

# 渔业资源调查采样设计优化研究进展

唐政<sup>1,3</sup>, 单秀娟<sup>2,3</sup>, 金显仕<sup>2,3</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 渔业资源调查是指利用一定的采样设计, 对渔业种群进行空间布点采样, 以获取研究区域内鱼类时空分布以及生物学和生态学信息。但是大量的研究表明, 不同的鱼类分布适合不同的采样设计, 需要根据鱼类的分布特点和调查目标(种群丰度等) 优化采样设计, 保证数据的准确性和精度。近年来, 相关的研究有很多, 涉及不同采样设计的比较和应用以及影响数据质量因素的探究。作者着重介绍了定点采样、传统方法、适应性方法和基于地理统计学方法, 叙述了计算机模拟及重采样技术在采样设计优化中的应用以及相对偏差、相对估计误差、设计效果和变异系数等评价采样设计性能的指标, 同时对采样设计中需要注意的问题进行介绍, 最后进行了总结并对未来的研究工作进展展望。

**关键词:** 渔业资源调查; 采样设计; 优化; 计算机模拟; 重采样

中图分类号: S932 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)04-0088-10

DOI: 10.11759/hyhx20180910001

海洋生态系统为人类提供了丰富的渔业资源<sup>[1]</sup>。随着需求增加以及捕捞技术的提高, 人们对渔业资源开发力度不断加大, 全球范围内已有超过 1/3 的渔业种群被过度开发或崩溃<sup>[2-3]</sup>, 海洋生态系统也遭到严重破坏<sup>[4-5]</sup>。渔业资源调查(Fishery-independent survey, FIS)可以获得研究区域内鱼类时空分布以及生物学和生态学信息<sup>[6-7]</sup>, 为渔业资源评估提供基础, 有助于制定合理的管理措施, 维护渔业可持续发展和生态系统平衡。FIS 成本高昂且费时, 对研究海域内的种群进行抽样调查是必然选择。然而, 鱼类分布呈现出不同的特征<sup>[8-11]</sup>, 而且受到环境变化和人为活动影响, 采样设计可能并不适应实际环境中的鱼类分布, 导致样本不具代表性或者采集不到样本<sup>[12]</sup>, 无法准确估算总体<sup>[13-14]</sup>。为了提高数据精度, 发展出了定点、传统方法、适应性方法和基于地理统计学方法等采样设计。近年来, 关于采样设计优化研究有很多, 涉及不同设计的比较<sup>[15-18]</sup>和应用<sup>[19]</sup>以及影响数据精度因素的探究<sup>[20-22]</sup>。随着计算机技术的迅速发展, 计算机模拟及重采样技术在采样设计研究中得到广泛应用<sup>[10, 23-24]</sup>, 为采样设计优化提供了新的方法。作者从采样设计、计算机模拟及重采样技术在采样设计优化中的应用、采样设计性能评价指标、采样设计优化存在的问题、总结和展望 5 个方面进

行了综述, 以期对 FIS 采样设计研究提供参考。

## 1 采样设计

19 世纪 60 年代末, 人们逐渐认识到 FIS 对渔业资源评估的重要性<sup>[25-26]</sup>, 并开始研究最适合的采样设计<sup>[27-28]</sup>。为了便于统计分析, 通常假设鱼类是随机分布的, 在此基础上发展出了简单随机采样、分层随机采样、系统采样和整群采样等传统方法。其中, 由于分层随机采样可以通过划分层次和分配站点等提高样本均值或总估计值的精度<sup>[29-30]</sup>、性能稳定<sup>[20, 23]</sup>等特点, 受到人们的关注。19 世纪 80 年代~20 世纪初, 为了提高没有早期信息、呈斑块分布和数量罕见

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0104400); 国家重点基础研究发展计划(2015CB453303); 山东省泰山学者专项基金项目; 青岛海洋科学与技术国家试点实验室“鳌山人才”培养计划项目(2017ASTCP-ES07)

[Foundation: The National Key Research Program of China, No. 2017YFE0104400; The National Basic Research Program of China, No. 2015CB453303; Special Funds for Taishan Scholar Project of Shandong Province; Aoshan Talents Cultivation Program Supported by Qingdao Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2017ASTCP-ES07]

作者简介: 唐政(1994-), 男, 安徽省涡阳县人, 硕士, 主要从事渔业资源学研究, 电话: 18621092031, E-mail: Tzheng2017@163.com; 单秀娟, 通信作者, E-mail: shanxj@ysfri.ac.cn

种群调查精度,人们提出了适应性方法<sup>[12, 31-33]</sup>。同时,定点采样的合理性受到人们的关注<sup>[18]</sup>,基于地理统计学的方法也逐渐应用到 FIS 中<sup>[34-36]</sup>,为采样设计优化提供了新的思路。

### 1.1 定点采样

定点采样即固定站点进行采样调查。作为中国目前 FIS 最主要的采样方法之一,定点采样适用于生物群落和分布稳定的种群资源调查,通常按照等间距的网格或断面进行站点的布设,虽然不用考虑鱼类分布特点,但是在实施调查前需要设置合理的站点数量,以达到预期效果。与其他采样设计相比,定点采样获取的数据可以进行时间序列上的比较,更有利于研究资源年间动态变化<sup>[18, 20, 37]</sup>。但是研究表明在成本一定的条件下定点采样比分层随机采样的空间覆盖率更小<sup>[38]</sup>。在估算物种丰度时,定点采样获取的数据还会产生偏差<sup>[39-40]</sup>,虽然增加站点数量可以提高数据的质量,但也因此会导致成本增加,降低调查效益。在实际的应用中,定点采样的航线设置比较简单,不会出现横跨长距离进行调查的情况,也可以降低一些成本。

### 1.2 传统方法

#### 1.2.1 简单随机采样

简单随机采样是从总体中随机、逐一地抽取一部分样本,每个样本被抽中的概率相同。在渔业资源调查采样中,通常将研究区域分成排列在一起的单元<sup>[23]</sup>,采用不放回的方式随机选取单元作为采样站点。简单随机采样是最基础的采样方法之一,操作简单。因为每个样本采样概率相同,所以方便计算采样误差和估计总体<sup>[41]</sup>。但是,一方面,鱼类可能分布在特定的区域,不符合鱼类个体随机分布的假设<sup>[24]</sup>。而且,样本之间的空间相关性会影响估计量的方差<sup>[42]</sup>。另一方面,当遇到恶劣的天气和海底底质不适合拖曳等情况时,调查设计不能完全在海上实施,也就不能实现严格的随机化采样<sup>[34]</sup>。所以简单随机采样不能直接应用于 FIS,在实际的 FIS 采样设计中,常把这种方法与其他站点布设方法结合使用,例如分层随机采样等,也可以将简单随机采样用于量化评价其他站点布设方法的优劣<sup>[10, 43]</sup>。

#### 1.2.2 分层随机采样

鱼类分布具有空间异质性<sup>[44-45]</sup>,并受环境因子和人类活动影响<sup>[46-47]</sup>,因此不同区域内的鱼类呈现不同的分布。如果将研究区域作为一个整体进行采

样,样本估算值之间差异较大,导致结果不准确<sup>[48]</sup>。此时可以根据鱼类栖息地特征(底质、海底地形和水深等因素)或种群分布特点,将研究区域划分成不同的层次<sup>[49-50]</sup>,减小层次内部差异,再从每个层次中随机选取采样站点实施采样,即分层随机采样,其获取高质量的数据主要取决于 3 个关键的因素:

(1) 层次的划分。合理的分层可以缩小样本与总体之间的差异,使得样本在总体中分布更加均匀,并且可以对总体参数和各层次目标量进行估计,提高参数估计的精度<sup>[7, 41, 51]</sup>。但是分层需要依据对鱼类分布有关键作用的要素<sup>[29]</sup>,实现层次内部差异最小化<sup>[23]</sup>,随意的分层不但不能提升数据的精度还可能导致调查效果低于简单随机采样<sup>[30, 48]</sup>;

(2) 层次数量。虽然增加层次数量可以降低总体方差<sup>[10]</sup>,但是一般情况下,当层次数量超过 6 个时,总体方差不会明显的降低<sup>[13]</sup>。另外,层次数量较少或面积较大时可以在每层中分配更多的站点,增加层次内部的样本,保证数据的稳定。每网次的捕捞量(尾数)通常呈现偏态分布,分析数据时需要对分布进行假设。适用于零值和极大的数值同时存在的 $\Delta$ -分布在大样本量( $\geq 15$ )情况下更有效<sup>[52-53]</sup>,因此通过控制层次数量间接增加层次内部样本量,更有利于数据分析<sup>[29]</sup>;

(3) 站点的分配。目前有 2 种方法确定每个层次内站点数量:

a、最优分配法<sup>[49, 54]</sup>

$$n_h = n \frac{w_h S_h}{\sum_{h=1}^H w_h S_h} \quad (1)$$

$$W_h = \frac{N_h}{N} \text{ 或 } W_h = \frac{A_h}{A} \quad (2)$$

其中, $n_h$ 为分配到  $h$  层中站点数量; $n$ 为总站点数量; $w_h$ 为  $h$  层的权重; $S_h$ 为  $h$  层的样本方差; $N_h$ 为  $h$  层可能被采样的站点的数量; $N$ 为研究区域总的可能被采样的站点的数量; $A_h$ 为  $h$  层的面积; $A$ 为研究区域总面积。最优分配法特点在于各层次的站点数量与该层次误差呈正比,可以求出方差最小时的站点数量<sup>[13, 55]</sup>。因为该方法被 Neyman 证明之后受到人们重视,因此也称为 Neyman 分配法。

b、如果方差未知,可以按照各层次面积的比例分配采样站点<sup>[37, 51]</sup>。公式如下:

$$n_h = n * W_h \quad (3)$$

方法 b 是一种比较随意站点数量分配方法,为了提高数据精度,可以根据经验在重要的鱼类栖息

地增加站点<sup>[23]</sup>。也可以采用二阶段分层随机采样,利用第一阶段调查获取鱼类分布的信息并计算每层的方差,在第二阶段调查时将站点分配到最有可能减少方差的层次中<sup>[56]</sup>。

由于分层随机采样有多种途径增加数据质量,可以应用于多种目标、多物种的 FIS。因此自 19 世纪 60 年代末开始,分层随机采样就受到国外研究者的广泛关注,直到今天依然是研究的热点之一,同时也是国外目前最常用的 FIS 采样设计之一,被广泛应用于海洋、河流和湖泊等水域的 FIS 中<sup>[57-59]</sup>。

### 1.2.3 系统采样

系统采样也称为等距采样,是将研究区域划分成排列规则的采样单元,随机选取一个采样单元作为初始单元后,再按照固定间隔依次选取其他采样单元。系统采样适用于大面积、形状规则(可以是人为划分的)和物种密度均匀分布的区域调查<sup>[37]</sup>。目前大多数研究都发现系统采样获取的数据精度比简单随机采样更高,也更容易实施<sup>[10, 16]</sup>,尤其是针对空间分布存在自相关性的种群时<sup>[60-61]</sup>。但是,系统采样获取的数据存在偏差<sup>[62]</sup>,有高估或低估实际种群资源量的可能性,而且样本量较少会造成系统采样性出现波动<sup>[23]</sup>。当采样单元的排列与调查目标高度相关时,系统采样的效果与分层采样的效果相近,否则与简单随机采样的效果相近<sup>[41]</sup>。如果数据存在较强的周期性,分层随机采样会优于系统采样<sup>[10]</sup>。将分层随机采样与系统采样结合,即将研究区域分层,在各层次中进行系统采样,也可消除数据的周期性对采样的不利影响<sup>[13, 63]</sup>。随着地理统计学应用到 FIS 中,系统采样可以为 Kriging 法估算种群的空间分布提供很好的支持<sup>[64-65]</sup>。

### 1.2.4 整群采样

整群采样是将若干个小样本单元组成一个大样本单元,采样时直接从总体中随机抽取大样本单元作为样本<sup>[13]</sup>。这种采样方法适用于大样本单元内部差异较大,大样本单元之间差异较小的情况,而且要求每个小单元具有较好的代表性。虽然理论上整群采样比简单随机采样更易操作<sup>[41]</sup>,但是其均匀性差且误差较大<sup>[55]</sup>,故而一般极少应用于 FIS 中,通常与简单随机采样结合成适应性整群采样。

## 1.3 适应性方法

适应性采样是指在调查过程根据收集到的数据优化采样设计,减少目标变化产生的不利影响。当目

标物种呈斑块状、聚集分布时或者缺少先验信息时,需要灵活和适应性强的资源调查方法,对目标的变化做出反应,以确保获得具有针对性的信息<sup>[20, 63, 66]</sup>。适应性采样可以适应调查目标、栖息地环境以及物种-栖息地模式的变化,将更多的采样努力量分配到需要高度关注的区域<sup>[67]</sup>,例如方差较大或物种密度较高的区域<sup>[56, 68]</sup>,降低种群密度估计值的变异性 and 置信区间范围<sup>[69]</sup>。适应性方法包括两阶段分层随机采样、适应性整群采样、两阶段顺序采样和完全分配分层采样等。

### 1.3.1 两阶段分层随机采样

两阶段分层随机采样最早由 Francis<sup>[31]</sup>提出,是以分层随机采样为基础的方法,主要是为了解决缺少鱼类分布信息,无法确定分层依据的情况。这种采样方法分为两个阶段:第一阶段,使用所有已知的有关鱼类分布的信息进行分层,将采样站点分配到各个层次并实施采样;第二阶段,分析第一阶段调查采集的数据,计算各层次内部的方差,在能最大程度减少方差的层次中增加采样站点,再次实施采样<sup>[68]</sup>。针对第二阶段采样站点的分配,Francis<sup>[31]</sup>提出了两种方法:

方法 A. 令  $A_h$  为第  $h$  层的面积,  $N$  为站点总数,  $N_1$  是第一阶段站点的数量,  $G_h$  为层次  $h$  中增加一个采样站点方差的减少程度。令  $n_h$ 、 $M_h$  和  $V_h$  分别为第 1 阶段调查中  $h$  层次的站点数量、捕捞率(捕捞重量/拖曳距离)的平均值和方差。 $G_h$  计算公式如下:

$$G_h = A_h^2 V_h / (n_h(n_h + 1)) \quad (4)$$

分配第二阶段站点时,先计算每个层次的  $G_h$ ,在  $G_h$  最大的层次中分配一个采样站点。然后令  $n_{h+1}$ ,重新计算  $G_h$ ,再将一个采样站点分配到  $G_h$  最大的层次中。依次类推直至满足需求。

方法 B. 因为  $M_h^2$  比  $V_h$  更稳定,所以当层次内样本的  $M_h^2$  和  $V_h$  近似成比例时,公式(4)可以改为:

$$G'_h = A_h^2 M_h^2 / (n_h(n_h + 1)) \quad (5)$$

其他步骤与 A 方法相同。

研究发现,如果  $M_h^2$  和  $V_h$  成比例,基于方法 B 的采样比基于方法 A 的采样平均绝对偏差更低,相对效率更高<sup>[31]</sup>。

这种采样方法有几点不足:首先,为了限制第二阶段采样站点数量,降低成本,实际应用中需要确定采样站点总数,并决定两个阶段分别需要多少采样站点。但是第一阶段需要足够多的采样站点来提供比较可靠的估计值,而第二阶段也需要足够多

的采样站点完善第一阶段的不足。虽然 Francis<sup>[31]</sup>和 Manly 等<sup>[56]</sup>认为可以根据经验将 75%的采样站点分配到第一阶段, 25%的采样站点分配到第二阶段。但是这种方法不一定适用其他的渔业资源调查。其次, 最终的估计值是基于两个阶段采样数据计算而来, 会产生偏差<sup>[68]</sup>。

### 1.3.2 适应性整群采样

适应性整群采样最早由 Thompson 等<sup>[70]</sup>提出, 该方法适用于罕见和呈斑块状分布的种群资源调查, 通常包括以下 3 个步骤: (a)首先从研究区域随机选取若干个单元作为初始采样单元; (b)如果这些单元中调查目标的值大于预先设置的限定值, 则对邻域(即每个初始采样单元的前、后、左和右侧的单元)进行采样; (c)重复步骤(b), 直到所有符合条件的单元都被采样<sup>[70]</sup>。对邻域进行采样是一个适应性过程, 需要工作人员对现场的情况进行判断, 决定下一个邻域的采样。适应性整群采样的效率首先取决于种群聚集的程度, 其次取决于采样设计。一般来说, 群体越集中, 适应性整群采样效率越高<sup>[68]</sup>。这种采样设计需要确定样本单元的大小和形状, 设定初始采样单元的数量以及限定值。为了防止无休止采样, 一般会设定最大采样次数<sup>[71]</sup>, 虽然这种方法可以最大限度的减少采样努力量在资源分布稀疏区域的消耗<sup>[69]</sup>, 但是同样会使调查精度下降, 增加船舶航行路程和路线的复杂程度, 进而导致成本增加。

### 1.3.3 两阶段顺序采样

为罕见和呈斑块状分布的种群资源调查设计高效的采样方案具有挑战性。适应性整群采样虽然适用于该类资源调查。但是, 其单元大小难以确定, 小单元容易造成站点数量过多, 大单元会造成调查结果精度下降, 限制了这种采样方法的效率和适用性。因此 Salehi 等<sup>[32]</sup>提出了两阶段顺序采样, 即将分层采样与适应性整群采样结合, 第一阶段先将研究区域分层, 每个层次中包含若干单元。第二阶段, 从每一个层次中随机选取  $n_0$  个单元进行采样, 如果这  $n_0$  个单元中的任何一个估计值达到预先设置的限定值时, 就再从该层次中另外选择  $n_1$  个最有可能满足限定值的单元进行采样。需要注意的是,  $n_1$  是固定的, 因此会限制这种采样方法的灵活性。所以 Brown 等<sup>[67]</sup>改进了这种采样方法, 即令  $n_1=f \times \lambda$ ,  $f$  为  $n_0$  个单元中估计值超过限定值的单元数量,  $\lambda$  为常数(0.25、0.75、1.25 等)。一般采用计算机模拟采样的方法, 选取最优的  $\lambda$  值。

### 1.3.4 完全分配分层采样

为了限制适应性整群采样的采样站点数量, Salehi 等<sup>[33]</sup>提出了完全分配分层采样。该方法是将研究区域分层, 并在每层中随机选择单元进行采样, 如果某一个单元的值超出了限定值, 则对该层次所有的单元进行采样。完全分配分层设计简化了适应性整群采样, 不存在因单元大小设定不合理导致的采样站点数量过多的问题。与分层随机采样相似之处在于, 根据历史信息进行分层, 可以改善完全分配分层采样, 获得更高质量的数据。在没有历史信息的情况下, 可以将研究区域分成规则的矩形, 也可以达到一定的效果。

## 1.4 基于地理统计学的方法

地理统计学是在区域化变量理论的基础上, 利用变异函数或协方差函数研究空间分布上存在的随机性和结构性的自然现象的科学<sup>[65]</sup>。20 世纪 50 年代~20 世纪 60 年代, 地理统计学形成并逐渐发展成一门科学<sup>[72-73]</sup>, 最早被用于采矿学和地质学等研究领域<sup>[43, 65]</sup>, 直到 20 世纪 80 年代才被应用于渔业, 用来估算渔业种群的丰度<sup>[74]</sup>, 目前已经扩展到 FIS 采样设计优化的研究中<sup>[24, 75-77]</sup>。其主要是利用模拟退火算法使站点布设达到预先设定的条件, 实现在该条件下的最优设计<sup>[43, 78]</sup>。模拟退火算法的主要特征是考虑所有站点, 避免陷入局部最优, 并能适应各种抽样约束条件<sup>[79]</sup>。受限的空间模拟退火算法由模拟退火算法发展而来, 其采样范围的上限值可以随着优化的过程逐渐变小, 提高实现最优采样设计的可能<sup>[80]</sup>。Liu 等<sup>[24]</sup>利用受限的空间模拟退火算法实现 3 种采样设计方案: (1)最短采样站点距离均值最小化; (2)为准确评估半方差模型参数使成对的点的分布均匀化; (3)方案(1)和方案(2)的组合(2/3 的样本实施方案(1), 1/3 的样本实施方案(2))。结果表明, 与系统采样和分层随机采样相比, 方案(2)可以更准确地估算种群资源量。因此, 即使这种方法需要大量的历史信息构建种群分布模型, 但是依然可以为采样设计提供很好的思路。

## 2 计算机模拟及重采样在采样设计优化中的应用

近年来, 采样设计不断更新完善。如何检验目前的采样设计的合理性以及如何对其进行改进是 FIS 采样设计优化的关键。随着计算机技术的快速发展,

各种种群分布模型和数据处理技术的产生,利用模型模拟种群分布,再结合重采样技术进行采样设计优化的方法被广泛应用。

重采样是指利用 R 语言等对数据重抽样代替实际的采样。通过该过程获取的数据可以用于评估和比较不同的采样设计<sup>[81-84]</sup>。利用计算机进行采样设计优化可以分成 3 个步骤: (1)构建种群分布模型或搜集近期完整的调查数据,并假设模型模拟值或获得的数据为“真实值”; (2)按照采样设计的规则对数据重抽样,并估算样本均值和方差等; (3)利用评价指标比较各采样设计的性能。计算机模拟采样比实际的重新采样更具有优势,可以节省大量时间和成本,提高效率。另外,计算机模拟采样能够确保数据的稳定<sup>[85]</sup>,避免因为天气、人员和器械装置等因素,导致采样不能完成,数据缺失的情况。目前利用计算机模拟采样进行采样设计优化的研究有很多, Xu 等<sup>[1]</sup>假设原始调查数据得出的单一物种丰度、物种丰富度和群落指数为“真实值”,按照不同的样本量对数据重抽样,根据不同样本量下设计的性能,选择最佳的站点数量。Cao 等<sup>[23]</sup>利用广义加性模型预测了美国龙虾密度的空间分布,并利用计算机重抽样比较了六种采样设计的性能。刘勇<sup>[80]</sup>利用模型模拟出种群丰度在空间中的“真实值”,并将进行重抽样,评估五种采样设计性能的优劣。

### 3 评价指标

为了判断不同采样设计的性能,需要一些评价指标,常用的指标有以下 4 种:

(1) 相对偏差(relative bias, RB)

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^M \frac{y_i^{\text{estimated}}}{M} - y^{\text{true}}}{y^{\text{true}}} \quad (6)$$

其中,  $M$  是模拟采样的次数;  $y_i^{\text{estimated}}$  是第  $i$  个模拟调查中估计的均值;  $y^{\text{true}}$  是真实均值。RB 可以评估采样设计的准确性<sup>[86]</sup>以及判断是否低估或高估种群的均值<sup>[23]</sup>。

(2) 相对估计误差(relative estimation error, REE)

$$REE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M (y_i^{\text{estimated}} - y^{\text{true}})^2 / M}}{y^{\text{true}}} \quad (7)$$

REE 可以评估采样设计的精度和准确性<sup>[86]</sup>。通常将 REE 和 RB 值是否接近 0 作为判断采样设计优劣的方法之一,一般认为 REE 和 RB 值越接近 0 性能

越好。

(3) 设计效果(design effect, DE)

$$DE = \frac{\bar{V}_j}{V_{SRS}} \quad (8)$$

简单随机采样是最简单、最基本的采样方法<sup>[13]</sup>,常用于量化评价其他站点布设方法的优劣<sup>[10, 24, 51]</sup>。其中,  $V_j$  是采样设计  $j$  的样本均值的方差,  $V_{SRS}$  是简单随机采样设计的样本均值的方差。DE > 1, 说明采样设计  $j$  精度低于简单随机抽样; DE 越小, 说明采样设计性能越好, 每个站点估算值的波动越小<sup>[20]</sup>。

(4) 变异系数(coefficient of variation, CV)

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (9)$$

其中,  $\sigma$  为标准差;  $\mu$  为均值。CV 代表数据的离散程度,也被认为是相对标准误差<sup>[81]</sup>。在实际应用中,可以比较不同采样设计获取的数据在时空上的稳定性。还可以根据站点数量与 CV 之间的关系,计算出达到理想 CV 值时需要的站点数量。

## 4 采样设计优化中需要注意的问题

### 4.1 多鱼种调查采样设计

针对多鱼种的调查采样设计具有挑战性,因为鱼类分布呈现多样性,以多鱼种为目标的采样设计会舍弃一些相对不重要的鱼类的分布信息,以均衡各鱼种对站点布设的要求,这样势必会影响调查效果<sup>[1, 23, 81]</sup>。近年来,研究者开始尝试解决这个问题。Manly 等<sup>[56]</sup>改进了两阶段分层随机采样以适应 11 个海滩的 4 种甲壳类生物资源调查。该方法首先需要构建函数:

$$Z = P + Q + R \quad (10)$$

其中,  $Z$  为优化标准;  $P$  为所有物种的平均 CV 值,表示总体估计值的精度;  $Q$  为所有物种最大的 CV 值;  $R$  为所有超过  $\alpha\%$  的 CV;  $\alpha\%$  为一些异常的较大的值。利用第一阶段调查数据计算  $P$ 、 $Q$ 、 $R$  的值。令  $Z=1$ , 在此基础上,将第二阶段的采样站点分配到可以最大地减少  $P$ 、 $Q$ 、 $R$  值的层次中。可以改变  $P$ 、 $Q$ 、 $R$  的值以满足不同的调查需要,例如令  $P=1$ ,  $Q=R=0$ , 可以提高总体估计值的精度; 令  $Q=1$ ,  $P=R=0$ , 可以降低某个物种的 CV 值远高于其他物种的可能; 令  $R=1$ ,  $P=Q=0$ , 可以避免出现异常值的情况。Wang 等<sup>[48]</sup>利用计算机模拟采样,比较了 12 种针对多鱼种调查的分层随机采样的性能,以选择相对适合的采样设计。目前,除了定点采样和分层随机采样,尚未

见到其他采样设计应用到多鱼种的 FIS 中。因此,针对多鱼种的调查采样设计仍然需要进一步研究。

## 4.2 网具作业时间与数据精度的关系

应用到 FIS 中的网具主要有拖网、刺网、围网和陷阱等<sup>[87]</sup>。其中拖网作为一种主动性网具可以适应不同的底质、海况、水流状况和水域,是 FIS 最常使用的网具之一,因此了解拖网拖曳时间与数据精度之间的关系非常重要。

研究表明,种群的密度和平均体长等特性可能具有较高的短距离空间自相关性<sup>[88-89]</sup>,这就意味着,短时间的拖曳也能获得足够的信息,不会影响生物量估计的精度。Kingsley 等<sup>[60]</sup>和 Carlsson 等<sup>[37]</sup>缩短了一半数量站点的拖曳时间,发现种群密度的估计值与未缩短拖曳时间的调查结果精度差别不大。在海上作业时,存在很多不确定因素影响拖网拖曳,可能导致作业持续时间不能达到要求,缩短拖曳时间可以降低这种可能性。此外,在成本一定的情况下,缩短拖曳时间节约的成本可以用于增加更多的采样站点,进而增加调查的精度<sup>[29, 37, 60]</sup>,也有益于海洋底栖生物的调查<sup>[90]</sup>。

## 4.3 采样设计在长时间以及季节性资源调查中的效果

鱼类分布随着年份和季节变化<sup>[48]</sup>,特别是在不同的生活史阶段(索饵和产卵等)<sup>[81]</sup>。调查数据的质量在长时间序列以及季节性上的稳定性在很大程度上决定着采样设计的优劣,同时也是保证渔业资源评估结果准确的关键。但是目前的采样设计优化研究大多考虑设计的精度和成本等,很少涉及采样设计在长期资源调查中的效果。根据已有的研究,Cao 等<sup>[23]</sup>认为分层随机采样设计在年间和季节间的性能具有稳定性,而且要高于系统采样和简单随机采样。同样是分层随机采样,Ault 等<sup>[49]</sup>的研究并没有表明类似的结论。导致两个研究结论不一致的原因可能是分层或者站点数量分配的合理性,因此进行采样设计优化时,需要对采样设计在长时间以及季节性资源调查中的效果进行评估,保证采样设计可以很好的应用于 FIS。

## 5 总结和展望

科学的 FIS 采样设计有助于研究者在有限的成本下获取具有代表性的数据。由于不同的目标物种和调查目标,需要采用不同的采样设计。早期鱼类的

分布和栖息地环境等信息对调查采样设计的优化非常重要,这些信息的充分利用,不但可以提高数据的质量,还可以降低成本,减少调查采样对生态系统的破坏。尽管目前应用于 FIS 的采样设计方法有很多,但是仍然存在一定的发展空间:(1)优化多鱼种资源调查的采样设计。虽然目前已经存在多物种资源调查的采样设计方法,但是其在 FIS 中的有效性尚未得到证实,需要进一步研究;(2)基于地理统计学的采样设计表现出了很好的发展潜力,可以尝试在实际的 FIS 中应用;(3)采样设计方法有很多,但是其在长时间资源调查中的效果并没有引起人们足够的重视,因此需要加强这方面的研究。

### 参考文献:

- [1] Xu B D, Zhang C, Xue Y, et al. Optimization of sampling effort for a fishery-independent survey with multiple goals[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(5): 252.
- [2] Garcia S M, Grainger R J R. Gloom and doom? The future of marine capture fisheries[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2005, 360(1453): 21-46.
- [3] Branch T A, Jensen O P, Ricard D, et al. Contrasting global trends in marine fishery status obtained from catches and from stock assessments[J]. Conservation Biology, 2011, 25(4): 777-786.
- [4] 陈作志, 邱永松, 贾晓平, 等. 捕捞对北部湾海洋生态系统的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1604-1610.  
Chen Zuozhi, Qiu Yongsong, Jia Xiaoping, et al. Effects of fishing on the marine ecosystem of Beibu Gulf[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1604-1610.
- [5] 樊伟, 周甦芳, 崔雪森, 等. 拖网捕捞对东海渔业资源种群结构的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1697-1700.  
Fan Wei, Zhou Sufang, Cui Xuesen, et al. Impact of trawl fishing on fisheries population components in East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1697-1700.
- [6] Runcie R, Holts D, Wraith J, et al. A fishery-independent survey of juvenile shortfin mako (*Isurus oxyrinchus*) and blue (*Prionace glauca*) sharks in the Southern California Bight, 1994-2013[J]. Fisheries Research, 2016, 183: 233-243.
- [7] Smith S J. Analysis of data from bottom trawl surveys[J]. Oceanographic Literature Review, 1997, 44(7): 747-748.
- [8] 张吉昌, 李显森, 赵宪勇, 等. 中东大西洋中部海域小型中上层鱼类集群形态与时空分布特征[J]. 海洋

- 渔业, 2017, 39(6): 601-610.
- Zhang Jichang, Li Xiansen, Zhao Xianyong, et al. Morphology and spatiotemporal distribution characteristics of the pelagic fish aggregation in the eastern central Atlantic[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(6): 601-610.
- [9] Petitgas P, Leveze J J. Spatial organization of pelagic fish: echogram structure, spatio-temporal condition, and biomass in Senegalese waters[J]. ICES Journal of Marine Science, 1996, 53(2): 147-153.
- [10] 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.
- [11] Su Z, Quinn T J. Estimator bias and efficiency for adaptive cluster sampling with order statistics and a stopping rule[J]. Environmental and Ecological Statistics, 2003, 10(1): 17-41.
- [12] Thompson S K, Seber G A. Adaptive sampling[M]. New York: Wiley, 1996.
- [13] Cochran W G. Sampling techniques (3rd ed)[M]. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- [14] Aoyama H. A study of the stratified random sampling[J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 1954, 6(1): 1-36.
- [15] Ye Y, Pitcher R, Dennis D, et al. Constructing abundance indices from scientific surveys of different designs for the Torres Strait ornate rock lobster (*Panulirus ornatus*) fishery, Australia[J]. Fisheries Research, 2005, 73(1): 187-200.
- [16] Pooler P S, Smith D R. Optimal sampling design for estimating spatial distribution and abundance of a freshwater mussel population[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(3): 525-537.
- [17] Horppila J, Peltonen H. Optimizing sampling from trawl catches: contemporaneous multistage sampling for age and length structures[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1992, 49(8): 1555-1559.
- [18] Li B, Cao J, Chang J H, et al. Evaluation of effectiveness of fixed-station sampling for monitoring American lobster settlement[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2015, 35(5): 16.
- [19] Smith S J, Tremblay M J. Fishery-independent trap surveys of lobsters (*Homarus americanus*): design considerations[J]. Fisheries Research, 2003, 62(1): 65-75.
- [20] 赵静, 林军, 周曦杰. 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.  
Zhao Jing, Lin Jun, Zhou Xijie. A comparative study of different sampling designs in fish community estimation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1181-1187.
- [21] Smith S J, Gavaris S. Improving the precision of abundance estimates of eastern scotian shelf Atlantic cod from bottom trawl surveys[J]. North American Journal of Fisheries Management, 1993, 13(1): 35-47.
- [22] Smith S J, Lundy M J. Improving the precision of design-based scallop drag surveys using adaptive allocation methods[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2006, 63(7): 1639-1646.
- [23] Cao J, Chen Y, Chang J H, et al. An 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.
- [24] Liu Y, Chen Y, Cheng J. 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.
- [25] Grosslein M D. Groundfish survey program of BCF Woods Hole[J]. Commercial Fisheries Review, 1969, 31(8-9): 22.
- [26] Clark S H. Application of bottom-trawl survey data to fish stock assessment[J]. Fisheries, 1979, 4(3): 9-15.
- [27] Lai H L. Optimum allocation for estimating age composition using age-length key[J]. Fishery Bulletin, 1987, 85(2): 179-186.
- [28] Rätz H J. Efficiency of geographical and depth stratification in error reduction of groundfish survey results: case study Atlantic cod off Greenland[J]. NAFO Sci Coun Studies, 1996, 28: 65-71.
- [29] Folmer O, Pennington M. A statistical evaluation of the design and precision of the shrimp trawl survey off West Greenland[J]. Fisheries Research, 2000, 49(2): 165-178.
- [30] 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(2): 137-144.
- [31] Francis R. An adaptive strategy for stratified random trawl surveys[J]. New Zealand Journal of Marine & Freshwater Research, 1984, 18(1): 59-71.
- [32] Salehi M M, Smith D R. Two-stage sequential sampling: A neighborhood-free adaptive sampling procedure[J]. Journal of Agricultural Biological & Environmental Statistics, 2005, 10(1): 84-103.
- [33] Salehi M, Brown J A. Complete allocation sampling: an efficient and easily implemented adaptive sampling design[J]. Population Ecology, 2010, 52(3): 451-456.
- [34] Petitgas P. Geostatistics in fisheries survey design and stock assessment: models, variances and applications[J]. Fish & Fisheries, 2001, 2(3): 231-249.
- [35] Warrick A W, Myers D E. Optimization of sampling

- locations for variogram calculations[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(3): 496-500.
- [36] Petitgas P. Geostatistics for fish stock assessments: a review and an acoustic application[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1993, 50(3): 285-298.
- [37] Carlsson D, Kannevorff P, Folmer O, et al. Improving the West Greenland Trawl survey for shrimp (*Pandalus borealis*)[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 2000, 27: 151-160.
- [38] McClelland M A, Sass G G. Assessing fish collections from random and fixed site sampling methods on the Illinois River[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2012, 27(3): 325-333.
- [39] Warren W G. The potential of sampling with partial replacement for fisheries surveys[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1994, 51(3): 315-324.
- [40] Kimura D K, Somerton D A. Review of statistical aspects of survey sampling for marine fisheries[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2006, 14(3): 245-283.
- [41] 金勇进, 杜子芳, 蒋妍. 抽样技术[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.  
Jin Yongjin, Du Zifang, Jiang Yan. Sampling technique[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2015.
- [42] Harbitz A, Aschan M, Sunnanå K. Optimal effort allocation in stratified, large area trawl surveys, with application to shrimp surveys in the Barents Sea[J]. *Fisheries Research*, 1998, 37(1): 107-113.
- [43] 姜成晟, 王劲峰, 曹志冬. 地理空间抽样理论研究综述[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 368-380.  
Jiang Chengsheng, Wang Jinfeng, Cao Zhidong. A review of geo-spatial sampling theory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 368-380.
- [44] 苏奋振, 周成虎, 仇天宇, 等. 东海水域中上层鱼类资源的空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1971-1975.  
Su Fenzhen, Zhou Chenghu, Zhang Tianyu, et al. Spatial heterogeneity of pelagic fishery resources in the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1971-1975.
- [45] Gaudreau N, Boisclair D. The influence of spatial heterogeneity on the study of fish horizontal daily migration[J]. *Fisheries Research*, 1998, 35(1-2): 65-73.
- [46] Blanchard J L, Maxwell D L, Jennings S. Power of monitoring surveys to detect abundance trends in depleted populations: the effects of density-dependent habitat use, patchiness, and climate change[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2007, 65(1): 111-120.
- [47] Vanderwal J, Murphy H T, Kutt A S, et al. Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 239-243.
- [48] Wang J, Xu B, Zhang C, et al. Evaluation of alternative stratifications for a stratified random fishery-independent survey[J]. *Fisheries Research*, 2018, 207: 150-159.
- [49] Ault J S, Diaz G A, Smith S G, et al. An efficient sampling survey design to estimate pink shrimp population abundance in Biscayne Bay, Florida[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1999, 19(3): 696-712.
- [50] Chen Y, Sherman S, Wilson C, et al. A comparison of two fishery-independent survey programs used to define the population structure of American lobster (*Homarus americanus*) in the Gulf of Maine[J]. *Fishery Bulletin*, 2006, 104(2): 247-255.
- [51] Yu H, Jiao Y, Su Z, et al. Performance comparison of traditional sampling designs and adaptive sampling designs for fishery-independent surveys: A simulation study[J]. *Fisheries Research*, 2012, 113(1): 173-181.
- [52] Smith S J. Evaluating the efficiency of the  $\Delta$ -distribution mean estimator[J]. *Biometrics*, 1988, 44(2): 485-493.
- [53] Pennington M. Estimating the mean and variance from highly skewed marine data[J]. *Fishery Bulletin*, 1996, 94(3): 498-505.
- [54] Neyman J. On the two different aspects of the representative method: The method of stratified sampling and the method of purposive selection[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1934, 97(4): 558-625.
- [55] 王子龙, 陈伟杰, 付强, 等. 土壤优化采样策略研究进展[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(5): 205-212.  
Wang Zilong, Chen Weijie, Fu Qiang, et al. Research progress of soil sampling strategy optimization[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(5): 205-212.
- [56] Manly B F J, Akroyd J A M, Walshe K A R. Two-phase stratified random surveys on multiple populations at multiple locations[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2002, 36(3): 581-591.
- [57] Koslow J A, Wright M. Ichthyoplankton sampling design to monitor marine fish populations and communities[J]. *Marine Policy*, 2016, 68: 55-64.
- [58] Bartsch L A, Richardson W B, Naimo T J. Sampling benthic macroinvertebrates in a large flood-plain river: considerations of study design, sample size, and cost[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 52(3): 425-439.
- [59] Urpanen O, Marjomäki T J, Viljanen M, et al. Population size estimation of larval coregonids in large lakes: stratified sampling design with a simple prediction model for vertical distribution[J]. *Fisheries Research*, 2009, 96(1): 109-117.
- [60] Kingsley M C S, Kannevorff P, Carlsson D M. Modifications to the design of the trawl survey for *Pandalus*



- borealis in West Greenland waters: effects on bias and precision[J]. NAFO SCR Doc, 1999, 99(105): 14.
- [61] Haining R. Spatial data analysis: Theory and practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [62] Blanchard J L, Maxwell D L, Jennings S. Power of monitoring surveys to detect abundance trends in depleted populations: the effects of density-dependent habitat use, patchiness, and climate change[J]. *Ices Journal of Marine Science*, 2007, 65(1): 111-120.
- [63] Mier K L, Picquelle S J. Estimating abundance of spatially aggregated populations: comparing adaptive sampling with other survey designs[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, 65(2): 176-197.
- [64] Sherpa S R, Wolfe D W, van Es H M. Sampling and data analysis optimization for estimating soil organic carbon stocks in agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1377-1392.
- [65] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Wang Zhengquan. Geo-statistics and its application in ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [66] Thompson S K. Adaptive cluster sampling: designs with primary and secondary units[J]. *Biometrics*, 1991, 47(3): 1103-1115.
- [67] Brown J A, Mohammad S M, Moradi M, et al. An adaptive two-stage sequential design for sampling rare and clustered populations[J]. *Population Ecology*, 2008, 50(3): 239-245.
- [68] Brown J A, Mohammad S M, Moradi M, et al. Adaptive survey designs for sampling rare and clustered populations[J]. *Mathematics & Computers in Simulation*, 2013, 93(7): 108-116.
- [69] Sullivan W P, Morrison B J, Beamish F W H. Adaptive cluster sampling: estimating density of spatially auto-correlated larvae of the sea lamprey with improved precision[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2008, 34(1): 86-97.
- [70] Thompson S K. Adaptive cluster sampling[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1990, 85(412): 1050-1059.
- [71] Hunter J R. Using a restricted adaptive cluster sampling to estimate Pacific hake larval abundance[J]. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 1997, 38(10): 103-113.
- [72] Matheron G. Principles of geostatistics, economic geology[J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [73] Matheron G. Kriging or polynomial interpolation procedures[J]. *CIMM Transactions*, 1967, 70: 240-244.
- [74] Conan G Y. Assessment of shellfish stocks by geostatistical techniques[J]. *ICES CM*, 1985, 30: 24.
- [75] Jardim E, Ribeiro Jr P J. Geostatistical assessment of sampling designs for Portuguese bottom trawl surveys[J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(3): 239-247.
- [76] Liu Y, Chen Y, Cheng J, et al. An adaptive sampling method based on optimized sampling design for fishery-independent surveys with comparisons with conventional designs[J]. *Fisheries Science*, 2011, 77(4): 467-478.
- [77] Harbitz A, Aschan M. A two-dimensional geostatistic method to simulate the precision of abundance estimates[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2003, 60(12): 1539-1551.
- [78] 杨建宇, 岳彦利, 宋海荣, 等. 基于空间模拟退火算法的耕地质量布样及优化方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 253-261.  
Yang Jianyu, Yue Yanli, Song Hairong, et al. Sampling and optimizing methods of cultivated land quality based on spatial simulated annealing algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 253-261.
- [79] Groenigen J W V, Stein A. Constrained optimization of spatial sampling using continuous simulated annealing[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(5): 1078-1086.
- [80] 刘勇. 渔业资源评估抽样调查方法的理论探讨与研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.  
Liu Yong. Theoretical study on the sampling methods of survey for fishery stock estimation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [81] Xu B D, Ren Y, Chen Y, et al. Optimization of stratification scheme for a fishery-independent survey with multiple objectives[J]. *海洋学报(英文版)*, 2015, 34(12): 154-169.
- [82] 王家启. 渔业资源调查站点和样本数量优化设计[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.  
Wang Jiaqi. Optimization of sample sites and sizes for fishery resources survey in Dianshan Lake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [83] Zhao J, Cao J, Tian S, et al. Evaluating sampling designs for demersal fish communities[J]. *Sustainability*, 2018, 10(8): 1-23.
- [84] Cabral H N, Murta A G. Effect of sampling design on abundance estimates of benthic invertebrates in environmental monitoring studies[J]. *Marine Ecology Progress*, 2004, 276(1): 19-24.
- [85] Miller A W, Ambrose R F. Sampling patchy distributions: comparison of sampling designs in rocky intertidal habitats[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 196(3): 1-14.
- [86] Chen Y. A monte carlo study on impacts of the size of subsample catch on estimation of fish stock parameters[J]. *Fisheries Research*, 1996, 26(3): 207-223.

- [87] Neal J W, Adelsberger C M, Lochmann S E. A comparison of larval fish sampling methods for tropical streams[J]. *Marine and Coastal Fisheries*, 2012, 4(1): 23-29.
- [88] Pennington M, Volstad J H. Optimum size of sampling unit for estimating the density of marine populations[J]. *Biometrics*, 1991, 47(2): 717-723.
- [89] Gunderson D R. *Surveys of fisheries resources*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [90] Son T C, Halvorsen R, Bakke T. Sampling effort required to recover the main gradients in marine benthic species composition[J]. *Marine Ecology*, 2016, 37(2): 329-335.

## A review of optimization of sampling design for fishery-independent surveys

TANG Zheng<sup>1, 3</sup>, SHAN Xiu-juan<sup>2, 3</sup>, JIN Xian-shi<sup>2, 3</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of PR China, Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** Sept., 10, 2018

**Key words:** fishery-independent surveys; sampling design; optimization; computer simulation; resample method

**Abstract:** Fishery-independent surveys involve sampling in certain areas according to study designs based on statistical principles for collecting high-quality abundance details and biological and ecological data at species and community levels. A large number of studies have demonstrated that different distribution patterns of fishes are suitable for different sampling designs. Therefore, it is necessary to optimize the sampling design according to the distribution characteristics of fishes and the objective (such as population abundance). Several related studies have been recently conducted on the comparison of different sampling designs and their applications, as well as on the exploration of factors affecting data quality. In this paper, we introduce the stationary sampling method, the traditional sampling method, the adaptive sampling method, and the geostatistical sampling method. We then describe the application of computer simulation of sampling in the optimization of sampling designs. In addition, we introduce the indicators of performance for sampling designs, such as relative bias, relative estimation error, design effect, and coefficient of variation. Finally, we provide a discussion regarding the problems associated with sampling designs and present the prospects of their future development.

(本文编辑: 谭雪静)