

东海北部底层冷水及双跃层初析

苏育嵩 李凤岐 马鹤来 钱清瑛
(青岛海洋大学)

提要 本文着重探讨东海北部区域底层冷水的形成和季节变化过程,指出北部冷水系冬季黄海沿岸水南下向东海输送低温水,并与外海高盐水混合变性形成的,它具有明显的移动规律。阐述了黄海沿岸水沿陆架下沉与黑潮次-中层水爬升的关系及其对北部冷水的影响。本文还分析了济州岛南部区域双跃层现象的类型及其波状结构的成因。发现上、下跃层之间存在着“跃层间环流”,它将导致双扩散的发生和有利于双跃层的维持。

黄、东海区水团环流研究已有许多成果,其中关于黄海冷水团、长江冲淡水 and 江浙沿岸流等研究较深入,但仍然有许多海洋学现象研究不够或很少为人所重视。本文试图对东海北部区域底层冷水团和济州岛南部海区中层春季的双跃层现象作进一步探讨。使用

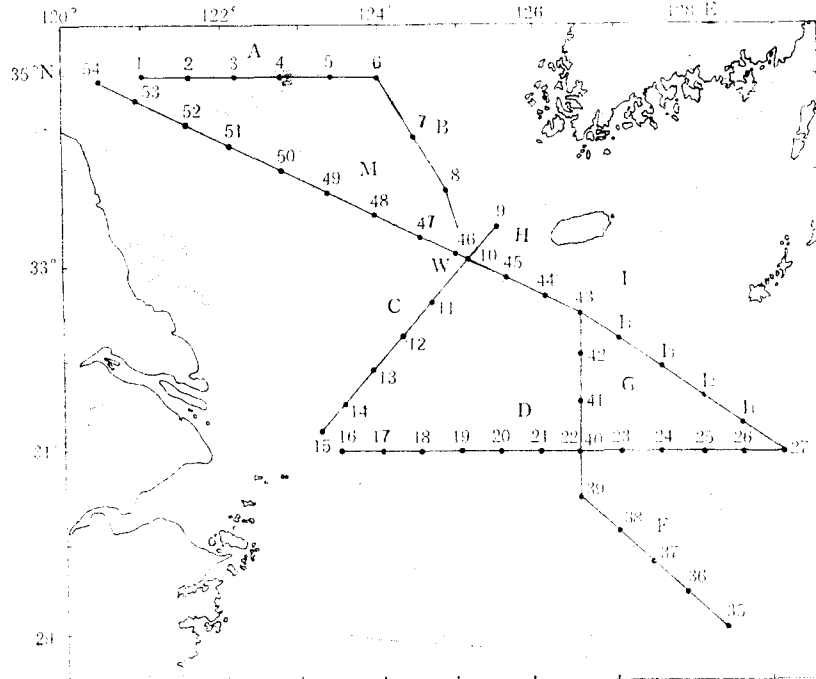


图1 调查断面及站位

Fig. 1 Stations and sections investigated

A—I 为断面号。

收稿日期: 1988年2月3日。

CTD 资料将有助于对上述问题的深入研究。观测资料以“东方红”调查船 1987 年 5—6 月间的东海调查为主,同时参照该船 1981—1982 年间 4 个航次的调查资料。1987 年的调查站位如图 1 所示。

一、东海北部区域底层冷水团

东海北部区域底层冷水团(简称北部冷水),也称东海中部底层冷水团^[2],位于黄海冷水团南部,系春、夏季出现于东海北部底层的冷水。国内外学者对于这一冷水的存在、形成原因及其多年变动曾作过初步分析^[1-3,4-6],其中文献[2]还论及了北部冷水与其周围流场及与黄海冷水团的关系。但对于该水团的季节消长过程的讨论尚不够深入。为了进一步探讨这些问题,有赖于利用一年四季完整的调查资料。

1. 北部冷水的形成与变动

文献[2]中曾指出,“北部冷水系冬季黄海沿岸水南下向东海输送低温水并与外海高盐水混合变性形成的”。这里所指黄海沿岸水是包括南下的苏北沿岸水及至长江口以北离岸朝东南方向继续进入东海的水,这两部分是长年存在的沿岸水系。但对本文所讨论

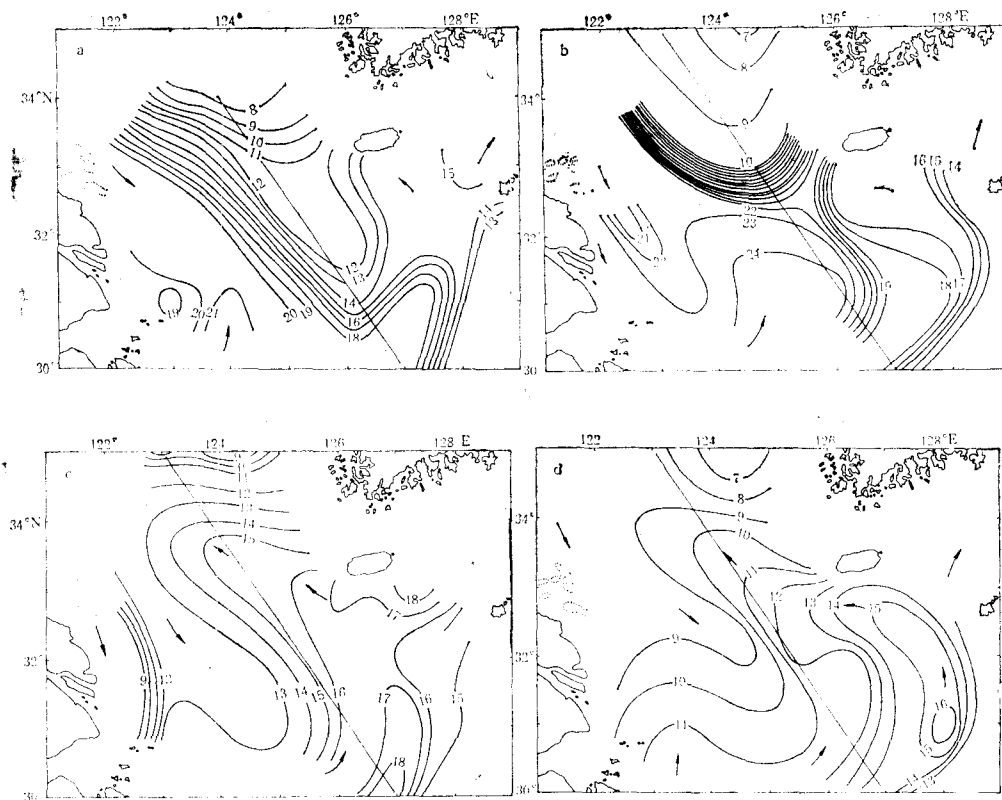


图 2 黄东海底层温度分布(1981—1982)

Fig. 2 Bottom temperature distribution in the Huanghai Sea and East China Sea (1981—1982)

a. 6 月; b. 9 月; c. 12 月; d. 3 月。

的北部冷水有直接关系的是离岸进入东海的这一部分水体。冬季,它具有低温性质,有人称为黄海冷水;春季,因沿岸增温激烈,南下进入东海的水体不具有低温的性质,不能再以冷水命名,因此,对这一长年水系统称为黄海沿岸水。

图 2 为底层温度分布,其中 a—d 分别代表 1981 年 6, 9, 12 月和翌年 3 月,从图 2b 可以看出,秋初(9 月)长江口东北方近岸海区便有低温的迹象,其特征温度为 22°C ; 秋末(12 月,图 2c),黄海沿岸水轮廓已趋明显,其特征温度为 13°C ; 冬季(3 月,图 2d)最强盛,特征温度为 $9-10^{\circ}\text{C}$,并形成明显的低温水舌。此时,黑潮次-中层混合水尚未向陆架爬升,在黄海暖流及台湾暖流的作用下,一部分低温的黄海沿岸水向东扩展,并使东海北部的中部海区出现大片低温区;春季(6 月,图 2a),因沿岸水增温较激烈,此时南下进入东海的黄海沿岸水已是“高温”水,同时整个海区表层也增温,于是在东海北部的中部海区,底层冬季余留下来具有低温的黄海沿岸水便形成了北部冷水。此时北部冷水因受高温的黄海沿岸水的挤压,在继续东移的过程中形成半闭合形式而与黄海冷水团几乎联成一体,其特征温度为 12°C 。但是东海北部海区的自然环境不利于北部冷水长期存在,入秋后,它受到上层冷却对流作用,还受到西侧高温的黄海沿岸水与南部外海水的挤压以及强盛的黑潮次-中层混合水爬升的共同胁迫而逐渐向北收缩。其寿命较黄海冷水团短得多,于 9 月份便已“融入”黄海冷水团而消失(图 2b)。由此可知,北部冷水是冬季黄海沿岸水在夏季的延续,在分析其消长过程时应将两者连贯起来考虑。这样,北部冷水的消长过程便可分为四个阶段,即冷水舌离岸期(秋末、冬季),北部冷水半闭合期(春季、夏初)、北缩消亡期(夏末,秋初),以及几乎与消亡期同时发生,或稍后一些的更新期。

根据以上分析,北部冷水边界位置的季节变动,可由其特征温度线来表征。在图 3 中,9, 12, 3 和 6 月的特征温度分别为 22, 13, 10 和 12°C 。由图可看出,北部冷水系先由西向东移动,形成半闭合北部冷水后再由南向北收缩而消失,在一年中构成一位移循环。

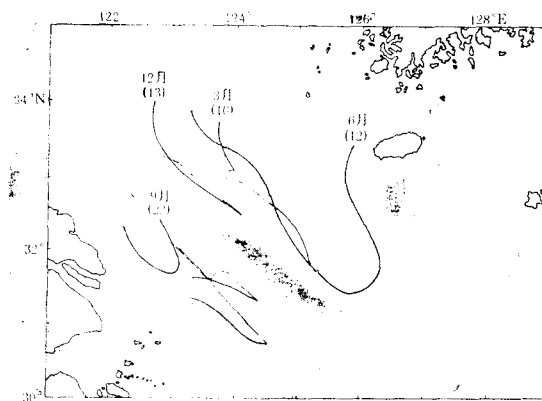


图 3 北部冷水边界的季节变动(1981—1982)

Fig. 3 Seasonal variation of the boundary of Northern Cold Water (1981—1982)

图 4 为由西北至东南斜穿海区的四个季节的温度断面分布(参看图 2 中的斜线)。由图 4 可见,12 月(图 4c)低温水舌并未穿过断面,在断面图上只呈现出黄海冷水团的边界。

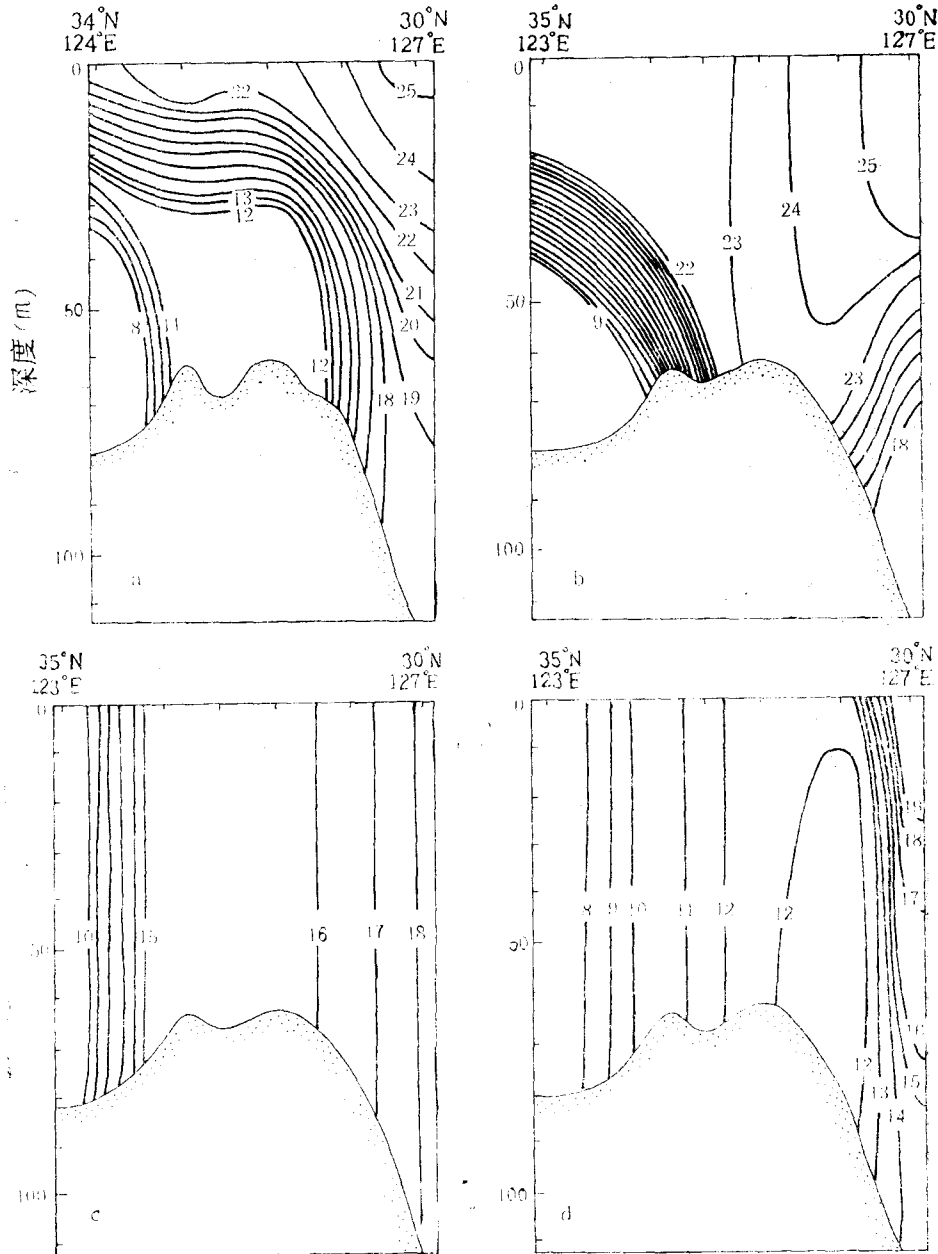


图4 黄、东海温度断面分布(1981—1982)

Fig. 4 Sectional distribution of temperature in the Huanghai Sea and East China Sea

a. 6月; b. 9月; c. 12月; d. 3月。

3月(图4d), 北部冷水的前缘穿过断面, 在断面图上出现两个“低温中心”。其实, 此时北部冷水在大面图上并未形成封闭的低温中心, 因此不宜仅从断面图上推测而称其“低温中心”。6月(图4a), 北部冷水正好通过断面, 从图中可以看出它已与黄海冷水团相联, 在其南部明显地形成一片低温区, 两者并非完全独立(即未形成两个低温中心), 其温度分布仍

然是连续的。有些年份两者可能相互独立而形成两个低温中心, 这要在冬季黄海沿岸水较强的年份才可能出现。9 月(图 4b), 表明其并入黄海冷水团而消失。

2. 黄海沿岸水沿陆架下沉与黑潮次-中层混合水的爬升

黄海沿岸水在底层有沿大陆架向东南下沉扩展的趋势, 与此同时, 黑潮次-中层混合水也有沿大陆架爬升(简称黑潮爬升水)的趋势, 两者互为消长。由于调查海区主要在济州岛南部海区, 本文便以讨论该海区为主。图 5 是调查海区 1987 年 6 月底层的温度和盐度分布图; 图 6 是 HI, D 和 F 三个断面的温度分布。根据上述资料, 本海区底层存在两条锋带, 一为北部冷水边界, 另一为黑潮爬升水的界限。我们分别在 HI, D 和 F 断面处取 14, 13 和 17°C 作为北部冷水的边界; 同样根据以上断面, 在陆架突然变陡处分别取 14, 13 和 17°C 作为黑潮爬升水的界限(简称爬升线), 在图 7 中以实线表示。由北部冷水边界向东南至爬升线的区域中底层有一片温度均匀区, 温度在 13—14°C 之间, 它们都属混合水, 但济州岛南部区域(参看 HI 断面)的混合水与北部冷水周围的混合水(参看 D 断面)并非同源。为便于区分, 我们参考 34.00‰ 盐度线在图 7 中以虚线标出。在虚线以内围绕北部冷水盐度低于 34.00‰ 的水体属于冷水团系统, 它表明黄海沿岸水扩展的范围(故称此线为扩展线); 济州岛南部靠近爬升线一侧盐度高于 34.00‰ 的水体属于外海水系。这里所指外海混合水, 系冬季黄海暖流带来的, 而当春季形成黄海冷水团后, 在底层受阻于冷水团边界处。由于表层仍有黄海暖流存在, 且黑潮爬升水也间接地给于一定的推力, 因此在冷水团边界处出现逆温和其他海洋学现象。

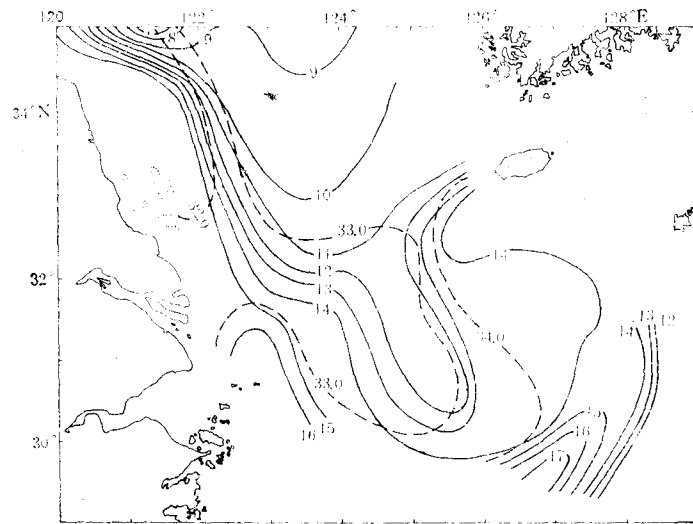


图 5 调查海区 6 月底层温度、盐度分布(1987)

Fig. 5 Bottom distribution of temperature and salinity in investigative area in June (1987)

——温度(°C); - - - - -盐度(‰)。

北部冷水与黑潮爬升水的季节变动可参见图 8。3 月, 北部冷水最强盛期, 扩展线达最东南, 而黑潮爬升水则较弱, 爬升线大约在 110—120m 等深线处; 6 月, 黑潮爬升水已经增强, 并向西爬升至 100m 等深线处, 扩展线向西退缩; 9 月是黑潮爬升水势力强盛期,

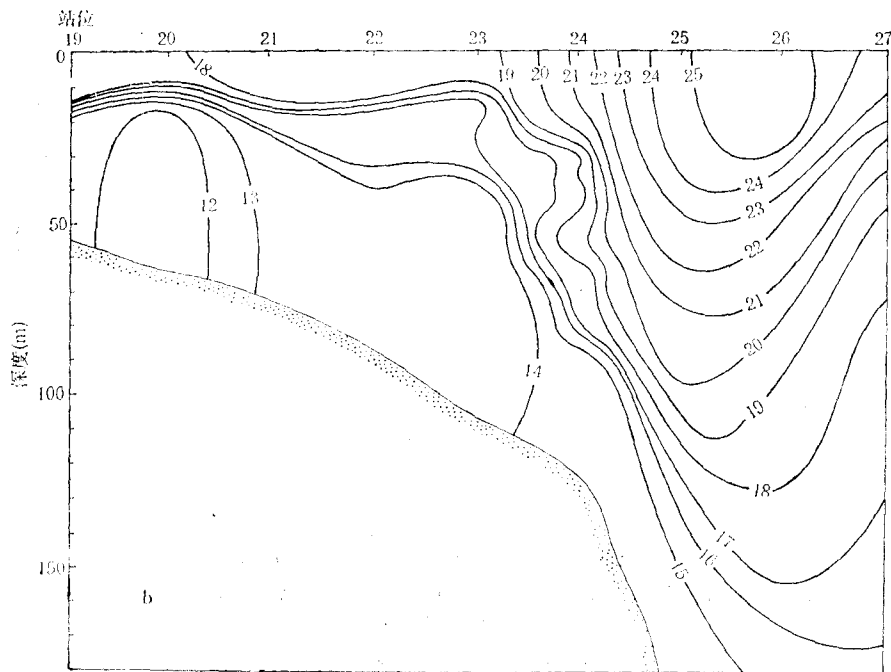
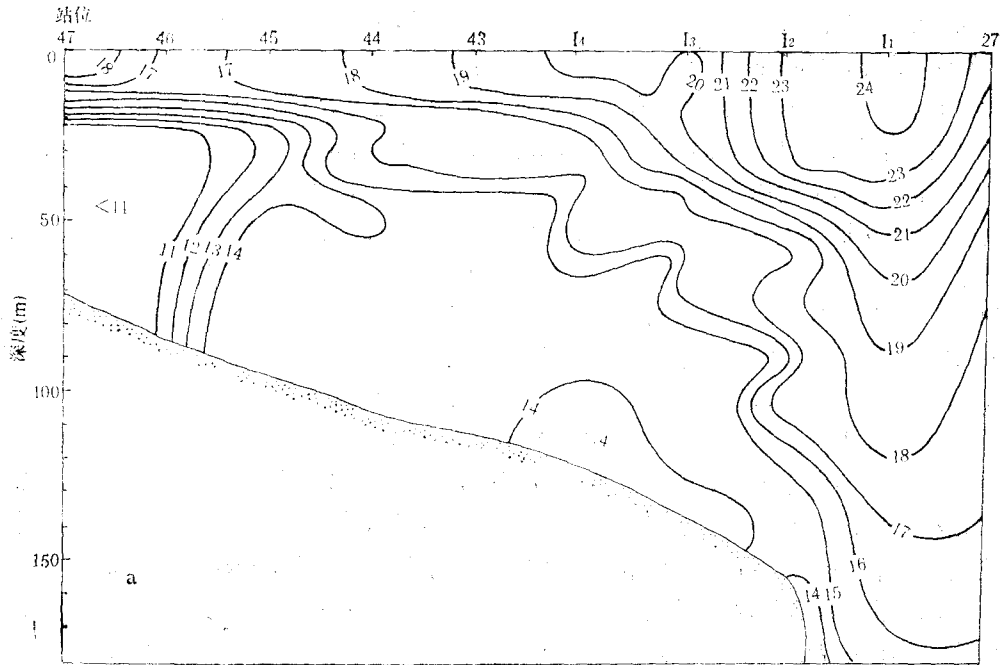
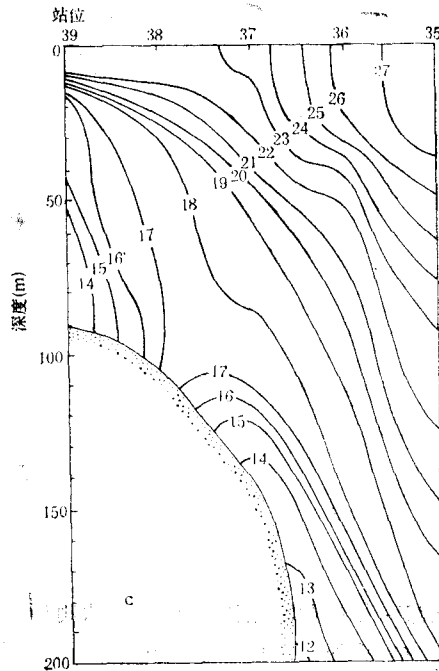


图 6 各断面温度分布(1987)

Fig. 6 Temperature distribution on each section

a. HI 断面; b. D断面; c. F断面。



(续图 6)

爬升线伸展到 70—90m 等深线处。前已述及,它是使北部冷水消亡的主要动力因素之一。只有黄海冷水团占据着爬升水动力作用势力范围之外的有利位置,得以保持较长的时间。

3. 北部冷水与黄海冷水团的关系

在水团分析中,往往把半闭合后的北部冷水并入黄海冷水团中。这是因为两者的温、盐性质相近,应用一般的分析方法无法区分它们。此外,这两者还有许多共同性的特征。例如:(1)两者都具有低温特征。黄海冷水团在其存在期间的温度在 6—12℃ 之间;北部冷水的温度从 9℃ 延至 20℃ 左右,均比其周围的温度为低。两者的盐度均介于外海高盐水与沿岸低盐水之间,前者在 31.60—33.00‰ 之间,后者在 32.00—34.00‰ 之间。因此可用“低温中盐”来代表这两部分底层冷水的温、盐特征。(2)两者都具有地区性的特征,都是冬季外海水与沿岸水混合变性作用在当地形成的,它们与黑潮爬升水并不同源。黑潮爬升冷水能够得到外海冷水的不断补充,而以上两个底层水形成后将孤立存在,得不到外来冷水的补充,只在冬季得以更新。(3)都属于季节性水团,并不长年出现,它们具有生消周期,且与温跃层的消长变化是一致的。

北部冷水和黄海冷水团也存在明显的差异。例如:(1)其形成的区域和方式并不相同。前已述及,北部冷水是黄海沿岸水南下向东海输送低温水并与外海高盐水混合变性(增温、增盐)形成于东海北部;而黄海冷水团是黄海暖流北上向黄海输送高盐水并与沿岸水混合,在当地冷却变性(降温、降盐)形成于黄海。(2)促使其消亡虽然都是热力因素与

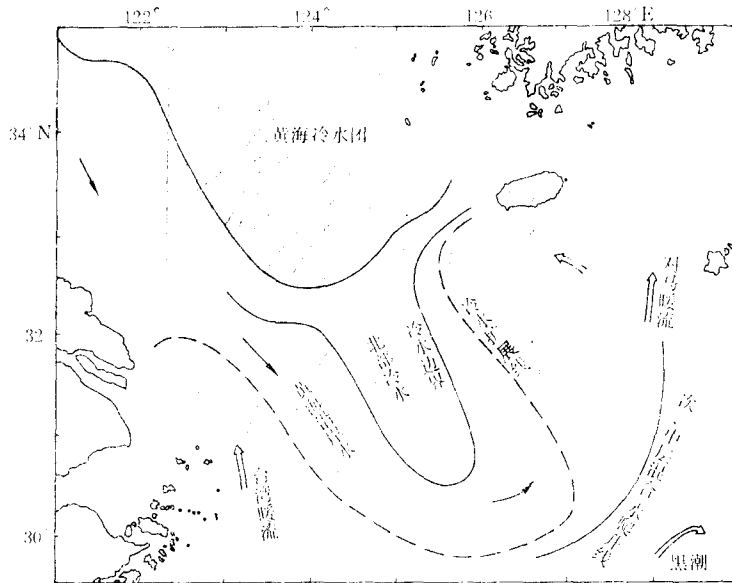


图7 北部冷水边界及黑潮次-中层混合水爬升线(1987)

Fig. 7 Boundary of Northern Cold Water and Climbing line of Kuroshio Subsurface-Intermediate Mixed Water (1987)

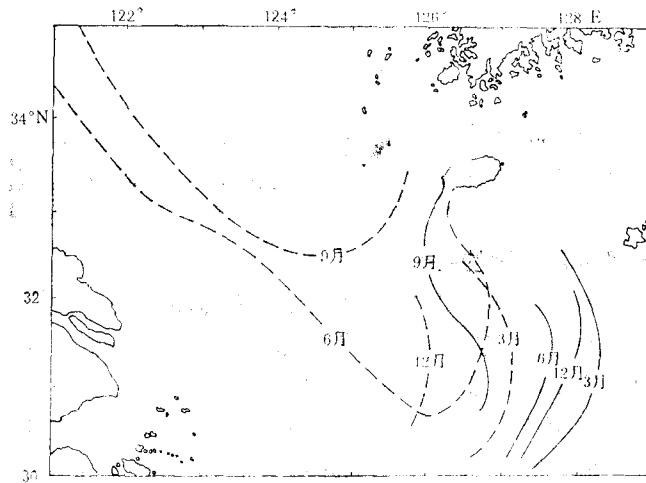


图8 冷水扩展线与黑潮次-中层混合水爬升线的季节变动(1981—1982)

Fig. 8 Seasonal variation of cold water extension line and Kuroshio Subsurface-Intermediate Mixed Water climbing line (1981—1982)

---冷水扩展线; ——次、中层混合水爬升线。

动力因素共同作用的结果,但黄海冷水团的消失主要因冷却对流作用,而北部冷水的消失除冷却作用外,还受到两侧海水的挤压,因此有明显的位移。(3) 北部冷水形成于冬季,在动力作用下沿陆架向东扩展而保持其冷水性质,不太依靠表层的增温;而冬季北上的黄海暖流虽然已降温,但春季必须通达表层增温才体现出冷水性质。照此分析,北部冷水出现较早,但如果从构成半闭合形成时正式称为北部冷水的话,则其形成比黄海冷水团晚而消

亡则较早。

二、济州岛南部区域的双跃层现象

黄、东海在暖半年有许多区域存在温度的双跃层现象。本文讨论的是济州岛南部区域具有特殊形式的双跃层及其波状现象。双跃层的范围大体上位于北部冷水边界至黑潮爬升线之间的区域内。其他区域一般为单跃层, 而双跃层范围不大。

1. 跃层类型及其成因

图 9 表示跃层类型及其相应的代表站位的实测水温垂直分布。应该说明的是, 所有上跃层都是表层增温形成的。对于类型 a, 是简单的单跃层。类型 b 是典型的双跃层, 下跃层因底层存在冷水而引起, 而且上、下的作用尚未连成一体。在济州岛南部海区, 底层冷水有来自北部冷水的下沉扩展 (21 站), 也有的来自外海水 (44 站)。例如: 在南部 (D 断面), 冷水保持一定的厚度 (大约 50—60m) 沿坡下沉, 当深度增加时, 跃层便分开而形成双跃层, 而且双跃层间的距离随海区深度的增加而加大; 在北部 (HI 断面) 的底层冷水乃是冬季留下来的黄海暖流水, 也保持一定的厚度与上跃层没有联接而形成双跃层。c 类型则因下层有暖水存在而出现逆温。如 15 站下层有台湾暖流水, 中层为冬季余留冷水, 表层增温尚未达此层^[4]; 而 45 站则在冷水团边缘, 有冷水从中层流出, 同时底层又有温度较高的余留黄海暖流水的存在。

d 类型是中层存在逆温现象的双跃层 (23 站), 逆温的主要成因是下跃层上部有暖水侵入, 或者同时上跃层下部还有冷水侵入。这是一个很有意义的现象。最复杂的 e 类型 (I₂ 站), 这是多跃层的类型, 在研究海区内主要是因不同温度的海水侧向侵入导致的, 大多发生在暖流一侧的锋带附近。

2. 双跃层的波状现象

图 10 是根据图 6 中 HI 断面和 D 断面的温度分布绘出的双跃层带。它们具有如下特点: (1) 从图中可以看出, 双跃层均发生在中层, 上跃层近于水平分布, 只在靠近对马

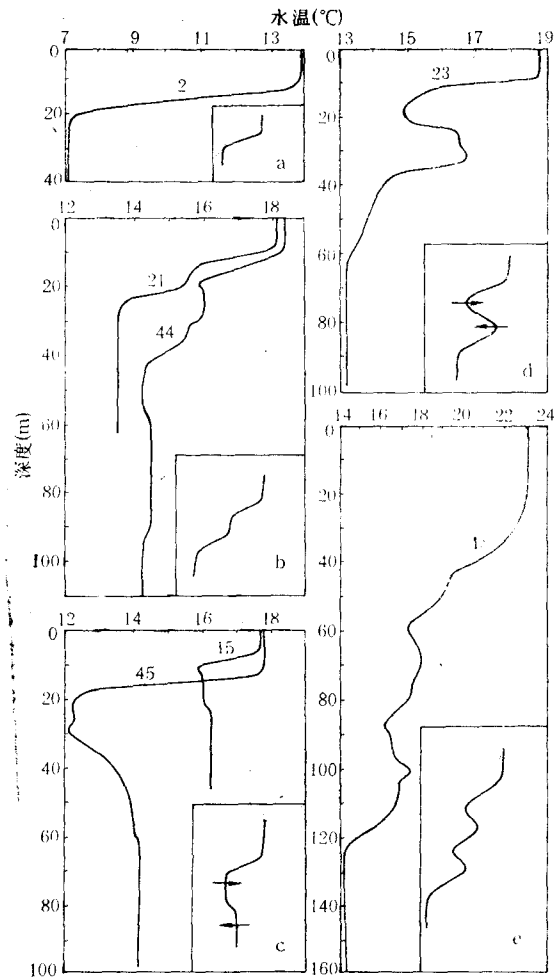


图 9 跃层类型及实测水温垂直分布(1987)

Fig. 9 Types of thermocline and actual vertical distribution of sea temperature (1987)

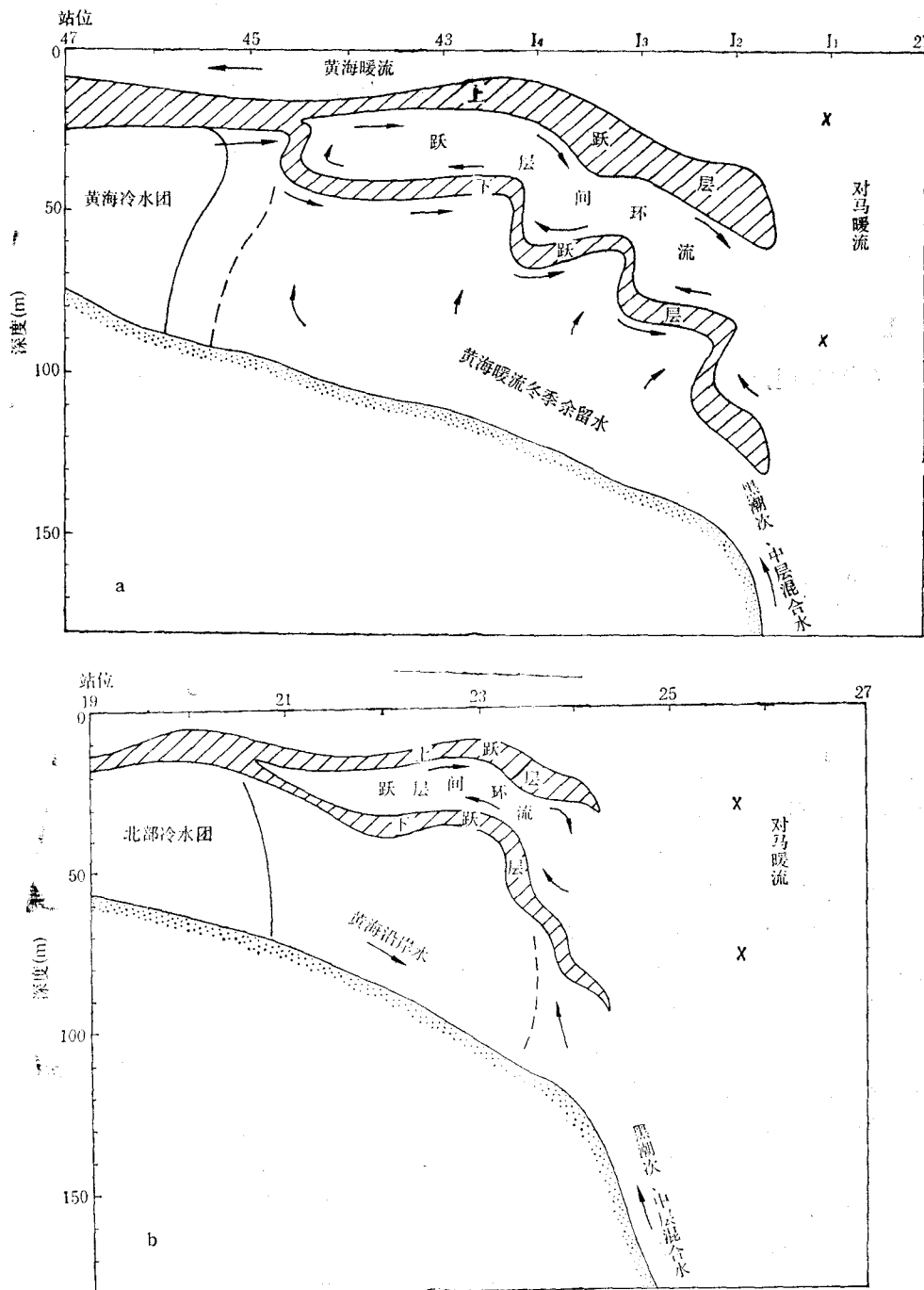


图 10 济州岛南部区域的双跃层(1987 年 6 月)

Fig. 10 Double-thermocline in the southern sea area of Cheju-do Island

a. HI 断面; b. D断面。

暖流的锋带处才逐渐向下倾斜;而下跃层几乎与海底倾斜度一致,随深度增加而下倾。(2) 双跃层起自水深 80—90m 冷水团本体边界附近,而止于陆架锋处,即海底坡度较平缓(约

150m 以浅)的区域。(3) 在其底层都有冷水存在,前已述及,这两个断面冷水性质相近而来源不同。以上特点对于分析双跃层的波状现象是有帮助的。

上跃层的下界和整个下跃层存在波状结构,这是个很有趣的海洋学现象。这种波状现象在下跃层(跃层强度约为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$) 表现特别明显,而且下跃层的波状在跃层下倾的区段尤为突出,宛如一条飘动的绸带。

引起跃层波状结构的原因可能有以下几方面:

(1) 强流锋区的侧向效应: 这种效应是海水流动中的不规则扰动引起的。暖流水不规则的侧向运动(暖水侵入),使下倾的跃层容易产生波状结构。

(2) 黑潮次-中层混合水的爬升: 次-中层冷水的上层部分沿坡爬升又推动前方水体的涌升。对于不同区段,其向上涌升的趋势不均匀时,将导致下跃层出现波状结构。特别在 D 断面,中层可直接涌升至 70m 处(图 10b),在此处容易形成小型的垂直环流^[2]。

(3) 黄海冷水团边缘密度环流引起的侧向流动: 在黄海冷水团强盛期,在其边缘等温线密集处形成一气旋式密度环流。由于黄海冷水团具有很好的垂直稳定度,限制海水在垂向上的运动。但在冷水团边缘区域,在密度环流的辐散作用下,容易使海水沿等温面产生水平的侧向运动(冷水侵入)。同时,爬升冷水前缘的混合水在冷水团底部的推挤作用,又加强了冷水团边缘顶部中层海水的侧向流动(参看图 10 的 HI 断面)。不论是暖水侵入还是冷水侵入都会导致跃层变动。

(4) 上、下层水体的流速、流向不一致引起的剪切作用也可能是发生跃层波状结构的原因之一。

3. 上、下跃层间的环流

正如上节跃层类型分析(d 型)所述,根据水温垂直分布所示,对马暖流的高温、高盐水向西的侧向入侵,一般是沿着下跃层上部流动(即产生下跃层的主要原因),而黄海冷水团(或北部冷水)的低温、低盐冷水向东的侧向入侵,却是沿着上跃层的下部流动。于是在上、下跃层之间(厚度大约 15—20m)的剖面上便形成了一个顺时针的环流(图 10),我们称其为“跃层间环流”。在跃层间环流上部是低温、低盐水,而其下部是高温、高盐水(其密度垂直分布仍然是稳定的),这种情况容易导致双扩散现象,从而增加该水层的稳定度。由此可知,只要跃层间环流存在,便有利于双跃层的维持。

参 考 文 献

- [1] 蓝淑芳、顾传成、傅乘照,1984。东海北部陆架区底层冷水的初步分析。海洋科学集刊,21: 75—85。
- [2] 苏育嵩,1986。黄、东海地理环境概况,环流系统与中心渔场。山东海洋学院学报,16(1): 12—27。
- [3] 胡敦欣、丁宗信、熊庆成,1984。东海北部一个气旋型涡旋的初步分析。海洋科学集刊,21: 81—98。
- [4] 翁学传,1984。东海西北部海域中层冷水的初步分析。海洋科学集刊,21: 63—73。
- [5] 井上尚夫,1975。东シナ海大陆棚上の海底流动。海洋科学,7(1): 12—18。
- [6] 深濑茂,1975。东シナ海陆棚上の底层水。海洋科学,7(1): 19—26。

A PRELIMINARY ANALYSIS OF THE NORTHERN BOTTOM COLD WATER AND DOUBLE-THERMOCLINE IN THE EAST CHINA SEA

Su Yusong, Li Fengqi, Ma Helai and Qian Qingying

(Ocean University of Qingdao)

ABSTRACT

In this paper, the formative causes, the elementary characters and the seasonal variational process of the bottom cold water in northern area of the East China Sea (named Northern Cold Water for short) are discussed with emphasis. It is pointed out that the Northern Cold Water is formed from the Huanghai Sea Coastal Water flowing southwards and transporting low temperature water to the East China Sea, where it mixes with and is modified by the high salinity water of open sea. The motion of Northern Cold Water has an apparent seasonal regularity, i.e., it first moves from the west to the east, then diminishes while moving northward. The whole variational process can be divided into four periods: the period of leaving coast of the cold water tongue; the period of semi-closing of the Northern Cold Water; the period of diminishing northwards and the period of regenerating. The causes of these variations are analysed and a detailed description is given of the relation between the lowering of the Huanghai Sea Coastal Water along the continental shelf and the climbing of the Kuroshio Subsurface-Intermediate Mixed Water and of its influence to the Northern Cold Water. The relation between the Northern Cold Water and the Bottom Cold Water Mass of the Huanghai Sea is also discussed.

The types and the causes of the double-thermocline discovered south of Cheju-do Island are analysed. Here we explain specially its wavelike phenomenon. It is pointed out that this phenomenon are mainly caused by the lateral effect of strong current front area, the climbing of the Kuroshio Subsurface-Intermediate Mixed Water, the sidewise current induced by the density circulation around the Huanghai Sea Cold Water Mass and the shear effect induced by the difference of current speeds and current directions between the upper layer and the lower layer.

It is also discovered that there is an inter-thermocline circulation in the double-thermocline, which is an interesting oceanographic phenomenon. It will generate double-diffusion and favour the maintainance of double-thermocline.