

东海西北部海域中层冷水的初步分析*

翁 学 传

(中国科学院海洋研究所)

海洋里很多地方都有中层冷水(中层低温水)存在,它与海水中声波传播的特性以及鱼群洄游等关系密切,所以,很早以前就引起了海洋学者的重视。例如,早在 1929 年, H. H. Зыбов 就研究并解释了极地海区中层冷水的形成原因^[6]。1945 年,他又进一步阐述了这一问题,指出:“中层冷水是由冬季垂直环流和夏季海洋表层的加热而形成的;它在春、夏季节出现于盐度垂直梯度极大的中、高纬度海域”^[7]。由于海洋学者们的努力,目前关于大洋和深海中中层冷水的特征及其成因,已研究得较为清楚。

东海西北部(28°—32°N, 124°E 以西)海域,位于陆架区,对这一海域的水文状况,特别是关于水团分布和跃层现象等问题,近二十余年来已进行过许多研究^[1,2]但对中层冷水则研究尚少。毛汉礼等在研究中国近海温、盐、密度的跃层现象时曾指出³⁾,在江浙外海水域,于 2—4, 5 月间出现逆温跃层。从实质上说,这已涉及到本文所讨论的中层冷水问题。中国科学院海洋研究所 1960 年的调查报告中曾指出²⁾,在东海西北部海域存在着温度较表层和深层为低的中层低温水。1961 年“金星”号调查结果证实,在东海西北部的广大海域内,存在着温度较其上、下层为低的水层;根据这次调查资料写成的调查报告,将其称为“中层冷水”³⁾,并认为:“中层冷水主要是由于南黄海冷水分支南下时,其上层受长江冲淡水以及太阳辐射的影响水温增高,而深层则受到北上的台湾暖流水的抬托而形成的”。为了进一步了解中层冷水的特征及其演变规律,“金星”号于 1962—1964 年的春季,又相继进行了几次专题性的调查。

本文根据 1958—1965 年间的有关资料,试图对东海西北部海域中层冷水的特征及其变化进行分析,并初步探索其成因。

一、中层冷水的基本特征

1. 中层冷水示性特征的确定

如上所述,迄今有关研究浅海中层冷水的文献甚少,分析研究这一现象的方法也极不

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 680 号。本文初稿写于 1963 年,现作了修改和补充。

本文承毛汉礼教授、尤芳湖副教授热忱指导,白少英同志绘图,李维淳同志参加初稿的部分统计和分析工作,特此致谢。

收稿日期: 1981 年 1 月 27 日。

1) 根据毛汉礼、邱道立 1964 年资料。

2) 根据中国科学院海洋研究所物理室 2 组 1960 年资料。

3) 根据尤芳湖等 1960 年资料。

完善,而浅海的中层冷水又复杂多变;所以,在讨论本海域中层冷水的基本特征之前,需要对中层冷水的含义及其有关示性特征加以说明。

中层冷水的含义 本文所称中层冷水,系指存在于浅海中层,水温较其上、下水层为低的那一部分中尺度水体。在这一水层中,上部水温随深度增加而降低(呈负梯度分布),而下部水温则随深度增加而增加(呈正梯度分布)。由偶然性因素而引起的个别测站或局部区域中间水层温度较低的现象,则不在本文研究范围之内。

中层冷水各项示性特征的含义 为了便于讨论中层冷水的特征及其变化,现将其各项示性特征的含义作如下规定(图1)。

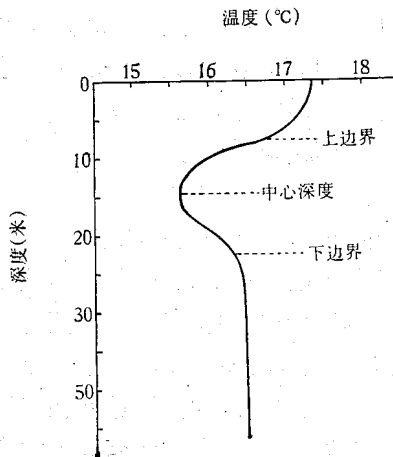


图1 中层冷水的模式

(1) 中层冷水的中心深度——指自海面向下,海水温度垂直梯度由负值变为正值处的深度。在一般情况下,亦即水温垂直分布曲线上温度最低处的深度。

(2) 中层冷水的中心温度——指中层冷水中心深度处的温度值。

(3) 中层冷水的上边界——指中心深度上方,水温垂直分布曲线最大曲率处的深度,也就是正温跃层顶界的深度。

(4) 中层冷水的下边界——指中心深度下方,水温垂直分布曲线最大曲率处的深度,也就是逆温跃层底界的深度。

(5) 中层冷水的厚度——指中层冷水上、下边界之间的深度差。

(6) 中层冷水的强度——指中层冷水上界和下界温度的平均值与中心温度值之差,除以二分之一厚度所得的结果。

2. 中层冷水的地理分布

根据1958—1965年的观测资料绘制温度垂直分布曲线,而后按上述规定,从这些曲线上(同时参照BT资料)确定中层冷水的各项示性特征。现将中层冷水的各项示性特征的地理分布情况,简述如下。

中层冷水出现的范围 对上述观测资料初步分析后得知,中层冷水出现的地点和范围虽然各年不尽相同,但总的说来还比较稳定,大致出现于 $29^{\circ}00' - 31^{\circ}00'N$, $124^{\circ}00'E$ 以西的海区内。

中层冷水中心深度的分布 中层冷水的中心深度表征了中层冷水在垂直方向上出现的位置,根据中心深度的分布,也就可以获得中层冷水的分布。分析结果表明,本海域中层冷水中心深度的分布趋势是:海域中部较浅,约为15米,向东、西两侧缓慢加深。

本海域中层冷水的中心深度值,比较集中在10—25米之间,其中,以20米深度的出现频率最大(图2)。统计各年3—6月间中心深度的平均值也得出,除1959年稍有偏离外,各年均均在20米左右。据此,我们可以大体上取20米作为中层冷水中心深度的平均值。

中层冷水厚度的分布 如将中层冷水的厚度与中心深度相结合,则可以表示出中层冷水在垂直方向上分布的范围。图3指出了中层冷水厚度值的频率分布,可以看出,厚

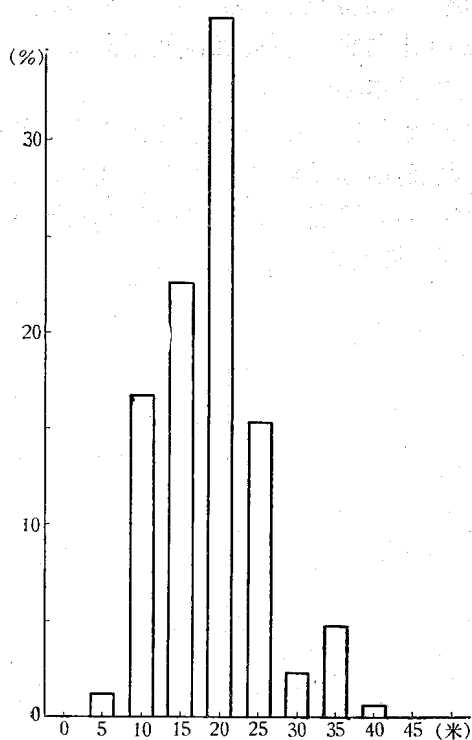


图2 中层冷水中心深度的频率分布

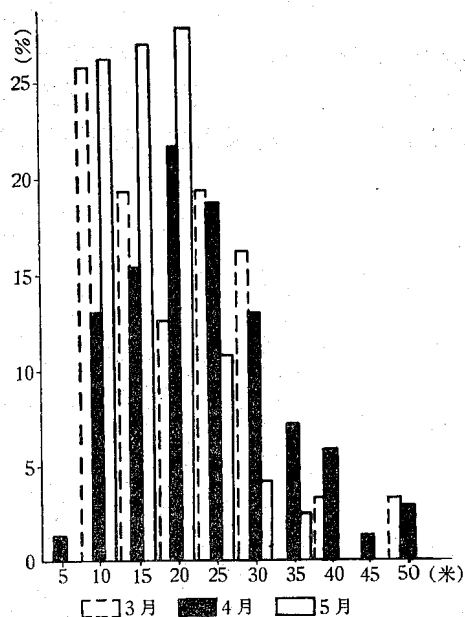


图3 中层冷水厚度值的频率分布

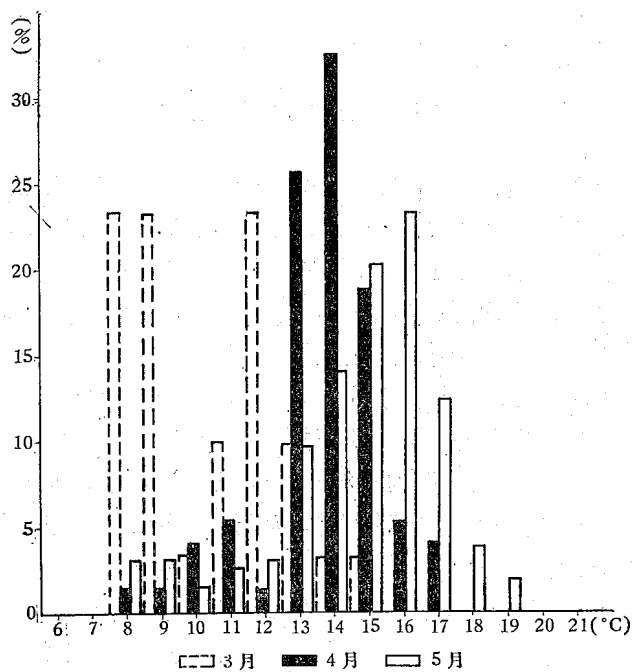


图4 中层冷水中心温度的频率分布

度值以 10—20 米间的频率较高。分析表明,中层冷水的厚度,在纬向断面上均以中部为最小,两侧较大;也就是研究海域的中部最小,约 10 米左右,向东、西两侧逐渐变大,可增至 20 米以上;且其分布趋势与上述中心深度的分布基本相似。

中层冷水中心温度的分布 如上所述,中层冷水以水温较低为其主要特征;但是,其中心温度值不尽相同,差异较大(图 4)。一般说来,中心温度的分布与台湾暖流水的温度分布颇为相似。由图 5 不难看出,在海区东南部,中心温度值较高,在 18°C 以上,由此向西北逐渐降低,至海区西北部降至 16°C 以下,两者相差 2°C 左右。

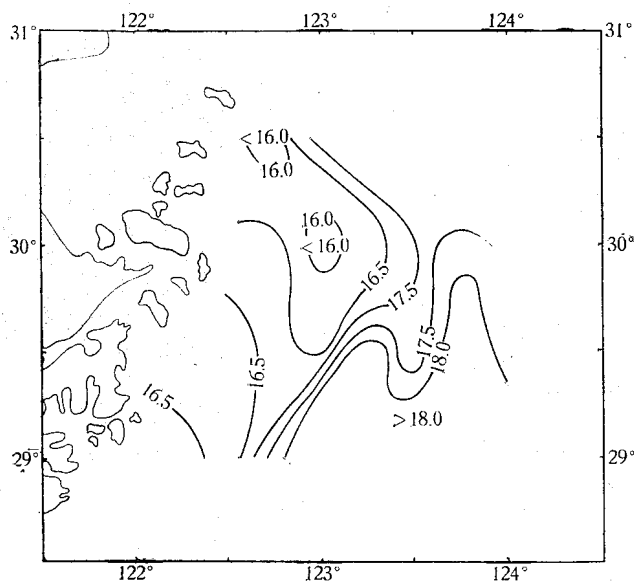


图 5 中层冷水中心温度的分布

中层冷水强度的分布 本海域中层冷水强度分布的主要特点是:在沿 123°E 线附近强度最大,可达 $0.33^{\circ}\text{C}/\text{米}$,向东、西两侧迅速减弱,至边缘处仅 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{米}$ 左右。

中层冷水区温度垂直结构的类型 出现中层冷水的海区,海水温度垂直分布曲线的形式颇多,但大致可以归纳为两种类型:正规型和非正规型(图 6)。前者是中层冷水温度垂直结构最基本的形式,其主要特点是上层水温高于深层。在这一类型中,又可细分为两种情形,其一为中层冷水下边界以下的水温呈垂直均匀状态;其二为下边界以下的水温先略有降低,而后逐渐趋于垂直均匀。非正规型的特点为深层水温高于上层;与正规型相似,也可细分为两种情形。在我们的资料中,非正规型中层冷水分布不甚广泛,但在 1962 年却频繁出现。据作者揣测,这可能和该年江浙沿岸水增温较迟有关。

3. 中层冷水随时间的变化

在浅海海域,中层冷水并非终年存在,仅在一年中的某个时期出现,具有明显的季节性。分析 1958—1965 年的资料后得知,本海域的中层冷水仅在春季(3—6 月)出现于 $29^{\circ}00'—31^{\circ}00'\text{N}$, $124^{\circ}00'\text{E}$ 以西海区,它的消长过程大体上可归纳如下。3 月,中层冷水开始在沿岸个别测站上出现,其中心深度一般在 10—15 米左右,中心温度低于 10°C ,

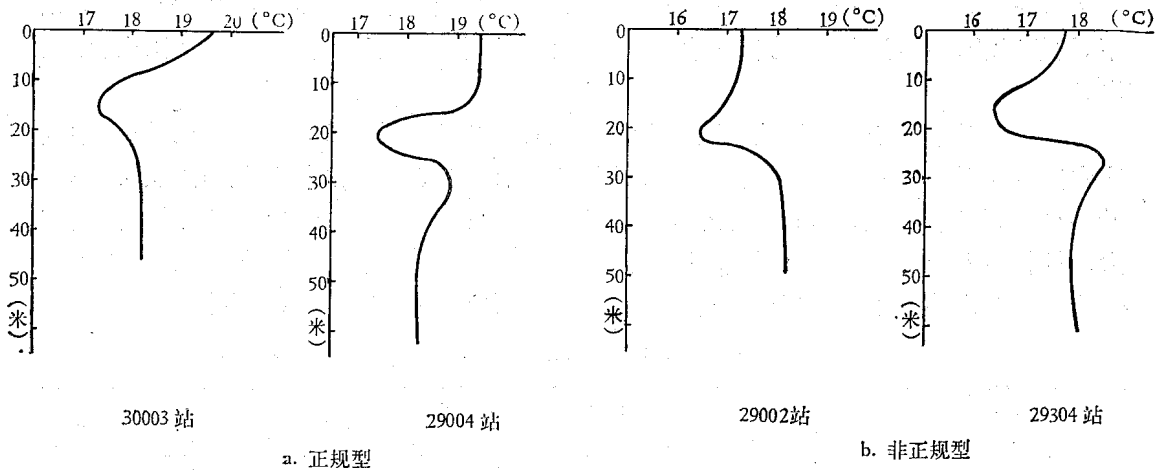


图6 中层冷水区温度垂直结构

强度在 $0.03-0.10^{\circ}\text{C}/\text{米}$ 之间。4 月中、下旬,分布范围逐渐扩大,此时适逢表层海水迅速增温,所以中心温度也急剧上升,达到 $13^{\circ}-15^{\circ}\text{C}$,中心深度在 15—20 米间,最大可达 25 米,强度在 $0.03-0.15^{\circ}\text{C}/\text{米}$ 间。5 月,分布最广,除近岸测站外,遍及 $29^{\circ}00'-31^{\circ}00'\text{N}$, $124^{\circ}00'\text{E}$ 以西整个海区,其中心深度已增至 20 米左右,厚度在 10—15 米之间,中心温度升高至 $15^{\circ}-17^{\circ}\text{C}$,强度一般在 $0.03-0.25^{\circ}\text{C}/\text{米}$ 之间,最大达 $0.33^{\circ}\text{C}/\text{米}$ 。6 月上、中旬,开始消衰,出现范围虽然仍较大,但已不完整;在 3 月份(即初现时)出现中层冷水的测站上,此时已极少存在;其中心温度接近 20°C ,厚度已减至 10 米以内,中心深度变化不大。6 月下旬,中层冷水在本海域内绝迹。

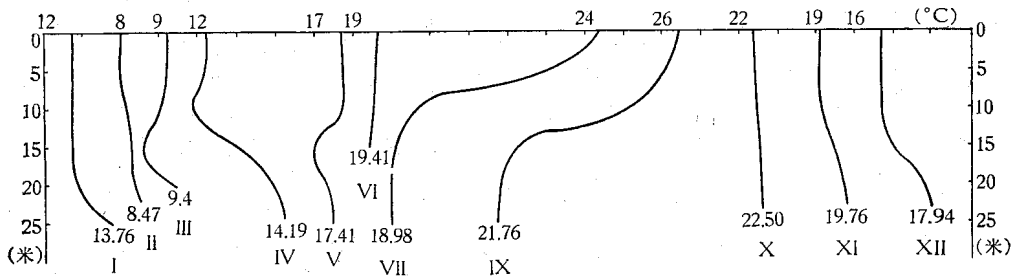


图7 29003 站逐月水温垂直分布的形式

为了具体说明中层冷水的消长过程,我们选取位于中层冷水区的 29003 站作为示例。从该站逐月水温垂直分布的形式可以看出(图 7),1—2 月间,除深层水温略有升高外,海水温度基本上呈垂直均匀状态。3 月,表层海水受热增温,由 8°C 升至 9°C 左右,深层(20 米以下)水温也相应上升了 1°C 左右,但中层(15 米)水温却变化甚微,仍保持在 8.5°C 左右。此时,该站中层(15 米)的水温已明显呈现出较其上、下层为低的状态,即出现了中层冷水。4 月,表层水温升高至 12°C 以上,深层水温也增至 14°C 左右;但中层(10 米)水温仍低于 12°C ,中层冷水依然存在,只是厚度比 3 月减小。5 月,表层水温迅速增高,而深

层增温缓慢,表层和深层的水温均已升高至 17.5°C 以上;但中层(15米)水温仍在 17°C 以下,依然比上、下层为低。6月,该站(因位于近岸区)中层已不呈现低温特性,中层冷水消失。

表1统计了几个典型测站中层冷水的各项示性特征。从表1可以清楚地看出,中层冷水出现的时间一般为3—6月。在此期间,各项示性特征的变化大致为:中心温度迅速升高;中心深度变化不大,以这三个测站而言,多数在10—15米之间;厚度在初现期间较大,以后逐渐减小直至消失;强度均以5月最大。表1所列三个典型测站中层冷水各项示性特征随时间的变化,基本上代表了本海域中层冷水随时间变化的主要特点。

表1 典型测站中层冷水的示性特征

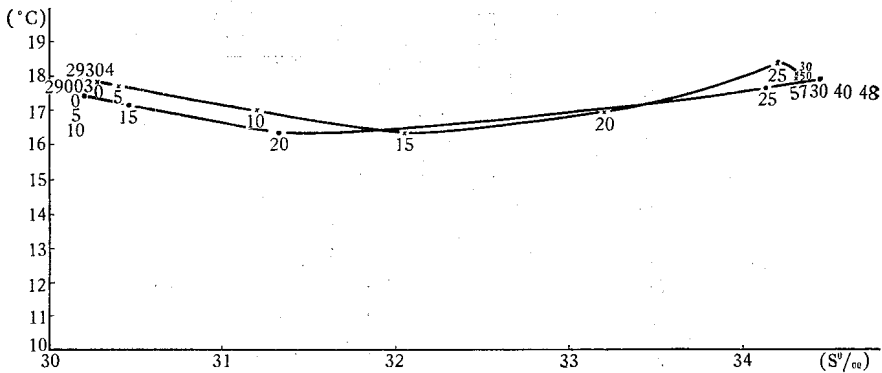
站 号	月.日	中心温度 ($^{\circ}\text{C}$)	中心深度 (米)	厚 度 (米)	强 度 ($^{\circ}\text{C}/\text{米}$)	类 型
29003	2.3	—	—	—	—	—
	3.7	8.52	15	14	0.09	非正规
	4.2	11.90	10	7	0.08	非正规
	5.12	16.93	15	8	0.10	正 规
	6.3	—	—	—	—	—
	7.8	—	—	—	—	—
29304	2.20	—	—	—	—	—
	3.29	12.80	10	25	0.14	正 规
	4.19	14.45	15	5	0.04	正 规
	5.16	17.56	15	10	0.25	正 规
	6.25	21.15	10	7	0.15	正 规
	7	未	—	观	—	测
30003	2.21	—	—	—	—	—
	3.15	11.45	10	20	0.09	非正规
	4.24	16.45	15	18	0.11	正 规
	5.17	15.92	15	15	0.19	非正规
	6.8	17.78	10	7	0.12	正 规
	7.8	—	—	—	—	—

二、中层冷水成因的初步探讨

中层冷水形成的原因很多,Ю. А. Владимирцев 将大洋中层冷水的成因归纳为平流成因、对流成因和对流-平流混合成因三种类型^[2],浅海中层冷水的成因较大洋中层冷水更复杂,具有明显的地区性。经初步分析,我们认为东海西北部海域的中层冷水,是继冬季海水温度垂直均匀分布后,表层和深层(台湾暖流水)海水春季同时增温,而中层海水则相对地保持原来较低温度的结果。因此,它是本地(或距本地不远)冬季海水的残余;就其成因类型来说,属对流-平流混合型。

1. 中层冷水的来源

首先综观一下出现中层冷水海区的水团分布。综合1958—1965年所有出现中层冷

图 8 $T-S$ 曲线

水测站的 $T-S$ 曲线, 可以看出, 它们的形状非常相似 (图 8)。各测站上层的盐度一般都小于 $32‰$, 深层则普遍大于 $34‰$, 但是两者的温度差不大。根据上述 $T-S$ 曲线的特征, 结合以前有关本海域水团的研究结果可以得知, 出现中层冷水的海区存在着两个水团, 深层为台湾暖流水, 上层则属江浙沿岸水。

前人的研究表明, 出现中层冷水的大部分海区, 冬季海水温度基本上呈现垂直均匀状态。一般自 3 月起, 表层海水因受热增温形成正温跃层。4—5 月间, 随着表层海水吸收热量的增加, 正温跃层迅速增强。同时, 由于跃层阻碍着热量向下传递, 跃层以下的海水增温比较缓慢, 还保留着冬季的低温特征。由此可知, 中层冷水的中心温度应与本地冬季的水温有关。据此, 我们分析了 5 月份中层冷水的中心温度与当年 2 月份同一测站表层水温之间的相关性。由 1959—1965 年共 101 个测站资料计算的结果, 两者的相关系数为 $0.74 (E = \pm 0.052, r/E = 15)$ 。这一结果表明, 本海域的中层冷水与冬季本地 (或距本地不远) 的海水有密切关系, 也就是说中层冷水系本地 (或距本地不远) 冬季海水的残余。

由此可见, 春季表层海水的增温导致正温跃层的出现, 是形成中层冷水的必要条件之一。

2. 台湾暖流水与中层冷水的关系

我们取用上述年间 5 月份的观测资料, 对台湾暖流水与中层冷水的关系作一探讨。

台湾暖流水的分布与中层冷水的关系

据我们对中层冷水区海水温、盐度垂直分布特征的初步分析得知, 中层冷水的下界深度 (即逆温跃层的底界深度) 与盐跃层的下界深度极为一致 (图 9)。在统计的 245 个测站中, 有 186 个测站 (占 76%) 这两个深度基本相同。图 10 列示了纬向断面上中层冷水和盐跃层位置的分布, 可以看出, 两者的深度较为一致。从统计结果 (表 2 列出了部分统计结果) 中还可看出, 盐跃层下界处的盐度较高, 除极个别测站外, 均接近或大于 $34‰$ 。

由以上所述可以得知, 中层冷水的下界大体上就是台湾暖流水上界面所在位置。可见, 台湾暖流水的分布, 对本海域中层冷水的形成及其各项示性特征的分布变化起着重要的作用。

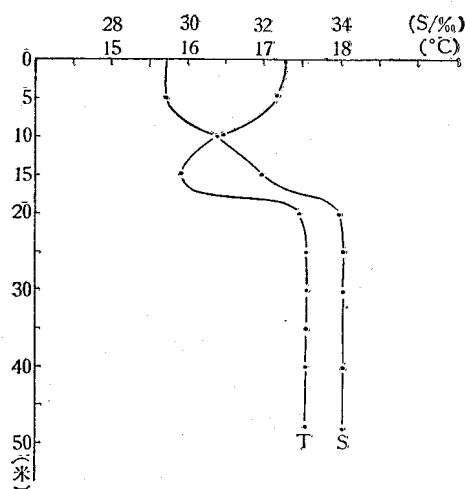


图9 温、盐度垂直分布(30003站)

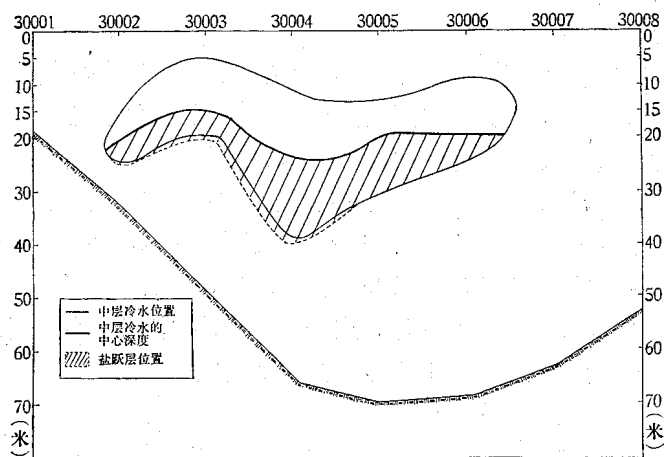


图10 纬向断面上中层冷水和盐跃层分布

在东海西北部海域,台湾暖流水大致呈舌状自南向北伸展,舌轴在多数年份大致沿 123°E 分布^[4]。在舌轴附近台湾暖流水上界面的深度较小,两侧逐渐增大。与此相应,中层冷水下界的深度也在舌轴附近较小,两侧较大。在同一纬度上,或范围较小的海区内,由太阳辐射引起的海洋表层的受热可以认为基本上是相同的;然而台湾暖流水舌轴所在处的中层冷水则中心深度较浅,厚度较小,强度较大;由此可见,中层冷水各示性特征的分布特点主要是由台湾暖流水所导致。

台湾暖流水的变化与中层冷水的关系

首先,我们在出现中层冷水海区内选取具有代表性的三个测站:29304站、29009站和29005站。根据文献[2],这三个测站,特别是其深层和底层,整年都位于台湾暖流水

表 2 中层冷水和盐跃层的下界深度统计(纬向断面)

年.月	站 号	中层冷水下界深度 (米)	盐跃层上、下界深度 (米)	盐跃层上、下界处盐度 (‰)
1961.5	30002	20	15—20	30.81—32.47
1961.5	30003	30	20—30	30.91—34.00
1961.5	30004	30	20—30	31.55—33.75
1961.5	30005	40	30—40	31.20—33.69
1961.5	30006	40	30—40	32.43—33.53
1961.5	30007	40	40—50	32.05—33.89
1962.5	30002	24	20—25	31.44—33.80
1962.5	30003	19	15—20	31.92—33.98
1962.5	30004	39	25—40	32.98—34.16
1962.5	30005	30	20—30	32.79—33.68
1962.5	30006	25	20—25	33.15—34.16

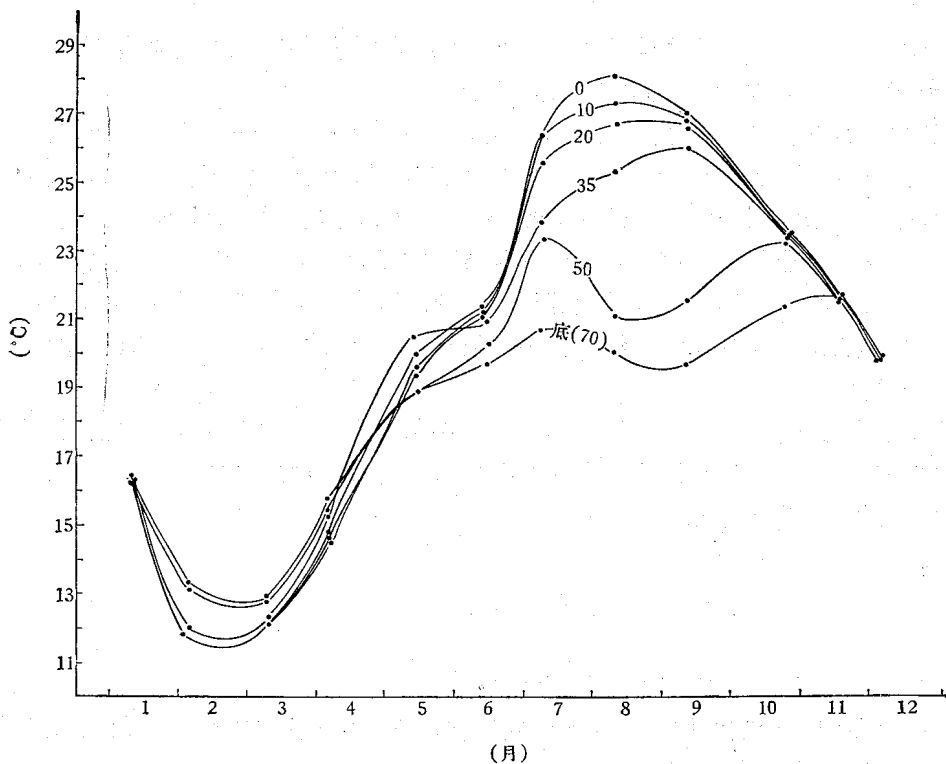


图 11 29304, 29005 和 29009 站平均温度的年变化

之内。因此,可借助这三个测站深层、底层平均温、盐度(主要是盐度)的变化,来间接地讨论台湾暖流水的消长。如以深层、底层(35 米层以下)盐度值的高低作为台湾暖流水消长的指标,则由图 11, 12 显然可以得知,台湾暖流水 2 月(冬季)最弱,3 月开始逐渐增强

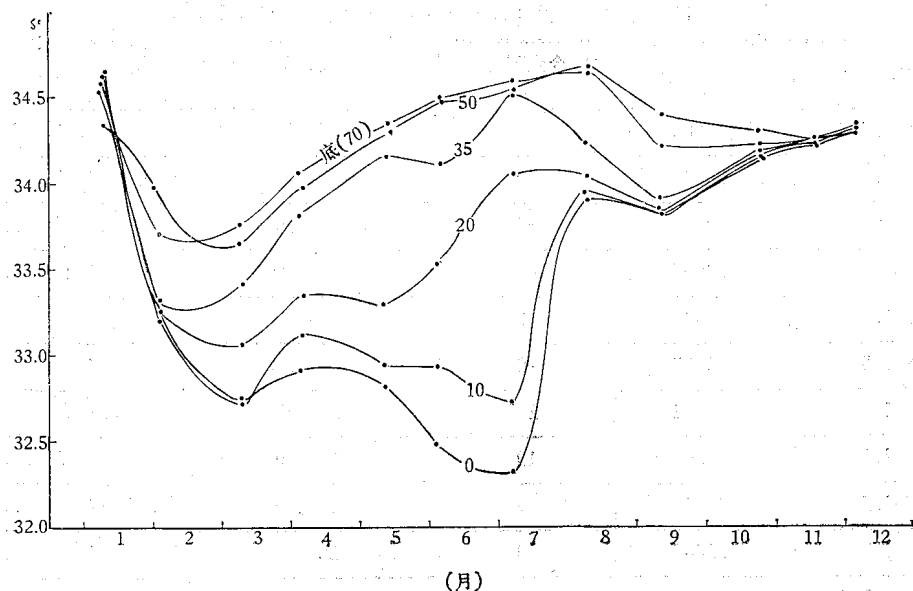


图 12 29304, 29005 和 29009 站平均盐度的年变化

(增温、增盐), 4—5 月间增强最迅速, 7—8 月(夏季)达最强。这一变化趋势与 T. Nakao 关于“台湾暖流水夏季发达”的结论大体一致^[3]。

在前面我们曾得出, 中层冷水随时间变化的趋势是: 3 月初现, 5 月最盛, 6 月下旬绝迹。这一趋势显然与上述台湾暖流水的增强(增温、增盐)过程近似一致。只是 5 月中旬以后, 一方面台湾暖流水增温速率变慢, 另一方面, 海洋表层受热增加, 热量逐渐向深层传递, 致使正温跃层的深度增大。由于这两方面的原因, 再加以在中层冷水的界面上不断地与上、下水层发生涡动混合, 中层水温迅速升高, 厚度逐渐变薄, 中层冷水逐渐消衰。至 6 月下旬, 中层冷水在本海域内绝迹。由此可见, 中层冷水的消长与台湾暖流的消长变化有直接的关系。

根据以上分析, 我们可以得知: 春季表层海水的增温导致正温跃层的出现, 是形成中层冷水的必要条件; 台湾暖流水春季增温导致深层逆温跃层的形成, 是本海域出现中层冷水的主要原因(充分条件)。

三、结 语

综合以上所述, 可以初步得出以下结论:

(1) 在东海西北部海域, 存在着中层冷水, 它的位置比较稳定, 大致在 $29^{\circ}00'—31^{\circ}00'N$, $124^{\circ}00'E$ 以西海区。

(2) 本海域的中层冷水, 仅在春季(3—6 月)出现, 它的消长过程可大致归纳如下: 3 月开始在沿岸的个别测站出现; 4 月中、下旬分布范围逐渐扩大; 5 月分布最广, 除近岸测站外, 遍及 $29^{\circ}00'—31^{\circ}00'N$, $124^{\circ}00'E$ 以西海区; 6 月上、中旬开始消衰, 出现范围虽然仍较大, 但已不完整; 6 月下旬, 中层冷水在本海域内绝迹。

(3) 中层冷水的各项示性特征(中心深度、厚度、强度和中心温度)的分布趋势是: 在研究海域的中部, 中心深度最浅, 厚度最小, 强度最大; 由此向东、西两侧深度变大, 厚度增大, 强度减弱。它随时间变化的主要特点是: 中心深度变化不大; 中心温度迅速升高; 厚度逐渐变小; 强度以 5 月最大。

(4) 本海域的中层冷水是本地形成的, 是本地(或距本地不远)冬季海水的残余。

(5) 本海域中层冷水的形成是表层和深层海水同时增温的结果。春季, 表层海水受热增温导致正温跃层的出现, 是形成中层冷水的必要条件; 台湾暖流水春季增温导致深层逆温跃层的出现, 是形成中层冷水的主要原因(充分条件)。

最后需要指出, 本文仅从地理学的观点对中层冷水的基本特征和成因作了粗浅的分析。作者期望今后能采用新的技术和设备(如 STD, XBT 等)对本海域的中层冷水进行专题调查, 以便作进一步的分析研究。

参 考 文 献

- [1] 毛汉礼、甘子钧、兰淑芳, 1963。长江冲淡水及其混合问题的初步探讨。海洋与湖沼 5(3): 183—205。
- [2] 毛汉礼、任允武、万国铭, 1964。应用 T-S 关系定量地分析浅海水团的初步研究。海洋与湖沼 6(1): 1—22。
- [3] Nakao, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *Jour. of the faculty of marine science and technology Tokai university*, Special Number: 199—367.
- [4] 松宫义晴、和田時夫、岡正雄, 1977。水型から見た東シナ海、黄海の水塊解析と底魚漁場について。長崎大学水産学部研究報告 43: 1—21。
- [5] Владимирцев, Ю. А., 1963. О промежуточных слоях в океане. *Океанология* 3(5): 798—802.
- [6] Зубов, Н. Н., 1929. К вопросу о происхождении холодного промежуточного слоя в полярных морях. *Тр. Морского научно-исследовательского ин-та* 4(2): 47—66.
- [7] Зубов, Н. Н., 1945. Лёды Арктики. Издательство Главсевморпути, стр. 61—62.

A PRELIMINARY ANALYSIS OF THE INTERMEDIATE COLD WATER IN THE NORTHWESTERN PART OF THE EAST CHINA SEA*

Weng Xuechuan

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In this paper, using geographic analytical method, characteristics of intermediate cold water formed in the northwestern part of the East China Sea and its cause are analysed preliminarily, based on data observed during 1958—1965. Some preliminary results are obtained as follows:

1. There is the intermediate cold water in the northwestern part of the East China Sea. Its position and bounds are comparatively steady, i.e., it occurs approximately in the region between $29^{\circ}00'$ and $31^{\circ}00'N$, west to $124^{\circ}E$.

2. The intermediate cold water of the area occurs only in the spring (March to June). Its growing and vanishing process are mainly as follows:

The intermediate cold water occurs at less stations in March: Its boundary enlarges in April; the May distribution is the vastest, except the stations close to the coast, it appears in all region (29° — $31^{\circ}N$, west to $124^{\circ}E$); it begins to vanish in the first and middle ten days of June; completely vanishes in July.

3. The distributive trend of all typical characteristics of the intermediate cold water is as follows:

Its central depth is shallowest, thickness thinnest and intensity greatest near the area $29^{\circ}30'N$, $123^{\circ}E$. Outward from the above-mentioned area and specially toward the eastern and western side, its depth and thickness increase and intensity weakens gradually. Its major feature of variation with time is as follows: its medial depth is almost constant, medial temperature rapidly increases, thickness thins gradually, maximum intensity occurs in May.

4. All typical characteristic distribution and variation depend on variation caused by both The Taiwan Warm Current Water and The Jiang-zhe coastal water and their interaction.

5. The intermediate cold water originates from the local winter water, not from the South Yellow Sea Cold Water shifted toward south.

6. Its formation is a result of simultaneous increase of temperature of the surface and deep water. In spring, the temperature of the surface water increases by heating and leads to the occurrence of thermocline. This is the necessary condition for the formation of intermediate cold water. The full condition is as follows: in spring, the temperature of the Taiwan Warm Current Water increases and leads to the occurrence of the inverse thermocline in deep layer.

*Contribution No. 680 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.