

# 不跨越边界基于 Horvitz-Thompson 估计量的 分层自适应群团抽样\*

朱光玉<sup>1,2</sup> 唐守正<sup>1</sup> 雷渊才<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所 北京 100091;

2. 中南林业科技大学林业遥感信息工程研究中心 长沙 410004)

**摘要:** 提出一种新的不跨越边界的基于 Horvitz-Thompson 估计量的分层自适应群团抽样方法, 给出其估计量公式, 并证明其无偏性。将 9 种抽样方法 (简单随机抽样、分层简单随机抽样、基于修正 Hansen-Hurwitz 估计量的 ACS、基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的 ACS、跨越边界基于 Hansen-Hurwitz 估计量的 ACSI、跨越边界基于 Hansen-Hurwitz 估计量的 ACSII、不跨越边界基于修正 Hansen-Hurwitz 估计量的 ACS、跨越边界基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的 ACS、不跨越边界基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的 ACS) 应用于中国乌兰布和沙漠边缘植被花棒密度调查, 并对比 9 种抽样方法精度。结果表明: 不跨越边界的基于 Horvitz-Thompson 估计量的分层自适应群团抽样的效果最佳; 分层的抽样方法比不分层的抽样方法效率要高。

**关键词:** 花棒; 自适应群团抽样; 分层自适应群团抽样; Horvitz-Thompson 估计量; Hansen-Hurwitz 估计量; 模拟抽样; 乌兰布和沙漠

中图分类号: S757.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2010)07-0001-06

## Stratified Adaptive Cluster Sampling Based on the Adjusted Horvitz-Thompson Estimator with the Network Nonoverlapping Strata

Zhu Guangyu<sup>1,2</sup> Tang Shouzheng<sup>1</sup> Lei Yuancai<sup>1</sup>

(1. Institute of Forest Resources Information Techniques, CAF Beijing 100091; 2. Research Center of Forestry Remote Sensing Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology Changsha 410004)

**Abstract:** In this paper, a new stratified adaptive cluster sampling method is proposed based on the adjusted Horvitz-Thompson estimator with the network nonoverlapping strata. The mean and variance estimator are proved to be unbiased. Nine sampling methods were used for estimating the density of *Hedysarum scoparium* in Ulanbuh Desert edge in China, simple random sampling, stratified simple random sampling, adaptive cluster sampling based on the adjusted Hansen-Hurwitz estimator, adaptive cluster sampling based on the adjusted Horvitz-Thompson estimator, stratified adaptive cluster sampling I (ACSI) based on the adjusted Hansen-Hurwitz estimator with the network overlapping strata, stratified adaptive cluster sampling II (ACSII) based on the adjusted Hansen-Hurwitz estimator with the network overlapping strata, stratified adaptive cluster sampling based on the adjusted Horvitz-Thompson estimator with the network overlapping strata, stratified adaptive cluster sampling based on the adjusted Horvitz-Thompson estimator with the network nonoverlapping strata. The precisions of the nine sampling methods were compared. The result showed that the new stratified adaptive cluster sampling method based on the adjusted Horvitz-Thompson estimator with the network nonoverlapping strata was more effective than the others, and the sampling in stratified populations was more effective than the sampling in non-stratified populations.

**Key words:** *Hedysarum scoparium*; stratified adaptive cluster sampling; Horvitz-Thompson estimator; Hansen-Hurwitz estimator; simulation sampling; Ulanbuh Desert

利用 Hansen-Hurwitz (Hansen *et al.*, 1943) 估计量和 Horvitz-Thompson (Horvitz *et al.*, 1952) 估计量, Thompson (1990) 首次提出了自适应群团抽样 (adaptive cluster sampling, 简称 ACS), 即基于修正

收稿日期: 2009-03-09; 修回日期: 2009-06-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30510103195)、科技部社会公益研究专项 (2005DIB5J142)、国家林业局“948”引进项目 (2006-4-34)、中南林业科技大学人才引进项目 (104-0086)。

\* 唐守正为通讯作者。

Hansen-Hurwitz 估计量的 ACS、基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的 ACS。随后,出现了多种自适应群团抽样设计,分层自适应群团抽样 (Thompson, 1991)、两阶段自适应群团抽样 (Salehi *et al.*, 1997) 和两相自适应群团抽样 (Felix-Medina *et al.*, 2004)。

Thompson (1991) 利用最初交叉次数的期望 (expected numbers of initial intersection)、Hansen-Hurwitz 估计量和最初交叉概率 (initial intersection probabilities) 构造了 4 种不同的分层适应性群团抽样设计,即跨越边界基于 Hansen-Hurwitz 估计量的分层 ACSI、跨越边界基于 Hansen-Hurwitz 估计量的分层 ACSII、不跨越边界基于修正 Hansen-Hurwitz 估计量的分层 ACS、跨越边界基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的分层 ACS。它结合了传统分层抽样和适应性群团抽样的优点。目前,传统的分层抽样研究比较多,然而,关于分层适应性群团抽样的研究非常少。

本研究利用网络交叉包含概率,提出了一种新的分层适应性群团抽样方法,不跨越边界的基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的分层 ACS,给出估计量公式,并证明了其无偏性。然后,以内蒙古磴口县巴彦高勒镇西南约 8 km 的乌兰布和沙漠边缘地区为研究区,该地区植被花棒 (*Hedysarum scoparium*) 呈稀少、群团状分布,以花棒密度为研究对象,利用 9 种抽样方法:分层简单随机抽样 (其均值估计为  $t_1$ 、相应的方差估计为  $v_1$ )、跨越边界基于 Hansen-Hurwitz 估计量的分层 ACSI (其均值估计为  $t_2$ 、相应的方差估计为  $v_2$ )、跨越边界基于 Hansen-Hurwitz 估计量的分层 ACSII (其均值估计为  $t'_2$ 、相应的方差估计为  $v'_2$ )、不跨越边界基于修正 Hansen-Hurwitz 估计量的分层 ACS (其均值估计为  $t''_2$ 、相应的方差估计为  $v''_2$ )、跨越边界基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的分层 ACS (其均值估计为  $t_3$ 、相应的方差估计为  $v_3$ )、不跨越边界基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的分层 ACS (其均值估计为  $t_4$ 、相应的方差估计为  $v_4$ )、简单随机抽样 (其均值估计为  $t_5$ 、相应的方差估计为  $v_5$ )、基于修正 Hansen-Hurwitz 估计量的 ACS (其均值估计为  $t_6$ 、相应的方差估计为  $v_6$ ) 和基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的 ACS (其均值估计为  $t_7$ 、相应的方差估计为  $v_7$ ) ,进行了抽样模拟试验,这 9 种抽样方法的最初样本均采用不放回抽取,对比分析了 9 种抽样方法的精度,寻求最适宜的抽样方法,用以指导研究区稀少、群团状植被的调查。摇摇

## 1 摇不跨越边界基于修正 Horvitz-Thompson 估计量的分层 ACS

### 1.1 摇抽样设计

邻域或邻近 (Neighborhood)、网络 (Network)、边缘单元 (edge unit)、群团 (cluster)、临界值 ( $C_\alpha$ )、自适应群团抽样 (ACS) 的概念和自适应群团抽样的相关估计量公式见 Thompson (1990)、雷渊才等 (2007),本研究采用一阶邻域。

现以图 1 为例说明不跨越边界的分层自适应群团抽样方法。第 1 阶段,假设总体中有  $N$  个单元,将总体划分为  $L$  个层 (strata),各层标记为  $h$  ( $h = 1, 2, \dots, L$ ),各层包括  $N_h$  个单元,从层  $h$  中,采取不放回简单随机抽样抽取  $n_h$  个单元,各层分别独立进行抽样 (如图 1,总体单元  $N = 400$ ,层  $L = 2$ ,单元格背景为灰白色且带点的所有单元为第 1 层,其余的为第 2 层,第 1 层的样本单元数  $N_1 = 110$ ,第 2 层的样本单元数  $N_2 = 290$ 。图中标记  $\odot$  所在的单元即为最初抽取的样本单元,  $\sum n_h = 8$ ,最初样本量为 8,网格内的数字表示单元属性值)。第 2 阶段,按照适应性抽样规则,当最初样本单元值满足条件  $C$  ( $\mu_{hi}$  表示第  $h$  层中第  $i$  个单元,相对应的感兴趣的目标变量值为  $y_{hi}$ 。单元属性值  $y_{hi} \geq c_\alpha = 0$ ,  $c_\alpha$  为临界值) 时,该单元的相邻单元也入样,如果相邻单元也满足条件,且相邻单元与其在同一层内,则该相邻单元继续入样,直至遇到不满足条件的单元为止 (如图 1,抽中了 2 个单元值大于临界值的网络,被深黑色背景的单元所包围的单元为抽中的网络之一)。这个过程就称不跨越边界的分层适应性群团抽样。

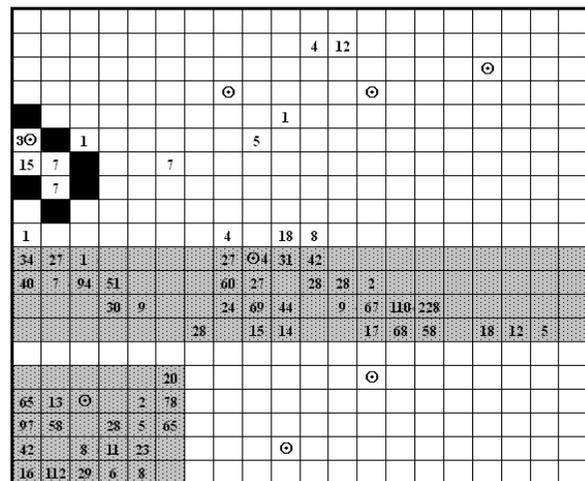


图 1 摇分层自适应群团抽样

Fig. 1 摇Stratified adaptive cluster sampling

最初样本量与最终样本：抽取的最初样本量为  $n_0 = \sum_{h=1}^L n_h$ ，最终样本为最初样本再加上按照适应性抽样规则抽取的样本单元。

不跨越边界的分层自适应群团抽样程序：1) 最初样本单元的抽取，通常采用不放回抽样对各个层分别独立抽取最初样本单元，如图 1，第 1 层中抽取的最初样本单元数  $n_1 = 2$ ，第 2 层中抽取的最初样本单元数  $n_2 = 6$ ，所以，最初样本量  $n_0 = \sum_{h=1}^L 1n_h = (2 + 6) = 8$ ；2) 临界值的设置和邻域的定义（如一阶邻域）；3) 以最初样本单元为中心，按照分层自适应群团抽样扩充原则选取额外单元，即得 8 个网络；4) 估计总体均值或总体总和及其相应的方差。摇摇

### 1.2 估计量的提出与证明

考虑到群团不跨越层的边界，将总体划分为  $K$  个独立的网络。令  $y'_{h_i}$  为第  $h$  层第  $i$  个网络单元值之和， $x_{h_i}$  为第  $h$  层第  $i$  个网络的单元数。 $\alpha_{h_i}$  为第  $h$  层第  $i$  个网络的交叉包含概率， $\alpha_{h_{ij}}$  为最初样本单元与第  $h$  层第  $i$  个网络和第  $h$  层第  $j$  网络都相交的联合交叉包含概率。由 Thompson (1990) 中的包含概率和交叉包含概率的计算公式可得： $\alpha_{h_i} = 1 - C_{N_h - x_{h_i}}^{n_h} / C_{N_h}^{n_h}$ ， $\alpha_{h_{ij}} = 1 - (C_{N_h - x_{h_i} - x_{h_j}}^{n_h} + C_{N_h - x_{h_j} - x_{h_i}}^{n_h} - C_{N_h - x_{h_i} - x_{h_j}}^{n_h}) / C_{N_h}^{n_h}$ 。

令  $z_{h_i}$  和  $z_{h_j}$  为 Bernoulli 随机变量，如果最初样本单元与第  $h$  层第  $i$  个网络相交，则  $z_{h_i} = 1$ ，否则， $z_{h_i} = 0$ ；如果最初样本单元与第  $h$  层第  $j$  个网络相交，则  $z_{h_j} = 1$ ，否则， $z_{h_j} = 0$ 。由 Bernoulli 随机变量性质得， $E(z_{h_i}) = n_h \alpha_{h_i}$ 。

由 Horvitz-Thompson 估计量和简单分层估计量，得总体均值估计量：

$$t_4 = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{y'_{h_i} z_{h_i}}{\alpha_{h_i}} \quad (1)$$

$$E(t_4) = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{n_h} E\left(\sum_{i=1}^{n_h} \frac{y'_{h_i} z_{h_i}}{\alpha_{h_i}}\right) = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{y'_{h_i} E(z_{h_i})}{\alpha_{h_i}} = \text{总体均值。因此}$$

$$\frac{y'_{h_i} E(z_{h_i})}{\alpha_{h_i}} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \frac{y'_{h_i} n_h \alpha_{h_i}}{\alpha_{h_i}} = \text{总体均值。因此}$$

此， $t_4$  为总体均值的无偏估计。 $t_4$  的方差：

$$v_4 = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^L N_h (N_h - n_h) \frac{S_h^2}{n_h} \quad (2)$$

$$S_h^2 = \frac{1}{N_h^2} \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{j=1}^{N_h} y_{h_i} y_{h_j} \left( \frac{\alpha_{h_{ij}} - 1}{\alpha_{h_i} \alpha_{h_j}} \right)$$

将样本方差  $s_h^2$  代替  $S_h^2$ ，即可得  $t_4$  方差无偏估计，

$$v_4 = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^L N_h (N_h - n_h) \frac{s_h^2}{n_h} \quad (3)$$

其中， $s_h^2 = \frac{1}{N_h^2} \sum_{i=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_h} \frac{y'_{h_i} y'_{h_j} z_{h_i} z_{h_j}}{\alpha_{h_{ij}}} \left( \frac{\alpha_{h_{ij}} - 1}{\alpha_{h_i} \alpha_{h_j}} \right)$ ，显然， $s_h^2$  为层方差无偏估计，将第  $h$  层看作亚总体，证明见 Thompson (1990)，可以得知  $t_4$  和  $v_4$  是无偏的。 $y'_{h_i}$  和  $y'_{h_j}$  为网络  $i$  和网络  $j$  的单元值之和。

由这种设计的估计量公式的推导过程，可以得知，它是一种基于 Horvitz-Thompson 分层自适应群团抽样估计量，因此称之为修正的 Horvitz-Thompson 估计量。

## 2 研究区概况与数据采集

### 2.1 研究区概况

研究地点位于内蒙古西部的磴口县，属于黄河河套地区，灌溉农业发达，境内自然环境分割明显，西部为沙漠戈壁。研究区选在内蒙古西部磴口县巴彦高勒镇西南约 8 km 黄河西岸绿洲向乌兰布和沙漠过渡的沙漠区，位于农垦区与沙漠交界处，分布有典型的沙地植被，是林业治沙技术试验区。研究区主要乔木树种为沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*)，主要灌木树种有白刺 (*Nitraria tangtorum*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 和沙蒿 (*Artemisia ordosica*) 等。主要草本植物有沙米 (*Agriophyllum squarrosum*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、沙鞭 (*Psammochloa villosa*) 和沙地旋覆花 (*Inula salsoloides*) 等。

### 2.2 样地设置与数据采集

首先在调查区范围内，选择具有稀少群团状植被的大样地，其面积为 1 000 m × 1 000 m，将该大样地划分为 100 块面积为 100 m × 100 m 样地。再将每个样地划分为 100 个 10 m × 10 m 的小样方。以样地西南角点为原点，测量小样方植株的位置。

调查内容包括 100 m × 100 m 样地的编号、样地面积、每个样地 4 个地面控制点的三维地理坐标、样地在大样地的位置图、小地形、土壤类型、土层厚度 (cm)、优势种、植被起源、树种、权属、造林时间、株行距、植被类型、调查者、调查日期等。以每个小样方 (10 m × 10 m) 为单位进行花棒株数密度的调查，经过调查得大样地花棒总株数为 2 107 株。

本研究以花棒密度数据作为研究总体，其在大样地中的位置分布状况如图 2。由此图分析可以得知：花棒分布稀少、集聚成群且分布广泛。

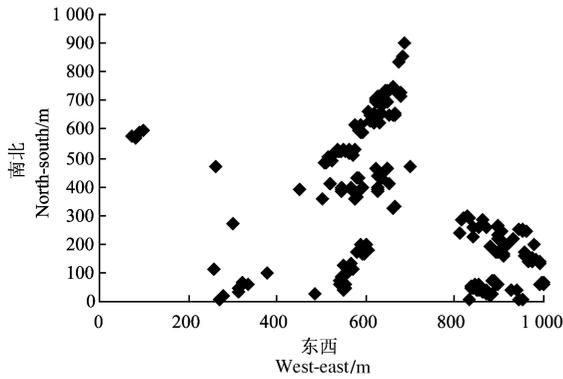


图 2 摇花棒分布

Fig. 2 摇 Distribution of *Hedysarum scoparium*

### 3 摇模拟抽样试验设计方案

邻域的定义采用一阶邻域, 临界值  $C_\alpha = 0$ , 扩充条件  $C > C_\alpha$ 。

对比各抽样方法的前提是最初样本相同, 最初样本的选取均采用不放回简单随机抽样, 简单随机抽样的自适应群团抽样的原理与方法见 Thompson (1990) 和雷渊才等 (2007)。

单元面积、总体特征和总体划分的层数等见表 1。对总体, 采取不同大小的抽样比  $\pi_i$  ( $\pi_i = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$  和  $0.1$ ), 各种抽样比均进行 5 000 摇摇摇

表 1 摇模拟试验总体参数

Tab. 1 摇 Simulation population experiment parameters

单元面积 Unit area	总体总值 Population total value	总体单元均值 Mean value of population	总体方差 Variance of population	总体单元数 Number of population unit	层数 Number of Stratum
10 m × 10 m	2 107	0.210 7	5.647 5	10 000	2
20 m × 20 m	2 107	0.842 8	34.993 288 16	2 500	2
40 m × 40 m	2 107	3.371 2	200.620 610 56	625	2
50 m × 50 m	2 107	5.267 5	365.020 943 75	400	2

次重复抽样试验。各层参数信息见表 2, 为了更直观地理解分层参数信息, 请参考图 1, 图 1 即是单元面积为 50 m × 50 m 的总体 (抽样比为 0.02)。

表 2 摇层参数信息

Tab. 2 摇 Stratum parameters information

单元面积 Unit area	层代号 Stratum code	层单元个数 Number of stratum unit
10 m × 10 m	1	1 473
	2	8 527
20 m × 20 m	1	665
	2	1 832
40 m × 40 m	1	300
	2	325
50 m × 50 m	1	110
	2	290

摇摇本次抽样采用的模拟工具是自编的抽样程序, 开发语言为 VB6.0。

## 4 摇结果与分析

### 4.1 摇分层抽样设计的样本均值与方差分析

考虑对总体进行分层的情况, 由表 1 和 3 可以得知 6 种类型估计量的均值和方差估计均值的变化呈现一定的规律: 1) 当单元面积为 10 m × 10 m、20 m × 20 m、40 m × 40 m 和 50 m × 50 m 时, 各种估计量的均值均非常接近于相应的总体均值, 6 种均

值估计量的相对误差变化范围分别为: 0.004% ~ 1.464%, 0.009% ~ 1.338%, 0.009% ~ 1.338%, 0.005% ~ 1.494%, 0.367% ~ 3.797% 和 0.579% ~ 6.682%; 2) 当单元面积为 10 m × 10 m, 20 m × 20 m, 40 m × 40 m 和 50 m × 50 m 时,  $E(v_4) < E(v_3) < E(v_2) < E(v'_2) < E(v''_2) < E(v_1)$ , 且  $E(v_2), E(v'_2)$  和  $E(v''_2)$  的差异非常小, 这是因为当各层样本量一致时,  $E(t_2) = E(t'_2), E(v_2) = E(v'_2)$ , 在这种条件下, 如果抽取的网络 (或群团) 没有跨越层的边界,  $E(t_2) = E(t'_2) = E(t''_2), E(v_2) = E(v'_2) = E(v''_2)$ ; 3) 当单元大小相同时, 随着抽样比的增加, 6 种估计量的均值方差均逐渐变小; 4) 当抽样比相等时, 随着单元面积变大, 6 种估计量的均值方差逐渐变大。

### 4.2 摇不分层抽样设计的样本均值与方差分析

考虑对总体不进行分层的情况, 由表 1 和 4 可以得知 3 种类型估计量的均值和方差估计均值的变化呈现一定的规律: 1) 当单元面积为 10 m × 10 m、20 m × 20 m、40 m × 40 m 和 50 m × 50 m 时, 各种估计量的均值均非常接近于相应的总体均值, 3 种均值估计量的相对误差分别为 0.038% ~ 6.087%, 0.005% ~ 5.693% 和 0.164% ~ 5.942%; 2) 当单元面积为 10 m × 10 m, 20 m × 20 m, 40 m × 40 m 和 50 m × 50 m 时,  $E(v_7) < E(v_6) < E(v_5)$ ; 3) 当单元面积相同时, 随着抽样比的增加, 3 种估计量的抽

摇摇摇

表 3 摇 分层设计重复抽样估计的花棒密度

Tab. 3 摇 *Hedysarum scoparium* density estimator based on stratified resampling

单元面积 Unit area	$\pi_i$	$E(t_1)$	$E(v_1)$	$E(t_2)$	$E(v_2)$	$E(t'_2)$	$E(v'_2)$	$E(t''_2)$	$E(v''_2)$	$E(t_3)$	$E(v_3)$	$E(t_4)$	$E(v_4)$
10 m × 10 m	0.02	0.210 65	0.026 84	0.210 95	0.018 89	0.210 94	0.018 89	0.211 20	0.019 11	0.209 71	0.018 23	0.209 48	0.000 61
	0.04	0.210 09	0.013 28	0.210 65	0.009 31	0.210 65	0.009 31	0.210 55	0.009 38	0.206 30	0.008 57	0.205 28	0.000 14
	0.06	0.211 26	0.008 62	0.211 20	0.005 99	0.211 20	0.005 99	0.211 16	0.006 04	0.205 44	0.005 28	0.204 03	0.000 06
	0.08	0.208 56	0.006 17	0.209 71	0.004 37	0.209 71	0.004 37	0.209 53	0.004 40	0.203 26	0.003 72	0.201 19	0.000 03
	0.10	0.211 16	0.004 94	0.210 72	0.003 45	0.210 72	0.003 45	0.210 71	0.003 48	0.202 70	0.002 81	0.200 51	0.000 02
20 m × 20 m	0.02	0.839 65	0.641 86	0.843 64	0.358 24	0.843 64	0.358 24	0.843 35	0.358 21	0.834 23	0.339 05	0.833 56	0.029 33
	0.04	0.842 11	0.318 60	0.837 11	0.173 90	0.837 11	0.173 90	0.837 14	0.173 93	0.823 22	0.155 25	0.822 29	0.006 52
	0.06	0.838 29	0.211 46	0.842 07	0.118 43	0.842 07	0.118 43	0.842 01	0.118 45	0.822 60	0.100 07	0.821 58	0.002 80
	0.08	0.846 67	0.154 32	0.842 00	0.084 54	0.842 00	0.084 54	0.842 09	0.084 56	0.815 27	0.066 68	0.814 15	0.001 32
	0.10	0.849 72	0.120 59	0.852 66	0.067 34	0.852 66	0.067 34	0.852 38	0.067 34	0.821 88	0.050 05	0.820 08	0.000 77
40 m × 40 m	0.02	3.321 94	14.525 47	3.325 74	7.582 70	3.326 09	7.595 45	3.320 83	7.659 57	3.304 76	6.761 15	3.272 34	1.296 21
	0.04	3.365 06	7.351 38	3.336 63	3.714 98	3.336 63	3.714 98	3.336 46	3.752 82	3.313 88	2.874 05	3.256 11	0.265 56
	0.06	3.371 32	5.072 30	3.372 61	2.597 10	3.372 61	2.596 02	3.372 29	2.623 37	3.330 77	1.760 23	3.243 68	0.111 03
	0.08	3.391 17	3.551 93	3.360 07	1.797 59	3.360 07	1.797 59	3.360 69	1.817 45	3.302 01	1.003 89	3.181 82	0.043 36
	0.10	3.376 11	2.768 55	3.354 08	1.413 54	3.354 01	1.413 78	3.354 40	1.428 07	3.286 21	0.662 28	3.145 95	0.022 39
50 m × 50 m	0.02	5.190 39	40.880 76	5.218 39	15.199 35	5.218 58	15.281 95	5.215 59	15.225 78	5.201 17	14.046 11	5.173 14	10.289 41
	0.04	5.319 56	20.377 13	5.215 15	7.227 95	5.216 12	7.202 86	5.236 59	7.319 54	5.150 88	5.808 98	5.125 77	2.079 00
	0.06	5.311 15	13.109 99	5.330 94	4.806 07	5.330 34	4.770 13	5.323 97	4.800 60	5.248 15	3.230 66	5.176 53	0.742 07
	0.08	5.250 66	9.616 54	5.244 57	3.483 28	5.245 30	3.456 54	5.252 99	3.513 23	5.165 72	1.924 59	5.105 40	0.320 40
	0.10	5.276 91	6.682 97	5.298 95	2.495 87	5.298 95	2.495 87	5.294 64	2.494 97	5.211 18	1.006 36	5.146 52	0.114 27

表 4 摇 不分层设计重复抽样估计的花棒密度

Tab. 4 摇 *Hedysarum scoparium* density estimator based on unstratified resampling

单元面积 Unit area	$\pi_i$	$E(t_5)$	$E(v_5)$	$E(t_6)$	$E(v_6)$	$E(t_7)$	$E(v_7)$
10 m × 10 m	0.02	0.208 72	0.027 28	0.208 98	0.019 50	0.208 04	0.018 75
	0.04	0.207 70	0.013 41	0.208 23	0.009 56	0.204 32	0.008 74
	0.06	0.210 78	0.008 88	0.210 71	0.006 27	0.205 20	0.005 47
	0.08	0.207 50	0.006 32	0.208 63	0.004 55	0.202 56	0.003 82
	0.10	0.210 97	0.005 10	0.210 53	0.003 62	0.202 70	0.002 91
20 m × 20 m	0.02	0.839 65	0.678 09	0.843 64	0.395 43	0.836 83	0.370 94
	0.04	0.842 11	0.336 36	0.837 11	0.191 32	0.825 57	0.168 26
	0.06	0.828 32	0.217 69	0.832 10	0.127 05	0.816 73	0.105 10
	0.08	0.846 67	0.162 88	0.842 00	0.093 00	0.817 19	0.071 39
	0.10	0.849 72	0.127 36	0.852 66	0.074 09	0.823 62	0.053 31
40 m × 40 m	0.02	3.444 33	16.590 12	3.445 20	8.979 22	3.438 22	7.888 39
	0.04	3.365 06	7.745 55	3.336 63	4.083 98	3.339 31	3.077 34
	0.06	3.323 13	5.180 36	3.325 60	2.773 15	3.323 39	1.813 40
	0.08	3.391 17	3.739 94	3.360 07	1.969 95	3.318 48	1.058 00
	0.10	3.400 23	2.960 68	3.377 38	1.572 08	3.308 66	0.706 66
50 m × 50 m	0.02	5.379 46	54.491 90	5.392 30	24.842 40	5.580 48	21.693 39
	0.04	5.168 17	23.615 38	5.079 70	10.495 00	5.235 50	7.467 64
	0.06	5.054 67	14.545 55	5.095 63	6.679 08	5.258 87	3.817 36
	0.08	4.946 87	10.334 02	4.967 64	4.706 22	5.149 91	2.137 28
	0.10	5.276 91	8.192 52	5.298 95	3.759 03	5.286 01	1.254 84

样效率均逐渐增加;4)当抽样比相等时,随着单元大小的增加,3种估计量的抽样效率均递减。

## 5 结 论

以花棒密度为研究对象,通过对9种抽样方法(简单随机抽样、分层简单随机抽样、基于修正Hansen-Hurwitz估计量的ACS、基于修正Horvitz-Thompson估计量的ACS、跨越边界基于Hansen-Hurwitz估计量的分层ACSI、跨越边界基于Hansen-Hurwitz估计量的分层ACSI、不跨越边界基于修正Hansen-Hurwitz估计量的分层ACS、跨越边界基于修正Horvitz-Thompson估计量的分层ACS、不跨越边界基于修正Horvitz-Thompson估计量的分层ACS)的比较得出以下结论:

1)不跨越边界基于修正Horvitz-Thompson估计量的分层ACS的效率最高,简单随机抽样的效率最低;

2)分层的抽样方法优于不分层的抽样方法;

3)当单元面积相同时,随着抽样比的增加,9种

估计量的抽样效率均逐渐增加;

4)当抽样比相等时,随着单元面积的增加,9种估计量的抽样效率均递减。

## 参 考 文 献

- 雷渊才,唐守正.2007.适应性群团抽样技术在森林资源清查中的应用.林业科学,43(11):132-138.
- Felix-Medina M H, Thompson S K. 2004. Adaptive cluster double sampling. *Biometrika*, 91: 877-891.
- Hansen M M, Hurwitz W N. 1943. On the theory of sampling from finite populations. *Annals of Mathematical Statistics*, 14: 333-362.
- Horvitz D G, Thompson D J. 1952. A generalization of sampling without replacement from a finite universe. *Journal of the American Statistical Association*, 47: 663-685.
- Salehi M M, Seber G A F. 1997. Two-stage adaptive cluster sampling. *Biometrics*, 53: 959-970.
- Thompson S K. 1990. Adaptive cluster sampling. *Journal of the American Statistical Association*, 85: 1050-1059.
- Thompson S K. 1991. Stratified adaptive cluster sampling. *Biometrika*, 78: 389-397.

(责任编辑 摇于静娴)