

基于 GAM 模型研究金枪鱼围网沉降性能影响因素

唐 浩¹, 许柳雄^{1,2,3,4*}, 周 成¹, 朱国平^{1,2,3,4}, 王学昉¹

(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 210306;

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. 上海海洋大学农业部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 金枪鱼围网渔业是现代金枪鱼渔业中捕捞效率最高的方法, 研究围网沉降性能与影响因子之间的关系有利于提高围网捕捞效率。利用 2011 年 9—12 月金枪鱼围网渔船“金汇 7 号”在中西太平洋作业时所收集的数据, 实验分析了围网沉降深度(H)与放网时间(T), 放网速度(V_0), 括纲(L)及跑纲(L_1)的投放长度, 10、60 和 120 m 3 个水层流速(V_{10} , V_{60} 及 V_{120}) 等因子之间的关系, 并利用广义加性模型(GAM)评价了各因子对沉降深度的影响。结果表明: (1) 网具中部沉降深度与时间的关系为 $H = -0.0002t^2 + 0.4086t + 1.8099$ ($R^2 = 0.9993$); (2) 沉降速度随着深度的增加而减小, 网具中部沉降速度与时间的关系为 $V = 2.5 \times 107t^2 - 6 \times 104t + 0.4412$ ($R^2 = 0.9852$); (3) GAM 模型中的逐步回归分析表明, T 、 V_{60} 、 V_{120} 和 L 4 个因子对 H 影响显著, 且影响大小依次为 V_{120} 、 L 、 T 和 V_{60} ; (4) GAM 模型分析表明, 沉降深度随放网时间的增加而增大, 放网时间集中在 500 ~ 550 s; 流速的大小与沉降深度呈负相关; 括纲投放长度主要集中在 1 800 m 左右。

关键词: 金枪鱼围网; 下纲; 沉降性能; 影响因素; 广义加性模型

中图分类号: S 972.1

文献标志码: A

现代金枪鱼渔业中捕捞效率较高的渔具是金枪鱼围网, 我国于 2001 年开始发展金枪鱼围网渔业^[1-2], 至 2012 年底渔船数量已达到 20 艘。金枪鱼围网作业方式一般可分为捕捞“浮水鱼群”(free swimming school)和“漂流物随附群”(floating objects associated school)两大类^[2]。随着国际渔业管理组织设立禁渔期以及呼吁减少捕捞流木鱼群所采用的人工集鱼装置(artificial fish aggregation device, FAD), 使得捕捞浮水鱼群的网次增加, 但围捕浮水鱼群对渔船和网具的性能要求极高, 生产中发现浮水鱼群被围在网圈内, 但仍能从网具下缘逃逸, 导致金枪鱼围网浮水鱼群的空网率较高, 进一步说明了捕捞浮水鱼群的空网率与网具沉降性能有着密切的联系。因此, 通常通过对金枪鱼围网沉降性能的研究, 提高围网

网具作业性能^[3-4]。

围网下纲最大沉降深度和沉降速度是反映围网沉降性能及网具作业性能最重要的指标。除网具材料、下纲重量、网目等网具因素外, 流速大小、放网速度及放括纲长度等渔法操作及环境因素等均影响着网具的沉降性能^[5-7]。早些时候, 一些学者对传统围网网具沉降性能影响因子开展了较为深入地研究^[8-9]。此后, 中国、韩国及日本等国学者也相继开展了相关研究^[10-20], 但大部分研究仅对沉降性能与影响因子之间的关系进行描述, 且大多通过线性手段分析围网沉降性能, 这在一定程度上限制了对沉降性能与影响因子之间内在联系的研究。有学者利用广义线性模型(generalized linear model, GLM)分析围网网具沉降性能的影响因子^[5,7], 然而围网沉降性能指标

收稿日期:2012-09-15 修回日期:2013-02-12

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA092302)

通信作者:许柳雄, E-mail:lxu@shou.edu.cn

与一些影响因子之间呈非线性关系,这点无法利用 GLM 模型予以检验。广义加性模型 (generalized additive model, GAM) 是 GLM 模型的非参数化拓展,采用平滑函数研究非线性关系,能够利用原始数据,更深入地探讨沉降深度与影响因子间的关系以及确定每个因子的重要程度^[21-22]。本实验根据 2011 年 9—12 月“金汇 7 号”在中西太平洋围网作业时所收集的数据,结合环境因子,通过 GAM 模型筛选出影响围网网具沉降深度的有效因子,并分析影响因子与网具沉降的关系,以期为我国远洋大型金枪鱼围网渔业提供技术指导。

1 材料与方 法

1.1 实验船

实验船为上海开创远洋渔业有限公司大型金枪鱼围网渔船“金汇 7 号”,渔船总吨位 1 789 t;船长 79.77 m,船宽 12.19 m,型深 5.84 m;主机功率 2 646 kW;速度 13 kn。

1.2 渔具

测定的渔具为金枪鱼围网渔船“金汇 7 号”使用的生产网具,由 29 片网衣缝合而成,主尺度

为 1 637.7 m × 321.6 m (上纲长度 × 网具最高部位拉直高度),浮子纲长 1 637 m,缩结系数为 0.8;沉子纲长 1 963.7 m,缩结系数为 0.92。网衣材料为聚酰胺合成纤维 (PA),取鱼部网目尺寸为 90 mm,网翼网目尺寸为 260 mm。围网下纲装有 119 只底环,底环和下纲采用 Y 型连接。

1.3 测试方法

调查仪器为微型温度深度计 (TDR-2050,共 7 个),用于测定网具沉降的深度,该仪器深度精度为测定量程 (10 ~ 740 m) 的 ±0.05%。全网共 119 个底环纲,分别将 TDR-2050 基本均匀固定在网具的下纲铁链上,将 1 ~ 7 号仪器从前网头开始分别固定于第 6、24、42、60、78、96 和 114 根铁链位置附近的下纲上 (图 1)。

4 号 TDR 位于网具中部,所测定的深度读数为网具的最大沉降深度,可作为表征围网沉降性能的指标。测定时,TDR 设置时间与电脑同步,时间间隔为 5 s,以便于记录围网操作过程中的各个时间点。同时,在作业期间记录不同水层海流速度、放网时间、放网速度以及跑纲和括纲松放长度。

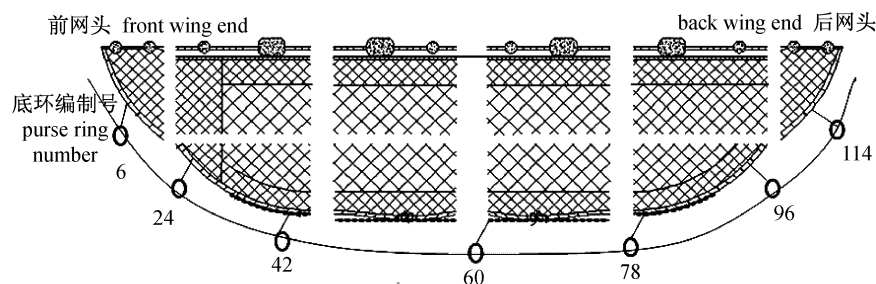


图 1 TDR-2050 沿金枪鱼围网下纲分布示意图

Fig. 1 The sketch map of the attached positions of TDR-2050 along the leadline of the tuna purse seine

1.4 数据处理

沉降深度、沉降速度与时间的关系 考虑到金枪鱼围网中部下纲的沉降深度最大,沉降时间相对较长,因此以网具中部下纲为切入口分析围网下纲沉降深度、沉降速度与时间的关系。每 20 s 记录沉降深度,多项式回归分析沉降深度与时间的关系;计算网具中部每 20 s 的沉降速度,多项式回归分析下纲沉降速度与时间的关系;鉴于变异系数 CV (coefficient of variance) 可描述数据的相对分散性,因此 CV 值的大小反映了沉降深度与沉降速度在不同时刻下的波动情况。

采用广义可加模型的逐步回归进行因子选择,遴选最优影响因子 逐步回归是以 AIC (akaike information criterion) 信息统计量为准则,通过选择最小的 AIC 信息统计量,以达到删除或者增加变量的目的^[21]。本实验利用 GAM 模型对沉降深度与各变量因子 (放网时间、放网速度、3 个水层水流流速、括纲和跑纲松放长度) 的关系进行分析,GAM 表达式:

$$H = s(T) + s(V_0) + s(V_{10}) + s(V_{60}) + s(V_{120}) + s(L) + s(L_1) + \varepsilon \quad (1)$$

式中, H 为下纲最大沉降深度; s 为自然立方样条

平滑; $s(T)$ 表示放网时间效应; $s(V_0)$ 表示放网速度效应; $s(V_{10})$ 表示10 m水层流速效应; $s(V_{60})$ 表示60 m水层流速效应; $s(V_{120})$ 表示120 m水层流速效应; $s(L)$ 表示括网投放长度效应; $s(L_1)$ 表示跑网投放长度效应; ε 表示残差, $E(\varepsilon) = 0$, $\varepsilon = \sigma^2$,符合正态分布。

利用AIC准则检验逐步加入因子后模型的拟合程度,值越小,模型的拟合效果越好^[9]。利用 F 检验评估因子的显著性^[13]。利用 P 值表示平滑函数是否显著的减少了模型误差,根据参考自由度EDF(estimated degrees of freedom)判断因子与响应变量是否属于非线性关系。GAM模型的构建及检验通过R 2.9.2软件实现。

2 结果

2.1 围网中部下纲沉降深度与时间的关系

图2为每20 s围网中部下纲沉降过程中平均沉降深度的变化。从沉降过程来看,沉降深度总体上呈稳步增加趋势,仅在沉降初期和后期出现较明显的波动;围网中部下纲在入水后的10 min内可沉降到177.6 m,约占其最大沉降深(203.3 m)的87%。10~13 min,下纲沉降趋缓。沉降13 min后,下纲沉降非常缓慢,下降深度较浅,约占整个沉降深度的1.5%。由沉降深度的CV值可知,下纲入水后的1 min内沉降深度变化最明显,之后随着沉降时间的增加,沉降深度变化趋于稳定,其CV值保持在0.05左右。从围网中部下纲入水至最大深度,整个过程大约需要14 min。

围网中部下纲沉降深度和时间的关系可用公式(2)表示:

$$H = -0.0002t^2 + 0.4086t + 1.8099 \quad (R^2 = 0.9993) \quad (2)$$

H 为网具下纲沉降深度,单位为m; t 为沉降时间,单位为s。

2.2 围网中部下纲沉降速度与时间的关系

图3为以20 s时间间隔为单位的围网中部下纲沉降过程中沉降速度的变化。从该沉降过程来看,中部下纲的沉降速度随着沉降时间的增加而逐渐减小。中部下纲入水时下沉速度最大,超过0.44 m/s;8 min后降低到最大沉降速度的50%;5~10 min之间,下纲沉降速度有一定的波动,7 min之后下纲沉降速度均位于趋势线以上,速度减小缓慢。通过沉降速度的CV值可以发现,网具下水后1 min内沉降速度变动较为剧烈;之后

趋于平稳,其CV值保持在0.1左右;400 s后沉降速度的CV值有了明显的上升,之后保持平稳;但在720 s之后由于绞收括网,沉降速度的CV值有了较大的波动。

围网中部下纲沉降速度和时间的关系可用公式(3)表示:

$$V = 2.5 \times 10^{-7} t^2 - 6 \times 10^{-4} t + 0.4412 \quad (R^2 = 0.9852) \quad (3)$$

对(3)式关于 t 的微分,得到网具下纲平均沉降加速度方程:

$$a = -6 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-7} t \quad (4)$$

V 为网具下纲沉降平均速度,单位m/s; a 为网具下纲沉降平均加速度,单位m/s²; t 为沉降时间,单位s。

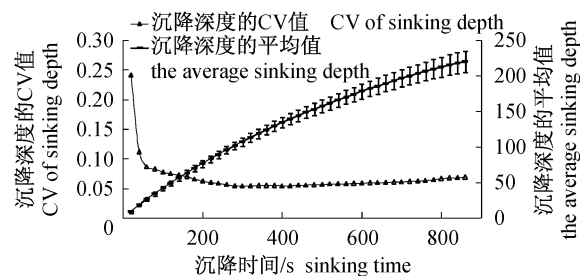


图2 金枪鱼围网沉降深度与沉降时间的关系
Fig. 2 Relationship between sinking depth and sinking time of tuna purse seine

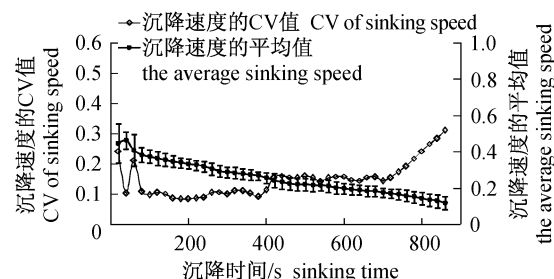


图3 金枪鱼围网沉降速度与沉降时间的关系
Fig. 3 Relationship between sinking speed and sinking time of tuna purse seine

2.3 GAM模型中逐步回归运算结果

GAM模型中逐步回归分析表明,逐步回归的最终模型解释能力为82.4%;在所有因子当中,放网时间、60 m水层流速、120 m水层流速和括网长度等4个因子组成的模型为最优模型。从表1中可以观察到,放网时间和括网长度与沉降深度之间的关系为线性关系(EDF=1),而60 m和120 m水层的流速与沉降深度之间的关系为非线性关系。

F 检验表明,放网时间、60 m 水层流速、120 m 水层流速和括网长度 4 个因子对沉降深度影响显著($P < 0.05$);其中,120 m 水层的流速影响最大;其次为:括网长度,放网时间,60 m 水层流速。

表 1 GAM 模型统计结果
Tab. 1 Statistical results of GAM

模型因子 model factors	估计	参考	F 值 F value	P 值 P value
	自由度 estimated df	自由度 referred df		
T (放网时间)	1.000	1.000	7.549	0.008 39
V_{60} (60 m 水层流速)	1.616	1.836	4.406	0.019 94
V_{120} (120 m 水层流速)	1.659	1.868	24.001	<0.001
L (括网长度)	1.000	1.000	8.919	0.004 41

2.4 GAM 模型分析

放网时间与沉降性能的关系 围网达到最大深度分为 2 个阶段,前一阶段为自然沉降深度,之后为绞收沉降深度。实验采用的 55 网次数据中,网具达到最大深度的最短时间为 860 s,表明 55 网次中网具均未在自然沉降阶段达到最大深度。这说明在包围完成之后的一段时间内,也就是绞收括网的一定时间内网具仍在下沉。从图 4-a 可知,沉降深度随着放网时间的增加而逐渐增大,金枪鱼围网完成包围鱼群的放网时间集中在 500 ~ 550 s 之间;在 400 ~ 650 s 之间随着放网时间的增加,沉降深度增大的趋势比较明显,650 s 之后,随放网时间的增加,沉降深度增大的趋势较之前的小。

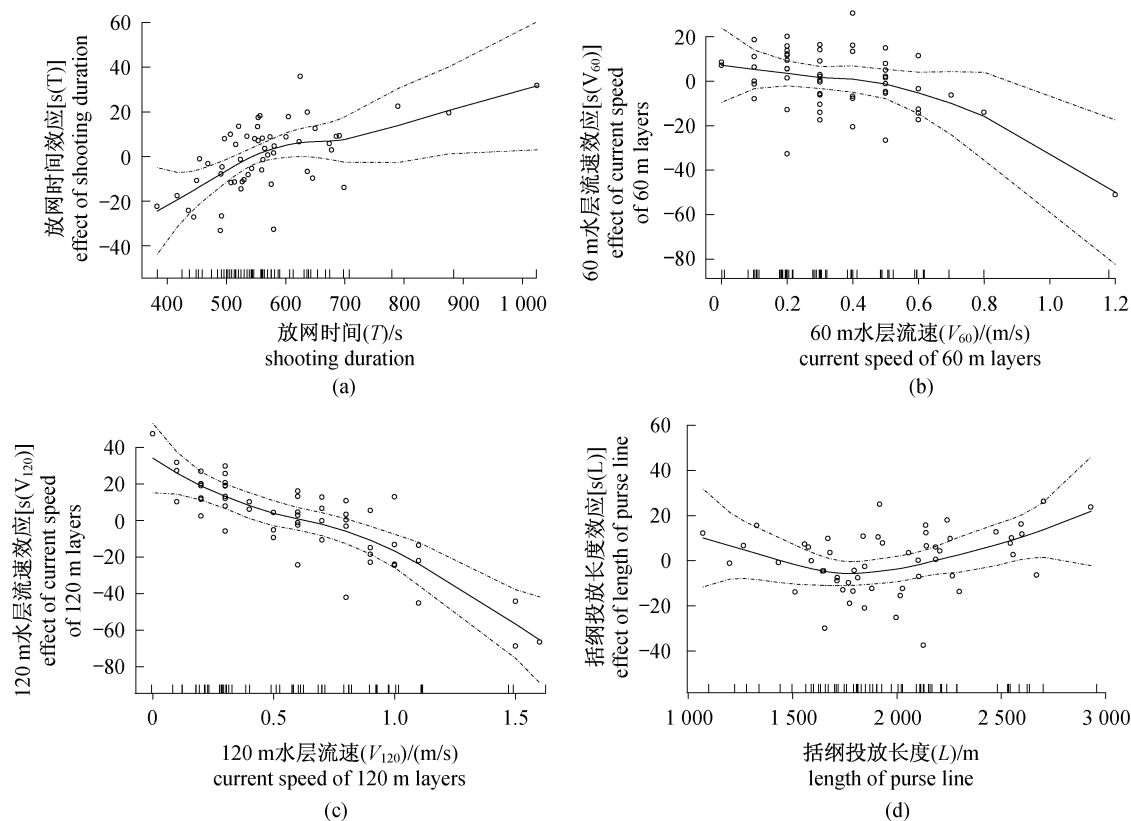


图 4 各影响因素与沉降深度之间关系的 GAM 分析图

Fig. 4 The relationship between impact factors and sinking depth based on the generalized additive model

流速对沉降性能的影响 从流速与沉降深度的关系图可知,流速的大小跟沉降深度成负相关性,随着流速的增大,沉降深度不断减小。60 m 水层的流速对沉降深度影响如图 4-b,水流在 0 ~ 0.5 kn 之间,随流速的增大,沉降深度在逐渐减小,但减小的趋势变化较小;流速在大于 0.5

kn 时,随着流速增大,沉降深度的变化有了较大幅度的减少。120 m 水层的流速对沉降深度的影响如图 4-c,总体趋势是随着流速的增大沉降深度一直保持着大幅度的减少,尤其在 0.7 kn 之后沉降深度随流速增加的变化幅度骤减。由于 120 m 水层的水流对沉降深度的影响是在众多因子中最

为显著的一个因子,因此可以把 120 m 水层的水流当作实际生产中放网时要着重考虑的因素。

括纲投放长度对沉降性能的影响 括纲是围网封闭网具下端的重要部件,同时也起到下沉网具的作用。因此,括纲的长度也是影响网具沉降性能的因素之一。实验显示,55 网次中括纲投放长度主要集中在 1 800 m 左右,在括纲长度小于 1 700 m 时,随着括纲长度的增加沉降深度在逐渐减小,大于 1 700 m 范围内,随着括纲长度增加沉降深度在逐渐增大(图 4-d),其主要是因为括纲投放长度越长,越利于网具沉降。

3 讨论

3.1 沉降速度的变化

实验表明网具沉降速度随着时间的增加逐渐减缓,与许柳雄等^[6]、王春雷^[7]及崔建章等^[23]研究结果“下纲各部位沉降速度均随着深度的增加而减小”一致。围网网具沉降分为两个阶段:自然沉降和绞纲沉降。网具中部在自然沉降阶段受纲索的拉力影响较小,较能反应网具在海水中自然沉降的过程。网具刚入水时,特别是下纲铁链部分起沉降主导作用,沉降速度较快;放网初期,由于网具部分还堆在船上,网衣间的拉力部分抵消了网具的沉降力,故此时网具的沉降速度较刚入水时期慢,随着网入水,船体对网具拉力逐渐减小,网具沉降速度也随之增快。当网具全部入水后,网衣在水中扩展沉降时,由于水流对网衣产生的阻力作用,又会减慢网具沉降速度。

网具中部在括纲开始绞收时尚未达到最大深度,但仍会有较大幅度的下沉。绞收括纲阶段,随着深度的增加,沉降速度减小,但总体减小趋势较为平缓。但速度在各水层均可能出现一定范围内的上下浮动,这可能是由于受到括纲移动的影响。实验表明网具下水后 1 min 内网具的沉降速度变动较为剧烈,这表明网具入水的初始速度变化较大,冯维山^[3]认为初始速度的大小与投网速度有关,而绞纲后(720 s 左右时刻)网具沉降速度 CV 值的增加可能是受作业的影响,开始绞纲或准备绞纲,括纲的抽动引起网具下沉速度的不规则变化。总体的沉降速度波动幅度随深度增加按“大-小-大”的规则变化,这与许柳雄等^[6]研究相吻合。

在研究沉降速度与时间的关系方面,所采用的

方法与许柳雄等^[6]和王春雷^[7]的一致,但通过对比网具中部下纲平均加速度变化,发现实验沉降速度变化趋势较许柳雄等^[6]研究中的大,且下纲沉降初始速度也大,主要原因可能为船舶作业性能及网具结构不同,生产中调查发现,渔船“金汇 7 号”较“金汇 6 号”船速快,这可能是导致下纲沉降初始速度出现差异的一方面原因,另外船长操作习惯、环境因素及作业因素均会影响网具沉降性能。

3.2 水流对网具沉降的影响

实验发现表层流对沉降性能无显著性影响,分析其可能原因为初始投网时由于大型围网的下纲及网衣较重,入水后未完全展开便迅速下沉,导致表层流对网具沉降性能的影响并不显著。而 60 m 和 120 m 水流对围网沉降性能有较显著的影响,其中 120 m 水层水流对沉降性能影响最大,根据本文作者海上实测调查发现,围网作业时,通过对不同水层水流的判断是船长决定放网时机的最重要的因素。因此,水流对指导放网的方位有重要作用。

围网作业是极其复杂的过程,单凭个别因子不能全面的反映对围网沉降性能的影响,但是生产中受测试仪器和船舶条件的限制,测试的项目数据及分析结果也略显不足,今后在精确数据的基础上应加强对网具下纲载荷、网具的扩张力等因素的数据采集。

3.3 GAM 模型分析

60 m 和 120 m 水层流速的估计自由度值不为 1,说明它们与沉降深度并不存在线性关系,因此对于研究金枪鱼围网沉降性能来说,采用一般线性模型尚不能较好地解析沉降性能与影响因子之间的关系。相对而言,GAM 模型更适用于表达影响因子和沉降性能之间的关系,鉴于 GAM 模型发展于 GLM 模型,主要适用于数据非线性关系的描述,即可以在同一模型中分析因变量和自变量之间的非线性关系^[24]。另外,GAM 中每个变量相对独立,即模型估计参数时,每个独立变量不对其它变量产生依赖。因此,采用 GAM 模型研究围网沉降性能可以为我们提供更多的关于沉降性能和影响因子之间关系的信息,同时也可以对影响因子进行筛选,并拟合最佳的模型。

参考文献:

- [1] 励仲年. 渔船驾驶员应知应会——十五、围网网具的沉降性能[J]. 海洋渔业,1987,9(4):181-182.

- [2] 孙满昌. 海洋渔业技术学[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- [3] 冯维山. 围网沉降载荷分布[J]. 中国水产科学, 1998,5(3):82-87.
- [4] 冯维山,许传才. 围网下纲载荷对下纲沉降特性的影响[J]. 水产学报,1999,23(suppl.):112-115.
- [5] 许柳雄,兰光查,叶旭昌,等. 下纲重量和放网速度对金枪鱼围网下纲沉降速度的影响[J]. 水产学报,2011,35(10):1563-1571.
- [6] 许柳雄,王敏法,叶旭昌,等. 金枪鱼围网沉降特性[J]. 中国水产科学,2011,18(5):1161-1169.
- [7] 王春雷. 中西太平洋 1 664.5 m × 394.3 m 金枪鱼围网沉降性能研究[D]. 上海:上海海洋大学,2008.
- [8] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-6[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1958, 24(6-7):407-410.
- [9] Iitaka Y. Model experiments on the sardine purse seine operating in Hyuganada-5[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1958, 23(9):511-513.
- [10] Konagaya T. Studies on the design of the purse seine[J]. Journal of the Faculty of Fisheries, Prefectural University of Mie, 1971, 8(3):209-296.
- [11] Kristjonsson H. Modern fishing gear of the world-Second edition[M]. London: Fishing News Books, 1981:254-255.
- [12] Misund O, Dickson W, Beltestad A. Optimization of purse seines by large-meshed sections and low lead weight. Theoretical considerations, sinking speed measurements and fishing trials [J]. Fisheries Research, 1992, 14(4):305-317.
- [13] Hyun-Young K, Chun-Woo L, Jong-Keun S, et al. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification [J]. Fisheries Research, 2007, 88(1-3):109-119.
- [14] Kim Y H. Geometry of the model purse seine in relation to enclosed volume during hauling operation [J]. Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 3(2):156-162.
- [15] Kim S J. An analysis of the sinking resistance of a purse seine. (2) The case of a model purse seine with different netting materials and sinkers[J]. Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology, 2004, 40(1):29-36.
- [16] Hosseini S A, Lee C W, Kim H S, et al. The sinking performance of the tuna purse seine gear with large-meshed panels using numerical method[J]. Fisheries Science. 2011, 77(4):503-520.
- [17] Park S J, Aoyama T, Suzuki M. Studies on the mackerel purse seine operating in the sea area of Cheju Island-2, Model experiment on the deformation of net in two layer current [J]. Bulletin of Marine Research Institute Cheju National University, 1986, 22(4):32-40.
- [18] 刘树椿. 深水围网沉降性能的测试及渔法研究[J]. 水产学报, 1988, 12(2):95-104.
- [19] 许柳雄,王学昉,朱国平,等. 中西太平洋金枪鱼围网流木鱼群中鲣鱼种群结构的分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28(2):293-299.
- [20] 许柳雄. 渔具设计与理论[M]. 北京:中国农业出版社, 2004:157-163.
- [21] 薛毅,陈立萍. R 统计建模与 R 软件[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [22] 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):1863-1871.
- [23] 崔建章,陆赤,黄硕林. 围网沉降性能测试和分析[J]. 海洋渔业, 1984, 6(1):7-10.
- [24] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized Additive Models[M]. London: Chapman and Hall, 1990.

Impact factors of sinking performance for tuna purse seine based on the generalized additive model

TANG Hao¹, XU Liuxiong^{1,2,3,4*}, ZHOU Cheng¹, ZHU Guoping^{1,2,3,4}, WANG Xuefang¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Tuna purse seining is the most efficient fishing method in the modern tuna fisheries, and the this present study analyzed the sinking performance in tuna purse seines and its relationships with impact factors, which are beneficial to improve efficient fishing in tuna purse seines. Based on the data collected from the tuna purse seiner “JINHUI 7” operating in the Western and Central Pacific Ocean (WCPO) during September to December 2011, the present study analyzed the relationship between sinking depth (H) and other variables, including shooting duration (T), shooting velocity (V_0), length of purse line (L), length of ran line (L_1) and current speed (V_{10} , V_{60} and V_{120}) of 10 m, 60 m and 120 m layers, the impact factors on sinking depth are also estimated using the generalized additive model (GAM). The results show that (1) the relationship between the sinking depth (H) and time (t) for the middle section of leadline can be described by the formula $H = -0.0002t^2 + 0.4086t + 1.8099$ ($R^2 = 0.9993$). (2) the sinking speed decreased with the increasing depth, the relationship between the sinking speed (V) at the middle part of leadline and time (t) can be described using the formula $V = 2.5 \times 10^{-7}t^2 - 6 \times 10^{-4}t + 0.4412$ ($R^2 = 0.9852$). (3) the analysis of stepwise GAM shows that four factors have a significant impact on the sinking depth ($P < 0.05$) and the significance can be ordered by V_{120} , L , T and V_{60} ; (4) the analysis of GAM shows that the sinking depth increases gradually with the increasing shooting duration, which concentrates on the period of 500 – 550 s; current speed has a negative correlation to the sinking depth; the length of purse line is mainly concentrated in about 1 800 m.

Key words: tuna purse seine; leadline; sinking performance; impact factors; generalized additive model (GAM)

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