



基于多目标鱼种资源量指数估计的不同采样设计比较

张国晟¹, 王晶², 张崇良^{1,3,4}, 薛莹^{1,3,4}, 任一平^{1,3,4}, 徐宾铎^{1,3,4*}

(1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316000;

3. 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;

4. 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: 经济高效的渔业资源调查采样有利于保证调查数据的质量, 提高调查效率, 从而为渔业科学研究提供可靠数据。根据 2016—2017 年山东近海渔业资源底拖网季度调查数据, 以小黄鱼、矛尾虾虎鱼、方氏云鲷和星康吉鳗作为目标鱼种, 使用 Kriging 插值法模拟了目标鱼种在 4 个季节的相对资源量分布, 设置简单随机抽样 (SRS)、常规系统抽样 (SYS_r)、等距系统抽样 (SYS_h)、按水深分层随机抽样 (StRS_depth)、按区域分层随机抽样 (StRS_region) 和综合水深和区域分层随机抽样 (StRS_total) 共 6 种备选采样设计方案, 利用计算机模拟方法对 Kriging 插值数据进行再抽样, 估计各目标鱼种资源量指数, 以相对估计误差 (relative estimation error, REE) 和相对偏差 (relative bias, RB) 衡量估计结果的精准度, 以准确度变化率 (accuracy change rate, ACR) 小于等于 10% 的标准确定最优调查站位数, 比较不同采样设计在估计多目标鱼种资源量指数方面的表现并进行样本量优化。结果发现, 3 种抽样方法的估计准确度不同, 简单随机抽样 < 分层随机抽样 < 系统抽样。除系统抽样外, 其余采样设计方案均为无偏估计。随调查站位数增加, 系统抽样的 REE 表现出无规律波动趋势。分层随机抽样的 REE 略低于系统抽样, 且随站位数增加而降低。分层随机抽样是最优抽样方法, StRS_total 是最优分层方案。不同目标鱼种、季节调查所需站位数不同, StRS_total 进行 4 季度调查的最优站位数可设为 80。

关键词: 多物种渔业资源调查; 采样设计; 资源量指数; Kriging 插值; 计算机模拟; 山东近海
中图分类号: S 931 **文献标志码:** A

渔业资源调查是开展渔业科学研究的重要数据来源。调查数据常用来研究渔业生物学特征^[1-2]、鱼类群落结构、多样性^[3-5]和分布规律^[6-7], 估计鱼种资源量和最大可持续产量^[8-9], 进而为渔业管理政策的制定提供理论依据。

渔业资源调查成本高, 采样设计优化可在保证调查数据质量前提下降低调查成本^[10]。调查

采样设计常基于历史调查数据和调查目的, 选择抽样方法, 合理分配采样努力量^[11-12], 借助计算机模拟方法比较不同调查设计表现, 从而确定最优调查方案^[13-14]。

资源量指数是渔业资源调查的常用指标。Kriging 插值法 (ordinary kriging interpolation, OKI) 可利用已有调查数据构建协方差函数, 模拟未

收稿日期: 2020-04-12 修回日期: 2020-09-29

资助项目: 国家重点研发计划 (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)

第一作者: 张国晟 (照片), 从事调查采样设计研究, E-mail: 664505023@qq.com

通信作者: 徐宾铎, E-mail: bdxu@ouc.edu.cn



调查区域的鱼种相对资源量分布, 以此作为目标鱼种的“真实”分布^[14-16]。

近年来, 国内外学者在调查采样设计及优化方面开展了大量研究。Xu等^[12, 17]以资源量指数和多样性指数为调查指标, 优化了海州湾渔业资源调查设计的采样努力量和分层设计。刘勇^[18]结合地统计学模拟方法和空间模拟退火算法进行采样设计, 确定了站位空间分布。王晶等^[19]通过计算机模拟方法确定了黄河口海域渔业资源调查的最优断面数。Cao等^[20]以美国龙虾(*Homarus americanus*)资源量指数为调查指标进行采样设计优化, 指出相对于随机抽样和分层随机抽样, 系统抽样的估计准确度最高。

本实验通过Kriging插值法模拟了山东近海4个季度小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、矛尾虾虎鱼(*Chaemrichthys stigmatias*)、方氏云鲷(*Enedrias fangi*)和星康吉鳗(*Conger myriaster*)等4个目标鱼种的相对资源量分布, 应用计算机模拟和重抽样方法, 比较了6种不同采样设计估计多鱼种资源量指数的表现, 确定最优抽样方法和采样努力量, 以期为该海域渔业资源调查采样设计优化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本实验数据来自2016年10月(秋季)、2017年1月(冬季)、5月(春季)、8月(夏季)的山东近海渔业资源底拖网季度调查, 调查海域范围为 $118^{\circ}20' \sim 123^{\circ}50' E$, $35^{\circ}00' \sim 38^{\circ}30' N$ (图1), 共设置177个站位。调查船为单船底拖网渔船, 主机功率为220 kW, 平均拖速为2~3 kn, 每站拖网时间1 h。拖网渔获物冷冻保存, 带回实验室鉴定, 并记录各种类的渔获重量和尾数, 计算相对资源量, 即单位网次渔获重量(g/h)。

实验中, 小黄鱼、矛尾虾虎鱼、方氏云鲷和星康吉鳗等4个目标鱼种, 分别用lp、cs、ef和cm表示, 以估计其资源量指数为调查目标。

Kriging插值法原理是估计值与真实值的数学期望相同且方差最小^[21]。Kriging插值法利用历史调查数据构建协方差函数, 对未调查区域进行预测^[22]。本实验利用Kriging插值法预测小黄鱼、矛尾虾虎鱼、方氏云鲷和星康吉鳗在山东近海4个季度的相对资源量(g/h)空间分布情况。调查区域根据经纬度划分为5 529个单元,

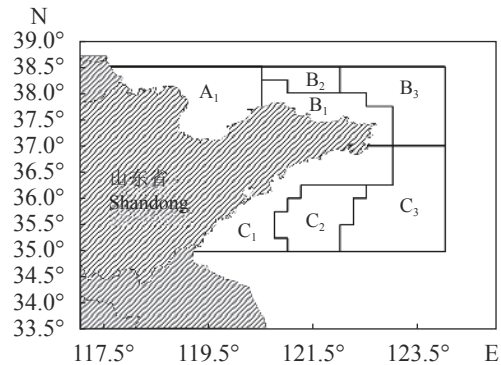


图1 山东近海渔业资源底拖网调查区域

A、B、C表示区域, 下标代表水深, 1. 水深小于30 m, 2. 水深30~50 m, 3. 水深大于50 m

Fig. 1 Study area of bottom trawl survey of fishery resources in the offshore waters of Shandong

A, B and C represent areas, and the subscript represents depth, 1 represents depth less than 30 m, 2 represents depth between 30 and 50 m, 3 represents depth greater than 50 m

每个单元是 $2' \times 2'$, 对所有单元进行插值。该研究中假设插值结果能够真实反映4个鱼种的资源量分布。

1.2 采样设计

比较简单随机抽样、系统抽样和分层随机抽样等共6种采样设计在估计目标鱼种资源量指数方面的表现。采样设计I (SRS)为简单随机抽样, 采用不放回式随机抽样确定调查站位。采样设计II (SYS_r)为常规系统抽样, 其抽样单元为正方形, 各个站位间距离不等, 调查站位在基础单元内的位置相同。采样设计III (SYS_h)为等距系统抽样, 其抽样单元为等边三角形, 各站位间距离相等, 但站位在基础单元内的位置不同。站位预设数与实际站位数的差的绝对值不大于2。采样设计IV (StRS_depth)为基于水深的分层随机抽样, 即根据水深将调查区域分为1区(小于30 m), 2区(30~50 m)和3区(大于50 m)3个层。采样设计V (StRS_region)为基于地理位置的分层随机抽样, 即根据地理位置将调查区域分为A区($37^{\circ}N$ 以北, $120^{\circ}30'E$ 以西的莱州湾及其邻近海域)、B区($37^{\circ}N$ 以北, $120^{\circ}30'E$ 以东的烟威渔场)和C区($37^{\circ}N$ 以南的山东半岛南部海域)3层。采样设计VI (StRS_total)为基于水深和地理位置的分层随机抽样, 把调查区域共分为7层(图1)。本实验分层随机抽样中样本量分配方法为比例分配, 即层内的调查站位数与层面积成正比。

1.3 模拟研究

实验以相对资源量 (g/h) 为调查指标, 使用 Kriging 插值法预测鱼种在调查海域的相对资源量的“真实”分布, 以此计算资源量指数“真值”。对于各采样设计, 对相对资源量插值数据进行重抽样, 样本量范围为 20~200 个调查站位, 间隔为 10。根据模拟数据计算不同采样设计下的各目标鱼种资源量指数估计值, 采用相对估计误差 REE (relative estimation error, REE)^[13, 23] 和相对偏差 RB (relative bias, RB)^[20] 来衡量不同采样设计估计资源量指数的精度和准确度, 比较不同调查采样设计的表现。以准确度变化率 ACR (accuracy change rate, ACR) 衡量 REE 是否显著降低^[18], 确定调查采样设计最优站位数。模拟流程如图 2 所示。

REE 和 RB 的计算公式:

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

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

式中, $Y_i^{\text{estimated}}$ 是根据第 i 次模拟抽样数据计算的资源量指数; Y^{true} 是根据 Kriging 插值数据计算的资源量指数“真值”; R 是模拟抽样次数, 本研究中为 1000 次。

实验基于 100 次重抽样的 REE 均值, 来计算准确度变化率 ACR。ACR 是准确度统计量 (如 REE 或 RB) 的变化量与样本量变化的比值。

$$ACR = (V_{\text{size1}} - V_{\text{size2}}) / (H_{\text{size1}} - N_{\text{size2}}) \times 100\%$$

式中, N_{size1} 、 N_{size2} 代表 2 个不同的样本量, N_{size2} 大于 N_{size1} ; V_{size1} 、 V_{size2} 是不同样本量对应的准确度统计量值, 为 100 次重复计算的 REE

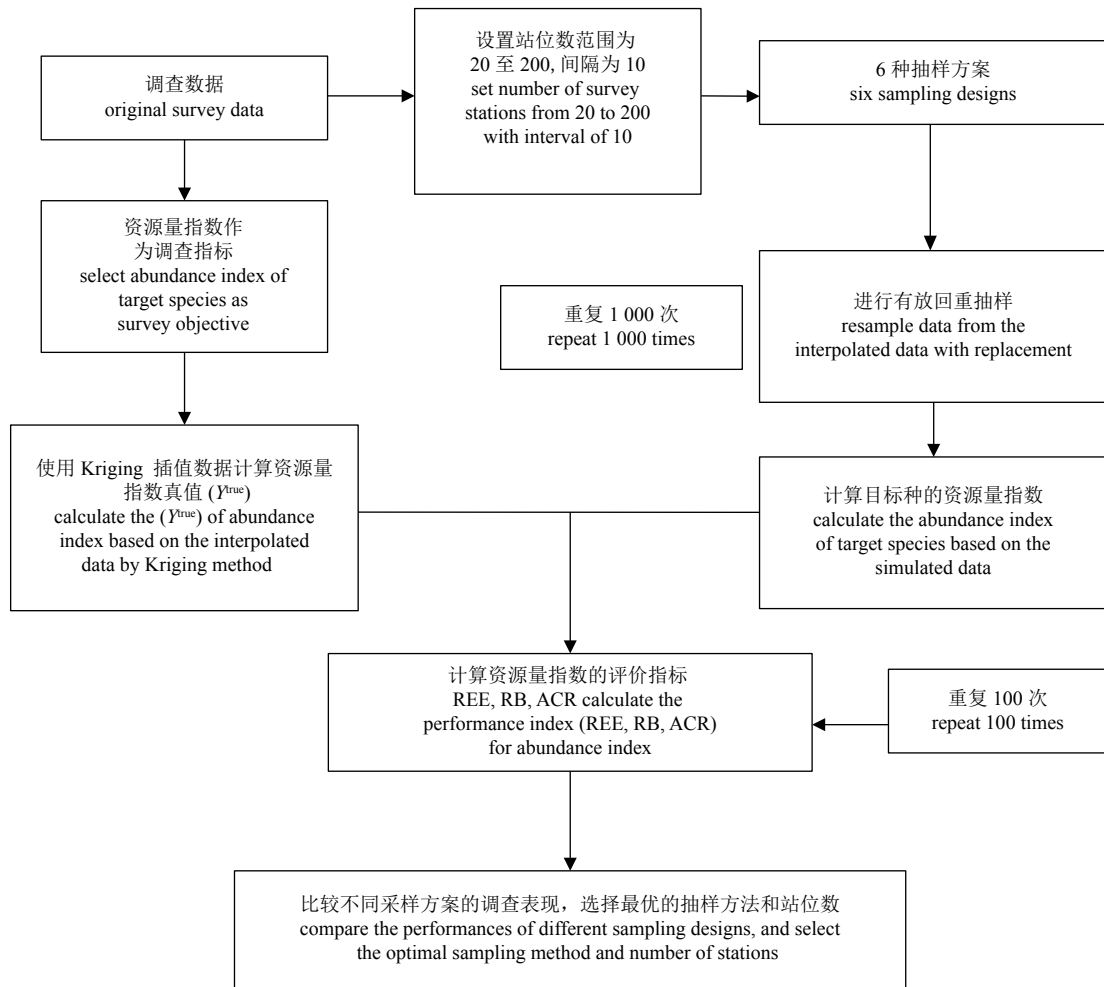


图 2 基于计算机模拟的调查采样设计及优化的模拟流程

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

均值。选取 ACR 值为 10%^[13] 作为确定 REE 显著降低的标准线^[24], 以 ACR 值不大于 10% 的最大站位数作为最优站位数。

2 结果

2.1 不同分层随机抽样方法的 REE、RB 比较

对于各目标鱼种, 各季节中 3 种分层随机抽样估计资源量指数的相对估计误差 (REE) 变化趋势一致, 均随站位数增加而降低。采样设计 VI (StRS_{total}) 的 REE 低于采样设计 IV (StRS_{depth}) 和采样设计 V (StRS_{region})。调查站位数越多, 3 种分层随机抽样的 REE 值越接近。采样设计 VI (StRS_{total}) 是最优分层随机抽样方法 (图 3)。

对于各目标鱼种, 各季节中不同分层随机抽样估计资源量指数的 RB 值 (绝对值) 均随站位数增加而降低, 且变异性降低。3 种分层随机采样设计均是无偏估计, RB 在 0 值附近波动 (图 4)。

2.2 不同采样设计的 REE 比较

采样设计 VI (StRS_{total}) 是表现最好的分层随机抽样, 在不同抽样方法比较时, 3 种分层随机抽样中仅以采样设计 VI 为例。分层随机抽样和简单随机抽样的 REE 值均随站位数增加呈逐渐降低趋势, 系统抽样的 REE 总体上呈降低趋势, 但在样本量较高时其分布呈无规律波动。在相同站位数下, 总体上系统抽样的 REE 最低, 简单随机抽样最高, 两种系统抽样方法的 REE 数值接近 (图 5)。

2.3 不同采样设计的 RB 比较

简单随机抽样和分层随机抽样的 RB 值随站位数增加而降低, 且变化范围减小; 其 RB 值在 0 附近波动, 是无偏估计。系统抽样的 RB 值随站位数增加无一致性变化趋势, 其 RB 分布具有无规律波动, 且多数情况下偏离 0 值, 不是无偏估计 (图 6)。

2.4 准确度变化率 (ACR)

在采样设计 VI (StRS_{total}) 中, 准确度变化率 ACR 均大于 0, 其随站位数增加而逐渐降低 (图 7)。系统抽样设计的 ACR 值随站位数增加未呈现一致性规律 (图 8), 根据 ACR 难以确定系统抽样设计的最优站位数。

综合考虑 4 个目标鱼种的 ACR 分布, 采样

设计 VI (StRS_{total}) 进行四个季度调查的最优站位数可设为 80 (表 1)。

3 讨论

本实验以估计目标鱼种的资源量指数为目标, 比较了 6 种调查采样设计的表现。系统采样设计的 REE 和 ACR 指标随站位数增加呈现无规律波动。除系统采样设计外, 其他采样设计的 REE、RB 均随站位数增加而降低, 且变异性降低。不同季节的 REE 存在一定差异, 尤其对于春季小黄鱼和夏季方氏云鳎两个目标鱼种。

系统采样设计的 REE 随站位数增加无一致性规律, 这与历史研究结论相似^[20, 24-25]。对于无偏估计的采样设计, 调查站位越多, 调查结果越接近真实值^[26]。当目标鱼种分布具有一定规律或趋势时, 若系统采样设计调查站位布设契合目标鱼种的分布规律或者趋势, 估计结果将出现高估或低估^[27]。鱼类常根据自身需要选择适宜的栖息环境^[24], 导致其时空分布存在差异。系统采样设计把调查区域分成多个等面积的基础单元, 系统采样设计的样本量不同时, 其站位空间分布可能差异较大。系统采样设计的 REE 分布呈现无规律波动, 这可能主要与鱼类分布的不均匀和站位位置的变化有关。

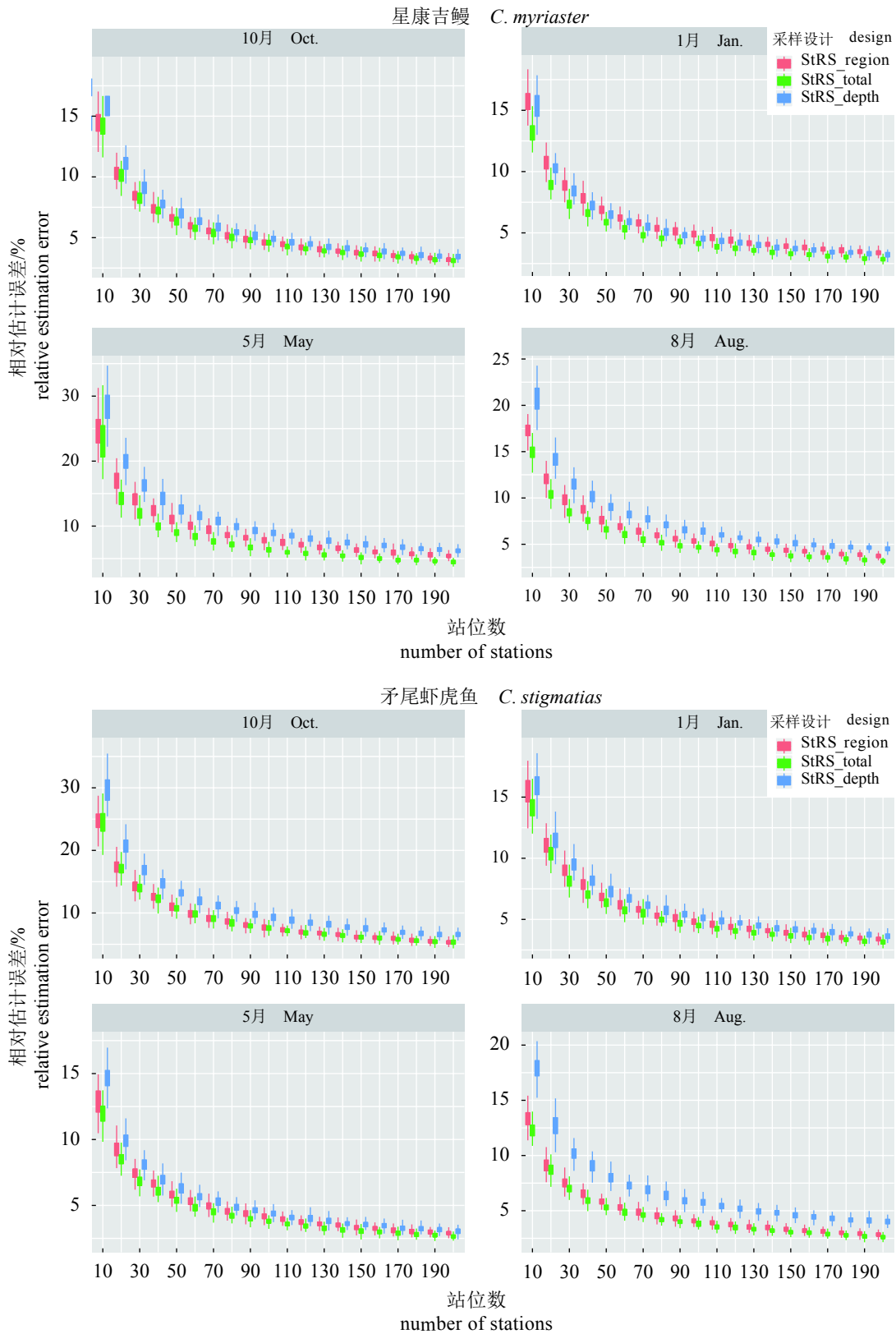
采样设计 VI (StRS_{total}) 具有较低 REE, 是表现最好的分层随机抽样设计。对于海州湾渔业资源调查分层随机采样设计, 综合考虑水深和区域两个因素的方案为最优分层方案^[12, 14]。本实验结果与其类似, 综合考虑水深和区域的分层方案表现更好。合理分层可以有效降低层内变异性, 提高渔业资源调查的准确度, 或者在相同估计准确度时减少调查所需站位数^[10, 14, 26]。水深、水温和底质类型等是影响鱼类分布的重要环境因子^[28-29], 例如水深和底层水温是影响星康吉鳎空间分布的重要因素^[30]。分层设计优化是提高调查效率和资源量指标估计准度的重要途径^[30-31]。

对于相对估计误差, 系统抽样的 REE 最低, 分层随机抽样其次, 简单随机抽样的 REE 最高, 该结果与以往研究结论相似^[20, 25, 32]。分层随机抽样是无偏估计, 其具有更高稳定性; 分层随机抽样的 REE 略高于系统抽样, 但随着站位数增加, 二者差异变小。站位数增加和分层设计优化可以提高调查准确度, 获得具有良好代表性的

样本^[14]。

准确度变化率 ACR 是衡量 REE 变化的评价指

标。采样设计 VI(StRS_total) 的 ACR 随站位数增加先下降而后趋于稳定,这与以往研究一致^[13]。ACR



(图 3 Fig. 3)

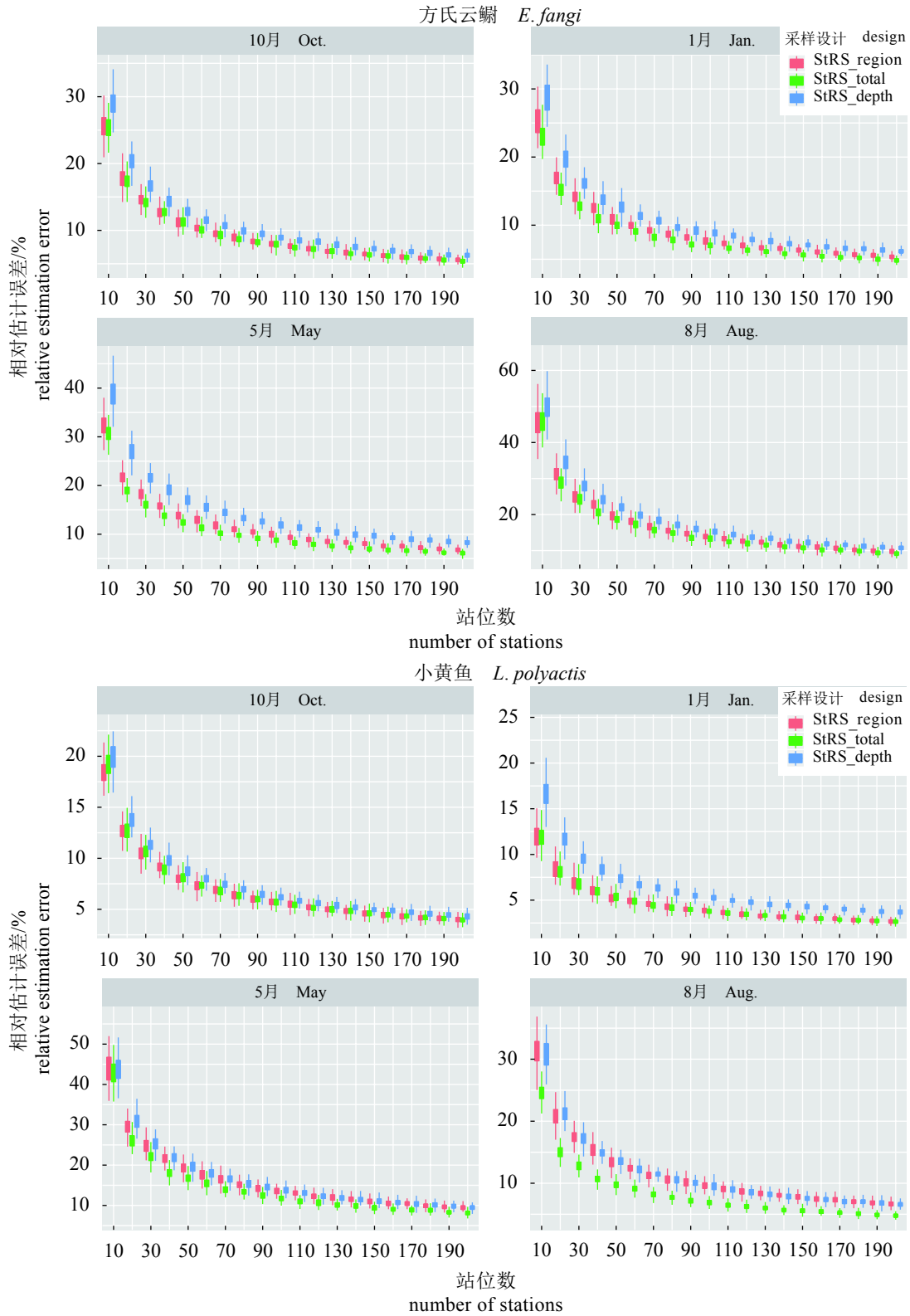


图3 分层随机抽样方法的目标鱼种资源量指数估计 REE

Fig. 3 Relative estimation error of abundance indices of target species for different stratified random sampling designs

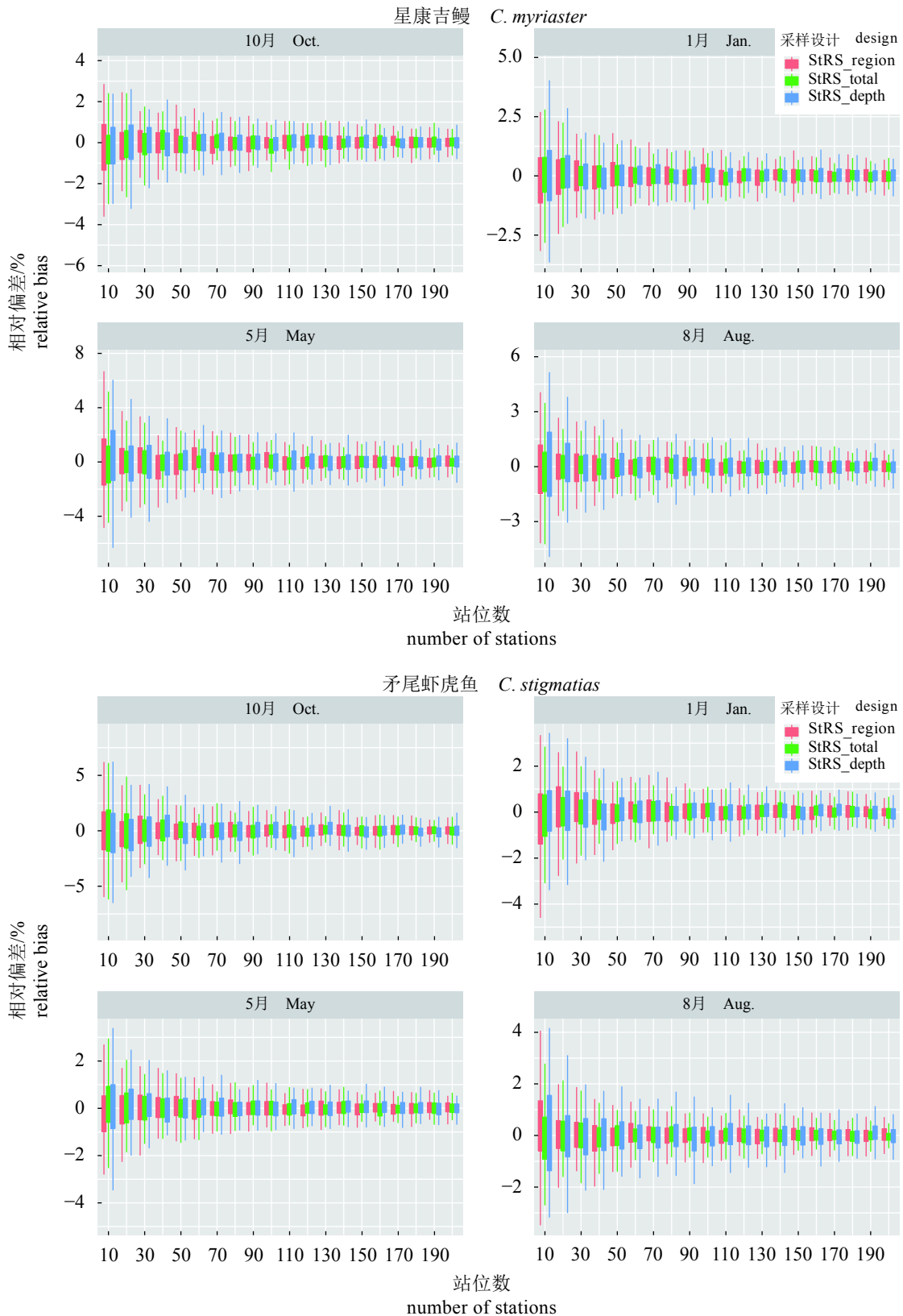
作为量化标准,可以减少主观因素的影响,但该方法不适用于系统抽样调查。最优站位数的

确定,需要结合实际情况和调查目标进行选择。

对于5月小黄鱼和8月方氏云鳎,其资源

量指数估计的 REE 较其他季节高，这可能与其空间分布特征有关。方氏云鳎的生殖洄游导致

其资源分布特征季节差异明显^[33]，小黄鱼在 6 月左右进入渤海各海湾、黄海北部沿岸和海州湾



(图 4 Fig. 4)

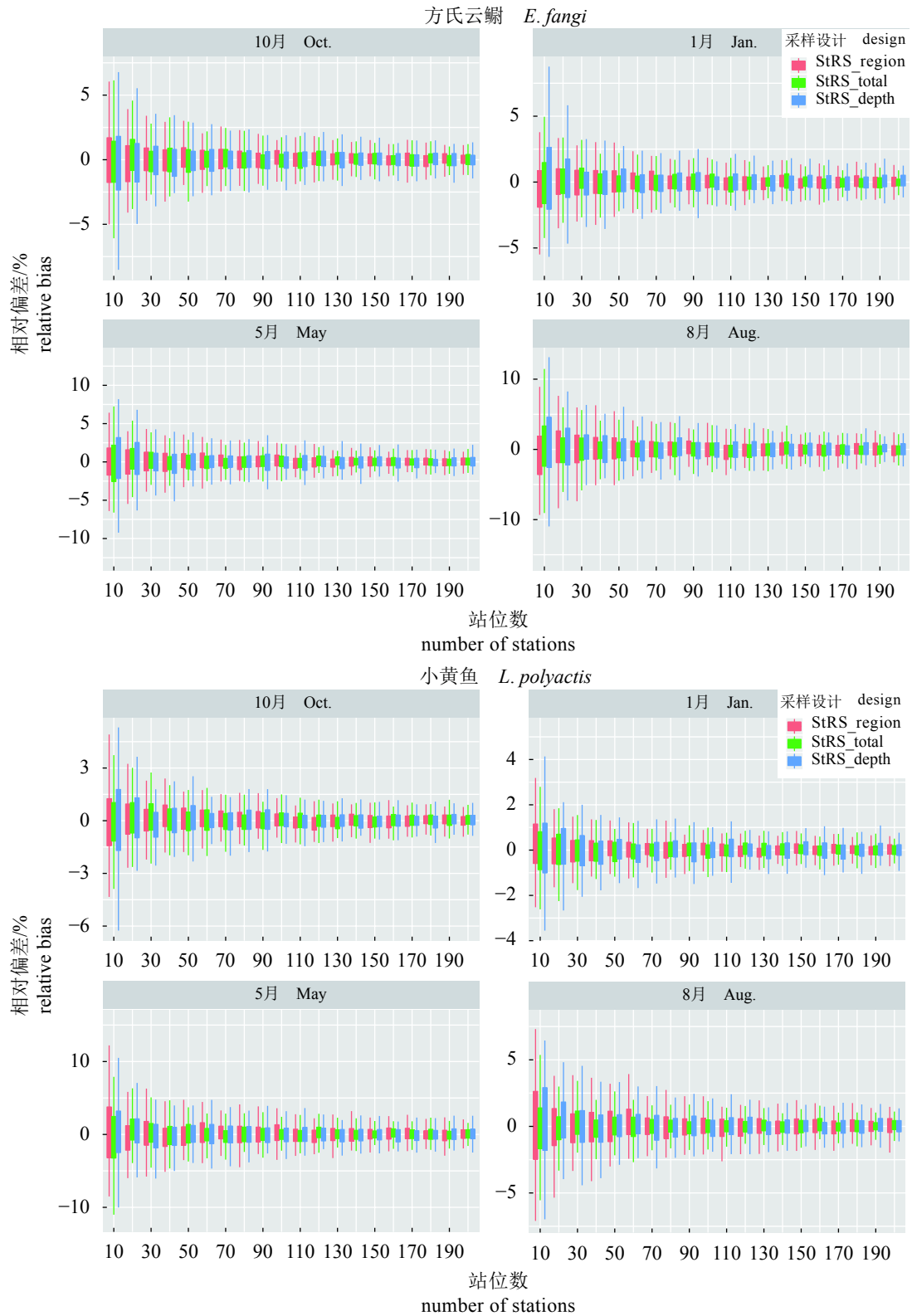


图 4 分层随机抽样方法的目标鱼种资源量指数估计 RB

Fig. 4 Relative bias of abundance indices of target species for different stratified random sampling designs

产卵^[34]。分层设计不能很好地适应上述鱼种在该时期的分布特征, 造成调查估计效果下降, 所

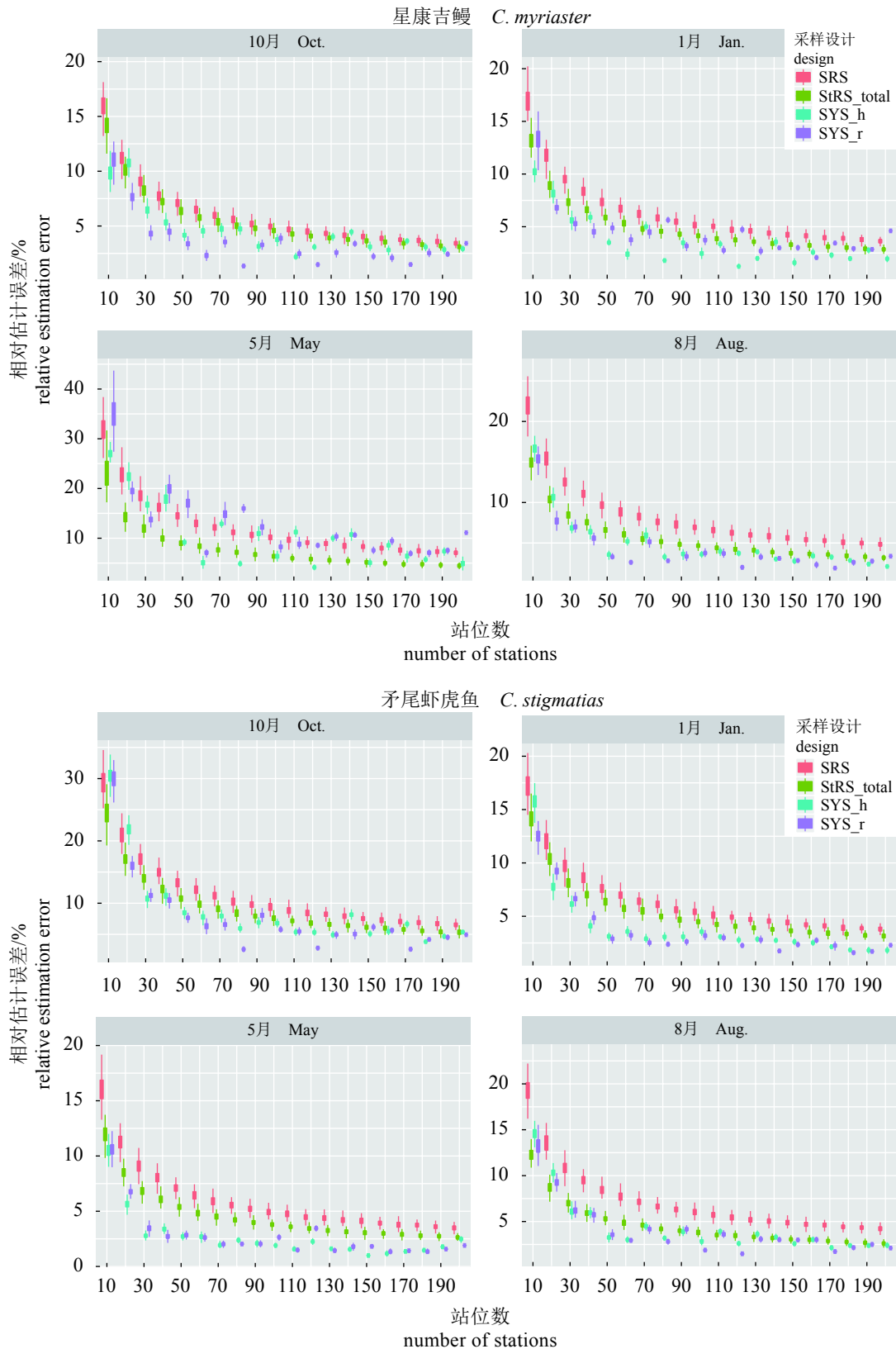
需调查站位数增加^[10, 14]。鱼类生殖、索饵洄游导致鱼类分布特征改变, 会影响调查估计的准确

性，尤其在分层随机采样设计中。

本实验采用的 Kriging 插值法只能逐一模拟

4 个目标鱼种的资源量指数分布，无法同时模拟

所有物种分布，也未考虑物种间的捕食和竞争



(图 5 Fig. 5)

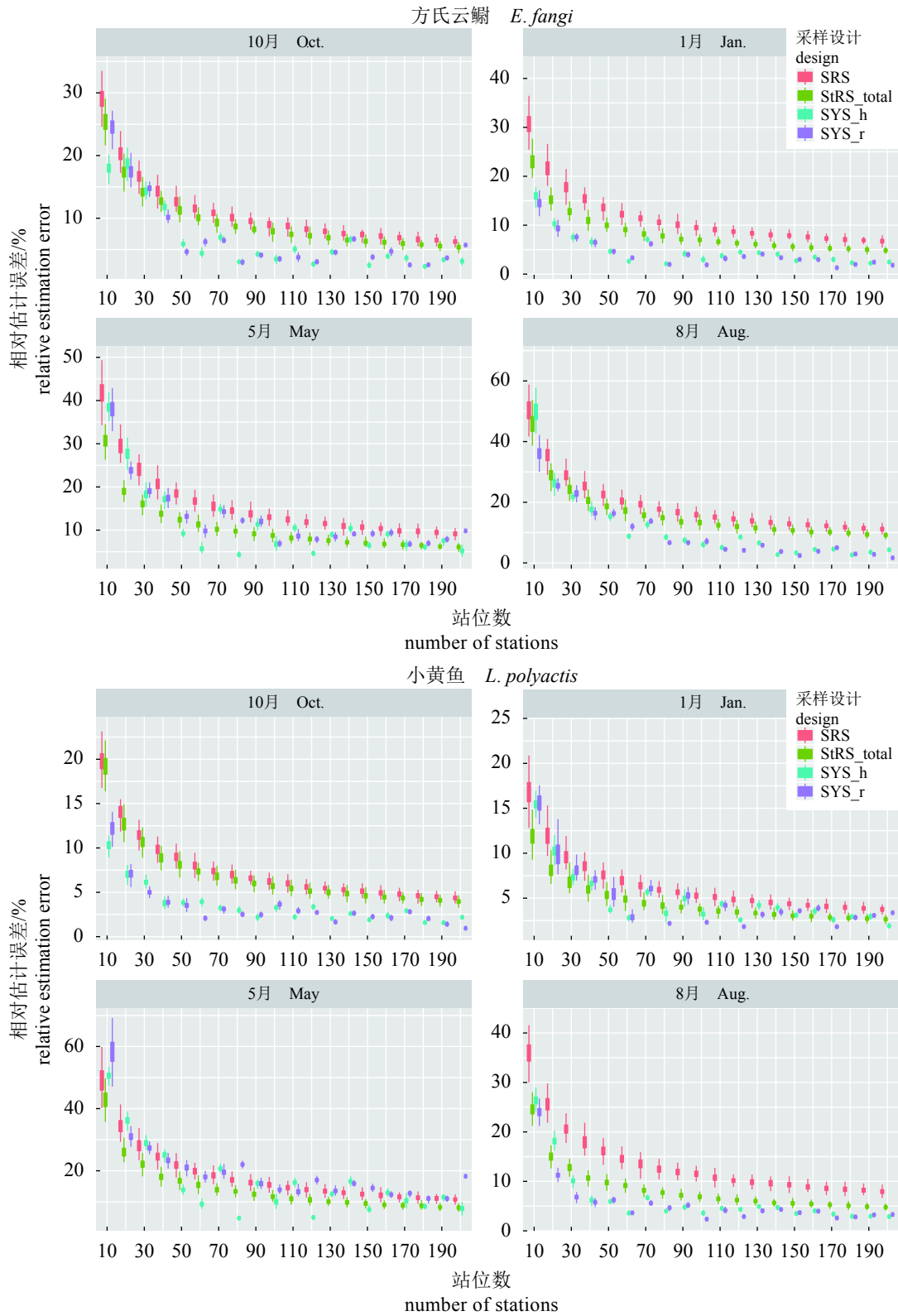


图 5 不同采样设计的目标鱼种资源量指数估计 REE

Fig. 5 Relative estimation error of abundance indices of target species for different sampling designs

关系。联合物种分布模型可以同时模拟多个鱼种资源的空间分布^[16], 但联合物种分布模型对调

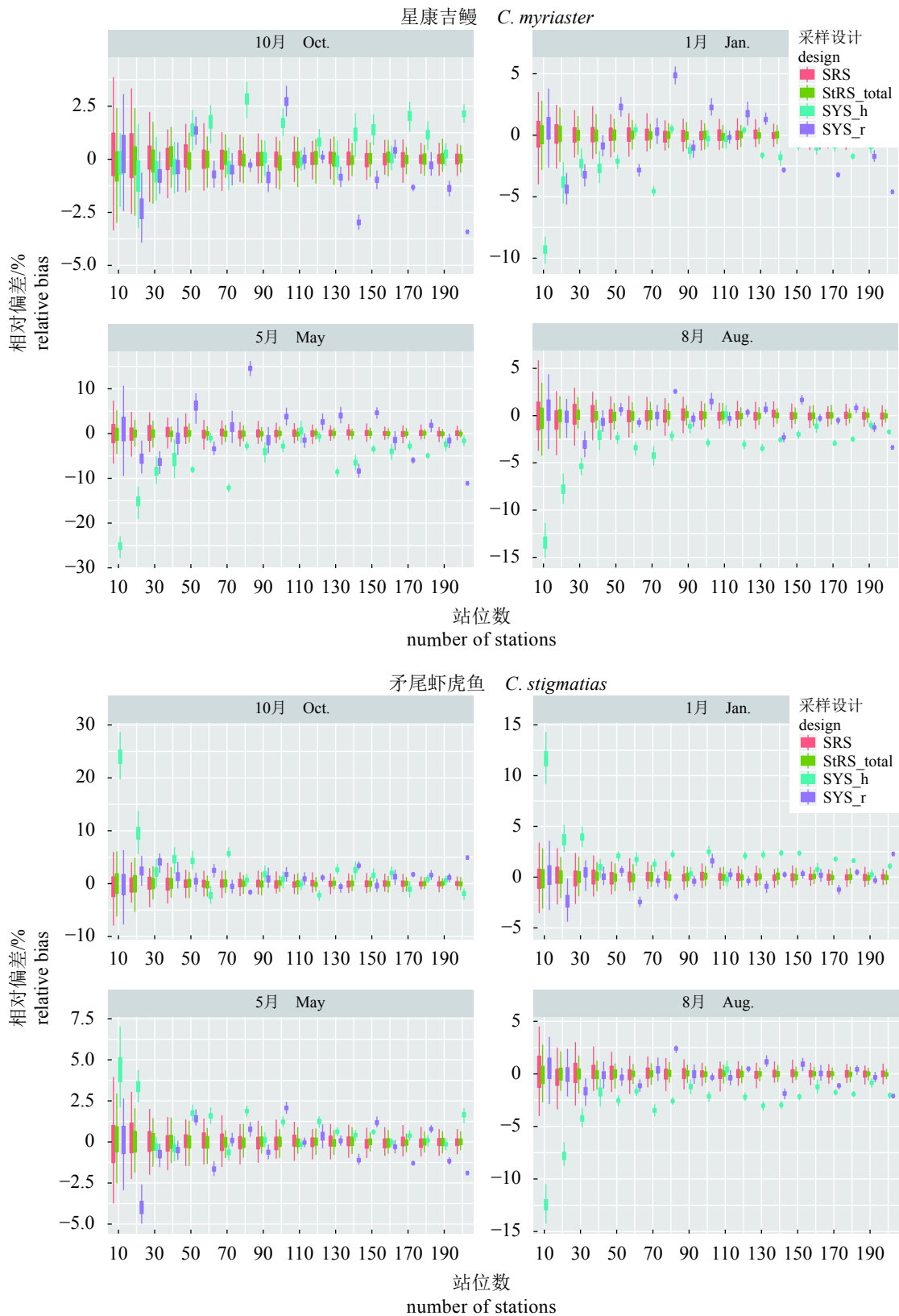
查数据的要求更高。在未来研究中, 当理化环境等数据可用时, 可考虑应用联合物种分布模

型来模拟鱼种资源量分布“真值”。

具有比系统采样更高的稳定性，是最优的采样

分层随机采样的精准度略低于系统采样，

方法。综合考虑区域和地理位置的分层随机采



(图6 Fig. 6)

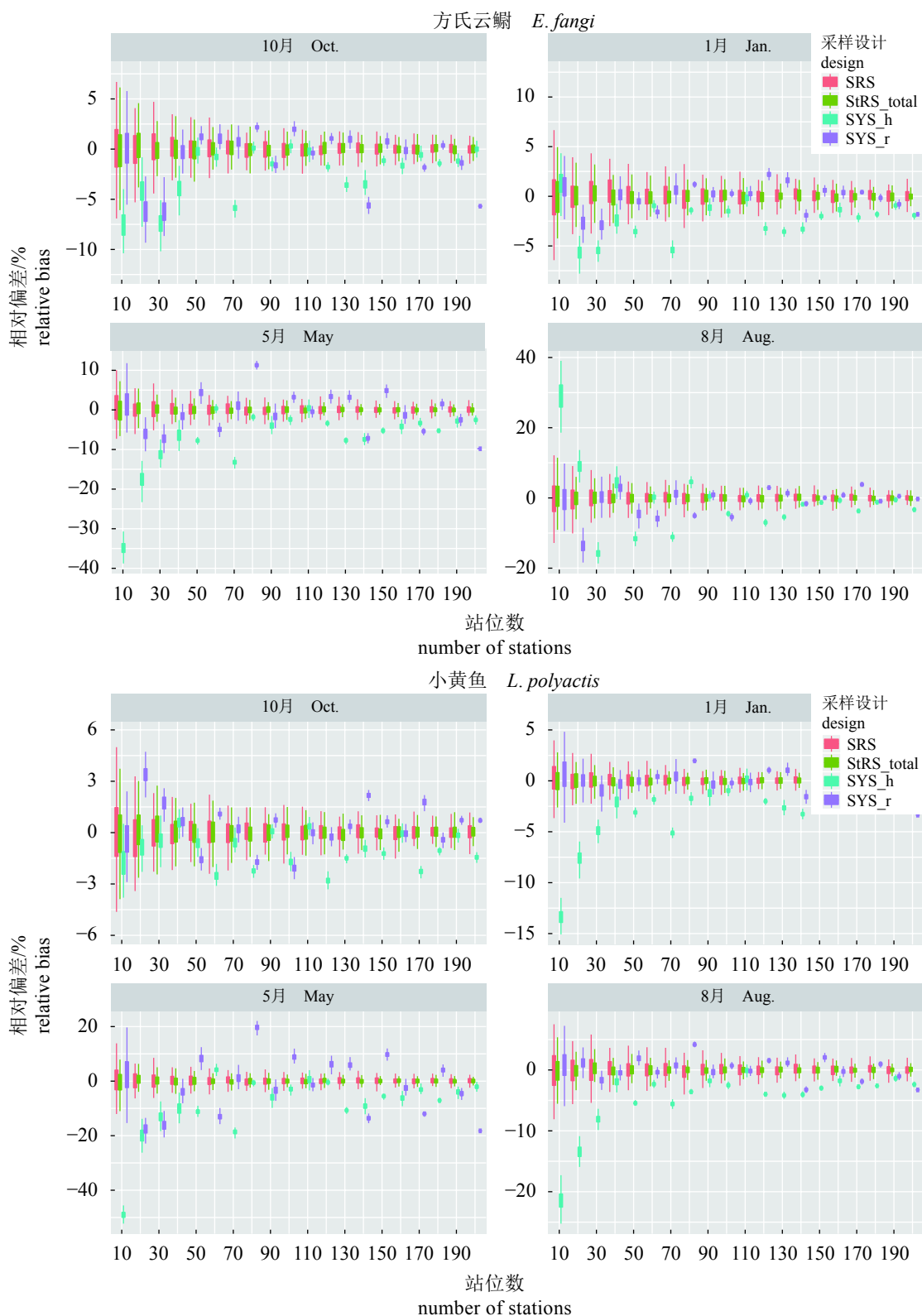


图 6 不同抽样方法的目标鱼种资源量指数估计 RB

Fig. 6 Relative bias of abundance indices of target species for different sampling designs

样是最优的采样设计, 进行山东近海 4 个季度调查的最优站位数可设为 80, 采样设计还有进一步优化的空间。

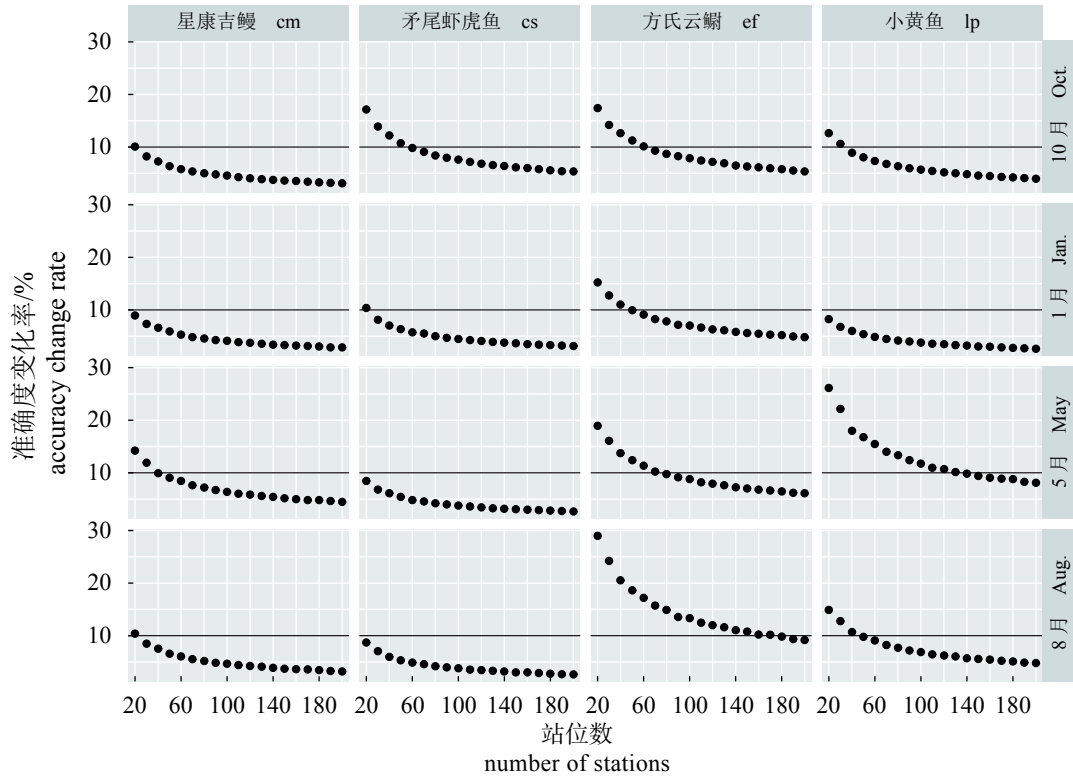


图 7 综合分层随机采样设计的 ACR 值随样本量的变化

Fig. 7 Accuracy change rate (ACR) of stratified random sampling design StRS_total with the sample size

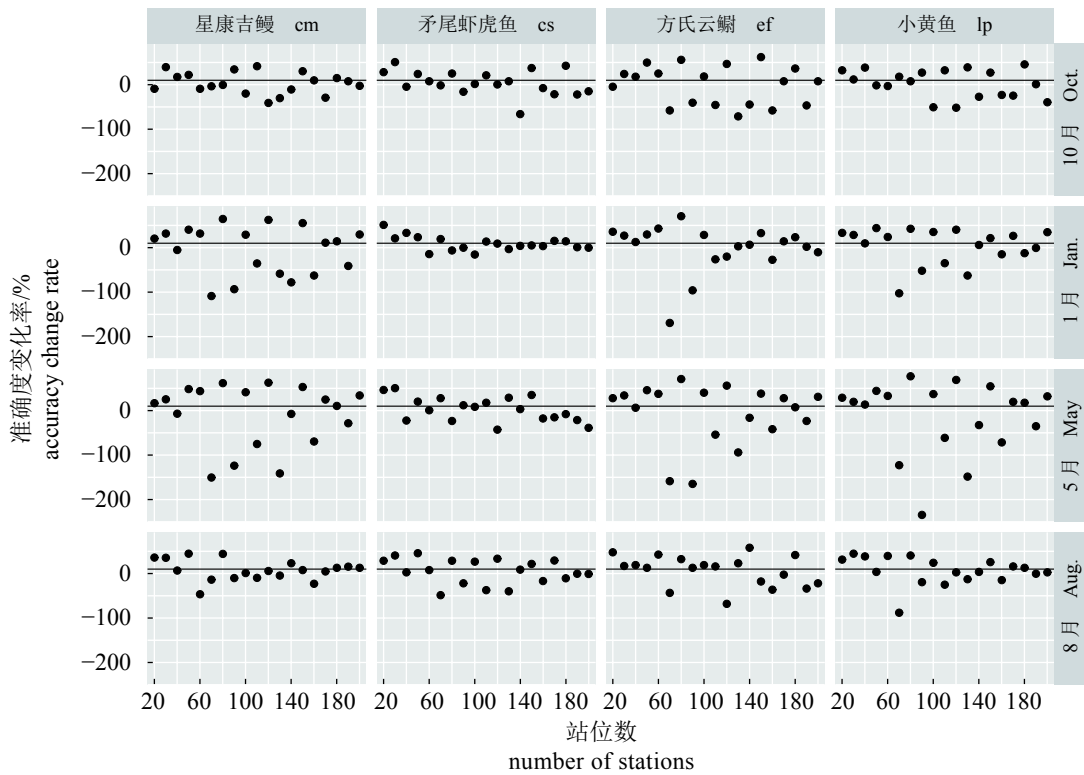


图 8 等距系统抽样采样设计的 ACR 值随样本量的变化

Fig. 8 Accuracy change rate (ACR) of hexagonal systematic sampling design with the sample size

表 1 综合分层随机抽样调查最优站位数

Tab. 1 Optimal number of stations in stratified random sampling design StRS_total				
鱼种 species	10月 Oct.	1月 Jan.	5月 May	8月 Aug.
小黄鱼 <i>L. polyactis</i>	40	20	130	50
星康吉鳗 <i>C. myriaster</i>	20	20	50	30
矛尾虾虎鱼 <i>C. stigmatias</i>	60	30	20	20
方氏云鳎 <i>E. fangi</i>	70	60	80	160

参考文献 (References):

- [1] 栾静, 徐宾铎, 薛莹, 等. 海州湾方氏云鳎体长与体重分布特征及其关系[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(6): 1323-1331.
- Luan J, Xu B D, Xue Y, *et al.* Size distribution and length-weight relationships in *Pholis fangi* in Haizhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(6): 1323-1331(in Chinese).
- [2] 孟宽宽, 王晶, 张崇良, 等. 黄河口及其邻近水域矛尾虾虎鱼渔业生物学特征[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 939-945.
- Meng K K, Wang J, Zhang C L, *et al.* The fishery biological characteristics of *Chaeturichthys stigmatias* in the Yellow River estuary and its adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 939-945(in Chinese).
- [3] 程济生, 俞连福. 黄、东海冬季底层鱼类群落结构及多样性变化[J]. *水产学报*, 2004, 28(1): 29-34.
- Cheng J S, Yu L F. The change of structure and diversity of demersal fish communities in the Yellow Sea and East China Sea in winter[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(1): 29-34(in Chinese).
- [4] 吕振波, 李凡, 王波, 等. 黄海山东海域春、秋季鱼类群落结构[J]. *水产学报*, 2011, 35(5): 692-699.
- Lü Z B, Li F, Wang B, *et al.* Community structure of fish resources in spring and autumn in the Yellow Sea off Shandong[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(5): 692-699(in Chinese).
- [5] 徐宾铎, 金显仕, 梁振林. 秋季黄海底层鱼类群落结构的变化[J]. *中国水产科学*, 2003, 10(2): 148-154.
- Xu B D, Jin X S, Liang Z L. Changes of demersal fish community structure in the Yellow Sea during the autumn[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(2): 148-154(in Chinese).
- [6] Nye J A, Link J S, Hare J A, *et al.* Changing spatial distribution of fish stocks in relation to climate and population size on the Northeast United States continental shelf[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 393: 111-129.
- [7] 金显仕, 唐启升. 渤海渔业资源结构、数量分布及其变化[J]. *中国水产科学*, 1998, 5(3): 18-24.
- Jin X S, Tang Q S. The structure, distribution and variation of the fishery resources in the Bohai Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1998, 5(3): 18-24(in Chinese).
- [8] Mueter F J, Megrey B A. Using multi-species surplus production models to estimate ecosystem-level maximum sustainable yields[J]. *Fisheries Research*, 2006, 81(2-3): 189-201.
- [9] Maunder M N. The relationship between fishing methods, fisheries management and the estimation of maximum sustainable yield[J]. *Fish and Fisheries*, 2002, 3(4): 251-260.
- [10] Miller T J, Skalski J R, Ianelli J N. Optimizing a stratified sampling design when faced with multiple objectives[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2007, 64(1): 97-109.
- [11] Ansari A H, Varshney R, Najmussehar, *et al.* An optimum multivariate-multiobjective stratified sampling design[J]. *Metron*, 2011, 69(3): 227-250.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Wang J, Xu B D, Zhang C L, *et al.* Evaluation of alternative stratifications for a stratified random fishery-independent survey[J]. *Fisheries Research*, 2018, 207: 150-159.
- [15] 张伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 底栖生物生物量空间插值方法研究[J]. *海洋通报*, 2010, 29(3): 351-356.
- Zhang W, Li C H, Jia X P, *et al.* Research on spatial interpolation methods of Macrobenthic biomass[J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(3): 351-356(in Chinese).
- [16] Zhang C L, Xu B D, Xue Y, *et al.* Evaluating multispecies survey designs using a joint species distribution model[J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2020, 5(3): 156-

- 162.
- [17] Xu B D, Zhang C L, 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.
- [18] 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 Y. Theoretical study on the sampling methods of survey for fishery stock estimation[D]. Shang Hai: East China Normal University, 2012.
- [19] 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.
- 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(in Chinese).
- [20] 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.
- [21] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [22] Oliver M A, Webster R. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, 4(3): 313-332.
- [23] 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(3-4): 207-223.
- [24] Jardim E, Ribeiro Jr P J. Geostatistical assessment of sampling designs for Portuguese bottom trawl surveys[J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(3): 239-247.
- [25] 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: 39-50.
- [26] 金勇进, 杜子芳, 蒋妍. 抽样技术[M]. 第4版. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
- Jin Y J, Du Z F, Jiang Y. Sampling techniques[M]. 4th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2015.
- [27] Groves R M, Fowler Jr F J, Couper M P, *et al.* Survey methodology[M]. New York: Wiley-Interscience, 2004: 214-216.
- [28] 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.
- [29] 李明坤, 张崇良, 李敏, 等. 山东南部近海秋、冬季星康吉鳎分布与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(5): 1115-1122.
- Li M K, Zhang C L, Li M, *et al.* Relationship between the spatiotemporal distribution of *Conger myriaster* and environmental factors in the southern waters off the Shandong Peninsula during autumn and winter[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(5): 1115-1122(in Chinese).
- [30] Yu H, Jiao Y, Su Z M, *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.
- [31] Smith S J, Tremblay M J. Fishery-independent trap surveys of lobsters (*Homarus americanus*): Design considerations[J]. *Fisheries Research*, 2003, 62(1): 65-75.
- [32] Royle J A, Nychka D. An algorithm for the construction of spatial coverage designs with implementation in SPLUS[J]. *Computers & Geosciences*, 1998, 24(5): 479-488.
- [33] 李敏, 李增光, 徐宾铎, 等. 时空和环境因子对海州湾方氏云鳎资源丰度分布的影响[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(4): 812-819.
- Li M, Li Z G, Xu B D, *et al.* Effects of spatiotemporal and environmental factors on the distribution and abundance of *Pholis fangi* in Haizhou Bay using a generalized additive model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(4): 812-819(in Chinese).
- [34] 徐兆礼, 陈佳杰. 小黄鱼洄游路线分析[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(6): 931-940.
- Xu Z L, Chen J J. Analysis on migratory routine of *Larimichthys polyactis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(6): 931-940(in Chinese).

Comparison of sampling designs of fishery-independent survey in estimating abundance indices of multiple target species

ZHANG Guosheng¹, WANG Jing², ZHANG Chongliang^{1,3,4}, XUE Ying^{1,3,4},
REN Yiping^{1,3,4}, XU Binduo^{1,3,4*}

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

2. College of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;

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

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

Abstract: Stock assessment and fisheries management need supporting data that can be collected through fishery-dependent or fishery-independent surveys. The main objective of cost-effective fishery-independent survey design is to collect high-quality data with limited survey cost, and optimization of survey design is often conducted to improve the sampling efficiency. In order to compare the performances of different sampling designs in a fishery-independent survey in estimating abundance indices of multiple target species, four fish species with different spatial distributions, including *Larimichthys polyactis*, *Chaemrichthys stigmatias*, *Enedrias fangi* and *Conger myriaster* were selected as target fish species. Relative abundance data collected from the bottom trawl surveys conducted in the offshore waters of Shandong Province in 2016-2017 were used to simulate the spatial distributions of relative abundance of target species using Kriging interpolation method. It is assumed that the interpolated relative abundance data were the 'true' distribution of four target fish species. The simple random sampling (SRS), the regular systematic sampling (SYS_r), the hexagonal systematic sampling (SYS_h), the stratified random sampling with strata defined by depth (StRS_depth), region (StRS_region), and depth and region (StRS_total) were chosen as the potential sampling designs for estimating abundance index of each fish species at different sample sizes from 20 to 200. The relative estimation error (REE) and relative bias (RB) were used to measure performances of different sampling designs. The accuracy change rate (ACR) less than or equal to 10% was set as the standard for determining the optimal sample size. Computer simulation study was used to compare the accuracy and the precision of different sampling schemes in estimating the abundance indexes. The results showed that the estimation accuracy of three sampling methods was different: simple random sampling < stratified random sampling < system sampling. Except for the systematic sampling, estimates of abundance indices of target fish species in other sampling methods were unbiased. The REE values of target species abundance index estimation in systematic sampling fluctuated irregularly with sample size increasing. The ACR was not suitable to determine the optimal sample size for systematic sampling design. The REE for the stratified random sampling was slightly higher than that of systematic sampling, but it showed higher stability. The stratified random sampling was the best sampling method. The stratified random sampling StRS_total could reduce the REE value compared with other two stratified sampling schemes. It was the best stratification scheme. The optimal number of stations for design StRS_total in four seasons could be set at 80. This study also offered references to determine the optimal sampling design for multispecies fishery-independent surveys in other waters.

Key words: multispecies fishery-independent survey; sampling design; abundance index; Kriging interpolation method; computer simulation; offshore waters of Shandong Province

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

Funding projects: National Key R&D Program of China (2018YFD0900904); Marine S & T Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0501-2)