DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14474

南极普里兹湾南极大磷虾资源时空分布与海洋环境要素的相 关性

李灵智,黄洪亮,屈泰春,杨桥,陈帅,刘健,齐广瑞 中国水产科学研究院 东海水产研究所 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室 上海 200090

摘要:基于我国第 29 次南极科学考察在普里兹湾附近海域断面的调查,对 2012 年 12 月 31 日至 2013 年 3 月 5 日 期间,普里兹湾南极大磷虾(*Euphausia superba* Dana)资源时空分布和资源量评估展开研究。结果表明,调查海域大磷虾 平均资源密度为 32.8 g/m²,总资源量为 9.34×10⁷ t;普里兹湾附近海域大磷虾资源量年度变化明显,种群年龄结构以 2⁺龄或 3⁺龄的补充群体为主,补充群体的生长状况将直接影响资源量变化;调查期间大磷虾主要集群于普里兹湾 口的陆架坡折区,其范围为 70.50°E~75.50°E、67°S~68.5°S,海底水深介于 250~1 000 m;叶绿素浓度与大磷虾资源 时空分布极显著相关(*P*<0.01),相关系数为 0.193;未发现水温、盐度和海底水深与大磷虾资源时空分布的直接相 关关系(*P*>0.05);盐度与叶绿素浓度呈显著负相关关系(*P*<0.01),相关系数为–0.23;叶绿素浓度深层极大值现象 (简称 DCM 现象)出现在以 73°E 67°S 为中心的普里兹湾口附近海域, DCM 现象可能与冬季残留水团关系密切。

关键词: 南极; 南极大磷虾; 时空分布; 资源量; 环境因子 中图分类号: S931 _____文献标志码: A _____文章编号: 1005-8737-(2015)03-0488-13

南极大磷虾(*Euphausia superba* Dana)广泛分 布于南大洋水域,是南极生态系统中的关键物种, 关于其资源量变化和分布的研究对于深入了解南 极生态系统和极地海洋环境变化具有重要意义^[1-2], 自 20 世纪 50 年代,从前苏联和日本为主的综合 考察开始,绝大部分从事南极科考的国家均将南 极磷虾作为考察的重要内容。20 世纪 80 年代至 今,南极生物资源养护委员会已开展了数次大范 围的联合调查^[3-6],据最新的估算,南极大磷虾的 生物量约为 6.5×10⁹~1.0×10¹⁰ t^[7-9]。我国自 1984 年首次开展南极科学考察,至今已经 30 年,针对 南极大磷虾资源分布、资源量评估展开了大量工 作,尤其在普里兹湾和南极半岛附近海域^[10-11], 随着国际上设立南极保护区的呼声日益高涨,科学 展开大磷虾资源调查也凸显出重要的战略意义^[8]。 尽管国内外已针对环境因子(水温、盐度、溶 氧、海流等等)与南极磷虾资源分布的相关关系展 开大量研究^[9, 12-18],但是除局部海域陆架坡折海 水深度和绕极深层水团之外^[9, 19-20],其他影响因 子均未被证明与南极磷虾资源分布具有明确相关 关系。研究认为,摄食行为和逃避敌害是大磷虾 集群形成的主要原因^[21-22],大磷虾主要摄食硅藻 类浮游植物,小于 2 mm 的微型藻类较难摄取^[23], 历年的调查表明陆架坡折的浮游植物丰度远大于 深海区,而绕极深层水团涌升使得表层水的营养 盐得到补充,促进浮游植物生长,因此大磷虾通 常集群于陆架坡折或绕极深层水涌升的海域,但 是该结论仅在南极半岛附近的局部海域得到验证, 普里兹湾附近海域磷虾资源时空分布与海洋环境 的相关性研究仍处于探索之中。

收稿日期: 2014-11-17; 修订日期: 2015-01-04.

基金项目: 南北极环境综合考察专项(CHINARE2012/5-01-06, CHINARE 2013/5-04-02-04); 国家公益性行业(农业)科研专项(201203018). 作者简介: 李灵智(1982-), 男, 硕士, 主要从事极地生物资源考察与评估. E-mail: lilz@ecsf.ac.cn

通信作者: 黄洪亮, 研究员. E-mail: ecshhl@163.com

近年来,南极附近海域大磷虾资源量呈下降 趋势^[24],年际变化显著。研究认为冬季海冰时空 分布与大磷虾资源量变化存在显著的相关关系, 海冰覆盖面积及覆盖时间与翌年大磷虾资源成正 相关,海冰不仅有助于大磷虾逃避敌害,也是重 要的索饵场^[25],尤其在饵料贫乏的冬季。Quetin 等^[26]比较了不同冰情条件下磷虾幼体生长状况, 表明海冰越厚重,其下的磷虾幼体生长状况越 好。普里兹湾附近海域大磷虾资源量尚无定论, 由于调查区域、调查时间等等存在差异,不同研 究结论不尽相同^[3-6,10-11]。

本研究以我国第 29 次南极科学考察在普里 兹湾断面的调查为基础,对 2012 年 12 月 31 日至 2013 年 3 月 5 日期间,普里兹湾南极大磷虾资源 时空分布和资源量评估展开研究,分析大磷虾时 空分布与海洋环境的相关关系,以期为南极大磷虾 资源评估和南极海洋生物科学合理利用提供参考。

1 材料与方法

数据来源于中国第 29 次南极科学考察之普 里兹湾断面调查,调查船名为"雪龙号"科考船, 总长 167 m,总吨位为 14 997 t,主机功率 13 200 kW。调查时间为 2013 年 1 月 31 日至 3 月 5 日,调 查站点如图 1 所示(圆点标出)。



图 1 普里茲湾附近海域断面调查站点(圆点)及拖网采样 站位(五角星)

Fig.1 The transection survey stations in Prydz Bay (dots) and trawl sample stations(five-pointed stars)

1.1 数据采集

1.1.1 样品采集 采集工具为南极磷虾专用采集 网,网口框架为:4 m×2 m(长×宽),网囊网目尺寸 为 10 mm,拖速为 3~4 kn,拖曳时间持续 20 min, 采样站点4个(如图1五角星标出),使用-80℃低 温保存磷虾样品,带回实验室测量,测量参数为 体长(额刺前沿至尾节末端之间的长度)、体重、 复眼直径和性别比例,总样品数少于 200 尾的站 点全部测量,超过 200 尾的站点,测量样品尾数 不少于 200 尾。

1.1.2 资源评估声学映像数据采集 采集仪器为 分裂波束式科学渔探仪(SIMRAD EK500 38kHz, 挪威), 声脉冲发射间隔为 1.32 s, 声学数据随船 航行不间断采集, 采集深度为水下 15 m 至水下 500 m,存储后带回实验室进行后处理,处理软件 为 Echoview®(V5.4)。

1.1.3 环境数据采集及作图 环境参数为海水深 度、水温、盐度和叶绿素浓度,测量仪器为"雪龙 号"科考船船载 CTD,测量水层为 0~200 m,采集 站位如图 1 所示。 以 30 m 水层为间隔,应用 ArcGIS9.0 进行等值线作图。

1.2 数据处理

声学数据处理参考 2009 年南极生物资源养 护委员会(the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, 简称 CCAMLR)^[27] 制定的声学调查与数据处理协议,并去除声学仪 器间的干涉噪声;由于大磷虾主要分布水层为 0~200 m^[3-6],以1 nmi 为水平间隔,将15~200 m 水层分别积分至 200 m 水深,积分上、下限分别 为-40 dB 和-70 dB。

由于实际航线复杂,并考虑数据处理的方便 性,将调查区域按照纬向0.125°,经向0.5°为间隔 进行栅格化处理。以栅格为处理单元,以首次经 过该栅格、航速 8~14 kn为筛选条件,提取有效积 分结果。平均目标强度(简称 TS)与大磷虾的体长 组成关系密切,因此有必要将调查区域按照南极 大磷虾样品的体长组成划分成不同的小区域,分 别统计平均 TS,用于资源密度的计算。以各拖网 站位样品的平均体长和经纬度为依据,进行系统 聚类分析;根据聚类结果,以栅格中心点到聚类 群的最短欧式距离为依据,将调查区域划分成磷 虾体长分布较均匀的小区域。

2 结果与分析

2.1 调查海域南极大磷虾资源量估算和水平分布

调查海域总面积为 284 780 km², 陆坡区占 44.3%, 深海区占 55.7%; 拥有有效声学数据的栅 格总数为 104 个, 其中陆坡区为 43 个, 深海区为 61 个; 监测到磷虾映像的栅格 18 个, 占 17.3%; 调查海域 15~200 m 水层中南极大磷虾的平均资 源密度为 32.8 g/m², 调查海域总资源量为 $9.34 \times 10^7 t_{\circ}$

普利茲湾附近海域大磷虾资源密度水平分布 如图 2 所示,资源密度由湾内向湾外递减,大密 度的栅格均分布于 70.50°E~75.50°E、67°S~68.5°S 的海域,该区域为普里兹湾口的陆架坡折区,海 底水深介于 250~1 000 m,尤其在 500~700 m 等深 线的海域资源密度最大;监测到磷虾映像的栅格 中分布于陆架坡折区的有 14 个,占 77.8%,深海 区仅为 4 个,表明大磷虾分布较集中,具有高度 集群特征;根据资源量统计,陆坡折区资源密度 为 78.1 g/m²,深海区为 1.8 g/m²,陆架坡折区的平 均资源密度显著大于深海区。



图 2 普里兹湾附近海域大磷虾资源密度分布(中空圆圈)及等深线(曲线) Fig.2 the Antarctic krill density distribution (circle) and bathymetry (curve) in Prydz Bay

2.2 调查海域南极大磷虾资源垂直分布

不同采样时间虾群分布水层如图 3 所示, 55% 的虾群分布于 60 m以上水层, 深水层发现虾群的 站位数要多于历年调查^[10-11]。采样期间, 普里兹 湾附近海域白天时间较长, 一天中从 4:00 至 21:00 大约有 17 个小时为白天, 其余为晚上, 除 150 m 水层之外, 白天各采样水层均有虾群分布; 晚上仅在 30 m 和 60 m 水层发现虾群。虽然未直 接监测大磷虾昼夜垂直移动, 但是根据白天和夜 间大磷虾的水层分布,可推测大磷虾夜间存在明 显上浮的行为,垂直移动的幅度可达100m以上。

2.3 调查海域南极大磷虾体长分布

体长与声学目标强度直接相关,根据拖网采 样,4个站位大磷虾体长分布如图4所示,体长频 数呈正态分布,P3-5、P4-6、P5-9和P7-8站位大磷 虾平均体长分别为35.06、38.27、35.66和32.11mm, 各站位大磷虾平均体长存在一定差异,根据聚类 分析(如表1所示),上述4个站位可分为2个磷虾



图 3 普里兹湾附近海域大磷虾垂直分布 Fig.3 The vertical distribution of Antarctic krill in Prydz Bay 集群, 其一为 P3-5、P4-6 和 P5-9 磷虾群, 平均体 长为 37.97 mm; 其二为 P7-8 磷虾集群, 平均体长 为 32 mm。P7-8 站位磷虾体长偏小, 可能与采样 时间较早有关, P7-8 采样时间为 2 月初, 而其他 3 个站位采样时间为 3 月 1 日至 5 日。

4 个站位共采集南极磷虾体长数据 1 072 尾, 体长分布介于 25~52 mm,优势体长范围为: 32~ 41 mm,以 2⁺龄为主,25 mm 以下个体比例较小, 可能与采样网具网目较大有关;3⁺以上个体比例 显著减小,普遍认为大磷虾性成熟年龄为3⁺



表 1 南极大磷虾集群聚类分析结果 Tab.1 The cluster analysis of Antarctic krill group



龄^[28-29],本次采样时间为 2 月初至 3 月初,此时 正处于繁殖末期^[29],相关研究推测繁殖引起的亲 体死亡可能是导致高龄大磷虾个体比例显著减小 的原因之一。

2.4 调查海域的水文特征

根据南极大磷虾分布水层,以 30 m 为垂直间 隔,选取 6 个水层(30、60、90、120、150 和 180 m 水层),对各水层的水温、盐度和叶绿素浓度等水 文特征及剖面变化进行分析。

调查海域各水层水温水平分布如图 5 所示, 30 m 水层水温纬向变化趋势明显,由北向南逐渐 递减,60、90 和 120m 水层水温变化以普里兹湾口 为中心,向周围逐渐递增,等温线环形分布,表 明该区域恰好处于普里兹湾环流区^[30-31]。受环流 影响,70.50°E~75.50°E、66°S~67.50°S 之间海域 200 m 以上水层水温随着水深增加递减,水温剖 面变化趋势稳定,温跃层出现在水下约50 m 附近, 随后稳定在-1.9~-1.5℃,形成深水等温层,未发 现明显逆温层;而在其周围,由于沿岸西向流、东 风漂流和普里兹湾环流的共同作用,多水团相遇 混合,水温剖面变化较为复杂,200 m 以上水层存 在多个逆温层和温跃层的现象;辐散带温跃层出 现在水下约50 m 附近,逆温层出现在水下约120 m 水层,随后继续升高。

各水层盐度水平分布如图 6 所示, 30 m 水层 盐度自西向东逐渐递减,高盐度区域出现在普里 兹湾口以西,麦克罗伯逊地附近海域,其他各水 层高盐区域的位置均分布于普利兹湾口及其东南 方向的陆坡区附近,60~90 m 水层在 72°E~77°E、 67°S~69°S 海域形成类似于椭圆形高盐区域并向 周围逐渐递减;根据调查海域海水盐度剖面调查 数据,50 m 以上水层主要受南极夏季表层水团影 响,盐度较低,垂直变化较小,随着水深增加,盐 度递增,变化趋势稳定。

调查海域各水层叶绿素浓度水平分布如图 7 所示,30 m 水层叶绿素浓度从湾内向外、由陆坡 区向深海区浓度逐渐递减,该水层高叶绿素浓度 区域对应盐度较低(图6);其他各水层高叶绿素浓 度区主要集中于普里兹湾口,类似于以 73°E、 67°S 为圆心,向周围逐渐递减,等值线环形分布; 根据叶绿素浓度剖面变化数据,大部分调查站位 50 m 以深的水层由于光照强度限制,浮游植物的 生物活性和生物量显著下降,叶绿素浓度随着水 深增加递减,但是在以 73°E 67°S 为中心的普里 兹湾口附近海域最大叶绿素浓度出现在 60~80 m 水层,该现象被称为叶绿素浓度深层极大值现象 (简称 DCM 现象)^[32]。

2.5 南极大磷虾资源分布与海洋环境相关性

单因素相关性分析表明叶绿素浓度与大磷虾 资源密度呈显著正相关(P<0.01).相关系数为 0.193; 水温、盐度和深度与资源分布相关性不显 著(表 2)。虽然未发现水温、盐度与大磷虾资源密 度变化的直接相关关系、但是调查表明大磷虾主 要分布于陆架坡折区、该区域各水层水温均在 0℃ 以下(图 5); 比较 30 m 水层叶绿素浓度和盐度的 等值线图发现, 叶绿素浓度较大的区域盐度较低, 根据各水层盐度与叶绿素浓度的相关性检验、表 明呈显著负相关关系(P<0.01)、相关系数为-0.23、 极有可能是由于水体中营养盐被大量消耗造成; 另外研究认为等深线1000m以内的陆架坡折区 大磷虾资源密度与水深呈正相关关系^[19]、本研 究未获得一致结论, 但是监测到大磷虾映像的 栅格中 44.5%分布于 500~700 m 等深线的普里兹 湾口区域。

3 讨论

3.1 普利茲湾附近海域大磷虾资源量评估

近年来普里兹湾附近海域南极磷虾生物资源 评估如表 3 所示,不同年度的调查中资源密度评 估值差异明显,虽然存在调查海域、调查时间差 异等客观因素,但是磷虾资源量自身的年际变化 可能也是重要的原因之一,1990年的观测^[10]中几 乎没有发现虾群映像,而1991年的资源评估量高 达 2.2×10⁸ t^[10],1992年^[11]调查海域和调查面积与 1991年相近,其资源密度仅为1991年的1/2。

根据拖网采样,普里兹湾附近海域大磷虾种 群年龄结构以2⁺龄或3⁺龄的补充群体为主,4⁺龄 以上个体比例非常小^[29]。由于南极附近海域冬 季被浮冰覆盖,水体中饵料非常匮乏,虽然南极 磷虾能够通过负生长、改变摄食种类甚至自残等 策略适应环境变化,但是南极磷虾度过冬季的成 活率仍受到较大影响,夏季补充群体的生长状况 以及冬季饵料生物的丰富程度将直接影响过冬成 活率,从而引起翌年资源量变化。



图 5 普里茲湾附近海域各水层水温等值线分布和大磷虾资源分布

Fig.5 The water temperature contour and krill density to water depths (30, 60, 90, 120, 150 and 180 m) in Prydz Bay





The salinity contour and krill density to water depths (30, 60, 90, 120, 150 and 180 m) in Prydz Bay

	表 2	环境参数	与大磷	虾	资	源	密度	Pearson	相关性检验	佥结果
•										

Tab. 2	The Pearson	correlation	test of	environment	parameters	and krill	density
--------	-------------	-------------	---------	-------------	------------	-----------	---------

环境参数 environment parameters	相关系数 correlation coefficient	显著性检验 significant test	自由度 df
水温/°C temperature	0.012	0.841	272
盐度 salinity	0.062	0.304	272
深度/m depth	-0.077	0.206	272
叶绿素浓度/(g·m ⁻³) chlorophyll concentration	0.193	0.001	272

Fig.6





图 7 普里兹湾附近海域各水层叶绿素浓度等值线分布和大磷虾资源分布 Fig.7 the chlorophyll concentration contour and krill density to water depths (30, 60, 90, 120, 150 and 180 m) in Prydz Bay

3.2 普里茲湾附近海域大磷虾资源时空分布

近年来国内外针对普里兹湾附近海域大磷虾 资源分布展开大量研究。如表 3 所示、由于调查时 间和调查区域等因素的影响、关于南极磷虾资源的

水平分布,不同研究得出的结论差异较大,总体上 呈现3种变化趋势:(1)南极磷虾主要集群于陆架坡 折、该区域的磷虾集群密度和生物量均显著大于深 海区, 2006 年 Toby 等^[5]和 Kawaguchi 等^[6]的研究中

65° S

60° S

65° S

65° E

0.53

0.60

叶绿素浓度/(mg·m-3)

chlorophyll concentration -0.42 - 0.72 - 1.9

70° E

- 5.01

0.72 - 1.94

0.93 - 3.05

- 1.30 -

0

水层深度 water depth: 30 m

75° E

0 9.23

		Tab.3 The krill biomas	s survey in Pryc	z Bay for recent	years		
年代	调查区域	湖查时间	调查面积/m ²	资源密度	总资源量/×107 t	磷虾集群位置 kr	ill cluster position
year	survey area	survey time	survey area	$/(g \cdot m^{-2})$ density	total resource	经度 longitude	纬度 latitude
1990 ^[10]	62°S–69°S, 64°E–80°E	1月7日—3月3日	I	I	I	I	I
) ^[10]	62°S–69°S, 68°E–108°E	1990年12月27日—1991年1月11日	675053.63	32.5	22.0	72°E–73°E	62°S–65°S
1991/92 ^[11]	62°S–68°S, 68°E–103°E	1991年12月31日—1992年1月28日	150533.9	15.6	1.699	68°E	63°S–67°S
1993 ^[11]	63°S–68°S, 58°E–83°E	1993年1月11日—1993年2月03日	125740.7	32.15	4.043	68°E, 73°E	63°S–67°S
1996 ^[3-4]	62°S–67°S, 80°E–150°E	1996年1月29日—1996年3月21日	872500	5.54	4.83	80°E	65°S−67°S
2006 ^[5-6]	60°S–70°S, 30°E–80°E	2006年1月—3月	1300000	24	28.75	70°E, 80°E	S°80–S°00
2013 (65°S–69°S, 68°E–78°E	2013年1月31日—3月5日	284780	32.8	9.34	70.5°E-75°E	S∘69~S∘29
注:-表示未发到	见虾群映像.						

近年来普里兹湾附近海域大磷虾资源调查

表 3

Note: – means no krill group.

50%的磷虾映像采自于陆架坡折距离 1 000 米等 深线 80 km 范围内,本研究监测到磷虾映像的采 样点中分布于陆架坡折的采样点占 77.8%。(2)普 里兹湾为南大洋印度洋区大磷虾资源主要密集区, 其资源密度要大于普里兹湾东、西两侧海域,根 据历年调查数据,其调查海域覆盖普里兹湾的评 估中,资源量和密度均较大,而在覆盖东西两侧 海域的调查中,其面积越大平均资源密度越低, 本次调查中南极磷虾资源密度为 32.8 g/m²,与 1991 年^[10]和 1993 年^[11]的评估结果相近,略高于 2006 年澳大利亚的评估值^[5],而 1996 年的调查评 估值最低。(3)从 12 月份至翌年 3 月份,随着调 查时间的延后,磷虾集群出现的纬度位置越靠 近南极大陆。

3.3 南极大磷虾资源时空分布与叶绿素浓度

叶绿素浓度与南极磷虾资源分布的正相关关 系在一些研究中得到肯定。但是叶绿素浓度表征 的是水体中所有初级生产力的总和、而南极磷虾 主要摄食的浮游植物为硅藻类^[33]、因此 siegel^[9] 认为该相关关系成立的前提是水体中浮游植物优 势种应为大磷虾主要摄食的硅藻类。除此之外, 南极磷虾集群区域浮游植物被大量摄食也有可能 引起叶绿素浓度降低、朱国平^[14]应用商业渔业数 据得出大比例的 CPUE 值通常出现在叶绿素浓度 为 $0\sim0.2 \text{ mg/m}^3$ 的海域。本研究南极大磷虾资源 时空分布与叶绿素浓度呈正相关关系、主要根据 如下依据得出: (1)近几年普里兹湾附近海域的浮 游植物调查表明主要优势种为硅藻类^[30,34]; (2)单 因素相关性检验表明两者正相关关系显著;(3)高 叶绿素浓度区域基本覆盖大磷虾主要集群海域 (图 7)。

3.4 DCM 现象与冬季残留水团

普里茲湾附近海域 DCM 现象在早期研究中 已经被发现,"铁限制假说"得到普遍认同。由于冬 季残留水团富含铁等微量元素,且主要分布于次 表层,因此相关研究推测普里茲湾附近海域 DCM 现象可能与冬季残留水团分布有关^[30,32], 冬季残留水团主要水文特征为水温<--1.5℃,盐度 介于 34.5~34.7。本研究 DCM 现象出现在以 73°E、 67°S 为中心的附近海域(如图 7 所示), 该海域水 文特征与上述基本特征相符(如图 5、图 6 所示), 进一步佐证 DCM 现象与冬季残留水团的相关关 系。冬季残留水团的分布将对普里兹湾附近海域 浮游植物的丰度及分布造成一定影响,并进一步 影响南极磷虾资源分布。另外 73°E、67°S 附近海 域正处于湾内环流范围, 该区域受其他水团影响 较小, 水温和盐度垂直变化趋势稳定, 为浮游植 物创造良好的生长环境。

4 结论

 调查海域大磷虾平均资源密度为 32.8 g/m², 总资源量为 9.34×10⁷t; 普里兹湾附近海域大磷虾 资源量年度变化明显,种群年龄结构以 2⁺龄或 3⁺ 龄的补充群体为主,补充群体的生长状况将直接 影响资源量变化。

3. 调查期间大磷虾主要集群于普里兹湾口的陆架坡折区,其范围为 70.50°E~75.50°E、
 67°S~68.5°S,海底水深介于 250~1 000 m。

3.叶绿素浓度与大磷虾资源时空分布显著相 关(P<0.01),相关系数为 0.193; 未发现水温、盐 度和海底水深与大磷虾资源时空分布的直接相关 关系;盐度与叶绿素浓度呈显著负相关关系 (P<0.01),相关系数为-0.23;叶绿素浓度深层极 大值现象(简称 DCM 现象)出现在 73°E 67°S,为 中心的普里兹湾口附近海域, DCM 现象可能与冬 季残留水团密切相关。

参考文献:

- Pakhomov E A, Froneman P W, Perissinotto R. Salp/krill interactions in the southern ocean: Spatial segregation and implications for the carbon flux[J]. Deep-Sea Res , 2002, 49: 1991–1907.
- [2] Jaume F, Philip N T, Peter L B, et al. Responses of antarctic pack-ice seals to environmental change and increasing krill fishing[J]. Biol Conserv, 2012, 149(1): 40–50.
- [3] Tim P, Stephen N, Ian H, et al. Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (80-150E) during the Austral summer of 1995/1996[J]. Deep-Sea Res , 2000, 47: 2465–2488.
- [4] Nicol S, Pauly T, Bindoff N L, et al. "BROKE" a biological/ oceanographic survey off the coast of East Antarctica

(80-150E)carried out in January-March 1996[J]. Deep-Sea Res , 2000, 47: 2281–2298.

- [5] Toby J, Natalie K, Kawaguchi S, et al. Acoustic characterisation of the broad-scale distribution and abundance of Antarctic krill(*Euphausia superba*) off east Antarctica (30-80E)in January-march 2006[J]. Deep-Sea Res , 2010, 57: 916–933.
- [6] Kawaguchi S, Stephen N, Patti V, et al. Krill demography and large-scale distribution in the western Indian Ocean sector of the Southern Ocean (CCAMLR Division 58.4.2) in Austral summer of 2006[J]. Deep-Sea Res , 2010, 57: 934–947.
- [7] Huang H L, Chen X Z, Feng C L. The antarctic krill resource utilization state anlysis[J]. Fishery Modernization, 2007(1): 48-52.[黄洪亮,陈雪忠,冯春雷. 南极磷虾资源开发现状分析[J]. 渔业现代化, 2007(1): 48-52.]
- [8] Chen X Z, Xu Z L, Huang H L. Development strategy on Antarctic krill resource utilization in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(3): 451–459.[陈雪忠, 徐兆礼, 黄洪亮. 南极磷虾资源利用现状与中国的开发策 略分析[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 451–459.]
- [9] Siegel V. Distribution and population dynamics of *Euphausia superba*: Summary of recent findings[J]. Polar Biol, 2005, 29: 1–22.
- [10] Guo N L, Chen X Z, Xu Z Y, et al. Distribution and a priliminary observation of the biomass of Antarctic krill in the Prydz Bay region by echogram analysis[J]. Antarctic Research, 1993, 5(4): 90–103.[郭南麟, 陈雪忠, 徐震夷, 等. 南极普里兹湾外海大磷虾声学映像的分布分析和生物量的初步估算[J]. 南极研究, 1993, 5(4): 90–103.]
- [11] Chen X Z, Xu Z Y, Chen G Z. The distribution and standing crops of Antarctic krill in the Prydz Bay region[J]. AntarcticResearch, 1996, 8(3): 46-52. [陈雪忠, 徐震夷, 陈冠镇. 南极普里兹湾外海大磷虾分布与现存量[J]. 南极研究, 1996, 8(3): 46-52.]
- [12] Dai L F, Zhang S M, Fan W. The abundance index of Antarctic krill and its relationship to sea ice and sea surface temperature[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(4): 352–361.[戴立峰, 张胜茂, 樊伟. 南极磷虾资源丰度变化与海冰和表温的关系[J]. 极地研究, 2012, 24(4): 352–361.]
- [13] Fan W, Wu Y M, Chen X Z, et al. Progress in spatio-temporal distribution of Antarctic krill and environment survey of remote sensing[J]. Marine fisheries, 2010, 32(1): 96–103.[樊伟, 伍玉梅, 陈雪忠, 等. 南极磷虾的时空分布及遥感环境监测研究进展[J]. 海洋渔业, 2010, 32(1): 96–103.]

- [14] Zhu G P. Effects of temporal and environmental factors on the fishing ground of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the northern Antarctic Peninsula based on generalized additive model[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(12): 1863–1872. [朱国平.基于广义可加模型研究时间和环境 因子对南极半岛北部南极磷虾渔场的影响[J]. 水产学报, 2012, 36(12): 1863–1872.]
- [15] Chen F, Chen X J, Liu B L, et al. Effect of sea ice on the abundance index of Antarctic krill(*Euphausia superba*) [J]. Oceanolagia et Limnologia Sineca, 2011, 42(4): 495–500.[陈峰,陈新军,刘必林,等. 海冰对南极磷虾资源丰度的影响[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 495–500.]
- [16] Siegel V. Krill stocks in high latitudes of the Antarctic Lazarev Sea: Seasonal and interannual variation in distribution, abundance and demography[J]. Polar Biol, 2012, 35: 1151–1177.
- [17] Witek Z, Kalinowski J, Grelowski A, et al. Studies of aggregations of krill (*Euphausia superba*)[J]. Meeresforsch, 1981, 28: 228–243.
- [18] Weber L H, El-Sayed S Z, Hampton I. The variance spectra of phytoplankton, krill and water temperature in the Antarctic ocean south of africa[J]. Deep Sea Res II, 1986, 33: 1327–1343.
- [19] Trathan P N, Brierley A S, Brandon M, et.al. Oceanographic variability and changes in Antarctic krill (*Euphausia superba*) abundance at South Georgia[J]. Fish Oceanogr, 2003, 12: 569–583.
- [20] Lawson G L, Wiebe P H, Ashijan C J, et al. Acoustically-inferred zooplankton distribution in relation to hydrography west of the Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Res II, 2004, 51: 2041–2072.
- [21] Daly K L, Macaulay M C. Influence of physical and biological meso-scale dynamics on the seasonal distribution and behavior of *Euphausia superba* in the Antarctic marginal ice zone[J]. Mar Ecol Prog Ser, 1991, 79: 37–66.
- [22] Zhou M, Dorland R D. Aggregation and vertical migration behavior of *Euphausia superba*[J]. Deep-Sea Res II, 2004, 51: 2119–2137.
- [23] Kawaguchi S, Taro I, Mikio N. Green krill, the indicator of micro- and nano-size phytoplankton availability to krill[J]. Polar Biol, 1999, 22: 133–136.
- [24] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean[J]. Nature, 2004, 432: 100–103.
- [25] Daly K L. Overwintering growth and development of larval *Euphausia superba*: an interannual comparison under varying environmental conditions west of the Antarctic Penin-

sula[J]. Deep Sea Res II, 2004, 51: 2139-2168.

- [26] Quetin L B, Ross R M, Clarke A. Krill energetics: seasonal and environmental aspects of the physiology of Euphausia superba[M]//El-Sayed S Z. Southern Ocean Ecology: The BIOMASS Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1994: 165–184.
- [27] Conti S G, Demer D A. Improved parameterization of the SDWBA for estimating krill target strength[J]. ICES J Mar Sci, 2006, 63: 928–935.
- [28] Wang R, Zhong X F, Sun S, et al. Population structure of the Antarctic krill in the Prydz Bay region, Indian Ocean sector of the Southen Ocean[J]. Antarctic Research, 1993, 5(4): 1-11.[王荣, 仲学锋, 孙松, 等. 普里茲湾邻近海域大磷虾 的种群结构研究[J]. 南极研究, 1993, 5(4): 1-11.]
- [29] Zhu G P. Population biolagy of Antarctic krill (*Euphausia superba*) dana -reproduction[J]. Acta Hydrobiolgica Sinica, 2013, 37(4): 751-759.[朱国平. 南极磷虾种群生物学研究 进展 -繁殖[J]. 水生生物学报, 2013, 37(4): 751-759.]
- [30] Gao G P, Dong Z Q, Shi M C, et al. Advances of physical oceanographic study on Prydz Bay and adjacent region, Antarctic[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(2): 313–320. [高郭平, 董兆乾, 侍茂崇, 等, 南极普里兹湾关 键物理海洋学问题研究进展及未来趋势[J]. 上海海洋大

学学报, 2013, 22(2): 313-320.]

- [31] Yu H H, Su J L, Miao Y T. Charateristics of hydrographic structure and source of bottom water in the Prydz Bay and vicinity sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(1): 11–21.[于洪华,苏纪兰,苗育田. 南极普里兹湾及其邻近海域的水文结构特征和底层水的来源[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 11–21.]
- [32] Sun W P, Hu C Y, Han Z B, et al. Distribution of nutrients and chl a in Prydz Bay during the austral summer of 2011[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2012, 24(2): 178–187.
 [孙维萍, 扈传昱, 韩正兵, 等. 2011 年南极夏季普里兹湾 营养盐与浮游植物生物量的分布[J]. 极地研究. 2012, 24(2): 178–187.]
- [33] Zhu G H. Phytoplankton composition in Antarctic krill stomach contents [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(5): 646-655.[朱根海. 南极大磷虾胃含物中浮游植物的初步 分析[J]. 海洋学报, 1988, 10(5): 646-655.]
- [34] Zhang H S, Han Z B, Zhao J, et al. Phytoplankton and chlorophyll a relationships with ENSO in Prydz Bay, East Antarctica[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(8): 1701–1712. [张海生,韩正兵,赵军,等. 东南极普里兹湾 浮游植物群落和叶绿素 a 变化与 ENSO 的联系及其预测意 义[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(8): 1701–1712.]

A correlation study between the marine environment and the spatial-temporal distribution of Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) in Prydz Bay

LI Lingzhi, HUANG Hongliang, QU Taichun, YANG Qiao, CHEN Shuai, LIU Jian, QI Guangrui

Key Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries Resources and Ecology, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Antarctic krill (Euphausia superba Dana) is a keystone species in the Southern Ocean ecosystem. Biomass and distribution research is important to further understand the Southern Ocean ecosystem and its relationship with environmental change. Krill biomass fluctuates annually in the Southern Ocean, and a relationship between extensive sea-ice cover during winter and subsequent high krill recruitment in the Antarctic Peninsula region has been suggested. Although many studies have investigated the effects of environmental factors (temperature, salinity, oxygen, and currents) on krill, except bathymetry of the shelf break and the presence of Circumpolar Deep Water near the Antarctic Peninsula, few studies have demonstrated a clear relationship between other factors and krill. Based on a transection survey conducted in the waters near Prydz Bay during the 29th Antarctic Chinese Scientific Expedition, continuous hydroacoustic surveying and net sampling were conducted to estimate krill biomass and study the effects of the marine environment on krill spatial-temporal distribution. The environmental factors included water temperature, salinity, chlorophyll concentration, and bathymetry. The hydroacoustic instrument used was the 38 kHz SIMRAD EK500 (Norway). The sampling net had a 15-mm mesh size. Environmental data were collected with the SBE-CTD911 instrument. The results showed that mean krill density in the survey area was 32.8 g/m^2 , and krill biomass was 9.34 million tons. The population age structure was mainly composed of the 2^+ and 3^+ recruitment groups, and the growing conditions during recruitment were the main reason for the annual changes in krill biomass. Krill aggregated primarily at the shelf break (70.50°E–75.50°E and 67°S–68.5°S) at 250–1000 m. A significant correlation (P<0.01; r=0.193) was found between chlorophyll concentration and the spatial-temporal distribution of Antarctic krill. Temperature, salinity, and bathymetry did not correlate directly with the Antarctic krill spatial-temporal distribution (P>0.05). A significant negative correlation was found between salinity and chlorophyll concentration (P < 0.01, r = -0.23). The deep chlorophyll concentration maximum phenomenon (DCM) was found at 73°E and 67°S in the waters near Prydz Bay. The DCM may correlate with the winter residual water mass.

Key words: Antarctic; *Euphausia superba*; spatial-temporal distribution; biomass; environmental factor Corresponding author: HUANG Hongliang. E-mail: ecshhl@163.com