

天然气水合物

青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究

库新勃, 吴青柏, 蒋观利

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 青藏高原地区有大面积多年冻土分布, 是我国陆地天然气水合物可能的赋存区域之一。在GIS平台下建立了基于三向地带性多年冻土地温分布的模型, 利用地温钻孔资料对青藏高原地区多年冻土厚度做了回归统计分析, 指出了青藏高原多年冻土年平均地温和多年冻土厚度的空间分布特征。结合陆域天然气水合物形成的热力学条件, 对青藏高原多年冻土区天然气水合物可能赋存区域进行了研究, 认为青藏高原多年冻土区天然气水合物可能主要集中分布在羌塘盆地西北部地区, 其储量可能较为可观。

关键词: 青藏高原; 多年冻土; 天然气水合物

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2007)04-0588-05

0 引言

天然气水合物是由气体和水组成的类冰固体, 广泛分布于多年冻土区和海洋中。预测天然气水合物中甲烷含碳量是地球上已探明煤、石油、天然气总含碳量的2倍^[1]。正是因为天然气水合物具有如此大的资源量和极强的浓缩气体的性质, 其被认为是未来最有希望的替代能源载体^[2]。

目前在多年冻土区已经发现有大量的天然气水合物, 如在加拿大马更些三角洲、阿拉斯加的North Slope和俄罗斯西伯利亚等地^[3-5]。青藏高原平均海拔高、气候严寒, 是我国多年冻土集中分布地区之一, 近年来关于青藏高原多年冻土区天然气水合物存在的条件和特征也引起了国内学者极大的关注。青藏高原多年冻土温度、厚度条件与北半球多年冻土区形成天然气水合物的条件比较接近, 具备天然气水合物形成的条件^[6-10], 特别是可能存在以硫化氢、乙烷、丙烷等重烃类水合物和具有自保护效应的甲烷水合物^[6-7]。陈多福等^[9]认为, 青藏高原多年冻

土区可能具有丰富的天然气水合物蕴藏量, 并初步估计多年冻土区天然气水合物储量约为 $(1.2 \sim 2.4) \times 10^{14} \text{ m}^3$ 。

分布于多年冻土区的天然气水合物的形成与多年冻土的热状态、多年冻土的厚度有着密切的关系(图1^[10])。从陆地多年冻土区天然气水合物形成的相平衡条件来分析, 如果多年冻土层内和层下地温梯度太大, 则无法形成较厚的多年冻土层, 那么天然气水合物形成的温度和压力条件就无法满足。这些都是影响多年冻土区天然气水合物形成和发育规模的主要因素。

因此, 本文利用多年冻土划分的三向地带性模型在GIS平台下建立了青藏高原多年冻土年平均地温和多年冻土厚度空间分析模型, 计算并生成了青藏高原多年冻土地温和厚度的空间分布图, 结合天然气水合物在多年冻土区的相平衡条件来判断该区天然气水合物可能的分布区域和储量情况。

1 青藏高原多年冻土分布模型及制图

青藏高原处于中低纬度地区, 海拔高, 气候严寒

收稿日期: 2007-03-28; 修回日期: 2007-05-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40471024); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目(编号: 2004103)资助

作者简介: 库新勃(1982-), 男, 陕西人, 硕士研究生, 从事冻土区遥感和地理信息系统研究 E-mail: kuxinbo@lzb.ac.cn

此文系第一作者硕士学位论文详细摘要

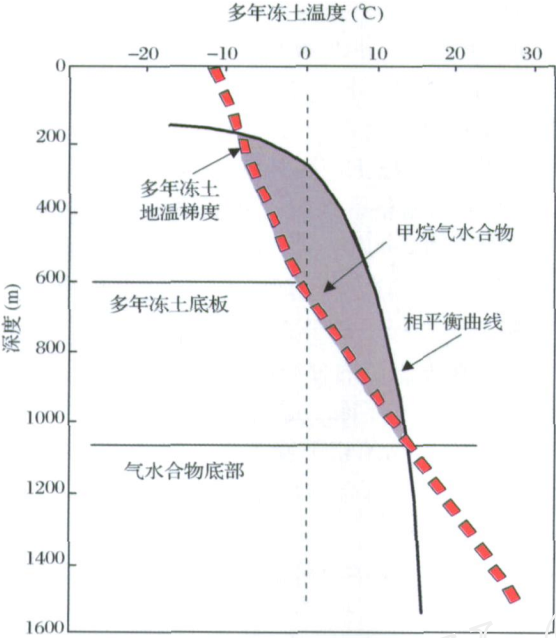


图1 多年冻土条件与天然气水合物形成关系^[10]

的特点决定着高海拔多年冻土的存在和广泛分布。青藏高原多年冻土分布特征既受高度地带性控制, 又受纬度地带性的制约, 同时还受到坡向、植被、雪盖、地质构造和地下水等局域因素的强烈影响^[11]。根据上述特点, 程国栋^[12]提出了青藏高原高海拔多年冻土分布的三向地带性规律, 即由热量和水分随高度变化造成的垂直地带性, 由热量南北差异引起的纬度地带性和由水分状况不同所产生的干燥度地带性。

1.1 多年冻土地温分布模型和计算结果

首先利用青藏铁路沿线218个地温孔所提供的多年冻土年平均地温资料和利用分辨率为1 km × 1 km的青藏高原地区的DEM数据, 提取了相对应的每个栅格纬度和海拔高度信息。然后主要根据青藏高原101个气象站提供的1961- 2000年年降水数据, 并利用公式^[12] $\text{ctg}\omega = P \times 10/H$ [其中P为降水量(mm), H为海拔高度(m)]计算出每个站点的大陆度数据。最后对多年冻土年平均地温和海拔高度、纬度以及大陆度进行回归统计分析, 得到青藏高原多年冻土区年平均地温与三项地带性之间的统计关系如下:

$$T_{\varphi} = 63.28597 + 1.507148W - 0.00555E - 1.15357X$$

(1)

式中: T_{φ} 为年平均地温; W为大陆度; E为高程, m; X为地理纬度, °。回归结果中 $R^2 = 0.557$, 在95%的

置信区间显著。
根据公式(1), 利用青藏高原海拔、纬度和大陆度栅格化数据, 在GIS平台下计算得到青藏高原多年冻土区的地温分布情况(图2)。

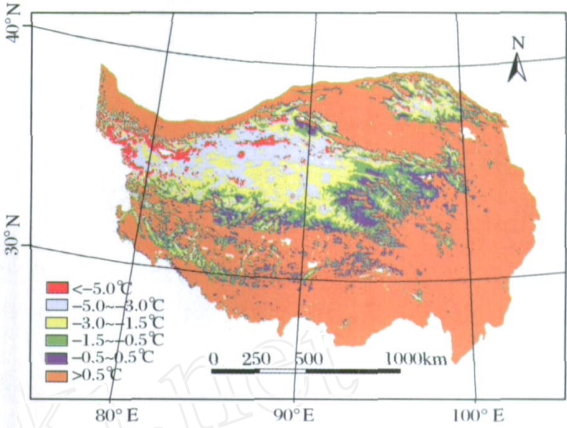


图2 青藏高原多年冻土地温分布

1.2 多年冻土厚度模型和计算结果

根据收集到青藏高原地区38个带有多多年冻土厚度数据的地温钻孔点的数据, 进行回归统计, 得到公式:

$$Y = 14.6 - 34.74X$$

(2)

式中: Y为多年冻土厚度, m; X为多年冻土年平均地温, °。回归结果中 $R^2 = 0.93$, 在95%的置信区间显著。根据公式(2)结合青藏高原多年冻土地温计算结果, 在GIS平台下进行空间运算得到青藏高原多年冻土区冻土层的厚度数据(图3)。

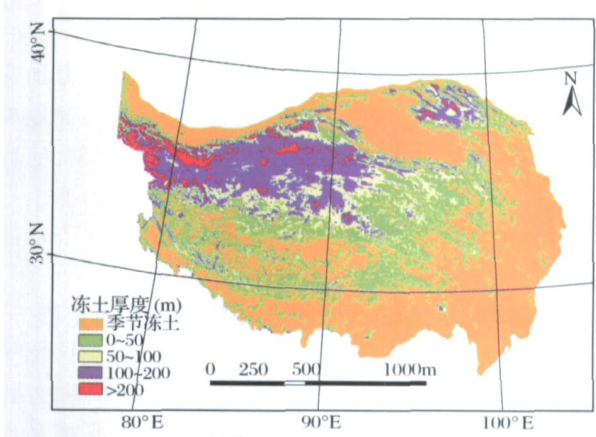


图3 青藏高原多年冻土厚度分布

结合青藏高原多年冻土的地温分布, 由图3可以看出季节冻土与年平均地温(> 0.5)的区域吻合程度较好, 同时年平均地温由东到西降低, 多年冻土的厚度也随之增加。

2 青藏高原多年冻土区天然气水合物的可能分布范围

天然气在冻土带沉积物中的特定温度和压力条件下可以形成水合物。由图1可以看出, 冻土层具有形成天然气水合物的有利条件。因此, 青藏高原多年冻土区天然气水合物的分布主要取决于多年冻土层的厚度所产生的压力和多年冻土底板下界的地温梯度状况。

2.1 天然气水合物形成的相平衡条件

因为多年冻土区形成的天然气水合物基本为甲烷水合物^[2], 所以本文采用由Sloan E D^[12]和Kamath V A^[13]提出的甲烷气水合物形成的相平衡条件统计方程来描述:

$$P = \exp(14\ 717 - 1866\ 79/T) \quad (0 \sim -25) \quad (3)$$

$$P = \exp(38\ 98 - 8533\ 8/T) \quad (0 \sim 25) \quad (4)$$

式中: P 为压力, kPa; T 为温度, K。

多年冻土底板处温度为0, 因此, 公式(3)为多年冻土底板以上天然气水合物形成的相平衡条件; 公式(4)为多年冻土底板以下沉积层天然气水合物形成的相平衡条件。

2.2 冻土层厚度与压力的关系

多年冻土层及之下沉积层的压力与深度的关系可以分别根据静岩压力(P_f)和静水压力(P_s)来计算^[14-15]:

$$P_f = P_0 + 10^{-6} \rho_f g h_f \quad (5)$$

$$P_s = P_f + 10^{-6} \rho_s g h_s \quad (6)$$

式中 P_0 为地表大气压, 为0.1 MPa; g 为重力加速度常数, 取 9.81 m/s^2 ; ρ_f 为冻土层密度, 实验测定冻土密度为 $1\ 500 \sim 2\ 000\text{ kg/m}^3$ ^[15-16], 计算时取 $1\ 750\text{ kg/m}^3$; h_f 为冻土层内的深度, m; ρ_s 为冻土层之下空隙流体密度, 取 $1\ 000\text{ kg/m}^3$; h_s 为冻土层底界向下的深度, m。

2.3 多年冻土区天然气水合物的可能分布范围

利用公式(3)计算出青藏高原多年冻土区冻土底板处的压力分布情况, 同时结合公式(5)和公式(6)计算出多年冻土底板处满足水合物相平衡条件时所需的压力($P = 2.38\text{ MPa}$), 判断含天然气水合物层之顶界存在于多年冻土区冻土层内的区段。此外, 对于多年冻土层之下的沉积层, 假设其地温梯度分别为 $2.3\ 4.5 / 100\text{ m}$, 结合公式(6)计算出含天然气水合物层的底界和上界底部都位于多年冻土层

之下的沉积层内。

2.3.1 含天然气水合物层顶界位于多年冻土层内

根据公式(2)计算得到的青藏高原地区多年冻土的厚度栅格数据, 带入公式(5)计算出其对应栅格的压力, 即多年冻土底板处的压力分布, 取压力 P

2.38 MPa 的栅格。根据这些栅格对应的多年冻土层的地温梯度, 可由公式(1)计算得到多年冻土层的地温和其底板处的温度, 再结合天然气水合物形成的相平衡条件方程中的公式(5)就可计算出含天然气水合物层在冻土层内分布的顶界厚度(H_T)。

由假设的多年冻土层之下的地温梯度并结合天然气水合物形成的相平衡条件方程中的公式(6)就可计算出天然气水合物在冻土层之下沉积层分布的底界深度(H_s)。

2.3.2 含天然气水合物层顶界、底界都位于多年冻土层之下

对于 $P < 2.378\ 66\text{ MPa}$ 的区域并不是全部都存在天然气水合物, 同样是根据假设的多年冻土层之下的地温梯度并结合天然气水合物形成的相平衡条件方程中的公式(6)计算天然气水合物在多年冻土层之下的上、下界的分布深度(H_{s1} , H_{s2})。

2.3.3 多年冻土区含天然气水合物层的顶界、底界及厚度计算

由上述可知, 含天然气水合物层在多年冻土区的分布可以分2种情况: 其顶界在冻土层内和底界位于冻土层之下的沉积层; 上、下界都在冻土层之下的沉积层。2种情况下多年冻土顶界、底界及厚度的计算都要首先计算其对应区域的多年冻土的底板处的深度。可由公式(2)计算多年冻土的厚度, 定义为(H_F)。2种情况下的含天然气水合层的厚度(H_z)计算可由如下公式:

$$H_z = (H_s + H_F) - H_T \quad (7)$$

公式(7)为含天然气水合物层顶界在冻土层内和底界位于冻土层之下的厚度计算公式: 其中 H_z 为含天然气水合物层厚度, H_T 为含水合物层顶界埋深, $(H_s + H_F)$ 表示含天然气水合物层的底界埋深。

$$H_z = H_{s2} - H_{s1}; H_T = H_{s1} + H_F; H_B = H_{s2} + H_F \quad (8)$$

公式(8)为含天然气水合物层顶界、底界都在冻土层之下的厚度、顶界、底界的计算公式。其中 H_z 为含天然气水合物层厚度, H_T 为含水合物层顶界埋深, H_B 为含天然气水合物层底界埋深。

2.3.4 参数统计及相关图件

根据上述结论, 利用相关参数的栅格化数据在

GIS 平台下计算出青藏高原多年冻土区天然气水合物的分布区域(图4)和有关参数统计(表1)。

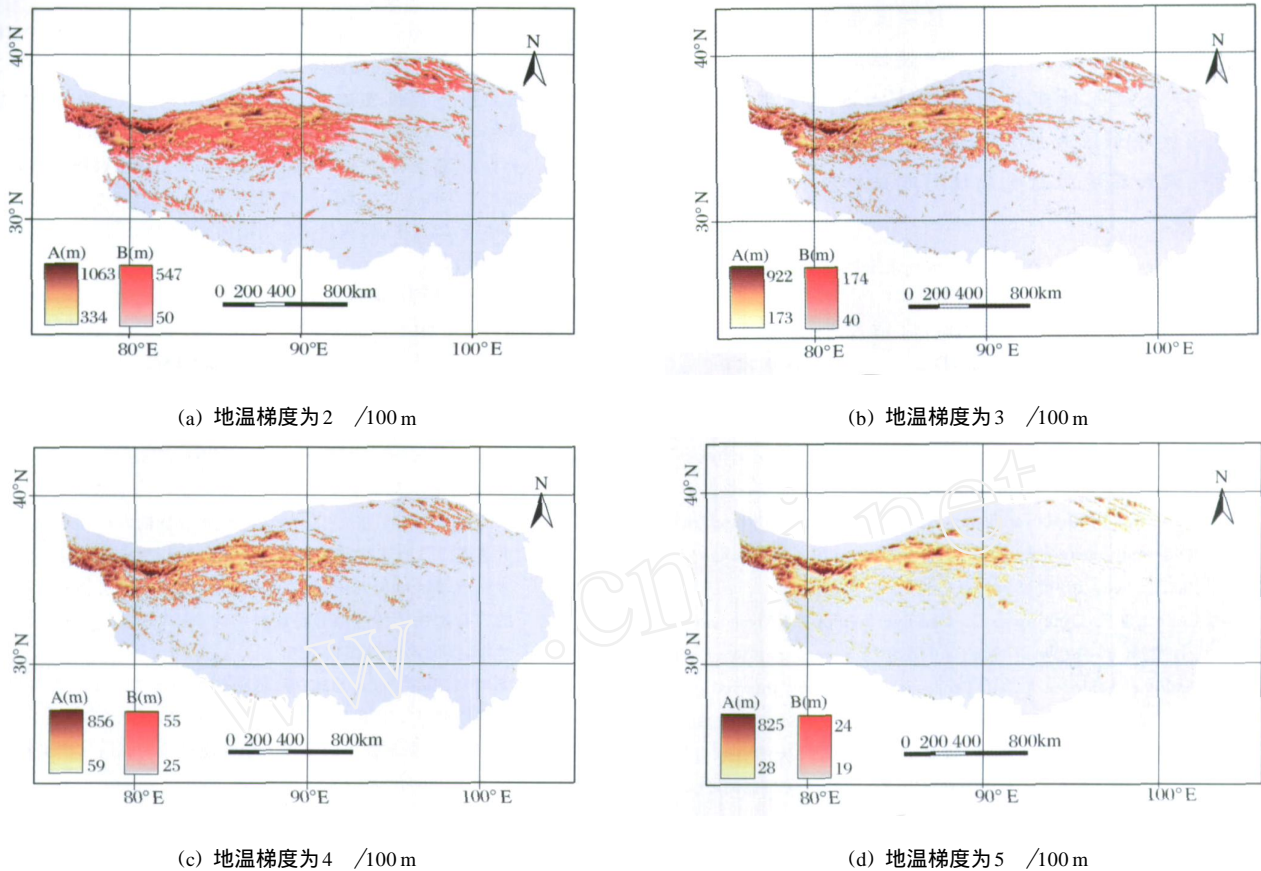


图4 不同地温梯度下青藏高原天然气水合物的可能分布区域

表1 青藏高原多年冻土区天然气水合分布各参数统计

地温梯度	类型	顶界(H_T)变化范围(m)	底界(H_B)变化范围(m)	厚度(H_Z)变化范围(m)	储量($\times 10^{14}m^3$)	总储量($\times 10^{14}m^3$)
2 °C/100 m	A	107.7~142.7	470.1~1182.5	334.1~1063.1	2.07	2.98
	B	125.2~354.6	384.4~678.5	51.0~547.2	0.91	
3 °C/100 m	A	107.7~142.7	315.8~1058.6	173.1~922.2	0.98	1.04
	B	125.2~171.1	190.6~305.0	40.8~174.3	0.06	
4 °C/100 m	A	107.7~142.7	202.6~994.4	59.9~856.0	0.61	0.62
	B	125.2~138.3	153.6~192.0	25.5~55.1	0.01	
5 °C/100 m	A	107.7~142.7	170.9~958.9	28.2~825.6	0.45	0.453
	B	128.7~137.3	151.9~157.3	20.0~24.5	0.003	

注: 表中A 类型为含天然气水合物层顶界在多年冻土层内, 底界在冻土层之下;B 类型为含天然气水合层顶界、底界都在多年冻土层之下。

3 分析与总结

(1) 多年冻土条件是青藏高原多年冻土区天然气水合物形成的最为重要的热力学条件, 特别是多年冻土的地温梯度、多年冻土底板附近融土的地温梯度和多年冻土的厚度等, 不仅控制着天然气水合物形成的热力学条件, 而且对于正确地分析和评价天然气水合物的分布和预测储量起到了至关重要的作用。

(2) 根据图4 计算的结果可知, 在几种不同的多年冻土层之下的地温梯度情况下, 青藏高原多年冻土区天然气水合物主要集中分布在羌塘盆地西北部地区, 其储量也比较可观。主要是因为该地区是青藏高原地区的低温中心, 多年冻土相当发育, 同时, 天然气水合物的分布范围和储量规模随着地温梯度的增大而减小。预测最大储量可达 $2.98 \times 10^{14}m^3$, 最小储量为 $0.453 \times 10^{14}m^3$ 。其中含天然气水合物层的最小顶界埋深为107 m 左右, 最大的底界埋深为1182

m 左右,埋深厚度在 24 5~ 1 063 m 不等。这与图 1 所显示的多年冻土区冻土条件和天然气水合物形成的关系有着很好的一致性。

(3) 全球气候变化引起的冻土区退化现象,必然会导致冻土区天然气水合物分布的变化,随之产生的气候和环境问题也应该引起关注。

参考文献:

- [1] 史斗,孙成权,朱岳年. 国外天然气水合物研究进展[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1992
- [2] Sloan E D Jr. Clathrate Hydrates of Natural Gases[M]. Edition II New York: Marcel Dekker, Inc., 1998
- [3] Paull C K, Usseler W III, Dillion W P. Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrate? [J]. Geophysical Research Letter, 1991, 18(4): 432-434
- [4] Neue H. Methane emission from rice fields: Wetland rice fields may make a major contribution to global warming [J]. Bio Science, 1993, 43(7): 466-473
- [5] Collett T S, Gimburg G D. Gas hydrates in the Messoyakha gas field of the west Siberian basin: A confirmation of the geologic evidence [C]//Proceedings of 7th International Off-shore and Polar Engineering Conference. 1997: 96-103
- [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. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1): 22-26
- [8] 黄朋,潘桂堂,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] 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,蒲毅斌,等. 青藏高原天然气水合物的形成条件与多年冻土的关系[J]. 地质通报, 2006, 25(1-2): 29-33
- [11] 周幼吾,邱国庆,郭东信,等. 中国冻土学[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [12] 程国栋. 我国高海拔多年冻土地带性规律之探讨[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 185-193
- [13] Kamath V A. Study of heat transfer Characteristics during the dissociation of gas hydrate in porous media[D]. Ph.D. Dissertation U. Pittsburgh Univ. Microfilms No. 8417404, Ann Arbor, Mi, 1984
- [14] 宋海斌,江为为,张文生,等. 天然气水合物的海洋地球物理研究进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 224-229
- [15] 宋海斌, Matsubayashi O, 杨胜雄,等. 含天然气水合物沉积物的岩石物性模型与似海底反射层的AVA 特征[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 546-556
- [16] 刘增利,李洪升,朱元林,等. 冻土初始与附加细观损伤的CT 识别模型[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 676-680
- [17] 江崇鲜. 淤泥质冻土的物理力学性能试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(9): 9-12

POTENTIAL DISTRIBUTION OF NATURAL GAS HYDRATE IN THE PERMAFROST REGIONS OF QINGHAI-TIBET PLATEAU

KU Xin-bo, WU Qing-bai, JIANG Guan-li

(State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, CAREE, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Natural Gas hydrate was found in permafrost regions and marine sediments. Permafrost distributes widely in the Qinghai-Tibet plateau which is the potential region for the distribution of natural gas hydrate in China. The temperature model of permafrost distribution is made by the three-dimensional zonation under the GIS. Meanwhile, a regression analysis of the permafrost thickness is carried out using the data of ground temperature drills and gives the spatial distribution characteristics of the annual ground temperature and the thickness of permafrost in the Qinghai-Tibet plateau. Combined with the thermodynamics conditions of forming natural gas hydrate, the potential regions for natural gas hydrate in the Qinghai-Tibet plateau have been studied. The result shows that the natural gas hydrate distributes mainly in northwestern Qingtang basin, and the reserve is likely to be large. This region is the low temperature center of the Qinghai-Tibet plateau. And, the distribution ranges and reserves of natural gas hydrate decrease with the increase of the geothermal gradients. The thickness of permafrost and geothermal gradients below it are the most important controlling factors of the formation of natural gas hydrate.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; Permafrost; Natural gas hydrate