

青藏高原天然气水合物潜在分布区预测

祝有海, 卢振权, 谢锡林

ZHU You-hai, LU Zhen-quan, XIE Xi-lin

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要: 青藏高原冻土面积约 $150 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是中国最大的冻土区, 具备较好的天然气水合物找矿前景。运用热力学预测方法, 根据青藏高原的年平均地表地温、冻土层厚度、冻土层内地温梯度 ($2.22^\circ\text{C}/100\text{m}$)、冻土层下地温梯度 ($4.18^\circ\text{C}/100\text{m}$) 等参数, 分纯甲烷组分、纯二氧化碳组分和各种实测气体组分, 分别计算出天然气水合物的稳定带及其厚度, 并编制出相应的分布预测图。结果显示, 青藏高原大部分冻土区基本具备天然气水合物的形成条件, 即使最难形成的纯甲烷水合物也能在部分冻土区内形成。若单纯从温压条件考虑, 成矿条件最有利的地区是喀喇昆仑地区, 其次为西昆仑地区, 再次为羌塘盆地, 最后才是祁连山等地区。综合考虑气源条件、运移条件、储层条件等, 羌塘盆地是青藏高原天然气水合物形成条件和找矿前景最好的地区, 其次是祁连山地区、风火山—乌丽地区, 再次是昆仑山垭口盆地、唐古拉山—土门地区、喀喇昆仑地区、西昆仑—可可西里盆地等。

关键词: 天然气水合物; 稳定带; 冻土; 青藏高原

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)12-1918-09

Zhu Y H, Lu Z Q, Xie X L. Potential distribution of gas hydrate in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12):1918-1926

Abstract: The Qinghai-Tibetan Plateau is the largest permafrost in China with an area of $150 \times 10^4 \text{ km}^2$, which is a potential and prospective region for gas hydrate. Based on the mean annual ground temperature, the thickness of frozen layer, thermal gradient in frozen layer ($2.22^\circ\text{C}/100\text{m}$) and thermal gradient below frozen layer ($4.18^\circ\text{C}/100\text{m}$), the stability zones and their thickness of gas hydrate with pure methane, pure carbon dioxide and various measured gas compositions from the Qinghai-Tibetan Plateau permafrost are calculated by using the thermodynamic method, and the potential distribution regions of gas hydrate are predicted and mapped. The results show that the Qinghai-Tibetan Plateau permafrost is of basic thermodynamic condition for formation of gas hydrate even including pure methane hydrate. According to temperature and pressure conditions, the best prospective region for gas hydrate is Kalakunlun Mountains, and next is Xikunlun Mountains, then Qiangtan Basin, and Qilianshan Mountains etc. However, combined with gas sources, transportation and reservoir conditions, Qiangtan Basin is the best prospective region for gas hydrate, next is Qilianshan Mountains and Fenghuoshan-Wuli, and then includes Kunlun Mountains Yakou Basin, Tanggula Mountains-Tumen, Kalakunlun Mountains, Xikunlun Mountains-Kekexili Basin etc.

Key words: gas hydrate; stability zone; permafrost; Qinghai-Tibetan Plateau

天然气水合物是由水和气体分子(主要是甲烷)组成的一种冰状物质, 广泛分布于海底沉积物和陆上永久冻土带中。这是一种规模巨大的新型潜在能源, 全球潜在资源量约达 $21 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 的甲烷气, 相当于已知煤、石油和天然气资源中含碳量总和的 2 倍,

加上能对全球气候变化和海底稳定性产生重大影响, 因而引起国内外的高度关注^[1-2]。中国也非常重视天然气水合物的调查研究, 先后在南海神狐海区和祁连山冻土区成功地钻获了天然气水合物实物样品, 证实中国也存在这一规模巨大的潜在能源^[3]。

收稿日期: 2011-9-10; 修订日期: 2011-11-28

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB219501)和中国地质调查局项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号: 1212010818055)

作者简介: 祝有海(1963-), 男, 硕士, 研究员, 从事天然气水合物和海洋地质研究。E-mail: zyh@mx.cei.gov.cn

青藏高原是世界中低纬度区海拔最高、面积最大的冻土区,也是典型的高山冻土区,平均海拔超过 4000m。冻土区南北跨越 12 个纬度,东西横亘近 30 个经度,面积约 $150\times 10^4\text{km}^2$,占全国冻土区的 69%^[4]。前人的研究表明,青藏高原,特别是羌塘盆地基本具备形成天然气水合物的温度和压力条件,能形成重烃类水合物或“自保护效应”的轻烃类水合物^[5-8];陈多福等^[9]运用热力学稳定域预测方法分别预测了生物成因气水合物和热解气水合物的产出特征;吴青柏等^[10]以年平均地温、地温梯度、冻土层厚度等参数计算了生物成因气水合物的可能产出状况;库新勃等^[11]根据不同的地温梯度计算了青藏高原天然气水合物的稳定带厚度,编制了可能的分布范围图;祝有海等^[12]则依据实测气体组分并结合年平均地表地温、地温梯度、冻土层厚度等资料,计算了祁连山冻土区天然气水合物形成的热力学条件,结果表明祁连山地区也基本具备天然气水合物的形成条件。但是,以上研究多基于现有资料的深入分析,缺乏实际调查资料作为依据。本文拟根据实测气体组分,运用热力学预测方法,预测各种实测组分的天然气水合物的分布范围并编制相应的分布预测图。

1 原理与方法

能否形成天然气水合物的关键因素包括温压条件、物源条件(气源、水源)、地质构造条件(运移、储层)等,若单从热力学方面考虑,影响冻土区天然气水合物及其厚度的主要参数包括年平均地表地温、冻土层厚度、冻土层内地温梯度、冻土层下地温梯度、气体组分等参数(图 1)。由于工作程度的限制,青藏高原的实测数据较少,且大部分实测数据均位于青藏公路沿线,只能依据各种实测数据,结合现有的研究手段,对上述参数进行理论计算或必要的假设,以便探讨青藏高原天然气水合物形成的热力学条件。

1.1 年平均地表地温

青藏高原年平均地表地温的实测数据较少,且绝大部分位于青藏公路沿线,

这里只好借用南卓铜等^[13]的方法来计算青藏高原的年平均地表地温。南卓铜等^[13]对青藏公路沿线 76 个年平均地表地温的实测数值与所处的纬度、高程进行线性多元回归统计,得出如下的多元回归方程:

$$T_{\varphi}=-0.83\varphi-0.0049E+50.63341 \quad (1)$$

式中: T_{φ} 为年平均地表地温($^{\circ}\text{C}$), φ 为十进制表示的纬度($^{\circ}$), E 为高程(m)。南卓铜等^[13]对这一回归方程进行了 F 检验,结果表明 $F=138.11$,其关系是非常显著的。利用这一方程获得的预测值与实测值的复相关系数 $r=0.90$,在 95 % 的置信度上远大于临界值 0.19,说明这一方程是可信的。

为获得青藏高原的高程和经纬度数据,笔者选用 USGS 网站的 GTOPO30 数据^[14],因为 GTOPO30 的中国区域数据比 USGS 的 DEM 数据更接近于中国测绘局给出的高程数据,再以 $2'\times 2'$ (约 $3.0\text{km}\times 3.7\text{km}$) 的网格制成青藏高原高程分布图。然后利用南卓铜等^[13]的线性多元回归方程,在每一个格点计

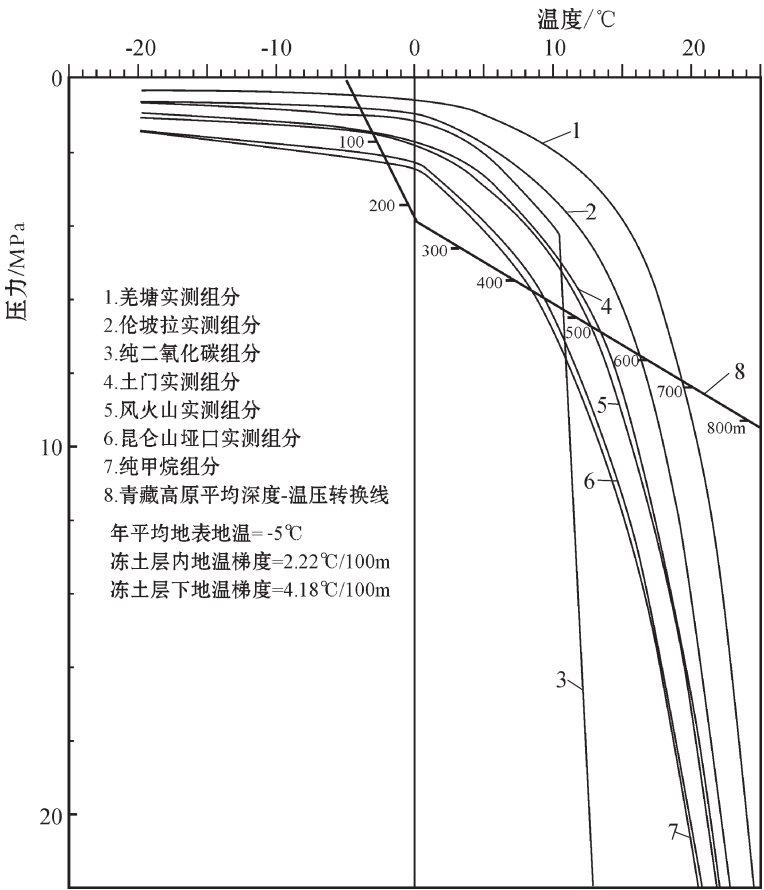


图 1 青藏高原实测气体组分天然气水合物相平衡图
Fig. 1 Phase equilibrium curves of gas hydrate with measured gas components from the Qinghai-Tibetan Plateau

算出年平均地表地温,再编制成青藏高原年平均地表地温分布图(图2)。结果表明,青藏高原大部分冻土区的年平均地表地温均高于 -5.0°C 。若以 0.5°C 的年平均地表地温作为多年冻土与季节冻土的界线,所获得的冻土分布图与周幼吾等^[4]编制的冻土分布图比较吻合,显示出模拟计算结果是比较可信的。但在藏东南、冈底斯山北侧及喜马拉雅山附近有一定的差异,特别是在藏东南岛状冻土区差异最为显著。这可能与这一地区缺少样本点而影响到回归方程质量有关^[13]。

1.2 冻土层厚度

在获知年平均地表地温之后,即可根据冻土层内的地温梯度计算出冻土层的厚度。由于青藏高原冻土层内地温梯度的实测数据极少,徐学祖等^[5]、张立新等^[6]、黄朋等^[7]、陈多福等^[9]均沿用了 $1.1\sim 3.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的数据。吴青柏等^[10]则根据近年来青藏高原多年冻土深孔的地温监测结果,得出青藏高原多年冻土层内的地温梯度在 $1.1\sim 3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 之间,平均约为 $2.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。王家澄等^[15]对青藏高原10个穿透多年冻土底板的测温孔资料进行了分析,发现多年冻土层内的地温梯度为 $1.8\sim 6.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,其中有6个钻孔的地温梯度大于 $5.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。笔者收集的青藏高原16个冻土层内的地温梯度数据为 $0.79\sim 3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,平均 $2.22^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,与吴青柏的数据一致。同时笔者在昆仑山口附近地区收集的82个青藏铁路浅孔测温资料显示地温梯度为 $0.21\sim 7.00^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,平均 $1.585^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。由此可见,青藏高原冻土层内的地温梯度数据变化较大。为简化计算,笔者取 $2.22^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 作为青藏高原冻土层内的平均地温梯度,对整个青藏高原每一个 $2'\times 2'$ 格点的冻土层厚度进行计算,具体计算方法运用周幼吾等^[4]的多年冻土厚度(H_f)与年平均地表地温(T_q)间的近似关系方程:

$$H_f = T_q \frac{\lambda}{q} + h \quad (2)$$

式中: λ 为土的导热系数, q 为热流($q=g\lambda$, g 为冻土层内的地温梯度), h 为地温年变化深度。对匀质地层,可认为 λ 不变,多年冻土厚度只与年平均地表地温、冻土层内地温梯度、地温年变化深度有关。根据前面的讨论,取地温梯度 $g=2.22^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,地温年变化深度 $h=10\text{m}$,这样冻土层的厚度只与年平均地表地温有关。

计算结果显示,青藏高原大部分地区的冻土层厚度介于 $100\sim 300\text{m}$ 之间,大于 300m 的冻土区主要分布于西藏、新疆交界处的喀喇昆仑和西昆仑地区,在唐古拉山、东昆仑山和祁连山地区也有零星分布,而冻土层厚度小于 100m 的冻土区主要分布于各周边地区(图3)。青藏公路沿线总体上也处于冻土层厚度不足 100m 的地区,与实测结果比较接近,由此可见这一计算结果还是比较合理可信的。

1.3 地温梯度

在确定了年平均地表地温、冻土层内地温梯度和冻土层厚度之后,影响天然气水合物稳定带及其厚度的重要参数还包括冻土层下的地温梯度。同样地,青藏高原冻土层下实测的地温梯度数据较少,徐学祖等^[5]、张立新等^[6]、黄朋等^[7]均沿用了 $2.8\sim 5.1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的数据,陈多福等^[9]在参考了多种资料后运用的是 $1.5\sim 5.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。王家澄等^[15]对10个穿透多年冻土底板的测温资料分析后认为,冻土底板附近的融土地温梯度(即冻土层下的地温梯度)为 $2.8\sim 8.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,其中有8个钻孔大于 $5.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。吴青柏等^[10]则应用 $1.5\sim 8.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的数据作为青藏高原冻土层下的地温梯度。笔者收集的49个冻土层下的地温梯度数据为 $1.05\sim 19.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,平均 $4.49^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。除去藏南地区1个 $19.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的极端高值外,48个冻土层内地温梯度数据为 $1.05\sim 9.93^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,平均 $4.18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。为便于计算,笔者取 $4.18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 作为青藏高原冻土层下的平均地温梯度,来对青藏高原冻土区天然气水合物的稳定带及其厚度进行计算。

1.4 气体组分

青藏高原气体组成比较复杂,有可能形成天然气水合物的包括纯二氧化碳气体、纯甲烷气体和各种实测组分的气体。笔者先后在青藏高原不同地区采集了大量的气体样品,包括顶空气、冷泉气、酸解烃等。这里分别利用昆仑山垭口盆地冷泉气、祁连山天峻县木里地区33号钻孔冷泉气、伦坡拉盆地酸解烃平均值、风火山—乌丽地区顶空气平均值、唐古拉山—土门煤矿地区顶空气平均值和羌塘盆地双湖地区顶空气平均值等实测组分(表1)对天然气水合物的稳定带及其厚度进行计算,由于昆仑山垭口盆地的实测数据非常接近于纯甲烷组分,可用纯甲烷组分来代替,祁连山木里地区和伦坡拉盆地的气体组分比较接近,可用一个组分来代表,而风火山—乌丽

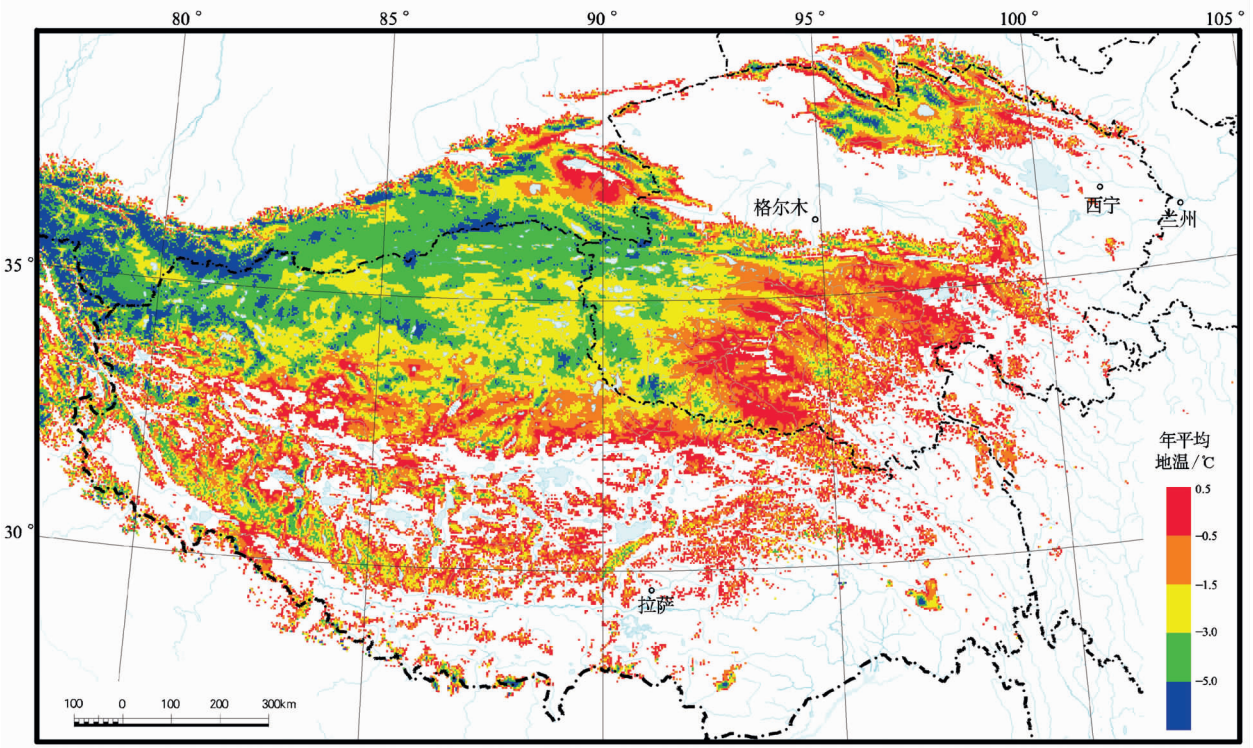


图 2 青藏高原年平均地表地温分布图

Fig. 2 Distribution of mean annual ground temperature in the Qinghai-Tibetan Plateau

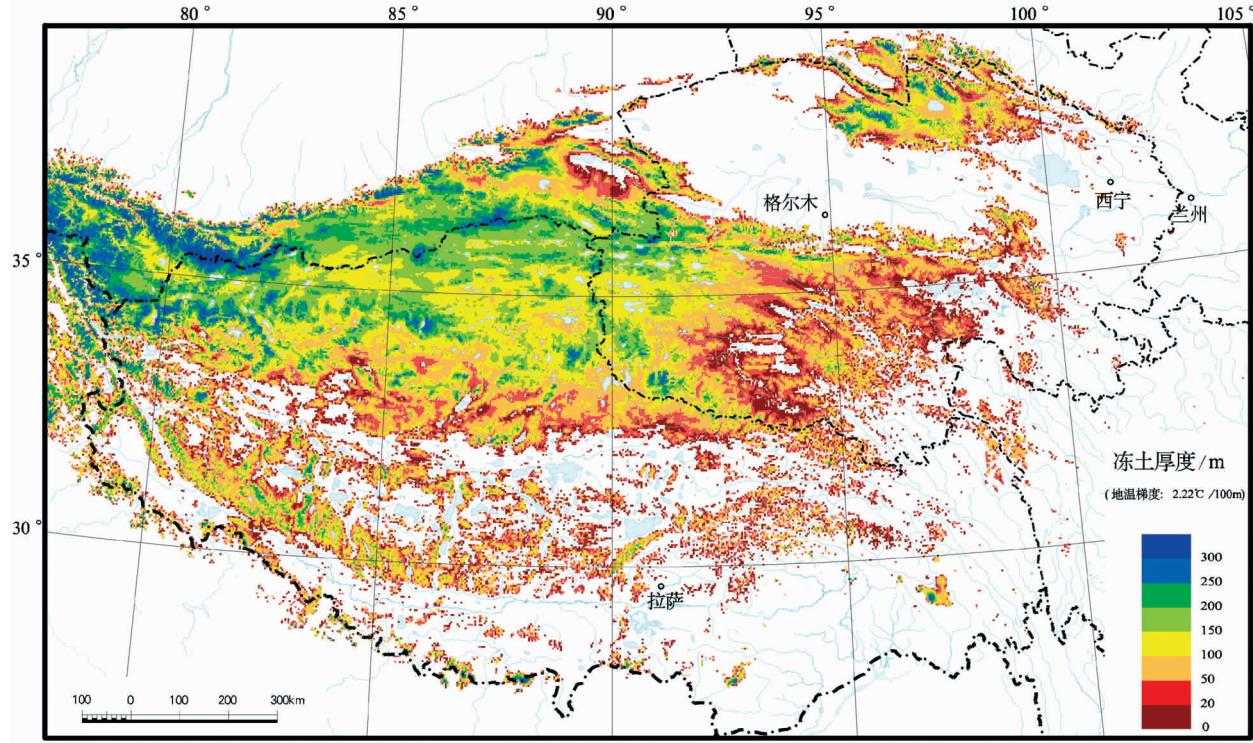


图 3 青藏高原冻土层厚度分布图

Fig. 3 Distribution of frozen layer thickness in the Qinghai-Tibetan Plateau

表 1 青藏高原气体组分实测数据

Table 1 The measured data of gas compositions from the Qinghai-Tibetan Plateau

样品产地	样品类型	样品数	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	nC ₄ H ₁₀	CO ₂
	纯 CH ₄ 气		100.0				
昆仑山垭口	冷泉气	1	99.2	0.8			
祁连山木里	冷泉气	1	96.6	3.3	0.1		
风火山—乌丽	冷泉气	5	93.8	6.2			
伦坡拉盆地	酸解烃	57	94.3	4.1	1.5		
羌塘盆地	顶空气	149	63.3	24.3	8.9	3.5	
	纯 CO ₂ 气						100.0

注:气体含量单位为 mol%

地区和唐古拉山—土门地区的气体组分也比较接近,也可用一种组分来代表。因此,本文只讨论纯甲烷气体、祁连山冷泉气、风火山—乌丽地区顶空气、羌塘盆地顶空气和纯二氧化碳 5 种气体组分的水合物形成条件。

综上所述,笔者以经过计算所获得的年平均地表地温(图 2)、冻土层厚度(图 3)和 2.22℃/100m 的冻土层内地温梯度、4.18℃/100m 的冻土层下地温梯度等参数,分纯甲烷、祁连山木里地区冷泉气、风火山—乌丽地区冷泉气、羌塘盆地双湖地区顶空气等实测组分和纯二氧化碳对青藏高原天然气水合物的稳定带及其厚度进行了计算。具体方法是先利用 Sloan 的 CSMHYD 程序计算出特定组分的天然气水合物相平衡曲线(温压曲线),然后利用冻土层内地温梯度和冻土层下地温梯度曲线来界定天然气水合物形成的稳定域(图 1),再根据某一特定组分的稳定域建立基于年平均地表地温的水合物稳定带厚度图,最后根据网格状的年平均地表地温分布图(图 2)编制出青藏高原冻土区天然气水合物稳定带及其厚度分布图(图 4)。由于冻土层厚度是年平均地表地温的函数,即年平均地表地温与冻土层内地温梯度的乘积,因此在实际计算过程中只把它当作中间参数而未参与到实际计算过程中。

2 结果与讨论

计算结果表明,纯甲烷组分是最难形成的天然气水合物,根据 2.22℃/100m 和 4.18℃/100m 的冻土层内及其下的地温梯度,要形成纯甲烷水合物的年平均地表地温必须低于-3.20℃,相应的冻土层厚

度必须大于 144.1m。理论上能形成纯甲烷水合物的地区主要是青海、西藏与新疆交界处附近的喀喇昆仑山、西昆仑山等地区,并零星分布于青藏高原的其它冻土区,稳定带厚度也相对较薄,一般小于 300m,局部地区可达 300~500m,最高可超过 600m(图 4)。

与纯甲烷组分相比,祁连山木里煤田区逸出的冷泉气含有 3.4%的重烃(乙烷、丙烷等),形成水合物要相对容易些。根据上述 2.22℃/100m、4.18℃/100m 的地温梯度,形成这种组分水合物的年平均地表地温必须低于-2.40℃,相应的冻土层厚度必须大于 108.1m。尽管有可能形成木里实测组分的水合物仍集中在青海、西藏与新疆交界处附近的喀喇昆仑山、西昆仑山等地区,但分布范围有所扩大,且逐渐连成一片,稳定带的厚度也相应加厚,最厚可超过 700m(图 5)。

风火山—乌丽地区冷泉气含有 6.2%的重烃,形成水合物要更容易些。根据上述参数,形成这种组分水合物的年平均地表地温只要低于-2.13℃,相应的冻土层厚度大于 95.9m,形成这种组分水合物的范围就有可能更为扩大,且基本连成一片,稳定带的厚度也有所加厚,最厚可接近 800m(图 6)。

羌塘盆地是重烃含量最高的盆地,149 个顶空气样品中平均含有 24.3%的重烃,非常容易形成水合物。若仍假定地温梯度为 4.18℃/100m,则形成这种水合物的年平均地表地温只需 1.70℃,也就是说非冻土区理论上也能形成这种重烃含量较高的水合物。因此,这种组分的水合物分布范围更为扩大,整个青藏高原,特别是藏北地区几乎连成一片,稳定带厚度也明显加厚,大部分地区均可达 400~700m,最

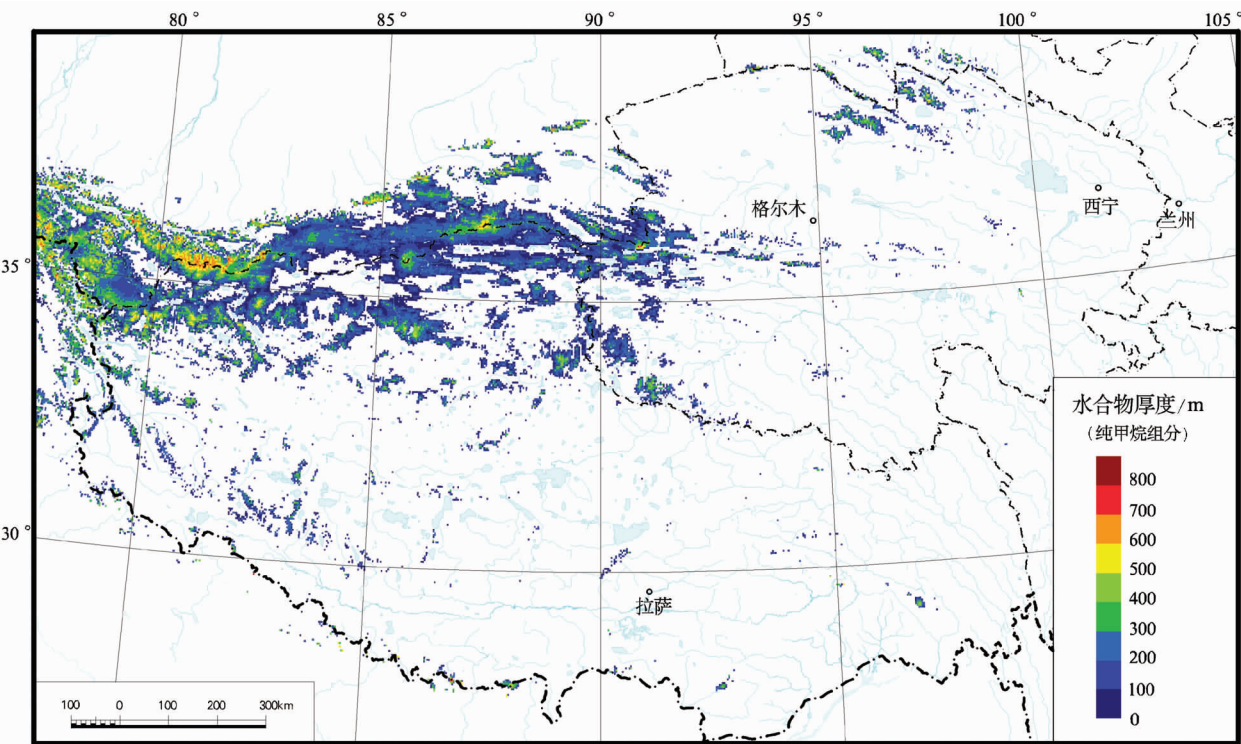


图 4 青藏高原甲烷水合物稳定带及其厚度分布图

Fig. 4 Potential distribution of methane hydrate stability zone and its thickness in the Qinghai-Tibetan Plateau

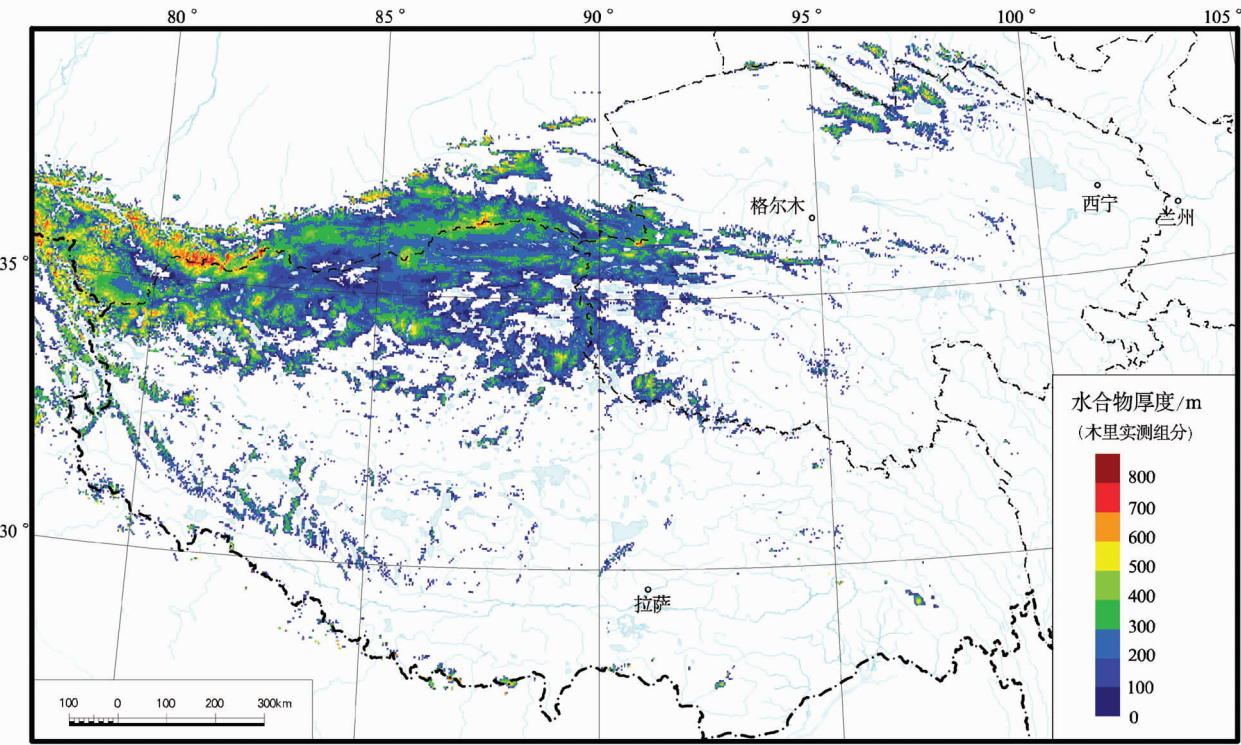


图 5 青藏高原天然气水合物(CH₄:96.6 mol%)稳定带及其厚度分布图

Fig. 5 Potential distribution of gas hydrate (CH₄:96.6 mol%) stability zone and its thickness in the Qinghai-Tibetan Plateau

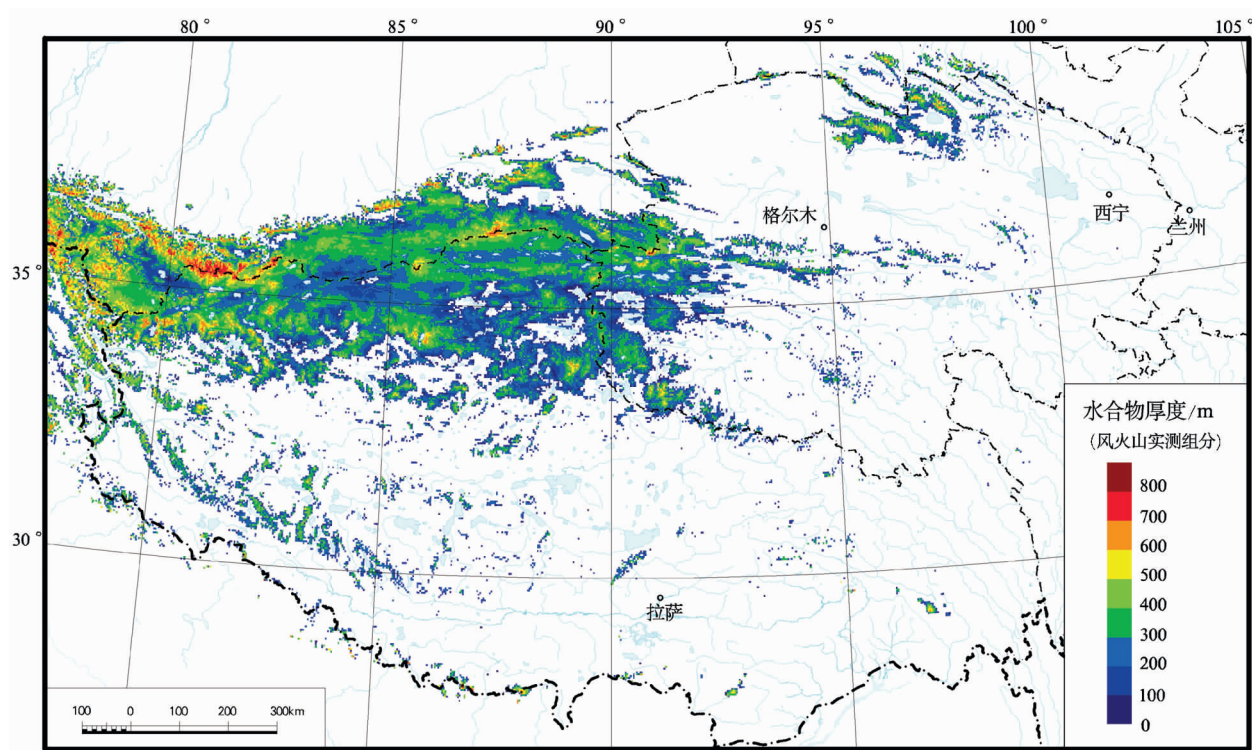


图 6 青藏高原天然气水合物(CH₄:93.8 mol%)稳定带及其厚度分布图

Fig. 6 Potential distribution of gas hydrate (CH₄:93.8 mol%) stability zone and its thickness in the Qinghai-Tibetan Plateau

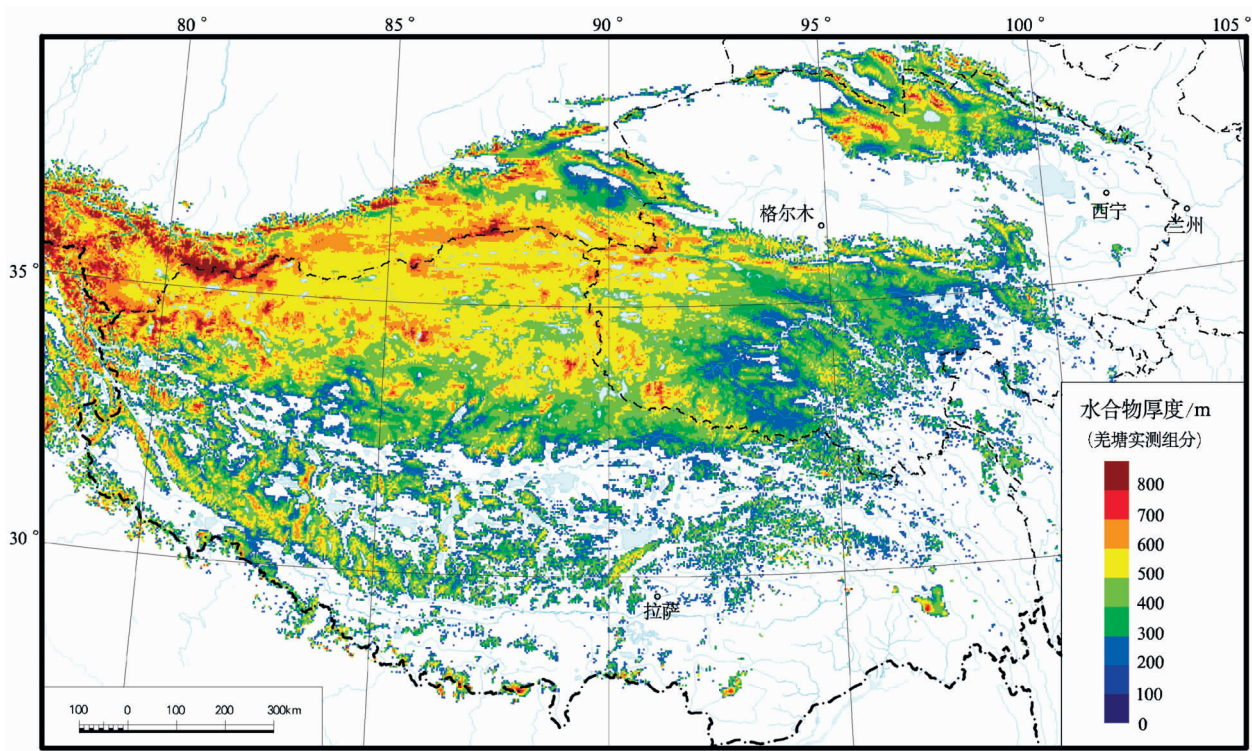


图 7 青藏高原天然气水合物(CH₄:63.3 mol%)稳定带及其厚度分布图

Fig. 7 Potential distribution of gas hydrate (CH₄:63.3 mol%) stability zone and its thickness in the Qinghai-Tibetan Plateau

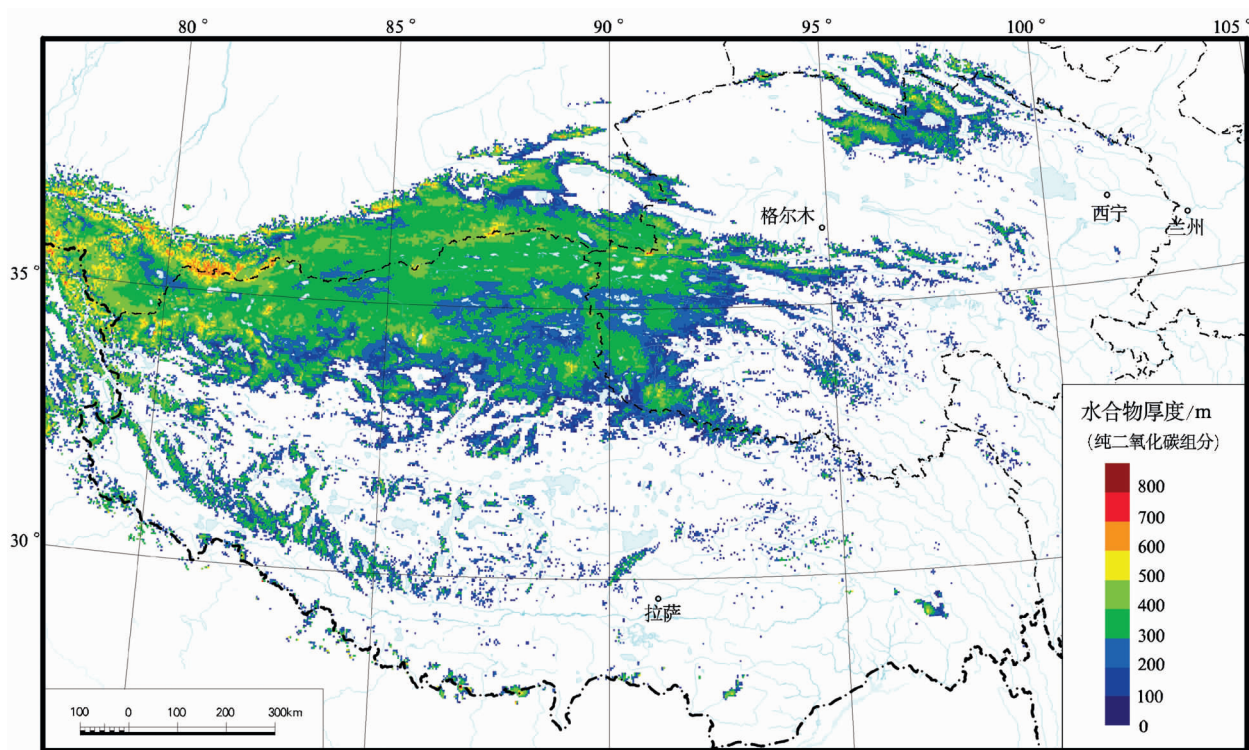


图 8 青藏高原二氧化碳水合物稳定带及其厚度分布图

Fig. 8 Potential distribution of carbon dioxide hydrate stability zone and its thickness in the Qinghai-Tibetan Plateau

厚可达近千米(图 7)。

笔者对纯 CO_2 组分也进行了相应的计算。结果表明,形成纯 CO_2 水合物的年平均地表地温只要 -1.25°C ,相应的冻土层厚度为 56.3m,就有可能形成纯 CO_2 水合物。但其分布地区略小于羌塘盆地实测组分的水合物分布区,稳定带的厚度也相对较薄,一般为 200~500m,只有少部分地区大于 500m(图 8)。

综上所述,青藏高原基本具备天然气水合物的形成条件,即使最难形成的纯甲烷水合物也能在部分冻土区内形成。若单纯从温压条件考虑,成矿条件最有利的地区是新疆与西藏交界处附近的喀喇昆仑地区,其次为青海与西藏交界处附近的西昆仑地区,再次为藏北的羌塘盆地,最后才是祁连山等地区。利用温压条件仅仅预测了天然气水合物的潜在分布区,是否存在天然气水合物还必须考虑气源条件、运移条件、储层条件等因素。综合考虑上述因素后笔者认为,青藏高原天然气水合物形成条件和找矿前景最好的地区是羌塘盆地,其次是祁连山地区、风火山—乌丽地区,再其次是昆仑山垭口盆地、唐古拉

山—土门地区、喀喇昆仑地区、西昆仑—可可西里盆地等。

随着气体组分中重烃含量的增加,形成天然气水合物所需的年平均地表地温可逐渐升高,冻土层厚度可逐渐降低,能形成天然气水合物的地区不断扩大,水合物稳定带也逐渐增厚。也就是说,气体组分中重烃含量越高越有利于形成天然气水合物。

3 结 论

(1)纯甲烷、各种实测气体组分和纯二氧化碳组分的温压条件计算结果表明,青藏高原大部分冻土区能形成各种类型的水合物,且随着气体中重烃组分的增加,能形成水合物的地区增大,水合物稳定带也增厚。

(2)羌塘盆地是青藏高原天然气水合物形成条件和找矿前景最好的地区,其次是祁连山地区、风火山—乌丽地区,再次是昆仑山垭口盆地、唐古拉山—土门地区、喀喇昆仑地区、西昆仑—可可西里盆地等。

参考文献

[1]Kvenvolden K A. Gas hydrates geological perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(2): 173-187.

[2]Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? [J]. Earth -Science Reviews, 2004, 66: 183-197.

[3]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): 1762-1771.

[4]周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-450.

[5]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.

[6]张立新, 徐学祖, 马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1/2): 22-26.

[7]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.

[8]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.

[9]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.

[10]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.

[11] 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.

[12]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.

[13]南卓铜, 李述训, 刘永智. 基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 142-148.

[14]USGS GTOPO30[Z/OL], <http://www.xmarks.com/site/edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>

[15]王家澄, 李树德. 青藏公路沿线多年冻土下限面附近的热状况分析[C]// 青藏冻土研究论文集.北京: 科学出版社, 1983: 38-43.