

# 白令海黄线狭鳕的生活史特征及资源利用状态

冉全<sup>①②</sup> 徐玉成<sup>③</sup> 邢洁<sup>④</sup> 于汉<sup>③</sup> 徐鹏翔<sup>③</sup> 张春光<sup>①</sup> 张洁<sup>①\*</sup>

① 中国科学院动物研究所, 动物生态与保护生物学院重点实验室 北京 100101; ② 中国科学院大学 北京 100049;

③ 辽宁远洋渔业有限公司 大连 116113; ④ 国家海洋局东海标准计量中心 上海 200136

**摘要:** 本研究以采自白令海峡的 230 尾黄线狭鳕 (*Gadus chalcogrammus*) 为测量样本, 运用联合国粮农组织 FAO 推荐的渔业资源评估软件 FISAT II, 研究其年龄及生长特征; 进一步分析了该物种近 40 年的历史捕捞量, 并对白令海峡种群的资源利用状态进行了综合评估。结果表明, 全长优势组主要集中在 41.3 ~ 54.8 cm, 空壳重优势组为 422.74 ~ 782.74 g。在生长过程中, 雌性和雄性并无显著性差异。鱼体空壳重 ( $W$ ) 和全长 ( $L$ ) 的关系为  $W = 0.045608L^{2.46}$ , von Bertalanffy 生长方程渐近全长  $L_{\infty}$  为 74.86 cm, 渐近空壳重  $W_{\infty}$  为 1 860.78 g, 生长系数  $K$  为 0.17; 总死亡系数  $Z$  为 0.67, 捕捞死亡系数  $F$  为 0.40, 开发率  $E$  为 0.59。此开发率虽然高于 0.5, 但远低于我国目前沿海的带鱼 (*Trichiurus japonicus*) 和银鲳 (*Pampus argenteus*) 等重要的经济鱼类, 捕捞压力较近海为轻。通过分析过去 40 年的历史捕鱼量, 我们进一步对该物种的利用状况进行了综合评价, 捕捞量的监测和分析显示, 得益于国际组织对远洋渔业的监管, 黄线狭鳕种群资源的利用相较于 20 世纪末更趋于合理化、规范化和制度化。本研究为制定或采取与国际接轨的远洋渔业监管策略, 促进中国远洋渔业健康可持续发展提供了重要的科学信息。

**关键词:** 黄线狭鳕; 年龄和生长; 白令海; 生活史; 资源利用评价

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2021) 02-229-11

## The Life-history Traits and Utilization Status of *Gadus chalcogrammus* in the Bering Sea

RAN Quan<sup>①②</sup> XU Yu-Cheng<sup>③</sup> XING Jie<sup>④</sup> YU Han<sup>③</sup> XU Peng-Xiang<sup>③</sup>  
ZHANG Chun-Guang<sup>①</sup> ZHANG Jie<sup>①\*</sup>

① Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

② University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ③ Liaoning Pelagic Fisheries Co., Ltd, Dalian 116113;

④ East China Sea Center of Standard and Metrology, Shanghai 200136, China

**Abstract:** A total of 230 Walleye Pollock, *Gadus chalcogrammus*, were collected from the Bering Sea. The population was assessed for age, growth, and mortality by using the software FISAT II, a fishery resource assessment software recommended by FAO. From our result, total lengths varied from 41.3 cm to 54.8 cm,

**基金项目** 国家海洋局极地考察办公室南极鱼类多样性及非南极物种习性调查项目 (No. JDXT2018-3);

\* 通讯作者, E-mail: zhangjie@ioz.ac.cn;

**第一作者介绍** 冉全, 男, 硕士; 研究方向: 鱼类生物学、生态学; E-mail: ranquan@ioz.ac.cn。

收稿日期: 2020-10-16, 修回日期: 2021-01-04 DOI: 10.13859/j.cjz.202102008

and the eviscerated weights ranged between 422.74 g and 782.74 g were the dominant groups, respectively. There was no significant correlation between sex and growth (the relationship between sex and length-weight was  $W = 0.045608L^{2.46}$ ); von Bertalanffy growth parameters were  $L_{\infty} = 74.86$  cm,  $W_{\infty} = 1\ 860.78$  g,  $K = 0.17$ , and  $t_0 = 0.77$ . The total instantaneous mortality ( $Z$ ) was estimated at 0.67, whereas the corresponding estimate of fishing mortality ( $F$ ) was at 0.40. The population appeared to have been moderately exploited at an exploitation rate ( $E$ ) of 0.59. We further made a comprehensive assessment of the utilization status of this species by analyzing the historical catch of the past 40 years (Fig. 6), and found that the current utilization status of the Walleye Pollock population has become more rational, standardized, and institutionalized than the end of the 20th century, which could be attributed to the regulation of pelagic fishery international organizations. Although the exploitation rate of *G. chalcogrammus* is above 0.5, it is far lower when compared with the economically important fish species, such as *Trichiurus japonicus* and *Pampus argenteus* which are currently caught in the coastal areas of China. To promote China's pelagic fishery healthy and sustainable development, continuous monitoring of various species with high economical value are highly suggested.

**Key words:** *Gadus chalcogrammus*; Age and growth; Bering Sea; Life-history traits; Resource utilization evaluation

黄线狭鳕 (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1811), 又称阿拉斯加狭鳕、明太鱼等, 英文名为 Walleye Pollock 或 Alaska Pollock, 属于鳕形目 (Gadiformes) 鳕科 (Gadidae) 鳕属 (Coulson et al. 2006, Carr et al. 2008)。因分类学争议, *Theragra chalcogrammus* 至今也被广泛使用为其学名 (Renner-Martin et al. 2018), 如联合国粮食与农业组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 官网依然沿用 *T. chalcogrammus*。其分布范围主要在北太平洋亚北极海域, 东到美国波特兰, 西到朝鲜半岛, 北部至阿拉斯加, 南至阿留申群岛 (Daniel et al. 1990, Kano et al. 2015)。黄线狭鳕属深海冷水性鱼类, 一般出现在 30 m 到 400 m 水层, 偶尔会出现在表层, 最深可到达 1 280 m 深水层, 有随温度变化的季节性迁移 (Daniel et al. 1990, Kotwicki et al. 2005)。由于黄线狭鳕资源量大且商品价值高, 一直以来是渔业捕捞的主要物种 (Ianneli et al. 2016), 每年捕捞量超数百万吨, 是世界上捕捞量最多的鱼种之一 (Smith 1979, Wespestad 2000, Yasumiishi et al. 2015)。黄线狭鳕作为一种高经济价值的鱼类, 其资源动态及捕捞状况已成为区域众多鱼类之

中被关注的热点。从生态学角度而言, 黄线狭鳕是肉食性鱼类, 主要摄食物浮游动物、磷虾和个体较小的鱼等 (Dwyer et al. 1987), 该物种被底栖鱼类、海鸟和海狮 (Laake et al. 2016) 等摄食, 同类相食的现象也非常普遍。该物种在维持区域生态系统平衡中具有重要意义, 是白令海区鱼类中的关键物种 (Yamamura et al. 2002)。因此, 对黄线狭鳕相关生物学参数的评估对该物种的资源评价和渔业资源管理等具有重要的指导意义。

生活史的进化是行为生态学、种群生态学和进化生物学中最重要的内容之一 (Dobson 2007), 通常被定义为种群的进化策略, 直接影响物种生存和繁殖的成功 (Ricklefs et al. 2002), 而正确评估物种年龄对了解种群动态、资源量和渔业管理等方面有重要的作用 (Pratchett 2005)。年龄、生长和死亡率是鱼类种群中至关重要的生活史特征, 由于对商业开发种群的密集捕捞, 这些特征可能随时间和地点而发生变化, 而生长、死亡等参数则是种群结构研究的重要内容。因此, 国外学者一直对黄线狭鳕生长、年龄和死亡参数等生物学参数进行周密的研究 (Trippel 1995, Jennings et al.

1998, Kooka 2012, Ashworth et al. 2016, Ianelli et al. 2016)。在所有动物类群中, 年龄大小是衡量生产力的关键指标 (MacNeil et al. 2017)。国内外对黄线狭鳕生活史特征的研究主要集中于 20 世纪 90 年代, 随后主要集中于 0 ~ 2 龄 (Yokota et al. 2016, Porter et al. 2019, Passerotti et al. 2020)。对于成年个体, 黄线狭鳕耳石到 5 或 6 环开始出现不清晰情况 (Buslov et al. 2019), 而且在研究中发现其矢耳石较大 (1 ~ 4 cm), 一般在 4 环左右会出现类似于贝壳状的弧度。因而, 用常规的耳石磨片法 (郭弘艺等 2010) 评估极地地区黄线狭鳕年龄的准确性将会大大降低。国外学者一般认为采用煨烧法对黄线狭鳕年龄的评估准确性最高 (Lai et al. 1987, Akira et al. 2001), 但这种方法同样对高龄个体也会有较大误差。

本文采用联合国粮食与农业组织 (FAO) 开发并推荐的 FISAT II 软件, 以采自白令海 61 渔业区的黄线狭鳕为研究对象, 构建其全长频率分布数据, 并用体长频率分析法 ELEFAN I (electronic length frequency analysis) 估算该种群的渐近空壳重、渐近全长等生长参数, 并拟合 von Bertalanffy 生长方程 (Renner-Martin et al. 2018), 对其资源开发率进行综合评价。期待本研究结果和产学结合的模式, 能够对我国远洋渔业重要经济鱼类资源的可持续利用和保护管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本收集与保存

实验材料由辽宁远洋渔业公司采自白令海 FAO 渔业区第 61 区 (178° E, 61° N), 共计 230 尾, 经现场冷冻于 2018 年 11 月 17 日送达实验室。冷冻的样本放置 5 h 解冻后, 进行基本形态学参数测量, 包括全长 (total length, TL)、叉长 (fork length, FL)、体长 (standard length, SL)、体重 (body weight, BW) 和空壳重 (eviscerated weight, EW) 等。长度用直尺 (DL8100, 得力公司) 和游标卡尺 (DL91150,

得力公司) 测量并精确到 0.1 cm, 电子天平 (XH30002, 成都倍赛克仪表研究所) 测量重量, 精确到 0.01 g。

### 1.2 生长参数

根据已采集样本的叉长 ( $L_F$ ) 和全长 ( $L_T$ ) 数据, 拟合出叉长-全长关系表达式为  $L_F = a_1 L_T + b_1$ , 采用 R 语言拟合出全长 ( $L_T$ , 单位 cm) 和空壳重 ( $W$ , 单位 g) 的相关关系为  $W = a L_T^b$ , 采用 Snedecor 公式计算出最佳全长分组组距为 1.5 cm。而后采用联合国粮食组织的 FISAT II 软件 (Version 1.2.2) 中的体长频率分析 (electronic length frequency analysis, ELEFAN) 拟合出黄线狭鳕的渐近全长 ( $L_\infty$ )、渐近空壳重 ( $W_\infty$ ) 和生长系数 ( $K$ )。并根据 Pauly (1980) 的经验公式:  $\ln(-t_0) = -0.3922 - 0.2752 \ln L_\infty - 1.038 \ln K$  求出理论生长起点年龄 ( $t_0$ )。最终带入 von Bertalanffy 生长方程:  $L_t = L_\infty [1 - e^{-K(t-t_0)}]$ ,  $W_t = W_\infty [1 - e^{-K(t-t_0)}]^b$ 。为了方便本研究所估算的相关生物参数与其他学者研究的结果进行比较, 本研究还采用了总生长表现指数  $\Phi'$  (Massutí et al. 2000), 公式为  $\Phi' = \lg K + 2 \lg L_\infty$ 。分别用全长和空壳重的生长速度和生长加速度曲线对生长过程的特征变化进行描述。计算公式如下,  $dL_t/dt = KL_\infty e^{-K(t-t_0)}$ ,  $dW_t/dt = bKW_\infty e^{-k(t-t_0)} (1 - e^{-k(t-t_0)})^{(b-1)}$ ,  $d^2L_t/dt^2 = -K^2L_\infty e^{-K(t-t_0)}$ ,  $d^2W_t/dt^2 = bK^2W_\infty e^{-k(t-t_0)} (1 - e^{-k(t-t_0)})^{(b-2)} (be^{-k(t-t_0)} - 1)$ 。当重量生长表现为不规则的 S 型, 重量生长存在拐点, 那么在生长拐点处,  $d^2W/dt^2 = 0$ , 即当  $be - K(t - t_0) = 0$ , 生长拐点  $T_{tp} = \ln b/K + t_0$ 。式中,  $L_F$  为叉长,  $L_T$  为全长,  $a_1$  和  $b_1$  分别为斜率和截距,  $a$  为肥满度,  $b$  为幂指数,  $L_t$  和  $W_t$  为个体年龄  $t$  时的预测全长及预测空壳重,  $L_\infty$  为渐近全长,  $W_\infty$  为渐近空壳重,  $e$  为自然常数,  $T_{tp}$  为生长拐点。

### 1.3 死亡参数

死亡系数亦称为瞬时死亡率, 为某一个时刻瞬时的相对死亡速度, 包括总死亡系数 ( $Z$ ), 自然死亡系数 ( $M$ ) 和捕捞死亡系数 ( $F$ )。采用 Pauly (1987) 经验公式估算自然死亡系数  $M$ ,

$\ln M = -0.0066 - 0.279 \ln L_{\infty} + 0.6543 \ln K + 0.4634 \ln T$ , 并用  $\ln(N_t/\Delta t) = -Z_t + \ln N_0$  估算总死亡系数 ( $Z$ ); 捕捞死亡系数 ( $F$ ) 根据总死亡系数和自然死亡系数之差计算得出, 即  $F = Z - M$ 。开发率  $E$ , 是捕捞系数占总死亡系数之比,  $E = (Z - M)/Z = F/Z$ 。一般而言,  $E$  大于 0.5 属于过度开发 (Pauly et al. 1987, 刘金殿等 2010)。此外理论寿命 (longevity)  $t_m$  采用  $t_m = 3/K + t_0$  计算获得。式中,  $N_t$  为  $t$  龄全长组的个体数占总样品数比例,  $\Delta t$  为其相应全长组由下限生长到上限所需的时间,  $L_{\infty}$  为渐近全长,  $K$  为生长系数,  $T$  为黄线狭鳕栖息环境水域表面的平均温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

#### 1.4 不同历史时期渔业动态及生长参数比较

通过对比 Lai 等 (1987)、Akira 等 (2001) 和 Janusz 等 (1997, 2005) 研究结果, 并采用  $t_m = 3/K + t_0$  经验公式计算出不同时期和地区的理论寿命。最后对各个地区和不同历史时期的黄线狭鳕种群生长动态进行分析。将原始数据保存在 Exce1 中, 数据分析采用 R 语言, 用 FISAT II 进行生长参数估算。黄线狭鳕历史捕捞量数据于联合国粮农组织 (FAO) 官方网站

获得 (<http://www.fao.org>)。

## 2 结果

### 2.1 全长长空壳重组成

经过测量, 总体 230 尾样品全长的范围为 35.30 ~ 72.00 cm, 均值为  $(48.17 \pm 6.29)$  cm, 优势组主要集中在 41.3 ~ 54.8 cm, 占样本总量的 75.19%。样本空壳重范围为 342.7 ~ 1 740.1 g, 均值为  $(650.90 \pm 237.98)$  g, 优势组为 422.74 ~ 782.74 g, 占样本总量的 80% (图 1)。

### 2.2 全长和叉长关系

根据公式  $L_F = a L_T + b$  分别模拟出黄线狭鳕雌性、雄性和雌雄所有样本的全长 ( $L_T$ ) 与叉长 ( $L_F$ ) 直线关系 (图 2)。雌性:  $L_F = 0.247 + 0.967 L_T$  ( $R^2 = 1.00, n = 147$ ); 雄性:  $L_F = -0.428 + 0.979 L_T$  ( $R^2 = 0.99, n = 83$ ); 雌雄总体:  $L_F = -0.068 + 0.972 L_T$  ( $R^2 = 0.99, n = 230$ )。协方差分析雌雄个体的全长和叉长无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 说明雌性和雄性的全长与叉长关系可以合并。

### 2.3 全长空壳重关系

黄线狭鳕的全长空壳重相关度 (Spearman

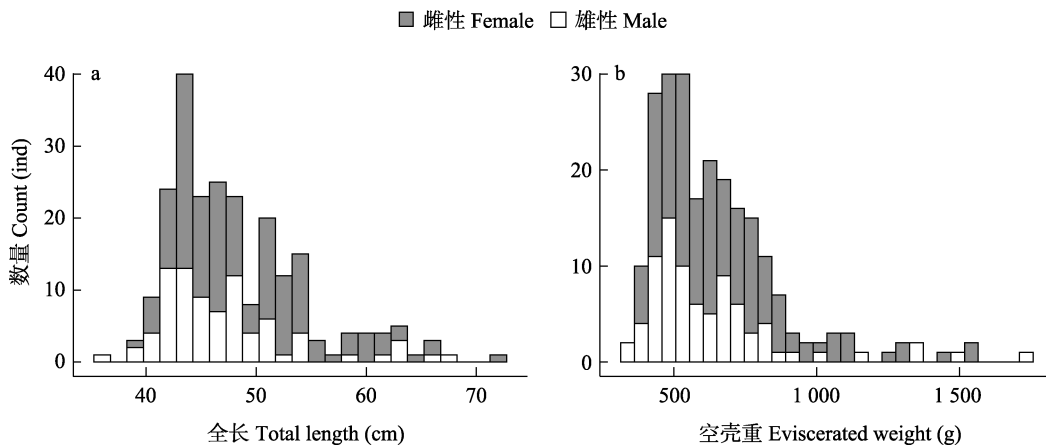


图 1 黄线狭鳕样本全长和空壳重分布图

Fig. 1 Total length and eviscerated weight distribution of Walleye Pollock sampled in the Bering Sea

a. 全长密度分布, 其中每个柱形代表计算的最佳组距 1.5 cm; b. 空壳重密度分布, 其中每个柱形代表计算的最佳组距 40 g。  
a. Total length density distribution, where each column represents the calculated optimal group spacing of 1.5 cm; b. Eviscerated weight density distribution, where each column represents the optimal group distance of 40 g.

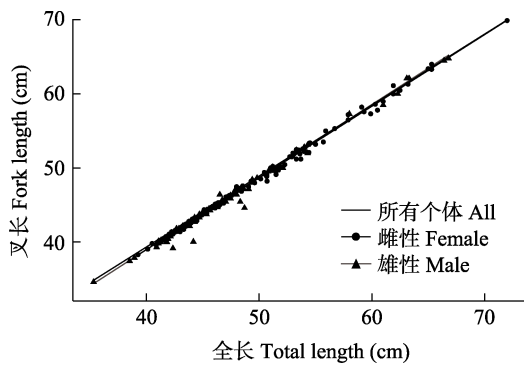


图2 白令海峡黄线狭鳕的全长和叉长的关系

Fig. 2 The relationship between the total length and fork length of Walleye Pollock in the Bering Sea

相关) 为 0.94 ( $P = 2.2 \times 10^{-16}$ ), 说明相关度极高。对全长  $L$  和空壳重  $W$  关系进行拟合, 分别采用线性 ( $W = a + bL$ )、幂函数 ( $W = aL^b$ )、指数 ( $W = a e^L$ )、多项式 ( $W = a + bL + cL^2$ ), 取  $R^2$  最大值进行拟合。结果幂函数拟合关系系数最高,  $R^2 = 0.904$ ,  $a$ 、 $b$  值分别 0.045 和 2.46。根据在白令海峡采集到的 230 尾黄线狭鳕的全长、空壳重数据, 跟据幂函数关系式做出回归曲线图 (图 3)。

雌性:  $W = 0.058L^{2.39}$  ( $R^2 = 0.8997$ ,  $n = 147$ ); 雄性:  $W = 0.024L^{2.53}$  ( $R^2 = 0.9000$ ,  $n = 83$ );

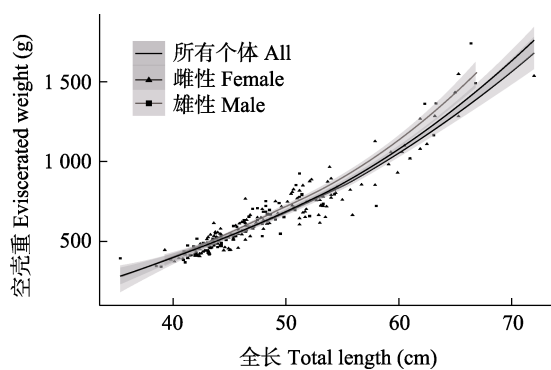


图3 黄线狭鳕的全长和空壳重的关系

Fig. 3 Diagram of the relationship between the total length and eviscerated weight of the Walleye Pollock

阴影部分表示所属曲线的置信区间。The shaded region represents the confidence interval of the curve to which it belongs.

所有个体:  $W = 0.045L^{2.46}$  ( $R^2 = 0.9045$ ,  $n = 230$ )。对雌性和雄性个体方程中的  $b$  值进行协方差分析, 雌雄差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 表示雌性和雄性的全长与空壳重关系可以合并。

## 2.4 生长方程

采用 von Bertalanffy 生长方程进行拟合。求得白令海峡黄线狭鳕的生长参数,  $L_{\infty}$  为 74.86 cm,  $K$  为 0.17, 采用 Pauly 经验公式求得  $t_0$  为 -0.77。利用求得的全长-空壳重关系式中  $a$ 、 $b$  参数值, 通过渐进全长  $L_{\infty}$  换算出渐进空壳

重  $W_{\infty}$ , 即  $W_{\infty} = 0.045L_{\infty}^{2.46}$ 。经过计算, 白令海峡黄线狭鳕的渐进空壳重为 1 860.78 g。

因此根据上述生长参数所得到的白令海峡黄线狭鳕的种群全长、空壳重生长方程分别为:  $L_t = 74.86[1 - e^{-0.17(t+0.77)}]$  和  $W_t = 1860.78 [1 - e^{-0.17(t+0.77)}]^{2.46}$ 。获得其相对应的生长方程曲线 (图 4)。

## 2.5 生长速度、加速度和生长拐点

全长、空壳重生长曲线主要反映鱼类的生长过程的总和, 鱼类生长过程中的变化情况主要依靠其生长速度及加速度来体现。本研究利用 R 软件拟合出的 von Bertalanffy 生长方程, 求得白令海峡黄线狭鳕的生长全长、空壳重生长速度和加速度, 分别绘制相关曲线图 (图 5)。白令海峡黄线狭鳕的全长生长速度方程为:  $dL_t/dt = 0.17 \times 74.86e^{-0.17(t+0.77)}$ ; 空壳重生长速度方程为  $dW_t/dt = 2.46 \times 0.17 \times 1860.78e^{-0.17(t+0.77)}(1 - e^{-0.17(t+0.77)})^{2.46-1}$ ; 全长、空壳重生长加速度方程分别为  $d^2L_t/dt^2 = -0.17^2 \times 74.86e^{-0.17(t+0.77)}$ 、 $d^2W_t/dt^2 = 2.46 \times 0.17^2 \times 1860.78e^{-0.17(t+0.77)}(1 - e^{-0.17(t+0.77)})^{2.46-2}(2.46e^{-0.17(t+0.77)} - 1)$ 。

经计算该种群最大年龄为 18.5 龄, 拐点年龄为 3.07 龄, 拐点年龄对应的全长和空壳重分别为 35.89 cm 和 305.40 g。当年龄小于 3.07 龄时, 空壳重生长速度曲线上升, 但其加速度下降且为正值, 反映了 3.07 龄前的个体空壳重生长速度是一直增加, 到 3.07 龄时达到最大值 (图 5b)。当年龄小于 3.07 龄时, 空壳重生长速度

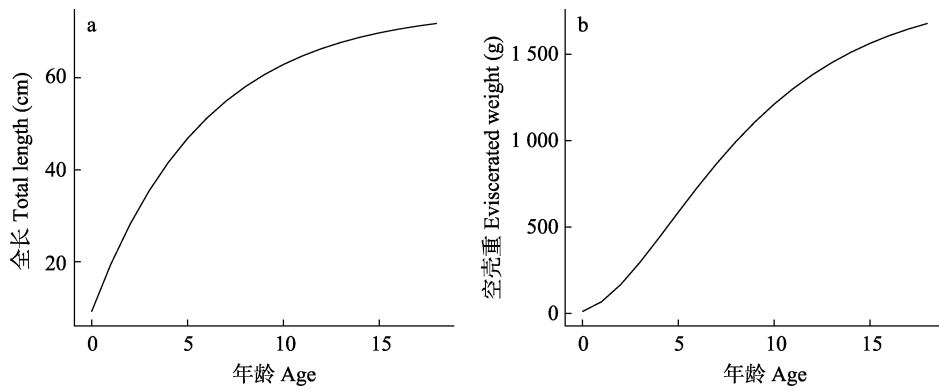


图 4 白令海峡黄线狭鳕的全长 (a) 和空壳重 (b) 的生长曲线

Fig. 4 The total length (a) and eviscerated weight (b) growth curve of the Walleye Pollock in Bering Sea

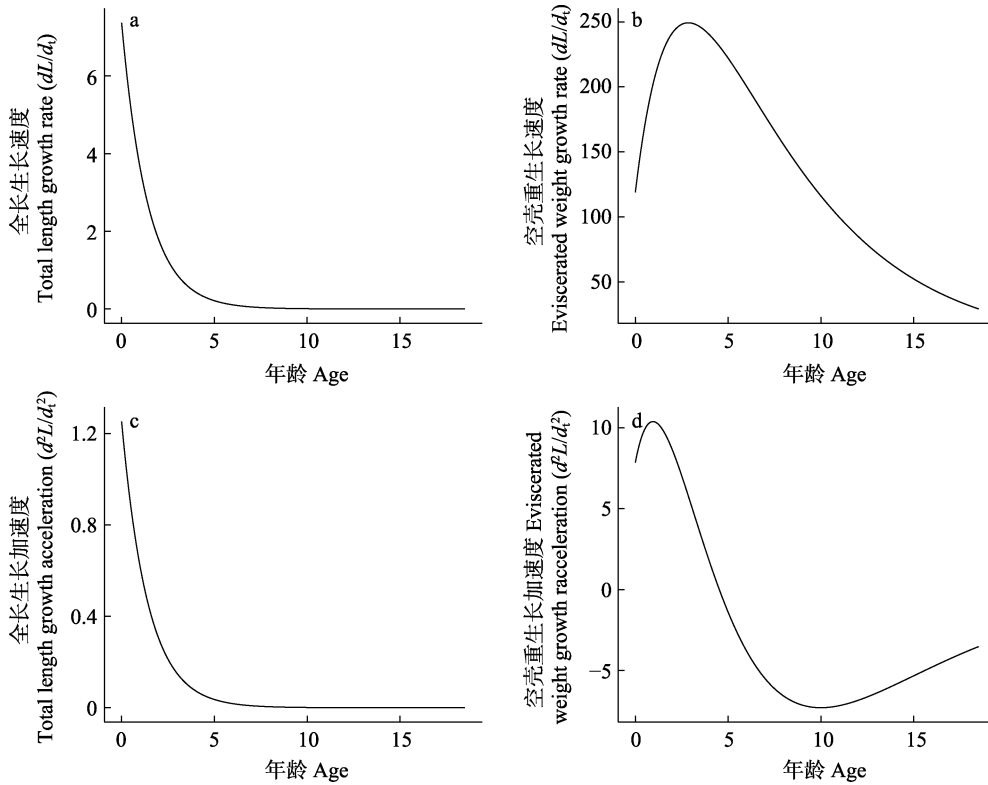


图 5 黄线狭鳕的全长生长速度 (a) 和空壳重生长速度 (b) 以及全长生长加速度 (c) 和空壳重生长加速度 (d)

Fig. 5 The total length growth rate (a), eviscerated weight growth rate (b), total length growth acceleration (c) and eviscerated weight growth acceleration (d) of the Walleye Pollock in the Bering Sea

和加速度均下降，其生长速度曲线逐渐变缓，并最终趋向于零，此时空壳重生长加速度逐步到达负值，为空壳重生长递减阶段。约 8 龄时，

空壳重生长加速度降至最低点 (图 5d)，表明随着空壳重生长速度进一步下降，其递减速度亦逐渐缓慢，个体开始进入衰老期。

## 2.6 死亡参数

鱼类死亡是影响种群结构三大因素之一, 通过了解鱼类死亡和生长情况可以知道该种群在特定地区的生存状态。本研究采用 FIST II 软件中的长度变换渔获物曲线法 (length-converted catch curve) 和 Pauly 经验公式拟合出黄线狭鳕的总死亡系数  $Z$  为 0.67, 自然死亡系数  $M$  为 0.27, 捕捞死亡系数  $F$  为 0.40, 开发率  $E$  为 0.597, 总生长表现指数  $\Phi'$  为 2.79。自然死亡系数与生长系数之比 ( $M/K$ ) 为 1.59,  $e^{-K}$  为 0.017。白令海黄线狭鳕各主要生物学参数汇总见表 1。

表 1 白令海黄线狭鳕各生物学参数

Table 1 The biological parameters of Walleye Pollock in the Bering sea

生物学参数 Biological parameters	代表符号 Symbol	值 Value
渐进全长 Asymptotic length (cm)	$L_{\infty}$	74.86
渐进空壳重 Asymptotic weight (g)	$W_{\infty}$	1 863.50
生长系数 Growth coefficient	$K$	0.17
理论生长起点 Theoretical beginning of growth	$t_0$	-0.77
总生长表现指数 Total growth performance index	$\Phi'$	2.79
总死亡系数 Total mortality	$Z$	0.67
自然死亡系数 Natural mortality	$M$	0.27
捕捞死亡系数 Total instantaneous mortality	$F$	0.40
开发率 Exploitation rate	$E$	0.597
理论寿命 Theoretical longevity	$t_m$	18.5
合理性检验 Reasonableness test	$M/K = 1.59$	$e^{-K} = 0.017$

## 3 讨论

### 3.1 黄线狭鳕的全长空壳重关系

黄线狭鳕的全长空壳重关系显示, 虽然雌性与雄性二者的全长-空壳重关系差异并不显著 ( $P > 0.05$ ), 但在全长大约为 45 cm (即 4.7 龄) 以后, 雄性的增重更为明显 (图 3)。其原因可能是与雌性发育中性腺的发育、脂肪和繁殖等因素有关。此时雌性应该在完成产卵之后, 个体从外界摄取的能量一部分用于产卵繁殖所

需的性腺发育的消耗, 个体增重较少, 而雄性则将这一部分能量用于个体的增长, 因此会出现雄性个体的增重更为明显, 但二者差异并不显著的现象, 这与研究显示白令海的黄线狭鳕在 4 龄左右性成熟相符合 (Stahl 2004)。全长-空壳重关系与所选体长范围等因素有关 (Froese 2006, Ricker 2015), 黄线狭鳕样本全长空壳重关系为  $W = 0.045608L^{2.46}$ , 接近于负向异速生长, 且与 Fadeev (2005) 在白令海的研究结果相似 ( $b = 2.482$ ), 但与一些对黄线狭鳕和其他鱼类物种 ( $b \approx 3$ ) 相比,  $b$  值较小, 其原因可能存在两个主要因素。第一, 是采用的空壳重和全长作为计算对象, 与一般研究所采用的标准体长和体重不同。第二, 样本缺乏小个体, 大个体空壳重与全长分布散点图 (图 3) 更为分散, 说明大个体的全长空壳重变化更大, 从而降低了  $b$  值。

### 3.2 黄线狭鳕的生长和死亡参数

本研究采集的样本个体最大年龄为 18.5 龄, 以 3 ~ 5 龄个体占据优势, 生长系数  $K$ 、总死亡系数  $Z$ 、自然死亡系数  $M$  和捕捞死亡系数  $F$  分别为 0.17、0.67、0.27 和 0.40。根据  $M/K$ 、 $e^{-K}$  验证  $M$  值、 $K$  值的合理性,  $M/K = 1.59$ , 介于 1.5 ~ 2.5,  $e^{-K} = 0.017 < 1$ , 均符合条件。且各生物学参数与 Search fishbase (<https://www.fishbase.se/search.php>)、Fadeev (2005) 等国外学者的研究结果基本一致。但渐进全长和生长系数与鄂霍次克海的黄线狭鳕更为类似 (Fadeev 2005)。其原因可能是白令海与鄂霍茨克海相邻, 而黄线狭鳕本身为季节性迁移物种, 相近海域的种群在不同季节相互迁移。

从死亡参数看, 总死亡系数为 0.67, 捕捞死亡系数为 0.40, 根据二者估算黄线狭鳕开发率  $E$  为 0.597。一般开发率  $E$  为 0.50 最为适合, 表明白令海峡黄线狭鳕种群面临的捕捞压力中等稍高。这与已有相关研究报道的经济鱼类普遍处于过度利用状态具有相近趋势, 但与中国近海大多数经济鱼类相比, 如日本带鱼 (*Trichiurus japonicus*)  $E$  为 0.864 (凌建忠等

2008), 银鲑 (*Pampus argenteus*)  $E$  为 0.71 (李建生等 2014) 等, 黄线狭鳕过度捕捞程度较轻。这对于一种极为重要的商业鱼类和生态系统中的关键种是极为难得的, 而且也主要得益于国际组织对白令海渔业资源的保护以及各国对渔业资源的重视。

### 3.3 不同时期和地区黄线狭鳕种群结构及资源利用

黄线狭鳕是世界上捕捞量最多的鱼类之一。在国际海域, 白令海峡沿岸国家如俄罗斯和日本最早开始进行黄线狭鳕商业捕捞, 1991 年以后, 中国、韩国、波兰等国也开始在国际水域进行捕捞 (Lai et al. 1987)。根据国际粮农组织 FAO 的统计显示, 黄线狭鳕的捕捞区域为 FAO 渔业区的第 61 区和 67 区。自开始统计以来 (1950 至 2017 年) 已有 68 年的捕捞记录, 共计捕获黄线狭鳕 213 306 776 t, 平均每年捕获 1 887 670.58 t。尤其是在 1985 年捕捞量达到 3 582 779 t, 也是黄线狭鳕种群捕捞压力最为严重的时期。白令海和鄂霍次克海都是黄线狭鳕在国际海域的重要捕捞地, 都属于 FAO 渔

业区第 61 区。以黄线狭鳕历史捕捞数据、文献及本研究结果比较黄线狭鳕渐进全长 (表 2), 黄线狭鳕种群历史动态波动较大, 且渐进全长  $L_{\infty}$  和种群动态密切相关 (图 6)。据资料显示, 20 世纪 70 年代末黄线狭鳕种群生物量被大量发现, 进而导致 80 年代黄线狭鳕的捕捞业迅速发展。1980 年对黄线狭鳕生物量的估计为 1 430 万 t, 占鄂霍次克海鱼类生物总量的 80% (Shuntov et al. 1990)。随着 80 年代中层水域拖网迅速发展, 导致黄线狭鳕捕捞量陡增, 此时种群资源丰富, 捕捞的大个体较多, 对应的渐进全长  $L_{\infty}$  较大。1993 年黄线狭鳕种群的数量减少最为严重 (Akira et al. 2001), 捕捞的大个体最少,  $L_{\infty}$  值也最小。为促进渔业健康发展, 同年, 联合国粮农组织第 23 届大会通过了《促进公海渔船遵守国际养护与管理措施的协定》等规定, 黄线狭鳕的种群得以逐步恢复,  $L_{\infty}$  逐渐增加。虽然 1991 年之后, 各个国家逐渐加入对黄线狭鳕资源的捕捞, 除了 1993 和 1994 年因黄线狭鳕种群数量严重减少影响捕捞量外, 基本没有出现捕捞量上涨的情况, 随着《联合

表 2 不同历史时期和不同地点黄线狭鳕研究方法以及生长参数的比较

Table 2 Comparison of research methods and growth parameters of Walleye Pollock in different historical periods and locations

来源 Source	捕获地点 Location	研究方法 Method	采样时期 Periods	生长参数 Growth parameters			
				$L_{\infty}$ (cm)	K	$t_0$	$t_m$
Akira et al. 2001	白令海 Bering Sea	煨烧法 Break ± burn	1973-1976	63.39	0.062	- 17.78	30.61
			1977-1980	64.50	0.07	- 10.75	32.11
Lai et al. 1987	白令海 Bering Sea	煨烧法 Break ± burn	1981	73.79	0.201	- 0.154	14.77
Akira et al. 2001	白令海 Bering Sea	煨烧法 Break ± burn	1981-1984	59.82	0.167	- 2.98	14.98
			1985-1989	56.65	0.291	- 0.64	9.66
Janusz et al. 1997	鄂霍次克海 Okhotsk Sea	体长频率法 Length-frequency	1991-1994	50.85	0.204	- 1.745	12.96
Janusz et al. 2005	鄂霍次克海 Okhotsk Sea	煨烧法 Break ± burn	1997	50.9	0.149	- 3.362	16.77
			1999	61.8	0.159	- 2.235	16.63
			2000	61.73	0.205	- 0.505	14.12
			2000	63.79	0.13	- 1.450	21.63
本研究 This study	白令海 Bering Sea	体长频率法 Length-frequency	2018	74.86	0.17	- 0.77	18.5

$L_{\infty}$ . 渐近全长; K. 生长系数;  $t_0$ . 理论生长起点年龄;  $t_m$ . 理论寿命。

$L_{\infty}$  is Asymptotic length, K is Growth coefficient,  $t_0$  is Theoretical beginning of growth,  $t_m$  is Theoretical longevity.



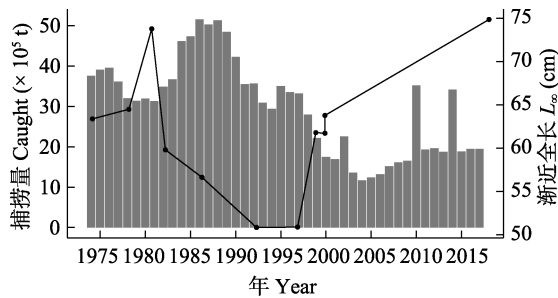


图 6 黄线狭鳕捕捞量（柱状图）和渐进全长  $L_{\infty}$ （折线图）时间序列分布图

Fig. 6 Time-Series changing of the catch/per year (bar chart) and asymptotic length  $L_{\infty}$  (line chart) of the Walleye Pollock

国海洋法公约》（1994 年 11 月 16 日生效）的完善和实施，各国对渔业的捕捞量都有了相关的配额。随后几年中，黄线狭鳕的捕捞量都显著性下降，有效阻止了资源的进一步恶化。由此可见，各国政策的制定对渔业资源的管理和控制以及对渔业资源的健康发展有着决定性的引导作用。

对比近 40 年来黄线狭鳕的捕捞数据与渐进全长  $L_{\infty}$  的变化，说明渐进全长  $L_{\infty}$  和种群资源动态关系密切，渐进全长在一定程度上和种群资源动态相呼应。总的来说，黄线狭鳕种群资源的利用相较于 20 世纪末更趋于合理化、规范化和制度化。在渔业生产中，虽然开发率高于 0.5，但远低于我国目前沿海的带鱼和银鲳等重要经济鱼类，捕捞压力较近海轻。此外，根据全球生物多样性机构（Global Biodiversity Information Facility, GBIF）记载（<https://www.gbif.org>），黄线狭鳕的分布范围近年来有逐步向高纬度北极圈内迁移扩散的倾向，通过进一步周密的生活史参数的监测，也可以进一步了解到气候变暖对鱼类种群动态的影响。建议今后持续密切监测黄线狭鳕种群动态，为远洋渔业资源可持续健康发展保驾护航。

**致谢** 感谢中国远洋渔业协会王文燕女士为本项目顺利执行提供的联络和大力帮助；感谢

中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学院重点实验室李明教授、周旭明教授和祁纪伟博士的指导与帮助。

## 参 考 文 献

- Akira N, Yanagimoto T, Mito K, et al. 2001. Interannual variability in growth of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the central Bering Sea. *Fisheries Oceanography*, 10(4): 367–375.
- Ashworth E, Hall N, Hesp S, et al. 2016. Age and growth rate variation influence the functional relationship between somatic and otolith size. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 74(5): 680–692.
- Buslov A, Ovsyannikov E. 2019. The validity of otolith-based age estimates for the walleye pollock *Theragra chalcogramma* (Pallas, 1814) from the Eastern Sea of Okhotsk. *Russian Journal of Marine Biology*, 45(5): 370–376.
- Carr S M, Dawn H. 2008. Phylogeographic analysis of complete mtDNA genomes from walleye pollock (*Gadus chalcogrammus* Pallas, 1811) shows an ancient origin of genetic biodiversity: Full-Length Research Article. *DNA Sequence*, 19(6): 490–496.
- Coulson M W, Marshall H D, Pepin P, et al. 2006. Mitochondrial genomics of gadine fishes: implications for taxonomy and biogeographic origins from whole-genome data sets. *Genome*, 49(9): 1115–1130.
- Daniel M, Tomio T, Nadia S. 1990. Gadiform fishes of the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 10(125): 36–38.
- Dobson F S. 2007. A lifestyle view of life-history evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(45): 17565–17566.
- Dwyer D A, Bailey K M, Livingston P A. 1987. Feeding habits and daily ration of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the eastern Bering Sea, with special reference to cannibalism. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(11): 1972–1984.
- Fadeev N. 2005. Guide to Biology and Fisheries of Fishes of the North Pacific Ocean. Russia: TINRO-Center, Vladivostok, 1–366.
- Froese R. 2006. Cube law, Condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations.

- Journal of Applied Ichthyology, 22(4): 241–253.
- Ianelli J. N., Honkalehto T., Barbeaux S. J., et al. 2016. In Stock Assessment and Fishery Evaluation Report for the Groundfish Resources of the Bering Sea/Aleutian Islands Regions, North Pacific Fishery Management Council, Anchorage, AK (2016).
- Janusz J., Horbowy J. 1997. The state of the walleye pollock in the northern part of the Okhotsk Sea, North Pacific. *Fisheries Research* 30(1/2): 87–102.
- Janusz J., Trella K. 2005. Some biological information on walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) from the Sea of Okhotsk (1997-2000) based on Polish commercial catches. *The Bulletin of the Sea Fisheries Institute*, 3(166): 51.
- Jennings S., Reynolds J. D., Mills S. C. 1998. Life history correlates of responses to fisheries exploitation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 26(5): 333–339.
- Kano Y., Takatsu T., Hashimoto Y., et al. 2015. Annual variation in otolith increment widths of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) larvae in Funka Bay, Hokkaido, Japan. *Fisheries Oceanography*, 24(4): 325–334.
- Kooka K. 2012. Life-history traits of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the northeastern Japan Sea during early to mid 1990s. *Fisheries Research*, 113(1): 35–44.
- Kotwicki S., Buckley T. W., Honkalehto T., et al. 2005. Variation in the distribution of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) with temperature and implications for seasonal migration. *Fishery Bulletin*, 103(4): 574–587.
- Laake J. L., Melin S. R., Orr A. J., et al. 2016. California sea lion sex-and age-specific morphometry, NOAA Technical Memorandum NMFS-AFSC-312. Seattle, WA: United States Department of Commerce. doi: 10.7289/V5/TM-AFSC-312.
- Lai H. L., Gunderson D. R. 1987. Effects of ageing errors on estimates of growth, mortality and yield per recruit for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *Fisheries Research*, 5(2/3): 287–302.
- MacNeil M., Chong-Seng K., Pratchett D., et al. 2017. Age and growth of an outbreaking *Acanthaster cf. solaris* population within the Great Barrier Reef. *Diversity*, 9(1): 18.
- Massuti E., Morales-Nin B., Moranta J. 2000. Age and growth of blue-mouth, *Helicolenus dactylopterus* (Osteichthyes: Scorpaenidae), in the western Mediterranean. *Fisheries Research*, 46(1/3): 165–176.
- Passerotti M. S., Jones C. M., Swanson C. E., et al. 2020. Fourier-transform near infrared spectroscopy (FT-NIRS) rapidly and non-destructively predicts daily age and growth in otoliths of juvenile red snapper *Lutjanus campechanus* (Poey, 1860). *Fisheries Research*, 223(1): 105439.
- Pauly D., Morgan G. 1987. Length-based methods in fisheries research (Vol. 13). Rice-fish research and development in Asia (ICLARM Conf. Proc.): WorldFish.
- Porter S. M., Dougherty A. B. 2019. Using cell cycle measurements with flow cytometry to predict the growth rate of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* larvae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 518(2019): 151178.
- Pratchett M. S. 2005. Dynamics of an outbreak population of *Acanthaster planci* at Lizard Island, northern Great Barrier Reef (1995-1999). *Coral Reefs*, 24(3): 453–462.
- Renner-Martin K., Brunner N., Kühleitner M., et al. 2018. On the exponent in the Von Bertalanffy growth model. *PeerJ*, 6(2018): e4205.
- Ricker W. E. 2015. *Methods for Assessment of Fish Production in Fresh Waters*. London: Blackwell Scientific Publications.
- Ricklefs R. E., Wikelski M. 2002. The physiology/life-history nexus. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(10): 462–468.
- Shuntov V., Volkov A., Abakumov A., et al. 1990. Composition and present status of the fish community in epipelagic waters of the Sea of Okhotsk. *Journal of Ichthyology*, 30(4): 587–597.
- Smith G. B. 1979. *The Biology of Walleye Pollock*. Seattle: University of Washington Press.
- Stahl J. P. 2004. Maturation of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the Eastern Bering Sea in relation to temporal and spatial factors. Alaska Fairbanks: Masters thesis. School of Fisheries and Ocean Sciences, Univ., Juneau.
- Trippel E. A. 1995. Age at maturity as a stress indicator in fisheries. *Bioscience*, 45(11): 759–771.
- Wespestad V. 2000. On relationships between cannibalism, climate variability, physical transport, and recruitment success of Bering Sea walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *Ices Journal of Marine Science*, 57(2): 272–278.
- Yamamura O., Honda S., Shida O., et al. 2002. Diets of walleye pollock

- Theragra chalcogramma* in the Doto area, northern Japan: ontogenetic and seasonal variations. *Marine Ecology Progress Series*, 238: 187–198.
- Yasumiishi E M, Criddle K R, Hillgruber N, et al. 2015. Chum salmon (*Oncorhynchus keta*) growth and temperature indices as indicators of the year-class strength of age-1 walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in the eastern Bering Sea. *Fisheries Oceanography*, 24(3): 242–256.
- Yokota T, Nakagawa T, Murakami N, et al. 2016. Effects of starvation at the first feeding stage on the survival and growth of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* larvae. *Fisheries Science* 82(1): 73–83.
- 郭弘艺, 魏凯, 唐文乔, 等. 2010. 基于矢耳石形态特征的中国鲈属鱼类种类识别. *动物分类学报*, 35(1): 127–134.
- 李建生, 胡芬, 严利平. 2014. 东海区银鲈资源合理利用的研究. *自然资源学报*, 29(8): 1420–1429.
- 凌建忠, 李圣法, 严利平, 等. 2008. 基于 Beverton-Holt 模型的东海带鱼资源利用与管理. *应用生态学报*, 19(1): 180–184.
- 刘金殿, 朱立新, 卢伙胜, 等. 2010. 北部湾多鳞鱈生长与死亡参数的估算. *浙江海洋学院学报*, 29(1): 64–69.
- 刘凯, 景丽, 陈永进, 等. 2016. 太湖麦穗鱼生长、死亡和利用状况评估. *大连海洋大学学报*, 31(4): 368–373.