

DOI: 10.12264/JFSC2020-0294

采样设计对近岸水域鱼类浮游生物物种丰富度估计的影响

马依宏¹, 纪毓鹏^{1, 2, 3}, 张崇良^{1, 2, 3}, 薛莹^{1, 2, 3}, 任一平^{1, 2, 3}, 徐宾铎^{1, 2, 3}

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

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. 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

摘要: 优化调查采样设计, 利用有限的调查成本获取准确可靠的调查数据, 对于开展渔业科学调查十分重要。本研究根据 2014 年 8 月(夏季)和 10 月(秋季)、2015 年 2 月(冬季)和 5 月(春季)在黄海中南部海域调查获得的鱼类浮游生物数据, 以鱼类浮游生物物种丰富度估计为采样优化目标, 利用计算机模拟再抽样方法, 比较了不同采样设计估计鱼类浮游生物物种丰富度的效果。结果表明, 随着采样频次以及采样站位数的增加, 鱼类浮游生物物种丰富度探测率逐渐升高, 相对估计误差(REE)和相对偏差(RB)逐渐减小。分层随机采样优于简单随机采样, 分层随机采样 4 次调查设计效应值(D_e)为 0.766。不同采样频次下最优季节组合分别为春、春夏、春夏秋以及全年, 其对应的 REE 和 RB 值在同频次不同季节组合中最小, 物种丰富度探测率最高; 保持 90% 的物种丰富度探测率, 分层随机采样每年调查 3 次和 4 次对应的最佳站位数分别是 80 个和 60 个。在保证精确度的前提下优化采样方法和选择不同调查频次下最佳季节组合, 可为鱼类浮游生物调查采样设计进一步优化提供参考。

关键词: 鱼类浮游生物; 简单随机采样; 分层随机采样; 物种丰富度; 采样频次

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2021)05–0635–11

鱼类浮游生物包括鱼卵和仔稚鱼, 其种类组成、丰度和分布及其变化是进行渔业资源调查研究的重要指标^[1–3], 其丰度影响着渔业种群早期补充量和种群动态^[4]。黄海中南部近岸海域基础饵料丰富, 是多种鱼类的产卵场和索饵场^[5–8], 分布着海州湾渔场、吕泗渔场等主要渔场, 也是我国传统的海洋渔业生产水域^[9–10]。过度捕捞、海洋环境污染及气候变化等诸多因素影响了鱼类正常的产卵环境, 进而对鱼类浮游生物种类组成和多样性产生直接或间接影响^[11]。因此, 需要开展必要的科学调查以了解黄海中南部海域鱼类浮游生物的物种多样性。

通常渔业科学调查样本量越大, 则调查结果与真实值越相近^[12]。考虑到调查时间和成本, 需

要平衡调查样本量和数据质量, 使得在一定样本量下精确度最高^[13]。最优调查设计要求在一定的调查需求以及成本条件下, 保证调查目标的准确度和精确度最高, 实现调查效益最大化^[14]。

采样设计相关研究涉及若干方面, 如物种资源监测的原则和抽样方法等^[15], 采样频率、样本量等对调查估计精度的影响等^[3, 16–18]。对于鱼类浮游生物调查采样, 如不同鱼类浮游生物采样设计在监测种群动态方面的表现^[19], 鱼类浮游生物分布特征在采样设计中的考虑等^[20]; 现有鱼类浮游生物调查多采用定点采样方法进行^[21–22]。目前对于黄海中南部鱼类浮游生物的研究大多集中在生态学方面^[8, 11, 22], 缺乏考虑采样设计对相关分析的影响。合理的鱼类浮游生物采样设计有助于获

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2020-10-26.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900904); 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-2)

作者简介: 马依宏(1996–), 女, 硕士研究生, 主要从事渔业资源生态学研究. E-mail: myh5720@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 徐宾铎, 副教授, 主要从事渔业资源生态学和采样设计研究. E-mail: bdxu@ouc.edu.cn

得高质量数据^[3,23],同时考虑到调查成本和后续样品分析鉴定工作量等问题,开展黄海中南部近岸海域鱼类浮游生物调查采样设计及优化研究十分必要。

本研究根据 2014—2015 年在黄海中南部近岸海域进行的鱼类浮游生物调查数据,应用计算机模拟方法,研究了不同采样设计对鱼类浮游生物物种丰富度估计的影响,以期在确保指标估计值的精确度的前提下,筛选合理的采样方法、减少采样努力量,为进一步的鱼类浮游生物调查采样设计优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源于 2014 年 8 月(夏季)、2014 年 10 月(秋季)、2015 年 2 月(冬季),2015 年 5 月(春季)在黄海中南部近岸海域进行的鱼类浮游生物调查。调查海域范围为 32°N~35.5°N, 119°E~123°E 海域。春季、夏季、秋季和冬季调查站位分别为 91、80、77 和 79 个(图 1)。调查使用网口带有流量计的大型浮游生物网(网口直径 0.8 m,网目 0.505 mm,网衣 2.8 m)进行水平拖网采样,拖曳时间 10 min,拖速约 2.0 kn;样品保存于 5%的海

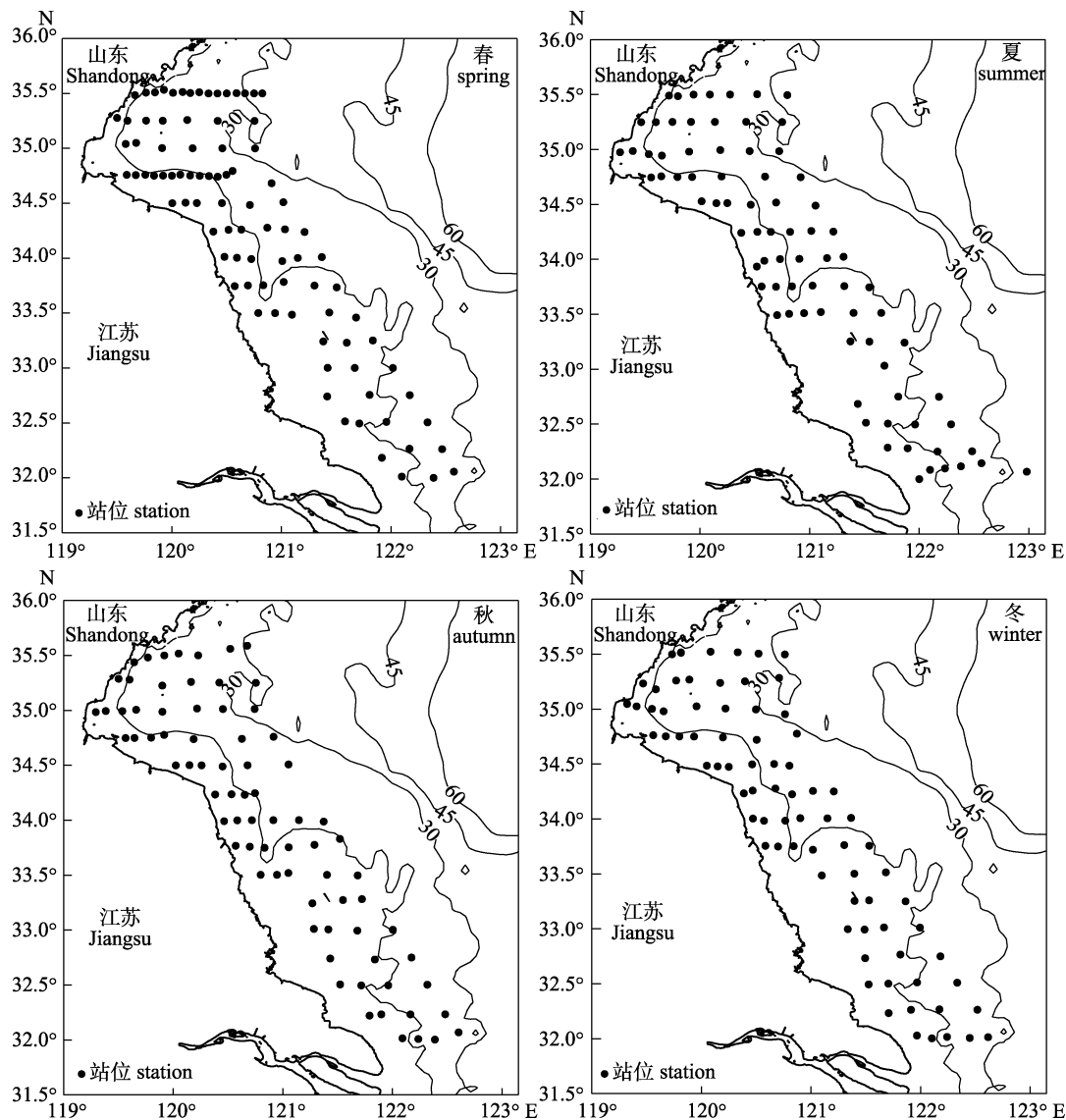


图 1 黄海中南部近岸海域鱼类浮游生物调查站位
Fig. 1 Sampling stations of ichthyoplankton survey in the coastal waters of central and southern Yellow Sea

水甲醛溶液中固定。鱼类浮游生物样品的采集、保存与室内分析处理均按《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)^[23]规定的方法进行。实验室镜检将鱼卵、仔稚鱼挑出,参考《中国近海鱼卵与仔鱼》^[24]、《台湾海域鱼卵图鉴》^[25]和《日本仔稚鱼图鉴》^[26]对样品进行物种鉴定。4 个季节航次共获得鱼类浮游生物 83 种,其中春季 51 种,夏季 54 种,秋季 26 种,冬季 8 种。

1.2 采样设计

1.2.1 抽样方法 (1)简单随机采样(SRS): 在全部站点中依次随机选择 10, 20, …, 100 个站位(以 10 为间隔)作为采样站点, 进行有放回抽样。

(2)分层随机采样(StRS): 按区域进行分层,以海州湾以及邻近海域作为 A 区(34.5°~35.75°N, 119.3°E~121°E), 江苏近岸北部海域为 B 区(33.00°N~34.50°N, 121°E~122°E), 江苏近岸南部海域为 C 区(32.00°N~33.00°N, 122°E~123°E), 根据各区域面积按比例分配不同样本量下每层采样站位数(表 1)。

1.2.2 采样频次 更改采样频次, 分为一年中 1、2、3 和 4 次采样共 15 种组合方式: 分别为春季、夏季、秋季、冬季、春-夏、春-秋、春-冬、夏-秋、夏-季、秋-冬、春-夏-秋、春-夏-冬、春-秋-冬、夏-秋-冬、全年。

1.3 模拟流程

本研究中假设原始调查数据可反映该海域鱼

表 1 黄海中南部近岸海域模拟采样过程中各层站位数
Tab. 1 The number of sampling stations of simulation study in the coastal waters of central and southern Yellow Sea

分层 stratum	站位数 number of stations									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
A	33	30	26	23	20	16	13	10	7	3
B	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
C	27	24	22	19	16	14	11	8	5	3

类浮游生物种类组成和物种数的“真值”。本研究主要比较不同采样设计对鱼类浮游生物物种丰富度估计的影响; 当成本一定时, 选取可达到一定的物种丰富度探测率且相对估计误差和相对偏差较小的采样设计为最优采样设计。本文考虑了两种抽样方法、不同采样频次以及样本量。模拟研究主要步骤如下: (1)采用两种抽样方法, 依次减少采样频次和采样站位数, 对原始调查数据进行放回式重抽样获得模拟数据, 统计模拟调查获得的鱼类浮游生物物种数, 此过程重复 1000 次; (2)将模拟调查物种数与原始调查物种数进行比较, 计算出模拟调查的物种丰富度探测率; (3)利用相对估计误差(relative estimation error, REE)和相对偏差(relative bias, RB)衡量不同采样设计估计鱼类浮游生物物种数的准确度和精确度, 从而确定合理的采样设计方案(图 2)。

1.4 采样设计表现评价

本文中所指的鱼类浮游生物物种丰富度探测

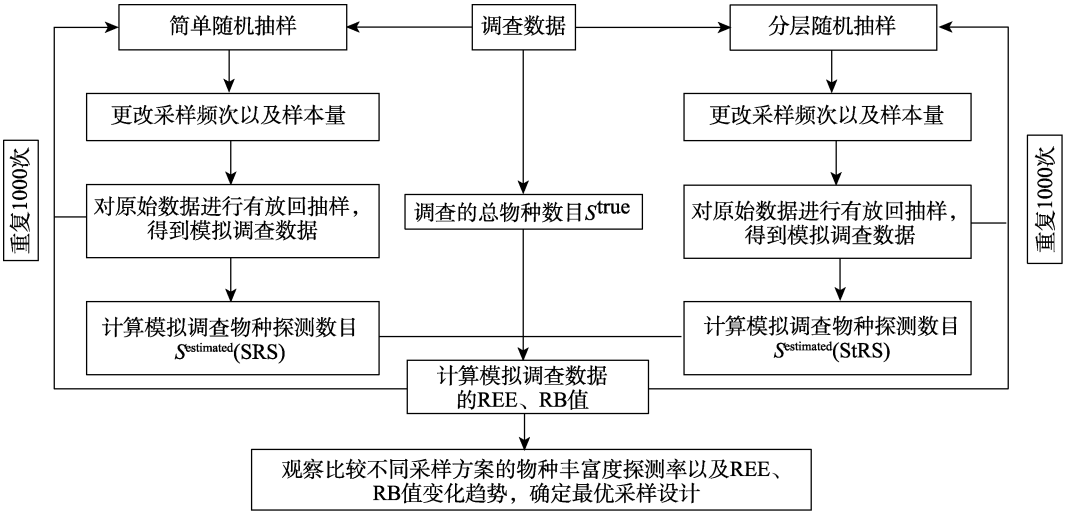


图 2 采样设计对鱼类浮游生物物种丰富度估计影响的模拟研究流程图

Fig. 2 Flowchart of the simulation study on the effect of sampling design on the estimation of ichthyoplankton species richness

率(species richness detectability)定义为某次调查所获得的物种数占调查区域“真实”物种数的百分比, 计算公式如下:

$$P = \frac{S}{S^{\text{true}}} \times 100\%$$

式中, P 是物种丰富度探测率, S 是某次调查所获的物种数, S^{true} 是调查区域“真实”物种数。

由于简单随机采样是最基本的抽样设计, 常被用来衡量其他采样设计的效果, 本研究的设计效应(design effect, D_e)计算公式^[27]如下:

$$D_e = \frac{\bar{v}_k(\hat{\theta})}{\bar{v}_{\text{SRS}}(\hat{\theta})}$$

式中, $\bar{v}_k(\hat{\theta})$ 为某一采样设计的估计均值的方差; $\bar{v}_{\text{SRS}}(\hat{\theta})$ 为简单随机采样的简单估计方差。如果 $D_e > 1$, 说明该采样设计精度低于简单随机采样, D_e 越小, 说明采样效果越好, 每次采样的波动较小。

相对估计误差(relative estimation error, REE)用来评价估计值的精度和准确度^[28]。

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

相对偏差(relative bias, RB)可用于评价调查估计值的准确度及偏离真值的情况^[29]。

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

式中, S^{true} 是调查区域“真实”物种数, 即“真值”, $S_i^{\text{estimated}}$ 是根据第 i 次再采样数据计算的鱼类浮游生物物种数的“模拟值”, R 是模拟次数(本研究中取 1000 次)。

2 结果与分析

2.1 物种丰富度探测率

图 3 是不同调查频次下两种抽样方法的物种丰富度探测率随站位数的变化。在各采样设计中, 物种丰富度探测率均随着站位数增加而升高。站位较少时, 物种丰富度探测率变异性较大、上升较快; 随着站位数增加, 探测率增加趋势逐渐平缓, 且变异性变小。

分层随机采样方法效果均优于简单随机采样,

在所有采样频次和站位数下, 分层随机采样的物种丰富度探测率均高于简单随机采样, 随着站位数增加, 分层随机采样的效果更加明显。

随着采样频次的增加, 物种丰富度估计值增高。在站位数相同时, 调查次数越少, 物种丰富度探测率越低, 不同方法的物种丰富度探测率也有所不同。1 次调查时, 春季采样效果最好, 冬季采样效果最差; 2 次调查以上时, 包含春季的季节组合探测率都优于同组其他组合, 不同采样频次采样效果最好的季节组合分别是: 春季、春-夏、春-夏-秋以及全年。

若要达到 90% 的物种探测率, 当采样 4 次时, 分层随机采样可减少至 60 个站位, 简单随机采样仍需 90 个站位; 进行 3 次采样时, 选择春、夏、秋 3 个季节, 分层随机采样站位数达到 80 个即可满足需求。若要达到 80% 的探测率, 则 4 次采样时分层随机采样可减少至 40 个站位, 简单随机采样可减少至 50 个站位; 而 3 次采样, 选择春-夏-秋季, 分层随机采样可减少至 50 个站位, 简单随机采样可减少至 60 个; 采样频次为 2 次时, 选择春-夏两季节, 分层随机采样站位数 90 即可达到要求。若要达到 70% 的探测率, 则 4 次采样时两种采样方法都可以减少至 30 个站位; 3 次采样时, 选择春-夏-秋季, 分层采样可减少至 30 个站位, 简单随机采样可减少至 40 个; 2 次采样时, 选择春-夏季, 分层采样方法调查站位数 50 个、简单随机采样方法站位数 60 个即可达到要求。

相同采样频次下, 随着站位数的增加物种丰富度探测率升高, 采样 4 次时, 分层随机采样方法若使探测率达到 95%, 每次需要设置站点 80 个; 若探测率为 90%, 则每次需要设置站点数为 60; 若探测率为 80%, 则每次仅需设置 40 个站位。简单随机采样方法若使探测率达到 90%, 每次需要设置站点 90 个; 若探测率为 80%, 每次需要设置站点数为 50 个。

2.2 相对估计误差(REE 值)

图 4 为两种抽样方法在不同调查频次下的物种丰富度探测率的相对估计误差随样本量的变化。相同调查频次下, 随着站位数增加, 物种丰富度探测率的相对估计误差 REE 值逐渐减小。站位

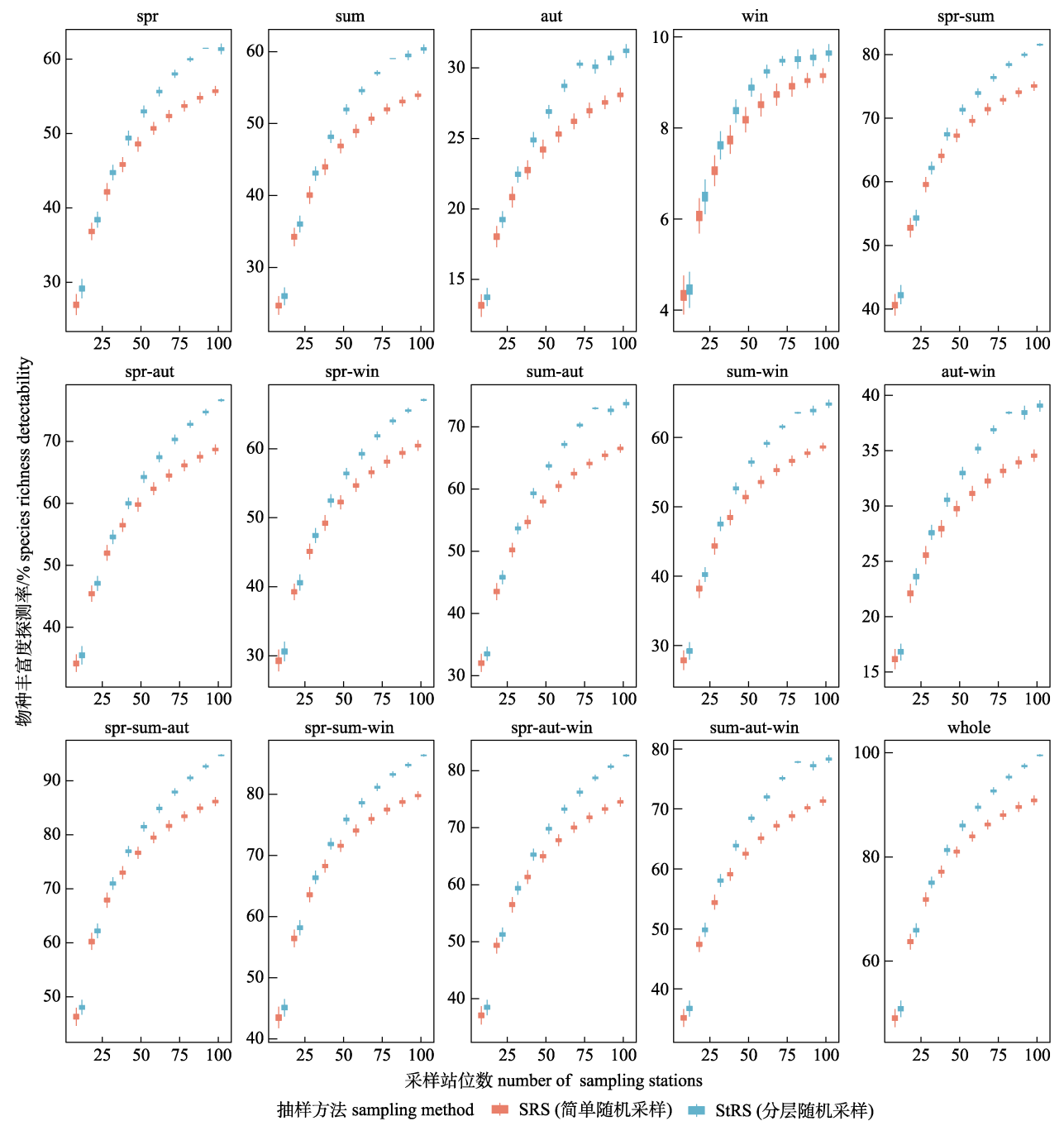


图 3 不同采样设计的鱼类浮游生物物种丰富度探测率变化
spr, sum, aut, win 分别代表春季、夏季、秋季和冬季。

Fig. 3 Changes of ichthyoplankton species richness detectability with different sampling designs
spr, sum, aut and win represent spring, summer, autumn and winter, respectively.
SRS: simple random sampling; StRS: stratified random sampling.

数较少时, REE 值变异性相对较大、下降速度较快; 随着站位数增加, REE 值的下降趋势逐渐趋于平缓。相同站位数情况下, 随着采样频次的增加, 所对应的 REE 值较小。

在相同调查频次相同站位数时, 分层随机采

样的 REE 值均小于简单随机采样的 REE。采样频次为 1、2 和 3 次时, 春季、春-夏季和春-夏-秋组合的 REE 值小于相同频次的其他季节组合。在站位数相同时, 随着调查频次的增加, REE 值总体上呈减小趋势。

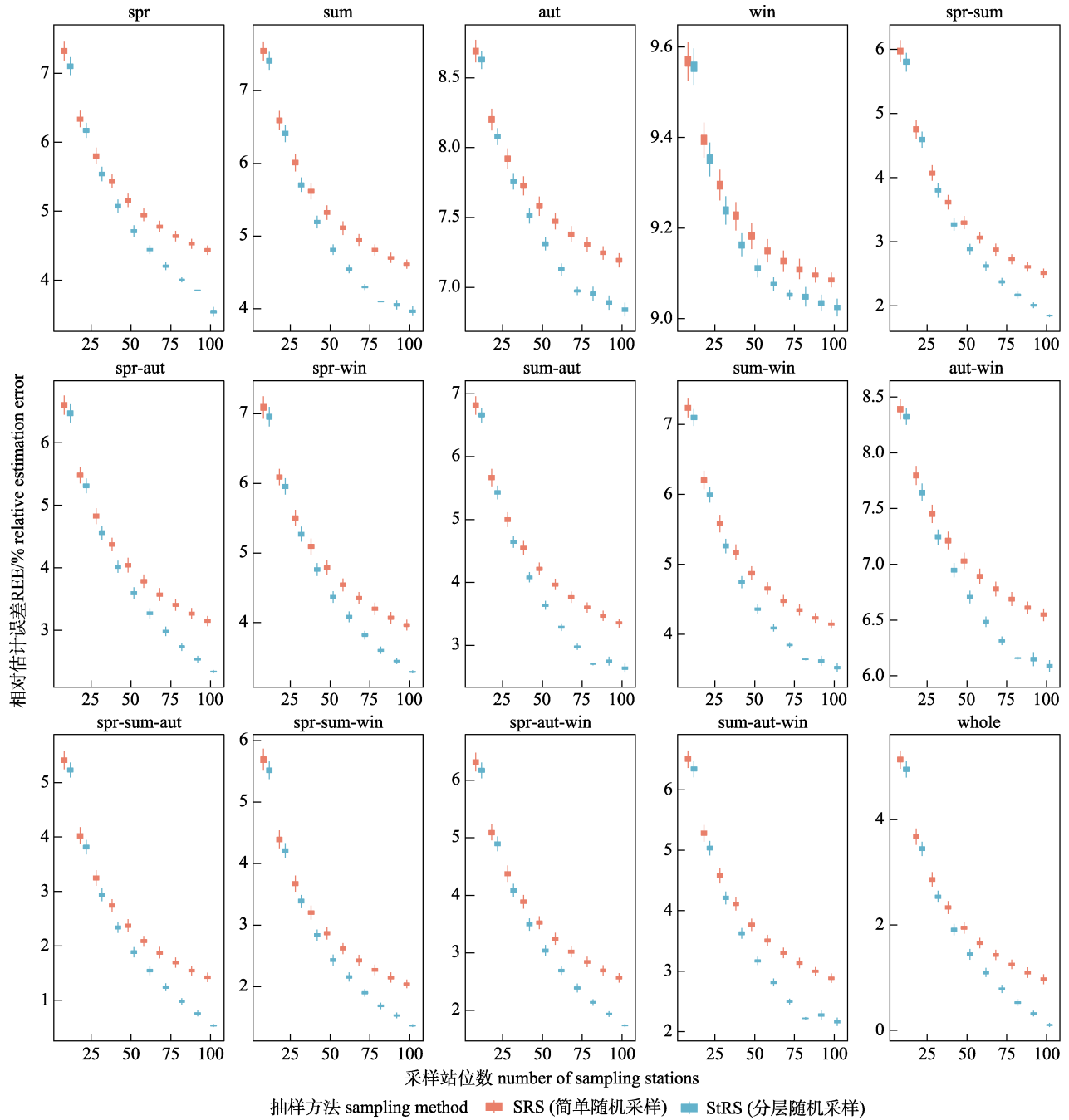


图 4 不同采样设计的相对估计误差变化

spr, sum, aut, win 分别代表春季、夏季、秋季和冬季.

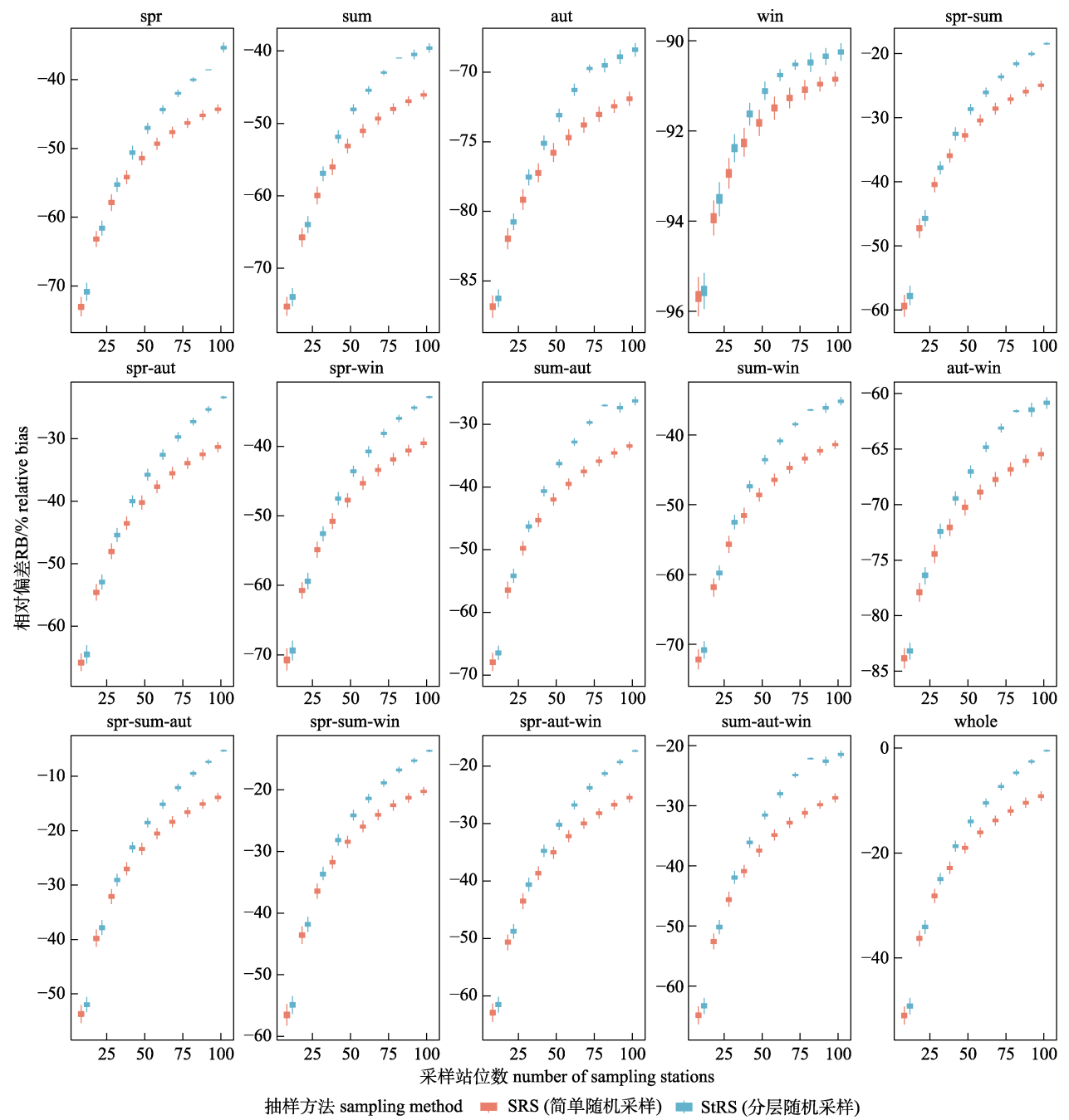
Fig. 4 Changes of relative estimation error with different sampling designs
spr, sum, aut, win represent spring, summer, autumn and winter, respectively.
SRS: simple random sampling; StRS: stratified random sampling.

2.3 相对偏差(RB 值)

图 5 为不同调查频次两种抽样方法的物种丰富度相对偏差随样本量的变化。本研究中的所有 RB 值均为负数。相同调查频次下，随着样本量增加，物种丰富度探测率的相对偏差 RB 绝对值逐

渐减小并趋缓。相同站位数情况下，随着采样频次的增加，所对应的 RB 绝对值较小。

在相同调查频次相同站位数时，分层随机采样的 RB 绝对值均小于简单随机采样的 RB 绝对值。采样频次为 1、2 和 3 次时，春季、春-夏季和



春-夏-秋季节的 RB 绝对值小于相同频次的其他季节组合。站位数相同时, 随着调查频次的增加, RB 绝对值总体呈减小趋势。

2.4 设计效应

分层随机采样设计效应值均低于简单随机采

样方法。每年 1 次采样时, 春季分层采样效果最好($D_e=0.922$); 2 次采样时, 春-夏季节组合的分层采样效果最好($D_e=0.884$); 3 次采样时, 春-夏-秋季节组合分层采样效果最好($D_e=0.805$); 全年分层随机采样设计效应为 0.766(表 2)。

表 2 不同抽样方法设计效应
Tab. 2 The design effect of different sampling methods

季节组合 season combinations	简单随机采样 simple random sampling, SRS	分层随机采样 stratified random sampling, StRS
春 spr	1.000	0.922
夏 sum	1.000	0.924
秋 aut	1.000	0.971
冬 win	1.000	0.994
春-夏 spr-sum	1.000	0.884
春-秋 spr-aut	1.000	0.890
春-冬 spr-win	1.000	0.921
夏-秋 sum-aut	1.000	0.890
夏-冬 sum-win	1.000	0.918
秋-冬 aut-win	1.000	0.959
春-夏-秋 spr-sum-aut	1.000	0.805
春-夏-冬 spr-sum-win	1.000	0.863
春-秋-冬 spr-aut-win	1.000	0.867
夏-秋-冬 sum-aut-win	1.000	0.875
全年 whole	1.000	0.766

注: spr, sum, aut, win 分别代表春、夏、秋和冬季。
Note: spr, sum, aut, win represent spring, summer, autumn and winter, respectively.

3 讨论

本研究中,从采样效应、物种丰富度探测率、相对估计误差和相对偏差上来看,分层随机采样均优于简单随机采样,随着样本量的增加,采样误差逐渐下降,这与历史研究所得结论一致^[30-31]。分层随机采样通常在渔业调查中都具有效率高、精确度高的特点^[32],是渔业调查中常用的调查设计方法之一^[30]。本研究中分层随机采样能够在相同物种丰富度探测率下,减少站位数;在相同样本量情况下,采样精度比简单随机采样更高,能较明显提高采样估计精度。

本研究表明随着采样频次的增加,鱼类浮游生物物种丰富度探测率估计精度、准度均有所增加,即采样频次越高,获得的数据更接近真实值。站位数的变化对于物种丰富度估计也有较大影响,随着站位数的增加,物种丰富度也更接近真实值。为达到一定的物种丰富度探测率,如果降低调查频次,则需要增加每次调查站位数。由于鱼类浮游生物具有较强的季节性^[24],因此单季节采样难以达到采样要求,需要一年多次采样。根据

物种丰富度探测率、相对估计误差和相对偏差(图 3,图 4,图 5),若要分别达到 90%、80%的物种丰富度探测率,进行 4 次采样时分层随机采样站位数可分别减少至 60 个、40 个;进行 3 次采样时,选择春-夏-秋季,站位数设置为每次 80 个。在进行物种多样性调查时,Koslow 等^[19]对缅甸湾 6 个断面进行站位数优化,比较长时间序列生物多样性变化规律,表明当每个断面在一定范围内即使站位数减少,所呈现出来的物种变动趋势也会趋于稳健;本文的研究结果与其相符,达到一定的调查频次时,站位数在一定范围内减少,仍可以保证较高的物种探测率。

通常而言,站位数越多,采样精度越高^[33],但由于调查成本以及后期分析鉴定工作的复杂,过高的站位数以及采样频次可能导致性价比下降。同时采样努力量以及采样方法等也会影响资源调查的结果^[16]。王家启等^[16]基于在淀山湖一年内的 12 次渔业调查确定最佳的调查频率和站位数,结果表明基于不同指数,最佳站位数和调查频次有所不同。因此,确定最优采样设计是一个复杂的问题,如每一次的采样努力量降低,则需要增加采样频次;若降低采样频次,则需要增加每次的调查站位数。以往学者提出需要增加样本量直到达到物种丰富度不会出现明显变化为止,低于此水平则无法达到资源监测效果^[34-36]。但在实际研究中,稀有种对于物种丰富度估计有较大影响^[37],因而在一定情况下,即使不断增加样本量,但受到稀有种本身的可探测性的限制,可能导致目前出现的种类并不能完全代表调查海域的种类组成真实情况。

鱼类浮游生物不具备游泳能力,被动随海流运动,其分布受到环境影响较大^[8,37]。在进行鱼类浮游生物采样方案设计时,要考虑鱼卵、仔稚鱼本身的特性以及调查目的不同进行不同的调查方案设计。不同精度要求以及不同调查目的均影响调查方案设计,因而需要在实际应用中根据不同需求确定最优调查设计。在确定最优调查设计时,考虑到调查时间和费用,可能减少调查频次,增加少量站位数更能节省采样成本。本研究仅探讨了不同采样设计下物种丰富度的变化,若优化指

标改变, 其结果可能会有所不同; 对于有多个调查目标的鱼类浮游生物调查, 需要综合考虑确定合适的调查设计以满足各指标要求。研究结果同时也受到稀有种较大影响, 如需考虑到这一方面的影响, 还需进一步研究。

本研究以物种丰富度为指标比较并优化采样设计方案, 比较了不同抽样方法、采样频次以及站位数变化对于鱼类浮游生物物种丰富度估计的影响。该研究结果可在确保指标估计值的精确度的前提下确定合理的抽样方法、减少采样努力量, 减少调查成本, 为进一步的鱼类浮游生物调查采样设计优化提供参考。

参考文献:

- [1] Zhang C I, Lee B J. Stock assessment and management implications of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) in Korean waters, based on the relationships between recruitment and the ocean environment[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1): 513-537.
- [2] Sassa C, Konishi Y, Mori K. Distribution of jack mackerel (*Trachurus japonicus*) larvae and juveniles in the East China Sea, with special reference to the larval transport by the Kuroshio current[J]. *Fisheries Oceanography*, 2006, 15(6): 508-518.
- [3] Pepin P, Helbig J A. Sampling variability of ichthyoplankton surveys—Exploring the roles of scale and resolution on uncertainty[J]. *Fisheries Research*, 2012, 117-118: 137-145.
- [4] Zhan B Y. Fishery Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 261-262. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 261-262.]
- [5] Wan R J, Jiang Y W. Studies on the ecology of eggs and larvae of Osteichthyes in the Yellow Sea[J]. *Marine Fisheries Research*, 1998, 19(1): 60-73. [万瑞景, 姜言伟. 黄海硬骨鱼类鱼卵、仔稚鱼及其生态调查研究[J]. 海洋水产研究, 1998, 19(1): 60-73.]
- [6] Liu Y, Cheng J H. Preliminary analysis on the division of fishery resources based on hydrological environment factors in the East China Sea and south of the Yellow Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(4): 796-810. [刘勇, 程家骅. 东海及黄海南部渔业资源水文环境类群划分及其相关特征的初步分析[J]. 中国水产科学, 2019, 26(4): 796-810.]
- [7] Zhang B, Wu Q, Niu M X, et al. Variation in feeding ecology within the fish community in the north Yellow Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(6): 1343-1350. [张波, 吴强, 牛明香, 等. 黄海北部鱼类群落的摄食生态及其变化[J]. 中国水产科学, 2011, 18(6): 1343-1350.]
- [8] Chen J J, Xu Z L, Chen X Z. Zooplankton in the coastal waters of southern Yellow Sea during winter and spring[J]. *Marine Fisheries*, 2008, 30(4): 39-44. [陈佳杰, 徐兆礼, 陈雪忠. 冬、春季黄海南部沿岸水域浮游动物[J]. 海洋渔业, 2008, 30(4): 39-44.]
- [9] Zhang Y L, Xu B D, Zhang C L, et al. Spatial heterogeneity in the feeding habits and feeding ground distribution of *Johnius belangerii* in Haizhou Bay during spring[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(3): 315-326. [张云雷, 徐宾铎, 张崇良, 等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼摄食习性的空间异质性及其索饵场分布[J]. 中国水产科学, 2020, 27(3): 315-326.]
- [10] Tang Q S. Regional Oceanography in China: Fishery Oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 16-17. [唐启升. 中国区域海洋学: 渔业海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 16-17.]
- [11] Li J S, Hu F, Cheng J H. Distributions of fish eggs and juveniles and relations between surface layer water temperature and salinity of the Yangtze estuary water area in spring[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(4): 16-21. [李建生, 胡芬, 程家骅. 长江口水域春季鱼卵仔鱼分布及其与温度盐度的关系[J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 16-21.]
- [12] Melissa T D. Estimating sampling effort for biomonitoring of nearshore fish communities in small central Minnesota Lakes[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2007, 27(4): 1094-1111.
- [13] Legg C J, Nagy L. Why most conservation monitoring is, but need not be, a waste of time[J]. *Environmental Management*, 2006, 78(2): 194-199.
- [14] Angermeier P L, Smogor R A. Estimating number of species and relative abundances in stream-fish communities: Effects of sampling effort and discontinuous spatial distributions[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, 52(5): 936-949.
- [15] Xu H G, Ding H, Wu J, et al. Principles, indicators and sampling methods for species monitoring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2013-2022. [徐海根, 丁晖, 吴军, 等. 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2013-2022.]
- [16] Wang J Q, Dai X J, Wang K, et al. Optimal design of sample size for estimating species richness of fishes in Dianshan Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 291-298. [王家启, 戴小杰, 王坤, 等. 淀山湖鱼类生物多样性调查样本量的优化设计[J]. 应用生态学报, 2017,

- 28(1): 291-298.]
- [17] Conti P L, Iorio A D, Guandalini A, et al. On the estimation of the Lorenz curve under complex sampling designs[J]. *Statistical Methods & Applications*, 2020, 29: 1-24.
- [18] Wang J, Xu B D, Zhang C L, et al. Sample size optimization for cluster design of bottom trawl fish surveys in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 931-938. [王晶, 徐宾铎, 张崇良, 等. 黄河口鱼类底拖网调查采样断面数的优化[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 931-938.]
- [19] Koslow J A, Wright M. Ichthyoplankton sampling design to monitor marine fish populations and communities[J]. *Marine Policy*, 2016, 68: 55-64.
- [20] Pope K L, Willis D W. Larval black crappie distribution: Implications for sampling impoundments and natural lakes[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 1998, 18(2): 470-474.
- [21] Wei Y J, Wang X B, Zhang H B, et al. Ichthyoplankton species composition and distribution in Hangzhou Bay in summer during 2004~2010[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012(4): 54-61. [魏永杰, 王晓波, 张海波, 等. 2004~2010 年夏季杭州湾鱼类浮游生物种类组成与数量分布[J]. *台湾海峡*, 2012(4): 54-61.]
- [22] Xiao H H, Zhang C L, Xue Y, et al. Community structure of ichthyoplankton from typical transects in Haizhou Bay and its adjacent waters during spring and summer[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 1079-1090. [肖欢欢, 张崇良, 薛莹, 等. 海州湾及邻近海域春夏季典型断面鱼类浮游生物群落的结构特征[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 1079-1090.]
- [23] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey, GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. [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. 中华人民共和国推荐性国家标准: 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [24] Zhao C Y, Zhang R Z, Lu S F. Fish Eggs and Larvae in China Seas[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985: 2, 18-188. [赵传纲, 张仁斋, 陆穗芬. 中国近海鱼卵与仔鱼[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 2, 18-188]
- [25] Shao G Z, Yang R S, Chen K Q, et al. An Identification Guide of Marine Fish Eggs from Taiwan[M]. Taipei: Academia Sinica, 2001: 15-320. [邵广昭, 杨瑞森, 陈康青, 等. 台湾海域鱼卵图鉴[M]. 台北: 台湾研究院, 2001: 15-320.]
- [26] Okiyama M. An atlas of the Early Stage Fishes in Japan[M]. Tokyo: Tokai UP, 1988: 2-400.
- [27] Wejnert C, Pham H, Krishna N, et al. Estimating design effect and calculating sample size for respondent-driven sampling studies of injection drug users in the United States[J]. *Aids & Behavior*, 2012, 16(4): 797-806.
- [28] 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: 207-223.
- [29] Paloheimo J, Chen Y. Estimating fishing mortality and cohort sizes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 1996, 53: 1572-1579
- [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] 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.]
- [32] Yuan X W, Liu Y, Cheng J H. Error analysis on stratified sampling and its application in fishery statistics[J]. *Marine Fisheries*, 2011, 33(1): 116-120. [袁兴伟, 刘勇, 程家骅. 分层抽样误差分析及其在渔业统计中的应用[J]. *海洋渔业*, 2011, 33(1): 116-120.]
- [33] Jardim E, Ribeiro P J. Geostatistical assessment of sampling designs for Portuguese bottom trawl surveys[J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(3): 239-247.
- [34] Jennings M J, Fore L S, Karr J R. Biological monitoring of fish assemblages in Tennessee Valley reservoirs[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, 11: 263-274.
- [35] Gotelli N J, Colwell R K. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness[J]. *Ecology Letters*, 2001, 4: 379-391.
- [36] Mou C C, Luo J C, Wang X P, et al. Plant diversity of ecotone community between forest and marsh in Changbai Mountain[J]. *Chinese Biodiversity*, 1998, 6(2): 53-58. [牟长城, 罗菊春, 王襄平, 等. 长白山林区森林/沼泽交错群落的植物多样性[J]. *生物多样性*, 1998, 6(2): 53-58.]
- [37] Liu S, Zhang J M, Leng Y. Species and distribution characteristics of fish eggs and larvae at the Yellow River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(6): 662-667. [刘霜, 张继民, 冷宇. 黄河口及附近海域鱼卵和仔鱼种类组成及分布特征[J]. *海洋通报*, 2011, 30(6): 662-667.]

Effects of sampling design on species richness estimation of ichthyoplankton in the coastal waters

MA Yihong¹, JI Yupeng^{1, 2, 3}, ZHANG Chongliang^{1, 2, 3}, XUE Ying^{1, 2, 3}, REN Yiping^{1, 2, 3}, XU Binduo^{1, 2, 3}

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China

Abstract: The species composition, abundance and distribution of ichthyoplankton and their changes are important indicators for the investigation of fishery resources. The abundance of ichthyoplankton affects the early supplement and population dynamics of fishery population. Therefore, carrying out necessary scientific surveys is necessary to understand the species diversity of ichthyoplankton in the central and Southern Yellow Sea. Generally, the larger the sample size is, the closer the survey results are to the true values. Considering the time and cost of the survey, balancing the sample size and data quality is needed to achieve the highest accuracy under a certain sample size. The optimal survey design requires that under certain survey demand and cost conditions, the bias and accuracy of the survey objectives are the highest, and the investigation benefit is maximized. Optimization of the sampling design to obtain accurate and reliable survey data with limited survey cost is important in fisheries-independent surveys. In this study the estimate of species richness of ichthyoplankton was the sampling objective. Based on the ichthyoplankton survey data collected in August (summer), October (autumn) 2014, February (winter) and May (spring) 2015 in the coastal waters in central and Southern Yellow Sea, the effect of different sampling designs on estimation of ichthyoplankton species richness was compared using the computer simulation study. In this study, it is assumed that the original survey data can be used as the “true value” reflecting the species composition and species number of fish plankton in the sea area. This paper mainly compares the effects of different sampling designs on the estimation of ichthyoplankton species richness; when the cost is fixed, the sampling design which can achieve a certain species richness detection rate and has small relative estimation error and relative deviation is selected as the optimal sampling design. The results showed that the detection rate of ichthyoplankton species richness increased gradually with the increase of sampling frequency and the number of sampling stations, and the relative estimation error (REE) and relative bias (RB) of the estimate of ichthyoplankton species richness decreased gradually. Stratified random sampling performed better than simple random sampling, and the design effect (D_e) of stratified random sampling with 4 times a year is 0.766. Under different sampling frequencies, the optimal season combinations were spring, spring-summer, spring-summer-autumn and four seasons, and the corresponding REE and RB values were the lowest among different seasonal combinations with the same frequency, and the species richness detection rates were the highest. If the detection rate of species richness was set at 90%, the optimal number of stations was 80 and 60 for stratified random sampling with 3 and 4 times a year, respectively. The sampling method and optimal season combination under different frequencies were optimized under the premise of ensuring the estimation accuracy and precision, which will provide reference for the further optimization of sampling design for ichthyoplankton survey.

Key words: ichthyoplankton; simple random sampling; stratified random sampling; species richness; sampling frequency

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