

DOI: 10.12264/JFSC2025-0109

采样设计对广东近海鱼类物种丰富度估计的影响

粟丽^{1,2}, 许友伟^{1,2,3}, 孙铭帅^{1,2}, 张魁^{1,2,3*}, 陈作志^{1,2,3}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;
2. 农业农村部海外渔业可持续利用重点实验室, 广东 广州 510300;
3. 广东省渔业生态与环境重点实验室, 广东 广州 510300

摘要: 准确评估海洋生物多样性是渔业管理和生态保护的基础, 而采样设计的优化对提升物种丰富度估计精度至关重要。本研究基于2014年8月至2015年5月广东近海四季底拖网调查数据, 采用计算机模拟重抽样技术, 对比分析简单随机采样(SRS)与分层随机采样(StRS)在不同站点数和采样频次下对鱼类物种丰富度估计的影响。结果表明, 物种丰富度探测率在低采样站点数时呈现快速上升趋势, 但随着站点数量的增加, 其增速逐渐减缓。达到90%的物种探测率, 全年四季采样需44个需采样站点; 实现80%探测率, 三季采样夏-秋-冬或夏-秋-春组合所需站点数最少, 为36个。相对估计误差(REE)和相对偏差(RB)的绝对值均随站点数增加而递减。StRS的REE和RB绝对值显著低于SRS ($P<0.05$)。剔除稀有种后, 达到90%探测率所需的样站点数减少至20个, 且REE和RB绝对值也显著降低 ($P<0.05$), 表明稀有种的存在增加了抽样变异性。15种采样组合的分层采样设计效应(D_c)均小于1, 表明StRS在广东近海渔业资源调查中具有更高的采样效率, 尤其在采样站点数较少时更为明显。本研究为优化广东近海渔业资源调查的采样设计提供了科学依据, 建议根据监测精度需求与成本约束, 合理选择站点数与季节组合。

关键词: 渔业调查; 简单随机采样; 分层随机采样; 物种丰富度; 广东近海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)07-0981-15

广东近海位于南海北部陆架海域, 受珠江径流、暖流及沿岸上升流的影响, 渔业资源丰富, 生物多样性高。近年来, 在过度捕捞、气候变化和海洋污染等多重压力影响下, 广东近海渔业资源生物量下降^[1], 典型生态系统不稳定性增强^[2]。资源评估结果显示, 广东海洋渔业资源最大可持续产量(maximum sustainable yield, MSY)约为 164×10^4 t, 1996—2006年捕捞产量超过MSY, 导致带鱼等重要经济鱼类遭受到过度捕捞^[3]。捕捞强度的持续增加会加剧海洋生态系统的破坏, 导致海洋生物多样性及物种丰富度降低^[4]。物种丰富度是衡量生态系统健康的核心指标, 准确评估

该海域的鱼类物种丰富度对于渔业管理和生态保护具有重要意义。然而, 由于采样设计的差异, 物种丰富度的估计结果可能存在较大偏差。

渔业资源调查采样设计方法学发展经历了从传统经验性采样到现代优化设计的演进过程。Buckland等^[5]开创性地将自适应采样技术引入渔业资源调查领域, 而近年来, 随着计算机模拟技术的应用, 采样设计优化研究取得了突破性进展。当前主流的采样设计方法包括定点采样(fixed-site sampling, FS)、简单随机采样(simple random sampling, SRS)、分层随机采样(stratified random sampling, StRS)、系统采样(systematic sampling, SS)

收稿日期: 2025-04-17; 修订日期: 2025-07-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2400402); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2025A1515011979); 中国水产科学研究院南海水产研究所基本科研业务费专项资金项目(2025RC01); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD05).

作者简介: 粟丽(1985-), 女, 助理研究员, 研究方向为海洋渔业生态学. E-mail: suli@scsfri.ac.cn

通信作者: 张魁, 副研究员, 研究方向为渔业资源保护及利用. E-mail: zhangkui@scsfri.ac.cn

和整群采样(cluster sampling, CS)等^[6]。大量研究表明, 这些方法各具优势与局限性^[7-9]。有研究发现分层随机采样通过科学分层、合理分配站点来提高采样的精确度和稳定性^[10-12], 而系统采样在某些特定场景下可能表现更优^[13]。因此, 在实际调查中需要综合考虑渔业资源空间异质性和研究目标来选择适宜的调查方法。此外, 采样效果还受样本量大小的影响, 通常样本量越大, 调查数据的准确性和代表性越高^[14-15]。但在实际调查过程中, 需综合考虑成本、时间、人力等资源限制, 在保证数据精度的前提下, 寻求样本量与调查效率的最佳平衡点。

南海北部近海海域鱼类种类繁多, 2014—2015 年四季调查共记录鱼类 466 种^[16]。研究发现广东近海 260 m 以浅海域鱼类群落具有沿水深呈带状分布的特点, 分布格局主要由温度、盐度和水深梯度等差异引起, 其中水深可作为鱼类群落划分的主要指标^[17]。基于此, 以往的调查多采用沿水深断面的站点布设方案。目前, 以物种丰富度为优化目标的采样设计已有相关报道^[18-20], 然而, 针对广东近海这一复杂生态系统的采样方法优化研究尚属空白。本研究基于 2014—2015 年广东近海四季底拖网调查数据, 通过计算机模拟重

抽样实验, 系统比较不同采样方法在不同站点数和采样频次下的性能表现, 并探讨了剔除稀有物种时的采样设计方案, 旨在评估在确保常见种监测精度的前提下减少对稀有种的调查投入来降低采样成本的可行性, 以期为广东近海渔业资源监测体系的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据源自 2014 年 8 月(夏季)、2014 年 10 月(秋季)、2015 年 2 月(冬季)和 2015 年 5 月(春季)广东近海海域渔业资源底拖网调查。调查海域范围为 19.12°N—23.29°N、110.70°E—117.21°E, 覆盖大陆架至陆坡区(水深 10~200 m)。调查布设了 5 个断面, 每个断面 9 个站点, 合计 45 个占站点(图 1), 基本覆盖了广东近海的生境类型。调查使用渔船主机功率为 441 kW, 船长 36.8 m。底拖网网具网囊网目尺寸为 40 mm, 拖曳时间为 60 min, 拖速约为 3.0 n mile/h。渔获物现场鉴定至种(或属/科), 并记录体长、体重等生物学参数。所有调查采样均遵循《海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)。

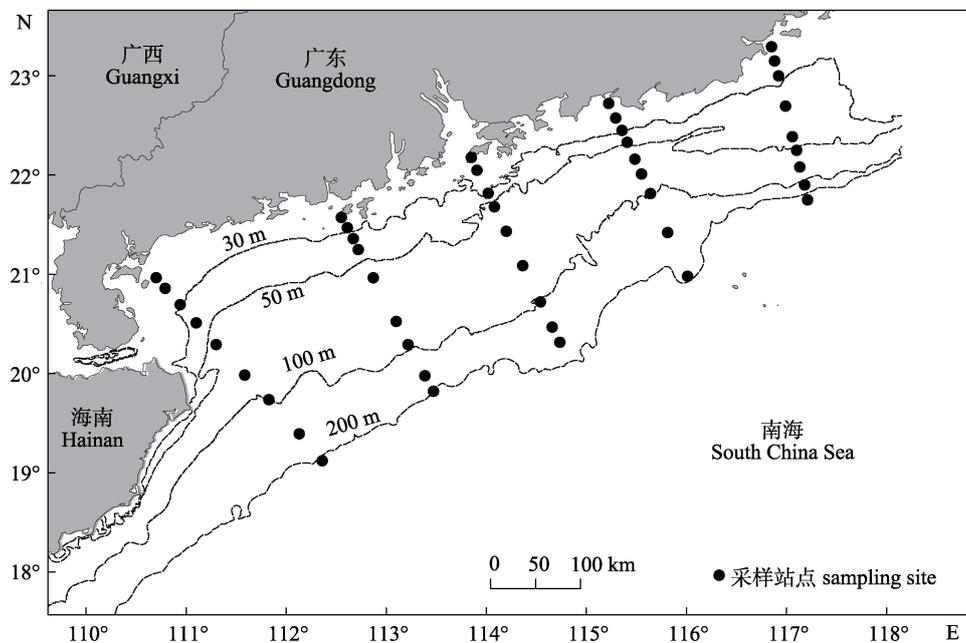


图 1 广东近海渔业资源调查站点

Fig. 1 Sampling sites for the offshore fishery resources survey of Guangdong

1.2 采样设计

1.2.1 采样方法 简单随机采样: 在 45 个调查站点中依次随机选择抽取 8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48 和 52 个采样站点。抽取过程中采用有放回随机抽样法。分层随机采样: 按水深梯度分为 4 层(A: <30 m、B: 30~50 m、C: 50~100 m、D: 100~200 m), 其中 A、B、C、D 层站点数分别为 10、11、12 和 12 个, 依据层内

站点比例分配样本量(表 1)。其中, 在 36~52 个站点的抽样过程中, 会出现需要从 C 层和 D 层同等概率抽取一个站点的情况。

1.2.2 采样频次设计 设置 15 种季节组合模式, 分别为 1 次/年(夏季、秋季、冬季、春季)、2 次/年(夏-秋、夏-冬、夏-春、秋-冬、秋-春、冬-春)、3 次/年(夏-秋-冬、夏-秋-春、夏-冬-春、秋-冬-春)和 4 次/年(夏-秋-冬-春)。

表 1 广东近海渔业资源调查分层抽样设计中各层的站点数设置

Tab. 1 Stratum-specific sampling effort allocation in the stratified random sampling design for Guangdong coastal fishery survey

分层 stratum	站点数 number of sites											
	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8
A	12	11	10	9	8	7	7	6	4	4	3	2
B	13	12	11	10	9	7	7	6	5	4	3	2
C	14(13)	12(13)	11(12)	10(11)	9(10)	9	7	6	5	4	3	2
D	13(14)	13(12)	12(11)	11(10)	10(9)	9	7	6	5	4	3	2

注: 表中带括号表示在 C、D 2 层的随机抽样站点数也可能为括号内的数。

Note: the brackets in the table indicate that the number of randomly sampled stations in layers C and D may be the number within the brackets.

1.3 模拟流程

本研究假设调查渔获的鱼类物种数为“真值”。采用 2 种抽样方法, 按照抽样设计的站点数和频次, 对原始数据进行有放回重抽样, 统计重抽样调查所获得的鱼类物种数, 该过程重复 1000 次。根据重抽样所获得的物种数与调查渔获总物种数进行比较, 计算重抽样调查物种丰富度探测率。利用相对估计误差(relative estimation error, REE)和相对偏差(relative bias, RB)衡量不同采样设计对鱼类物种数估计的准确度和精确度。选取物种丰富度探测率相对较高而相对估计误差和相对偏差绝对值相对较小的采样设计为最佳采样方案。本研究针对广东近海鱼类群落中稀有种(出现频率<5%且仅分布于 1~2 个采样点)比例较高的特点, 设计了包含全部物种和剔除稀有种 2 种采样优化方案, 旨在评估在确保常见种监测精度的前提下, 通过减少对稀有种的调查投入看能否有效降低采样成本。

1.4 采样设计效果评价

鱼类物种丰富度探测率(species richness detectability)为某次抽样调查所获得的物种数占

调查海域“真实”物种数的比例, 计算公式如下:

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

式中, P 为物种丰富度探测率, S 为某次重抽样调查所获的物种数, S^{true} 为调查海域“真实”物种数。

相对估计误差(relative estimation error, REE)用来评价估计值的精度和准确度, 计算公式如下^[21]:

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

式中, S^{true} 为调查区域“真实”物种数, $S_i^{estimated}$ 为第 i 次重采样所获得的鱼类物种数, R 为重抽样次数(本研究为 1000 次)。

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, 计算公式如下^[22]:

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

式中各符号含义同上。

设计效应(design effect, D_e)用于衡量不同采样设计效果, 其常以简单随机采样为基准, 计算

公式如下^[23]:

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

式中, $\bar{v}_k(\hat{\theta})$ 表示采用特定采样设计时估计量的方差; $\bar{v}_{SRS}(\hat{\theta})$ 表示相同样本量下, 简单随机抽样(SRS)的估计量方差。若 $D_e > 1$, 表明当前采样设计的估计效率低于简单随机抽样, 即精度较差; 若 $D_e < 1$, 则表明当前设计优于简单随机抽样, D_e 越小, 采样效果越好。

探测率、相对估计误差、相对偏差和设计效应分析均在 R 语言中进行; 采用 t 检验进行相关参数差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 鱼类种类组成

四季调查共记录鱼类生物 420 种, 隶属 2 纲 24 目 119 科 240 属, 其中夏季 258 种、秋季 295 种、冬季 219 种、春季 238 种。四季调查占鱼类总渔获量 2% 以上的种类为深水金线鱼 (*Nemipterus bathybius*)、美软鱼 (*Malakichthys griseus*)、短尾大眼鲷 (*Priacanthus macracanthus*)、发光鲷 (*Acropoma japonicum*)、多齿蛇鲻 (*Saurida tumbil*)、黄鳍马面鲀 (*Thamnaconus hypargyreus*)、高体若鲂 (*Caranx equula*)、竹筴鱼 (*Trachurus japonicus*)、刺鲷 (*Psenopsis anomala*)、带鱼 (*Trichiurus japonicus*)、二长棘犁齿鲷 (*Evyynnus cardinalis*)、弓背鰐齿鱼 (*Champsodon atridorsalis*)、条尾绯鲤 (*Upeneus bensasi*)、六指马鲛 (*Polynemus sextarius*)、蓝圆鲂 (*Decapterus maruadsi*)、圆鳞发光鲷 (*Acropoma hanedai*)、单角革鲀 (*Alutera monoceros*) 和日本金线鱼 (*Nemipterus japonicus*)。剔除出现频率小于 5% 的稀有鱼类后, 夏季 157 种、秋季 176 种、冬季 93 种、春季 123 种, 四季共 250 种。

2.2 物种丰富度探测率

2.2.1 全物种 在 15 种采样设计中, 物种丰富度探测率均随采样站点数量的增加逐渐升高(图 2)。调查站点数较少时, 物种丰富度探测率上升速度较快, 随着站点数的增加, 上升速度逐渐趋于平

缓。t 检验结果显示, 分层随机采样的探测率显著高于简单随机采样($P < 0.05$)。物种丰富度探测率随着采样频次的增加持续上升。相同调查频次下, 不同季节组合的采样效果存在差异: 一年 1 次采样时, 秋季效果最佳; 一年 2 次采样时, 夏-秋组合效果最优; 一年 3 次采样时, 夏-秋-冬和夏-秋-春组合表现最佳。

一年 4 次采样, 探测率要达到 90%, 分层和简单随机采样均需 44 个站点; 若要达 80%, 站点数可减少至 28 个。一年 3 次采样, 若要达 80% 探测率, 夏-秋-冬和夏-秋-春组合需 36 个, 而夏-冬-春和秋-冬-春组合需 44 个站点。一年 2 次采样, 若要达 70% 探测率, 夏-秋组合所需站点数最少, 为 36 个, 其他组合基本需 44 个。

2.2.2 剔除稀有种 剔除稀有种后, 物种探测率初期上升速度更快, 达到一定值后增速逐渐趋缓, 其中分层随机采样上升速度较简单随机采样快(图 3)。一年采样 1 次时, 秋季的探测率最高, 探测率达 60%, 采样站点仅需 16 个; 采样 2 次时, 夏-秋季组合的探测率最高, 探测率达 80%, 采样站点仅需 20 个; 采样 3 次时, 夏-秋-春季组合的探测率最高, 探测率达 90%, 采样站点仅需 24 个。相比之下, 一年采样 4 次时, 探测率达到最高, 探测率达 90%, 采样站点仅需 20 个。

2.3 相对估计误差

2.3.1 全物种 在 15 种采样设计中, 物种丰富度探测率的 REE 值均随采样站点数的增加而逐渐减小(图 4)。调查站点数较少时, REE 值下降速度相对较快, 随着站点数的增加, 其下降速度趋于平缓。相同站点数下, 随着采样频次的增加 REE 值逐渐减小。

分层随机采样和简单随机抽样的 REE 值均随站点数的增加而逐渐下降。分层随机采样的 REE 值在采样站点数较少时与简单随机采样差异较明显, 然而随着采样站点数的增加, 两者的差异越来越小。采样频次分别为 1、2 和 3 次时, 秋季、夏-秋、夏-秋-冬和夏-秋-春的 REE 值相对较小。

2.3.2 剔除稀有种 剔除稀有种后, REE 值初期下降速度更快, 降低到一定值后趋缓(图 5)。在相同调查频次和站点数条件下, 分层随机采样的

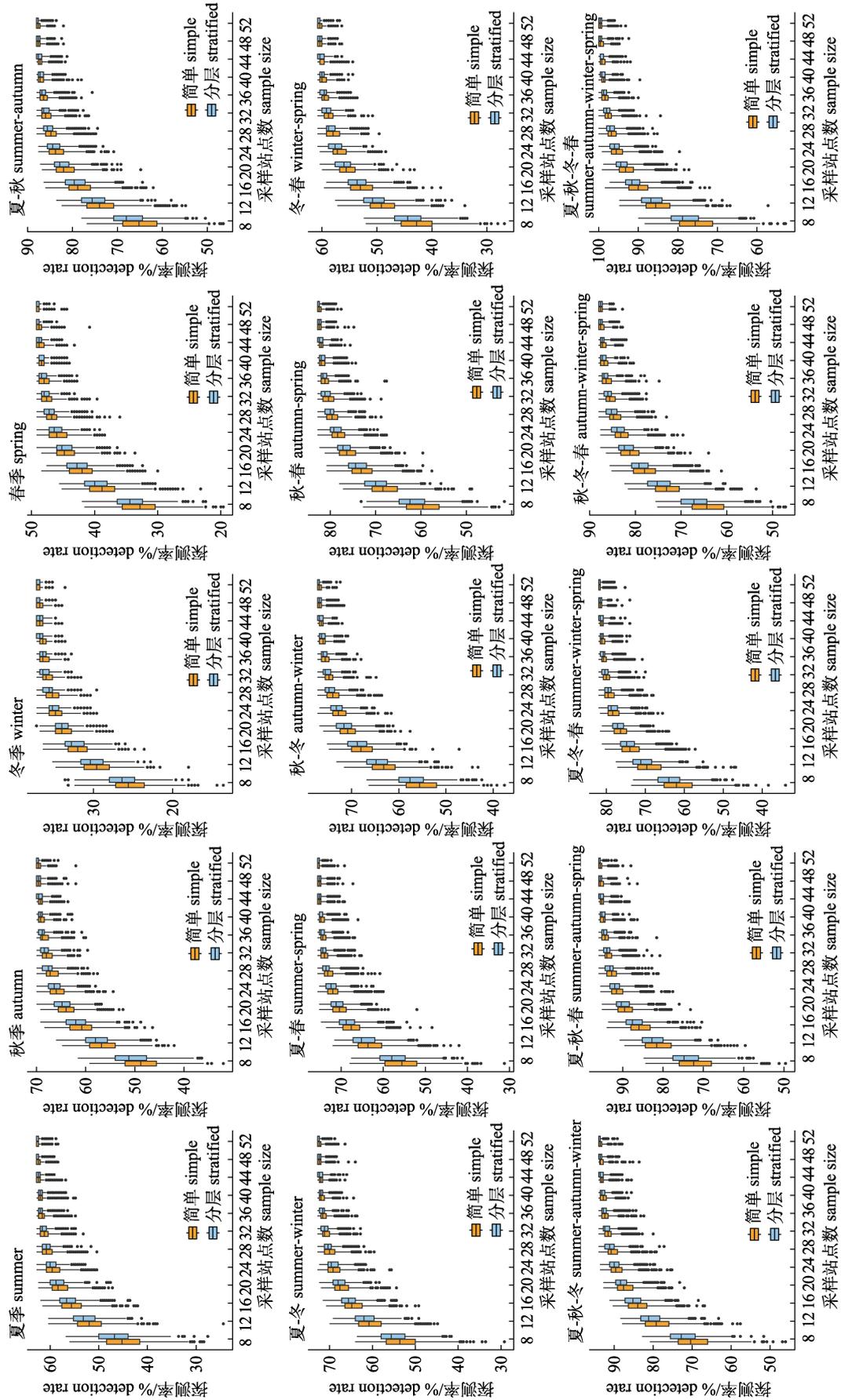


图 3 剔除稀有物种后不同采样设计的物种丰富度探测率
 Fig. 3 Species richness detection rates of different sampling designs after rare species were excluded

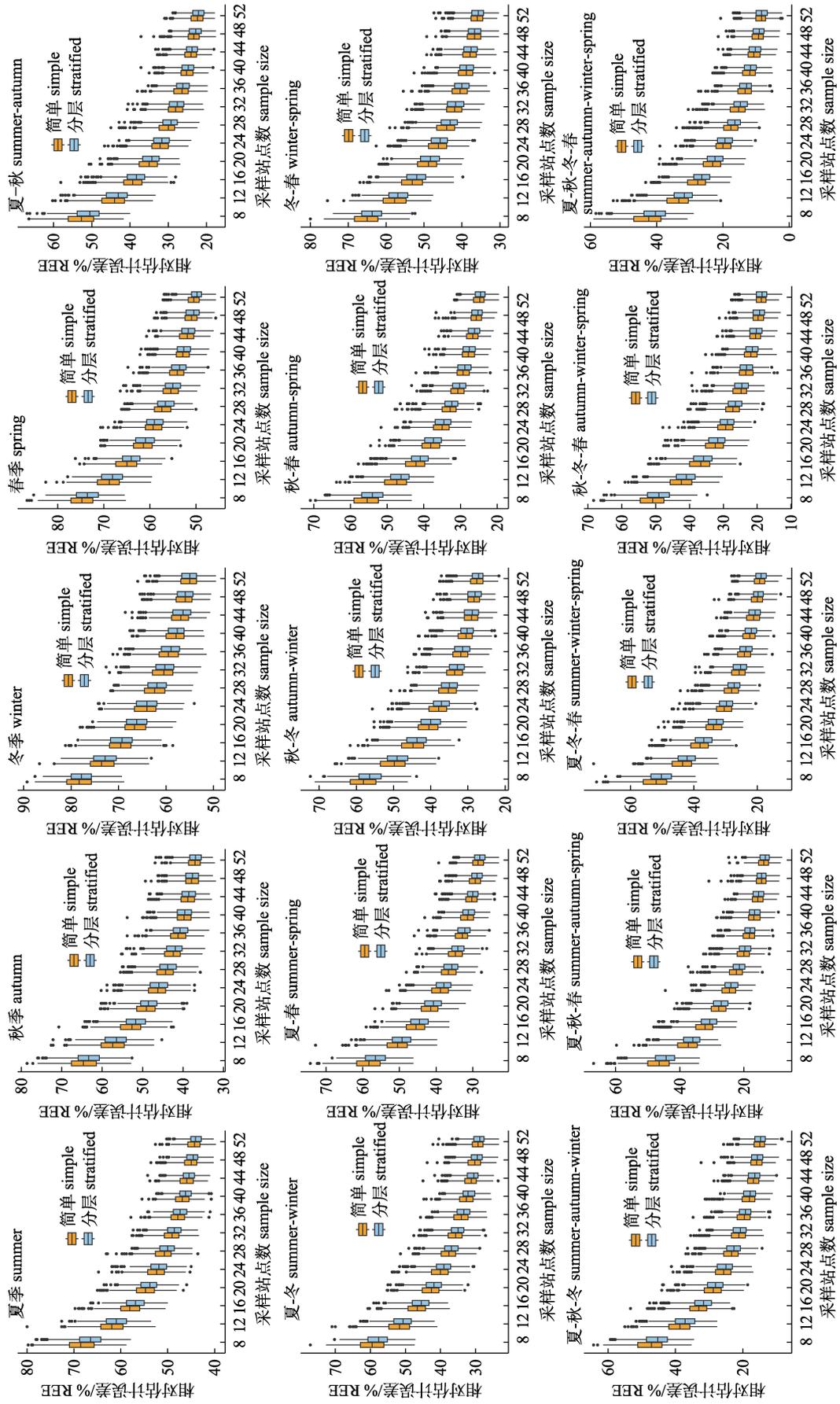


图 4 不同采样设计的相对评估误差
Fig. 4 Relative evaluation errors of different sampling designs

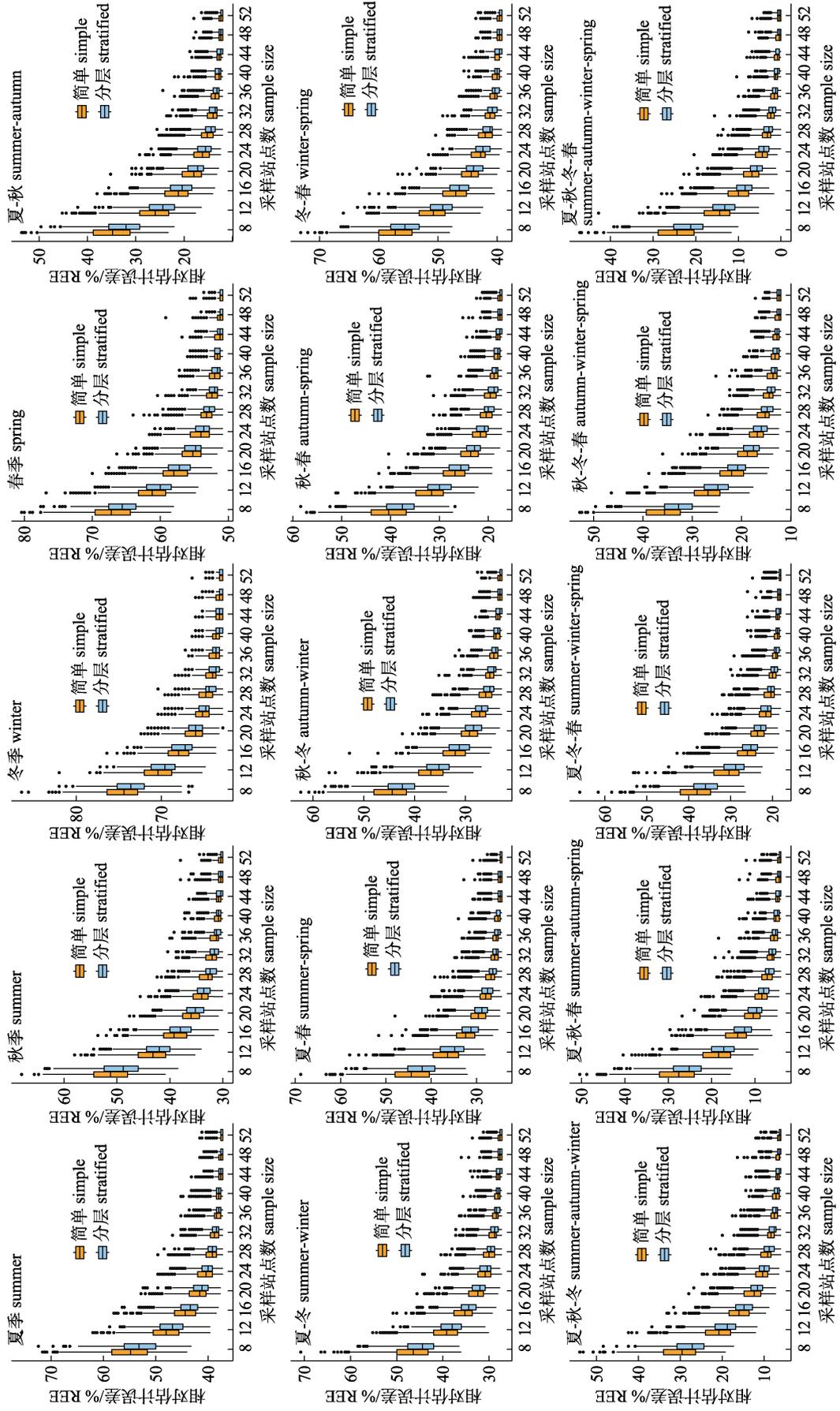


图 5 剔除稀有物种后不同采样设计的相对评估误差
 Fig. 5 Relative evaluation errors of different sampling designs after rare species were excluded

REE 值低于简单随机采样。当一年采样 1 次时, 秋季的 REE 值最小; 采样 2 次时, 夏-秋季组合的 REE 值最小; 采样 3 次时, 夏-秋-春季组合的 REE 值最小。相比之下, 一年采样 4 次时, REE 值达到最小。

2.4 相对偏差

2.4.1 全物种 在 15 种采样设计中, 物种丰度探测率的 RB 值均随采样站点数的增加而逐渐增大(图 6)。调查站点数较少时, RB 值上升速度较快, 随站点数的增加, 其变化趋于平缓。在相同站点数下, 采样频次越多, RB 值相对越大。分层随机采样的 RB 值在站点数较少时明显高于简单随机采样, 但随着采样站点数的增加, 两者的差异逐渐减小。采样频次分别为 1、2 和 3 次时, 秋季、夏-秋、夏-秋-冬和夏-秋-春的 RB 值相对较大。

2.4.2 剔除稀有种 剔除稀有种后, RB 值初期上升速度更快, 达到一定值后增速逐渐趋缓(图 7)。在相同调查频次和站点数条件下, 分层随机采样的 RB 值高于简单随机采样。当一年采样 1 次时, 秋季的 RB 值最大; 采样 2 次时, 夏-秋季组合的 RB 值最大; 采样 3 次时, 夏-秋-春季组合的 RB 值最大。相比之下, 一年采样 4 次时, RB 值达到最大。

2.5 设计效应

从图 8 可以看出, 采样设计效应值均小于 1, 表明分层随机采样优于简单随机采样。相较于全部物种采样, 剔除稀有种后的采样效果更优($P < 0.05$)。每年单次采样, 夏季($D_e = 0.84$)分层采样效果最好; 每年 2 次采样, 夏-冬季组合($D_e = 0.82$)分层随机采样效果表现最佳; 每年 3 次采样, 夏-冬-春季组合($D_e = 0.79$)效率最高(图 8a)。分层抽样的优势在采样站点较少时更为明显, 其中全物种抽样在 8 个站点($D_e = 0.78$)时达到最低设计效应值(图 8b)。

3 讨论

3.1 站点数对采样设计的影响

广东近海水域因其独特的地理位置和复杂的海洋环境(如珠江冲淡水、暖流及沿岸上升流的交互作用), 形成了较为明显的水文梯度(如水深、盐

度、水温), 导致物种分布呈现明显的垂直与水平分异^[1,17]。这种环境异质性使得分层随机采样在低采样强度下能够更有效地覆盖不同生境类型, 从而提高物种丰富度的估计精度。然而, 随着采样站点数的增加, SRS 与 StRS 的差异逐渐减小。这一现象可能与“采样饱和效应”有关: 当站点数足够多时, 随机采样已能覆盖主要生境类型, 分层策略的边际效益递减。这与 Cao 等^[24]对美国龙虾(*Homarus americanus*)资源调查的模拟结果一致, 当样本量超过总站点的 70% 时, 分层设计的优势不再显著。因此, 在实际调查中, 若预算有限, 建议优先采用分层抽样设计以提高调查效率; 而在高强度调查中, 则可基于研究目标和精度需求, 在分层抽样与简单随机抽样之间灵活选择——但考虑到样本代表性和统计效能, 分层抽样仍是首推方案。

3.2 季节组合对采样设计的影响

采样频次对物种丰富度探测率也有很大影响。单季采样时, 物种丰度探测率最高仅能达到 60% 左右, 随着采样频次的增加, 探测率越来越高, 一年四季采样时, 探测率最高接近 100%。季节组合对物种丰富度探测的影响反映了物种活动的季节性动态。单次采样中, 秋季探测率最高, 可能与伏季休渔^[16]、鱼类生态习性^[25]及季节性洄游^[26]等有关, 使得该季节鱼类物种丰富度相对较高。王跃中等^[27]在南海北部的研究也支持这一观点, 他们发现秋季是多数经济鱼类索饵洄游期, 种类和数量增加。两季采样中, 夏-秋组合的探测效果最好, 这 2 个季节物种丰富度均相对较高。三季组合时, 夏-秋-春或夏-秋-冬探测效果最好, 达到 80% 探测率仅需 36 个站点。夏、秋季水温相对较高、饵料丰富促使物种活动范围扩大, 物种多样性相对较高, 而冬、春季的温盐跃层驱动了垂直迁移物种的聚集^[3], 因此, 季节性组合能捕获不同生态策略的物种。程文等^[28]在黄河口的研究也发现, 不同季节数据矛尾虾虎鱼(*Chaemrichthys stigmatias*)体长-体质量关系参数 b 估计精度具有不同影响, 多季节组合估计参数精度优于单季节。吴桢等^[29]在胶州湾的研究发现, 夏季采样可覆盖全年 70% 的物种, 结合秋季后可提升至

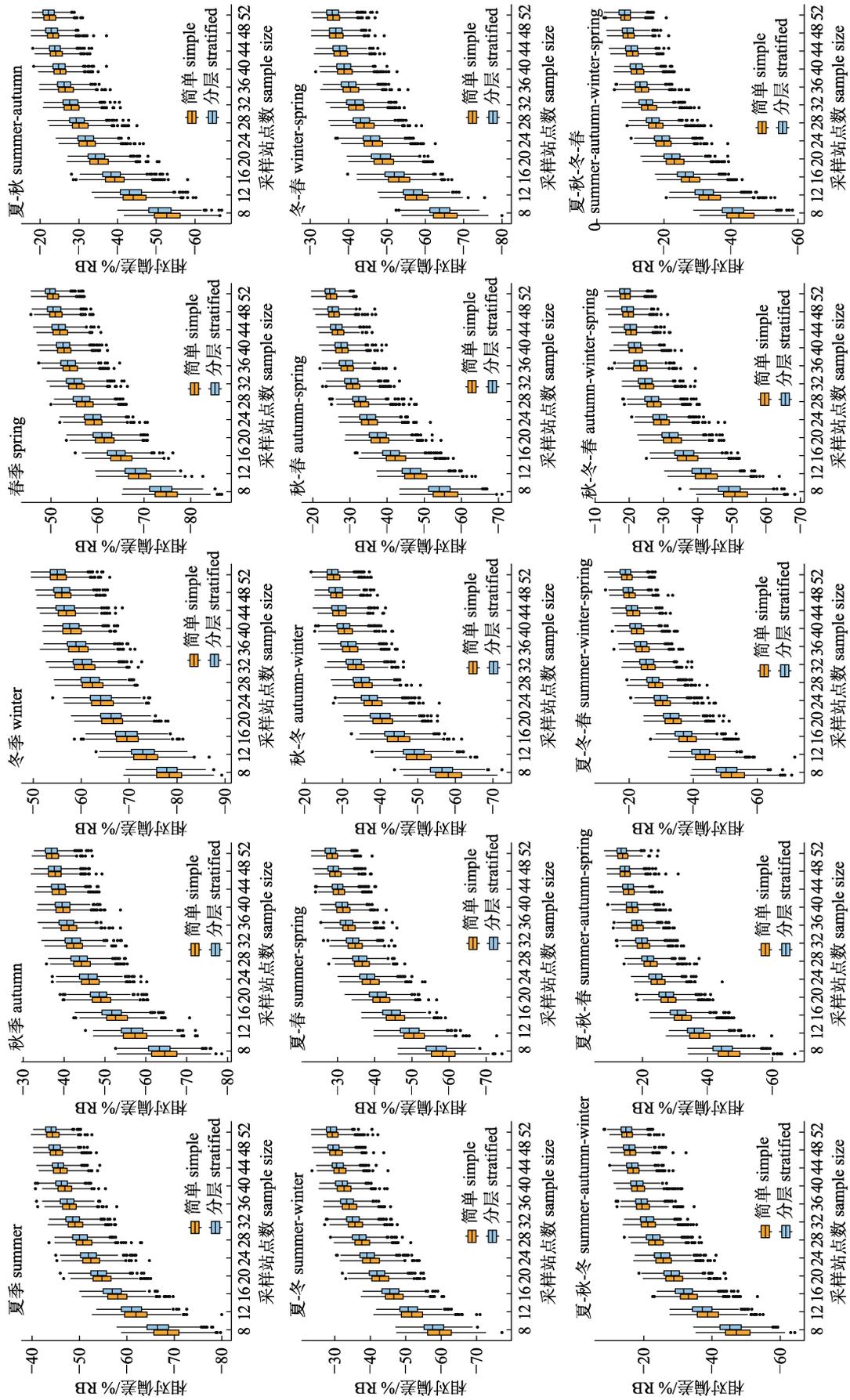


图 6 不同采样设计的相对偏差
Fig. 6 Relative deviation of different sampling designs

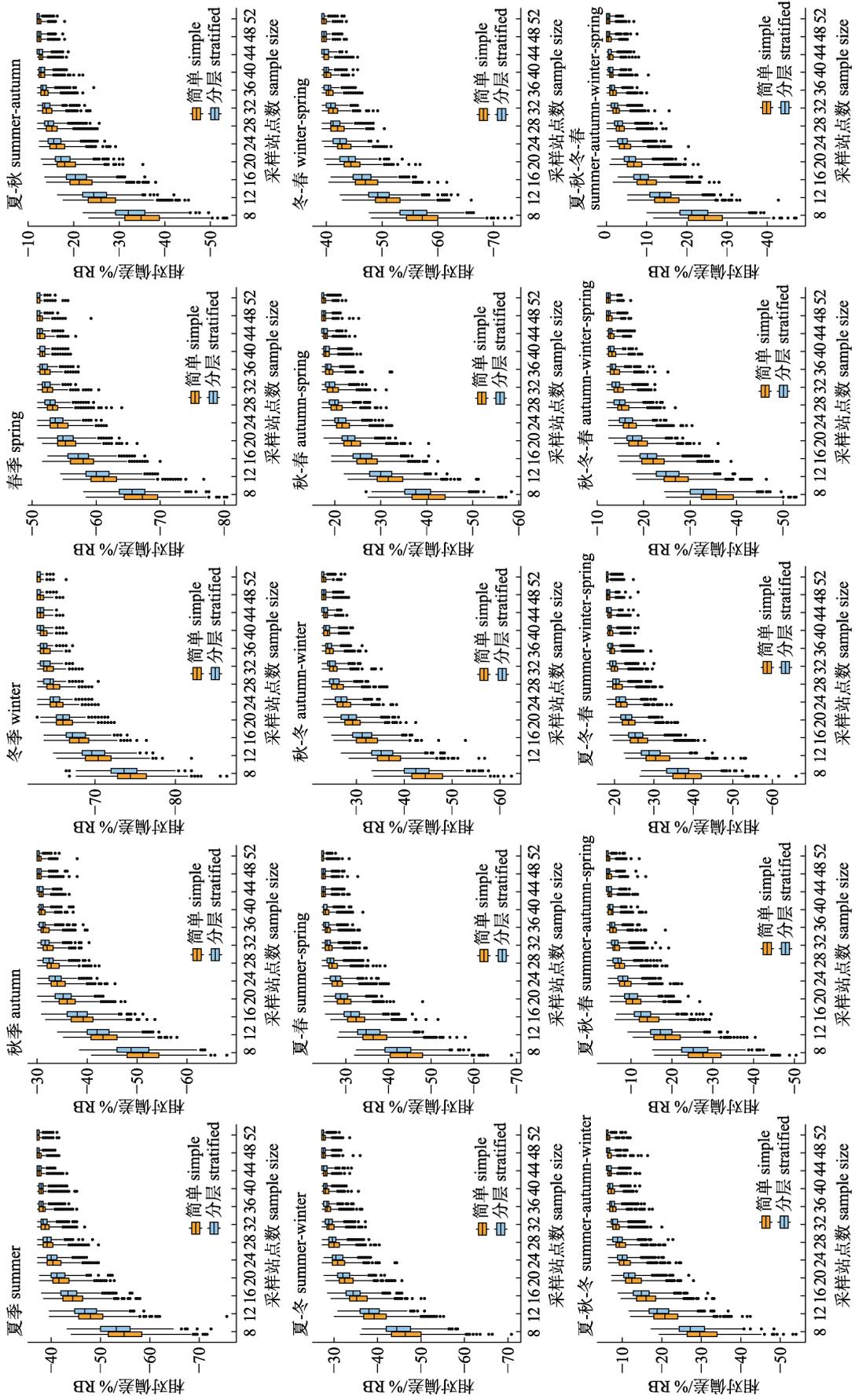


图 7 剔除稀有物种后不同采样设计的相对偏差

Fig. 7 Relative deviation of different sampling designs after rare species exclusion

的适用性取决于生境复杂度与采样强度的平衡。这一发现为实际调查中的采样设计提供了重要参考。在预算有限的情况下, 分层采样能够以较少的站点实现较高的精度; 而在资源充足时, 可根据实际需求选择更灵活的采样方案。短期监测可采用 StRS 结合夏-秋-冬或夏-秋-春三季采样, 平衡 80%探测率与成本; 长期监测可建立动态自适应设计, 根据气候变化调整分层策略和采样频次^[38]。

4 小结

本研究以广东近海鱼类物种丰富度为采样设计优化指标, 系统比较了不同抽样方法、采样频次及站点数对物种丰富度估计的影响。研究结果表明, 分层随机采样在低采样强度下更具优势, 其设计效应值(D_e)始终小于 1, 而稀有种是影响抽样变异性的关键因素。研究提出了兼顾效率与精度的广东近海优化采样策略: 采用夏-秋-冬或夏-秋-春三季组合的分层采样设计, 仅需 36 个站点即可实现 80%的物种探测率。该研究不仅为广东近海渔业资源调查提供了科学依据, 更为渔业资源评估与生态监测中采样方案的优化提供了重要参考, 对平衡调查成本与数据质量具有重要的实践指导价值。

参考文献:

- [1] Liu W D, Lin Z J, Jiang Y E, et al. Spatial distribution of demersal fishery resources in the continental shelf of the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(5): 95-103. [刘维达, 林昭进, 江艳娥, 等. 南海北部陆架区底层渔业资源的空间分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(5): 95-103.]
- [2] Zhang K, Guo J Z, Xu Y W, et al. Long-term variations in fish community structure under multiple stressors in a semi-closed marine ecosystem in the South China Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 745: 140892.
- [3] Shi D F, Xu Y W, Sun M S, et al. Assessment of allowable catches of fishery resources in Guangdong waters[J]. *Marine Fisheries*, 2021, 43(5): 521-531. [史登福, 许友伟, 孙铭帅, 等. 广东海洋渔业资源可捕量评估[J]. *海洋渔业*, 2021, 43(5): 521-531.]
- [4] Su L, Zhang K, Xu Y W, et al. Variations in the fish community of the Beibu Gulf (South China Sea) following fishery resources protection measures[J]. *Fisheries Research*, 2025, 283: 107293.
- [5] Buckland S T, Anderson D R, Burnham K P, et al. *Introduction to Distance Sampling: Estimating Abundance of Biological Populations*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2001
- [6] Tang Z, Shan X J, Jin X S. A review of optimization of sampling design for fishery-independent surveys[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(4): 88-97. [唐政, 单秀娟, 金显仕. 渔业资源调查采样设计优化研究进展[J]. *海洋科学*, 2019, 43(4): 88-97.]
- [7] Delargy A J, Cassidy K S, Lisi A D, et al. A comparison of survey designs for marine benthic invertebrate sampling[J]. *Fisheries Research*, 2025, 285: 107384.
- [8] Nelson G A. Cluster sampling: A pervasive, yet little recognized survey design in fisheries research[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2014, 143(4): 926-938.
- [9] Jardim E, Ribeiro P J. Geostatistical assessment of sampling designs for Portuguese bottom trawl surveys[J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(3): 239-247.
- [10] 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.]
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.]
- [14] Drake M T. 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.
- [15] Li Y D, Zhang C L, Ji Y P, et al. Effects of sampling design on estimation of spatial pattern indices of fish population[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(1): 36-47. [李迎冬, 张崇良, 纪毓鹏, 等. 不同采样设计对估计鱼类空间格局指数的影响[J]. *海洋学报*, 2022, 44(1): 36-47.]
- [16] Cai Y C, Xu S N, Chen Z Z, et al. Current status of community structure and diversity of fishery resources in

- offshore northern South China Sea[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 10-18. [蔡研聪, 徐姗楠, 陈作志, 等. 南海北部近海渔业资源群落结构及其多样性现状[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 10-18.]
- [17] Qiu Y S. The regional changes of fish community on the northern continental shelf of South China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1988, 12(4): 303-313. [邱永松. 南海北部大陆架鱼类群落的区域性变化[J]. *水产学报*, 1988, 12(4): 303-313.]
- [18] Thiele J, Schulte auf'm Erley G, Glemnitz M, et al. Efficiency of spatial sampling designs in estimating abundance and species richness of carabids at the landscape level[J]. *Landscape Ecology*, 2023, 38(4): 919-932.
- [19] Ma Y H, Ji Y P, Zhang C L, et al. Effects of sampling design on species richness estimation of ichthyoplankton in the coastal waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(5): 635-645. [马依宏, 纪毓鹏, 张崇良, 等. 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[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(5): 635-645.]
- [20] Wang J Q, Dai X J, Wang K, et al. Optimal design of sample size for estimating species richness of fishes in Dianshan Lake, China[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.]
- [21] 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.
- [22] Paloheimo J E, Chen Y. Estimating fish mortalities and cohort sizes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, 53(7): 1572-1579.
- [23] 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 and Behavior*, 2012, 16(4): 797-806.
- [24] 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.
- [25] Qiu Y S. A preliminary analysis of fish species groups on the northern continental shelf of South China Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1990, 14(4): 267-276. [邱永松. 南海北部大陆架鱼种组群初步分析[J]. *水产学报*, 1990, 14(4): 267-276.]
- [26] Liu C L, Xu Q, Wang L L, et al. Nekton diversity, density, and community structure of spring and autumn in coastal waters of eastern Fujian Province[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(7): 115-131. [刘彩莲, 许庆, 王林龙, 等. 闽东近海春秋季节游泳动物多样性、密度及群落特征[J]. *生物多样性*, 2023, 31(7): 115-131.]
- [27] Wang Y Z, Yuan W W. Changes of demersal trawl fishery resources in northern South China Sea as revealed by demersal trawling[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(2): 26-33. [王跃中, 袁蔚文. 南海北部底拖网渔业资源的数量变动[J]. *南方水产*, 2008, 4(2): 26-33.]
- [28] Cheng W, Ji Y P, Xue Y, et al. Effect of sampling design on the estimation of length-weight relationship parameter b of *Chaemrichthys stigmatias*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(12): 2357-2365. [程文, 纪毓鹏, 薛莹, 等. 采样设计对估计矛尾虾虎鱼体长-体质量关系参数 b 的影响[J]. *水产学报*, 2022, 46(12): 2357-2365.]
- [29] Wu Z, Xue Y, Zhang C L, et al. Effect of sampling frequency on species richness estimation in fishery-independent surveys[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(6): 34-41. [吴桢, 薛莹, 张崇良, 等. 采样频次对渔业资源调查物种丰富度估计的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 34-41.]
- [30] 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.
- [31] Gotelli N J, Colwell R K. Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness[J]. *Ecology Letters*, 2001, 4(4): 379-391.
- [32] Mouillot D, Bellwood D R, Baraloto C, et al. Rare species support vulnerable functions in high-diversity ecosystems[J]. *PLoS Biology*, 2013, 11(5): e1001569.
- [33] Power M E, Tilman D, Estes J A, et al. Challenges in the quest for keystones[J]. *BioScience*, 1996, 46(8): 609-620.
- [34] Magurran A E. *Measuring Biological Diversity*[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.
- [35] Zhang Y, Zhao J, Ye X C, et al. Comparison of sampling designs for fishery resource surveys in Northwest Pacific Ocean[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(4): 1031-1042. [张焱, 赵静, 叶旭昌, 等. 西北太平洋渔业资源调查采样设计比较[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(4): 1031-1042.]
- [36] Benedetti-Cecchi L. Variability in abundance of algae and invertebrates at different spatial scales on rocky sea Shores [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 215: 79-92.
- [37] 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.]
- [38] Perry A L, Low P J, Ellis J R, et al. Climate change and distribution shifts in marine fishes[J]. *Science*, 2005, 308(5730): 1912-1915.

Effects of sampling design on fish species richness estimation in Guangdong coastal waters

SU Li^{1,2}, XU Youwei^{1,2,3}, SUN Mingshuai^{1,2}, ZHANG Kui^{1,2,3*}, CHEN Zuozhi^{1,2,3}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Open-sea Fishery, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China

Abstract: Accurate assessment of marine biodiversity is fundamental to fisheries management and ecological conservation. Optimizing sampling design is crucial for improving the estimation precision of species richness as an essential biodiversity indicator. Based on seasonal bottom trawl survey data collected from August 2014 to May 2015 in the coastal waters of Guangdong, this study employed computer-simulated resampling techniques to compare the effects of simple random sampling (SRS) and stratified random sampling (StRS) on the estimation of fishery species richness under varying numbers of sampling sites and frequencies. The results showed that the species detection rate increased rapidly with the addition of sampling sites when their number was low, and the increasing rate gradually slowed as the number of sites increased. To achieve a 90% species detection rate, 44 sampling sites were required for year-round seasonal sampling; for an 80% detection rate, the minimum number of sites needed was 36, with the summer-autumn-winter or summer-autumn-spring seasonal combinations being the most efficient. Both the absolute values of relative estimation error (REE) and relative bias (RB) decreased as the number of sampling sites increased. StRS exhibited significantly lower absolute REE and RB values than SRS ($P < 0.05$). After excluding rare species, the number of sites required to achieve a 90% detection rate decreased to 20, and the absolute REE and RB values also declined, indicating that rare species increased sampling variability. The design effects (D_e) of 15 stratified sampling combinations were all below 1, demonstrating that StRS had higher sampling efficiency in Guangdong coastal fisheries surveys, particularly when the number of sampling sites was limited. This study provides a scientific basis for optimizing sampling designs in Guangdong coastal fisheries surveys, and suggests selecting site numbers and seasonal combinations based on monitoring precision requirements and cost constraints.

Key words: fisheries survey; simple random sampling; stratified random sampling; species richness; Guangdong coastal waters

Corresponding author: ZHANG Kui. E-mail: zhangkui@scsfri.ac.cn