

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17199

利用非参数方法估计山东半岛南部海域秋季游泳生物群落物种丰富度

牟秀霞¹, 徐宾铎¹, 薛莹¹, 任一平^{1,2}, 张崇良¹

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 266000

摘要: 为减少渔业资源物种丰富度观测的偏差, 以山东半岛南部海域为例, 根据 2016 年 10 月对该海域进行的底拖网调查数据, 运用 Chao、一阶刀切(Jackknife1)、二阶刀切(Jackknife2)和自助法(Bootstrap)4 种非参数方法估算了该海域鱼类群落物种丰富度, 并探讨了影响非参数方法估算的因素及非参数方法的应用。结果表明, 4 种非参数方法估算鱼类群落物种数目呈现出 Jackknife2>Chao>Jackknife1>Bootstrap, 依次为 265 种、248 种、235 种、206 种; 不同估算方法的标准差范围有较大差别, Chao 最大, Jackknife 居中, Bootstrap 最小。通过 MDS 多维标度排序将该海域划分两个群落, 两群落物种数有显著差异, 群落 I 物种数目估计值为 250 种、238 种、219 种、191 种, 群落 II 物种数目为 86 种、100 种, 4 种非参数估算方法在不同群落表现基本一致。综合比较不同群落的物种估算结果, 认为采样强度是影响 4 种非参数估计方法表现优劣的主要因素, 采样充足是使用非参数估计方法的前提。本研究为不同采样努力下物种丰富度的比较提供了方法参考和比较标准。

关键词: 物种丰富度; Bootstrap; 二阶刀切法; 抽样强度; 物种累积曲线; 估计方法评估

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)02-0436-08

物种丰富度, 是最基本的生物多样性概念^[1], 是生态系统健康程度的重要指标, 也是许多资源保护计划中的关键目标, 因此物种数目的准确估计在生物学研究中非常重要。而相关研究通常直接采用实际调查观测到的物种数来反映海区的物种丰富度, 这可能存在一定的偏差。例如, 在一个丰富度很高的群落, 稀有种在采样站位中有可能并不出现, 因此观察到的物种数目可能严重低于物种实际数目^[2]。此外, 依据不同调查方案来进行物种丰富度调查时, 会因采样强度的不同, 调查结果也存在较大的差异。在利用观测物种数代替群落中总物种数进行生物多样性、物种丰富度变化比较等研究时, 就会因采样努力量的不同而无法直接比较, 或因观测物种数的随机变异对结果

造成严重影响^[3]。因此可统一选择一种物种丰富度的估计方法, 以减少这类比较研究中的偏差。

物种丰富度的测定方法有很多, 但因非参数方法(Bootstrap, Jackknife1, Jackknife2)不需要假设一个潜在的物种丰度分布的拟合, 只需了解物种是否存在的信息, 所以应用较广泛且容易^[4]。非参数方法可以根据数据进行分析并绘制物种累积曲线, 在考虑到稀有种影响之外, 也可量化抽样强度与物种丰富度之间的关系。虽然非参数方法在昆虫、植物等群落物种丰富度的估算中已被广泛应用^[5-8], 但国内仅有少数学者运用非参数方法估算海域中鱼类和底栖动物的物种丰富度^[9-10]。本文以山东半岛南部海域为例, 利用非参数估计方法来估算该海域渔业资源的物种数, 旨在通过

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-08-03.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(201612002, 201512002).

作者简介: 牟秀霞(1994-), 女, 硕士研究生, 从事渔业资源研究. E-mail: 907439453@qq.com

通信作者: 张崇良, 副教授. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn

非参数方法的比较分析研究, 促进非参数方法在物种多样性研究与渔业资源调查中的应用, 减少物种丰富度观测的偏差, 为海区中物种丰富度的比较提供参考标准, 为评估海域不同时期渔业资源的演变状况提供可行方法。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来自 2016 年 10 月对山东半岛南部海域进行的底拖网调查, 调查站位如图 1 所示。调查区域为 $119^{\circ}18' \sim 124^{\circ}00'E$, $35^{\circ}00' \sim 37^{\circ}00'N$ 。使用 220 kW 单拖网渔船进行底拖网调查, 囊网网目 20 mm, 拖曳时网口扩张宽度约 15 m, 高度 7.53 m。每个调查站位拖网时间约为 1 h, 拖速 3 kn。样品的采集和分析按照《海洋调查规范》进行。

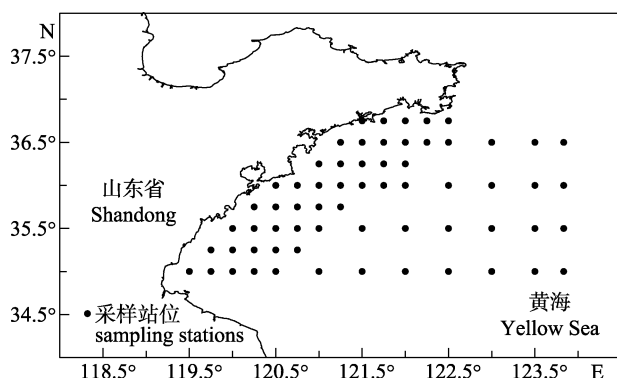


图 1 山东南部海域渔业资源底拖网调查站位

Fig. 1 Sampling stations of bottom trawl survey for fishery resources in the waters of southern Shandong Peninsula

1.2 数据处理

根据渔业资源调查物种数据, 运用非参数统计方法 Chao^[11]、Jackknife1^[12]、Jackknife2^[13-14]、Bootstrap^[15]估算该调查区域的总物种数。其中,

$$\text{Chao 估计: } C_{\text{Chao}} = C + C_1^2/2C_2$$

式中, C 表示群落中物种观测值, C_1 表示仅由 1 个个体代表的种数, C_2 表示仅有 2 个个体代表的种数, C_{Chao} 表示运用 Chao 估计法得出的物种数量。

$$\text{Jackknife1 估计: } J_1 = S + r_1(n-1)/n$$

式中, S 表示调查所得实际物种数, r_1 表示只在一个站位中出现的物种数, n 表示站位的数目, J_1 表示一阶刀切法所得估计物种数。

Jackknife2 估计:

$$J_2 = S + r_1(2n-3)/n - r_2(n-2)2/[n(n-1)]$$

式中, S 表示调查所得实际物种数, r_1 表示只在一个站位中出现的物种数, n 表示站位的数目, r_2 表示只在两个站位中出现的物种数, J_2 表示二阶刀切法所得估计物种数。当 $r_1=0$, $r_2>0$ 时, 估计物种数小于实际调查物种数。

$$\text{Bootstrap 估计: } B_j = S + \sum_{j=1}^{S_0} \left(1 - \frac{Y_j}{n} \right)^n$$

式中, S 表示调查所得实际物种数, S_0 表示 Bootstrap 样本中观测到的物种数, n 表示站位的数目, Y_j 表示样本数量, B_j 表示 Bootstrap 估计物种数。

利用以上方法估算该海域渔业资源总物种数, 通过 R 语言 vegan 包完成估算过程。此外, 考虑到群落组成结构及游泳动物游泳能力不同对非参数方法估算值的影响, 本研究利用 MDS 多维标度排序进行群落划分并进行比较分析, 以及对游泳生物鱼类、虾蟹类、头足类。

2 结果与分析

2.1 总物种丰富度估计

本次调查观测到鱼类、甲壳类、头足类及其他生物类群的游泳生物共 184 种。应用 Chao、一阶刀切(Jackknife1)、二阶刀切(Jackknife2)、自助法(Bootstrap)估算的物种数分别为 248 种、235 种、265 种、206 种。估算值呈现出 Jackknife2 最高, Chao、Jackknife1 其次, Bootstrap 最低。4 种非参数估计方法中, Chao 估算产生的标准差最大, 其次为 Jackknife2 与 Jackknife1, 而 Bootstrap 产生的标准差最小, 且其估算的物种数目最接近于调查中实际观测到的物种数目。4 种非参数方法估算物种数累积曲线呈渐近线, 在站位总数低于 10 时, 总物种数目迅速上升, 随后上升速度减缓, 趋于稳定。Jackknife2 在累积到 18 个站位时, 其估算物种数已达到物种数的观测值, Chao 和 Jackknife1 分别累积到 23 个站位与 27 个站位时达到物种数的观测值, 而 Bootstrap 需累积到 43 个站位方可达到物种数的观测值(图 2)。

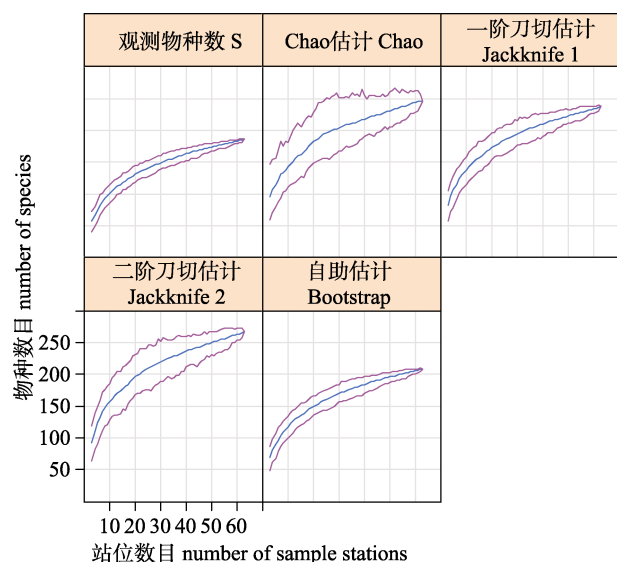


图2 山东半岛南部海域动物群落总物种数目累积曲线
Fig. 2 The species accumulation curves in the waters of southern Shandong Peninsula

2.2 不同群落的比较

根据 MDS, 调查海域游泳生物明显分为两个群落, 以 50 米等深线为界分为近岸群落(群落 I)和离岸群落(群落 II)(图 3)。两群落所占海域面积相近, 群落 I 包含采样站位 48 个, 群落 II 包含采样站位 15 个。由于采样努力量的不同, 常规研究中两群落的物种数无法直接比较, 本研究利用物种累积曲线, 能够反映出两者物种丰富度的差异。群落 I 中游泳动物的物种丰富度均高于群落 II(表 1)。

群落 I 观测到的物种总数为 170 种, 群落 II 为 65 种。通过 Chao、Jackknife1、Bootstrap、Jackknife2

4 种非参数方法估算群落 I 的总物种数为 238 种、219 种、191 种、250 种, 群落 II 为 86 种、89 种、76 种、100 种。其中 Jackknife2 估计值最高, Bootstrap 最低, Bootstrap 最接近物种的实际观测值。通过物种累积曲线可看出(图 4), 群落 I 中 4 种非参数方法估计物种数累积曲线呈渐近线, 在站位总数较少时, 总物种数目上升较快, 随后上升速度减缓; 群落 II 中 Chao 与 Jackknife2 的物种数目随着站位的增多趋于稳定, 而其他估计方法的物种累积曲线一直趋于上升状态, 故群落 II 的估计物种数目为 86 种、100 种。利用 Chao 方法估算每个站位的物种数目并做空间分布(图 4), 群落 I 每个站位的物种数为 30~50 种, 群落 II 每个站位的物种数为 10~20 种, 物种数目较多的站位主要集中在近岸区域, 离岸站位的物种数目较少。

群落 I 观测到鱼类 73 种, 群落 II 观测到鱼类 31 种。通过非参数方法估算群落 I 鱼类为 87~107 种, 群落 II 鱼类为 35~42 种。根据物种累积曲线看出, 当群落 I 站位总数少于 10 时, 物种数目增长较快, 随后增长速度减小, 呈渐近线状(图 5)。群落 II Chao 与 Jackknife2 的物种累积曲线以渐近线状趋于稳定, 而 Jackknife1 与 Bootstrap 的物种累积曲线无明显拐点, 近直线上上升(图 5)。群落 I 观测到虾蟹类 34 种, 群落 II 观测到虾蟹类 12 种。通过非参数方法估算群落 I 虾蟹类为 39~52 种, 群落 II 为 14~29 种。通过物种累积曲线可以看出, 两个群落中物种累积均近直线增长。群落 I 的 Chao 估计标准差较大, 其他 3 种方法的估计

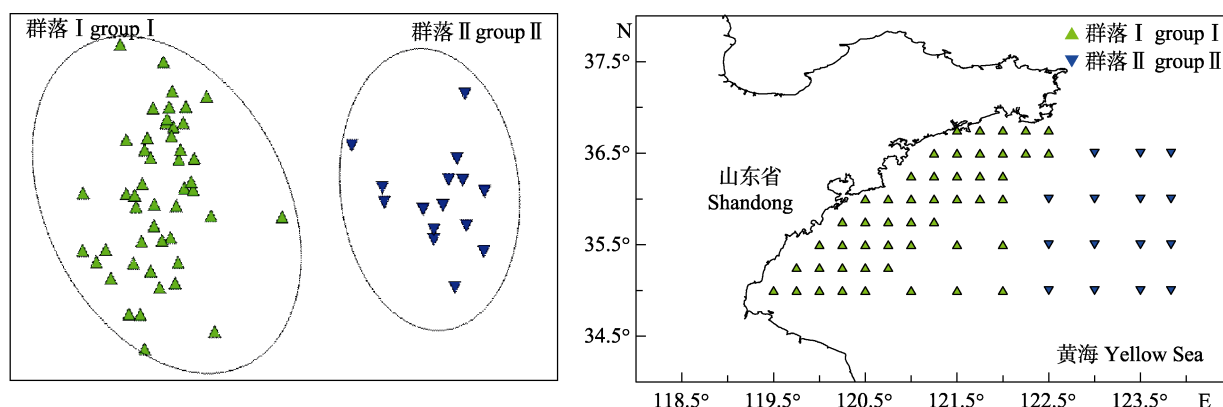


图3 山东半岛南部海域动物群落结构的多维标度排序与空间分布
Fig. 3 MDS ordination and space distribution of the animal communities in the waters of southern Shandong Peninsula

表 1 非参数方法对山东半岛南部海域动物物种丰富度估计

Tab. 1 The estimation of species richness by non-parametric methods in the waters of southern Shandong Peninsula

群落 community	种群 population	物种数目观测值 number of species by observation	Chao 估计值 Chao	一阶刀切估计值 Jackknife1	自助估计值 Bootstrap	二阶刀切估计值 Jackknife2
I	总数 all	170	238±26.36	219±10.42	191±5.74	250
	鱼类 fish	79	102±14.5	97±5.20	87±2.99	107
	虾蟹类 shrimp and crab	34	52±14.10	46±4.17	39±2.24	53
	头足类 cephalopods	6	6±0	6±0	6±0.07	6
II	总数 all	65	86±10.89	89±9.18	76±5.14	100
	鱼类 fish	31	36±4.75	39±3.67	35±2.46	42
	虾蟹类 shrimp and crab	12	29±22.07	18±3.29	14±1.65	22
	头足类 cephalopods	5	7±3.19	8±2.87	6±1.64	9

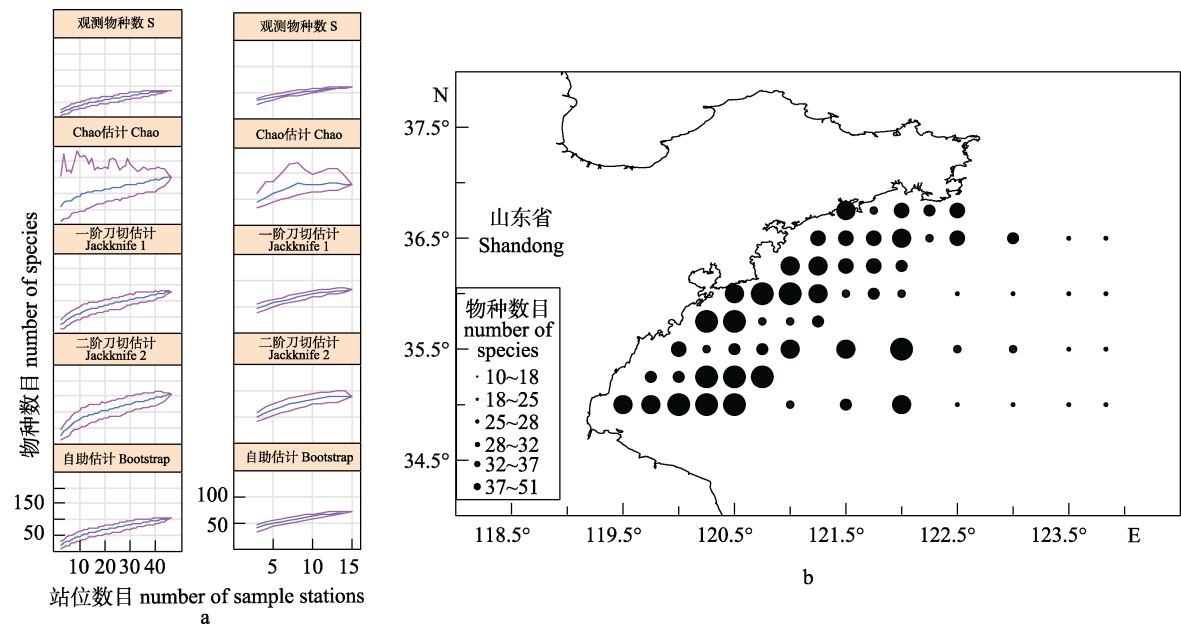


图 4 山东半岛近远海群落总物种累积曲线(a)与物种数目的空间分布(b)

Fig. 4 The species accumulation curves (a) and spatial distribution of number of species (b) in coastal community and offshore community in the waters of southern Shandong Peninsula

标准差较小;而群落Ⅱ 4 种方法的估计标准差均较大,尤以 Chao 显著(图 5)。群落Ⅰ观测头足类 6 种,通过非参数方法估算值与观测值相等,物种累积曲线均在 20 个站位时趋于水平,可见此时采样非常充分;群落Ⅱ观测到头足类 5 种,非参数方法的估算值为 6~9 种,Bootstrap 方法物种累积曲线近直线增长,其他方法在累积到 10 个站位时物种数目的上升出现减缓趋势。

3 讨论

3.1 物种丰富度

黄渤海生物资源丰富、种类繁多,《中国海

洋生物名录》记载黄渤海硬骨鱼类约有 249 种,大部分在山东近海均有分布^[16]。20 世纪 90 年代,分布于山东近海的渔业资源约有 260 种,较重要的经济鱼以及无脊椎动物近 80 种^[17]。2006 年秋季黄海山东近海海域底拖网调查监测到鱼类 50 种^[18]。本次调查在山东南部近岸海域共发现渔业生物 184 种,其中鱼类 86 种。总体而言,山东海域物种数目相比于历史记载有所减少,这可能反映了该海域渔业资源的衰退^[19-21]。山东近海是黄渤海渔业生产的主要作业区域,作业方式多样,作业时间长、捕捞力度大,故过度捕捞可能是造成物种多样性减少的最重要因素^[21]。其次,因为调查

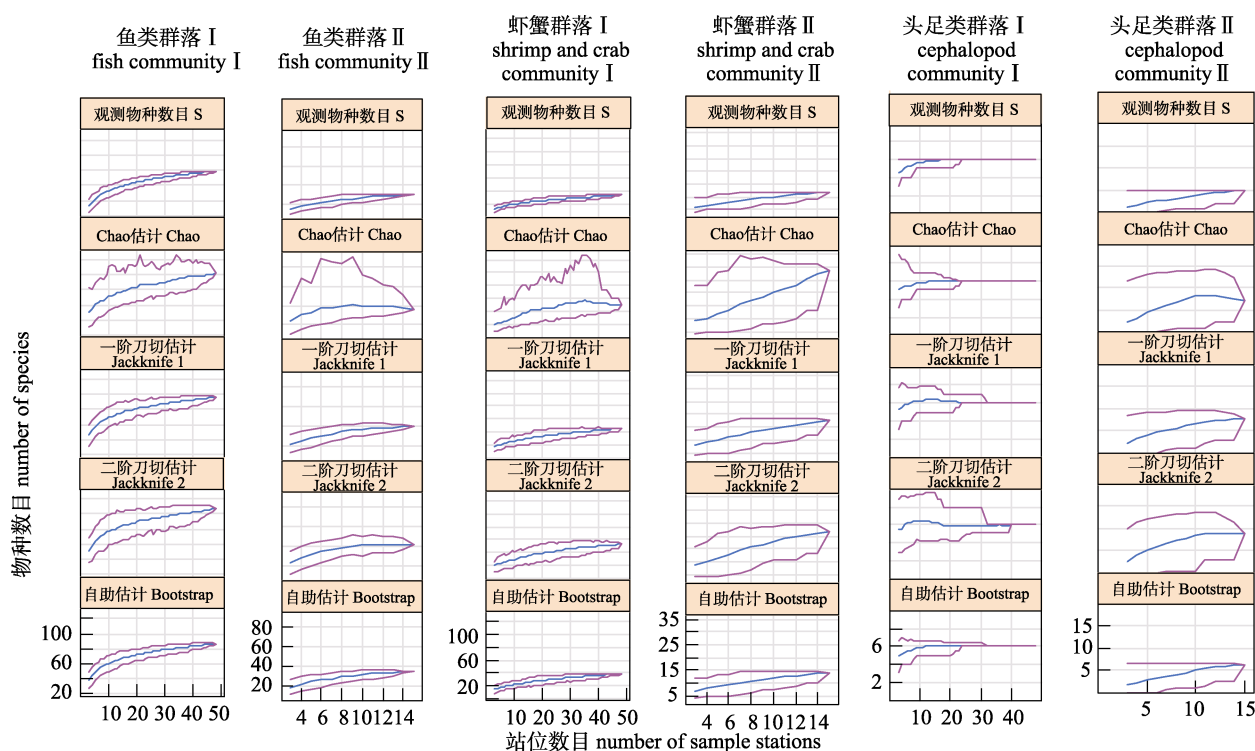


图 5 山东半岛近远海群落鱼类物种累积曲线

Fig. 5 The species accumulation curves in coastal community and offshore community in the waters of southern Shandong Peninsula

季节的不同而导致物种数目的差异。如洄游性鱼类的集群与洄游分布具有明显的季节变化, 秋季索饵期分布较分散^[17], 部分洄游性鱼类未捕获到。与 2006 年秋季吕振波等^[20]的调查结果相比, 本次调查鱼类物种数目有所增加。虽然两次调查海域范围相近, 但 2006 年设置 45 个调查站位, 本研究设置 63 个调查站位, 增大了近岸海域调查站位的密度, 因此采样强度的不同可能是导致鱼类物种数目差异的主要原因。故同一研究海域, 采样努力量不同, 会导致研究结果之间存在较大的差异。另外, 调查船、网具的差异也是影响调查结果的原因。因该海域历史研究中未采用物种丰富度的标准化方法, 因此, 通过与历史数据的比较分析, 只能粗略地反映出该海域物种丰富度的变化。而本研究对物种丰富度进行了标准化, 可为今后物种数的比较研究提供参照。

3.2 群落间物种丰富度差异

不同海域所处的地理环境不同, 形成了各自独特的生态环境与水文特征, 造就了物种丰富度的不同。近岸海域有众多河流入海, 海域中的营

养盐与有机碎屑含量较高^[18]。浮游动植物等基础饵料生物也主要分布在 122°E 以西的山东南岸至海州湾一带近岸低盐水域和莱州湾海域^[17], 丰富的饵料环境适宜多样的生物在此栖息、索饵, 所以近岸区域的物种丰富度较高。此外, 近岸海域的底质复杂多样, 有黏土、砂粒、岩礁等多种底质类型, 而 50 m 等深线以外的远岸海域则主要是以粗粉砂和黏土质软泥为主^[17, 22]。底质类型的丰富程度对于鱼类的物种丰富度具有重要的影响作用^[23], 多样的底质环境能为鱼类提供丰富的栖息环境, 使得该区域适合作为鱼类的产卵育幼场或避难所^[24-26], 从而使近岸海域拥有更高的物种丰富度。因此近岸海域本身的物种种类较离岸群落丰富, 所以其物种数目估计值也远高于群落 II。

3.3 非参数方法比较及影响因素

物种丰富度的估算方法较多, 除了提到的非参数方法估计物种数目外, 还有基于个体抽样的贝叶斯方法、基于理论抽样的经典估计方法和基于对数正态分布拟合的估计方法, 但这些方法比较适合于离散程度较高的动物物种数目的估计^[29]。

非参数方法基于样方抽样, Jackknife 与 Bootstrap 方法仅需知道物种存在或不存在信息, 所以应用较广泛且容易。非参数方法对物种丰富度的估计是基于稀有种的数目, 能够在一定程度上减少稀有种对于物种丰富度测定的影响。同时利用非参数方法建立物种累积曲线, 量化抽样强度与物种数目的关系, 可以在相同的采样努力量下比较同一海域调查的物种丰富度的变化趋势。

Jackknife1 估计方法受样本量的影响较大, Heltshe 等^[30]也曾指出, 只有在大量的样本条件下, Jackknife1 才能保证其在估计中的偏差较小^[30]。因为 Jackknife2 估计是根据稀有种(即仅在一个或两个站位中出现)的数量估算物种总数^[14], 当群落中仅在一个站位中出现的物种数较少, 在两个站位中出现的物种数目很多时, 可能导致估计物种的数目低于观测到的物种数目, 从而导致估计值偏低, 因此, 在该方法的应用中需要引起注意。Bootstrap 方法是作为刀切法的替代而提出的, 应用更加广泛、可靠^[14], 本研究结果表明, 该方法估计物种数最接近采样实际观测到的物种数, 其估计值标准差和置信区间较小, 在应用中较稳定。而 Chao 方法的置信区间较大, 原因可能是依赖于稀有种(仅由单个个体或两个个体代表的物种)的数目, 受采样过程中的随机性影响较大, 存在较大偶然性, 所以估计结果不稳定。

物种累积曲线能在一定程度上指导调查站位设计, 如图 4、图 5 所示, 群落 I 中设置采样站位密度较大, 4 种非参数方法估算的物种数目随着站位的增多最终趋于稳定, 表明该海域采样充足。群落 II 只有 Chao 与 Jackknife2 方法估算的物种数目最终趋于稳定, 而 Jackknife1 与 Bootstrap 方法的物种累积曲线一直处于上升状态, 表明该海域的采样强度过低, 非参数估计方法会低估海域中实际存在的物种数目, 在今后的调查中应适度增加站位, 并根据调查的目的, 针对于不同生物类群设置调查站位。而本研究表明, 当采样不足时, 非参数方法低估群落中的物种数目, 尤以 Bootstrap 与 Jackknife1 显著低估; 刘灿然等^[5]在研究中曾经表示, 当抽取大量的样方时, Jackknife 会趋于高估物种数目, 所以当采样充足, 即

物种累积曲线呈渐近线状时, 应该综合考虑 4 种非参数方法的估计值。虽然在不同的采样强度下, 非参数方法可能会低估或高估群落中真实的物种数目, 但其仍可降低海域群落中稀有种以及采样努力量不同对物种丰富度测定的影响, 增加与前人物种丰富度测定结果比较研究的科学性。此外, 物种的数目可能会影响非参数方法的估计结果。例如, 非参数方法对于鱼类物种数估计的物种累积曲线呈渐近线状, 而群落 II 虾蟹类、头足类部分物种累积曲线快速上升, 几乎近直线。推测对待测物种数目较少时, 需要更高的采样强度来提高非参数估算物种数目的精度。

4 结论

以往不同学者在进行海域物种丰富度的研究时, 会因采样努力量的不同、稀有种的影响而导致结果间无法直接比较, 而本研究指出, 利用非参数方法构建的物种累积曲线能够较好地实现不同研究、特别是不同年代际间物种数的比较。在实际应用中, 可以根据调查数据分别构建物种累积曲线, 根据曲线的相对高低评价物种丰富度的变化趋势。因此, 统一采用非参数方法进行物种丰富度的估计, 能够更加科学准确地反映海域的物种丰富度的变化情况。此外, 在利用非参数方法进行物种数目的估计时, 可以根据物种累积曲线是否呈渐近线状来判断采样是否充足, 以指导进一步的调查设计。

参考文献:

- [1] Liu C R, Ma K P. Measurement of biotic community diversity V. Methods for estimating the number of species in a community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 601-610. [刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法 V. 生物群落物种数目的估计方法[J]. *生态学报*, 1997, 17(6): 601-610.]
- [2] Liu C R, Ma K P, Lv Y H, et al. Measurement of biotic community diversity VI: the statistical aspects of diversity measures[J]. *Chinese Biodiversity*, 1998, 6(3): 229-239. [刘灿然, 马克平, 吕延华, 等. 生物群落多样性的测度方法 VI: 与多样性测度有关的统计问题[J]. *生物多样性*, 1998, 6(3): 229-239.]
- [3] Lande R. Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities[J]. *Oikos*, 1996, 76

- (1): 5-13.
- [4] Peet R K. The measurement of species diversity[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1974, 5: 285-307.
- [5] Liu C R, Ma K P, Yu S L, et al. Plant community diversity in Donglingshan Mountain, Beijing, China VI. Estimation of the numbers of species in several types of plant communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(2): 138-150. [刘灿然, 马克平, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性研究 VI. 几种类型植物群落物种数目的估计[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 138-150.]
- [6] Hao Z Q, Yu D Y, Ye J, et al. The estimation of species richness at different altitudes on the northern slope of Changbai Mountain[J]. Journal of Forestry Research, 2002, 13(3): 191-195.
- [7] Li Q, Chen Y Q, Wang S M, et al. Diversity of ants in subtropical evergreen broadleaved forest in Pu'er City, Yunnan[J]. Chinese Biodiversity, 2009, 17(3): 233-239. [李巧, 陈又清, 王思铭, 等. 普洱市亚热带季风常绿阔叶林区蚂蚁多样性[J]. 生物多样性, 2009, 17(3): 233-239.]
- [8] Jia Y Z, Zhao X H, Meng Q F. Insect diversity along a successional gradient in conifer and broad-leaved mixed forests in Changbai Mountain[J]. Acta Entomologica Sinica, 2009, 52(11): 1236-1243. [贾玉珍, 赵秀海, 孟庆繁. 长白山针阔混交林不同演替阶段的昆虫多样性[J]. 昆虫学报, 2009, 52(11): 1236-1243.]
- [9] Li S F. The ecological study of fish community in the East China Sea continental shelf: the spatial pattern and diversity[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005. [李圣法. 东海大陆架鱼类群落生态学研究-空间格局及其多样性[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.]
- [10] Zhang J L. Biodiversity and community structure of macrobenthos in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012. [张均龙. 黄海大型底栖生物多样性和群落结构的研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.]
- [11] Chao A, Lee S M. Estimating the number of classes via sample coverage[J]. Journal of the American Statistical Association, 1992, 87(417): 210-217.
- [12] Palmer M W. The estimation of species richness by extrapolation[J]. Ecology, 1990, 71(3): 1195-1198.
- [13] Palmer M W. Estimating species richness: The second-order jackknife reconsidered[J]. Ecology, 1991, 72(4): 1512-1513.
- [14] Smith E P, van Belle G. Nonparametric estimation of species richness[J]. Biometrics, 1984, 40(1): 119-129.
- [15] Mccune B, Mefford M J. PC-ORD: multivariate analysis of ecological data[M]. Gleneden Beach: MjM software design, 1999.
- [16] Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008. [刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [17] Tang Q S, Ye M Z, Tang Y D, et al. The Protection and Exploration of Shandong Offshore Fish Resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1990. [唐启升, 叶懋中, 唐元德, 等. 山东近海渔业资源开发与保护[M]. 北京: 农业出版社, 1990.]
- [18] Lü Z B, Li F, Xu B Q, et al. Fish community diversity during spring and autumn in the Yellow Sea off the coast of Shandong[J]. Chinese Biodiversity, 2012, 20(2): 207-214. [吕振波, 李凡, 徐炳庆, 等. 黄海山东海域春、秋季鱼类群落多样性[J]. 生物多样性, 2012, 20(2): 207-214.]
- [19] Li T, Zhang X M, Zhang P D, et al. Seasonal variation on community structure of fishery resources in the coastal waters of Southern Shandong Peninsula[J]. Periodical of Ocean University of China, 41(1): 41-50. [李涛, 张秀梅, 张沛东, 等. 山东半岛南部近岸海域渔业资源群落结构的季节变化[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(1): 41-50.]
- [20] Lu Z B, Xu B Q, Li F, et al. Structure and distribution of fish resources in the Yellow Sea off Shandong during spring and autumn 2006[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(6): 1335-1342. [吕振波, 徐炳庆, 李凡, 等. 2006 年春、秋季黄海山东海域鱼类资源结构与数量分布[J]. 中国水产科学, 2011, 18(6): 1335-1342.]
- [21] Lu Z B. The research and evaluation of Shandong offshore biological resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010. [吕振波. 山东近海经济生物资源调查与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.]
- [22] Wang X L, Xu B D, Ji Y P, et al. Fish community structure and its relationships with environmental factors in Haizhou Bay and adjacent waters of East China in winter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1707-1714. [王小林, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 海州湾及邻近海域冬季鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1707-1714.]
- [23] Araújo F G, de Azevedo M C C, de Araújo Silva M, et al. Environmental influences on the demersal fish assemblages in the Sepetiba Bay, Brazil[J]. Estuaries and Coasts, 2002, 25(3): 441-450.
- [24] Pihl L, Wennhage H. Structure and diversity of fish assemblages on rocky and soft bottom shores on the Swedish west coast[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 61(sA): 148-166.
- [25] Almany G R. Differential effects of habitat complexity, predators and competitors on abundance of juvenile and adult coral reef fishes[J]. Oecologia, 2004, 141(1): 105-113.
- [26] Moore C H, Harvey E S, Van Niel K. The application of

- predicted habitat models to investigate the spatial ecology of demersal fish assemblages[J]. *Marine Biology*, 2010, 157 (12): 2717-2729.
- [27] Ma K P, Liu C R, Yu S L, et al. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China. III. Species-abundance relations of several types of forest communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 573-583. [马克平, 刘灿然, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 III. 几种类型森林群落的种-多度关系研究[J]. *生态学报*, 1997, 17(6): 573-583.]
- [28] Heltshe J F, Forrester N E. Estimating species richness using the jackknife procedure[J]. *Biometrics*, 1983, 39(1): 1-11.

Non-parametric method for estimating the species richness of a nekton community during fall in the southern waters of Shandong Peninsula

MOU Xiuxia¹, XU Binduo¹, XUE Ying¹, REN Yiping^{1,2}, ZHANG Chongliang¹

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

2. Laboratory for Marine Fisheries and Aquaculture, Qingdao National Laboratory for Marine, Qingdao 266235, China

Abstract: Species richness is the most fundamental concept of diversity. The observed number of species in surveys are commonly used to represent the species richness in marine areas, however, this approach may lead to certain underestimations due to observational errors. This study used the marine fish community in Southern Shandong Peninsula as an example to test methods for reducing errors in species richness estimation. Non-parametric methods, Chao, Jackknife1, Jackknife2 and Bootstrap, were used to estimate the number of species in the waters of Southern Shandong Peninsula, based on bottom-trawl survey data collected in October 2016. In addition, we examined the factors that can influence the performance of non-parametric methods. The results show that the number of species in the community, estimated by four non-parametric methods, showed remarkable variations: 265, 248, 235 and 206 for Jackknife2, Chao, Jackknife1 and Bootstrap, respectively. In addition, the four methods also showed differences in standard deviation, and the standard deviation was the largest in Chao, followed by Jackknife, and was lowest in Bootstrap. The results of MDS showed that fish assemblages could be divided into two communities and the number of species have large differences. The estimated values in community I were 250, 238, 219 and 191; the number of species estimated in community II were 86 and 100. Comparative studies show that the sampling intensity and number of species affect the estimation of non-parametric methods. This study provides a method reference and comparison criterion for the comparison of species richness with different sampling efforts.

Key words: species richness; Bootstrap; Jackknife2; sampling intensity; species accumulation curve; evaluation of estimate method

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: zhangclg@ouc.edu.cn