

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.002

基于森林资源二类调查数据的森林生物量抽样设计对比研究

田志艳, 延原原, 张超

(西南林业大学, 云南 昆明 650224)

摘要:探究和对比不同抽样方法对森林生物量抽样调查中样地数量、样地布设及估算精度等方面的影响, 优选适宜的抽样方案, 在保证精度的前提下节省外业调查的工作量和成本。基于云南省大理市 2016 年森林资源二类调查小班数据, 以森林起源、龄组、优势树种作为分层变量, 在可靠性为 95%、抽样精度为 90% 和 85% 的条件下, 计算分层抽样所需的样本单元数, 并与系统抽样进行比较分析; 以分层抽样方法进行大理市森林地上生物量的抽样设计, 将抽样结果与系统抽样方法进行比较分析。结果表明, 抽样精度为 90% 时, 分层抽样所需的样本单元数分别比系统抽样少 21.91%、12.92% 和 45.51%; 抽样精度为 85% 时, 分层抽样所需的样本单元数分别比系统抽样少 21.51%、12.66% 和 45.57%; 在相同的抽样精度条件下, 抽样单元数呈现起源 > 优势树种 > 龄组的变化趋势。按抽样精度 90%, 系统抽样估测的大理市森林地上总生物量为 1 914.83 万 t, 按起源、优势树种和龄组, 其总生物量估测值分别为 1 608.22 万 t、1 679.03 万 t、1 536.08 万 t。在可靠性和抽样精度相同时, 实际抽样精度排序为起源 > 优势树种 > 龄组, 其中, 利用优势树种估测的森林地上总生物量为 1 679.03 万 t, 最接近实际值, 按优势树种估测的抽样效果较好, 抽样精度为 96.63%。由于分层抽样具有样本数量少、抽样精度高的明显优势, 可为区域森林生物量抽样调查和估测提供方法参考。
关键词: 分层抽样; 系统抽样; 森林地上生物量; 抽样精度; 森林资源二类调查数据

中图分类号: S718.556; S757.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3168(2023)02-0009-07

引文格式: 田志艳, 延原原, 张超. 基于森林资源二类调查数据的森林生物量抽样设计对比研究[J]. 林业调查规划, 2023, 48(2): 9-15. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.002

TIAN Zhiyan, YAN Yuanyuan, ZHANG Chao. Comparative Study on Sampling Design of Forest Biomass Based on Forest Management Inventory Data [J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(2): 9-15. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.002

Comparative Study on Sampling Design of Forest Biomass Based on Forest Management Inventory Data

TIAN Zhiyan, YAN Yuanyuan, ZHANG Chao

(Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: This paper explored and compared the effects of different sampling methods on the number, layout, and estimation accuracy of sample plots in forest biomass sampling surveys, and selected suitable sampling plans to save the workload and cost of field surveys while ensuring accuracy. Based on the sub-compartment data of forest management inventory in Dali City, Yunnan Province in 2016, using forest

收稿日期: 2022-02-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160405); 云南省“万人计划”人才培养项目(YNWR-QNBJ-2018-334).

第一作者: 田志艳(1997-), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生. 研究方向为数字林业和森林资源管理. Email: 1143449086@qq.com

责任作者: 张超(1980-), 男, 河北唐山人, 博士, 教授. 研究方向为森林经理学. Email: 42668600@qq.com

origin, age group, and dominant tree species as stratified variables, the number of sample units required for stratified sampling was calculated and compared with systematic sampling under the conditions of reliability of 95%, sampling accuracy of 90% and 85%; the sampling design of forest aboveground biomass was made by using stratified sampling method, and the sampling results were compared with systematic sampling method. The results showed that when the design accuracy was 90%, stratified sampling was 21.91%, 12.92%, and 45.51% less than systematic sampling, respectively; when the design accuracy was 85%, stratified sampling was 21.51%, 12.66%, and 45.57% less than the systematic sampling, respectively; under the same design precision, the number of sampling units showed a trend of origin > dominant tree species > age group; according to 90% design accuracy, the total biomass estimated by systematic sampling was 19.148 3 million t, the total biomass estimated by origin, dominant tree species and age group was 16.082 2 million t, 16.790 3 million t, 15.360 8 million t, respectively. When the reliability and sampling design accuracy were the same, the actual sampling accuracy results was origin > dominant tree species > age group, in which the overall biomass estimated by the dominant tree species was 16.790 3 million t which was closest to the actual biomass, and the sampling effect of estimated biomass based on the dominant tree species was better with the sampling accuracy of 96.63%. Due to the obvious advantages of small sample size and high sampling accuracy, stratified sampling could provide a method reference for regional forest biomass sampling and estimation.

Key words: stratified sampling; systematic sampling; forest aboveground biomass; sampling accuracy; forest management inventory data

森林生物量是森林经过长期的生产和代谢,在一定年龄、一定面积上所生长的全部干物质的重量^[1]。作为森林生态系统最基本的特征数据,森林生物量是研究森林生态系统结构、特征、功能以及森林生产力的基础,亦是计算森林生态系统碳储量的重要数据来源和全球碳循环的重要组成部分,是林学和生态学领域研究的热点问题^[2]。为克服传统生物量调查时劳动强度大、时间和人力成本高等弊端,研究采用抽样的方式对森林生物量进行估测,这是目前可行的调查方法。森林生物量估测方法已成为区域或全国范围内进行森林生物量、生产力及其动态变化和碳平衡研究中最具代表性的手段之一。森林生物量数据主要通过直接测量和间接估算两种途径获得。目前,有关森林生物量间接估算的方法已有大量研究。可通过单木生物量推算样地生物量,再通过加权平均等方法推算林分、区域甚至更大空间尺度的森林生物量数据^[3-11]。森林生物量抽样估计方法多基于森林资源连续清查(简称“一类调查”)样地数据或森林资源规划设计调查(简称“二类调查”)小班数据,因此其抽样估计方法多采用系统抽样或分层抽样^[12]。

系统抽样可使样本单元在总体中均匀分布,具有良好的代表性,且计算和操作简便,统计学基础可靠,是目前森林生物量抽样估计最常用且可行的途

径^[13];分层抽样则在样本量相同的情况下,总体标准误一般小于简单随机抽样、系统抽样或整群抽样^[14],可显著提高估计精度,减少样本数量,节约调查成本^[15]。分层抽样可将用地类型、森林类型、优势树种、林龄等属性作为分层变量^[16],同时对各层进行参数估计。本研究以云南省大理市为研究区,基于全市二类调查小班数据,分别从样地大小、样本数量和抽样方法 3 个方面系统分析森林生物量抽样的不确定性;在可靠性为 95% 和抽样精度为 90%、85% 的两个水平,对基于不同分层变量的分层抽样和系统抽样进行对比分析,为今后区域森林生物量的精准计量方法研究提供理论依据,为提高森林生物量的抽样效率、建立精准高效的森林生物量抽样方法体系提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于云南省大理市,地处云南省中部偏西,平均海拔为 2 090 m,地理坐标为东经 98°52'~101°03',北纬 24°41'~26°42'。土地总面积 29 459 km²。以低纬高原季风气候为主,四季温和,年温差小;由于地形地貌复杂,海拔高差悬殊,气候的垂直差异显著;河谷热,坝区暖,山区凉,高山寒,立体气候特征显著。森林资源丰富,是云南省的重点林区。主要树种有云南松、华山松、铁杉、冷杉、马尾杉、思

茅松、柏树、樟树、椿树和栎树等。珍稀树种有银杏、牟尼柏、罗汉松、秃杉、红豆杉和珙桐等。

森林资源情况,截至 2020 年底,大理市森林总面积 80 892 hm²,森林覆盖率 46.54%,其中,有林地面积 70 491 hm²,占总面积的 87.14%;国家特别规定灌木林地面积 10 400 hm²,占 12.86%。在森林总面积中,天然林面积 44 417 hm²,占 54.91%;人工林面积 36 474 hm²,占 45.09%。与 2019 年相比,2020 年度全市森林面积由 70 232 hm² 增长到 80 891 hm²,净增 10 659 hm²,增幅为 15.15%;全市森林覆盖率由 40.41%增长到 46.54%,净增 6.13%,呈平稳增长态势。

2 材料与方法

2.1 森林地上生物量计算

以大理市 2016 年森林二类调查小班矢量数据为主要数据源,设置抽样间隔为 1 km × 1 km,对森林地上生物量样本数据进行整理,以此作为本研究基础数据。参考《云南省森林生物量和碳储量估算及发布研究》^[17],利用生物量扩展因子法进行蓄积量-生物量转换,计算小班生物量,生物量转换因子模型如式(1)所示。各主要优势树种生物量扩展因子及木材密度如表 1 所示,计算得出的研究区地上生物量统计结果如表 2 所示。

$$B = V \cdot \text{SVD} \cdot \text{BEF} \quad (1)$$

式中: B 为森林地上生物量; BEF 为生物量扩展因子; SVD 为某优势树种的木材密度; V 为林分蓄积。

表 1 森林地上生物量转换因子

Tab. 1 Conversion factors of forest aboveground biomass

优势树种	木材密度 (SVD)	生物扩展因子 (BEF)	优势树种	木材密度 (SVD)	生物扩展因子 (BEF)
云南松	0.483	1.6193	桉木	0.541	1.4237
栎类	0.676	1.3551	其他	0.482	1.5136
华山松	0.396	1.7854	桉树	0.578	1.2633

2.2 抽样设计

以上述计算得到的大理市森林地上生物量小班数据为基础,根据起源、龄组、优势树种等常用的森林生物量调查因子作为分层变量,在可靠性为 95% 时,分别设置抽样精度为 90% 和 85%,并采用系统抽样进行对比分析。为确保达到抽样的准确性,共

表 2 大理市森林地上生物量统计

Tab. 2 Statistics of forest aboveground biomass in Dali City

优势树种	面积 /hm ²	生物量 /万 t	单位面积生物量 /(t · hm ⁻²)
云南松	227256.2	987.37	43.4
栎类	83719.3	579.88	69.3
其他	23026.1	113.96	49.5
总计	334001.6	1681.21	50.3

重复抽取 10 次,样地大小重采样为 30 m × 30 m 的栅格数据。

2.2.1 样本单元数确定

1) 系统抽样样本单元数确定

对森林地上生物量样本数据进行随机抽取,计算标准差为 30.25 t/hm²,平均值为 46.60 t/hm²,利用平均值和标准差计算变异系数(c)。在可靠性为 95% 和抽样精度为 90%、85% 的情况下,计算所需要的样本量(n)为:

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} c}{E} \right)^2 \quad (2)$$

式中: c 为总体变动系数; E 为给定的相对误差; t_{α} 为可靠性指标。

为避免无反应单元的情况,增加 10% 的保险系数,系统抽样样本数确定方法与简单随机抽样方法相同。

2) 基于不同分层变量的分层抽样样本单元数确定

利用森林起源、龄组、优势树种作为分层变量,计算不同分层下的样本平均值与标准差,通过总样本和各层样本计算各层权重。分层抽样的样本计算方法采用的是最优分配法,根据各层的变动大小和层权重 2 个方面,再给定 n 的条件下,合理分配各层的样本单元数(n_h),使得误差达到最小;且在各层独立、随机地进行抽样,其计算公式为:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \sum_{h=1}^m W_h S_h^2}{E^2 \left(\sum_{h=1}^m W_h \bar{y}_h \right)^2} \quad (3)$$

式中: W_h 为第 h 层总体单元占总体 N 的比重(层权重); S_h 为第 h 层的标准差; \bar{y}_h 为第 h 层平均数估计值。

2.2.2 样地布设

基于 ArcGIS 生成研究区公里网格。系统抽样的样本点是均匀分布的,计算抽样间隔;分层抽样基

于森林二类调查数据获得不同分层的图层,在层内以网络编号随机确定样地位置。两个样地之间实际地面距离(L)公式为:

$$L = 100 \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (4)$$

式中: A 为总体面积; n 为实际抽取的样本单元数。

2.3 抽样精度计算

总体平均数估计值标准误差($S_{\bar{Y}_{st}}$)、绝对误差限($\Delta_{\bar{Y}_{st}}$)、相对误差限(AE)、抽样精度(p)计算公式分别为:

$$S_{\bar{Y}_{st}} = \sqrt{S_{\bar{Y}_{st}}^2} \quad (5)$$

$$\Delta_{\bar{Y}_{st}} = t_{\alpha} \times S_{\bar{Y}_{st}} \quad (6)$$

$$AE = \frac{\Delta_{\bar{Y}_{st}}}{\bar{Y}_{st}} \times 100\% \quad (7)$$

$$p = 100\% - AE \quad (8)$$

式中: $S_{\bar{Y}_{st}}^2$ 为层平均数方差; \bar{Y}_{st} 为平均数估计值。

2.4 分层变量的方差分析

采用 SPSS 中的单因素方差分析法,分别计算起源、龄组、优势树种的森林地上生物量组间和组内方差,进而解释森林地上生物量调查中对分层抽样变量选择的合理性。

3 结果与分析

3.1 样地布设

利用系统抽样进行了样地单元布设,在设置精度为 90% 和 85% 的情况下,计算出 2 种抽样间隔,分别是 4 332 m × 4 332 m、6 502 m × 6 502 m,结果如图 1 所示。在 ArcGIS 中利用 Fishnet 对大理市进行不同规格抽样单元的划分,然后对样本进行有规律的抽取。

3.2 分层抽样

利用起源、龄组、优势树种 3 个常用的森林调查因子,根据其因子特性首先进行分层。分层后利用 SPSS 中的单因素方差分析结果(表 3)以及传统分层抽样的要求,对样本过少的分层进行合并,并根据分类习惯调整。最终得出利用 3 个森林调查因子进行分层的结果,结果如图 2 所示。

3.3 抽样单元数

分层抽样的样本计算方法均采用的是最优分配法,计算出各个因子所占比例,根据公式计算抽样单元数。不同抽样方法在不同设计精度情况下的抽样单元数如表 4 所示。

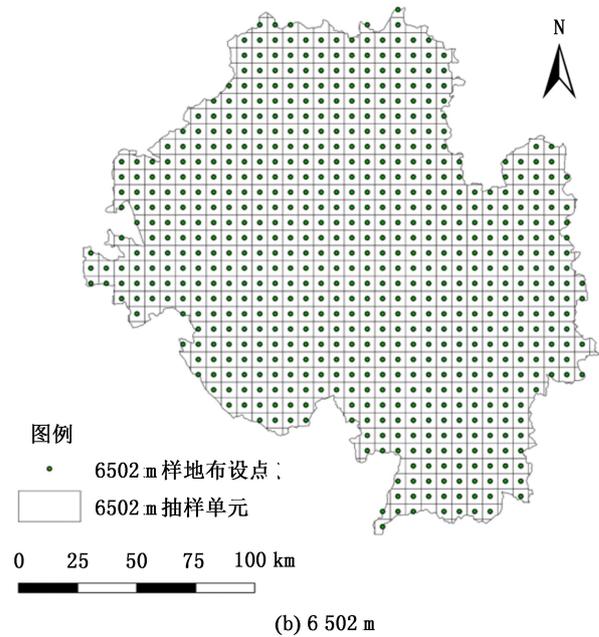
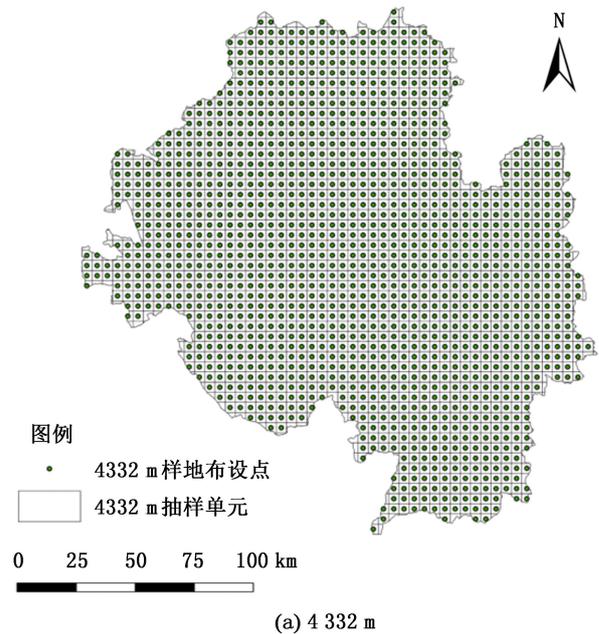


图 1 样地布点

Fig. 1 Layout of sample plots

从表 4 可以看出,在分层抽样中,利用优势树种、起源、龄组 3 个分层变量分层抽取所需的样本单元数,在设置可靠性为 95%、抽样精度为 90% 时,分别比系统抽样少 21.91%、12.92%、45.51%;抽样精度为 85% 时,分别比系统抽样少 21.51%、12.66%、45.57%。

根据样本单元数的计算结果来看,在相同设计精度下,系统抽样的抽样单元数较多,分层抽样单元数相对较少。在分层抽样中,抽样单元数呈现起源 > 优势树种 > 龄组的变化趋势。

表 3 单因子分层抽样方差分析
Tab. 3 Analysis of variance of one-way stratified sampling

调查因子	类别	平均值 /(t · hm ⁻²)	标准差 /(t · hm ⁻²)	权重 /hm ²
优势树种	云南松	41.42	23.50	68.0
	栎类	64.00	41.94	25.1
	其他树种	45.90	28.42	6.9
起源	天然	49.68	33.29	72.8
	人工	40.14	22.69	8.1
	飞播	39.92	20.02	19.1
龄组	龄组 I	31.42	17.04	36.3
	龄组 II	47.22	22.00	47.1
	龄组 III	85.18	44.08	16.7
总计		46.61	30.25	100.0

注:优势树种的其他树种包括华山松、桉木、其他阔叶林、桉树;龄组 I (幼龄林)、龄组 II (中龄林)、龄组 III (近熟林、成熟林、过熟林)。

表 4 样本单元数确定

Tab. 4 Determination of sample units number

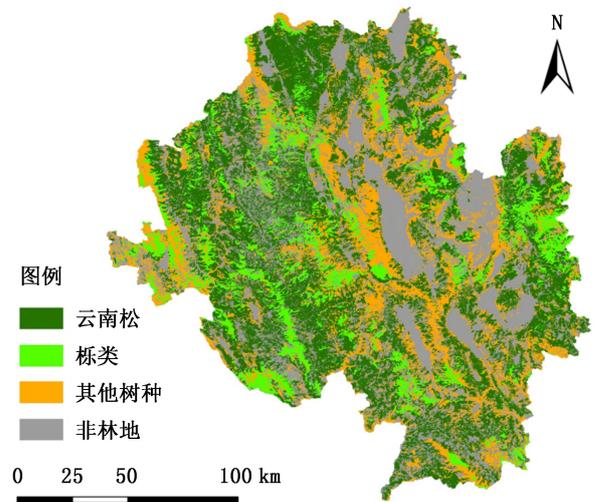
抽样精度 /%	抽样单元数				
	系统抽样	分层抽样	与系统抽样比较 /%	系统抽样间隔 /m	
90	178	优势树种	139	-21.91	4332
		起源	155	-12.92	
		龄组	97	-45.51	
85	79	优势树种	62	-21.51	6502
		起源	69	-12.66	
		龄组	43	-45.57	

3.4 抽样精度

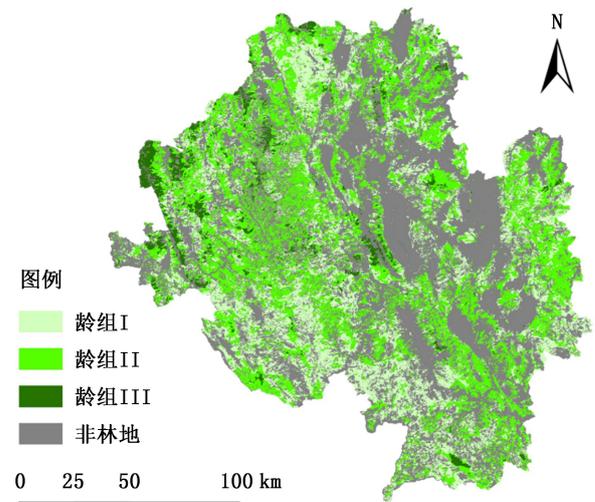
利用不同分层因子进行分析,其分层抽样精度均比系统抽样精度高,重复抽取 10 次(表 5)。

在系统抽样中,设置可靠性为 95%,抽样精度为 90%时,实际抽样精度为 90.91%,估测的总体生物量为 1 914.83 万 t;抽样精度为 85%时,实际抽样精度为 87.25%,估测的总体生物量为 1 674.35 万 t,此时最接近实际生物量。

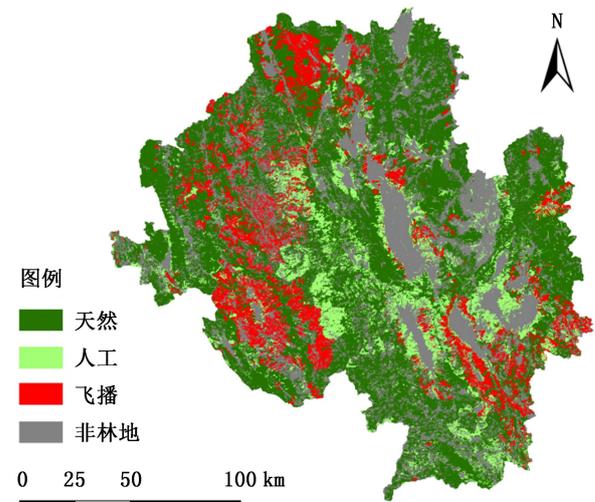
在分层抽样中,设置可靠性为 95%,抽样精度为 90%时,以优势树种为分层变量的实际抽样精度为 96.63%;以起源为分层变量的实际抽样精度为 96.77%;以龄组为分层变量的实际抽样精度为 96.00%;实际抽样精度结果排序为起源 > 优势树种 >



(a) 优势树种



(b) 龄组



(c) 起源

图 2 分层提取结果

Fig. 2 Layered extraction results

表 5 不同抽样方法的抽样结果

Tab. 5 Sampling results of different sampling methods

设计精度 /%	抽样方法	类别	分层变量	平均值 / (t·hm ⁻²)	标准差 / (t·hm ⁻²)	相对误差 /%	抽样精度 /%	总生物量 / 万t			
90	系统抽样			57.33	35.46	9.09	90.91	1914.83			
		分层抽样	优势树种	云南松	42.60	25.09			1422.85		
				栎类	61.99	39.50			2070.48		
				其他树种	50.34	20.48			1681.37		
				总计	50.27	32.33	3.37	96.63	1679.03		
		起源	天然	50.13	33.33			1674.35			
			人工	44.12	18.16			1473.62			
			飞播	37.52	16.28			1253.18			
		总计	48.15	31.23	3.23	96.77	1608.22				
		龄组	龄组I	31.80	13.78			1062.13			
			龄组II	47.77	25.73			1595.53			
			龄组III	91.22	38.58			3046.77			
		总计	45.99	29.22	4.00	96.00	1536.08				
		85	系统抽样			50.13	28.97	12.75	87.25	1674.35	
				分层抽样	优势树种	云南松	42.52	22.22			1420.18
						栎类	86.88	56.12			2901.81
						其他树种	47.21	47.68			1573.82
						总计	59.28	45.21	6.00	94.00	1979.96
起源	天然			50.54	31.13			1688.05			
	人工			28.78	9.58			961.26			
	飞播			39.72	19.16			1326.66			
总计	47.87			29.58	4.61	95.39	1598.87				
龄组	龄组I			29.16	14.42			973.95			
	龄组II			43.85	20.39			1464.60			
	龄组III			66.00	21.81			2204.41			
总计	40.10			23.36	5.51	94.49	1339.35				

龄组,利用优势树种估测的总体生物量为 1 679.03 万t,最接近实际生物量;抽样精度为 85%时,以优势树种为分层变量的实际抽样精度为 94.00%;以起源为分层变量的实际抽样精度为 95.39%;以龄组为分层变量的实际抽样精度为 94.49%;实际抽样精度排序结果为龄组 > 起源 > 优势树种,利用起源估测的总体生物量为 1 598.87 万t,最接近实际生物量。

3.5 分层变量对比分析

不同分层变量的方差分析结果见表 6。

表 6 分层变量的组内与组间的方差分析

Tab. 6 Analysis of variance within and between groups of stratified variables

分层因子	类别	平方和	自由度	均方	F	P
优势树种	组间	3549.477	5820	0.610	2.962	0.000
	组内	1667.245	8096	0.206		
	总计	5216.723	13916			
起源	组间	4019.019	5820	0.691	1.000	0.504
	组内	5592.236	8096	0.691		
	总计	9611.256	13916			
龄组	组间	3948.064	5820	0.678	2.193	0.000
	组内	2504.387	8096	0.309		
	总计	6452.451	13916			

由表 6 可以看出,单因子变量分层抽样中,组间方差均高于组内方差,组间差异呈现优势树种 > 龄组 > 起源的趋势,其中优势树种变量的组间方差最大,这与实际抽样精度结果一致。

4 结论与讨论

1) 以大理市 2016 年森林资源规划设计调查(二类调查)小班矢量数据为基础数据,采用系统抽样和分层抽样方法,在相同可靠性和不同设计精度下,对实际抽样精度、抽样样本单元数和抽样效率进行对比分析。系统抽样采用计算间隔进行抽样,分层抽样以起源、优势树种、龄组为分层变量进行抽样。

2) 根据抽样精度计算结果得出,抽样调查精度的高低取决于抽样误差及可靠性指标。当可靠性一定时,抽样误差越小,估计误差亦越小,精度则越高。当抽样误差一定时,可靠性指标越高,精度越低。当设计可靠性为 95%、抽样精度为 85%时,系统抽样的样本量为 79,实际抽样精度为 87.25%,估测的总生物量为 1 674.35 万t,与实际估测的生物量接近;当设计可靠性为 95%、抽样精度为 90%时,按优势树种进行分层抽样,其样本量为 139,实际抽样精度为 96.63%,估测的总生物量为 1 679.03 万t,与实际估测的生物量接近,抽样效果最好。根据不同抽样方法的样本数量估测的总生物量结果得出,90%和

85%的抽样设计精度为不同成本投入和精度要求下开展森林生物量估测提供了多种抽样选择。与系统抽样相比,分层抽样具有样本数量少、抽样精度高的明显优势。

3)样本单元数的大小直接与资金投入和外业调查时间相关,是抽样效率的主要评价因子。在森林碳储量计算过程中抽样误差主要受样地数量、大小、抽样方式及自然条件等因素影响^[18]。在实际调查中调查方式仍以人力调查为主,将增加人为误差,如树高对应错误、树木漏测、树种记录错误等,均会对内业计算产生影响;有的样本单元分散或部分样地位置特殊,也将增加生物量数据的不确定性。单从抽样成本与估测精度来确定抽样方法是不全面的。在实际操作中,要考虑森林生物量空间分布存在显著差异^[19]。

4)本研究中森林生物量值通过生物量扩展因子转换得出,最终导致一些生物量值偏高或偏低,在实际调查中可调整计算标准。在分层抽样中,为保证抽样精度,可将数据少或差别不明显的层合并优化,保证层间方差大即可,这样进行的生物量分层抽样设计将具有很强的合理性,理论上可获得更高的抽样效率。将优势树种部分数据进行合并,抽样效果较好,但由于本次研究的样本数量有限,尚缺乏具体优化设计。在下一步研究中,可根据因子属性将一些常规的分层变量进行细化和优化,找到最优抽样设计方案,以达到减小误差,提高效率,降低成本,提高抽样效率的目的。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国森林生态系统生物量和生产力[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2] FANG J Y, LIU G H, XU S L. Forest biomass of China: An estimation based on the biomass-volume relationship[J]. Ecological Applications, 1998(8): 1084-1091.
- [3] 唐守正,张会儒. 相容性生物量模型的建立及其估计方法的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(z1): 19-27.
- [4] 雷渊才,唐守正. 适应性群团抽样技术方法和应用研究进展[J]. 林业科学, 2009, 45(3): 118-127.
- [5] 李海奎,赵鹏祥,雷渊才,等. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较[J]. 林业科学, 2012, 48(5): 44-52.
- [6] 胥辉. 两种生物量模型的比较[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(2): 36-39.
- [7] 曾伟生,唐守正. 国外立木生物量模型研究现状与展望[J]. 世界林业研究, 2010, 23(4): 30-35.
- [8] 雷相东,张会儒,牟惠生. 东北过伐林区蒙古栎林分相容性生物量模型研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 559-565.
- [9] 王仲锋. 森林生物量建模与精度分析[D]. 北京:北京林业大学, 2006.
- [10] 罗云建,张小全,王效科,等. 森林生物量的估算方法及其研究进展[J]. 林业科学, 2009, 45(8): 129-134.
- [11] AVITABILE V, CAMIA A. An assessment of forest biomass maps in Europe using harmonized national statistics and inventory plots[J]. Forest Ecology and Management, 2017(409): 489-498.
- [12] 冯仲科,罗旭,石丽萍. 森林生物量研究的若干问题及完善途径[J]. 世界林业研究, 2005, 18(3): 25-28.
- [13] SHEN W J, LI M S, HUANG C Q, et al. Annual forest aboveground biomass changes mapped using ICESat/GLAS measurements, historical inventory data, and time-series optical and radar imagery for Guangdong province, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018(259): 23-38.
- [14] STRIMBU V F, ENE L T, GOBAKKEN T, et al. Post-stratified change estimation for large-area forest biomass using repeated ALS strip sampling[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2017(47): 839-847.
- [15] FASSNACHT F E, LATIFI H, HARTIG F. Using synthetic data to evaluate the benefits of large field plots for forest biomass estimation with LiDAR[J]. Remote Sensing of Environment, 2018(213): 115-128.
- [16] 张超. 三峡库区森林碳储量估测研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [17] 胥辉,张子翼,欧光龙,等. 云南省森林生物量和碳储量估算及分布研究[M]. 昆明:云南科技出版社, 2019.
- [18] PICARD N, GAMARRA J G P, BIRIGAZZI L, et al. Plot-level variability in biomass for tropical forest inventory designs[J]. Forest Ecology and Management, 2018(430): 10-20.
- [19] AHMED R, SIQUEIRA P, HENSLEY S, et al. Uncertainty of forest biomass estimates in north temperate forests due to allometry: Implications for remote sensing[J]. Remote Sensing, 2013(5): 3007-3036.

责任编辑: 陈旭