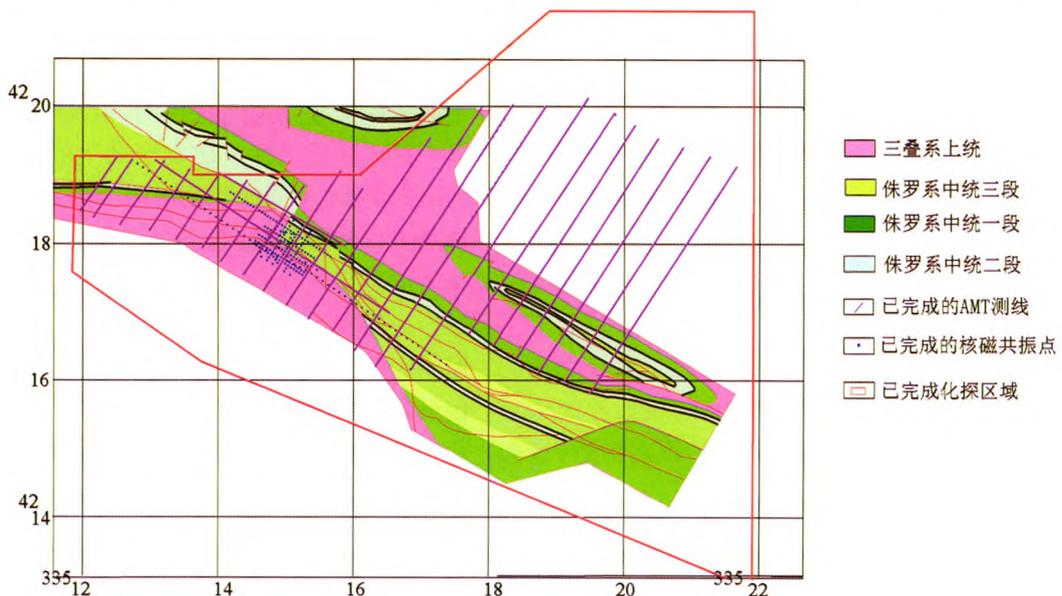


图1 木里地区物化探工作程度示意

破碎带内富集,在冻土层的封闭作用下,和赋存在孔隙或裂隙中的水一起,在合适的温压条件下冻结形成天然气水合物。后期受新构造运动和气候条件变化的影响,天然气水合物的热稳定状态可能遭受破坏分解,气体逸散或形成浅层气藏,或重新聚集形成天然气水合物,近年来在冻土层底部发现的“裂隙型”黄铁矿指示天然气水合物曾发生分解等次生变化^[9]。

2 模糊统计法的原理

在传统的评判体系中,往往采取二值法来对事物的特性进行描述,使用非此即彼的概念。这样的描述方法便于理解和计算,但很难用于描述一些模糊的概念。模糊统计法是基于模糊统计试验确定隶属函数的一种统计方法^[10-14],基本思想是对于一个论域 U ,在 U 中选取一固定元素 u_0 , U 中的一个随机运动的普通集合 A^* ,它联系着一个模糊集合 A^* , A^* 的每一次确定,都是对相应于 A^* 的模糊概念的一个确定划分,每次实验要对 u_0 是否属于 A^* 作一个确切的判断,若在 n 此试验中 u_0 对 A^* 的隶属频率 = ($u_0 \in A^*$ 的次数) / n ,式中 n 为试验的总数,由此可确定 U 中数个固定元素 u 的隶属频率,将其在图中表示出则可得隶属函数曲线大致形状,再根据图线形状,选取恰当的函数表达式,得到隶属函数表达式。常用的函数表达式有矩形、梯形、 k 次抛物线型、 Γ 型、正态、柯西、岭形。而实际数据的分布可能为这几种分布的综合形式。

进行矿产预测首先要进行预测变量选取与分析,分析与矿产有关的化探、物探异常等找矿信息,将这些找矿信息转变为预测变量。正确地确定隶属函数,是运用模糊集合理论解决预测模型的基础,隶属函数实质上反映的是函数的渐变性。

模糊统计法本质是通过拟合原始数据的连续分布函数来表达结果数据的方法,在做预测时,就是通过建立预测变量的分布函数,来表达预测变量与预测结果之间的关系。对于控制水合物成藏的几个因素,冻土、气源、地下水的异常都是连续分布存在的,而不是散点形式存在的,且天然气水合物空间上分布是非均质性的;这几种控制水合物成藏的因素对预测水合物时做出的贡献是不“清晰的”,模糊的。比如冻土厚度与水合物预测之间,假如厚度 100 m,认为是有利于水合物成藏的,那么 90 m 呢?所以采用模糊统计法来解决水合物预测问题。

3 以木里地区为例进行天然气水合物预测

前人工作已经得知影响水合物成藏的几个因素,根据模糊统计学的理论建立成藏要素与水合物预测的定量关系,即隶属函数的建立。

3.1 冻土隶属函数

结合实际情况,冻土厚度越大越有利于水合物形成,即冻土厚度越大隶属函数越大,且冻土达到一定厚度后,隶属函数不再增大。所以冻土厚度隶属函数符合偏大型 Γ 型模糊分布(图 2)。从图中可以看出随着冻土厚度的增加隶属度呈上升趋势,但是冻土厚度达到某一个值后会趋于平稳,不会无限上升。根据隶属函数分布图,建立了冻土的隶属函数。

$$\mu_d(i,j) = \begin{cases} 1 - [\Delta d_r(i,j) - d_{\max}]^2 & 0 \leq \Delta d_r(i,j) < d_{\max} \\ 1 & \Delta d_r(i,j) \geq d_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mu_d(i,j)$ 为冻土厚度的隶属度, $\Delta d_r(i,j)$ 为任一点的冻土厚度值, d_{\max} 为参照点(上升区间内取值最大点)。

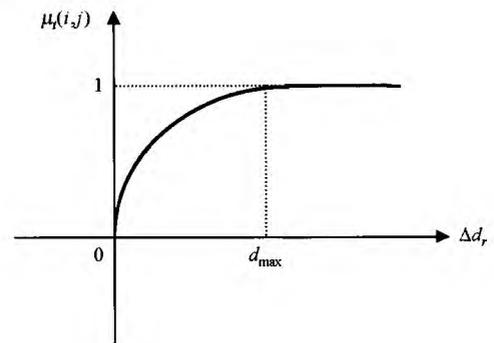


图 2 隶属函数分布

按照公式得到的冻土隶属度 $\mu_d(i,j)$ 分析,其数值越大,所包含水合物可能成藏的信息越大。

3.2 气源隶属函数的建立

木里地区顶空气烃类气体对水合物具有一定的指示作用,气源包括甲烷、重烃^[5],结合实际情况(图 3),气源的隶属函数与冻土隶属函数相似,气源含量越大,水合物越有利于形成。根据同样的方法建立气源的隶属函数:

$$\mu_c(i,j) = \begin{cases} 1 - [\Delta C_r(i,j) - C_{\max}]^2, & 0 \leq \Delta C_r(i,j) < C_{\max} \\ 1, & \Delta C_r(i,j) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mu_c(i,j)$ 为冻土厚度的隶属度, $\Delta C_r(i,j)$ 为任一点的冻土厚度值, C_{\max} 为参照点(上升区间内取值

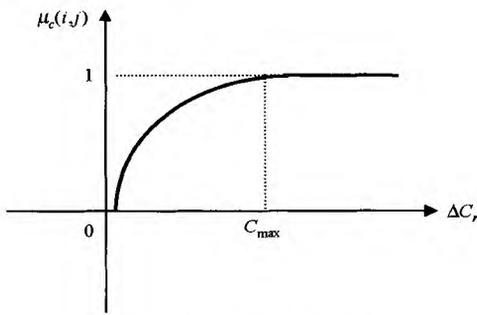


图3 气源隶属函数分布

$$\mu_s(i, j) = \begin{cases} 1 - [\Delta s_r(i, j) - s_{\max 1} / s_{\max 1} - s_{\min}]^2, & 0 \leq \Delta s_r(i, j) < s_{\max 1}; \\ 1, & s_{\max 1} \leq \Delta s_r(i, j) < s_{\max 2}; \\ [(\Delta s_r(i, j) - s_{\max 3}) / s_{\max 3} - s_{\max 2}]^2, & s_{\max 2} \leq \Delta s_r(i, j) < s_{\max 3}; \\ 0, & \Delta s_r(i, j) \geq s_{\max 3} \circ \end{cases} \quad (3)$$

式(3)可分为4段(图4): [0- $s_{\max 1}$]区间随着地下水含量的增加隶属度逐渐增加,隶属度在0~1之间变化,即地下水含量越高越有利于水合物成藏; [$s_{\max 1}$ - $s_{\max 2}$]区间隶属度并不随地下水含量的增加而增加,始终为1; [$s_{\max 2}$ - $s_{\max 3}$]区间地下水含量与隶属度呈负相关关系,即地下水含量越高越不利于水合物成藏; [$s_{\max 3}$ -∞]区间隶属度为0,认为没有水合物成藏的可能性。根据地下水的隶属函数分布得到公式,式中 $\mu_s(i, j)$ 为地下水含量的隶属度, $\Delta s_r(i, j)$ 为任一点的地下水含量值, $s_{\max 1}$ 、 $s_{\max 2}$ 、 $s_{\max 3}$ 为参照点,按照公式得到的隶属度 $\mu_s(i, j)$ 分析,其数值越大,所包含可能水合物成藏的信息越大。

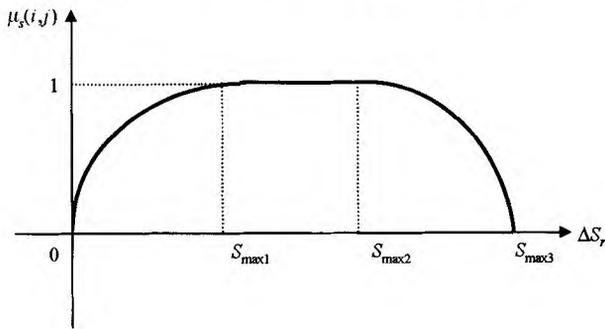


图4 隶属函数分布

根据建立各要素的隶属函数,得到控矿要素的隶属度图(图5),图中隶属度数值越高越有利于水合物形成,钻遇水合物的机会越大。从图中可以看出各要素与水合物成藏的关系,图5a显示,大部分已知钻遇水合物的钻孔位于高值区域内,也说明了

最大点)。按照式(2)得到的冻土隶属度 $\mu_c(i, j)$ 分析,其数值越大,所包含水合物成藏的信息越大。

3.3 地下水隶属函数的建立

通过多年来在木里地区的试验勘查工作,发现地下水也是影响水合物成藏的重要因素,且地下水含量与水合物成藏之间的关系较为复杂,含量过高,过低均不利于水合物成藏,当含量达到一定范围时,认为是有利于水合物成藏的,因此建立地下水环境的隶属函数:

冻土厚度是水合物成藏的控制因素。整个区域有3个高值区,东部2个,西部1个;从图5b、5c看出,钻遇到水合物的钻孔均位于气源隶属函数的高值区,而没有钻遇到水合物的钻孔均位于低值区,进一步说明了气源是水合物成藏不可缺少的控制因素;由于核磁共振的测线较少所能控制的面积有限,因此从图5d可知,研究内没有测线的高值区是不真实的,只有在有测线控制的位置才是真实的,才能真实反映地下水对水合物成藏的控制作用。从图中看出,钻遇到水合物的钻孔大部分落在高值区内,个别钻孔除外。

综合考虑冻土、气源、地下水的因素,得到木里地区的水合物预测图(图6),整个研究区水合物有利区分为6个区域,分为东西两部分,已知钻遇到水合物的钻孔大部分位于Ⅲ号区域内,Ⅰ号区域的冻土厚度较厚,气源较充足,但是地下水的信息有限;Ⅱ号区域冻土厚度较厚,气源较充足,缺少地下水的信息;Ⅲ号区域冻土厚度、气源、地下水信息最全,该区域预测结果最可靠;Ⅳ号区域冻土条件较好,气源条件较好,缺少地下水信息;Ⅴ号区域冻土条件较好,气源条件充足,缺少地下水信息;Ⅵ号区域冻土、气源条件较好,缺少地下水信息。综上所述,这六个水合物有利区Ⅲ号区域为一级靶区(冻土、气源、地下水条件均较好),Ⅰ、Ⅱ号区域为二级靶区(冻土、气源条件好,地下水条件信息缺少);Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ号区域为三级靶区(冻土、气源条件较好,地下水条件信息缺少)。

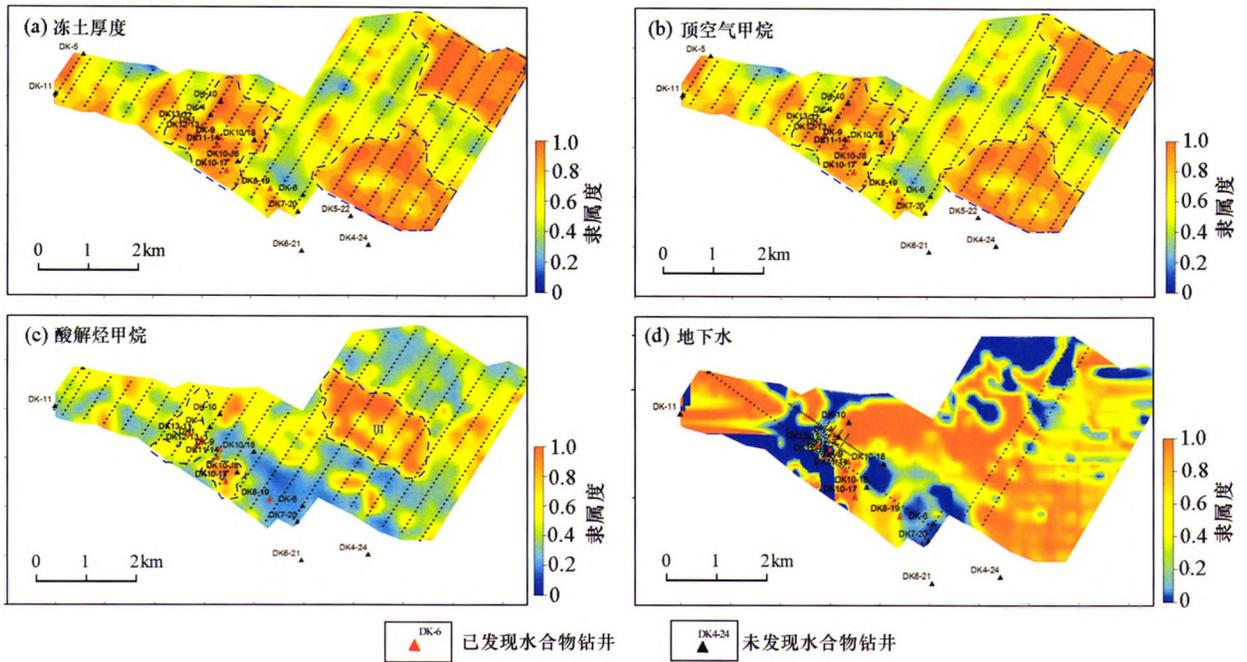


图 5 每种预测变量的隶属度分布

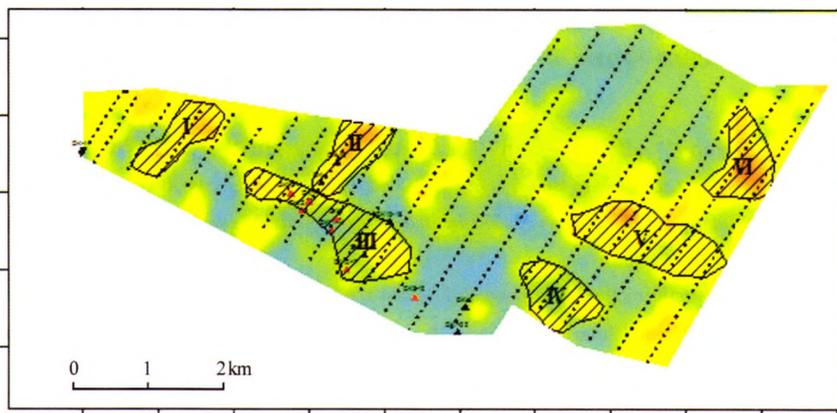


图 6 木里地区水合物靶区预测

4 讨论

从综合预测图(图 6)上看,已知钻遇到水合物的钻井均位于综合预测图较高值的区域,这也进一步说明了这几种控矿要素对水合物预测发挥作用的程度,且利用物化探方法预测水合物是可行的;但是也有些并未钻井水合物的钻井位于高值区域,这说明可能还存在其他的控矿要素对水合物成藏起着不可或缺的作用,也有可能是预测变量的值选取不合适,具体原因还有待进一步查证。

研究区内未钻遇到水合物的钻孔,DK11、10-18、10-16、6、7-20,气体发育不好,含量较低,不足以形成天然气水合物;而 DK-10 井,冻土、气源、地下水均显示良好的成藏条件,但是并未钻遇到水合物,尤

其是 DK-10 井,该井钻至 50 余米由于高压气体原因而终钻,这并不代表该区域不存在天然气水合物。DK-4 井显示水合物成藏条件较好,但是并未钻遇到水合物,其附近有一条北倾的断裂,该断裂封闭性较差,下部能量沿断裂向上运移、交换,天然气水合物热稳定状态遭到破坏分解。所以控制水合物成藏的因素是缺一不可。

5 结论

- 1) 应用模糊统计法对物化探资料进行水合物靶区预测是可行的。
- 2) 木里地区天然气水合物预测结果与已知钻遇水合物的钻孔有很好的对应,已知钻遇水合物的钻孔均位于预测区域内。研究区存在六个水合物成

藏有利区,其中Ⅲ号区域已经有钻孔验证,其余几个区域有待验证。

3) 从控制水合物成藏因素的角度分析了未钻遇水合物的钻孔的原因。分析认为控制水合物成藏的几个因素是缺一不可的。

参考文献:

- [1] 侯翠霞,刘向冲,张文斌,等.成矿预测理论与方法新进展[J].地质通报,2010,29(6): 953-960.
- [2] 肖克炎,孙莉,阴江宁,等.全国重要矿产预测评价[J].地球学报,2014,35(5): 543-551.
- [3] 王世称.综合信息矿产预测理论与方法体系新进展[J].地质通报,2010,29(10): 1399-1403.
- [4] 冯益民.祁连山造山带研究概况——历史、现状及展望[J].地球科学进展,1997,12(4): 5-12.
- [5] 青海省地质学会.青藏高原东北部地质研究[M].北京:地质出版社,2005,1-10.
- [6] 符俊辉,周立发.南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征[J].西北地质科学,1998,19(2): 47-54.
- [7] 祝有海,刘亚玲,张永勤.祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J].地质通报,2006,25(1-2): 58-63.
- [8] 唐世琪,卢振权,王伟超.青海木里三露天冻土区天然气水合物钻孔岩心顶空气组成及指示意义[J].现代地质,2015,29(5): 1201-1213.
- [9] 王平康,祝有海,卢振权.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(6): 1283-1297.
- [10] 吴青柏,程国栋.多年冻土区天然气水合物研究综述[J].地球科学进展,2008,23(2): 111-119.
- [11] 汪培庄.模糊集合论及其[M].上海:上海科学技术出版社,1983.
- [12] 马万元,耿秀丽.基于概率统计的模糊隶属函数计算研究[J].数学理论与应用,2016,36(3): 93-100.
- [13] 王石青,邱林,王志良,等.确定隶属函数的统计学方法[J].华北水利水电学院学报,2001,23(1): 68-71.
- [14] 李洪兴,汪培庄.模糊数学[M].北京:国防工业出版社,1994.

Fuzzy statistic method used to prediction of gas hydrate target area: A case study of Muli area in Qinghai Province

YUAN Yong-Zhen^{1,2,3}, PEI Fa-Gen^{1,2,3}, ZHANG Peng-Hui^{1,2,3}, ZHANG Xiao-Bo^{1,2,3}

(1. Electromagnetic Detection Technology Key Laboratory of Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, China; 2. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China; 3. The Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, China)

Abstract: In this paper, the fuzzy statistic method was used to forecast the distribution of natural gas hydrate resources in Muli area, with the geochemical exploration data obtained from Muli area as the study object. The results show that it is feasible to use this method to predict hydrate. The prediction area is well correlated with the drilling of the known hydrate, and the six hydrate favorable regions were delineated. The result obtained by the authors is of great significance not only for the optimization of material and geochemical exploration methods, the analysis of abnormal characteristics and the establishment of evaluation indexes, but also for the acceleration of the exploration and potential evaluation of natural gas hydrate resources in China's landfill regions.

Key words: membership functions; fuzzy mathematics; hydrates prediction; Muli area in Qinghai

(本文编辑:王萌)