

渤海中部海底恒温层温度及泥温相位随深度变化特征*

刘文通 徐德伦 王正林

(青岛海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266003)

宋珊 吴述礼

(中国海洋石油开发工程设计公司, 塘沽 300450)

提要 利用渤海中部两点一年中4个季节泥温观测资料, 近似确定两测点海底恒温层泥温分别为11.0℃和11.7℃。认为泥温随深度变化可视为一垂向波-泥温波, 并利用这一概念分析了泥温相位随深度变化特征, 8#, A(B)平台测点泥温波波长分别为 $l_8=8\text{m}$ 和 $l_{A(B)}=10\text{m}$ 。研究建议, 以0.5m处多年泥温平均值作为海底恒温层温度。

关键词 泥温 恒温深度 相位 热扩散率 泥温波

恒温层深度及其相应的温度在一定程度上反映一个海区海底浅层(以下简称海底)热状况和热历史。了解一海区的恒温层深度及其温度对评价深层泥温、地热资源普查和勘测、石油和天然气资源钻探和开采具有实际意义。

目前, 我国已对地热进行过某些研究, 但对海底热状况特别是浅层海底泥温的研究几乎为空白。作者曾利用渤海海域两点(见图1)一年中4个季节实测泥温资料对该海域水温及泥温铅直分布特征进行过初步探讨(刘文通, 1993)。本文主要研究渤海中部海底恒温深度上的温度及泥温相位随深度变化特征。

1 渤海中部海域海底恒温层深度

渤海属典型的内陆海。该海域太阳辐射具有明显的日、年、多年周期变化, 特别是日、年周期变化明显。以太阳辐射作为“周期热源”的海水和海底泥温也具有相应周期变化。经验和现场观测表明, 在上述3种周期性太阳辐射中, 以年周期太阳辐射对海水及海底泥温影响最显著。因此, 本文在分析泥温变化特征时, 仍然只考虑其年变化周期。

海底泥温除间接受太阳辐射影响外, 还受到来自地球内部地热的影响, 但经验表明, 这种影响极小: 大地热流对地球表面温度的直接影响小于0.02℃(O. 卡普迈耶等, 1981), 因此, 地热对海底泥温的影响可忽略不计。

因地球表面温度几千年来没发生多大变化, 所以, 在研究海底泥温变化规律时, 可不

* 中国海洋石油开发工程设计公司“海上温湿观测及研究”项目资助。刘文通, 男, 出生于1940年8月, 副教授。

苏育嵩教授提出过修改意见, 谨志谢意。

收稿日期: 1993年12月25日, 接受日期: 1994年3月15日。

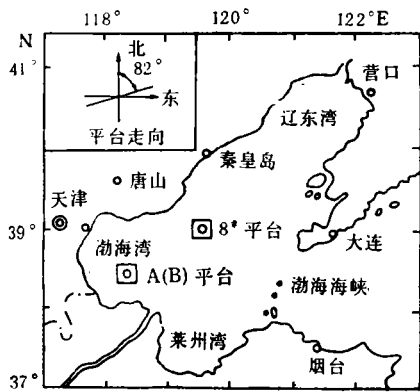


图 1 8#, A(B) 平台测点位置

Fig. 1 Locations of 8# and A(B) measurement sites in the Bohai Sea

考虑其初始条件。若将海底视为平面,并把地球深度视为半无限、将泥温年变化视为谐变化(主频为年变化)的热传导问题,则海底以下 z 处(令海底处 $z = 0$) 的泥温可表示为:

$$T(z,t) = T_0 + T_{s_0} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} z} \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} z\right)$$

(1)

不同深度泥温年变化振幅为:

$$T_s = T_{s_0} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} z}$$

(2)

以上二式中: T_0 为年平均温度; T_{s_0} 为泥表 ($z = 0$) 温度振幅; $\omega = 1.99 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$, 泥温年变化圆频率; κ 为热扩散率,由泥温实测值通过(3)式计算:

$$\kappa = \frac{(z_1 - z_2)\pi}{(\ln T_1 - \ln T_2)\tau}$$

(3)

其中: T_1, T_2 分别为 z_1, z_2 处实测泥温值; τ 为泥温年变化周期,此处取 $\tau = 365\text{d}$ 。

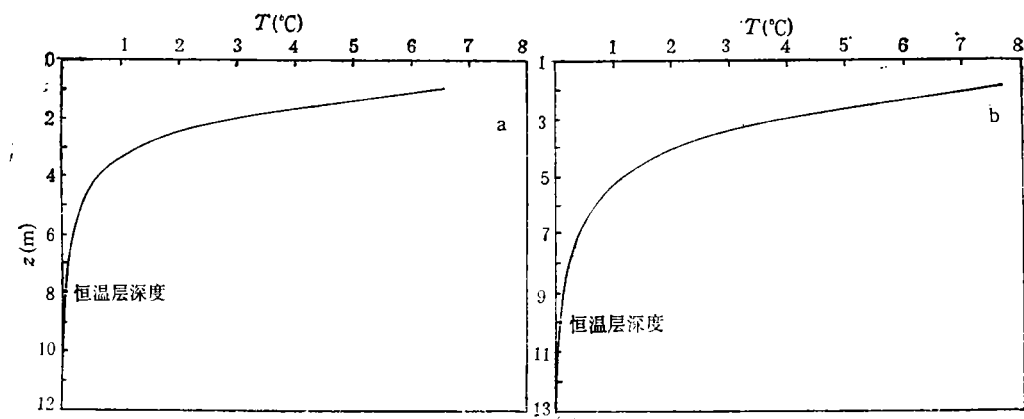


图 2 泥温年变幅随深度变化

Fig. 2 Year's soil temperature range changes with depth in the Bohai Sea

a. 8# 平台测点; b. A(B) 平台测点。

作者已利用式(2)计算出泥温年变幅(为振幅的 2 倍)随深度的变化规律,并用泥温年变幅 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ 作为标准定义了恒温层深度,得到了两测点的恒温层深度(刘文通,1994)。为进一步分析 8#, A(B) 平台两测点恒温层泥温及泥温相位随深度变化规律,此处引用其中的两测点泥温年变幅随深度变化关系(图 2)。从图 2 可以看出, 8# 及 A(B) 平台测点恒温层深度约分别为 8m 和 10m。

2 恒温层泥温值分析

恒温层(点)为地球内热与太阳辐射热相互影响达到平衡的深度。恒温层的深度及其相应的温度在一定程度上反映一个海区海底浅层热状况和热历史,了解海区的恒温层深度及其温度对评价深层泥温、地热资源普查和勘测、石油和天然气钻探和开采等具有实际意义。

如上所述,根据现场泥温观测资料,由式(2)容易计算出不同测点处恒温层深度。研究表明,陆地恒温层深度一般为 20—40m 左右(因受纬度、地面坡度、地面植被、湿度等因素影响,各地有差异),恒温层温度接近当地多年平均地面温度(0m 深地温),高于当地多年平均气温 $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ 或 $1.5\text{--}3^{\circ}\text{C}$ (中国科学院地质研究所地热组 1978),且随纬度降低而升高。我国地热研究证实了这一结论,如唐山地区恒温层深度平均为 35m,恒温层地温平均为 12.7°C ;河南平顶山地区为 25m, 17.2°C ;安徽庐江罗昌河地区为 25m, 18.9°C (中国科学院地质研究所地热组,1978)。

从表 1 可以看出, 8#, A(B) 平台两测点泥表温度平均值分别为 10.6°C 和 11.5°C ; 0.5m 深处分别为 11.0°C 和 11.7°C 。0—2m 深度(4 层)泥温年均值分别为 11.0°C 和 12.0°C 。从该表还可以看出,各层泥温年均值相差甚小,其均方差分别为 $\sigma_8 = 0.2^{\circ}\text{C}$ 和 $\sigma_{A(B)} = 0.4^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 8#, A(B) 平台测点实测水、泥温年均值

Tab. 1 Average of the measured water and soil temperatures for one year at 8#, A(B) sites in the Bohai Sea

深度 (m)	8#($^{\circ}\text{C}$)	A(B) ($^{\circ}\text{C}$)
5	12.7	12.0
10	10.5	11.3
25	10.9	
泥表	10.6	11.5
0.5	11.0	11.7
1.0	11.2	12.1
2.0	11.2	12.6

象陆地上观测多年气温和地表温度一样进行多年海底泥表温度观测有很多困难。因此,在目前尚无多年海底泥表及不同深度泥温资料情况下,我们试借鉴陆地地温研究成果。由于海底与海水间的关系极类似于陆地与大气之间的关系,因此,我们可以推想海底泥表温度与恒温层温度、陆地地表温度与恒温层温度间应存在着类似的关系。

类似地,若取海底泥表年平均温度作为恒温层温度,则 8#, A(B) 平台测点恒温层泥温分别为 10.6°C 和 11.5°C ;若取 0.5m 深度的年平均泥温作为恒温层温度,则两测点恒温

层的泥温分别为 11.0℃ 和 11.7℃。

由泥表和 0.5m 深度泥温作为恒温层温度，两测点分别相差 0.4℃ 和 0.2℃。若以后者为准，则两种方法得到的恒温值相对误差分别为 3.6% 和 1.7%

3 泥温相位随深度的变化

理论和现场观测表明，泥温不仅年变幅随深度的增加呈指数规律减小，而且温度相位依次滞后。作者已从理论上计算和分析过渤海 8[#]，A(B) 平台两测点泥温年变幅随深度的变化特征(图 2)。

泥温相位随深度变化主要取决于海底物质的热扩散率 κ ，而 κ 又是由观测资料计算得到的，因此，现场观测资料的质量会直接影响到泥温相位的计算结果。由于目前只有渤海湾两测点一年中 4 个季节(代表月份分别为 1, 4—5, 8, 10—11 月)的泥温实测资料(刘文通, 1993)，而且由于观测仪器设备的限制观测的深度也还不够深，因此，不可能完全依据这些实测资料找出泥温相位随深度变化特征。下面采用一种半经验半理论的方法：首先，依现有资料，由式(3)计算 κ ，然后代入下式计算泥温相位与深度的关系：

$$\varphi = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} z$$

(4)

计算结果列入表 2 并绘于图 3。

表 2 8[#], A(B) 平台泥温相位随深度变化

Tab. 2 Soil temperature phase changes with depth at 8[#], A(B) sites in the Bohai Sea

深度 (cm)	泥温相位移(弧度)		泥温年变幅(℃)	
	8 [#]	A(B)	8 [#]	A(B)
0	0	0	13.6	23.5
50	0.3825	0.2938	10.8	20.0
100	0.7650	0.5858	6.6	13.6
200	1.5300	1.1716	3.1	7.6
300	2.2950	1.7574	1.4	4.1
400	3.0600	2.3432	0.6	2.3
500	3.8250	2.9290	0.4	1.3
600	4.5900	3.5148	0.2	0.7
700	5.3550	4.1006	0.1	0.4
800	6.1200	4.6864	0.1	0.2
900	6.8850	5.2722	0.0	0.1
1 000		5.8580		0.1
1 100		6.4438		0.0

从图 3 可以看出，不仅泥温年变幅随深度的增加迅速减小，而且泥温相位依次滞后，而滞后的快慢完全取决于 κ 。8[#], A(B) 平台两测点无论是泥温年变幅还是相位随深度变化之间的差异均为 κ 所致。

若将泥温随深度的变化视为一垂向波动-泥温波，则 8[#] 和 A(B) 平台两测点泥温波的波长分别为 $l_8 = 8\text{m}$ 和 $l_{A(B)} = 10\text{m}$ 。于半波长深度，泥温相位恰好与泥表相反，即 8[#] 平台测点：夏季泥表温度最高，而 4 m 深处温度最低，于冬季，泥表温度最低，4m 处温

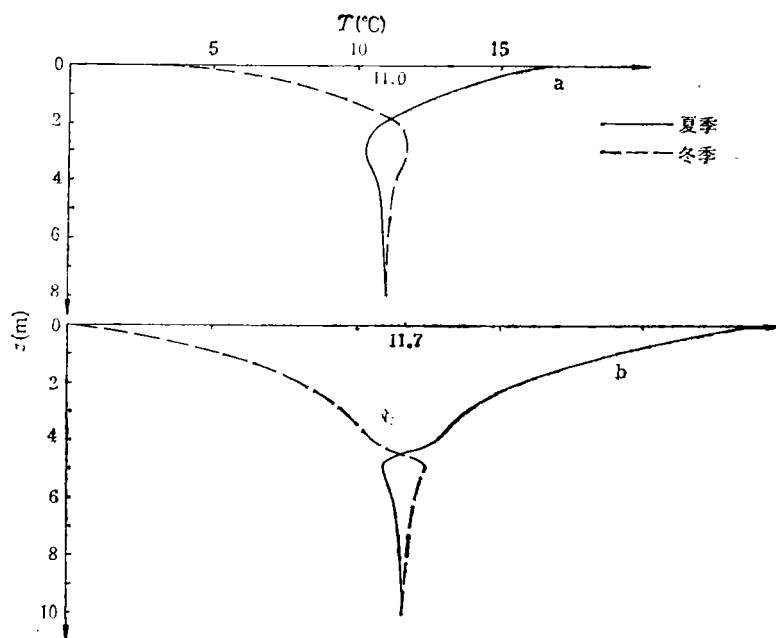


图3 泥温相位随深度变化

Fig. 3 Soil temperature variation in phase with depth in the Bohai Sea

a. 8# 平台测点; b. A(B) 平台测点。

度最高; A(B) 平台测点, 于 5m 深处, 泥温相位与泥表恰好相反。

4 结果与讨论

4.1 海底泥温振幅和相位随深度变化特征主要取决于海底物质的热扩散率 κ 。 κ 为由实测泥温计算的近似值, 因此, κ 值的精度直接影响到有关泥温分布特征。另外, 由于现场泥温测量精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 所以本文采用泥温年变幅 $\leq 0.1^\circ\text{C}$ 的深度作为恒温层深度。

4.2 由泥温相位移计算得到的 8#, A(B) 平台测点的泥温波波长与由 κ 直接计算得到的恒温层深度完全一致, 约分别为 8m 和 10m。

4.3 8#, A(B) 平台两测点泥温相位随深度变化规律相同; 但量值不同: 前者于 $z = 4\text{m}$ 深处泥温相位与泥表相反, 而后的反相点为 $z = 5\text{m}$ 。两测点泥温“反相点”深度不同主要是由水深、地质结构等因素造成的。

4.4 根据一年中分 4 个季节进行的泥温现场测量以及参照有关陆地地热研究结果, 本文提出的以泥表或 0.5m 深度多年泥温的平均值作为与恒温层相应的泥温, 都是近似的。目前, 由于还没有多年实测资料进行验证, 所以只能作为一种推测。至于文中仅用了一年的实测资料分析恒温层泥温, 也是近似的。

4.5 由于 0.5m 深度处年均泥温与泥表(水、泥界面)相差不大, 而且数据较稳定, 另外, 测量也较准确(测量泥表温度时很难将温度传感器恰好放置到泥表, 即 $z = 0$ 处), 因此, 建议以 0.5m 处多年泥温均值作为相应的恒温层泥温, 即 8#, A(B) 平台两测点的恒温层泥温分别为 11.0°C 和 11.7°C 。

4.6 根据理论计算得到 8# 平台测点与泥表温度相位相反的深度应为 $z = 4\text{m}$, 但由温度振幅与深度关系计算的结果略微偏小(如图 3), 这是由计算精度产生的。

4.7 本文所用分析海底恒温层深度、泥温相位随深度变化规律的方法具有普遍性, 但因所得结果是来自渤海中部海域两测点的实测资料, 因此, 这些结果又具有一定的局限性, 但对渤海其它海域仍有重要参考价值。

参 考 文 献

中国科学院地质研究所地热组, 1978, 地热研究论文集, 科学出版社(北京), 48, 124, 127。

刘文通, 1993, 渤海中部海底泥温铅直分布特征以及与水温的关系, 海洋与湖沼, 24(6): 584—590。

O. 卡普迈耶, R. 海涅尔, 北京大学地质学系地热研究室译, 1981, 地热学及其应用, 科学出版社(北京), 63。

刘文通, 1994, 渤海中部海域海底热扩散率及恒温层深度研究. 青岛海洋大学学报, 24(4): 185—490。

SOIL-TEMPERATURE AT THE DEPTH WITH CONSTANT TEMPERATURE AND PHASE CHARACTERISTICS OF SOIL TEMPERATURE PROFILE IN CENTRAL BOHAI SEA

Liu Wentong, Xu Delun, Wang Zhenglin

(Physical Oceanography Lab., Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

Song Shan, Wu Shuli

(Bohai Petroleum Company, Tanggu 300450)

ABSTRACT

In situ data measured in the representative months (Jan., Apr.—May, Aug., Oct.—Nov.) and the thermal conduction equation were used to calculate the soil depth with constant temperature (DCT) for two sites in the central part of the Bohai Sea. The calculated DCT was about 8m at site 8# and 10m at site A(B) with the DCT criterion being that the annual variation of soil temperature is equal to or less than 0.1°C . In the light of the results and with those on terrestrial soil temperature as reference, it is proposed that the multi-year averaged soil temperature at 0.5m below the sea-bed could be taken as the temperature at the DCT, being 11.0°C and 11.7°C at the two sites, respectively.

The calculated results also show that the soil-temperature variation with depth can be considered to be a vertical wave-soil temperature wave, with its wave length equaling the length of the soil layer with varying temperature, i.e., the length from the sea-bed surface to the DCT, 8m at site 8# and 10m at site A(B). At the depth of half wave-length, the phase of the soil temperature is opposite to that at the sea-bed surface. In summer, the soil temperature is maximum at the sea-bed surface and minimum at the depth of half wave-length; the situation is contrary in winter.

Key words Soil temperature Soil depth with constant temperature (DCT) Phase Thermal dispersion rate Soil temperature wave