白令海海盆区夏季水团分布及其年际变化

刘娜^①, 林丽娜^{②*}, 何琰^①, 李涛^③, 孔彬^④

① 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;

② 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

③ 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100;

④ 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266510

* 联系人, E-mail: linln@fio.org.cn

2015-09-25 收稿, 2015-11-07 修回, 2015-11-09 接受, 2016-03-15 网络版发表

南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2015-03-01, CHINARE2015-04-03)、海洋公益性行业科研专项(201205007)和国家海洋局第一海洋研究所 2014 年度基本科研业务费专项(2014T02)资助

摘要 利用1999, 2003, 2008, 2010, 2012和2014年夏季中国6次北极科学考察在白令海海盆区获取的重复断面水文数据, 对白令海海盆区水团分类及时空变化特征进行了分析. 结果表明, 白令海海盆水体主要由高温低盐的白令海海盆上层水、低温的白令海海盆中层水和高盐的白令海海盆深层水组成. 其中, 白令海海盆上层水主要位于40 m以浅, 经向上自南向北厚度逐渐减小, 垂向上与中层水之间存在显著的温跃层, 跃层强度年际变化显著; 白令海海盆中层水主要位于500 m以浅, 受白令海陆坡流的影响, 在北部陆坡流区有加深加厚的趋势; 海盆中层冷水与陆架冷水团同步变化, 根据冷水温度和范围差异, 可分为冷年和暖年两种状态, 且近十几年大致以6 a为周期交替变化. 2014年冷水温度最高且范围急剧减小, 是否是新一轮暖年的开始还需进一步论证; 白令海海盆深层水位于中层水以下, 是海盆区体积最大且最稳定的水体, 约占总水体体积的80%以上, 深层水的温盐范围年际变化较小, 维持在较为稳定的状态. 北部陆坡流的影响深度可至1000 m.

关键词 白令海海盆, 水团分布, 年际变化, 北极

白令海是位于北半球中高纬度的北太平洋边缘海(51°~66°N, 163°~157°W), 大致呈三角形, 顶端向北, 通过白令海峡与北冰洋楚科奇海相连, 底部由阿拉斯加半岛与阿留申群岛连接的长1600 km的岛弧构成, 海中岛屿众多. 白令海海底可分为两个区域, 水深浅于200 m的浅水区位于东北部, 称为白令海陆架区, 是世界上最大的陆架之一; 水深深于3000 m的深水区位于西南部, 称为白令海海盆区, 海盆海底平坦, 水深大致介于3800~3900 m之间. 白令海浅水陆架区和海盆区的面积几乎相等. 白令海海盆区南部有着广阔的海域与太平洋相通, 因此海盆区水文特征深受北太平洋影响. 白令海东北部陆架区由于水

深较浅, 其他因素对其影响显著, 例如受到冬季结冰和海冰融水淡化的影响, 这个海域已经具有极地海域的水文特点. 所以, 白令海浅水陆架区和海盆区的水文特征明显不同, 本文重点关注白令海西南部海盆区的水文特征.

白令海因地处高纬度, 终年严寒, 受气候条件所限, 对白令海的调查和研究较中低纬海域起步较晚且相对较少. 白令海海盆水文研究主要集中在在水团^[1~7]、环流^[8~13]和水体物质交换^[14~20]三个方面. 白令海海盆水体按温盐性质不同和所处深度不同主要分为3种水团, 分别为白令海上层水、中层水和深层水^[5~7], 其中上层水以高温、低盐和高溶解氧为主要

引用格式: 刘娜, 林丽娜, 何琰, 等. 白令海海盆区夏季水团分布及其年际变化. 科学通报, 2016, 61: 1478–1487

Liu N, Lin L N, He Y, et al. Distribution and interannual variation of water masses in the Bering Sea basin in summer (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1478–1487, doi: 10.1360/N972015-00852

特征;其下温度迅速降低,低温是中层水的主要特征,此外盐跃层和氧跃层均集中在此层^[4];深层水则主要表现出相对低温、高盐和低溶解氧特征.中层冷水现象是夏季北太平洋亚极地环流区的一个主要特征,其中尤以白令海最为深厚,密度可达 26.6 kg/m^3 ^[4].

海盆上层环流为气旋式环流(图1),分别由西部的堪察加流、南部的阿留申北部陆坡流和东部的白令海陆坡流首尾衔接而成.入流主要来自阿拉斯加流,通过阿留申岛链上的深水水道进入白令海,出流为堪察加流,通过堪察加海峡进入北太平洋,并最终汇入亲潮^[11].此外,还有一支白令海陆坡流北上汇入阿纳德尔流,经白令海峡进入北冰洋.海流冬季强、夏季弱,冬季流速比夏季高60%^[13].白令海的海水输运在太平洋和北冰洋的海水交换过程中扮演着重要角色.近期模拟^[15-17]和实测数据^[18,19]研究表明,在白令海北部陆架区和南部海盆区的海水交换中,中尺度涡起着决定性作用,控制着太平洋海水向北冰洋的输送.

前人对于白令海海盆水文环境的认识大多基于数值模拟、卫星遥感和少量的实测数据,其中利用实测数据研究海域水文特征及年际变化最为缺乏,单独针对白令海海盆区的研究则更少.我国在1999, 2003, 2008, 2010, 2012和2014年夏季组织了6次北极

科学考察,积累了丰富的调查资料,为我们深入认识白令海海盆区水文分布特征提供了数据基础,同时,也为认识该区域水文特征的年际变化提供了可能.本文以中国历次北极科学考察在白令海海盆区获取的温盐深仪(Conductivity-temperature-depth sensor, CTD)调查资料为基础,分析了白令海海盆区的温盐分布特征和水团分类,并在此基础上分析了水团的年际变化特征.

1 数据简介

1.1 数据来源

本文所用数据来自历次北极科学考察在白令海海盆区的重复调查断面,从图2中可以看出,断面沿俄罗斯和美国交界线,位于奥利伍托斯基海脊和拉特岛海脊之间,贯穿整个白令海海盆,且调查时间均集中在7月(表1).本文将该断面称为白令海海盆调查断面,断面调查站位分布见图2,详细的站位调查时间和经纬度信息参见中国历次北极科学考察报告^[21-26].

1.2 调查设备

在“雪龙”船装备SBE 911 CTD以前,用于水文CTD调查的主要设备存在多种类型,有时使用船上

图1 白令海海域流系分布示意图^[20]. ACC, 阿拉斯加沿岸流; KC, 堪察加寒流; BSC, 白令海陆坡流; ANSC, 阿留申北部陆坡流; AC, 阿纳德尔流

Figure 1 Currents in the Bering Sea^[20]. ACC, Alaskan coastal current; KC, Kamchatka current; BSC, Bering slope current; ANSC, Aleutian north slope current; AC, Anadyr current

图2 中国历次北极科学考察(1999, 2003, 2008, 2010, 2012 和 2014 年)白令海海盆区重复调查断面
Figure 2 Distribution of double sections in the Bering Sea basin collected by the first to sixth Chinese Arctic Research Expedition

表1 中国历次北极科学考察白令海海盆断面考察时间及站位信息表
Table 1 Details of sections in the Bering Sea basin collected by the first to sixth Chinese Arctic Research Expeditions

航次名称	年份	考察时间	站位	纬度范围(N)
中国第1次北极科学考察	1999	07-21~07-23	B1-1~B1-10	56.0°~60.4°
中国第2次北极科学考察	2003	07-24~07-27	BR08~BR24	53.3°~60.2°
中国第3次北极科学考察	2008	07-18~07-23	BR09~BR23	53.3°~60.5°
中国第4次北极科学考察	2010	07-10~07-15	B02~B12	53.3°~60.3°
中国第5次北极科学考察	2012	07-11~07-14	BL02~BL11	53.3°~60.3°
中国第6次北极科学考察	2014	07-18~07-22	B02~B11	53.6°~60.3°

的自带设备,有时为派出单位自备设备,表2给出了历次北极科学考察CTD调查设备和获取的数据类型.其中第1次北极科学考察采用的仪器为美国G.O公司生产的MARKIII-CTD,其数据温度精度为0.003℃,电导率精度为0.0003 S/m.第2次北极科学考察采用的仪器为MARKIII-CTD和美国海鸟公司生产的SBE25 CTD, SBE25数据温度精度为0.002℃,电导率精度为0.0003 S/m.

雪龙船SBE 911 plus CTD目前应用最为广泛,是由美国海鸟公司生产,主要测量的水文要素参数为温度、电导率和压力.它由水下单元、甲板单元和采水器等模块组成.通过铠装缆实现水下单元与甲板单元的连接,并将采集到的数据直接存储在操作间电脑上,可以实现记录的直接显示. SBE 911 plus CTD主要技术指标如表3所示.自2011年以来,包括温度、电导率和压力在内的重要传感器已经进行了双

表2 中国历次北极科学考察CTD调查设备及获取数据类型信息表

Table 2 Details of CTD types and their corresponding data types in the first to sixth Chinese Arctic Research Expeditions

航次名称	CTD类型	数据类型
中国第1次北极科学考察	MARK3	RAW/DAT
中国第2次北极科学考察	MARK3/SBE25	RAW/DAT
中国第3次北极科学考察	SBE 911	RAW/CNV
中国第4次北极科学考察	SBE 911	RAW/CNV
中国第5次北极科学考察	SBE 911	RAW/CNV
中国第6次北极科学考察	SBE 911	RAW/CNV

份安装,进一步确保了数据的可靠性.

1.3 数据预处理

即便对于相同的海洋要素,不同测量设备获取到的原始数据类型差异也较大,对后续处理的要求

表3 SBE 911 plus CTD主要技术指标

Table 3 The technical indexes of SBE 911plus CTD

传感器	电导率(S/m)	温度(℃)	压力
测量范围	0~7	-5~35	0~6800 m
准确度	0.0003	0.001	0.015%量程
稳定度(每月)	0.0003	0.0002	0.0015%量程
分辨率	0.00004	0.0002	0.001%量程
响应时间(s)	0.065	0.065	0.015

也不尽相同. 即便是同一测量设备, 鉴于在多个处理步骤中有数处需要人工干预, 个别参数的不同选择也会使得最终数据处理结果有所差异. 本文首先完备地收集了中国历次北极科学考察水文CTD调查数据, 根据航次的现场记录情况或者航次执行人的口头描述, 按照不同设备的数据处理要求进行了规范到1 m一个记录的处理. 为了支撑海洋化学、海洋生物等海洋学科对水样采集的要求, 通常CTD剖面观测是带有采水器的, 并且一般在仪器上升过程中进行采水. 为了避免采水时带来的干扰, 数据处理时尽可能采用下降过程的原始记录, 这同时可以避免压力传感器在上升过程中恢复较慢带来的影响.

2 白令海海盆区水团分类及特征

2.1 白令海海盆区水团分类

图3为历次北极科学考察在白令海海盆区的重复调查断面CTD数据温盐散点图, 所取数据垂直方向间隔为1 m, 各年数据用不同类型的标志分类, 数据点所在深度用色标标识.

从图中可以看出, 40 m以浅主要特征为高温、低盐; 其下温度迅速降低, 在100~200 m之间温度达到最低; 200~300 m水温逐渐升高; 300 m以深水温又继续降低, 水体主要表现出相对低温和高盐特征. 参考前人对白令海海盆水团的划分^[5-7], 为便于区分和分析研究, 按所处深度不同, 将水团划分为白令海海盆上层水, 白令海海盆中层水和白令海海盆深层水3种水团.

夏季白令海海盆上层水主要位于40 m以浅的上层海洋, 受太阳辐射、融冰等因素影响, 高温低盐是其显著特征. 如图3所示, 上层水温盐变化范围较大, 在散点图中分布较分散. 位温变化范围为4.2~11.0℃, 盐度变化范围为31.5~33.3.

白令海海盆中层水主要位于40~300 m范围, 在

图3 历次北极科学考察在白令海海盆区调查数据温盐散点图

Figure 3 Potential temperature-salinity scatter plot of data collected by the first to sixth Chinese Arctic Research Expeditions in the Bering Sea basin with colors indicating depth according to color bar

温盐散点图中整体呈“V”型分布. 主要包括由冬季结冰析盐及对流混合过程形成的冬季残留冷水以及与上层、深层水之间的过渡水体. 水团温盐特征分别为0.5~4.2℃和32.3~33.8. 夏季表层升温, 垂向稳定性增强, 阻碍了热量向下传输, 使得部分冬季残留水得以保留, 低温是其最显著的特征. 从图3中可以看出, “V”型分布呈双峰结构, 且峰值所处深度不同. 左峰温盐点基本位于100~150 m范围内, 而右峰温盐点则分布在150~200 m附近, 这种差异说明白令海海盆区中层冷水团具有显著的空间分布特征.

300 m以深的深层海域存在的水团称为白令海海盆深层水. 该水团的温度随深度递减, 盐度则随深度逐渐增加, 低温高盐是其显著特征. 位温介于1.2~4.2℃之间, 盐度介于33.8~34.7之间, 位势密度最大值为27.8.

2.2 白令海海盆区水团空间分布特征

中国历次北极科学考察白令海海盆区断面1500 m以浅温盐分布如图4所示. 由于深层海洋温盐变化较小, 温盐分布的差异主要体现在上层和中层, 因此断面图主要突出了500 m以浅的温盐分布, 从而更清晰地展示白令海海盆区水团在水平和垂直方向的分布特征. 总体来看, 白令海海盆上层水、中层水和底

图4 中国历次北极科学考察白令海海盆区断面位温(a, c, e, g, i, k)和盐度(b, d, f, h, j, l)分布图(站点位置用黑色倒三角形标示)

Figure 4 Vertical sections of potential temperature (a, c, e, g, i, k) and salinity (b, d, f, h, j, l) in the Bering Sea basin from the first to sixth Chinese Arctic Research Expeditions. Station positions are indicated by black inverted triangles at the top

层水3种水团的特征差异十分显著. 自上而下, 温度呈现高-低-次高分布. 上层水温度最高, 中层水温度

最低, 底层水温度介于上层水和中层水之间, 盐度自上而下则呈逐步增加的趋势.

如图4(a)所示, 1999年海盆调查断面纬度范围为 $56^{\circ}\sim 60.5^{\circ}\text{N}$, 较其他航次范围最小. 表层最高温度为 8.4°C , 最低盐度为32.7. 在30 m附近存在显著的温跃层, 跃层强度最强为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{m}$. 跃层以下温度迅速降低, 中层冷水最低温度为 0.5°C , 出现在 59°N 140 m深度. 随着深度的加深, 盐度逐渐增加, 150 m以浅盐度普遍较低, 150 m以深盐度层化显著, 且等值线分布趋势与温度分布相似, 在 59.5°N 以北等值线加深. 按水团划分, 白令海海盆上层水主要位于断面30 m以浅, 中层冷水在北部加深, 最大深度范围为230~300 m, 在断面北侧 60.2°N 位置上深度最深且厚度最厚, 最深至300 m, 最大厚度为270 m. 中层冷水以下是高盐的白令海海盆深层水, 在深水层, 1000 m以浅温盐等值线在断面北侧仍有加深的趋势, 与中层水相比, 趋势一致但强度相对减弱, 1000 m以深等值线基本呈水平分布.

2003年海盆断面温盐分布如图4(b)所示, 表层温度南低北高, 表层最高温度为 10.7°C , 最低盐度为32.7. 30~40 m附近温跃层显著, 跃层强度最强为 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 跃层以下中层冷水最低温度为 1.0°C , 位于 55°N 110 m处. 冷水主要集中在 $54^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 范围, 断面最南端即 54°N 以南的两个站位和断面最北端 60.2°N 站位剖面没有温度低于 3°C 的冷水出现. 150 m以深盐度层化显著, 等值线在 59.7°N 附近存在一个凹槽. 按水团划分, 白令海海盆上层水基本位于40 m以浅, 54°N 以北中层冷水自南向北最大深度变化范围为210~400 m, 在断面北侧 59.5°N 位置上深度最深且厚度最厚, 最深至400 m, 最大厚度为370 m. 54°N 以南温度自上而下逐渐降低, 没有明显的中层冷水出现. 1000 m以浅白令海海盆深层水温盐等值线分布趋势与中层水基本一致.

如图4(c)所示, 2008年海盆断面表层温度南高北低, 最高温度为 10.9°C , 最低盐度为30.6. 在20~40 m附近存在显著的温跃层且自南向北逐渐变浅, 跃层强度最强为 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 跃层以下冷水层最低温度为 1.3°C , 出现在 59°N 190 m处. 冷水主要集中在 $54^{\circ}\sim 60.5^{\circ}\text{N}$ 范围, 断面最南端即 54°N 以南的两个站位没有温度低于 3°C 的冷水出现. 150 m以深盐度层化显著, 等值线呈波状起伏, $55^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 等值线自南向北逐渐加深, 在 59.7°N 附近存在一个凹槽. 按水团划分, 白令海海盆上层水也基本位于40 m以浅, 54°N 以北中层冷水自南向北加深增厚趋势显著, 最大深度变

化范围为200~440 m, 最大深度出现在断面北侧 59.5°N 位置上, 最深为440 m, 最大厚度为420 m. 54°N 以南中层冷水较弱.

2010年表层温度南低北高(图4(d)), 表层最高温度为 8.5°C , 最低盐度为31.5. 在30~40 m附近存在显著的温跃层, 在北部强度最强, 为 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{m}$. 跃层以下冷水层最低温度为 0.8°C , 位于 54.6°N 127 m处. 150 m以深盐度层化显著, 在 59.7°N 附近等值线陡然加深, 形成一个凹槽. 按水团划分, 白令海海盆上层水也基本位于40 m以浅, 中层冷水最大深度变化范围为200~500 m, 59.7°N 附近深度最深且厚度最厚, 最大深度为500 m, 最大厚度为470 m.

如图4(e)所示, 2012年表层温度也呈南低北高趋势, 表层最高温度为 8.3°C , 最低盐度为32. 上层水与中层水之间温跃层深度自南向北逐渐变浅, 在20~40 m范围内变化, 强度最强为 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{m}$. 冷水层最低温度为 0.7°C , 出现在 57.4°N 168 m处. 150 m以深盐度层化显著, 等值线在断面北侧有加深趋势, 在 59.8°N 附近最深. 按水团划分, 白令海海盆上层水也基本位于40 m以浅, 中层冷水在断面北侧加深增厚趋势显著, 最大深度变化范围为200~390 m, 在 59.8°N 附近深度最深为390 m, 最大厚度为370 m.

2014年断面温盐分布如图4(f)所示, 表层最高温度为 10.5°C , 最低盐度为32.8. 在40 m附近存在显著的温跃层, 跃层强度最强为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 跃层以下冷水层最低温度为 2.0°C , 位于 59.4°N 147 m处. 150 m以深盐度层化显著, 55°N 以北等值线自南向北逐渐加深, 在 60°N 附近最深, 形成一个凹槽. 按水团划分, 白令海海盆上层水也基本位于40 m以浅, 中层冷水与其他年份相比, 范围最小, 强度最弱, 最大深度变化范围为180~340 m, 在断面北侧 60°N 位置上深度最深且厚度最厚, 最深至340 m, 最大厚度为300 m.

2.3 白令海海盆区水团年际变化特征

(i) 白令海海盆上层水. 白令海海盆上层水占据着海洋的上层, 在3个水团中所占体积最小, 因风、潮、流场等的动力和热力混合作用使得垂向分布相对均匀. 从白令海海盆区多年断面温盐分布(图4)可以看出, 上层水主要占据40 m以浅的上层海洋, 温度高于 10°C 的高温低盐水团出现在2003, 2008和2014年. 2003年的高温区位于 $56^{\circ}\sim 60.5^{\circ}\text{N}$ 之间, 2008年高温区域位于 $54^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{N}$ 之间, 2014年范围最大, 几乎占据整

个断面表层. 表层温度最高达 10.9°C , 最低盐度为30.6, 均出现在2008年. 上层水厚度自南向北有逐渐减小的趋势, 1999和2012年断面北侧上层水仅占据20 m以浅. 在上层水与中层水之间存在显著的温跃层, 跃层深度也呈自南向北抬升的趋势, 跃层强度多年变化范围为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 强度最强和最弱的年份分别为1999和2014年.

从盐度来看, 上层水盐度最低, 最为明显的特征是在断面的南北部分别存在两个盐度的低值中心. 断面南部的低值中心主要分布在 56°N 以南, 断面北部的低值中心主要分布在 58°N 以北. 两个低值中心的强度有明显的年际变化.

(ii) 白令海海盆中层水. 综合各个年份白令海海盆中层水的分布来看, 低温是其最为显著的特征, 盐度则介于上层水和底层水之间. 就经向范围而言, 2003年中层冷水仅分布在 54°N 以北, 54°N 以南温度自上而下逐渐降低, 不存在中部冷水层. 2008年 54°N 以南冷水层开始出现, 但与断面北部冷水层相比, 强度较弱, 温度在 $3.5\sim 4^{\circ}\text{C}$ 之间, 2010年以后, 冷水占据了整个断面中层. 就垂向范围而言, 中层冷水在断面北部有加深加厚的趋势, 如表4统计结果所示, 中层水深度多年变化范围为180~500 m, 2010年断面 59.7°N 附近中层水深度最深且厚度最大, 最大深度为500 m, 最大厚度为470 m. 各年份中层水最大厚度出现的位置均位于断面北侧, $59.5^{\circ}\sim 60.2^{\circ}\text{N}$ 范围内.

中层冷水150 m以浅盐度相对较低且变化较缓慢, 150 m以深层化显著. 与温度分布相似, 断面盐度等值线在断面北侧也呈加深的趋势, 在 58°N 以南分布较平缓, 58°N 以北明显加深, $58^{\circ}\sim 60.2^{\circ}\text{N}$ 盐度整体呈“V”型分布, 在 59.8°N 附近存在一个凹槽, 即凹槽内水体盐度较同深度上其他水体盐度偏低. 此外, 33.8盐度等值线与中层冷水下边界基本吻合.

将观测到的最低温度中层冷水称为冷水核心(简称冷核), 各年份冷核统计结果如表4所示. 从表中可以看出, 冷核特征具有显著的年际变化. 冷核多年深度变化范围在110~200 m之间, 位置变化范围在 $54.6^{\circ}\sim 59.4^{\circ}\text{N}$ 之间. 1999年观测到的冷核温度最低, 为 0.5°C , 2014年观测到的冷核温度相对最高, 为 2.0°C .

在夏季的白令海陆架区, 也存在一部分冬季残留水, 称为陆架冷水团^[27]. 研究发现, 冷水温度与前一年冬季气温具有较好相关性^[28], 根据陆架冷水团分布范围的年际差异, 可以分为暖年和冷年两种状态, 其中1998, 2000~2005年为暖年, 1999, 2007~2012年为冷年^[29,30]. 结合图4和表4, 就冷水范围和冷核温度可以看出白令海海盆中层冷水年际变化与陆架区冷暖状态一致. 2003和2014年为暖年, 冷水团范围最小且温度偏高, 其中以2014年最为显著; 1999, 2008, 2010和2012年为冷年, 1999, 2010和2012年均出现温度低于 1°C 冷水, 虽然2008年冷核温度较高, 但冷水团范围较大. 出现这种现象的原因现在还没有定论, 但主要观点是认为与北太平洋海表面气压变化和北极变暖有关^[30].

(iii) 白令海海盆深层水. 白令海海盆深层水位于最下层, 在3个水团中所占的体积比重最大, 综合各个年份来看, 深层水体积约占总海水体积的80%以上. 深层水的温盐范围与中层水和上层水相比变化较小, 维持在较为稳定的状态. 按温盐分布特征的不同, 可以分为两部分. 中层水以下1000 m以上的部分, 温盐等值线在断面北侧仍有加深的趋势, 且与中层水相比, 分布趋势基本一致但强度逐渐减弱, 即随着深度增大“V”型凹槽逐渐减弱, 至1000 m凹槽消失; 1000 m以深等值线基本呈水平分布. 多年观测达到的最大深度为3851 m, 观测到的最低位温为 1.2°C ,

表4 各年份中层水特征信息

Table 4 Characteristics of Bering Sea basin Intermediate Water in different years

年份	冷核温度($^{\circ}\text{C}$)	冷核位置(N)	冷核深度(m)	中层水深度(m)	中层水最大厚度(m)	位置(N)
1999	0.5	59.0°	140	230~300	270	60.2°
2003	0.9	55.0°	110	210~400	370	59.5°
2008	1.2	58.0°	200	200~440	370	59.5°
2010	0.8	54.6°	127	200~500	470	59.7°
2012	0.7	57.4°	168	200~390	360	59.8°
2014	2.0	59.4°	147	180~340	310	60.0°

最大盐度为34.7, 最大位势密度为27.8.

由图4可以看出, 多年温盐等值线在断面北侧59°~60°N均有加深趋势, 且在500 m以浅加深趋势最明显, 500~1000 m随深度的加深趋势逐渐减弱. 此区域正是白令海陆坡流区, 通过温盐分布可以推测陆坡流在59°~60°N流速最强, 且陆坡流的影响深度最大可至1000 m. 各年份温盐等值线加深程度各不相同, 1999年最弱, 2008和2010年最显著, 说明陆坡流强度也有显著的年际变化.

3 结论

本文利用1999, 2003, 2008, 2010, 2012和2014年夏季中国6次北极科学考察在白令海海盆区获取的重复断面CTD数据, 分析了白令海海盆区的水团分类、空间分布及其年际变化特征, 得到如下结论.

(1) 总体来看, 白令海深水海盆主要分为3种水团, 分别为上层高温低盐的白令海海盆上层水、中层低温的白令海海盆中层水和深层高盐的白令海海盆深层水.

(2) 白令海海盆上层水主要位于40 m以浅, 2003, 2008和2014年表层均出现了温度高于10℃的高温低盐水团, 2014年高温水团范围最大. 表层温度最高达10.9℃, 最低盐度为30.6, 均出现在2008年. 经向上上层水厚度北低南高, 垂向上与中层水之间存在显

著的温跃层, 跃层强度最强达到0.5℃/m. 在断面的南北部分别存在两个低盐中心.

(3) 白令海海盆中层水深度变化范围为180~500 m, 受白令海陆坡流的影响, 在北部陆坡区有加深加厚的趋势, 表现为温盐等值线在北侧加深, 且在59°~60°N之间形成一个“V”型凹槽. 中层水最大厚度可达470 m, 各年份中层水最大厚度出现的位置位于断面北侧59.5°~60.2°N范围内.

(4) 白令海海盆深层水位于中层水以下, 是海盆区体积最大且最稳定的水体, 约占总水体体积的80%以上. 1000 m以上的深层水, 仍受到白令海陆坡流的影响, 温盐等值线在断面北侧有加深趋势, 且与中层水相比, 分布趋势基本一致但强度逐渐减弱; 1000 m以深等值线基本呈水平分布. 多年最低温度为1.2℃, 最大盐度为34.7, 最大位势密度为27.8.

(5) 白令海海盆中层冷水冷暖变化与陆架冷水团变化一致, 根据水团温度和范围, 可分为冷年和暖年两种状态, 且在过去十几年中, 大致以6年为周期交替变化. 2003和2014年为暖年, 其中以2014年最为显著; 1999, 2008, 2010和2012年为冷年. 其与北太平洋海表面气压变化和北极增暖的关系还需进一步探讨. 与其他年份相比, 2014年中层冷水温度最高且范围急剧减小, 这是对北极增暖的响应还是新一轮冷暖年交替的开始仍需进一步的论证.

参考文献

- 1 Barnes C A, Thompson T G. Physical and chemical investigations in Bering Sea and portions of the North Pacific Ocean. Univ Washington Publ Oceanogr, 1938, 3: 35-79
- 2 Ohtani K. Oceanographic structure in the Bering Sea. Memo Facul Fisher Hokkaido Univ, 1973, 21: 65-106
- 3 Roden G I. Aleutian basin of the bering sea: Thermohaline, oxygen, nutrient, and current structure in July 1993. J Geophys Res: Oceans (1978-2012), 1995, 100: 13539-13554
- 4 Miura T, Suga T, Hanawa K. Winter mixed layer and formation of dichothermal water in the Bering Sea. J Oceanogr, 2002, 58: 815-823
- 5 Tang Y X, Jiao Y T, Zou E M. A preliminary analysis of the hydrographic features and water masses in the Bering Sea and the Chukchi Sea (in Chinese). Chin J Polar Res, 2001, 13: 57-68 [汤毓祥, 矫玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析. 极地研究, 2001, 13: 57-68]
- 6 Gao G P, Shi M C, Zhao J P, et al. Hydrologic features of the Bering Sea in the summer of 1999 (in Chinese). Acta Oceanol Sin, 2003, 15: 11-20 [高郭平, 侍茂崇, 赵进平, 等. 1999 年白令海夏季水文特征分析. 海洋学报, 2002, 24: 8-16]
- 7 Gao G P, Dong Z Q, Shi M C. Water properties of the seas surveyed by Chinese First Arctic Research Expedition in summer, 1999 (in Chinese). Chin J Polar Res, 2003, 15: 11-20 [高郭平, 董兆乾, 侍茂崇. 1999 年夏季中国首次北极考察区水团特征. 极地研究, 2003, 15: 11-20]
- 8 Royer T C, Emery W J. Circulation in the Bering Sea, 1982-1983, based on satellite-tracked drifter observation. J Phys Oceanogr, 1984, 14: 1914-1920
- 9 Stabeno P J, Reed R K. Circulation in the Bering Sea basin by satellite tracked drifters: 1986-1993. J Phys Oceanogr, 1994, 24: 848-854
- 10 Reed R K, Khen G V, Stabeno P J, et al. Water properties and flow over the deep Bering Sea Basin, summer 1991. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 1993, 40: 2325-2334

- 11 Stabeno P J, Schumacher J D, Ohtani K. The physical oceanography of the Bering Sea. In: Loughlin T R, Ohtani K, eds. Dynamics of the Bering Sea. Fairbanks: North Pacific Marine Science Organization (PICES) and University of Alaska Sea Grant, 1999. 1–28
- 12 Panteleev G, Yaremchuk M, Luchin V, et al. Variability of the Bering Sea circulation in the period 1992–2010. *J Oceanogr*, 2012, 68: 485–496
- 13 Khen G V, Basyuk E O, Vanin N S, et al. Hydrography and biological resources in the western Bering Sea. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 2013, 94: 106–120
- 14 Overland J E, Spillane M C, Hurlburt H E, et al. A numerical study of the circulation of the Bering Sea basin and exchange with the North Pacific Ocean. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24: 736–758
- 15 Maslowski W, Roman R, Kinney J C. Effects of mesoscale eddies on the flow of the Alaskan Stream. *J Geophys Res: Oceans* (1978–2012), 2008, 113, doi: 10.1029/2007JC004341
- 16 Kinney J C, Maslowski W, Okkonen S. On the processes controlling shelf-basin exchange and outer shelf dynamics in the Bering Sea. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 2009, 56: 1351–1362
- 17 Hu H, Wang J. Modeling effects of tidal and wave mixing on circulation and thermohaline structures in the Bering Sea: Process studies. *J Geophys Res: Oceans* (1978–2012), 2010, 115, doi: 10.1029/2008JC005175
- 18 Mizobata K, Saitoh S I, Shiimoto A, et al. Bering Sea cyclonic and anticyclonic eddies observed during summer 2000 and 2001. *Prog Oceanogr*, 2002, 55: 65–75
- 19 Mizobata K, Wang J, Saitoh S. Eddy-induced cross-slope exchange maintaining summer high productivity of the Bering Sea shelf break. *J Geophys Res: Oceans* (1978–2012), 2006, 111, doi: 10.1029/2005JC003335
- 20 Danielson S L, Weingartner T J, Hedstrom K S, et al. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait throughflow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient. *Prog Oceanogr*, 2014, 125: 40–61
- 21 Chen L Q. The report of First Chinese Arctic Research Expedition (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2000 [陈立奇. 中国首次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2000]
- 22 Zhang Z H. The report of Second Chinese Arctic Research Expedition (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2004 [张占海. 中国第二次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2004]
- 23 Zhang H S. The report of Third Chinese Arctic Research Expedition (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2009 [张海生. 中国第三次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2009]
- 24 Yu X G. The report of Fourth Chinese Arctic Research Expedition (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2011 [余兴光. 中国第四次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2011]
- 25 Ma D Y. The report of Fifth Chinese Arctic Research Expedition (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2013 [马德毅. 中国第五次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2013]
- 26 Pan Z D. The report of Sixth Chinese Arctic Research Expedition (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 2015 [潘增弟. 中国第六次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2015]
- 27 Wang X Y, Zhao J P. Distribution and inter-annual variations of the cold water on the northern shelf of Bering Sea in summer (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2011, 33: 1–10 [王晓宇, 赵进平. 北白令海夏季冷水团的分布及其年际变化研究. 海洋学报, 2011, 33: 1–10]
- 28 Azumaya T, Ohtani K. Effect of winter meteorological conditions on the formation of the cold bottom water in the eastern Bering Sea shelf. *J Oceanogr*, 1995, 51: 665–680
- 29 Lauth R. Summer bottom and surface temperatures-Eastern Bering Sea. In: Boldt J, Zador S, eds. Ecosystem Considerations for 2010, Appendix C. Alaska: Alaska Fisheries Science Center, 2010. 53–54
- 30 Overland J E, Wang M, Wood K R, et al. Recent Bering Sea warm and cold events in a 95-year context. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 2012, 65: 6–13

Distribution and interannual variation of water masses in the Bering Sea basin in summer

LIU Na¹, LIN LiNa², HE Yan¹, LI Tao³ & KONG Bin⁴

¹ First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

² South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

³ College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

⁴ College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

The Bering Sea is a marginal sea of the North Pacific located in middle and high latitudes. It can be divided into almost two equal part. The northern one called the Bering Sea Shelf whose depth less than 200 m, meanwhile, the other southwest part is the Bering Basin which is deeper than 3000 m. There is a cyclonic circulation in the basin, which consists of the Kamchatka Current in the west, the Aleutian North Slope Current in the south and the Bering Slope Current in the east. As a transitional area connecting the Pacific Ocean and the Arctic Ocean, the variations of hydrological environment directly affect the properties of Pacific inflow, which not only is the key factor of the Shelf-Slope-Basin system in the west of the Arctic Ocean, but also can expand its impact to the north of Atlantic through the Arctic. What's more, the broad Bering Sea is a productive ecosystem that has great economic and cultural value, the changes in the physical environment are capable of reorganizing the ecosystem.

In the summers of 1999, 2003, 2008, 2010, 2012 and 2014, a total of six Chinese National Arctic Research Expeditions were carried out. In these researches, the Arctic-Pacific sector has always been the focus, so that many years of hydrographic data were obtained in the Bering Sea basin. Based on the valuable CTD data from the repeated section, which is along the common border shared by the Russia and the America and intersects the whole basin, the distribution and interannual variation of water masses in the Bering Sea basin are analyzed. The results indicate that the water in this area can be divided into three types of water masses based on the differences in temperature and salinity: Bering Sea Basin Upper Water, Bering Sea Basin Intermediate Water, Bering Sea Basin Deep Water. In summer, Bering Sea Basin Upper Water is the warmest water mass in the basin and located at depths <40 m with the highest temperature of 10.9°C in 2008. Its thickness decreases from south to north. Furthermore, there is a marked thermocline between the upper and intermediate waters, with a noticeable interannual variation. The Bering Sea Basin Intermediate Water occurs at depths <500 m. Affected by the Bering Slope Current, its thickness increases in the north, which can up to 470 m. Including the residual cold water from winter is the most obvious characteristic of the intermediate water. The core of cold water is located between 54.6°N and 59.4°N with depth of 110–200 m, whose lowest temperature is 0.5°C in 1999. It varies simultaneously with cold water on the Bering Sea shelf. Based on annual temperature and cold-water ranges, it can be divided into two types: cold event and warm event. In recent years, the warm event has alternated with cold event in cycles of approximately 6 years. The 2003 and 2014 are the warm years and the 1999, 2008, 2010 and 2012 are the cold years. In 2014, the intermediate cold water displays the greatest temperature and minimum range, which may point to a new warm event requiring further study.

As the largest and most stable water mass, Bering Sea Basin Deep Water makes up more than 80% of the Bering Sea Basin water mass. The Bering Slope Current can affect waters at depths of up to 1000 m, but the effect intensity is decrease with the increase of depth. In the future, more observed data and long term mooring are expected. The cause and effect of warm and cold events, especially its relationship with the surface pressure and polar warming and the impact on the ecosystem, need to be further analyzed.

Bering Sea basin, water masses, interannual variation, Arctic

doi: 10.1360/N972015-00852