

# 东北大西洋中部区域中的水文结构和环流

许建平

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

## 摘要

本文利用1985年秋季在东北大西洋中部——加拿利海盆区域中获得的水文观测资料, 比较详细地阐述了该区域海水的温-盐度特性、水团分布、斜压流场和地转输送等。分析表明, 这一区域中呈现的活性中尺度现象主要归因于源地水团(表层水、北大西洋中央水、地中海水和深层水)和外来水团(亚极地模态水、拉普拉多海水和南极中层水)之间的交织、混合和本身的消长变化。亚速尔海流和加拿利海流构成了亚热带环流的东部再循环。

亚速尔海流由多个分支汇合而成。主流位于亚速尔群岛以南 $35^{\circ}\text{N}$ , 它在 $15^{\circ}\text{W}$ 附近开始分离。葡萄牙近岸发现的逆向流动可能是它的一个北向分支; 亚速尔锋阻止了拉普拉多海水和亚极地中海水的南向入侵, 它也是区分西北大西洋(中央)水和东北大西洋(中央)水的明显边界。

对北大西洋环流的研究已有近80年历史。但过去人们感兴趣的主要是中大西洋海脊以西和北大西洋北部区域, 因北大西洋环流主要由该区域中的强大湾流和北大西洋流构成, 对于它们的调查研究已经取得许多成果, 这由大量的文献佐证。然而对于北大西洋环流的东边界——中大西洋海脊以东区域, 特别是亚热带北大西洋的东部区域, 调查研究甚少。早期的研究认为, “在这一海区, 并无明确的海流存在, 而以扩散的形式, 将海水向南输送。”<sup>[1]</sup>为此, 人们似乎对该区域失去了兴趣。直到1981年, 西德基尔大学“北大西洋暖水层”联合研究计划的实施, 加拿利盆地(Canary Basin)区域专题调查活动的展开, 以及Käse和Siedler“亚速尔群岛东南亚热带锋的弯曲”一文<sup>[2]</sup>的发表, 才又重新拉开了东北大西洋研究的序幕。短短几年, 已取得了不少突破性的研究成果<sup>[3-12]</sup>。其中对强亚速尔海流(Azores current)的存在、活性中尺度涡的频繁报道和亚热带模态水的发现, 使人们开始对这一海区刮目相看。“这一区域, 历史上认为相当简单、沉寂, 其实不然, 它是一个十分复杂和活性的海区。”<sup>[12]</sup>

亚速尔海流是北大西洋环流的一个重要组成部分, 但对其起源至今尚不清楚。Thurman曾对亚速尔海流下过这样的定义: “北大西洋流的起点约在 $40^{\circ}\text{N}$ 、 $45^{\circ}\text{W}$ 处, 且在 $45^{\circ}\text{N}$ 处有一分支转向南, 流经亚速尔群岛(Azores Islands)和西班牙海岸之间, 称为亚速尔海流。

这支海流以扩散的形式,在一个广阔的区域内向南传播,最后加入到北赤道流中。”这一解释代表了许多早期的研究。虽然人们对分支点的推测众说不一,但对它起源于北大西洋流的想法是一致的。Gould<sup>[9]</sup>和Siedler等人<sup>[8]</sup>最近的研究则暗示了这支海流可能是湾流再循环再分支的向东延续体。尽管这种推测由于受观测资料的限制还未得到完全证实,然而种种迹象表明它直接来自于湾流的一个分支是有可能的<sup>[9]</sup>。

研究区域中海水体积输送的报道过去和现在同样存在差异。Dietrich等人<sup>[14]</sup>应用北大西洋中地球物理年调查资料计算的亚速尔群岛和葡萄牙海岸之间的南向体积输送为 $14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  (相对于1000m零面),而根据Saunders<sup>[4]</sup>的研究,在同一断面上获得的输送仅为前者的1/4 (相对于850m零面)。但人们对于亚速尔群岛以南南向输送的报道基本上是一致的,大约有 $10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的输送进入了东北大西洋的加拿利海盆区域<sup>[2,4,16]</sup>。

本文将根据1985年秋季在东北大西洋中部——加拿利海盆区域中的一次大尺度水文观测所获资料,对该时期的水文结构作一较全面的描述,以便对该区域中的亚热带再循环和中尺度过程有更深入的了解。

## 一、资料和方法

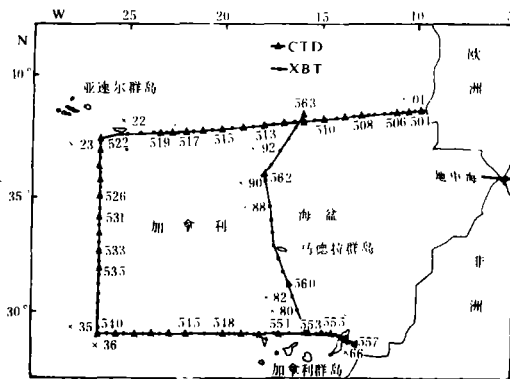


图1 调查区域和站位示意图

CTD测站: 504—563,

XBT测站: ×01—×94

1985年11月5日—12月9日,西德“普沙东”(POSEIDON)调查船在东北大西洋中部,即加拿利海盆区域中进行了一次大尺度水文观测,分别沿大约 $38^\circ\text{N}$ 、 $29^\circ\text{N}$ 、 $16^\circ\text{W}$ 和 $26^\circ30'\text{W}$ 线布设了两条纬向和两条经向断面,构成了如图1所示的“四边形”观测方案。

调查期间,回收了5套深水浮标系统,取得了长达一年的海流观测资料,并在4条断面上获得了45个CTD测站和90个XBT测站上的温、盐度资料。CTD测站的平均间距约为60 n mile, XBT测站大体上处于两CTD

站之间。前者平均测量深度为1500m,后者为750m。本文分析主要以CTD和XBT资料为依据。

本文用4条断面上的CTD和XBT资料估算了研究区域中的质量输送和地转速度。水文特征的描述则采用了传统的“ $t-S$ 曲线”法和断面分布图等。遗憾的是,由于沿岸一条断面(约 $16.5^\circ\text{W}$ )主要以XBT观测为主,其中只有很少几个CTD站,所以文中未能给出深层流场的分布。在计算该断面上的动力高度时,应用了Emery和Dewar介绍的方法<sup>[17]</sup>。不过在具体计算时,考虑到研究海区水文状况较为复杂,采用历史 $t-S$ 曲线未必

能获得满意的结果。于是,在推断 XBT 测站上的盐度值时,使用了相邻近的两个CTD测站上的资料。最后,由推断的盐度值和实测温度值计算密度。动力高度计算时的零面则取 XBT 仪最大有效观测深度。

值得指出的是,在调查期间,由于 Neil Brown CTD 仪途中发生故障,所以从 531 站,即  $36^{\circ}\text{N}$  以南区域,由 ME-45CTD 代替,两种类型的 CTD 均带玫瑰型采水器。通过资料整理发现,虽然两个 CTD 仪在实验室中的校正精度较接近,但在实际观测中则存在较大偏差。为此,我们采用颠倒温度表和实验室盐度计的测量结果分别对上述两种仪器观测的资料进行校正。然后用 Grose 介绍的 CTD 资料订正方法<sup>[18]</sup>对它们作了严格的处理。最后,认为两者的结果是一致的,且精度也完全满足讨论问题的需要。

## 二、水文特征

如上所述,研究海区位于亚热带东北大西洋区域,即北大西洋亚热带环流的东部再循环区域;欧洲地中海通过直布罗陀海峡直接与该区域相通。于是大量来自北大西洋中部和北部的海水以及地中海流出水构成了本海区的基本水文特征。

### (一) 温、盐度特征

按照古典的水文分析法——“ $t$ - $S$ 曲线几何形状”判别法<sup>[19]</sup>不难看出本海区主要有 4 个水团组成(见图 2),它们是北大西洋表层水、北大西洋中央水、地中海水和北大西洋深层水。如果细分,在北大西洋中央水中还可区分出亚极地模态水和亚热带模态水两个次级水团。此外,我们还发现了拉普拉多海水和南极中层水的迹象,虽然它们的强度不大,但对调查海区

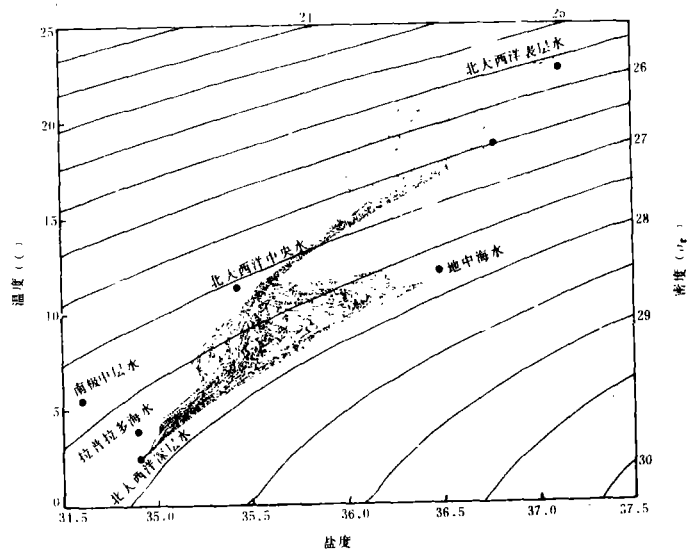


图 2  $t$ - $S$ 点聚图

的影响还是存在的。表 1 给出了研究海域中各个水团的温、盐度特性。由于一些水团的核心处于研究区域以外,故它们的温、盐度指标是根据前人的研究确定的。

北大西洋表层水 (NASW),它具有高温、高盐特性。该水团主要由夏季增温和贸易风引起的强烈蒸发形成<sup>[20]</sup>,所以它的特性随季节和地理位置的变化较大。NASW 位于水柱

50m 上层, 由于它直接受到海面风混合的影响, 故该层水体通常呈均一的特性. 在NASW 以下, 为季节性跃层控制的区域, 虽说调查期间正值秋末, 然而季节性跃层却依然相当强盛,  $\Delta t/\Delta z \approx 0.13^\circ\text{C}/\text{m}$ ,  $\Delta S/\Delta z \approx 0.02/\text{m}$ .

表 1 各水团的温、盐度特性

水 团 名 称	特 性		参 考 文 献
	$t$ ( $^\circ\text{C}$ )	$S$	
北大西洋表层水	约23.0	约37.10	本文
北大西洋中央水	11.0—18.65	35.47—36.76	[13]
地中海水	11.90	36.50	[22]
北大西洋深层水	2.50	34.90	[19]
亚热带模态水	16.0—18.0	34.40—34.60	本文
亚极地模态水	11.0—12.0	35.50—35.60	[23]
南极中层水	5.50	34.60	[19]
拉普拉多海水	3.80	34.88	[15]

北大西洋中央水 (NACW), 在  $t-S$  点聚图上具有良好的线性特征. 该水团位于 100—600 m 范围内, 主要由深层对流和等密度面混合所致. 在本文研究区域内, NACW 可看作为两个性质近似相同的水团的合成, 它们被称为西北大西洋水 (WNAW)<sup>[20]</sup> 和东北大西洋水 (ENAW)<sup>[21]</sup>. 由于 ENAW 直接与深层的地中海源地水发生混合, 因此它的盐度要略高于西北大西洋水. 在  $10^\circ\text{C}$  等温面上, 这种差异为 0.03, 而在  $15^\circ\text{C}$  等温面上为 0.06.

西北大西洋水主要出现在  $35^\circ\text{N}$  以北、 $13^\circ\text{W}$  以西区域. 而东北大西洋水则在调查区域中的陆架、陆坡以及  $35^\circ\text{N}$  以南区域.

地中海水 (MW), 以高盐为其特征. 地中海为它的源地. 当它经直布罗陀海峡进入调查区域后, 沿等密度面迅速向外海扩展<sup>[14]</sup>. 高盐舌位于 1 200m 深度附近, 它的影响范围在 600—1 800m 深度, 且随离源地的距离增加而迅速收缩. 在靠近直布罗陀海峡的 506 站上, 最大盐度值为 36.4, 而到了离海峡约 2 300km 的 526 站上降为 35.6.

北大西洋深层水 (NADW), 呈低温、低盐的特性. 对于该水团的形成机理至今还不清楚. 根据历史上确定的该水团的温、盐度指标能够很好地拟合本次调查的结果, 这说明深层水的变性不大, 或许表明了它的一个源地就位于调查区域中<sup>[21]</sup>. 由于受观测深度的限制, 我们只能看到该水团的上界 (约 1 800m 深度附近), 实际上它盘踞了整个水柱大约 3/5 的区域, 是调查海区中占体积最大的一个水团.

亚热带模态水 (STMW) 和亚极地模态水 (SPMW), 它们以水体的垂直均一性为其特征. 它们的形成机制是相同的, 即为冬季对流产生<sup>[23—25]</sup>. 前者通常出现在亚热带区域, 这里冬季对流局限于 200—300m 上层, 故决定了亚热带模态水只能出现在季节性跃层和北大西洋中央水之间, 在本海区中则处于水柱 100—200m 深度范围内; 而后者主要由南向平流带入调查海区, 它的源地似乎在远离研究海区的北大西洋北部区域, 那里强盛的冬季对流使得亚极地模态水能到达较大深度, 但在研究区域中它位于 400—600m 范围内, 即嵌于

北大西洋中央水和地中海水之间。

南极中层水 (AAIW), 以中层低盐为其特征。该水团源自南大西洋辐合带区域, 它的核心指标应为 $2.2^{\circ}\text{C}, 33.80$  [20]。但当它离开源地区域向北运移时, 不断同周围海水发生混合变性。因此图 2 中给出的 AAIW 的位置实际上是变性的南极中层水指标。AAIW 的影响仅限制在调查区域南部 800—900m 深度附近。

拉普拉多海水 (LSW), 同样以低盐为特征。它形成在远离研究区域西北的拉普拉多海 (Labrador Sea) 中, 且以等密度面混合的形式向南扩展, 但人们通常认为它只能够运移到 $47^{\circ}\text{N}$ 附近 [7], 然而本文的例子则表明, 拉普拉多海水的影响可以伸展到 $36^{\circ}\text{N}$ 附近, 它的南界似乎是亚速尔锋所在的位置。在研究区域中, LSW 出现在 1 200—1 800m 深度范围内。

(二) 断面结构

图 3 显示了经向断面上的温、盐度分布。高温、高盐水位于上层, 最大温、盐度值出现在断面的左侧, 即南部区域, 然后朝北逐渐降低, 南北盐度差可达 0.8 以上。在 531—526 站 ( $26^{\circ}30' \text{W}$  断面) 和  $\times 90-562$  站 (近岸断面) 之间还发现了一条明显的表面盐度锋, 最大

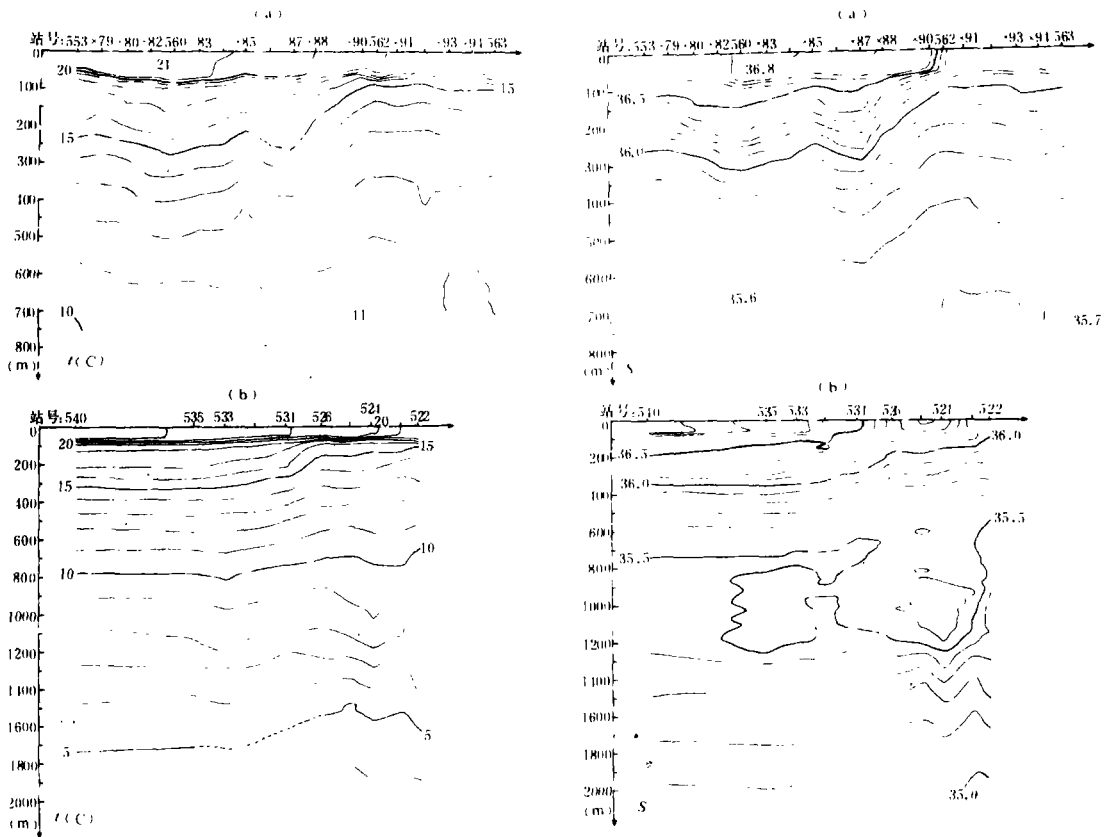


图 3 温、盐度经向断面

(a)  $165^{\circ}\text{W}$ , (b)  $26.5^{\circ}\text{W}$

水平梯度为 $0.03/10\text{km}$ ，但在温度断面上却未能发现类似的表面不连续层。50m层附近密集的等值线分布表明了季节性跃层的位置。与此形成对照，位于其下的 $16-18^{\circ}\text{C}$ 等温线和 $36.4-36.6$ 等盐线则显得十分稀疏，这就是亚热带模态水盘踞的区域(100—200m层)。值得注意的是，它只出现在断面的左侧—— $35^{\circ}\text{N}$ 以南区域。在200—600m层之间，存在一永久性跃层，即北大西洋中央水控制的区域。地中海水的影响表现在600m层以下，在近岸断面上，我们只能看到它的上界，然而在 $26^{\circ}30'\text{W}$ 深水断面上，它的高盐特征则是非常明显的，在1000m层附近，还出现了两个接近封闭的高盐环，它们的中心分别位于535站和524站上。显然，它们相对于 $35^{\circ}\text{N}$ 线成对称分布。地中海水层(600—1800m)以下则为低温、低盐的深层水控制，这里海水明显呈高度层化。在与地中海水同一平面上，我们发现了另一水团——拉普拉多海水的影响，不过它只出现在 $26^{\circ}30'\text{W}$ 断面的右侧—— $35^{\circ}\text{N}$ 以北区域。这里等值线在1200m层附近明显呈波形状，表明了南向入侵的拉普拉多海水和向北扩展的地中海水之间的交织混合。在断面右侧，等值线分布则显得十分平坦，可见拉普拉多海水的影响只局限于 $35^{\circ}\text{N}$ 以北。那么，是什么原因使拉普拉多海水受阻于 $35^{\circ}\text{N}$ 以北的呢？而且上面揭示的许多现象也同样与 $35^{\circ}\text{N}$ 线有关。看一下整个断面上等值线的分布不难找到结论。由图3可以看到，等值线在 $35^{\circ}\text{N}$ 附近(526和536站之间)很明显呈由北向南倾斜，即存在较强的经向梯度。这与Kase和Siedler<sup>[2]</sup>以及Siedler等人<sup>[8]</sup>早期在该区域中发现的亚速尔锋(或亚速尔海流)的位置是一致的。所不同的是，在 $26^{\circ}30'\text{W}$ 断面上，等值线倾斜一直可跟踪到2000m深层，而他们报道的亚速尔锋(或亚速尔海流)仅限于1000m上层。值得一提的是，这条锋也同样呈现在近岸断面(约 $165^{\circ}\text{W}$ )上，虽然该断面因受观测水深的限制，我们无法知道它的实际深度，但它的梯度分布似乎比上一个断面更强，所以估计它的影响深度也不会小于千米。

在两条纬向断面(图4)上，水团结构大体与上述两条经向断面相一致，不同的是：

1. 在 $37^{\circ}\text{N}$ 断面上，150m层附近未发现亚热带模态水的迹象，而由400—600m范围内的另一个同质层——亚极地模态水来代替。

2. 在 $29^{\circ}\text{N}$ 断面上，靠岸一侧受到了低盐南极中层水平流入侵的影响。这比Fiúza等人<sup>[20]</sup>确定的南极中层水的北界位置( $25^{\circ}\text{N}$ )向北推进了约4个纬度。但当它进入调查区域以后，由于受到高盐的地中海流出水的强烈影响，南极中层水也就很快消失在加拿利群岛区域。而这里 $35.40$ 等盐线从1400m深层上升到了800m层附近，则可能与岛屿周围强烈的潮混合和近岸上升流的影响有关。

3. 地中海水的影响在北部断面上是相当明显的，且呈舌状楔入。最大盐度层出现在1100—1200m深度内。在高盐舌的顶部亦发现了封闭的高盐环，其中心位于断面西侧的517站上，其下可能受到了来自北部的低温、低盐水的影响，等值线亦呈波状，可见这里出现的高盐环与拉普拉多海水的平流入侵似有一定的联系。

4. 更有趣的是，在北部断面上，这里上、下层等值线的走向显然是不一致的，大体上由西向东发散。但在断面靠岸一侧的506和508站之间，这里等值线的倾斜，除了中层受地中海高盐水舌楔入，等值线的走向不尽相同以外，几乎上下均呈由东向西的上倾，并可跟踪到1800m深层。而且盐度锋露于表面，同 $26^{\circ}30'\text{W}$ 断面一样，这里也不存在表面温度锋。

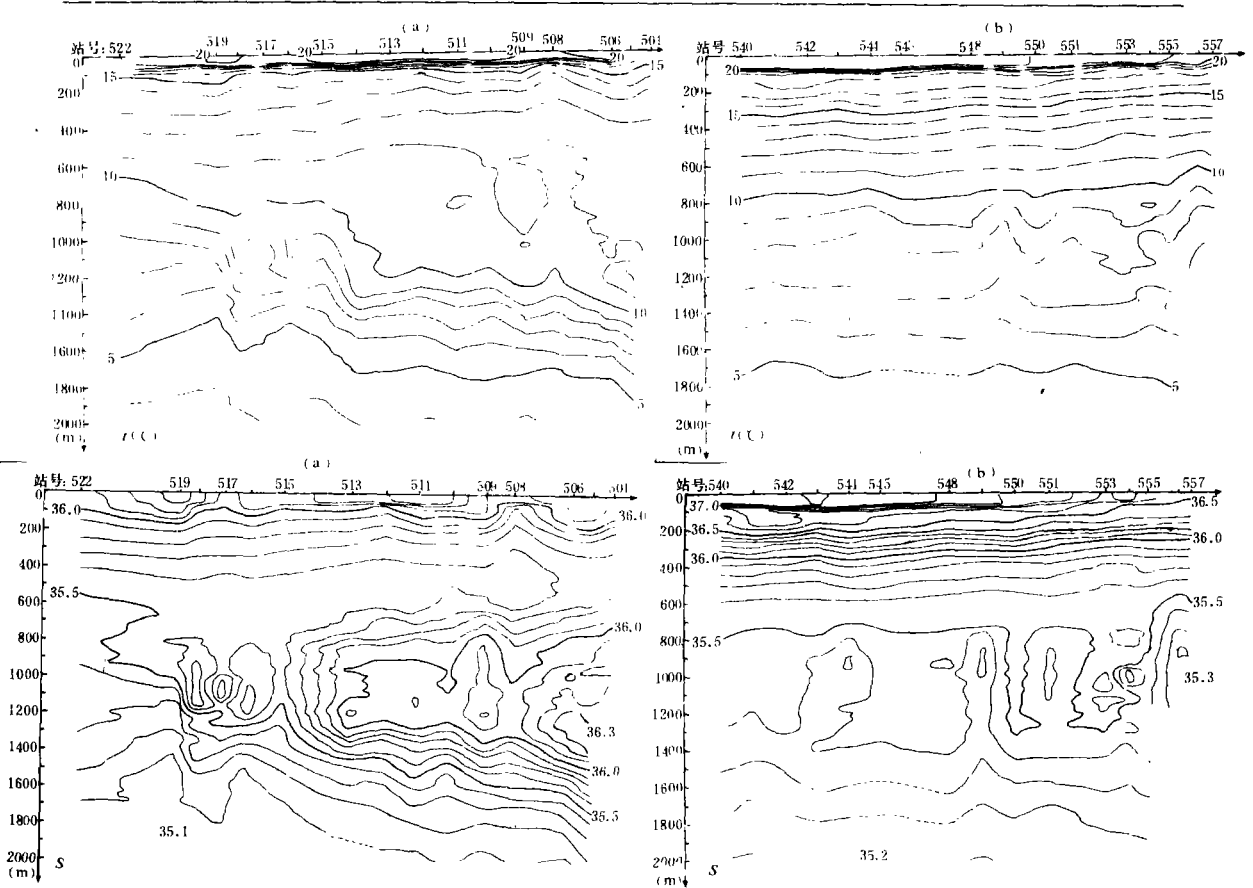


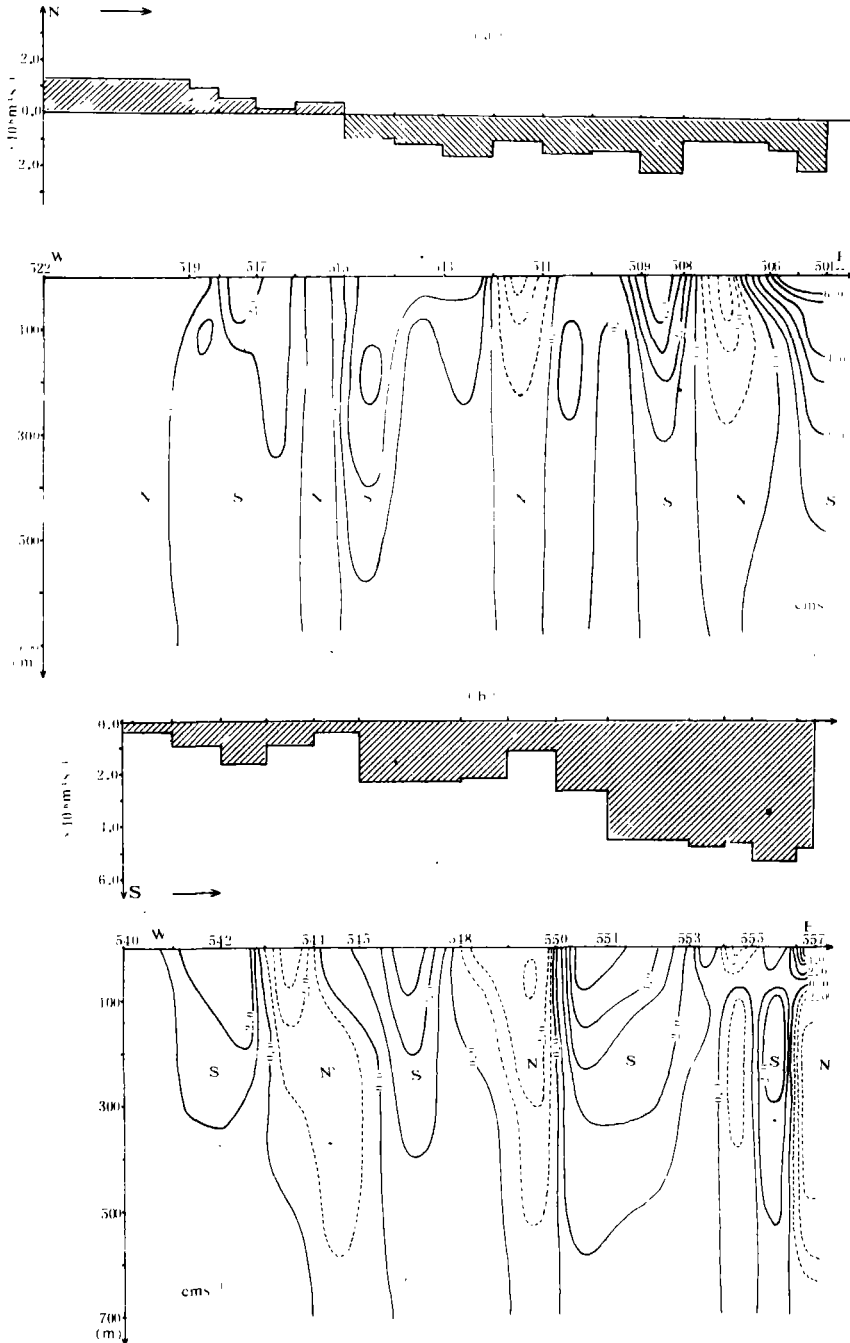
图4 温、盐度纬向断面

(a) 37°N, (b) 29°N

综上所述，研究海区中受到了8个不同性质水团的影响，其中表层水、北大西洋中央水、地中海水和深层水的影响最盛，体积最大，而且由它们的温盐性质不难看出，它们是在加拿利海盆中生成的源地水团。南极中层水、亚极地模态水和拉普拉多海水分别从调查海区南部、西北部和北部入侵，体积分布相当有限，它们与源地水交织、混合，最终消失在这一区域中。对于亚热带模态水，除4个源地水团以外，它的体积亦是相当可观的，几乎占据了35°N以南、15°W以西100—200m水层，据估计，它的体积至少有 $41 \times 10^3 \text{ km}^3$ 。根据Siedler等人<sup>[26]</sup>最近的研究表明，在这里发现的亚热带模态水亦为源地所生，其形成区域位于研究海区西部的马德拉群岛(Madeira Islands)附近，故亦称马德拉模态水。那么，马德拉模态水是如何向南、向西传播的呢？据前人的观点，这种类型的水由冬季深层对流形成后，一般由总环流携带离开它的形成区域<sup>[23]</sup>。然而本文研究区域中的环流显然是不利于该水团向西扩展的，而且Siedler等人<sup>[26]</sup>的结论也否定了该水团来自于北大西洋西海盆中的18℃水的可能性。显而易见，这里应有一支由东向西的平流才能解释这一现象。由下面的分析可以看到，在北大西洋东部再循环内部，这样一支逆流显然是存在的。也就是说，马德拉模态水完全有可能出现在远离形成区域的西部。

### 三、地转流场和输送

4条断面上以700m层为动力零面计算的地转流速分布如图5所示.根据Stramma<sup>[6]</sup>的统计结果,研究区域中无运动面似乎应取1200—1300m层较为合适.然而,本文资料因





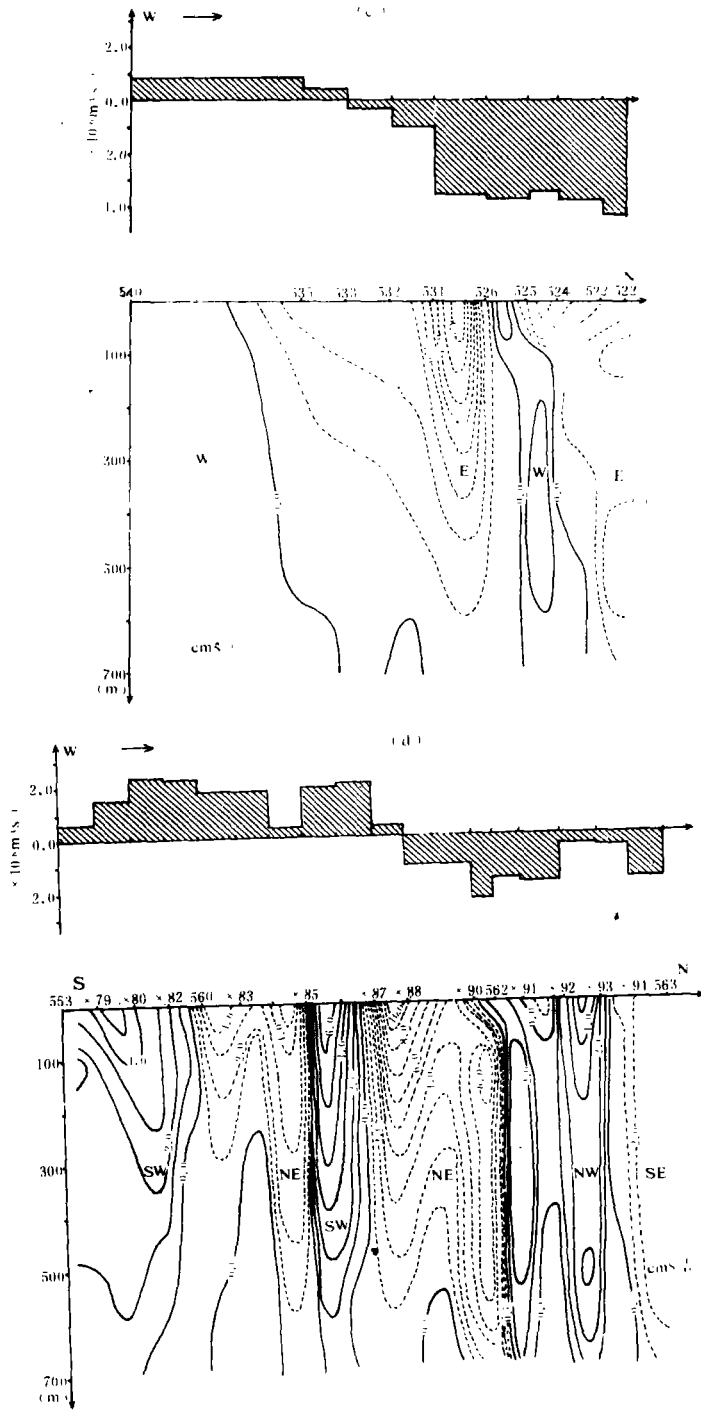


图5 地转流速(下)和体积输送(上)的断面分布  
 (a) 37°N, (b) 29°N, (c) 26.5°W, (d) 16.5°W

受到沿岸断面上观测深度的限制,故取 XBT 的最大有效测量深度近似作为该区域中零面所在的位置。虽说本文选取的无运动面也许浅了些,但计算结果仍不失有代表性。在 3 条 CTD 断面上,我们根据 Stramma<sup>[6]</sup> 给出的加拿利海盆中的统计零面进行了重复计算(图略),结果发现除前者计算的流速值偏低以外,其上层流场结构有着明显的相似性,而且与上面讨论的水团分布也是一致的。

### (一) 纬向断面

由图 5a 可以看到,在亚速尔—葡萄牙断面上斜压流场的分布是相当复杂的,赤道向和极向流动相互交叉,呈现了一种“环状”(cellular)结构,这一特征早在 Wunsh 和 Barbara Grant<sup>[27]</sup> 的研究中就已经注意到了。总的来说,断面上计算的斜压流是非常微弱的,且以南向为主。

为了清楚起见,我们将断面分为 3 个部分,即近岸(504—510站)、外海(514—522站)和中部(511—513站)区域。在断面外海一侧,是一个弱流控制的区域,相对强流速出现在 514—515站之间的 200m 层上,其值约为 3.0cm/s,这部分可以看作为北大西洋流的一个南向分支。断面中部似以中尺度涡占优势,但涡的强度亦是相当微弱的。近岸部分则为熟知的葡萄牙海流区域,计算的最大流速约为 7.0cm/s,流向为南,但 506和 508站之间的区域流向相反,这支北向流动的表层流速为 4.0cm/s。根据“水文特征”一节分析,这支逆向流动影响的深度可能不仅局限于上层,所以不能简单地将它看作为一个活性的涡旋。在 10—700m 层内,计算的体积输送(北向)为  $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而整个断面上的输送(南向)则为  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,这一量值与 Saunders, Pollard 和 Pu<sup>[4, 10]</sup> 获得的量值 ( $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 相对于 850m) 是一致的。

在 29°N 断面(图 5b)上,经向流动亦相当微弱。相对强流带(3—5 cm/s)呈现在 550—553站之间,流向为南,这条带可能代表了加拿利海流。在其东部仍有南向流动出现,但流速更微弱。在近岸区域,地转流结构由于受到地形的影响,几无规律可循。这一断面,10—700m 范围的累积输送(南向)为  $5.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 远比北部断面强。

### (二) 经向断面

亚速尔海流由 26°30'W 断面(图 5c)上的一支强流带表示,流轴位于 526—531站之间,最大东向流动出现在次表层,约为 8.0cm/s。在断面的北端,呈现了另一条东向流带,相比之下,流速则较为微弱(2.5—4.0cm/s)。在这两条东向流带之间,为一微弱的逆向流动区域。不难推测,当它们进入研究区域后,势必会和来自亚速尔群岛东部(37°N 断面上)的那支南向流动汇合,并继续朝东北方向而去,这可以从近岸断面上亚速尔海流的流带变窄、流速加强得到证实。在其南北两侧,几乎都存在比较微弱的逆流(约 1.0cm/s),这同样呈现在 Stramma 的图 3<sup>[16]</sup> 中。我们计算的由亚速尔海流携带的体积输送为  $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,它占了整个断面(29°—37°30'N 之间)上总体积输送的 95%。

从图 1 中可见,沿岸那条断面为一条准经向断面,它始于加拿利群岛附近,经马德拉群岛朝西北延伸,到了 562站又折向东北,所以,该断面上地转流的方向不能简单地看作为

东向或西向。这里复杂的斜压流场结构除了与断面折向有关以外,与加拿利群岛和马德拉群岛周围复杂的水文状况也是分不开的。尽管如此,亚速尔和加拿利两支海流在断面上还是比较明显的。前者位于断面中部的 $\times 87-562$ 站之间,流向为东北,后者则出现在断面南部区域,流向则为西南。亚速尔海流在这一断面上呈现了它的双核结构,一个位于 $\times 87-\times 88$ 站之间表层,最大流速为 $10.4\text{cm/s}$ ,另一个则位于北侧的 $\times 90-562$ 站之间,强流速区域( $>6.7\text{cm/s}$ )出现在 $150\text{m}$ 层而不是表层。该迹象进一步证实了,断面上亚速尔海流乃是它的主流与来自亚速尔群岛东部和南部的两个分支的合成。在它的两侧,我们同样发现了两支由东向西的逆流,且流速远较 $26^{\circ}30'W$ 断面强,超过了 $6.0\text{cm/s}$ 。尽管它们的动力机制至今仍不清楚,但它们的存在则是不容置疑的。在上面的分析中曾提到,亚热带模态水是由东向西扩展的,看来它与亚速尔海流南侧的那支逆流的贡献是分不开的。由该断面上的体积输送计算可以看到,虽然亚速尔海流在进入调查海区以后,在它的南侧不断有海水离开主流向南而去,但它的东向输送仍强达 $4.4 \times 10^6\text{m}^3/\text{s}$ ,与 $26^{\circ}30'W$ 断面相比几乎相差无几,这进一步证明了亚速尔海流可能得到了来自北部区域的水体补充。

图6为 $100\text{m}$ 层上的地转流矢量分布,我们试图通过它来导出调查海区中总的环流特征。亚速尔海流的主流由西向东流动,在 $35^{\circ}N$ 附近穿过 $26^{\circ}30'W$ 断面进入调查海区,在它的南部有一小部分水体离开主流向南而去,而其北部另有两个分支与它汇合,然后穿过沿岸断面继续流往东北方向,在大约 $15^{\circ}W$ 附近,亚速尔海流开始分离,一部分水体转向北沿葡萄牙海岸逆流而上,而另一部分水体则转而向南加入加拿利海流中,后者经南部断面穿过加拿利群岛区流向南方。葡萄牙海流沿葡萄牙近岸陆架由北部进入调查区域,然后继续沿岸南下,一部分进入直布罗陀海峡,以平衡地中海流出水;而另一部分则汇入亚速尔海流的南向分支。除了这几支明显的流带以外,剩余区域则为活性中尺度涡控制。

应该指出的是,上面提到的亚速尔海流的北向分支,并非偶然现象。在温、盐度断面图上,我们就已经注意到了在葡萄牙近岸存在较强的纬向梯度。等值线由东向西倾斜亦表明了这里存在一支北向的流动。实际上,早在1936年和1942年这支流动就已经标明在Iselin和Severdrup等人绘制的北大西洋总环流分布图上<sup>[1,28]</sup>。而后,Kase等人提出的大尺度动力

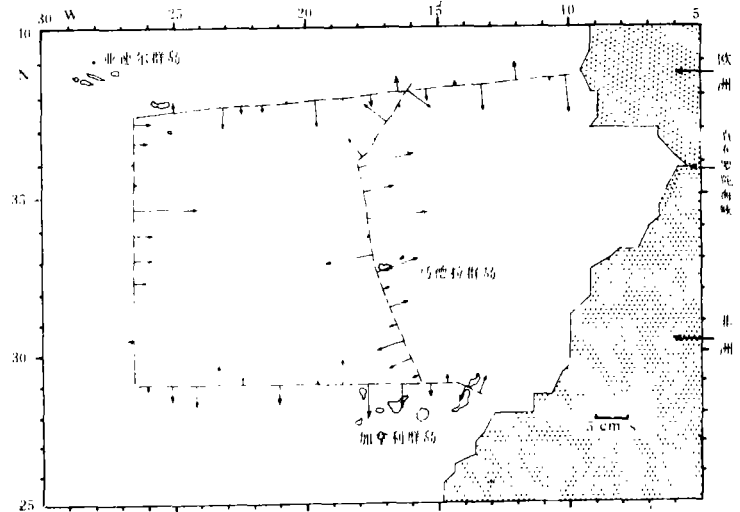


图6 地转流矢量分布(100m层)

地形图亦表明了这支逆向流动的存在。显而易见,虽然上述作者未直接明确指出这是亚速尔海流的一个北向分支,但它的存在是不容置疑的。这里我们之所以称它为亚速尔海流的北向分支,因为从“温、盐度特性”一节的分析中已经看到,它的温盐度性质和空间分布与 $35^{\circ}N$

断面上亚速尔主流区域中的特征是相同的,然而对于它的转向机制,至今还是不清楚的。

#### 四、结 语

1. 调查区域主要由北大西洋表层水、北大西洋中央水、地中海水和北大西洋深层水4个源地水团组成,它们的消长变化以及与外来水团(拉普拉多海水、南极中层水和亚极地模态水等)的交织、混合,构成了本海区独特的水文特征。

2. 拉普拉多海水和亚极地模态水的南向入侵限于亚速尔锋以北,而亚热带模态水只出现在该锋以南,它的东边界为加拿利海流,但它的西边界和南边界则超出了本文研究范围。亚速尔锋也是区分西北大西洋(中央)水和东北大西洋(中央)水的边界,它的一个明显特征是,盐度锋总是暴露于海面,而温度锋仅出现在次表层以下,且它们可以跟踪到1800m深层。

3. 研究区域中的斜压流是相当微弱的,尤其是经向流动。即使在亚速尔海流区域,计算的最大流速也不超过15cm/s。逆向流动主要出现在亚速尔海流的两侧,尽管它们的流速比较微弱,但它们对本海区水文状况的影响还是比较明显的,诸如亚热带模态水,当它在冬季形成之后,离开源地区域由东向西传播,无疑与亚速尔海流南侧的那支逆流有关。亚速尔海流的主体位于亚速尔群岛以南 $35^{\circ}\text{N}$ 处,在调查区域中呈东北向流动,它在 $15^{\circ}\text{W}$ 附近分出两个分支,北分支沿葡萄牙海岸北上,而南支则汇入加拿利海流。

4. 亚速尔海流和加拿利海流构成了亚热带环流的东部再循环,在这个反气旋环流系统中,估算的一个封闭区域中10—700m层之间总的地转输送是不平衡的,它们的流入量为 $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,流出量为 $5.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。故尚有 $0.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的海水在反气旋环流内部下沉进入深层环流中。

本文得到了联邦德国基尔大学海洋研究所G.西德勒教授和T.米勒博士的热情帮助和指导。在计算和绘图过程中还得了该所一些先生的帮助。本文资料由该所物理海洋学研究室提供。在此谨致谢意。

#### 参 考 文 献

- [1] Sverdrup, H. U. et al., *The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1942, 1087.
- [2] Kase, R. H. and G. Siedler, Meandering of the subtropical front southeast of the Azores, *Nature*, **300** (1982), 5889: 245—246.
- [3] Müller, T. J., Current and temperature measurements in the North East Atlantic during NEADS, *Ber. Inst. f. Meereskunde Kiel*, Nr. **90** (1981), 100.
- [4] Saunders, P. M., Circulation in the eastern North Atlantic, *Journal of Marine Research*, **40** (1982), Suppl., 641—657.
- [5] Gould, W. J., *The Northeast Atlantic Ocean*, Editor, Springer-Verlag, 1983.
- [6] Stramma, L., Geostrophic transports in the warm water sphere of the eastern subtropical North Atlantic, *Journal of Marine Research*, **42** (1984), 537—558.
- [7] Maillard, C., Mean circulation and exchanges in the Northeastern Atlantic from historical data.,

- Rapp. P. V. Reun. Cons. int. Explor. Mer.*, **185** (1984), 131—139.
- [ 8 ] Siedler, G. *et al.*, Strong current events related to a subtropical front in the North East Atlantic, *J. Phys. Oceanogr.*, **15** (1985), 885—897.
- [ 9 ] Gould, W. J., Physical oceanography of the Azores front, *Progress in Oceanography*, **14** (1985), 167—190.
- [ 10 ] Pollard, R. T. and S. Pu, Structure and circulation of the upper Atlantic Ocean northeast of the Azores, *Prog. Oceanogr.*, **14** (1985), 443—462.
- [ 11 ] Käse, R. H. *et al.*, Current, fronts and eddy fluxes in the Canary Basin, *Prog. Oceanogr.*, **14** (1985), 231—257.
- [ 12 ] Käse, R. H. *et al.*, A quasi synoptic survey of the thermocline circulation and water mass distribution within the Canary Basin, *Journal of Geophysical Research*, **19** (1986), c8, 9739—9748.
- [ 13 ] Tomczak, M. Jr., A multi parameter extension of temperature/salinity diagram techniques for the analysis of non isopycnic mixing, *Prog. Oceanogr.*, **10** (1982), 147—171.
- [ 14 ] Dietrich, G., *et al.*, *General Oceanography*, Second Edition, John Wiley, New York, 1980, 626.
- [ 15 ] Muller, *et al.*, The distribution of water masses on the Greenland Scotland Ridge in August/September 1973, *Ber. Inst. f. Meeres. Kiel*, Nr. **62** (1979), 172.
- [ 16 ] Stramma, L., Potential vorticity and volume transport in the Eastern North Atlantic from two long CTD sections, *Dt. Hydrogr. Z.*, **37** (1984), 147—155.
- [ 17 ] Emery, W. J. and J. S. Dewar, Mean temperature salinity, salinity depth and temperature depth curves from the North Atlantic and North Pacific, *Prog. Oceanogr.*, **11** (1982), 219—305.
- [ 18 ] Grose, P. L., CTD data processing, *Draft Report for SCOR Working Group 51*, 1981. (Unpublished manuscript).
- [ 19 ] Mamayer, O. I., Temperature salinity analysis of world Ocean waters, *Elsevier Scientific Publishing Company*, Amsterdam Oxford, New York, 1975, 369.
- [ 20 ] Fiúza, A. F. G. and D. Halpern, Hydrographic observations of the Canary Current between 21 N and 25.5 N in March—April 1974, *Rapports et proces verbaux der reunions, Conseil permanent International pour L'exploration de la Mer*, **180** (1982), 58—64.
- [ 21 ] Harvey, J.,  $\theta$ - $S$  relationships and water masses in the eastern North Atlantic, *Deep Sea Research*, **29** (1982), 8 (A): 1021—1033.
- [ 22 ] Wust, G., Die stratosphäre des Atlantischen Ozeans, *Wiss. Ergeb. Deutsche Atl. Exped. Vermessungs. Forschungsschiff Meteor*, **8** (1936), 1: 109—288.
- [ 23 ] McCartney, M. S., The subtropical recirculation of mode waters, *Journal of Marine Research*, **40** (1982), Suppl: 427—464.
- [ 24 ] Worthington, L. V., The 18 water in the Sargasso Sea, *Deep Sea Research*, **5** (1959), 297—305.
- [ 25 ] McCartney, M. S. and L. D. Talley, The subpolar mode water of the North Atlantic Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, **12** (1982), 1169—1188.
- [ 26 ] Siedler, G., *et al.*, The Madeira mode water, *Journal of Physical Oceanography*, 1987, (submitted).
- [ 27 ] Wunch, C. and B. Grant, Towards the general circulation of the North Atlantic Ocean, *Prog. in Oceanogr.*, **11** (1982), 1—59.
- [ 28 ] Iselin, C. O., A study of the circulation of the western North Atlantic, *Papers in Physical Oceanography and Meteorology*, **4** (1936), 4: 101.