

DOI: 10.12264/JFSC2024-0166

## 采样设计对鱼类群落生物量粒径谱参数估计的影响

曲耀琦<sup>1</sup>, 王鹏<sup>4</sup>, 马依宏<sup>1</sup>, 李迎冬<sup>1</sup>, 杨仕诚<sup>1</sup>, 任一平<sup>1,2,3</sup>, 徐宾铎<sup>1,2,3</sup>

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;
2. 青岛海洋科技中心, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003;
4. 青岛市海洋管理保障中心, 山东 青岛 266000

**摘要:** 为了查明采样设计对鱼类群落标准化生物量粒径谱参数估计的影响, 本研究根据 2016—2017 年山东半岛南部海域渔业资源底拖网季度调查数据, 采用计算机模拟重抽样方法, 选取简单随机采样(SRS)、基于水深的分层随机采样(StRS\_depth)和基于粒径的分层随机采样(StRS\_size)作为备选抽样方法, 以 5 为样本量间隔设置了 5~60 个调查站位, 采用相对估计误差(REE)和相对偏差(RB)评价了不同采样方法和样本量对鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计的影响。结果表明, 在 3 种采样方法下, 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率的相对估计误差均随着样本量增加而逐渐减小。随着样本量增加, RB 值绝对值的变化范围逐渐减少, 并逐渐趋近于 0。3 种采样方法下, 随着样本量增加, 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率模拟值的分布愈加集中, 估计精确度提高。与其他两种采样方法相比, 基于粒径的分层随机采样方法表现更好, 其参数斜率估计值的 REE 值与 RB 值绝对值较低。不同季节数据对鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计的影响不同。综合 3 种采样方法下 4 个季节不同样本量的采样效果看, 基于粒径的分层随机采样设计为鱼类群落生物量粒径谱参数估计的最优采样方法, 且调查站位数可适当优化。

**关键词:** 采样设计; 鱼类群落; 粒径结构; 计算机模拟

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)10-1240-09

粒径谱(size spectrum)是表示生物量或者生物数量与粒径大小关系的曲线, 其参数可以反映群落生物量、丰度和粒径结构特征<sup>[1-3]</sup>。粒径谱方法目前被广泛用于鱼类群落结构研究, 且其参数斜率和截距作为生态指标常被用来研究环境变化和人为干扰对生态系统的影响, 如 Graham 等<sup>[4]</sup>研究发现, 随着捕捞强度的上升, 鱼类群落标准化粒径谱斜率呈下降趋势。

渔业资源调查是开展渔业资源评估和管理的重要数据来源<sup>[5-6]</sup>。目前, 在开展鱼类群落粒径谱分析时, 所用数据一般来自于渔业资源调查。考虑到不同粒径级鱼类空间分布存在差异性以及不同抽样方法的特点, 不同调查采样设计会影响调查数据

的获取, 从而影响鱼类群落粒径谱构建和参数估计。样本量小、采样范围小等会导致无法获得较为完整的生物群落信息, 难以反映生物群落的真实情况, 从而影响群落粒径谱构建, 采样代表性会影响粒径谱模式, 粒径谱参数估计易出现异常值<sup>[7-8]</sup>。因此, 来自不同采样设计的调查数据的数量和质量存在差异, 会影响粒径谱的构建和参数估计。国内外学者针对采样设计对不同指标估计的影响已开展较多研究, 如种群资源丰度<sup>[9]</sup>、鱼类资源量指数<sup>[10]</sup>和群落多样性指标<sup>[11]</sup>等, 但采样设计对于鱼类群落生物量粒径谱参数估计的影响研究仍较少。

本研究根据 2016—2017 年在山东半岛南部海域渔业资源调查数据, 应用计算机模拟方法,

收稿日期: 2024-05-23; 修订日期: 2024-06-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2401301).

作者简介: 曲耀琦(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: quyq0827@163.com

通信作者: 徐宾铎, 副教授, 研究方向为渔业资源生态学. E-mail: bdxu@ouc.edu.cn

探究了简单随机采样和分层随机采样等抽样方法和样本量对鱼类群落生物量粒径谱参数估计的影响, 以期为合理构建鱼类群落生物量粒径谱和优化调查采样设计提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究中鱼类生物学数据来源于 2016 年 10 月、2017 年 1 月、5 月和 8 月在山东半岛南部海域进行的渔业资源底拖网调查。调查海域范围为

119.5°E~124°E, 35°N~37°N, 共设置 63 个站位(图 1)。本次调查所用渔船功率为 220 kW, 调查所用网具网口高约 7.53 m, 网口宽约 15 m, 囊网网目为 17 mm。拖网作业均安排在白天进行。设定每站拖网时间 1 h, 拖速 2~3 kn。渔业资源调查和样品采集按《海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T12763.6-2007)<sup>[12]</sup>和《海洋渔业资源调查规范》(SC/T9403-2012)<sup>[13]</sup>要求进行。依据拖网时间 1 h、拖速 2 kn 对原始调查数据进行标准化处理, 得到每个站位的相对渔获量。

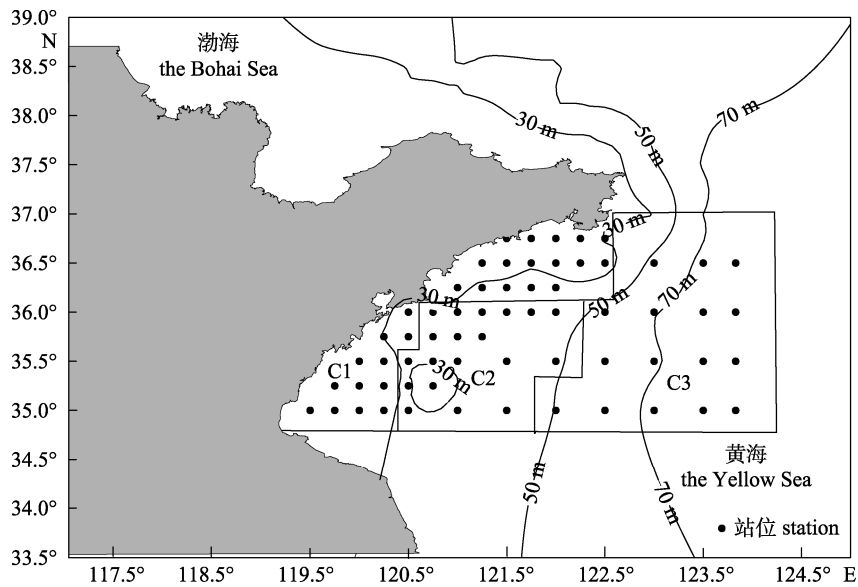


图 1 山东半岛南部海域渔业资源底拖网调查站位

字母 C 表示区域, 数字代表水深: 1. 水深小于 30 m, 2. 水深 30~50 m, 3. 水深大于 50 m.

Fig. 1 Sampling stations for fishery resources in the southern waters off the Shandong Peninsula  
The letter C represent areas, and the number represents depth: 1 represents depth less than 30 m, 2 represents depth between 30~50 m, and 3 represents depth greater than 50 m.

### 1.2 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率

鱼类群落标准化生物量粒径谱以  $\log_2$  转换的各体重组上限值作为横坐标, 以  $\log_2$  转换的单位面积上( $m^2$ )对应的生物量与粒径间隔宽度的比值为纵坐标<sup>[14]</sup>; 考虑到渔具选择性, 选取个体体重 $>4$  g 的数据, 即拟合曲线中呈线性下降的部分进行分析, 求得线性回归方程的斜率<sup>[15]</sup>。

鱼类标准化生物量粒径谱可以反映鱼类群落的粒级丰度。处于稳定状态的鱼类群落, 其标准化生物量粒径谱应呈线性并且理论斜率为-1, 因此可根据斜率与-1 的关系来判断鱼类群落结构

状态<sup>[16-17]</sup>。

### 1.3 采样设计

本研究选取了简单随机采样(simple random sampling, SRS)和分层随机采样(stratified random sampling, StRS)<sup>[5]</sup>, 同时样本量设置为 5~60 个调查站位, 间隔为 5。其中, 考虑到本研究中样本总体容量较小且有限, 简单随机采样采用有放回式抽样确定调查站位, 分层随机采样包括基于水深的分层随机采样(StRS\_depth)和基于粒径的分层随机采样(StRS\_size)。两种分层随机采样方法中各层站位选择均采用放回式抽样确定调查站位。

基于水深的分层随机采样,即根据水深将调查区域分为 C1 (小于 30 m), C2 (30~50 m)和 C3 (大于 50 m) 3 个区域(图 1)。基于粒径的分层随机采样,即将各站位所有鱼类的平均体重大小作为分层依据,将所有站位分为 D1 (小于 50 g), D2 (50~80 g)和 D3 (大于 80 g)区域共 3 层,将平均体重相似的站位划分到同一层,可有效降低不同层内各站位平均体重的变异性,同时层间的变异性大,从而确保分层随机采样方法能够得以实施。本研究中分层随机采样中样本量分配方法为按比例分配,即层内的调查站位数与层内潜在调查站位数成正比。

#### 1.4 模拟研究

根据不同采样设计下得到的模拟采样数据,计算鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率,得到斜率估计值的分布情况;把根据各季节原始调查数据计算得到的斜率作为“真值”,以此判断该海域不同季节鱼类群落结构状态;不同采样设计重复模拟 1000 次,判断每次模拟采样所得的斜率估计值能否反映鱼类群落结构状态,用能准确反映鱼类群落结构状态的斜率估计值在全部 1000 个斜率模拟值中所占的百分比来表征正确率。正确率的计算公式:

$$\text{正确率} = \frac{n_i}{N_i} \times 100\%$$

式中,  $n_i$  是第  $i$  种采样设计模拟采样所得的斜率模拟估计值中能反映鱼类群落结构状态的个数;  $N_i$  第  $i$  种采样设计模拟采样斜率模拟估计值个数,  $N=1000$ 。

本研究以估计鱼类群落标准化生物量粒径谱参数斜率为目标,探究不同采样方法和样本量对斜率估计的影响。本研究假设目前 63 个原始调查站位数据能代表该海域鱼类群落标准化生物量粒径谱特征,根据 63 个原始调查站位数据计算的各季节鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率可作为“真值”。

计算机模拟流程: (1) 根据 63 个原始调查站位数据拟合鱼类群落标准化生物量粒径谱,得到其斜率作为“真值”; (2) 对于各采样设计,从原始调查数据中随机重抽样,利用所抽取的数据构建

模拟调查样本,样本量范围为 5~60 个调查站位,间隔为 5,在这些样本量下,进行了 1000 次随机重复抽样; (3) 根据重抽样数据计算不同采样设计下的斜率估计值,采用相对估计误差 REE (relative estimation error, REE)<sup>[18-19]</sup> 和相对偏差 RB (relative bias, RB)<sup>[20]</sup> 两个评价指标衡量斜率估计的精确度和准确度; (4) 重复步骤②~③ 100 次,得到 100 次 REE 和 RB 值的分布情况,从而对模拟结果进行评估分析。模拟流程如图 2 所示:

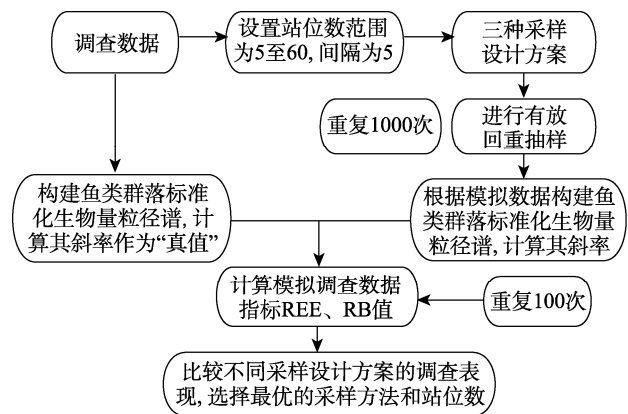


图 2 基于计算机模拟的调查采样设计及优化的模拟流程

Fig. 2 Flow chart of the sampling designs and optimization based on the computer simulation

REE 和 RB 的计算公式<sup>[21]</sup>:

$$\text{REE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^R (Y_i^{\text{estimated}} - Y^{\text{true}})^2 / R}}{Y^{\text{true}}} \times 100\%$$

$$\text{RB} = \frac{\sum_{i=1}^R Y_i^{\text{estimated}} / R - Y^{\text{true}}}{Y^{\text{true}}} \times 100\%$$

式中,  $Y_i^{\text{estimated}}$  是根据第  $i$  次模拟采样数据计算的鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率;  $Y^{\text{true}}$  是基于原始调查数据计算得出的鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率“真值”;  $R$  代表模拟的次数,在本研究中是 1000 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率模拟值的分布

在相同采样方法下,随着样本量的增加,鱼

类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值波动范围逐渐减小, 趋近于真值并整体趋于稳定。在样本

量较低时, 3 种采样方法均会高估鱼类群落标准化生物量粒径谱的斜率(图 3)。

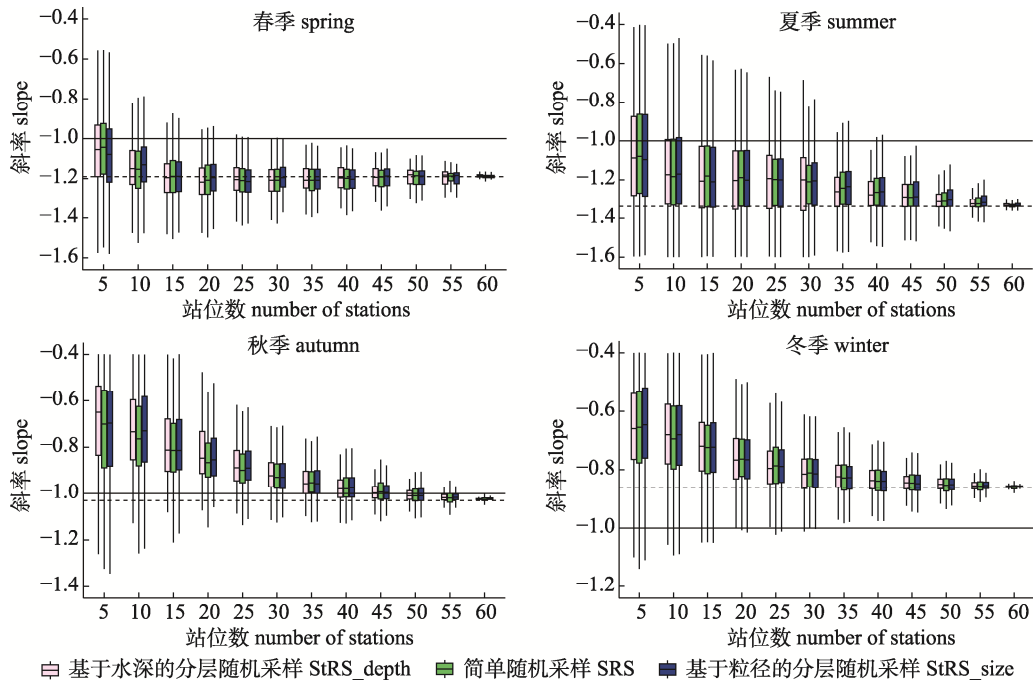


图 3 不同采样设计下鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值分布

实线代表斜率理论值-1, 虚线代表根据原始调查数据计算的斜率“真值”。

Fig. 3 Distribution of the estimated slopes of normalized biomass size spectra of fish communities for different sampling designs. Solid lines represent the theoretical value of the slope -1, and dashed lines represent the “true” slope values calculated from the original survey data.

鱼类群落标准化生物量粒径谱的斜率可以判断鱼类群落结构状态。在不同采样方法下, 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计的正确率随着样本量的增加而升高, 其中春季、夏季和冬季斜率模拟值估计的正确率在样本量为 25~35 个站位后达到最大, 而秋季斜率模拟值估计正确率随着样本量的增加不断升高。从整体上来看, 两种分层随机采样方法下斜率模拟值估计正确率要高于简单随机采样(图 4)。

## 2.2 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计的相对估计误差

在不同采样方法下, 各季节中鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值的相对估计误差 (REE) 变化趋势一致, 均随站位数增加而降低。在不同季节, 3 种采样设计方案的 REE 值变化范围不同, 在 4 个季节分别为 1.5%~22.0%、2.3%~32.8%、0.8%~56.4% 和 0.8%~46.1%。在夏季、秋

季和冬季, 样本量较低时, StRS\_depth 的 REE 高于 SRS, 但在样本量较高时, StRS\_depth 的 REE 低于 SRS。从总体上看, StRS\_size 的 REE 低于其他两种采样设计(图 5)。

## 2.3 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计的相对偏差

在不同采样方法下, 各季节中鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值的 RB 值随样本量增加而逐渐趋近于 0。在春季, 当采样站位数小于 15 时, 3 种采样方法的 RB 值均小于 0, 而当站位数超过 15 时, 3 种采样方法的 RB 值大于 0 且随着站位数增加而逐渐减小并趋近于 0; 在夏季、秋季和冬季, 3 种采样方法的 RB 值均小于 0, 表现出不同程度的负偏差。RB 值的分布范围存在季节差异; 在春季 3 种采样设计方案的 RB 值绝对值基本小于 10.0%; RB 值绝对值变化范围在夏季、秋

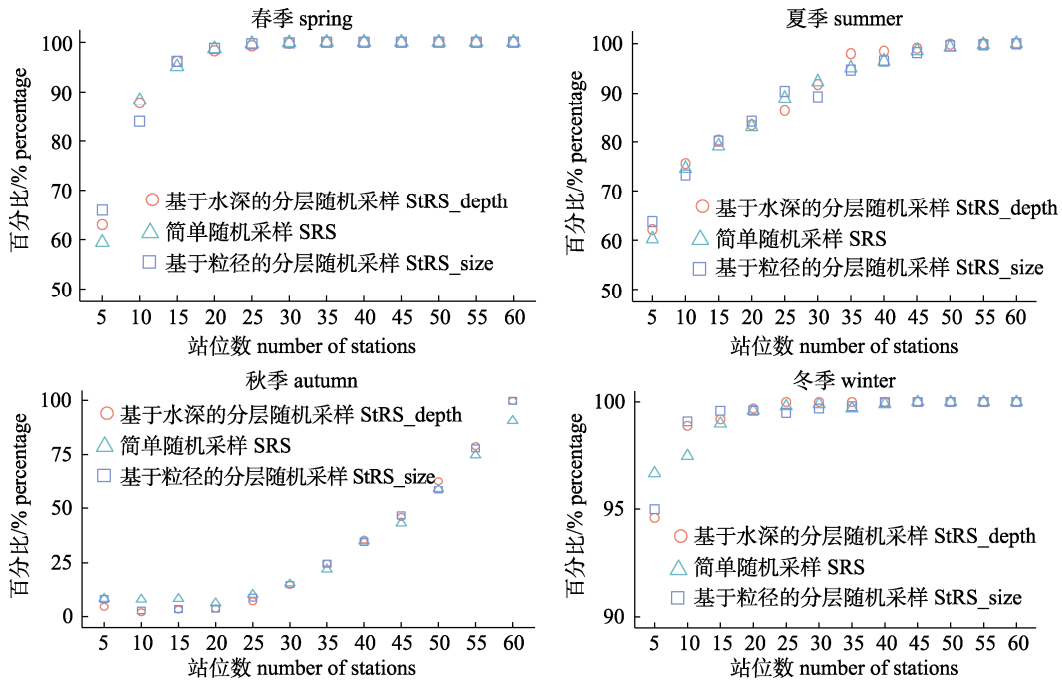


图 4 不同采样方法下鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计正确率

Fig. 4 Estimation accurate rate of the slopes of normalized biomass size spectra of fish communities for different sampling methods

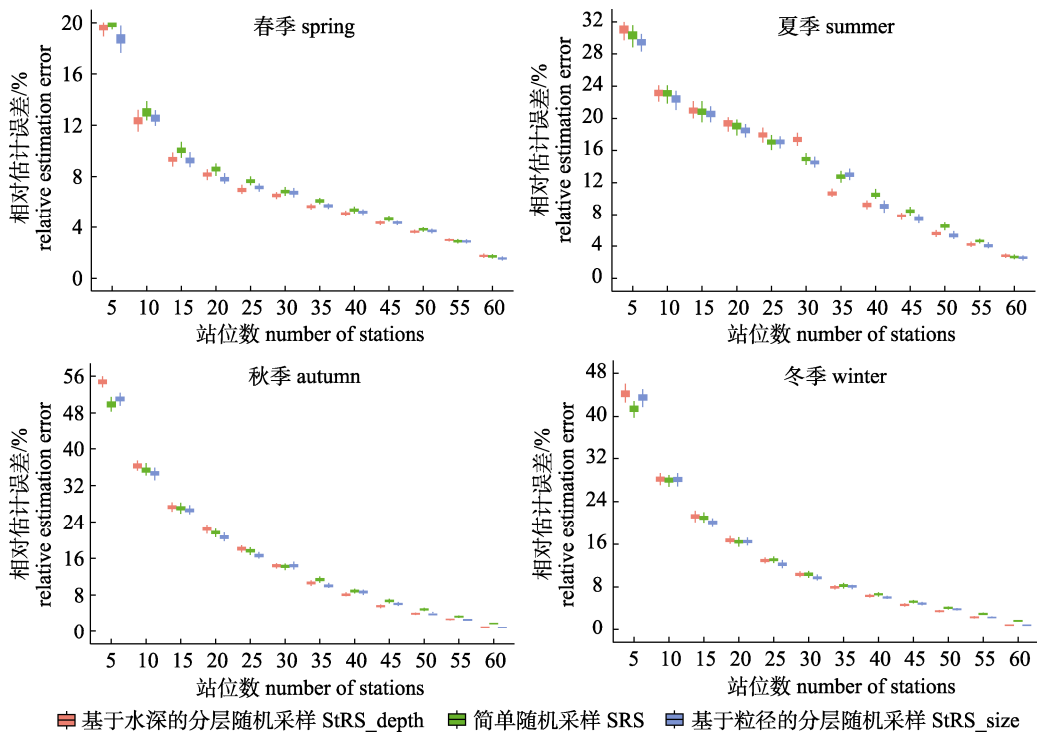


图 5 不同采样方法下鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值 REE 值与样本量的关系

Fig. 5 The relationship between the relative estimation error of estimated slopes of normalized biomass size spectra of fish communities and the sample size for different sampling methods

季和冬季则分别为 0.4%~22.0%、0.4%~49.6%和 0.04%~36.9%。在春季、夏季和秋季，当样本量较

低时，StRS\_depth 的 RB 值绝对值高于 SRS；但在样本量较高时，StRS\_depth 的 RB 值绝对值低于

SRS。而在春季、夏季和秋季, StRS\_size 的 RB 值绝对值要低于其他两种采样设计。在冬季, 两种

分层随机采样方法的 RB 值绝对值高于简单随机采样(图 6)。

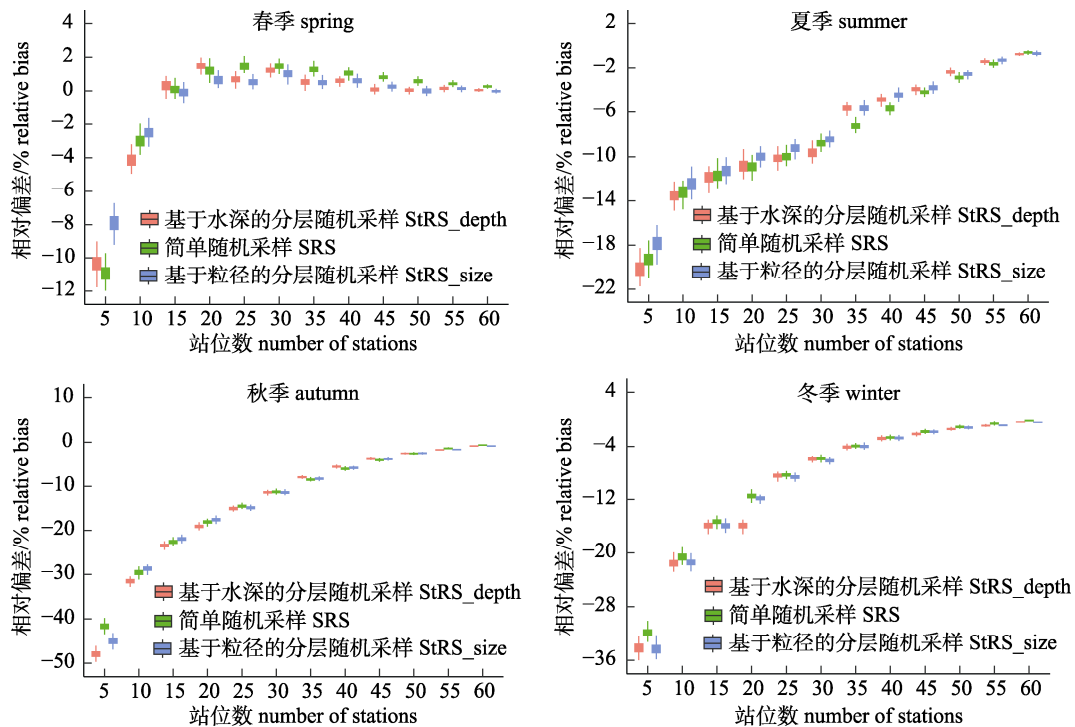


图 6 不同采样方法下鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值 RB 值与样本量的关系

Fig. 6 The relationship between the relative bias of estimated slope of normalized biomass size spectra of fish communities and the sample size for different sampling methods

### 3 讨论

在 3 种采样方法下, 随着样本量增加, 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率的相对估计误差 REE 逐步降低。随着样本量的逐步增加, RB 值的绝对值变化范围逐步缩小, 最终趋近于 0, 但是这 3 种采样方法都存在不同程度的偏差。3 种采样方法下, 随着样本量增加, 鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率模拟值的分布愈加集中, 精确度越高; 同时, 斜率模拟值估计鱼类群落结构状态的准确度也随着样本量的增加而升高, 这符合采样设计的基本理论<sup>[22]</sup>。

本研究中, 对于鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计, 基于水深的分层随机采样方法并未明显优于简单随机采样。从总体上看, 基于粒径的分层随机采样方法与其他两种采样方法相比, 其斜率估计 REE 值与 RB 值绝对值较低。基于粒径的分层随机采样方法根据粒径大小进行分层,

因此能够保证在同样的采样强度下不同粒径区间的鱼类均能够被较好地采样, 其采样结果能够更好地反映鱼类群落的真实情况, 因此该采样方法具有较低的 REE 值与 RB 值绝对值。基于水深的分层随机采样在小样本量情况下相比简单随机采样设计采样效果较差, 而随着站位数的增加, 基于水深的分层随机采样效果要优于简单随机采样。一些以资源量指数为调查目标的研究中, 基于水深的分层采样设计通常能提高采样估计精度<sup>[23-24]</sup>, 与本研究结果不同。这可能是由于基于水深的分层随机采样设计并不完全适用于估计鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率。鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率反映了不同粒径区间生物量的变化, 采样代表性、采样强度以及鱼类群落各粒径区间生物量在不同站位间的变异性均会影响斜率的估计精度<sup>[7-8]</sup>。不同粒径大小的鱼类在海域中的分布可能与水深并无直接关系, 因此基于水深进行分层也很难保证构建鱼类群落粒径谱所

需鱼类群落数据的完整性,而基于粒径的分层随机采样方法较为直接地将该海域中的鱼类群落按照粒径大小进行分层,从而保证了采样过程中鱼类群落各个粒径区间的鱼类数据的完整性,但该采样方法具有一定的局限性,其前提需要对该海域的鱼类群落粒径结构状况具有一定的了解,才能保证该采样方法能有效开展。此外,分层方式和层数会影响估计结果,本文依据各站位中所有鱼类的平均体重大小将所有站位分为三层开展研究,但估计精确度是否提高主要取决于分层方案是否降低了层内变异性,不能完全保证分层越多估计结果越精确。因此,分层数量对鱼类群落生物量粒径谱参数估计的影响还需要进一步的相关研究。

模拟采样结果存在较为明显的季节差异。在春季、夏季和冬季,3种采样方法斜率估计值受样本量的影响一致,均表现为斜率估计的精确度和准确度随样本量增加而提高;当采样站位数超过40后,随样本量继续增加,估计精确度提升趋于平缓。在春季、夏季和冬季,受洄游群体以及补充群体量等因素影响<sup>[25]</sup>,鱼类群落各粒径区间生物量在不同站位间分布不均匀。因此,随着样本量的增加,模拟采样数据能够更好地反映鱼类群落结构,从而导致鱼类群落粒径谱斜率估计的精确度和准确度不断提高。在春季和夏季,当年生幼鱼及小黄鱼等暖温性洄游鱼类在山东近岸海域低粒径级大量出现,使该海域低粒径级鱼类生物量增加<sup>[26-27]</sup>。而冬季,当年生的幼鱼数量有所减少,暖温性和暖水性的鱼类会迁移到黄海中部和南部的越冬场进行越冬活动<sup>[28]</sup>。由于高粒径级鱼类如黄鲛鳊的数量相对较多,这导致了该海域中低粒径级鱼类的生物量减少,而高粒径级鱼类的生物量则有所增加。因此,在春季、夏季和冬季,山东半岛南部海域鱼类群落受补充群体及洄游性鱼类的影响,各粒径区间生物量在站位分布上总会存在一定的空间变异性,斜率估计的精确度和准确度会随样本量增加而提高,但到达一定采样强度后,采样结果既可以较好地反映鱼类群落的真实情况,后续随着采样强度增加,估计精度提高幅度较小,这也符合采样设计的基本理论。

秋季的采样估计结果与其他3个季节存在较大的差异。在秋季,随着样本量的增加,斜率估计的精确度和准确度不断提高。在秋季,鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率为-1.03,可近似认为该海域鱼类群落结构在秋季处于理想状态,即鱼类群落各粒径区间生物量相等<sup>[17]</sup>,分析其原因可能是由于暖温性、暖水性鱼类亲体经春、夏季繁殖后幼鱼索饵生长,小粒径鱼类个体相对减少,从而导致鱼类群落生物量在各粒径区间均匀分配。然而,小样本量情况下很难保证采样所得的模拟值中鱼类群落生物量在不同的粒径区间均匀分配,因此随着采样强度的增加,采样结果逐步接近于真实情况,斜率估计的精确度和准确度随采样强度的增加而不断提高。本研究中,基于4个季节下3种采样方法模拟采样结果的REE等指标综合分析,3种采样方法在站位数为40时可获得较好的估计效果。

不同的采样方法对鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率的估计会产生影响,针对该海域而言,基于水深的分层随机采样在小样本量情况下相比简单随机采样设计采样效果较差,而随着站位数的增加,基于水深的分层随机采样效果要优于简单随机采样。3种采样方法相比较,基于粒径的分层随机采样方法在相同的采样强度下能够较好地反映鱼类群落的真实情况。此外,不同季节数据对鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计的影响不同,该研究结果可在确保鱼类群落标准化生物量粒径谱斜率估计值的精确度的前提下确定合理采样方法,减少采样努力量,为进一步的鱼类群落结构研究提供参考。

#### 参考文献:

- [1] Zhu H C, TANG J H, Wu L, et al. Fish community structure and biomass particle size spectrum in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(9): 1202-1211. [朱海晨, 汤建华, 吴磊, 等. 黄海南部海域鱼类群落结构及生物量粒径谱特征[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(9): 1202-1211.]
- [2] Lefort S, Aumont O, Bopp L, et al. Spatial and body-size dependent response of marine pelagic communities to projected global climate change[J]. *Global Change Biology*, 2015,

- 21(1): 154-164.
- [3] Guet J, Poggiale J C, Maury O. Modelling the community size-spectrum: Recent developments and new directions[J]. Ecological Modelling, 2016, 337: 4-14.
- [4] Graham N, Dulvy N, Jennings S, et al. Size-spectra as indicators of the effects of fishing on coral reef fish assemblages[J]. Coral Reefs, 2005, 24(1): 118-124.
- [5] Cochran W G. Sampling Techniques[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1977: 1-16.
- [6] Jardim E, Ribeiro P J. Geostatistical assessment of sampling designs for Portuguese bottom trawl surveys[J]. Fisheries Research, 2007, 85(3): 239-247.
- [7] Griffiths D. Sampling effort, regression method, and the shape and slope of size-abundance relations[J]. Journal of Animal Ecology, 1998, 67(5): 795-804.
- [8] Han B P, Straškraba M. Size dependence of biomass spectra and population density I. the effects of size scales and size intervals[J]. Journal of Theoretical Biology, 1998, 191(3): 259-265.
- [9] Simmonds E J, Fryer R J. Which are better, random or systematic acoustic surveys? A simulation using North Sea herring as an example[J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(1): 39-50.
- [10] Zhang G S, Wang J, Zhang C L, et al. Comparison of sampling designs of fishery-independent survey in estimating abundance indices of multiple target species[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(5): 700-715. [张国晟, 王晶, 张崇良, 等. 基于多目标鱼种资源量指数估计的不同采样设计比较[J]. 水产学报, 2021, 45(5): 700-715.]
- [11] Xu B D, Ren Y P, Chen Y, et al. Optimization of stratification scheme for a fishery-independent survey with multiple objectives[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(12): 154-169.
- [12] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007, Specifications for oceanographic survey-Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007, 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社 2007.]
- [13] Ministry of Agriculture of the PRC. SC/T 9403-2012, Technical specification for marine fishery resources survey[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. [中华人民共和国农业部. SC/T 9403-2012, 海洋渔业资源调查规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2013.]
- [14] Sprules W G, Munawar M. Plankton size spectra in relation to ecosystem productivity, size, and perturbation[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1986, 43(9): 1789-1794.
- [15] Blanchard J L, Dulvy N K, Jennings S, et al. Do climate and fishing influence size-based indicators of Celtic Sea fish community structure?[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(3): 405-411.
- [16] MacPherson E, Gordoa A. Biomass spectra in benthic fish assemblages in the Benguela System[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 138: 27-32.
- [17] Guo J Z, Chen Z Z, Xu S N. Advances in fish particle size spectra study[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(5): 582-591. [郭建忠, 陈作志, 徐姗楠. 鱼类粒径谱研究进展[J]. 海洋渔业, 2017, 39(5): 582-591.]
- [18] Chen Y. A Monte Carlo study on impacts of the size of sub-sample catch on estimation of fish stock parameters[J]. Fisheries Research, 1996, 26(3-4): 207-223.
- [19] Liu Y, Chen Y, Cheng J H. A comparative study of optimization methods and conventional methods for sampling design in fishery-independent surveys[J]. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(9): 1873-1882.
- [20] Cao J, Chen Y, Chang J H, et al. IAN evaluation of an inshore bottom trawl survey design for American lobster (*Homarus americanus*) using computer simulations[J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 2014, 46: 27-39.
- [21] Paloheimo J E, Chen Y. Estimating fish mortalities and cohort sizes[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, 53(7): 1572-1579.
- [22] Lohr S L. Sampling: Design and Analysis[M]. California: Duxbury Press, 2009.
- [23] Gavaris S, Smith S J. Effect of allocation and stratification strategies on precision of survey abundance estimates for Atlantic cod (*Gadus morhua*) on the eastern Scotian shelf[J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 1987, 7: 137-144.
- [24] Zhao J, Zhang S Y, Lin J, et al. A comparative study of different sampling designs in fish community estimation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1181-1187. [赵静, 章守宇, 林军, 等. 不同采样设计评估鱼类群落效果比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1181-1187.]
- [25] Kerr S R, Dickie L M. The Biomass Spectrum: A Predator-prey Theory of Aquatic Production[M]. New York: Columbia University Press, 2001:110-128.
- [26] Wu R, Li J C, Ye Z J, et al. Growth and distribution of young Pacific cod in Yellow Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(7): 63-73. [武瑞, 李建超, 叶振江, 等. 黄海大头鳕幼鱼的生长和分布特征[J]. 中国海洋大学学报



- 报(自然科学版), 2020, 50(7): 63-73.]
- [27] Li Y D, Zhang C L, Ji Y P, et al. Spatio-temporal distribution of *Larimichthys polyactis* in southern waters off the Shandong Peninsula and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(4): 442-450. [李迎冬, 张崇良, 纪毓鹏, 等. 山东半岛南部海域小黄鱼时空分布及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2021, 28(4): 442-450.]
- [28] Hu C J, Zhang J. Probe into the relationship between the migrating routes of endemic branch tribles of *Larimichthys polyactis* in the Southern Yellow Sea and the environment[J]. Marine Fisheries, 2005, 27(2): 109-112. [胡成建, 张晶. 南海黄族小黄鱼地方支族群洄游途径与环境关系的探讨[J]. 海洋渔业, 2005, 27(2): 109-112.]

## Effects of sampling designs on estimation of biomass size spectra parameters of fish communities

QU Yaoqi<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>4</sup>, MA Yihong<sup>1</sup>, LI Yingdong<sup>1</sup>, YANG Shicheng<sup>1</sup>, REN Yiping<sup>1,2,3</sup>, XU Binduo<sup>1,2,3</sup>

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;
3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China;
4. Qingdao Marine Management and Guarantee Center, Qingdao 266000, China

**Abstract:** The size spectra of fish communities can reflect the characteristics of their biomass, abundance, and size structure, and these parameters can be used to explore the effects of environmental changes and human disturbance on the ecosystem. Therefore, it is important to construct reasonable size spectra of fish communities to study their community structures. However, there are differences in the quantity and quality of data collected from different survey designs, which further affects the construction of the size spectra of fish communities. This simulation study examined the effects of sampling design on the estimation of parameters of normalized biomass size spectra of fish communities using a computer resampling method based on data collected from seasonal bottom trawl surveys in the southern waters off the Shandong Peninsula from 2016 to 2017. Simple random sampling (SRS), stratified random sampling with strata defined by depth (StRS\_depth), and stratified random sampling with strata defined by size (StRS\_size) were chosen as potential sampling designs for sample sizes ranging from 5 to 60. The relative estimation error (REE) and relative deviation (RB) were used to measure the performance of the different sampling designs. The results showed that under the three sampling methods, REE values of the slopes of the normalized biomass size spectra of the fish communities decreased with an increase in the sample size. As the sample size increased, the range of absolute values of RB decreased and gradually approached zero. Under the three sampling methods, the distribution of simulated values of the slopes of the normalized biomass size spectra of fish communities became more concentrated, and the estimation accuracy improved with an increase in sample size. StRS\_size performed better compared with those of the other two sampling methods, which had lower REE and absolute RB values. In addition, different seasonal data showed different effects on the slope estimation of the normalized biomass size spectra of fish communities. Considering the sampling effects of different sample sizes during the four seasons under the three sampling methods, StRS\_size was the optimal sampling method suitable for the estimation of biomass size spectra parameters of fish communities, and the number of sampling stations could be optimized.

**Key words:** sampling design; fish community; size structure; computer simulation

**Corresponding author:** XU Binduo. E-mail: bdxu@ouc.edu.cn