

北太平洋冬季海水层结分析

叶志敏, 张 铭

(解放军理工大学气象学院, 江苏 南京, 211101)

摘 要: 本文利用最新 ARGO 全球海洋观测网的资料, 计算了北太平洋冬季的海水层结, 发现北太平洋冬季海水存在层结曲线呈单极值、双极值和多极值等多种结构, 本文将其初步概括为 6 类, 并对各类层结的温度结构作了分析。

关键词: 北太平洋; ARGO 全球海洋观测网; 层结

中图分类号: P722 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2004)01 - 0020 - 07

1 引言

海水温度、盐度是海洋水体的重要水文特征, 由温、盐、压力决定的密度分布不均导致了海洋热盐环流的形成。由于海洋中声速对温度、盐度和压力的依赖关系, 海水层结将直接影响声纳的有效使用和反潜作战操作^[1]。密度的垂直分布不均, 可以由层结参数来描述。密度随深度急剧变化, 称为(密度)跃层, 此处层结参数会有很大的变化。正是跃层的存在, 使海洋中内波在该处附近有较大的振幅^[2~3], 而内波对潜艇航行有较大影响。研究表明, 中东太平洋温跃层深度异常的正距平与热带大气海洋中 ENSO 事件密切相关^[4]。因此, 温盐结构和海洋层结特征的研究无论在理论上和实际应用上均十分重要。

以往的海洋温盐资料主要来源于调查船断面观测和零星的升降式浮标观测。这些浮标观测大部分都只是小范围、短期或断续的观测, 观测精度也不高。ARGO 海洋观测网能够快速、准确、大范围地收集全球海洋上层的海水温、盐度剖面资料。本文利用最新的 ARGO 资料来计算北太平洋冬季海水的层结参数, 并依据层结参数曲线的形状来进行分类, 并给出其可能的解释。

2 资料介绍及处理

本文采用“ARGO 全球海洋观测网”^[5~7]的资料。ARGO 计划是由美国等国家的大气、海洋科学家于 1998 年推出的一个全球海洋观测试验项目, 旨在快速、准确、大范围收集全球海洋上层的海水温、盐度剖面资料。一种称为自律式的拉格朗日环流剖面观测浮标(简称 Argo 浮标)担此重任。它每隔 10~14 d 自动发送 1 组剖面实时观测数据,

垂直分辨率高达几十米甚至几百米。

本文取 2001 年 1 月上旬北太平洋上的 ARGO 温盐资料。读取各观测层上的海水压力(1dbar = 1m 厚单位面积海水柱重量, 以下将海水压力作为海水深度处理)、温度、盐度数据(盐度值有时缺测), 并计算对应的密度。层结参数可用 Brunt-Väsala 频率表示, 并可写成:

$$N^2 = \frac{g}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dz} \quad (1)$$

对于垂直分布非均匀的观测层, 为了充分利用观测资料, 不妨采用不等距差分法^[8]。设观测层共 n 层, 深度分别为 z_1, z_2, \dots, z_n , 对应密度为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 。假设 ρ_i 在 z_i 附近为抛物线分布, 则密度随深度的变化率为:

$$\left(\frac{d\rho}{dz}\right)_i = a_i \left(\frac{\rho_i - \rho_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}\right) + (1 - a_i) \left(\frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{z_{i+1} - z_i}\right), \quad i = 2, \dots, n-1. \quad (2)$$

其中 $a_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{z_{i+1} - z_{i-1}}$, $i = 2, \dots, n-1$ 。则有:

$$N_i^2 = \frac{g}{\rho_i} \left(\frac{d\rho}{dz}\right)_i, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (3)$$

在边界处 ($i=1, i=n$) 分别利用后差和前差公式

$$N_1^2 = \frac{2g}{\rho_1 + \rho_2} \left(\frac{d\rho}{dz}\right)_1 = \frac{2g}{\rho_1 + \rho_2} \frac{\rho_2 - \rho_1}{z_2 - z_1} \quad (4)$$

$$N_n^2 = \frac{2g}{\rho_{n-1} + \rho_n} \left(\frac{d\rho}{dz}\right)_n = \frac{2g}{\rho_{n-1} + \rho_n} \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{z_n - z_{n-1}} \quad (5)$$

本文依据以上各式计算层结参数 N^2 , 并作出其垂直分布图。

3 层结曲线分类

大洋中的温盐结构及层结形式多样, 此处选取冬季 2001 年 1 月 1~8 日的 27 个个例(参见表 1)来分析, 所选浮标均限于北太平洋范围, 分别位于日本海、北太平洋西边界、中纬度中太平洋和赤道东太平洋及赤道西太平洋。

3.1 第一类层结

表 1 中, 第 1~8 个浮标个例所对应的层结类型大致相似, 呈单极值峰状, 可归为第一类层结。对这 8 个浮标个例所对应的层结作平均, 得到第一类层结的典型曲线(图 1a)。上层 20~30m 为浅薄的混合层, 60~180m 处为跃层, 跃层处呈尖顶峰状, 跃层强度最大约为 $2.8 \times 10^{-4} \text{s}^{-2}$ 。约在 200m 以下则层结参数随深度几乎不变, 其值约为 $0.5 \times 10^{-4} \text{s}^{-2}$, 表明该范围海水密度的对数基本上随深度线性增加。由图可见, 此类层结的跃层厚度小而强度较大。

表 1 北太平洋冬季 2001 年 1 月 1~8 日的浮标个例明细表

| 序号 | 浮标号 | 时间 (年月日) | 记录层数 | 位置 (纬度、经度) | 最大深度 |
|----|-------|----------|------|--------------------|--------|
| 1 | 21863 | 20010102 | 47 | 41.970°N 135.320°E | 793.0 |
| 2 | 29020 | 20010102 | 33 | 36.050°N 131.130°E | 999.0 |
| 3 | 29021 | 20010102 | 33 | 38.030°N 130.210°E | 993.0 |
| 4 | 29022 | 20010102 | 33 | 38.870°N 131.310°E | 996.0 |
| 5 | 21870 | 20010103 | 48 | 40.650°N 134.770°E | 794.0 |
| 6 | 21881 | 20010101 | 48 | 38.830°N 133.580°E | 798.0 |
| 7 | 29004 | 20010102 | 77 | 31.415°N 178.605°E | 675.0 |
| 8 | 51706 | 20010107 | 93 | 11.948°N 196.753°E | 527.0 |
| 9 | 29025 | 20010101 | 42 | 37.251°N 158.972°E | 388.0 |
| 10 | 21861 | 20010102 | 48 | 43.550°N 156.930°E | 795.0 |
| 11 | 21886 | 20010104 | 48 | 38.130°N 137.540°E | 802.0 |
| 12 | 29000 | 20010106 | 41 | 43.825°N 167.396°E | 395.0 |
| 13 | 51699 | 20010108 | 81 | 05.403°N 225.948°E | 415.0 |
| 14 | 29010 | 20010101 | 45 | 34.437°N 154.816°E | 1557.0 |
| 15 | 21872 | 20010103 | 48 | 41.890°N 138.310°E | 798.0 |
| 16 | 21876 | 20010104 | 47 | 38.440°N 133.160°E | 792.0 |
| 17 | 29003 | 20010102 | 66 | 40.111°N 172.656°E | 563.0 |
| 18 | 51705 | 20010101 | 80 | 08.553°N 169.877°E | 423.0 |
| 19 | 29011 | 20010101 | 45 | 41.710°N 162.249°E | 1549.0 |
| 20 | 49005 | 20010101 | 54 | 04.420°N 274.388°E | 605.0 |
| 21 | 21858 | 20010106 | 48 | 46.240°N 139.220°E | 799.0 |
| 22 | 29002 | 20010106 | 51 | 37.846°N 168.030°E | 444.0 |
| 23 | 51710 | 20010105 | 87 | 11.685°N 200.720°E | 464.0 |
| 24 | 29034 | 20010108 | 63 | 28.504°N 143.012°E | 2000.0 |
| 25 | 29035 | 20010108 | 62 | 28.532°N 143.015°E | 1899.0 |
| 26 | 29028 | 20010102 | 42 | 38.198°N 179.475°E | 384.0 |
| 27 | 29029 | 20010102 | 43 | 44.210°N 162.611°E | 394.0 |

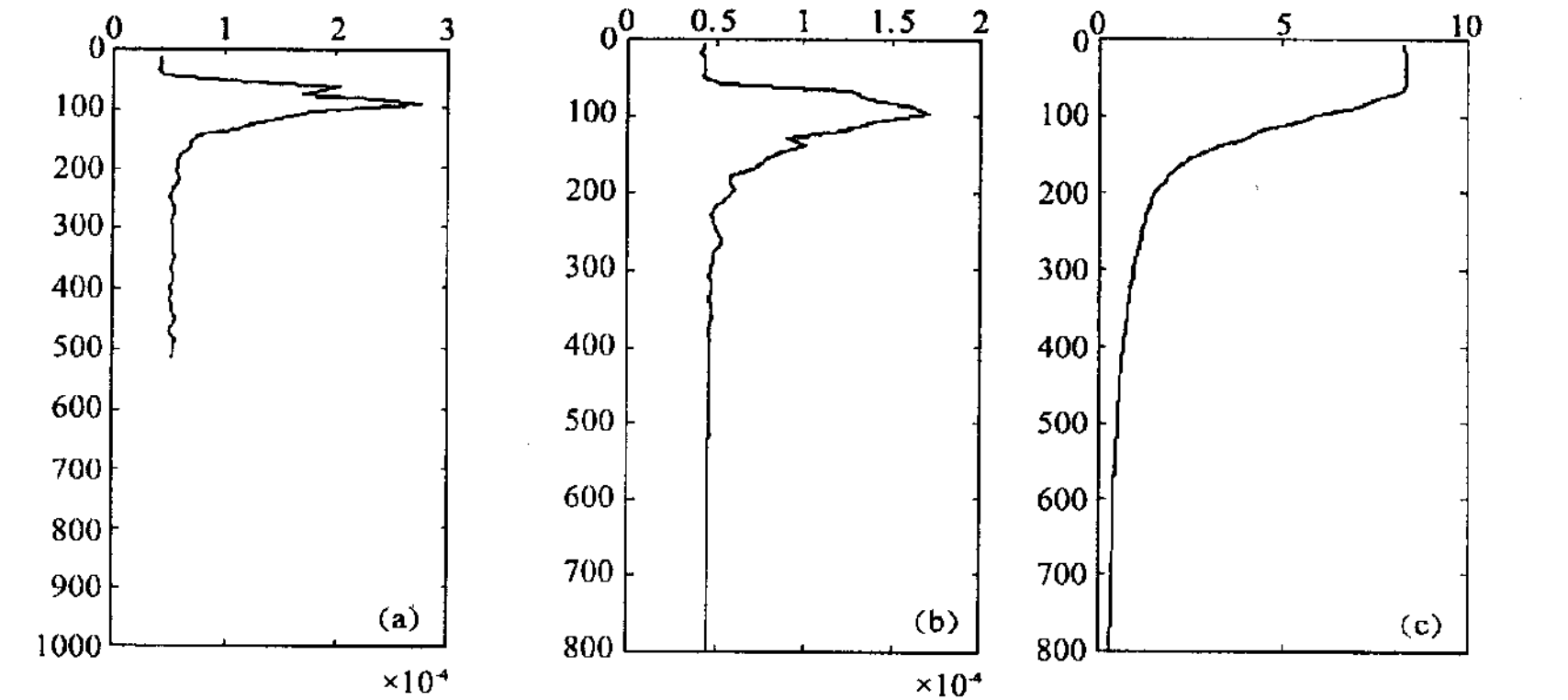


图 1(a) 第一类层结典型曲线 , (b) 21881 号浮标层结曲线 , (c) 21881 号浮标温度曲线
(图中纵坐标为深度, 单位 m , 横坐标图 (a)、(b) 为 $10^{-4}s^{-2}$, (c) 为 $^{\circ}C$)

3.2 第二类层结

表 1 中第 9~13 个浮标个例所对应的层结, 可归为第二类层结。该层结形状与第一类层结相同, 也是单极值型, 但跃层所在深度较深。得到该类层结的典型曲线 (参见图 2a), 其中深度 100m 以上为混合层, 100~200m 为跃层, 层结最大强度也达到 $2.8\times 10^{-4}s^{-2}$ 。

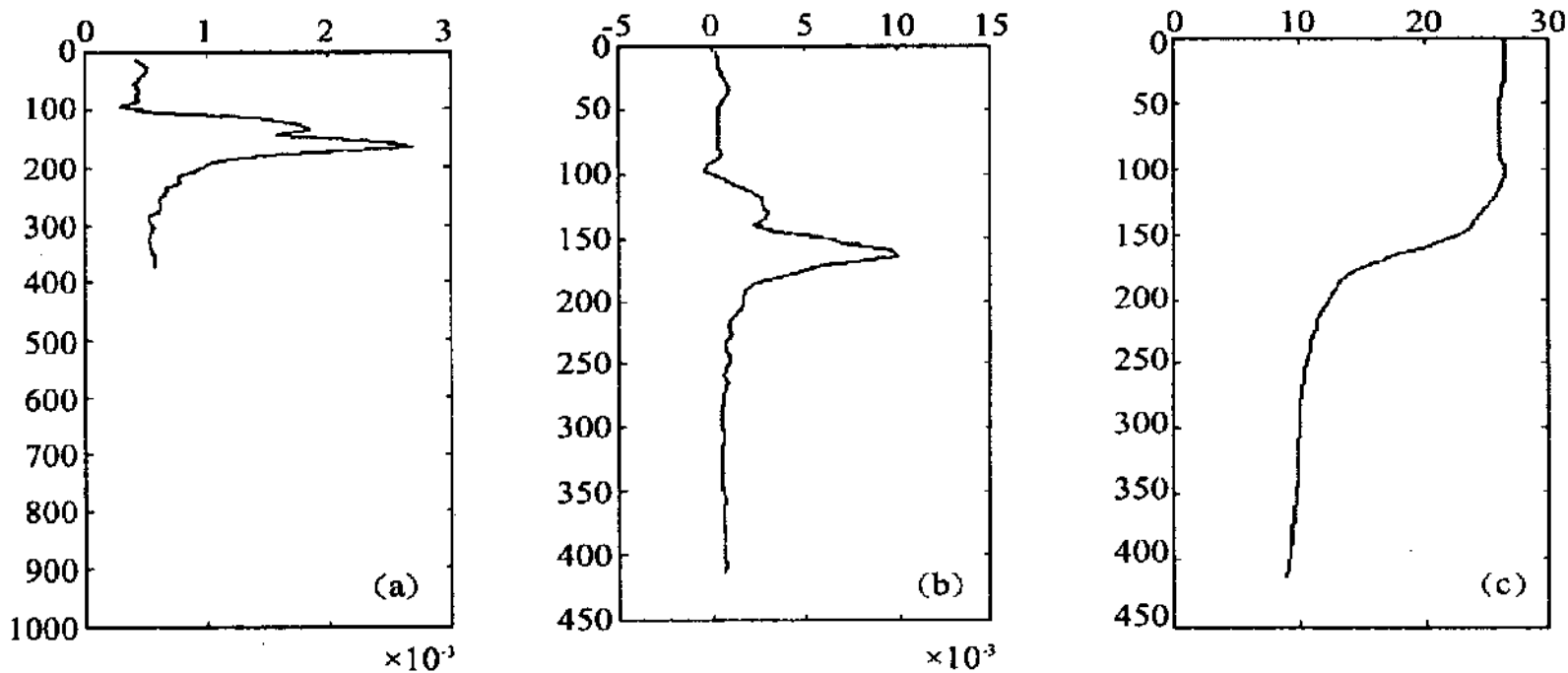


图 2 (a) 第二类层结典型曲线 , (b) 51699 号浮标层结曲线 , (c) 51699 号浮标温度曲线
(图中纵坐标为深度, 单位 m , 横坐标图 (a)、(b) 为 $10^{-4}s^{-2}$, (c) 为)

3.3 第三类层结

表 1 中第 14~18 个浮标个例所对应的层结, 都为双极值峰状, 将其归为第三类层结。其中 29010 号浮标、21872 号浮标(图 3a)、21876 号浮标个例对应的层结, 极值分别在 180m、200m , 30m、80m 和 60m、80m 处, 在极值处呈尖顶, 两处极值相距较近, 较强层结(或跃层)的海水厚度小。29003 号浮标(图 3b)和 51705 号浮标的峰值处较平滑, 两处较强层结海水所占厚度较大。前者从 100~200m , 300~400m 皆是较强层结, 最大强度可达 $1\times 10^{-4}s^{-2}$;后者似波包状, 从 50~200m 整层皆是强的层结, 其上有两处极值。

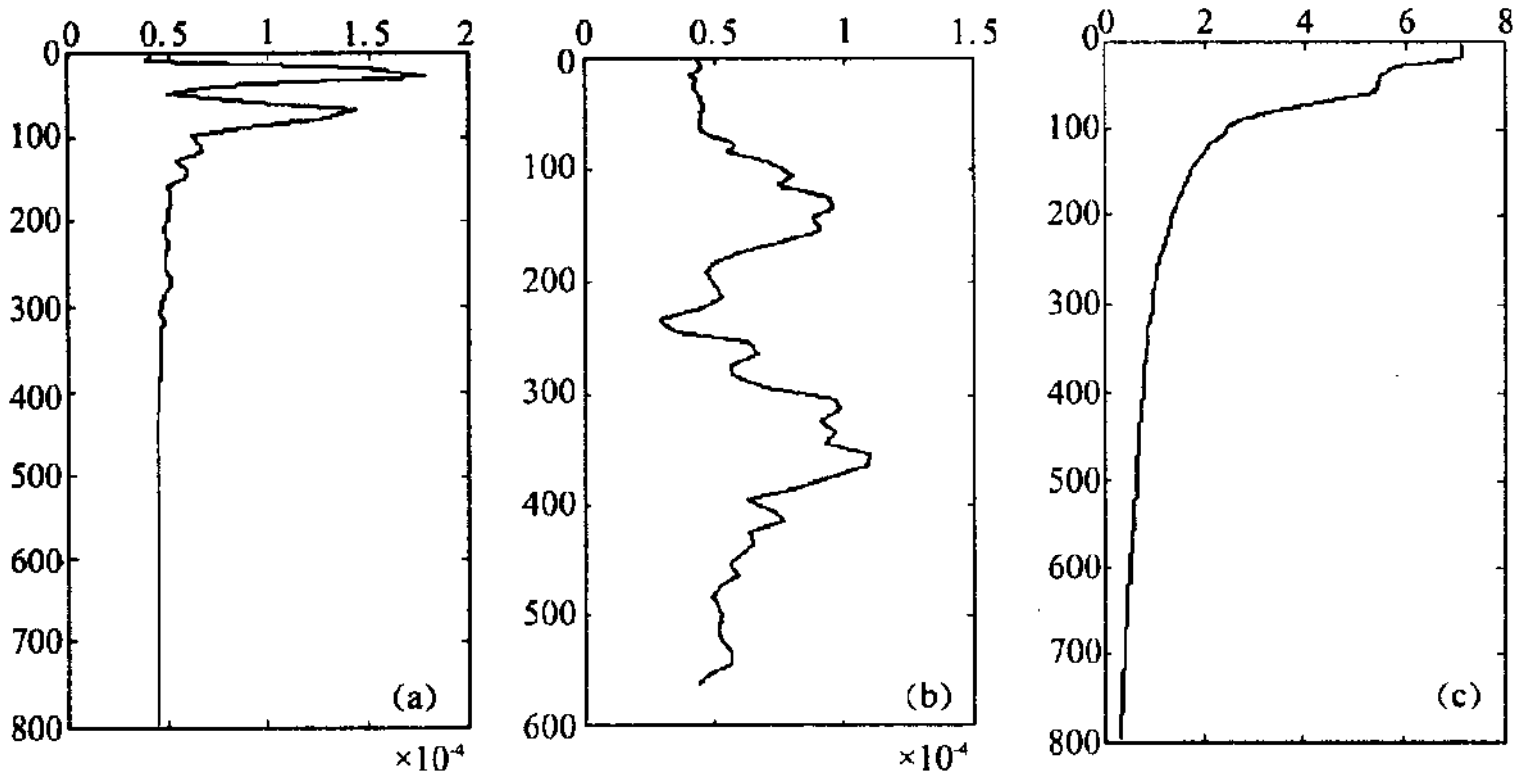


图 3 (a) 21872 号浮标层结曲线 , (b) 29003 号浮标层结曲线 (c) 21872 号浮标温度曲线
(图中纵坐标为深度, 单位 m , 横坐标图 (a)、(b) 为 $10^{-4}s^{-2}$, (c) 为)

3.4 第四类层结

表 1 中第 19~20 个浮标个例(29011 号、49005 号浮标个例)代表着另一类层结(参见图 4a、b),可称其为第四类层结。特征是该层结在海表处最大,最大值分别可达 $0.8 \times 10^{-3} \text{s}^{-2}$ 和 $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-2}$,从海表至约 20~40m 深度处层结参数迅速减小,以下深度层结几乎为常数。

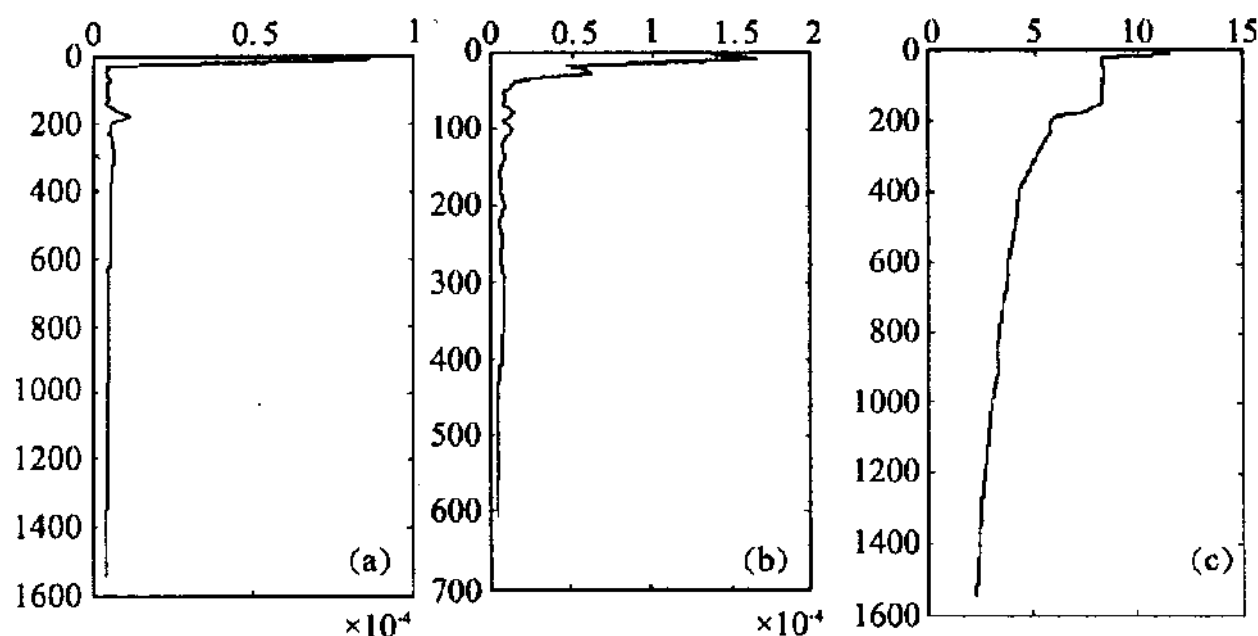


图 4 (a) 29011 号浮标层结曲线, (b) 49005 号浮标层结曲线, (c) 29011 号浮标温度曲线
(图中纵坐标为深度, 单位 m, 横坐标图 (a)、(b) 为 10^{-4}s^{-2} , (c) 为 $^{\circ}\text{C}$)

3.5 第五类层结

由于海水温盐结构的复杂性,海水也存在着多极值的层结。例如:21858、29002 和 51710、29034、29035 号浮标个例。21858 号浮标个例所示的层结(图 5a),有三处极值:100m, 160m, 210m。160m 处强度最大,约为 $7 \times 10^{-5} \text{s}^{-2}$ 。29002 号浮标个例所示的层结(图 5b),在 100m 极值处呈尖顶,从 150m 至 400m 层结都很强,有多处极值。后四个浮标个例的层结曲线上,最上面的极值呈尖顶,且强度最大,以下深度有多处起伏,强度稍弱,但厚度较大(图略)。这些归为第五类层结。

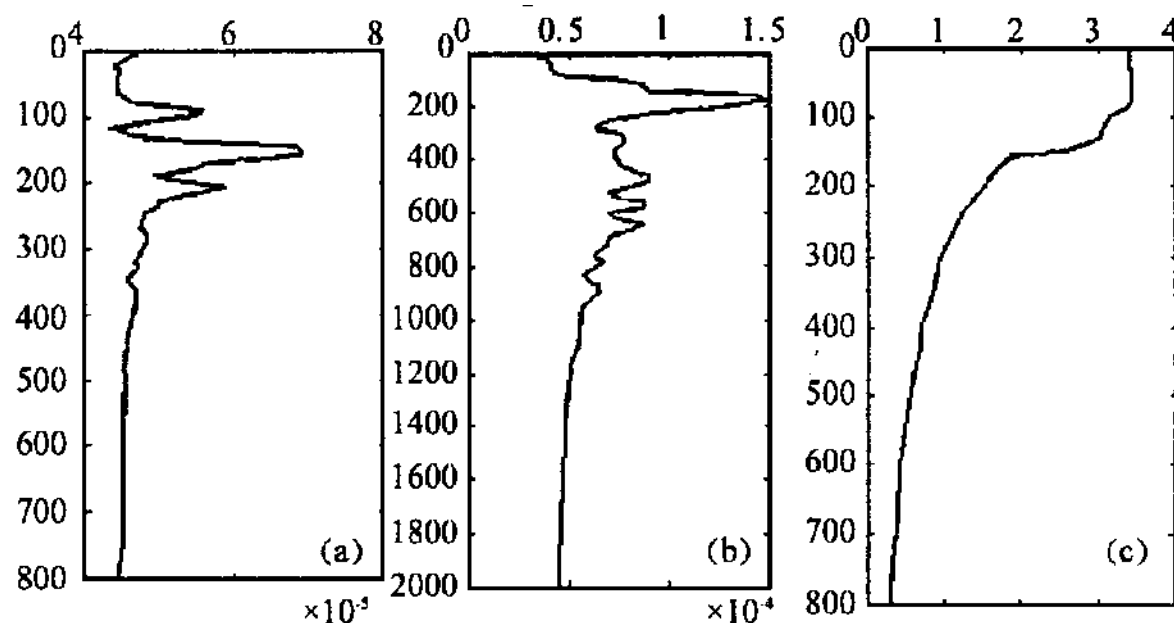


图 5 (a) 21858 号浮标层结曲线, (b) 29002 号浮标层结曲线, (c) 21858 号浮标温度曲线
(图中纵坐标为深度, 单位 m, 横坐标图 (a)、(b) 为 10^{-5}s^{-2} , (c) 为 $^{\circ}\text{C}$)

3.6 第六类层结

另外,还有一些浮标个例的层结,虽然层结曲线大体上是单极值型,但其层结较大的海水所占的深度较大,将其归为第六类层结。例如:29028 号浮标个例对应的海水层结(图 6a),其强度从 120m~400m 都在 $0.6 \times 10^{-4} \text{s}^{-2}$ 左右。29029 号浮标个例对应的海水层结(图 6b),其强度从 180m~350m 都在 $0.4 \times 10^{-4} \text{s}^{-2}$ 以上。

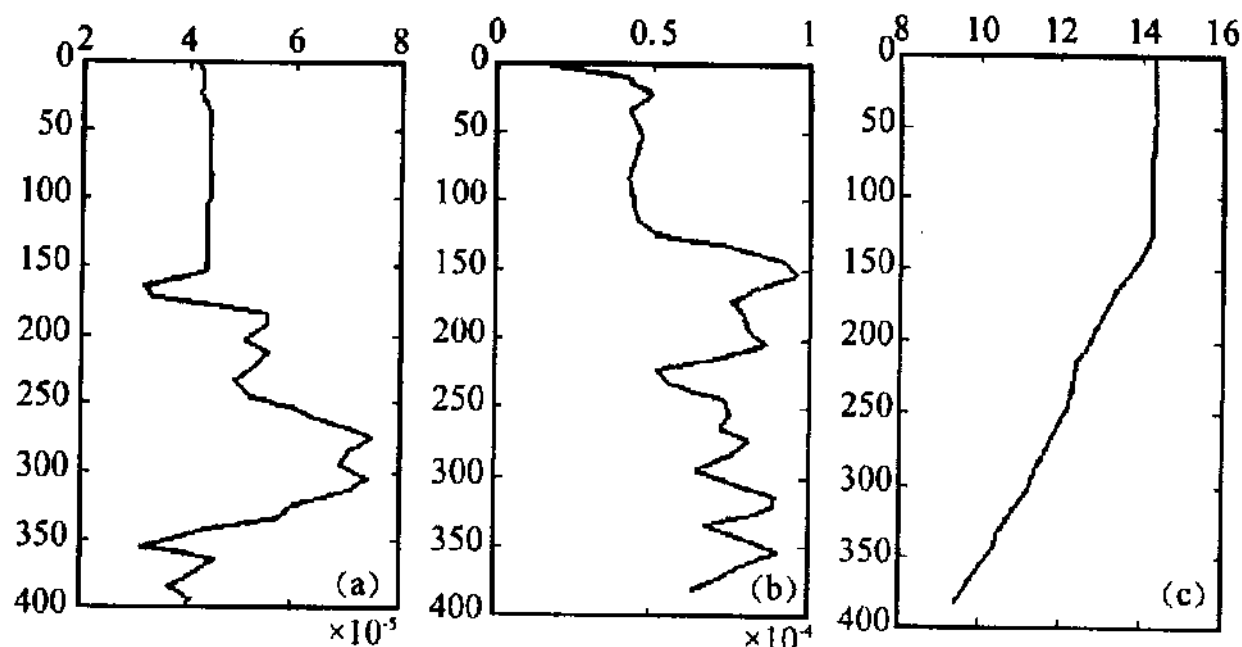


图 6 (a) 29028 号浮标层结曲线, (b) 29029 号浮标层结曲线, (c) 29028 号浮标温度曲线
(图中纵坐标为深度, 单位 m, 横坐标图 (a)、(b) 为 10^{-4}s^{-1} , (c) 为)

4 各类层结的温度结构

依海水状态方程, 温度、盐度的垂直分布决定海水密度, 故也影响海水的层结, 特别是温度对层结的影响更重要, 故在此对其作重点分析。

第一类和第二类层结一般对应着温度仅在某一薄层深度处迅速递减, 而其它深度则几乎不变。例如, 21881 号浮标个例对应的层结属于第一类, 其温度曲线上(图 1c), 温度只在 100m 附近迅速递减, 该段曲线随深度急剧变化, 其它深度上温度几乎不变。51699 号浮标个例对应的层结(图 2b)属于第二类, 其温度曲线(图 2c)只在 150m 附近急剧变化。

第三类层结, 一般存在两段温度急剧变化的海水薄层。例如, 在 21872 号浮标个例的温度曲线(图 3c)上, 30m 和 80m 处温度曲线急剧变化, 在两段之间存在一薄层, 其间温度几乎不变。又如, 29003 号浮标个例对应的温度曲线上(图略), 存在两段温度变化的海水层, 但其变化趋势与前面的个例相比, 缓和了许多。这两段水层厚度也大得多, 其间的过渡水层中温度变化不大。这就造成了对应的层结存在两处深厚的跃层。51705 号浮标个例对应的温度曲线(图略)在较大深度范围内(50~200m)迅速变化, 并且变化快慢趋势在某些薄层(100m、150m 附近)有起伏。这样的温度结构决定了海水层结的波包形状及多极值特性。

第四类层结对应着温度在表层的急剧降低, 如图 4c, 此处不再举例赘述。

第五类多极值的层结, 是由温度变化速率在较小深度范围内的起伏导致的。图 5c 列

出了 21858 号浮标的温度曲线。由此可见, 温度曲线斜率在极小深度范围内微小的起伏就可能导致层结的一个极值。

第六类层结对应着温度在较大的深度范围内的迅速递减, 而在其它深度几乎不变。它和第一、二类层结对应的温度分布不同的是, 温度迅速变化的范围不再局限于薄层, 而是扩展到更厚的水层。此特征由 29028 号浮标对应的温度曲线(图 6c)上可以看出。

5 结语

北太平洋冬季海水存在着层结曲线呈单极值、双极值和多极值等多种结构, 本文可将其初步概括为 6 类。这些层结曲线的极值(强度达到一定标准时, 称为跃层)出现的深度不同, 在表层、次表层甚至中层水中皆可出现; 即使是同一类型的层结, 层结较强的海水层(跃层)的厚度也有差异。这种层结的多样性, 是由海洋中温、盐结构的多样性决定的, 特别是温度对层结的影响更重要; 温度的垂直变化率在较小深度范围内的微小起伏就可能导致层结曲线出现一个极值。最后要指出的是, 因本文所取浮标个例有限, 该层结的分类并不很严格。此外并没有讨论层结随时间和空间的演变, 这些有待我们作进一步的工作。

参考文献:

- [1] JOSEPH M. BISHOP, APPLIED OCEANOGRAPHY. A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, 1984.
- [2] 叶安乐, 李凤歧. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992.
- [3] 杨殿荣, 等, 黄东海夏季温跃层的诊断研究[J]. 海洋学报, 1990, 12(1): 14~23.
- [4] 巢纪平, 厄尔尼诺和南方涛动动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [5] 许建平, 阿尔戈全球海洋观测大探秘[M]. 海洋出版社, 2002.
- [6] 许建平, 朱伯康. 全球海洋观测计划(ARGO)进入全面实施阶段[J], 海洋技术, 2001, 20(3): 9~16.
- [7] 许建平, 朱伯康. ARGO 全球海洋观测网与我国海洋监测技术的发展[J]. 海洋技术, 2001, 20(2): 15~17.
- [8] 廖洞贤, 王两铭. 数值天气预报原理及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 1986.

THE ANALYSIS OF SEA WATER'S STRATIFICATION IN NORTH PACIFIC OCEAN IN WINTER

YE Zhi-min, ZHING Ming

(Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China)

Abstract: Using the down to date ARGO data, the stratification of seawater in North Pacific Ocean in winter is calculated. It is found, the vertical stratification curve of the seawater shows many kinds, such as single extremum, two extrema and multiple extrema etc. This paper reduces these kinds to six types, and the temperature structure is analyzed too.

Key words: North Pacific Ocean; ARGO; stratification