

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16229

拖速和曳纲长度对南极磷虾中层拖网网位的影响

苏志鹏¹, 许柳雄^{1,2,3}, 朱国平^{1,2,3}, 王震¹, 胡桂森¹, 于永军⁴

1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306;
2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;
4. 青岛市远洋捕捞有限公司, 山东 青岛 266000

摘要: 利用2015年2—7月随青岛远洋捕捞有限公司南极磷虾(*Euphausia superba*)大型中层拖网渔船“明开轮”赴南极南舍得兰群岛水域执行农业部南极海洋生物开发利用项目期间收集的网位(D)、网口高度(H)、曳纲投放长度(L)和拖速(V)等数据, 分析了拖速和曳纲长度对拖网网位和网口高度的影响。本研究中, 网口高度定义为网口上下网深度之差; 网位定义为网口中心位置水深。根据渔船作业习惯和虾群群体特点, 曳纲投放长度范围138~258 m, 每档间隔20 m。拖速1~3 kn, 间隔0.5 kn。结果表明: (1) 网口高度变化范围为13.6~24.1 m, 网位水深变化范围为50~70 m; (2) 作业过程中, 南极磷虾拖网网位变化主要由曳纲长度决定, 曳纲从138 m开始投放时, 每增加20 m, 网位平均下降深度约1.9 m, 网口高度平均减小1.1 m, 曳纲长度对网位和网口高度均产生极为显著的影响($P < 0.01$); (3) 拖速由1.0 kn变化至3.0 kn时, 网位平均上升速率约2.9 m/kn, 网口高度平均减小速率为2 m/kn, 平均降低19.8%, 拖速对网位和网口高度的影响显著($P < 0.05$); (4) 不同曳纲长度时的各拖速区间内的平均网位变化速率呈先减小后逐渐增大的规律。本研究结果不仅可为南极磷虾渔船船长根据虾群的群体大小、水层变化及其与网具的位置关系, 适时调整曳纲长度和拖速, 使网位到达预设水层, 实现瞄准捕捞提供参考, 还可为研究南极磷虾拖网网具性能的优化以及南极磷虾拖网网具设计的改进提供基础资料。

关键词: 南极磷虾; 中层拖网; 拖速; 曳纲长度; 网位; 网口高度

中图分类号: S97

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)04-0884-09

南极磷虾(*Euphausia superba*)属于甲壳类浮游动物^[1], 广泛分布于环南极大陆架水域, 是目前地球上已知的资源量最大的单种生物^[2]。随着南极磷虾应用价值的不断提升, 加工技术的逐渐成熟, 其巨大的资源开发潜力和在南极生态系统中所处的重要地位开始重新被各国重视, 得到人们普遍关注^[3-4]。

传统的单船中层拖网是目前磷虾捕捞的主要作业方式, 中国磷虾拖网网具主要有两种, 即国外引进的专业磷虾拖网和依竹筴鱼拖网改进设计的网具^[5]。实践经验表明, 中层拖网能否获得较高

的捕捞效率, 关键在于是否能够根据捕捞对象的生物学特性及其栖息水层, 有效地控制、调节网具所处的水层, 达到瞄准捕捞的目的^[6]。也就是说, 拖网过程中, 能否将网口对准捕捞对象的聚集中心进行瞄准捕捞, 是评判中层拖网捕捞成败的关键技术之一^[7]。因此, 拖网网位及其影响因素的研究一直受到渔业科学工作者的关注。韩曦^[8]认为, 改变曳纲长度和增减浮沉力是控制双船底拖网作业过程中网位变动的主要方法, 拖速在作业中调整网位的幅度较小。低拖速条件下, 双船中层拖网网位随着拖速的增加迅速上升, 但随着拖曳速

收稿日期: 2016-08-08; 修订日期: 2016-10-07.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD13B03); 公益性行业(农业)科研专项(201203018); 农业部南极海洋生物资源开发利用项目.

作者简介: 苏志鹏(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事渔具与渔法研究. E-mail: suzhipeng0904@126.com

通信作者: 许柳雄, 教授, 博士生导师. E-mail: lxxu@shou.edu.cn

度的继续增大,网位变化速率减小^[9]。王尔光^[10]根据力学关系,提出控制拖网水层位置要素的数学模式,并计算编制出中层拖网水层因素表。周应祺^[11]根据作图法推算拖网运动轨迹,通过调整渔船转向角使拖网网口对准移动的鱼群实现瞄准捕捞。黄洪亮等^[12]根据智利竹筴鱼(*Trachurus murphyi*)中层拖网的实测数据,得出中层拖网网位与曳纲长度呈线性关系。中国2009年发展南极磷虾渔业以来,国内有关学者利用网具模型实验,对南极磷虾拖网性能进行了研究。周爱忠等^[13]研究得出南极磷虾拖网网具阻力公式。冯春雷等^[14]的研究表明,南极磷虾拖网沉力的增加能够增加网具的垂直扩张,浮沉比变大后,网口高度的增加幅度随着拖速的提高而增加。但徐鹏翔等^[15]的研究表明,拖网沉力的增加可导致网位下降,不利于捕捞上层的磷虾。徐国栋^[16]的研究表明,磷虾拖网阻力随拖速和 L/S 的增加而增加,网口高度的变化则与之相反,网具阻力和网口高度随速度变化呈指数改变,相关性显著。孟涛^[17]认为,减少网具内网面积能够有效降低网具能耗系数。但是,有关南极磷虾中层拖网作业过程中的网位变化鲜有研究报道,特别是磷虾拖网拖曳过程中,拖网网位所处水层的变化与浮、沉力配备、曳纲

长度、网板重量、拖曳速度等的关系尚不清楚。本文基于作者自2015年2月至7月随青岛远洋捕捞有限公司大型加工拖网渔船“明开轮”执行农业部南极海洋生物开发利用项目期间进行的实验研究,海上实测的有效拖网网位数据,以及拖网作业时的曳纲投放长度、渔船拖速等信息,分析了拖网过程中拖速和曳纲长度对网位水层变化的影响,以期对南极磷虾拖网作业过程中网位的调整,以及验证渔具模型实验结果提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验水域

作业水域为南设得兰群岛水域(图1),实验水域为南极半岛与南设得兰群岛之间,经度范围 $58^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$, 纬度范围 $63^{\circ}\sim 64^{\circ}\text{S}$ 。

1.2 渔船与渔具

渔船为青岛远洋捕捞有限公司大型加工拖网船“明开轮”,渔船主要尺度见表1。

“明开轮”捕捞作业使用 $400\text{ m}\times 146.44\text{ m}$ (上纲 61 m) 四片式磷虾拖网,分类上属单船有袖单囊拖网。网具总长为 146.44 m ,网口周长为 400 m ,网口网目尺寸 400 mm ,网袖长度为 23.2 m ,网身长度为 81.44 m ,网囊长度为 41.8 m ,上、下纲及

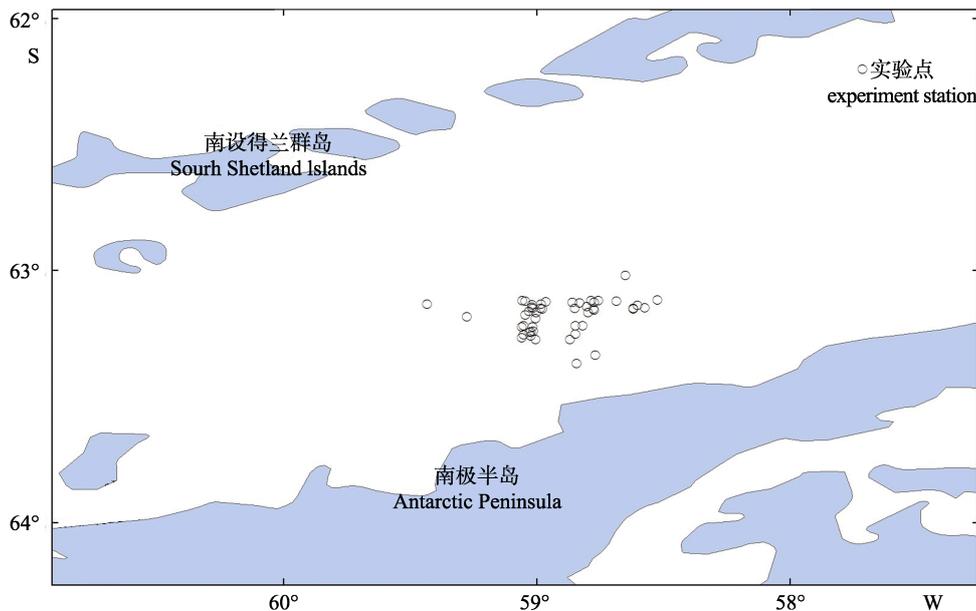


图1 “明开轮”南极磷虾拖网作业水域

Fig. 1 The fishing area of Antarctic krill trawler “Ming kai”

表 1 南极磷虾拖网渔船“明开轮”主要尺度
Tab. 1 Main dimensions of Antarctic krill trawler “Mingkai”

渔船总长/m overall length	主机功率/kW main engine power	总吨位/t total tonnage	最大航速/kn max speed	型深/m moulded depth	型宽/m moulded breadth
120.7	2×2650	7765	14.3	6.63	19.00

侧纲长度均为 61 m。网袖 2 段, 采用网目尺寸为 400 mm, 网线直径为 4 mm 的尼龙材料, 每边绕缝 5 目作为加强网筋(力纲)。网身共 9 段, 网目尺寸从 400 mm 逐渐减少到 120 mm。网身第 1~5 段使用 3 股尼龙网线, 直径从 4 mm 到 2.3 mm, 第 6~9 段网衣使用高强聚乙烯, 网线直径由 2 mm 增加到 4.5 mm。内衬网从网身第 8 段开始附加, 网目尺寸 19.6 mm, 网囊内衬网网目尺寸 15.0 mm。力纲(网筋)采用 24 mm 迪尼玛材料。浮力配置: 直径 35 mm 的浮子 30 个, 总浮力约 4.41 kN。沉力装配: 内径 22 mm 和 19 mm 的铁链沿下纲(61 m)分布, 下纲袖端(各 17 m)为内径 26 mm 铁链, 总沉力约 14.7 kN (含沉铁)。另外, 网囊背网附加 14 个直径 35 mm 的浮子, 底部附加 12 m 内径 22 mm 铁链。网板为 9 m² 立式 V 形网板, 重 2.68 t。南极磷虾拖网网图如图 2 所示。

1.3 测试仪器与测试方法

测量网具深度使用加拿大生产的 DR-1050 型水深测量仪(简称 DR-1050)。该仪器可以自动记录和储存网具在水中的沉降深度, 测量范围为 0~750 m, 测量精度为满量程的±0.05%。曳纲长度由船用曳纲系统控制器显示并记录。网口高度取网口中间部位上、下纲中点之间的距离, 通过 DR-1050 记录。

DR-1050 分布固定在网具上、下纲(网口)中点, 设定每 20 s 记录一次数据, 即每 20 s 分别记录一次网具上、下纲中点的深度(离海面的距离)。本文的网位定义为上、下纲中点的深度, 即网位 $D=[\text{上纲中点深度}(h_1)+\text{下纲中点深度}(h_2)]/2$ 。拖速为对地拖速, 通过 GPS 显示读取。实验时使用秒表校对好时间, 通过船用网位仪显示的网位和 GPS 显示的对地拖速及拖网曳纲长度控制器稳定后开始记录数据。

1.4 曳纲长度和拖速

根据“明开轮”捕捞南极磷虾的生产经验和习

惯, 测定曳纲长度计划从 138 m 开始, 按照 20 m 间隔逐步增加至 258 m。拖速从 1.0 kn 开始, 以 0.5 kn 间隔逐步增加至 3.0 kn。

1.5 数据处理方法

运用 EXCEL 2013 和 SPSS 软件处理数据, 分别分析拖速和曳纲长度对网位和网口的影响。拖速对网位和网口高度的影响以及曳纲长度对网口高度的影响均采用单因子方差分析进行检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

测试期间作业水域平均水深 200 m, 放网水深一般为 40~80 m。拖速分别为 1.0 kn、1.5 kn、2.0 kn、2.5 kn 和 3.0 kn, 曳纲投放长度为 138 m、158 m、198 m、218 m、238 m 和 258 m, 共分 6 档。共测定 30 网次数据, 其中可用于分析的有效网次为 24 网次。

2.1 拖速与网位的关系

如图 3 所示, 曳纲长度 138 m 时, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn, 相应的网位从水深 56.5 m 上升至 50.4 m, 上升了 6.1 m。曳纲长度 158 m 时, 上述拖速变化对应的网位由 60.9 m 上升至 52.1 m, 上升了 8.8 m。曳纲长度 198 m 时, 网位由 63.3 m 上升至 57.7 m, 上升了 5.6 m。曳纲长度 218 m 时, 网位由 65.7 m 上升至 59.6 m, 上升了 6.1 m。曳纲长度 238 m 时, 网位由 66.5 m 上升至 62.0 m, 上升了 4.5 m。曳纲长度 258 m 时, 网位由 65.7 m 上升至 62.3 m, 上升了 3.4 m。拖速由 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网位平均上升了 5.8 m。平均上升速率约为 2.9 m/kn。单因素方差检验结果表明, 拖速对网位影响显著($P=0.004$)。

2.2 网位变化速率与拖速的规律

拖速与网位变化速率的关系(图 4)。同一曳纲长度下, 网位水深随着拖速的增加而上升; 而不同曳纲长度下, 网位随拖速变化的上升速率不

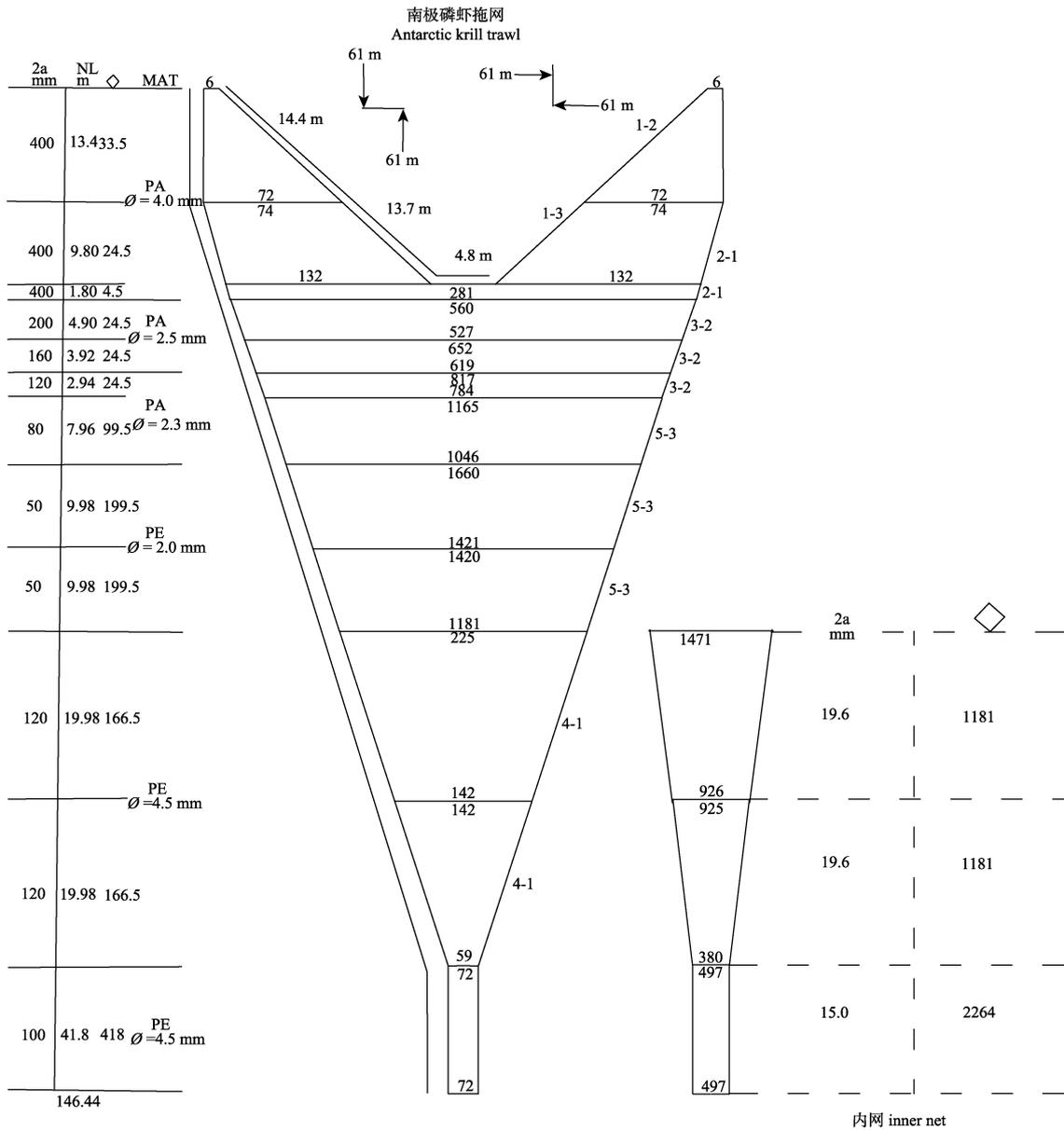


图 2 400 m×146.44 m (上纲 61 m) 南极磷虾拖网网图
Fig. 2 Net drawing of 400 m×146.44 m (headline 61 m) Antarctic krill trawl

同, 网位变化速率为正数时表明网位在上升, 为负数时表明网位在下降, 为零时表明网位保持不变或变化很小。拖速在 1.0~1.5 kn 变化时, 曳纲长度为 158 m 的网位变化速率最大, 其余曳纲长度条件下的网位变化率较为相近。拖速在 1.0~1.5 kn 变化时, 曳纲长度为 218 m 的网位变化速率最大; 而拖速在 2.0~2.5 kn 变化时, 曳纲长度为 218 m 的网位变化速率为 0, 即表明在 2.0~2.5 kn 拖速范围内网位保持不变或变化很小。拖速在 2.0~2.5 kn 变化时, 曳纲为 198 m 的网位变化速率为-2, 即

表示在该曳纲长度下, 拖速由 2.0 kn 增大到 2.5 kn 时, 网位出现下降状态。各曳纲长度下的平均网位变化速率在不同的拖速区间呈先减小后增大的规律, 在拖速为 2.0~2.5 kn 时的平均网位变化速率最小。

2.3 拖速与网口高度的关系

同一曳纲长度条件下, 网口高度随着拖速的增大而减小(图 5)。海上实测表明, “明开轮”使用的拖网网具的最大网口高度为 24.1 m, 出现在曳纲长度 138 m, 拖速 1.0 kn 时。最小网口高度为

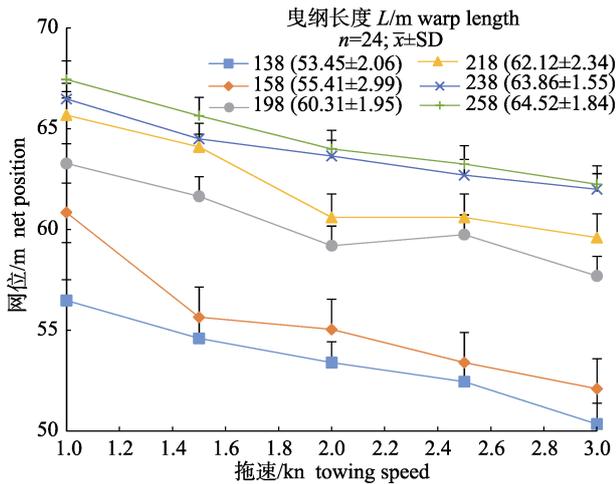


图 3 拖速与网位的关系(竖线为±1 倍标准差)

Fig. 3 The relationship between towing speed and net position (the vertical bar indicates ±1 standard deviation)

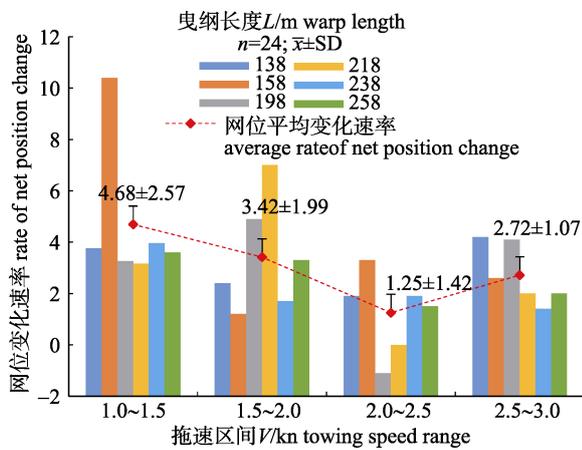


图 4 拖速变化与网位变化速率的关系

Fig. 4 The relationship between towing speed range and rate of net position change

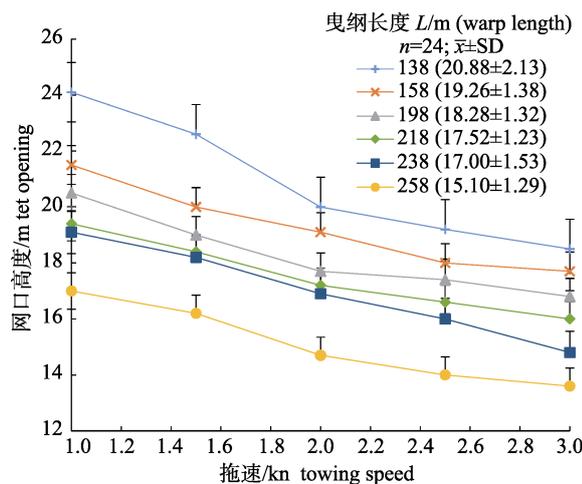


图 5 拖速与网口高度的关系(竖线为±1 倍标准差)

Fig. 5 The relationship between towing speed and net opening (the vertical bar indicates ±1 standard deviation)

13.6 m, 出现在曳纲 258 m, 拖速 3.0 kn 时。曳纲长度为 138 m, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网口高度由 24.1 m 降低到 18.5 m, 减小了 23.2%。曳纲长度 158 m 时, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网口高度由 21.5 m 降低到 17.7 m, 减小了 17.7%。曳纲长度 198 m 时, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网口高度由 20.5 m 降低到 16.8 m, 减小了 18%。曳纲长度 218 m 时, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网口高度由 19.4 m 降低到 16 m, 减小了 17.5%。曳纲长度 238 m 时, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网口高度由 19.1 m 降低到 14.8 m, 减小了 22.6%。曳纲长度 258 m 时, 拖速从 1.0 kn 增加至 3.0 kn 时, 网口高度由 17 m 降低到 13.6 m, 减小了 20%。拖速由 1.0 kn 变化至 3.0 kn, 网口高度平均下降 4 m, 平均减小速率为 2 m/kn, 网口高度平均降低 19.8%。

拖速与网口高度的拟合关系如下:

$$H = -2.05V + 22.11 \quad (R^2 = 0.9604) \quad (3.1)$$

式中, H 表示网口高度(m); V 表示拖速(kn)。根据式 3.1 可得, 拖速 1 kn 时, 曳纲放出长度在 138~258 m 时, 网口平均高度约 20 m。单因素方差检验结果可知, 拖速对网口高度的影响显著 ($P=0.012$)。

2.4 曳纲长度与网位的关系

曳纲长度与网位的关系见图 6, 在不同拖速时, 网位随着曳纲长度的增大逐渐下降, 且下降速率不同, 网位平均下降速率先变大后逐渐变小。拖速为 1.0 kn 时, 曳纲投放长度从 138 m 增加到 258 m, 相应的网位由 56.5 m 下降到 67.5 m。拖速为 1.5 kn 时, 曳纲投放长度从 138 m 增加至 258 m, 相应的网位由 54.6 m 下降到 65.7 m。拖速为 2.0 kn 时, 曳纲投放长度从 138 m 增加至 258 m, 相应的网位由 53.4 m 下降到 64 m。拖速为 2.5 kn 时, 曳纲投放长度从 138 m 增加至 258 m, 相应的网位由 52.5 m 下降到 63.5 m。拖速为 3.0 kn 时, 曳纲投放长度从 138 m 增加至 258 m, 相应的网位由 51 m 下降到 63.3 m。曳纲长度在 138~218 m 时, 网位水深平均下降 11.07%, 曳纲长度从 218 m 增加到 258 m 时, 网位水深平均下降 7.61%。拖速为 1.5 kn 时, 网位水深下降速率先较为平缓,

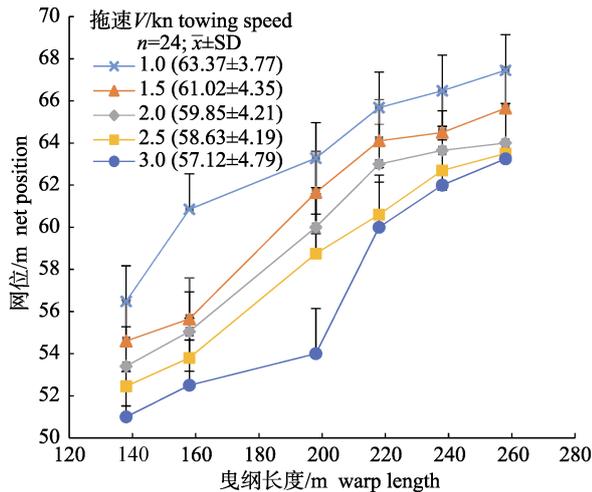


图 6 曳纲长度与网位的关系(竖线为 ± 1 倍标准差)

Fig. 6 The relationship between warp length and net position (the vertical bar indicates ± 1 standard deviation)

后逐渐变大。当拖速在 1.0~3.0 kn 变化, 曳纲从 138 m 开始投放时, 曳纲每增加 20 m, 网位平均下降深度约为 1.9 m。

拖速为 1.0~3.0 kn 时, 曳纲长度与网位之间的关系可用如下拟合公式表示:

$$D=0.098 L+40.24 (R^2=0.9577) \quad (3.2)$$

式中, D 表示网位水深(m); L 表示曳纲投放长度(m)。式 3.2 表明, 曳纲长度为 138 m, 拖速为 1.0~3.0 kn 时, 网位平均深度为 53.76 m。单因素方差检验结果可知, 曳纲长度对网位的影响极显著($P=0.002$), 即曳纲长度增加, 网位明显下降。

2.5 曳纲长度与网口高度的关系

曳纲长度与网口高度的关系见图 7。网口高度变化范围为 13.6~24.1 m。网口高度随曳纲长度的增大而减小, 五组实验结果的图形变化规律较为相似。拖速为 1.0 kn 时, 曳纲长度由 138 m 增加到 258 m, 网口高度由 24.1 m 降低至 17 m, 减小了 7.1 m。拖速为 1.5 kn 时, 网口高度由 22.6 m 降低至 16.2 m, 减小了 6.4 m。拖速为 2.0 kn 时, 网口高度由 20 m 降低至 14.7 m, 降低了 5.3 m。拖速为 2.5 kn 时, 网口高度由 19.2 m 降低至 14.3 m, 降低了 4.9 m。拖速为 3.0 kn 时, 网口高度由 16.5 m 降低至 13.6 m, 降低了 2.9 m。当曳纲长度由 138 m 增加至 158 m 时, 网口高度变化速率逐渐趋于平缓, 拖速由 1.0 kn 变化至 1.5 kn, 拖速增加 50%, 网口高度平均下降 7.1%, 拖速由 1.5 kn 变化至

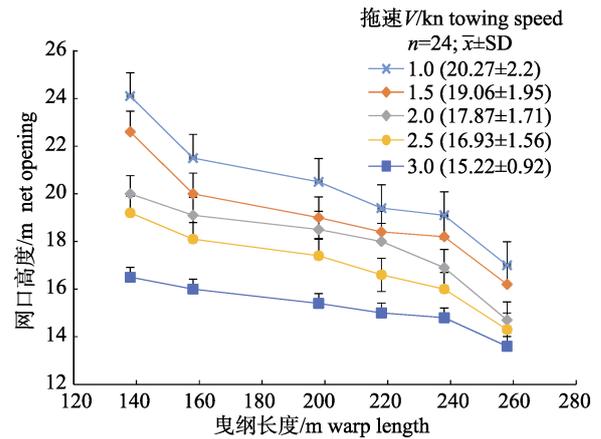


图 7 曳纲长度与网口高度的关系(竖线为 ± 1 倍标准差)

Fig. 7 The relationship between warp length and net opening (the vertical bar indicates ± 1 standard deviation)

2.0 kn, 网口高度平均下降 8.85%, 拖速由 2.0 kn 变化至 2.5 kn 时, 网口高度平均下降 2.27%。拖速由 2.5 kn 变化至 3.0 kn 时, 网口高度平均下降 11.29%。当曳纲长度在 238~258 m 变化时, 网口高度减小速率再次开始变大。拖速在 1.0~3.0 kn 变化时, 曳纲由 138 m 开始逐渐增加, 每增加 20 m, 网口高度平均减小 1.1 m。网口高度与曳纲长度的拟合公式如下:

$$H=-0.038 L+24.66 (R^2=0.9150) \quad (3.3)$$

式中, H 表示网口高度(m); L 表示曳纲投放长度(m)。式 3.3 表明, 曳纲长度投放至 138 m 时, 拖速为 1.0~3.0 kn 时的网口平均高度为 19.4 m。单因素方差检验结果可知, 曳纲长度对网口高度的影响极显著($P=0.009$)。

3 讨论

网位调整在中层拖网捕捞过程中非常重要。作业过程中, 捕捞对象往往并不总是处于同一个水层, 与其水层分布变化相适应的网位调整成为影响捕捞效率高低的关键技术之一。黄洪亮等^[12]将网位定义为网具上中纲至水面的距离。本文将网位定义为网口中心位置离水面的距离, 即网口中心点的水深。我们认为, 网口中心位置是随着上、下纲深度的共同变化而变化的, 可更有效地代表网具在拖曳过程中的位置变动情况。另一方面, 捕捞作业过程中, 根据虾群群体密度和水层调整网位, 以网口中心点对准虾群进行瞄准捕捞,

作业效果会更好。调节曳纲长度和拖速是调整中层拖网网位的常用方法^[6]。本研究得出, 改变曳纲长度和拖速对调整磷虾拖网网位变化有显著的影响, 拖速和曳纲长度的改变能有效地调整网位变化。如图 4 所示的网位变化速率与拖速的关系可知, 不同曳纲长度时, 各拖速区间下的网位平均总体变化速率呈先减小后逐渐增大的状态。拖速在 2.0~2.5 kn 时平均网位变化率最小。至于在 2.0~2.5 kn 拖速区间内, 出现曳纲长度 198 m 时, 网位随着拖速的增加而下降这一与整体变化趋势不同的情况, 究其原因可能是由于在实验过程中的一些测量误差所致, 也有可能是流速和流向对不同实验的影响程度不同, 进而导致实验结果出现较小的偏差。尽管其对整体结果影响不大, 但今后的海上实测实验也应将流速等因素加入在内, 探讨流速对于网具性能的影响是有必要的。

如果在浮沉力配备、网板、手纲、叉纲等因素保持不变的条件下, 在实际捕捞操作过程中, 改变曳纲放出长度是调节和控制网位的最有效方法^[9, 18]。网位调整过程中, 如果网位变动范围不超过 0.5 m, 可视为稳定时段, 网位稳定时间与收绞或投放的曳纲长度有关。本次海上实测结果表明, 网位调整后, 处于稳定状态平均需要 3 min。同一曳纲长度下, 不同拖速时的网位变化速率不同。因此在实际生产作业时, 通过调节曳纲长度来调整网位需要注意当时的拖速。根据鱼探仪影像和网位仪显示的网具位置, 结合曳纲长度和拖速对网位调整幅度的关系, 可有效判断调整网位时是否有充足的时间将网口提升或下降至所预设的水层。

网口高度是评价磷虾拖网性能的重要指标。浮、沉力配备越大, 越能提高拖网网口高度^[19]。实际拖网的空纲长度在一定范围内变化, 小网目磷虾拖网网口高度随着空纲长度的增加也相应的增加^[20]。鱼探仪磷虾影像显示, 磷虾集群状态呈螺旋状或块状。相比于网口宽度, 网口高度变化对捕捞磷虾效率更重要。根据 SPSS 检验结果可知, 拖速和曳纲长度对网口高度均具显著影响。从力学角度上分析, 曳纲长度的变化主要为改变拉力角度。曳纲投放越长, 使得手纲方向角度增加, 从而加大网口水平扩张^[21]。网口水平扩张和

网口高度(垂直扩张)之间的变化是相反的, 网口水平扩张的增大即意味着网口高度在逐渐减小。网具的稳定情况和网形对网具阻力有很大影响, 曳纲长度改变有可能导致网具和网板对水速度的突然改变, 手纲张力发生约 1.0 t 力的增加, 使得曳纲张力瞬间剧增, 从而对拖曳中的渔船造成较大的冲击力, 拖网渔具也因为承受相同的冲击力遭到较大损坏^[22]。虽然由于缺乏有关仪器, 我们无法在渔船上实际测量出曳纲、叉纲、网板和网具的受力情况, 但根据我们在南极磷虾中层拖网作业过程中观察到的情况, 也有可能出现上述现象。磷虾中层拖网的拉力较大, 一旦发生上述情况, 对网具的破坏也会较大。

本次海上实测没有测定记录风向、风力、流向和流速等环境因子, 因此没有进行上述环境因素对拖网网位影响的研究。由于现有生产渔船上的条件所限, 难以严格按照实验设计方法进行对比实验并进行测定, 例如在同一条件下的重复拖曳实验测定, 也没有条件比较浮沉比变化对网口高度和网位的影响。尽管如此, 我们认为本次海上测试的结果无论对于有效调整南极磷虾拖网网位、改善瞄准捕捞作业水平, 还是研究南极磷虾拖网性能均有参考价值。

致谢: 对青岛远洋捕捞有限公司的“明开轮”船长、大副及船员在实验过程中给予帮助和生活上的关怀, 特致谢忱!

参考文献:

- [1] Siegel V, Sushin V, Dammu U. Catch per unit effect (CPUE) data from the early years of commercial krill fishing operations in the Atlantic Sector of the Antarctic[J]. CCAMLR Sci, 1998(5): 31-50.
- [2] Chen X Z, Xu Z L, Huang H L, et al. Development strategy on Antarctic krill resource utilization in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(3): 451-458. [陈雪忠, 徐兆礼, 黄洪亮, 等. 南极磷虾资源利用现状与中国开发策略分析[J]. 中国水产科学, 2009, 16(3): 451-458.]
- [3] Zhu G P. Population biology of Antarctic krill (*Euphausia superba*). I - age, growth and mortality [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(5): 862-868. [朱国平. 南极磷虾种群生物学研究进展 I - 年龄、生长与死亡[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 862-868.]

- [4] Zhu G P, Zhu X Y. Population biology of Antarctic krill (*Euphausia superba*) III – feeding ecology[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(6): 1152–1160. [朱国平, 朱小艳. 南极磷虾种群生物学研究进展 III – 摄食[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(6): 1152–1160.]
- [5] Lu Q W, Zhang M, Zou X R, et al. On resistance formula of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) mid-water trawl used by Chinese fishing fleets[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(2): 155–162. [陆奇巍, 张敏, 邹晓荣, 等. 竹筴鱼中层拖网阻力计算的初步研究[J]. *海洋渔业*, 2014, 36(2): 155–162.]
- [6] Huang X C. Fishing Technology[M]. Chongqing: Chongqing Publishing Press, 2001. [黄锡昌. 捕捞学[M]. 重庆: 重庆出版社, 2001.]
- [7] Sun M C. Marine Fishery Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. [孙满昌. 海洋渔业技术学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.]
- [8] Han X. Analysis of the position control of bottom trawl for double dragging[J]. *Fisheries Sciences*, 1995, 5(8): 26–28. [韩曦. 双船底拖网网位控制方法的探讨[J]. *水产科学*, 1995, 5(8): 26–28.]
- [9] Wan R, Zhu W B, He X, et al. Static analysis of the position control of Mid-water trawl for double dragging[J]. *Periodical of Ocean University of China: Nature Science*, 2007, 37(1): 61–64. [万荣, 朱文斌, 何鑫, 等. 双船中层拖网网位控制的静力学解析[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2007, 37(1): 61–64.]
- [10] Wang E G. The control in water layer on middle level trawl[J]. *Journal of Dalian Fisheries College*, 1991, 6(2): 21–29. [王尔光. 中层拖网的水层控制[J]. *大连水产学院学报*, 1991, 6(2): 21–29.]
- [11] Zhou Y Q. The method of aiming at fishing of net position control of mid-water trawl[J]. *Marine Fisheries*, 1988, 1(1): 6–10. [周应祺. 瞄准捕捞中层拖网网位的控制方法初探[J]. *海洋渔业*, 1988, 1(1): 6–10.]
- [12] Huang H L, Chen X Z. Min-water trawl techniques for fishing Chilean jack mackerel in the southeastern Pacific Ocean[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(1): 99–103. [黄洪亮, 陈雪忠. 东南太平洋智利竹筴鱼中层拖网捕捞技术[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(1): 99–103.]
- [13] Zhou A Z, Feng C L. Experiment and research of krill trawl net[J]. *Modern Fisheries Information*, 2011, 26(8): 6–9. [周爱忠, 冯春雷. 南极磷虾拖网的试验研究[J]. *现代渔业信息*, 2011, 26(8): 6–9.]
- [14] Feng C T, Huang H L, Zhou A Z, et al. Performance optimization of a trawl for Antarctic krill[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(4): 662–670. [冯春雷, 黄洪亮, 周爱忠, 等. 南极磷虾拖网的性能优化分析[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(4): 662–670.]
- [15] Xu P X, Xu L X, Meng T, et al. Comparative analysis on the performance of Japan and South Korea Antarctic krill mid-water trawls with small mesh sizes[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(4): 837–846. [徐鹏翔, 许柳雄, 孟涛, 等. 日韩小网目南极磷虾拖网性能对比分析[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(4): 837–846.]
- [16] Xu G D. The Antarctic krill design and performance analysis [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011. [徐国栋. 南极磷虾拖网设计与性能分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [17] Meng T. The expansion performance of Antarctic krill mid-water trawl used by Chinese fishing fleets—examination by modeling experiments[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [孟涛. 基于模型试验的我国南极磷虾中层拖网扩张性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [18] She X W. Fishing Gear Mechanics Calculation[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2001. [余显伟. 计算渔具力学导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001.]
- [19] Feng C L, Huang H L, Chen X Z, et al. Significance analysis on the main parameters of single boat mid-water trawl[J]. *Marine Fisheries*, 2007, 29(1): 8–12. [冯春雷, 黄洪亮, 陈雪忠, 等. 主要作业参数对单船中层拖网性能的显著性分析[J]. *海洋渔业*, 2007, 29(1): 8–12.]
- [20] Zhou A Z, Feng C L, Zhang X, et al. Influence of adjustment of operation parameters on small-mesh Antarctic krill trawl [J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(1): 74–82. [周爱忠, 冯春雷, 张勋, 等. 调整作业参数对小网目南极磷虾拖网水动力性能的影响[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(1): 74–82.]
- [21] Chen Y L, Zhao Y G, Zhou H, et al. Simulation study of large mid-water trawl system[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(4): 625–633. [陈英龙, 赵勇刚, 周华, 等. 大型中层拖网网具系统的仿真研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(4): 625–633.]
- [22] Yang L. The dynamic control characteristics of the mid-water trawl based on field measurements[J]. *Fisheries Science and Technology*, 1995(3): 37–40. [杨吝. 中层拖网系统动态控制特性的海上试验[J]. *水产科技*, 1995(3): 37–40.]

Effects of towing speed and warp length on the net position of Antarctic krill mid-trawl

SU Zhipeng¹, XU Liuxiong^{1,2,3}, ZHU Guoping^{1,2,3}, WANG Zhen^{1,2,3}, HU Guisen¹, YU Yongjun⁴

1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Engineering Research Center for Pelagic Fishery; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Qingdao Pelagic Fishery Co. Ltd., Qingdao 266000, China

Abstract: Based on the on-sea measurements on net position and net mouth height (vertical opening) of the 400 m × 143.44 m (headline 61 m) of Antarctic krill trawl used by the “Mingkai” krill trawler operated at South Shetland Island from February to July 2015, this paper analyzed the effects of towing speed and warp length on the net position and net mouth height. The net position and net mouth height were measured by DR-1050 depth instruments and the corresponding towing speed and warp length during trawling were also recorded. In this study, the net mouth height is defined as the difference in water depth between the headline and footrope, while the net position is defined as the water depth of the central position of the net mouth. According to the usual operation practice of the fishing vessel and characteristics of the krill aggregation, the range of warp length increased from 138 m to 258 m, with 20-m intervals, and tow speed increased from 1 kn to 3 kn with 0.5-kn intervals. The main results are as follow: (1) The net mouth height of the krill trawl studied ranged from 13.6 m to 24.1 m, while the net position ranged from 50 m to 70 m deep. (2) During trawling, net position was controlled mainly by the length of warp. For each additional 20 m from 138 m of the warp length, the net position decreased by 1.9 m on average, and the net mouth height reduced by approximately 1.1 m on average. Warp length showed significant effects on both the net position and net mouth height ($P < 0.01$). (3) When towing speed increased from 1.0 kn to 3.0 kn, average rise rate of the net position reached 2.9 m/kn with the variation of warp length changing from 138 m to 258 m. When towing speed increased from 1.0 kn to 3.0 kn, the vertical opening of net mouth average reduction rate reached 2 m/kn, accounting for 19.8% on average. Towing speed had a significant impact on the net position and net mouth opening ($P < 0.05$). (4) Analysis of the relationship between rate of net position change and towing speed expression showed that average rate of the net position change decreased first and then increased with different ranges of towing speed under different warp lengths. This result can not only provide useful reference for the Antarctic krill fishing vessel captain who can, according to the size or water layer of the krill aggregation and its relation with the location of the net, timely adjust the warp length and towing speed and control the net at the water depth for accurate fishing, but also provide basic information for Antarctic krill trawl model experiments and independent design of the Antarctic krill trawl net.

Key words: Antarctic krill; mid-water trawl; towing speed; warp length; net position; vertical opening of net mouth

Corresponding author: XU Liuxiong. E-mail: lxxu@shou.edu.cn