

利用 Bootstrap 统计方法探讨体长-体重关系中的幂指数对小黄鱼产卵期的指示作用

刘 勇^{1,2} 程家骅² 陆健健¹

(¹华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

(²农业部海洋与河口渔业重点开放实验室 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘 要 利用 2004 年在 29°N 以北、127°E 以西海域所采集的小黄鱼近全年的生物学数据, 在日、周、半月、月 4 个不同时间尺度下, 对小黄鱼体长与体重关系中幂指数的周年变化特征进行了分析。利用 Bootstrap 统计方法, 把小黄鱼产卵期内的幂指数与年内其他时期的进行比较。研究结果显示, 全年当中, 小黄鱼在产卵期内的幂指数显著偏小 ($P < 0.05$)。研究发现, 根据平均 b 值来判断产卵期与非产卵期, 采用周、或者比周更长的时间尺度所得到的数据是比较可信的; 根据单个采样 b 值判断, 采用半月、或比半月更长的尺度所得到的结果才可信。对全年各时期的幂指数进行分析发现, 在 4~5 月份之间, 幂指数出现一个低谷; 在 11~12 月之间, 出现一个高峰。且随着时间尺度的提高, 这一变化特征更加显著。

关键词 体长 体重 幂指数 小黄鱼 产卵期 Bootstrap 统计方法

中图分类号 S931.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2011)02-0001-06

Testing of power b in exponent relationship between body-length and weight of small yellow croaker as spawning indicator by Bootstrap method

LIU Yong^{1,2} CHENG Jia-hua² LU Jian-jian¹

(¹State Key Laboratory of Coastal and Estuarine Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

(²Key and Open Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090)

ABSTRACT Based on the biological measurement data of small yellow croakers collected in the sea area in the north of 29°N and the east of 127°E in 2004, the trend of annual change of power b was analyzed by Bootstrap method at four different temporal scales including day, week, half-month, and month. The bootstrap analysis showed that the values of power b during the spawning period were significantly smaller than those of the other periods in the same year ($P < 0.05$). When the average b value from the samples was used for the determination of the periods of spawning and non-spawning, only the results based on the time scales of week or longer were reliable. However, when the b value of a single sample was used for the determination, the results based on the time scales of only half month or longer were reliable. The trend of annual change of power b , with low values during April~May and a peak during November~De-

科技部公益性项目(2009-2010)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院东海水产研究所)资助项目(2009M01)共同资助

收稿日期:2010-07-08;接受日期:2010-07-28

作者简介:刘 勇(1977-),男,副研究员,在读博士,主要从事海洋渔业资源与生态学研究。E-mail: liuyong7707@yahoo.com.cn, Tel:

(021)65803266

ember, became more obvious with the increase of temporal scales.

KEY WORDS Body-length Weight Power exponent Small yellow croaker
Spawning period Bootstrap

长度、重量是鱼类生物学的基础数据(詹秉义 1995)。目前应用较多的是将鱼类的体长与体重关系描述为 $W=aL^b$ (詹秉义 1995; 黄真理等 1999), 其中 a 和 b 值由统计分析给出。关于幂指数特定的生物学意义, 华元渝等(1981)认为幂指数表示鱼的重量增加系数与体长增长系数之比; 李星颢等(1983)则认为幂指数表示同一瞬时相对体重增长率与相对体长增长率之比; Ricker(1975)、詹秉义(1995)认为幂指数可以用来判断鱼类是否处于等速生长, 它表示了鱼类生长发育的不均匀性, 这种不均匀性是由于体重(或体积)和体长不均匀增长带来的。对于不同种类来说, 幂指数存在差异, 同一种的不同种群之间、同一种群或群体在不同年份也存在差别, 这可能主要由于它们的营养条件和所处的生活阶段不同所致(Ricker 1975; 詹秉义 1995)。幂指数的这种变化研究尚未见报道。本文以小黄鱼 *Pseudosciaena polyactis* Bleeker 为例, 通过近全年的数据探讨幂指数对鱼类不同生活阶段(如产卵洄游、索饵洄游等)的指示作用。

1 材料和方法

1.1 材料来源

2004年小黄鱼生物学的全年测定资料来自东海区渔业资源常规监测和每年4次的大面积定点调查。调查船为双拖渔轮, 功率为183.25 kW/艘, 网具为100目 \times 4 m, 网囊网目为2.5 cm, 平均拖速为2 n mile/h。常规监测调查的地点是小黄鱼聚集的主要渔场, 大面积定点调查的范围广, 因此采取数据能反映研究对象的生长情况。

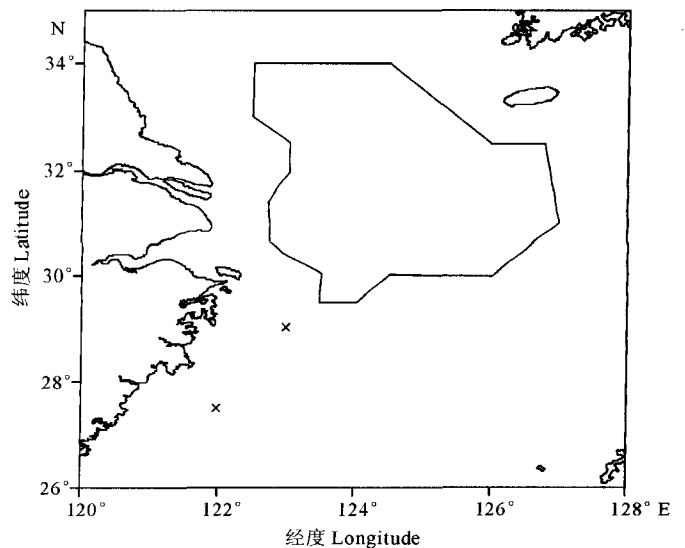
据20世纪60年代的调查结果(朱树屏 1960; 叶昌臣 1991), 黄海南部小黄鱼的主要产卵时间集中在4月份; 80年代的调查结果(毛锡林等 1987), 东海中部以北的小黄鱼的产卵时间主要集中在4、5月份; 90年代的调查结果表明(俞连福等 2003), 东海北部小黄鱼的产卵期为3~5月上旬。初步判断东海中部以北、黄海南部以南的小黄鱼, 其产卵时间主要集中在4~5月, 以此为前提, 来验证体长-体重关系幂指数 b 值是否能够指示小黄鱼的产卵时间。调查站点主要分布在29°N以北、127°E以西, 此外, 在27°~29°N间的近岸水域也有几个站点因常规监测调查是随机取样, 站点呈无规则分布, 所以本文以主要区域来示意采样来源(图1)。

共捕获44批次样品, 测定小黄鱼3962尾。全年除1~2月(春节前后)和7~8月(伏季休渔)没有采样外, 其他各月份都有采样, 详细采样情况见表1。

1.2 模型及数据处理

体长-体重关系为幂函数, $W=aL^b$ 。

式中, W 和 L 分别为体重(g)和体长(mm); a 、 b 为生长参数。



注: 实线区域代表主要采样区域, 叉点表示两次个别采样点
Note: Polygon refers to the main sampling area, and the cross signs refer to two particular sampling locations

图1 采样水域
Fig. 1 Sampling area

表 1 采样情况
Table 1 Measurement of samples

采样日期(年-月-日) Date	尾数 Ind.	体长范围 Body length (mm)	体重范围 Body weight (g)	采样日期(年-月-日) Date	尾数 Ind.	体长范围 Body length (mm)	体重范围 Body weight (g)
2004-03-04	60	103~198	18~126	2004-06-25	21	97~144	17~56
2004-04-02	60	95~180	14~113	2004-09-05	30	95~129	14~40
2004-04-08	17	103~175	18~95	2004-09-12	30	85~178	11~107
2004-04-09	246	87~171	10~83	2004-09-15	53	80~173	11~95
2004-04-10	161	99~188	14~124	2004-09-16	240	86~190	11~147
2004-04-11	269	98~206	15~116	2004-09-17	242	85~200	12~166
2004-04-12	79	99~196	15~104	2004-09-18	120	72~230	7~221
2004-04-17	30	101~171	14~69	2004-09-19	180	98~184	16~117
2004-04-20	150	83~160	11~77	2004-09-20	103	90~180	13~114
2004-04-21	120	91~170	12~89	2004-09-21	60	104~180	19~104
2004-04-22	120	75~182	9~107	2004-09-22	30	108~135	20~46
2004-04-23	60	104~181	20~111	2004-10-08	30	105~189	21~117
2004-05-14	20	119~150	30~62	2004-10-16	30	90~175	14~107
2004-05-30	30	113~166	25~78	2004-10-24	30	120~172	24~92
2004-06-16	60	90~214	15~173	2004-10-31	30	113~185	23~113
2004-06-17	112	80~184	10~116	2004-11-10	30	120~194	27~124
2004-06-18	90	88~149	13~63	2004-11-23	21	125~172	33~84
2004-06-19	30	100~145	19~63	2004-12-08	54	120~180	27~110
2004-06-21	47	103~175	18~102	2004-12-25	30	102~164	16~80
2004-06-22	208	97~187	17~113	2004-12-26	180	107~186	14~120
2004-06-23	146	47~159	1.8~73	2004-12-27	177	90~200	12~147
2004-06-24	85	91~182	15~117	2004-12-28	41	102~157	9~69

在对数据进行分析时,剔除偏离整体趋势的个别值。根据前述函数关系,对各个批次的体长、体重数据进行线性回归拟合,计算幂指数 b 值。获得的 44 个 b 值,由于采样时间不定期,间隔有长有短, b 值变化规律不是很明显,因此在对原始样点分析的基础上,再进行周、半月和月 3 种不同时间尺度的分析。在对不同时间尺度 b 值的计算过程中,先把同一时段内的体长、体重数据整合在一起,然后再进行计算。

1.3 Bootstrap 统计方法

Bootstrap 方法最初是由 Efron 等于 1979 年提出:在一个有限样本的原始总体中做有放回的抽样,每次取样都会获得一个样本。在这个过程中,每次所取的样本都被看作总体空间的一个独立样本。在多次重复取样后,就会得到样本的统计分布,从而可以对样本的一些统计学特征作适当的评估(孔丹莉等 2006)。

Bootstrap 方法在实践中被用来估计样本统计量的置信区间。本文采用的是百分比计算法,即设定统计量处于置信区间的概率为 95%,则统计量大于置信上限的概率和小于置信下限的概率都为 2.5%,根据此百分比,可以计算出重复取样获得的统计分布的置信区间(Efron *et al.* 1983)。

用 Bootstrap 方法来检验小黄鱼产卵期(4~5 月)内的 b 值与其他时期的差异,判断它们之间的差异是否有显著性。如果产卵期内的 b 值与其他时期有显著差异,那么就能使用幂指数 b 值来指示小黄鱼是否处于产卵期。具体的方法是:先统计落在 4~5 月间的采样点的数目 n (总样点数为 N),并计算其幂指数的平均值 \bar{b} ,然后把 n 个幂指数 b 值的平均值作为研究的目标统计量 S ,用 Bootstrap 方法,在 N 个 b 值中进行有放回的抽样,每次抽样的数量为 n 个,每次抽样就可计算出一个统计量 S ,反复抽样共计 10 000 次,得到 10 000 个统计量 S ,最终获得一个统计量 S 的分布。在知道统计量 S 的分布情况下,就可以对小黄鱼产卵期 4~5 月内获得的 n 个幂指数的平均值 \bar{b} 是否与其他时间内的 b 值有显著的差别作一个统计判断。检验的零假设是产卵期内的统计量与整个调查时间内的统计量没有差别。若 \bar{b} 值小于或大于 95%的 S 值(即 9 500 个 S 值),则说明零假设不成立。

1.4 使用软件

数据处理采用 Excel 软件和 R 统计软件(R Development Core Team 2009); Bootstrap 方法是采用 Resampling Stats Excel Add-In 2.0。

2 结果

2.1 原始分布样点分析

44 批次样品可得到 44 个 b 值, b 值在一个时间序列上的变化特征如图 2-a 所示。由图 2-a 可看到, 4~5 月间的 b 值普遍较低, 其中有 77% 的值低于 3; 而在 10~12 月间的 b 值普遍较高, 其中有 73% 的值高于 3; 其他 b 值点基本上在 3 上下波动。

落在 4~5 月间的 13 个 b 值, 其平均值为 2.837 1, 此值在 10 000 个统计量中百分比排位为 0.002 4(图 3-a), 远远小于 0.05, 可见零假设不成立, 因此产卵期内的幂指数 b 值的平均值与其他时期的有显著差别, 明显小于其他时期。

2.2 周分布样点分析

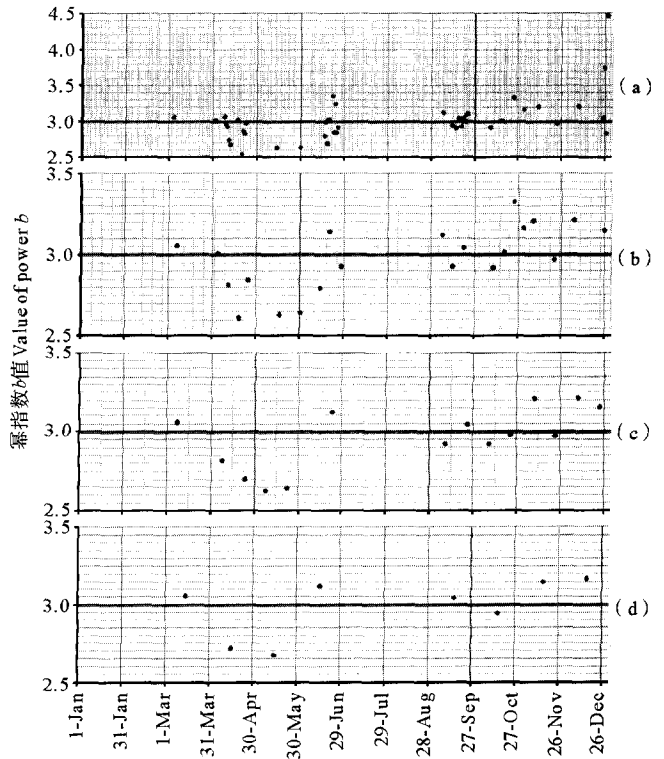
把采集的样品数据按照每周 7 d 的时间长度进行重新组合, 然后对这些新的组合再进行回归模拟, 求出各个新组合的 b 值。重新组合后, 原先 44 个 b 值变成了 21 个周的数据, 即 21 个 b 值。由图 2-b 可以看到, 4~5 月间有一个显著的低凹点分布, 其他时期的点都围绕在 3 上下波动, 9~12 月间落在 3 以上的点较多。落在 4~5 月间的点有 6 个, 其平均值为 2.756 0, 此值在 10 000 个统计量中百分比排位为 0.003 4(图 3-b), 同样远远小于 0.05, 可见零假设不成立, 同样说明产卵期内 b 值的平均值显著小于其他时期。

2.3 半月分布样点分析

把采集的样品数据按照半个月的时间长度进行重新组合, 原先 44 个 b 值变成 14 个半月的数据。由图 2-c 可以看到, 4~5 月间仍然有一个显著的低凹点分布, 其他时期的点都围绕在 3 上下波动, 11~12 月间在 3 以上的点较多。在 4~5 月间的有 4 个, 其平均值为 2.695 4, 此值在 10 000 个统计量中百分比排位为 0.005 0(图 3-c), 远远小于 0.05, 可见零假设仍不成立, 同样说明产卵期内 b 值的平均值显著小于其他时期。

2.4 月分布样点分析

把采集的样品数据按照 1 个月的时间长度进行重新组合, 原先 44 个 b 值变成 8 个月的数据。由图 3-d 可以看到, 4~5 月间仍然有一个显著的低凹点分布, 其他时期的点都围绕在 3 上下波动, 11~12 月间的点都相对较高。在 4~5 月间的点有两个, 其平均值为 2.695 1, 此值在 10 000 个统计量中百分比排位为 0.014 9(图 3-d), 低于 0.05, 可见零假设仍不成立, 同样说明产卵期内 b 值的平均值显著小于其他时期。



注: 4 幅图的时间尺度分别为 (a) 日, (b) 周, (c) 半月, (d) 月

Note: Time scales for the four plots, a. day; b. week; c. half-month; d. month

图 2 不同时间尺度下的幂指数 b 值时序分布

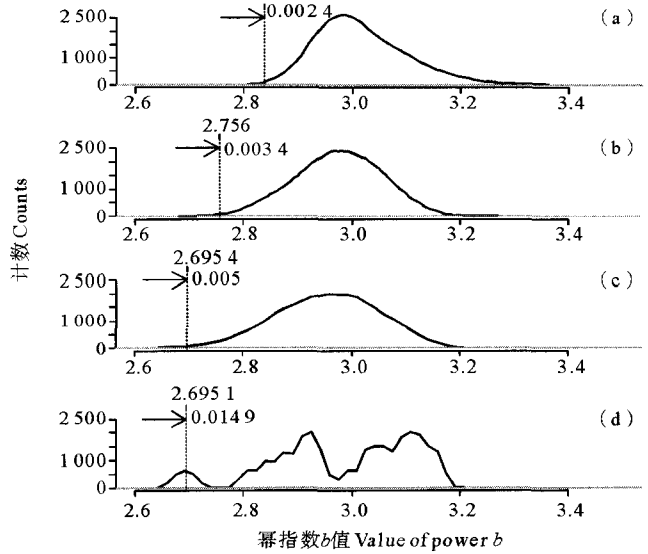
Fig. 2 Period distribution of power b under different time scales

3 讨论

本文在日、周、半月、月 4 个不同时间尺度下,对小黄鱼的体长与体重关系中 b 值的周年变化特征进行了分析。利用 Bootstrap 统计方法把小黄鱼产卵期内的 b 值与整个年内其他时期的 b 值进行比较。结果显示,全年中小黄鱼产卵期内的 b 值显著偏小。利用 b 值的这一特点,在收集到 b 值的一个长时间变化序列的条件下,可通过寻找 b 值相对较低的时间段来推断小黄鱼的产卵期,在实践中可以把 b 值的时序变化作为判断小黄鱼产卵期的一个指示参考。小黄鱼产卵场的地理位置不同,其产卵期会随纬度的增高而推迟(毛锡林等 1987)。本文在特定水域进行采样,是在已经知道了小黄鱼的产卵期的前提下对 b 值的变化进行检验;若在其他水域,在不知道小黄鱼的产卵期的情况下,则可根据 b 值来对小黄鱼的产卵期加以推测。

根据不同时间尺度下获得的 b 值,在已知产卵期的前提假设下(即 4~5 月为小黄鱼的产卵时期),描述了各个尺度下,产卵期和非产卵期 b 值的特征(表 2)。通过分析比较可以看到,除了日尺度,其他尺度下产卵期与非产卵期的平均 b 值的置信区间都是明显隔离的,二者之间没有交叉区域;尽管日尺度下置信区间有部分交叉,但交叉区域相对较小,仅占产卵期和非产卵期置信区间的 23%和 15%;随着时间尺度的增长,非产卵期平均值置信区间下限与产卵期上限的差值随之增大。可见,若根据样品的平均 b 值来判断产卵期和非产卵期,随着时间尺度的增加,其准确度会增加;本文研究的结果显示,不能根据日尺度的平均值来判断产卵期与非产卵期,而根据周、半月、月或更长尺度的平均值判断的结果则是可信的。另外 b 值的范围变化也有类似特征,在时间尺度较小时,产卵期和非产卵期的范围有交叉,如日、周尺度;而尺度较大时,二者则显著有分离;同样的,随着尺度的增加,非产卵期 b 值范围下限与产卵期上限的差值随之增大。可见,若根据单个采样 b 值来判断产卵期和非产卵期,以短期的日、周尺度获得的数据是难以判断的,而以半月、月或更长尺度的数据则可以较准确地加以判断。

本研究中所有时间尺度下 b 值的全年变化都呈现出一个共有的特征,那就是在 4~5 月之间的幂指数 b 值相对都较小,出现一个低谷,而在 11~12 月之间的幂指数 b 值相对较高,出现一个相对的高峰。这一趋势在原始采样点的尺度下,幂指数 b 值表现出较大的变异性,波动变化较大;随着时间尺度的提高,幂指数 b 值的变异性变小,波动性降低,趋势也更加明显。这与景观生态学



注:4 幅图的时间尺度分别为(a)日,(b)周,(c)半月,(d)月

Note: Time scales for the four plots: a. day; b. week; c. half-month; d. month

图 3 不同时间尺度下 Bootstrap 抽样分布及真实采样值位置

Fig. 3 Distribution of average value of power b sampled by Bootstrap method and the location of the real average value of power b in the distribution with different time scales

表 2 不同时间尺度下 b 值的特征

Table 2 The characters of b value at different time scales

尺度 Time scale	生理期 Period	范围 Range	平均值 Mean	置信区间 Confidence interval
日 Day	产卵期 Spawning	2.453 1~3.070 9	2.829 9	2.727 7~3.018 1
	非产卵期 Non-spawning	2.514 7~4.470 0	3.070 8	2.950 3~3.413 1
周 Week	产卵期 Spawning	2.615 9~3.006 1	2.756 0	2.630 7~2.912 5
	非产卵期 Non-spawning	2.795 0~3.325 0	3.064 5	2.993 0~3.205 7
半月 Half month	产卵期 Spawning	2.624 9~2.819 8	2.695 4	2.608 7~2.783 9
	非产卵期 Non-spawning	2.918 1~3.209 0	3.057 3	2.988 4~3.168 4
月 Month	产卵期 Spawning	2.676 6~2.713 6	2.695 1	2.658 9~2.721 3
	非产卵期 Non-spawning	2.947 3~3.164 2	3.085 6	3.020 3~3.167 2

的等级缀块动态理论中关于复合稳定性概念中的观点较为一致(邬建国 2000),即景观稳定性可以看作是干扰在时间和空间相对尺度上的函数。从时间尺度来看,当干扰间隔与景观恢复时间之比很小时,景观一般表现出非稳定状态;当干扰间隔与景观恢复时间之比增大时,景观稳定性趋于上升。本文不同时间尺度上的分析,相当于分析不同长度干扰间隔对幂指数 b 值的影响,这些干扰可以理解为环境变化(比如温度)和生理变化(比如性腺的发育)对小黄鱼正常生长的影响;小黄鱼本身有一种恢复正常生长的能力,这种单位恢复时间可以假设为一个常量,那么随着分析时间尺度的增加,即干扰间隔的增大,干扰间隔与恢复时间之比也随之增大,因此幂指数 b 值的稳定性也就随之上升。

Ricker(1975)、詹秉义(1995)研究认为,幂指数 $b=3$ 时,表示该鱼类为等速生长,即说明其 3 个线度(长、宽、高)方向生长的速度相等,其体形随个体生长按等比例放大,具有体形不变和比重不变的特征;而当 $b \neq 3$ 时,表示异速生长,即 3 个线度方向生长的速度不等,其体形和比重重要发生变化。本文的研究结果表明,小黄鱼在 4~5 月之间的幂指数 b 值相对较小,出现一个低谷;在 11~12 月之间的幂指数 b 值相对较高,出现一个相对的高峰;在其余时间内,幂指数 b 值都较接近于 3,围绕 3 在小范围内波动。这表明小黄鱼的大部分生长过程都是保持等速生长,而 1 年中有两段时间内其生长严重偏离了等速生长,即春季(4~5 月)和冬季(11~12 月);并且这两个季节生长偏离的方向不同,春季幂指数 b 值向低于 3 的方向偏离,冬季向高于 3 的方向偏离。春季(4~5 月)和冬季(11~12 月)正好对应着小黄鱼产卵洄游和越冬洄游两个生理周期。处于产卵期的小黄鱼,由于腹腔内怀有大量的卵,体态一般呈比较丰满的形态,可能由于这种体形特征导致了幂指数 b 值趋于偏低;而处于越冬期的小黄鱼,一般摄食强度都偏低(薛莹等 2004;林龙山 2007),为了维持正常代谢和活动消耗,通常入不敷出,必须依靠体内的营养来供应机体能量的消耗(陈大刚 1997),从而其体形一般都比较瘦,这可能是导致幂指数 b 值偏高的原因。

本研究没有把产卵群体与非产卵群体区分开来进行分析,因此研究对象包含了非产卵群体。这部分个体(包括雄体及未成熟雌体)不会因为产卵原因而导致体形变化,应该处于正常生长,接近匀速生长。这些个体对于拉低幂指数 b 值的贡献不会很大,那么导致总体幂指数 b 值变小的主要原因可能就是产卵群体的体形变化。假如单独分析产卵群体的幂指数 b 值变化,其幂指数 b 值在产卵期偏离匀速生长的幅度可能会变得更大。单纯产卵群体的幂指数 b 值的变化可能更显著,单独观察产卵群体的变化情况可以更好地理解本研究的总体变化趋势,这一工作还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 孔丹莉,丁元林. 2006. 非参数 Bootstrap 方法及其应用. 数理医药学杂志, 19(3): 232~233
- 毛锡林,俞超楚,秦忆芹. 1987. 小黄鱼. 见: 东海区渔业资源调查和区划. 上海: 华东师范大学出版社, 339~356
- 叶昌臣. 1991. 小黄鱼. 海洋渔业生物学. 北京: 农业出版社, 164~200
- 华元渝,胡传林. 1981. 鱼种重量与长度相关公式($W=bLa$)的生物学意义及其应用. 见: 鱼类学论文集. 北京: 科学出版社, 125~131
- 邬建国. 2000. 景观生态学. 北京: 高等教育出版社, 81~94
- 朱树屏. 1960. 黄渤海区小黄鱼的洄游及有关环境因素. 见: 太平洋西部渔业研究委员会第三次全体会议论文集. 北京: 科学出版社, 16~24
- 陈大刚. 1997. 渔业资源生物学. 北京: 中国农业出版社, 101~118
- 李星颜,陈赛斌. 1983. 鱼类生长的数学描述. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2(1): 29~39
- 林龙山. 2007. 长江口近海小黄鱼食性及营养级分析. 海洋渔业, 29(1): 44~48
- 俞连福,程家骅. 2003. 小黄鱼. 东海大陆架生物资源与环境. 上海: 上海科学技术出版社, 472~487
- 黄真理,常剑波. 1999. 鱼类体长与体重关系中的分形特征. 水生生物学报, 23(4): 330~336
- 詹秉义. 1995. 渔业资源评估. 北京: 中国农业出版社, 18~25
- 薛莹,金显仕,张波,梁振林. 2004. 黄海中部小黄鱼的食物组成和摄食习性的季节变化. 中国水产科学, 11(3): 237~243
- Efron, B., and Gong, G. 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife, and cross-validation. American Statistician, 36~48
- R Development Core Team. 2009. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- Ricker, W. E. 1975. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, 191: 382