北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

利用空间分布模式与样地设计提升森林资源抽样调查精度

胡樱馨 梅安琪 徐晴 侯正阳

Using spatial distribution patterns and sample plot design to improve the accuracy of forest resource sampling survey

Hu Yingxin, Mei Anqi, Xu Qing, Hou Zhengyang

引用本文:
胡樱馨, 梅安琪, 徐晴, 侯正阳. 利用空间分布模式与样地设计提升森林资源抽样调查精度[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2):155-165. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230061
Hu Yingxin, Mei Anqi, Xu Qing, Hou Zhengyang. Using spatial distribution patterns and sample plot design to improve the accuracy of forest resource sampling survey[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2):155-165. doi: 10.12171/j.1000-1522.20230061

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230061

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遥感的高山松连清固定样地地上生物量估测模型构建

Establishment of remote sensing based model to estimate the aboveground biomass of *Pinus densata* for permanent sample plots from national forestry inventory

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 1-11. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190394

重庆主城区屋顶绿化乡土植物资源调查及其应用分析

Resource investigation of roof greening native plant of Chongqing main city and its landscape application analysis

北京林业大学学报, 2017, 39(11): 92-97. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170281

杨桦次生林林分空间结构参数多元分布研究

Multivariate distribution of spatial structure parameters of *Populus davidiana-Betula platyphylla* secondary forest

北京林业大学学报, 2021, 43(2): 22-33. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200076

温带云冷杉混交林凋落物养分的空间分布特征

Spatial distribution characteristics of litter nutrients in temperate spruce-fir mixed forests

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 73-84. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200065

林分空间结构参数*N*元分布及其诠释

N-variate distribution and its annotation on forest spatial structural parameters: a case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural mixed forest in Xiaolong Mountains, Gansu Province of northwestern China

北京林业大学学报, 2019, 41(4): 21-31. https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20180228

兴安落叶松人工林空间结构优化

Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 68-76. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200228

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230061

利用空间分布模式与样地设计提升森林资源抽样调查精度

胡樱馨[1,2]　梅安琪[1,2]　徐　晴[3]　侯正阳[1,2]

（1. 北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083；2. 国家林业和草原局黑龙江三江平原沼泽草甸生态系统定位观测研究站，黑龙江 双鸭山 518000；3. 国际竹藤中心竹藤资源与环境研究所，国家林业和草原局/北京市共建竹藤科学与技术重点实验室，北京 100102）

摘要:【目的】森林资源调查中，研究森林属性空间分布模式下的抽样设计，以突破地域限制，为抽样调查提供可推广的经验法则。**【方法】**利用北京市鹫峰国家森林公园样地调查的实测数据，构建人工总体。以树木死亡率作为为森林属性的代理属性,表达空间自相关。采用系统抽样设计，并通过蒙特卡洛模拟法，评估森林空间自相关、样地大小以及系统抽样设计对抽样精度的影响。**【结果】**(1)4 种不同空间分布模式的总体变异系数，从小到大依次为：死亡率为 0% 的总体、死亡率为 20% 的随机模式总体、死亡率为 10% 的聚集模式总体、死亡率为 20% 的聚集模式总体。当死亡率为 20%，抽样强度为 2.73% 时，随机模式的变异系数比聚集模式的变异系数低了 1.3%。(2)3 种不同大小的样地总体变异系数，从小到大依次为：20 m × 20 m、30 m × 30 m、40 m × 40 m。其中，40 m × 40 m 的变异系数明显高于 20 m × 20 m 和 30 m × 30 m 对应的变异系数。(3)随着抽样强度增大，随机模式下 8 × 8 的主单元数目设计的人工总体的变异系数比 4 × 4 的约高 0.02%，比 16 × 16 的约高 0.15%；聚集模式下，8 × 8 的 N 设计的人工总体的变异系数比 4 × 4 的约高 0.32%，比 16 × 16 的约低 0.54%。**【结论】**(1)不同强度的空间自相关都会削弱抽样精度，其中聚集模式相比随机模式的影响更为显著；(2)较小的样地有利于提高抽样精度和精度的收敛速度，但合理大小的样地设计才能有效提升抽样效率；(3)系统抽样中不同主单元数目对抽样精度的影响不明显，实际调查中应避免选择样本量为 1 的系统抽样，否则抽样误差难以度量。

关键词：抽样调查；空间模式；样地大小；系统抽样

中图分类号：S757.2　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)02−0155−11

引文格式：胡樱馨，梅安琪，徐晴，等. 利用空间分布模式与样地设计提升森林资源抽样调查精度［J］. 北京林业大学学报，2024，46(2)：155−165. Hu Yingxin, Mei Anqi, Xu Qing, et al. Using spatial distribution patterns and sample plot design to improve the accuracy of forest resource sampling survey［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 155−165.

Using spatial distribution patterns and sample plot design to improve the accuracy of forest resource sampling survey

Hu Yingxin[1,2]　Mei Anqi[1,2]　Xu Qing[3]　Hou Zhengyang[1,2]

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Ecological Observation and Research Station of Heilongjiang Sanjiang Plain Wetlands, National Forestry and Grassland Administration, Shuangyashan 518000, Heilongjiang, China;
3. International Center for Bamboo and Rattan, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration/ Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, Beijing 100102, China)

Abstract: ［**Objective**］In forest resource survey, sampling design under the spatial distribution pattern of forest attributes was studied to break through regional limitations and provide generalizable empirical rules for sampling survey. ［**Method**］Artificial forest populations were constructed with the data field survey at

收稿日期: 2023−03−17　**修回日期:** 2024−01−05

基金项目: 雄安新区科技创新专项(2022XACX1000)，国家社会科学基金项目(22BTJ005)，国家自然科学基金项目(32001252)。

第一作者: 胡樱馨。主要研究方向：森林资源抽样调查。Email: 3276888425@qq.com　地址：100083，北京市海淀区清华东路 35 号。

责任作者: 侯正阳，博士，副教授。主要研究方向：森林资源统计监测。Email: houzhengyang@bjfu.edu.cn　地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

the Beijing Jiufeng National Forest Park. Tree mortality rate was used as a proxy for expressing forest spatial autocorrelation. Systematic sampling design was adopted, and Monte Carlo simulations were implemented to evaluate the effects of spatial autocorrelation, sample plot size and systematic sampling on sampling precision. [**Result**] (1) The coefficients of variation for the four different spatial distribution patterns increased in the following order: 0% mortality, 20% mortality in random pattern, 10% mortality in aggregated pattern, and 20% mortality in aggregated pattern. When mortality rate was 20% and sampling intensity was 2.73%, the coefficient of variation for random pattern was 1.3% lower than that for aggregated pattern. (2) The coefficients of variation for three different sample plot sizes increased in the following order: 20 m × 20 m, 30 m × 30 m, and 40 m × 40 m. The coefficient of variation of 40 m × 40 m was significantly higher than that of 20 m × 20 m and 30 m × 30 m. (3) With increasing sampling intensity, under the random pattern, the coefficient of variation for the artificial population designed with 8 × 8 main units was about 0.02% higher than that for 4 × 4, and about 0.15% higher than that for 16 × 16. Under the clustered pattern, the coefficient of variation for the artificial population designed with 8 × 8 main units was about 0.32% higher than that for 4 × 4, and about 0.54% lower than that for 16 × 16. [**Conclusion**] (1) Different degrees of spatial autocorrelation reduce sampling accuracy, among which aggregated pattern has a more significant impact than random pattern. (2) Smaller sample plots help improve sampling accuracy and convergence rate, but reasonable sample plot design can effectively enhance sampling efficiency. (3) The number of main units in systematic sampling has little impact on sampling accuracy. In practice, systematic sampling designs with a sample size of 1 should be avoided because sampling errors would be hard to quantify.

Key words: sampling survey; spatial model; sample plot size; systematic sampling

森林资源调查是获取森林基本状况和变化规律的主要手段，也是实现森林合理经营与资源利用的基础[1−2]。作为陆地生态系统的主体，森林为世界上大部分动植物提供了栖息环境，它对人类生存发展有重要保障作用[3−4]。抽样调查在森林资源调查中的应用有效地解决了无法进行全面调查的现实问题[5]。目前，森林资源抽样调查中引入了遥感、模型、数据库、全球定位和地理信息系统等多种技术手段，有简单随机抽样、分层抽样、系统抽样和群团抽样等方法[6−8]。中国和欧美主要国家的森林资源调查普遍以抽样调查为基础，采用系统抽样设计，按照预定规则抽取样本[9]。一直以来，降低不确定性和提升抽样调查精度是森林资源调查的重要目标和核心内容，实际开展调查时，综合考虑当地气候、地形、树种等现实因素选择合适的技术手段，是降低调查过程中的不确定性的关键[10]。在我国目前森林资源调查周期缩短的情况下，如何在控制样本量的前提下，有效提升抽样精度，是森林资源调查迫切需要解决的科学问题。

基于设计的统计推断方法被证明具有稳健性较强、出数可靠等特点[11]，在中国、美国等国家级森林资源调查中采用[12]，该推断方法尤其适用于国家、州及省级区域等广域调查[13]。该统计推断方法依赖于入样概率（个体或单位被选入样本的概率）且具有无偏性[14−15]。其核心观点是总体单元的调查因子被视为固定的，因此未知的总体参数，如均值和方差，也是固定的[16]。而推断中的不确定性主要来自于抽样带来的随机性，源于对总体的不完全调查[17]。虽然增加样本量能够有效提升森林资源抽样调查精度，但由于成本限制，通常需要在较低的抽样强度下尽量提高精度[16]。21 世纪以来，随着调查技术进步，该方法得到持续改进和广泛应用，然而对于复杂环境下的调查仍有待进一步探索。

森林属性的空间分布是影响抽样精度的关键。森林具有空间自相关性，即在空间分布上相邻或位置靠近的森林样本（如不同试验地），其林分结构、生长状况等属性存在一定的相关性[18]。受自然干扰、人为干扰以及树种特性等因素相互作用，森林资源属性如地上生物量、林分蓄积量、森林土壤、物种分布等调查因子并不是独立存在[19−20]。森林空间自相关性的简化表达就是森林空间模式，包括随机、规则和聚集 3 种模式[21]。森林的聚集模式在自然条件下最为常见，体现了森林是一个复杂综合体，森林属性在空间上相互关联[19−20]。特定的空间模式可通过对空间数据的统计处理表达出来[22]。然而，森林自相关变程是多样化的，有学者指出，在选择样地之前就应当考虑森林属性的空间模式对基于设计的调查精度估算效果的影响[23]。

样地设计从形状和大小两个方面影响抽样调查精度。样地形状有矩形、方形、圆形等[15]，其中方形样地在我国使用普遍[7]。方形样地从中心点按一定距离确定 4 个角，能有效降低出错可能性[11,24]。在实践调查中，样地大小对于精度和成本都有重要影响，相同抽样强度下大样地比小样地更能节约成本[25]。样地的布设方式和样地数量与成本直接相关，庞丽峰等[26]比较了 4 种不同样地布设方式（系统抽样间距）对抽样精度和成本花费的影响，提出了具体有关样地布设的抽样设计方案。无论从成本还是精度考虑，样地设计都是抽样调查中的关键环节，解析样地设计对于精度和成本的作用机制尤为关键。然而，大多数研究寻找到的最优设计方案对不同地形地貌条件的适应性需要进一步验证，这使得设计方案如何突破地域限制成为关键。

综上所述，本研究针对基于设计的统计推断方法在森林资源抽样调查应用中的局限性，构建不同空间分布模式的人工总体，开展包含不同样地大小和不同系统抽样间距设置的抽样调查模拟并采用蒙特卡洛模拟法进行结果评估。与传统的统计方法相比，蒙特卡洛模拟法通常不需要特定的理论假设，如正态分布等，使得它在复杂的森林生态系统中更加适用。本研究重点分析了森林空间模式、样地大小以及系统抽样设计对抽样调查精度的影响，并探讨三者的组合设计如何有效提升调查精度。研究旨在寻找不受时间和地域限制，能够被广泛推广的经验性结论，为实际调查降低不确定性提供理论依据，为平衡精度与样本量之间的权衡关系提供普适结论。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区域概况

北京市鹫峰国家森林公园，位于北京市海淀区西北部苏家坨镇境内（39°54′N，116°28′E），海拔 100～1 153 m，隶属北京林业大学试验林场。气候属于暖温带半湿润半干旱季风气候区，春秋干旱、冬季寒冷干燥，年降水量约 628.9 mm，年平均气温约 12.5℃[27]。该林场林分起源类型为天然林和人工林，林场总面积 832.04 hm^2，包含人工林面积 576.43 hm^2，天然林面积 173.22 hm^2。该地区土壤多为砂质壤土，包含 13 种立地类型。该林场共划分为 6 大经营区，15 个林班，106 个小班。其中各小班的郁闭度在 0.35～0.90 不等，多数郁闭度在 0.70 左右[28]。林场中栓皮栎（*Quercus variabilis*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）、五角枫（*Acer mono*）、油松（*Pinus tabuliformis*）和华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）等为优势树种。在海拔 800 m 以下地区主要为人工林，主要树种包括侧柏、油松和栓皮栎；在海拔 800～1 100 m 之间，以松栎天然混交林、华北落叶松为主。

1.2　数据来源

该研究的基础数据调查于 2021 年，在北京林业大学鹫峰试验林场试验区域内共均匀设置了 18 个临时样地，每个样地的大小为 0.09 hm^2，形状均为方形。在对林分踏查掌握林分特点的基础上，对林分特征及立地条件一致的林地简单分层后随机抽取本次调查的全部样地。此外，确保样地位置不跨越河流、道路或伐开的调查线，并且远离林缘。在各样地内进行每木检尺，调查乔木共计 2 437 株，包含栓皮栎、侧柏、五角枫、油松、千金榆（*Carpinus cordata*）、槲栎（*Quercus aliena*）、朴树（*Celtis sinensis*）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、白蜡（*Fraxinus chinensis*）、华北落叶松，各树种胸径和树高基本信息如表 1。

1.3　研究方法

1.3.1　人工总体构建

抽样调查中，最佳的抽样设计通常与林地地域直接关联，因而多数研究致力寻找到的最优设计在

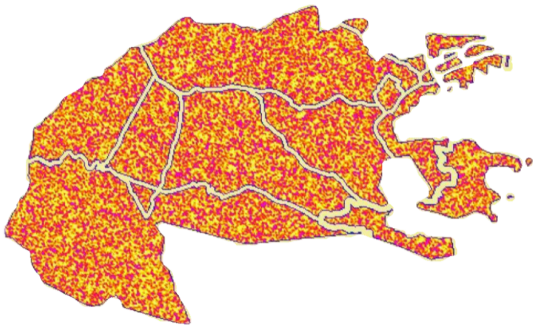
表 1　鹫峰乔木树种调查基本信息统计

Tab. 1　Basic information statistics of Jiufeng arbor species investigation

树种 Tree species	胸径 DBH/cm				树高 Tree height (*H*)/m			
	最小值 Min. value	最大值 Max. value	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min. value	最大值 Max. value	平均值 Mean	标准差 SD
栓皮栎 *Quercus variabilis*	3.0	59.2	15.9	9.2	1.4	31.0	10.0	4.9
侧柏 *Platycladus orientalis*	1.7	23.5	10.3	3.5	2.2	14.9	8.0	2.3
五角枫 *Acer mono*	4.1	24.2	10.6	4.8	3.0	23.0	10.8	4.9
千金榆 *Carpinus cordata*	4.2	30.6	9.3	4.4	2.3	16.9	7.5	3.2
槲栎 *Quercus aliena*	5.0	36.4	13.5	5.1	2.3	23.6	9.5	3.4
朴树 *Celtis sinensis*	5.0	24.5	10.9	5.5	2.4	20.2	10.1	4.7
白蜡 *Fraxinus chinensis*	5.0	21.6	7.8	3.2	3.1	14.2	6.5	2.0
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	5.2	32.6	12.4	9.0	2.1	14.0	6.3	3.1
油松 *Pinus tabuliformis*	6.3	19.1	13.3	3.5	3.7	11.5	8.1	2.5
华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*	8.4	17.1	12.4	2.6	4.7	9.4	6.2	1.3

区域上缺乏可推广性。因此本研究并不针对于研究区域开展讨论，而是从森林属性入手，但并不局限于某一特定属性，构建人工总体，在总体上归纳出在地域上不受限的结论。本文是以蓄积量属性为例，构建人工总体。人工总体构建方法参考已有研究[25]。基于鹫峰的实地调查数据总共构建了 12 个人工总体，在图 1 中展示了基于鹫峰地区构建的人工总体结构，各总体属性列于表 2。总体的形状为多边形，具有特定强度的空间自相关。

根据实地调查数据，得到树种的径阶分布（图 2），参照胸径的概率密度函数，在 0 ~ 1 之间每取一个随机数即可为人工总体中的每株树木分配相应胸径。在获得胸径的基础上，使用典型的树高–胸径分布模型，并参考相应树种实地调查的平均树高，使特定胸径的树木与相应的树高适配。单株树木以 5 m^2 的占地面积及特定坐标置入总体。因此，在总体中每一株树木具备胸径和树高两个数据后，依据相应树种的异速生长模型[29]得到每株树木蓄积量，异速生长



图中颜色由深到浅变化反映了树木个体蓄积由大到小的梯度变化。The color gradient in the image reflects a gradient change of tree biomass from large to small.

图 1 鹫峰森林人工总体构建框架

Fig. 1 Construction framework of artificial forest in Jiufeng

模型形式为

$$V = aD^b\left[c_0(1-\mathrm{e}^{-c_1 D})^{c_2}\right]^c \quad (1)$$

式中：V 为立木材积（m^3）；D 为林木胸径（cm）；a、b、c 为二元立木材积公式的参数；c_0、c_1、c_2 为 Richards 树高曲线的参数。相应树种各参数列于表 3。

表 2 基于鹫峰数据的人工总体构建汇总

Tab. 2 Summary of artificial population construction based on Jiufeng data

序号 No.	总体 Population	空间模式 Spatial pattern	死亡率 Mortality/%	样地尺寸 Sample size	总蓄积 Total volume/m^3	单位蓄积量/($m^3 \cdot hm^{-2}$) Unit volume/($m^3 \cdot ha^{-1}$)	聚集辐射距离 Cluster radius distance/m
1	M0-P20		0	20 m × 20 m	35 642.97	49.58	
2	M0-P30		0	30 m × 30 m	35 642.97	49.58	
3	M0-P40		0	40 m × 40 m	35 642.97	49.58	
4	R-M20-P20	随机 Random	20	20 m × 20 m	28 584.23	49.70	
5	R-M20-P30	随机 Random	20	30 m × 30 m	28 584.23	49.70	
6	R-M20-P40	随机 Random	20	40 m × 40 m	28 584.23	49.70	
7	C-M10-P20	聚集 Cluster	10	20 m × 20 m	31 829.55	49.69	50
8	C-M10-P30	聚集 Cluster	10	30 m × 30 m	31 829.55	49.69	50
9	C-M10-P40	聚集 Cluster	10	40 m × 40 m	31 829.55	49.69	50
10	C-M20-P20	聚集 Cluster	20	20 m × 20 m	28 125.76	49.72	70
11	C-M20-P30	聚集 Cluster	20	30 m × 30 m	28 125.76	49.72	70
12	C-M20-P40	聚集 Cluster	20	40 m × 40 m	28 125.76	49.72	70

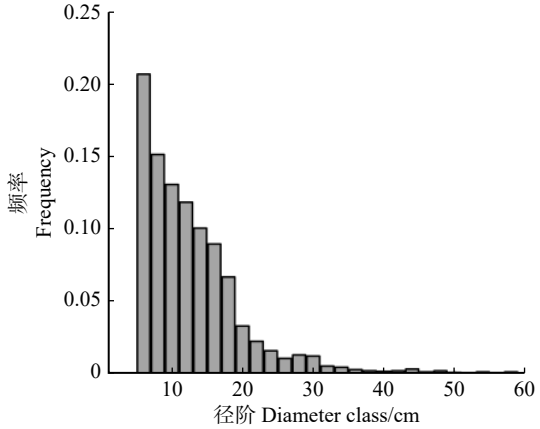


图 2 鹫峰地区树种径阶分布

Fig. 2 Distribution of tree species diameter classes in Jiufeng area

1.3.2 空间自相关表达

森林的空间自相关极其复杂，空间模式与空间自相关紧密联系。森林的空间模式主要包括随机分布、均匀分布、聚集分布 3 种模式，其中均匀分布模式是随机分布的特殊情况，常见于人工林之中。在这种特定情形下树木个体在位置上呈现规则变化，当这种规律性变化与系统抽样的规则吻合，就有可能导致抽样效果过好或者过差，但这种情况极少发生。此外，树木本身存在的遗传变异，决定了树木的属性具有不确定性，即使树木个体空间位置规律性变化，树木的属性在空间上具有随机性。因而，本研究构建的人工总体只包含随机和聚集两种模式。

表 3　各树种异速生长模型参数统计

Tab. 3　Parameter statistics of allometric growth model of various tree species

树种 Tree species	材积参数 Timber volume parameter			树高曲线参数 Tree height curve parameter		
	a	*b*	*c*	c_0	c_1	c_2
栓皮栎 *Quercus variabilis*	0.000 057 469	1.915 56	0.926 60	10.010 30	0.155 53	1.788 38
侧柏 *Platycladus orientalis*	0.000 091 972	1.863 98	0.831 57	4.298 95	0.458 07	4.320 85
五角枫 *Acer mono*	0.000 057 469	1.915 56	0.926 60	10.017 40	0.292 15	4.296 35
千金榆 *Carpinus cordata*	0.000 062 324	1.825 58	0.977 49	12.584 10	0.120 40	1.670 84
槲栎 *Quercus aliena*	0.000 057 469	1.915 56	0.926 60	10.010 30	0.155 53	1.788 38
朴树 *Celtis sinensis*	0.000 057 469	1.915 56	0.926 60	19.487 60	0.040 81	0.801 35
白蜡 *Fraxinus chinensis*	0.000 057 469	1.915 56	0.926 60	19.487 60	0.040 81	0.801 35
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	0.000 071 182	1.941 49	0.814 87	13.725 10	0.130 98	1.818 21
油松 *Pinus tabuliformis*	0.000 066 492	1.865 56	0.937 69	9.285 56	0.219 29	3.400 51
华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*	0.000 053 403	1.808 07	1.072 42	19.614 70	0.014 09	0.432 46

在自然状态下，树木植株会因为地震、火灾、病虫害以及人为砍伐破坏等原因受损、干枯以及死亡，在此情况下，研究树木蓄积量空间分布模式的影响等同于研究树木死亡空间分布模式的影响。因此，以死亡率作为蓄积量的代理属性来完成人工总体空间自相关的表达。具体方式通过在模型林分中随机或聚集方式指定极端蓄积量值（如 0）来模拟不同程度的随机或聚集死亡模式，在本研究中就是通过设定单木蓄积量为 0 来代替现实中的死亡树个体，可以推广到其他依赖于树木死亡的森林属性的空间模式影响，如生物量、碳汇量等。林分整体死亡率，通过随机选择树木单株或树木小集体为其蓄积量赋极值 0 来分配，从而实现随机和聚集模式的表达；控制死亡树的空间分布模式和数量,实现不同程度的随机性和聚集性的模拟，进而表达了不同强度的空间自相关。简而言之，该方法通过在模型林分中控制死亡树的空间模式，有效地模拟了随机和聚集空间分布。

本研究设定了 0%、10% 和 20% 3 类死亡率，随机和聚集两种模式，利用 DNR 抽样工具来完成总体构建工作。图 3 展示了各人工总体空间自相关的表达情况。

1.3.3　样地大小设计

以往研究中就已证明了小样地比大样地更能提升抽样调查精度以及精度收敛的速度[25]，但由于成本限制，一味通过减小样地以追求高精度的做法也不现实。为协同分析各因素对精度的综合作用，本研究亦将样地大小的设计纳入考虑，设置了 3 种不同大小的方形样地，依次为 20 m × 20 m、30 m × 30 m、40 m × 40 m，分析不同空间模式的总体中不同大小样地对抽样调查精度的影响，设计情况见图 3。

1.3.4　系统抽样设计

本研究在建立的 12 个人工总体上开展系统抽样设计。系统抽样又称等距抽样或机械抽样，使用时其保证了样本单元均匀分布在总体内，从而提高样本代表性以提高抽样效率。开展工作时，布设一小抽样框于总体抽样框中进行抽样，小框由主单元的集合（population of primary units，PUs）构成且数量记 N，每个主单元（primary unit，PU）均由同等次级单元（secondary unit，SU）构成，且在空间呈规律性分布，被选中的每个 PU 其所包含的每个次级单元称为实际调查单元，布设的小抽样框中被选中的主单元的数量记 n，按照预先规则能被选取到的次级单元的数目为 M[17]。系统抽样布设方法如图 4。

抽样强度（sampling intensity，SI）表示为

$$\mathrm{SI}=\frac{n\times M}{N\times M}\times 100\%=\frac{n}{N}\times 100\% \tag{2}$$

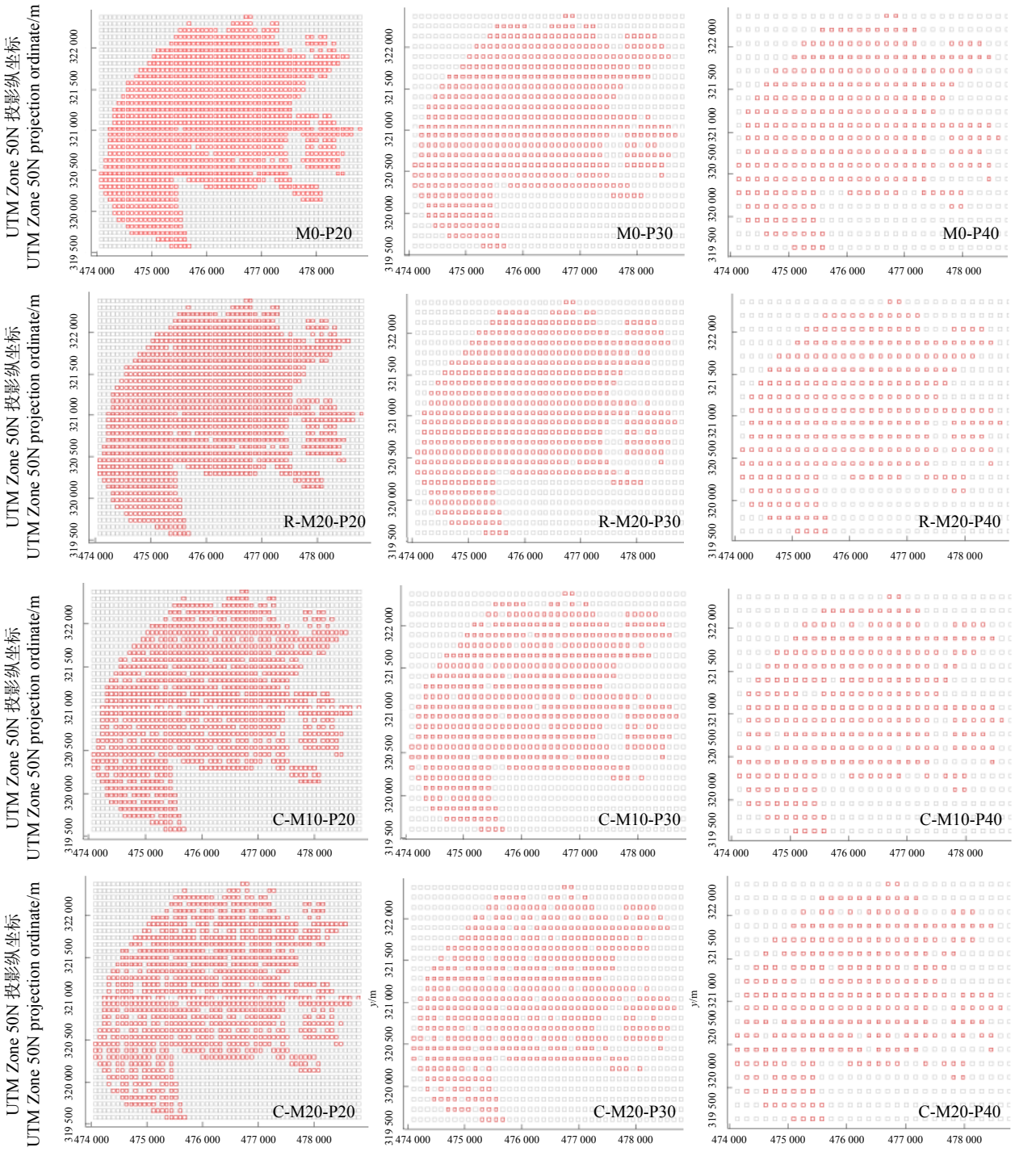
在实际调查中，调查总体并不都是规则形状的，因而采取的方法是将总体抽样框边界拉升，而位于调查总体之中的抽样单元才会被实际调查[25]。在本研究中设置小抽样框 4 × 4、8 × 8、16 × 16 这 3 种类型，即 N 取值 16、64、256。不同的 N 值的设置对应了不同的系统抽样间距，这与庞丽峰等[26]比较的 4 种样地布设方式类似。N 的数量、样地大小、样地数量以及样本量 n 之间相互联系，通过不同系统抽样设计试验模拟以探索众因素对抽样精度的联合作用机制。

1.3.5　估计量和蒙特卡洛模拟评估

根据以上设计，调查总体蓄积量（τ）为

$$\tau=MN\mu \tag{3}$$

τ 的无偏估计量可表示为



图中坐标为 UTM Zone 50N 投影坐标。红色表示活树，灰色表示死树；死树是任何依赖于树木生死状态的森林属性或生态指标的载体；死亡模式反映了任何替代属性或指标的空间分布模式。The coordinates in the image are UTM Zone 50N projected coordinates. Living trees in red, dead trees in gray; dead trees are surrogate for any forest attributes or ecological indicators relying on living status; mortality patterns represent the spatial distribution of any surrogated attributes or indicators.

图 3 森林空间自相关表达

Fig. 3 Forest spatial autocorrelation expression

$$\widehat{\tau} = \frac{N}{n}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{M_i} y_{ij} \tag{4}$$

总体样本均值是总量均值的无偏估计量，表示为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{Mn}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{M} y_{ij} = \frac{1}{Mn}\sum_{i=1}^{n} Y_i \tag{5}$$

总体样本均值方差

$$\mathrm{Var}(\hat{\mu}) = \frac{N-n}{M^2 Nn}\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - M\mu)^2}{n-1} \tag{6}$$

总体样本均值方差估计量为

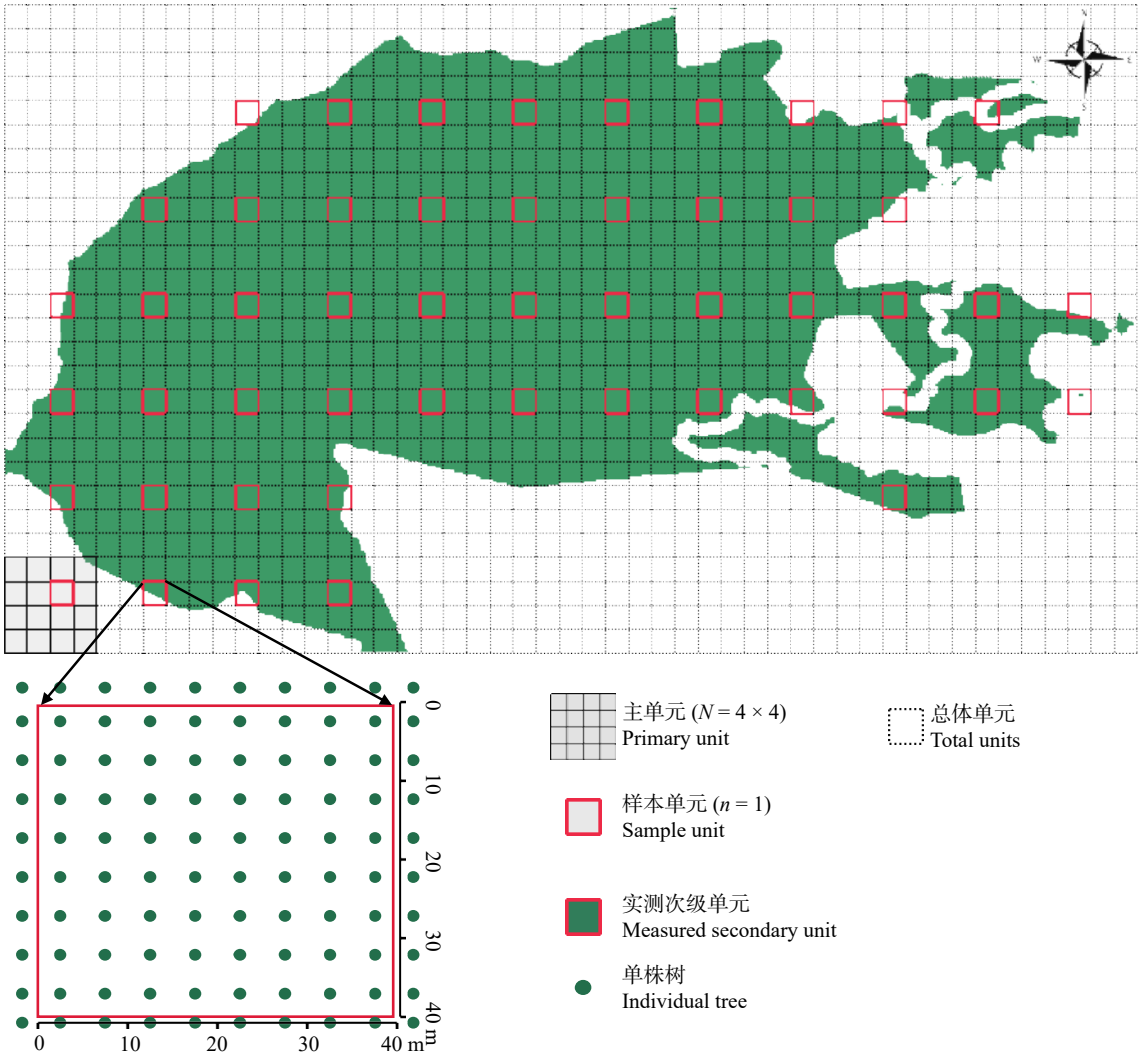


图 4　系统抽样布设方法

Fig. 4　System sampling layout method

$$\widehat{\mathrm{Var}}(\hat{\mu}) = \frac{N-n}{M^2Nn}\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - M\hat{\mu}_i)^2}{n-1} \tag{7}$$

标准误

$$E_S = \sqrt{\widehat{\mathrm{Var}}(\hat{\mu})} \tag{8}$$

变异系数

$$\mathrm{CV} = \frac{E_S}{\hat{\mu}} \times 100\% \tag{9}$$

式中: $Y_i = \sum_{j=1}^{M} y_{ij}$, 第 i 个主单元中感兴趣变量的观测总值; N 为主单元的数量; n 为主单元中的样本量; M 为次级单元数; M_i 为第 i 个样本主单元中次级单元的数量; y_{ij} 为第 i 个主单元中第 j 个次级单元中感兴趣变量的观察值; μ 为总量均值; $\hat{\mu}$ 为总体样本均值; $\hat{\mu}_i$ 为单个样本均值。

本研究采用蒙特卡洛模拟法评价抽样分布, 并针对方法链中任意环节或参数对不确定性的独立与综合效应进行量化诊断。其原理为当总体、抽样方法和统计推断方法相同, 而样本不同时, 总体参数的点估计 $\hat{\mu}$ 就会不同; 若每组样本对应一个点估计, 那么由大量点估计形成的分布就是抽样分布, 根据中心极限定理, 服从 $N(E(\hat{\mu}), \widehat{\mathrm{Var}}(\hat{\mu}))$; 当估计方法无偏时, 即 $E(\hat{\mu}) = \mu$, 则抽样分布服从 $N(\mu, \widehat{\mathrm{Var}}(\hat{\mu}))$, 此时精度评价的意义便在于通过 $\widehat{\mathrm{Var}}(\hat{\mu})$ 评价标准误, 标准误 E_S 越小推断精度就越高, 从而抽样精度越高。变异系数也称为抽样误差, 抽样误差越大, 抽样精度越低。

2　结果与分析

2.1　森林空间自相关对抽样精度的影响

本研究构建了 2 种模式 3 种强度共 4 种类型的人工总体, 即死亡率 0%、随机模式死亡率 20%、聚集模式死亡率 10% 以及聚集模式死亡率 20%。对这 4 种总体进行相同的试验设计, 研究森林空间自相关性对抽样调查精度的影响, 结果如图 5 所示。

同等抽样强度下, 变异系数为死亡率 0% < 随机模式死亡率 20% < 聚集模式死亡率 10% < 聚集模式

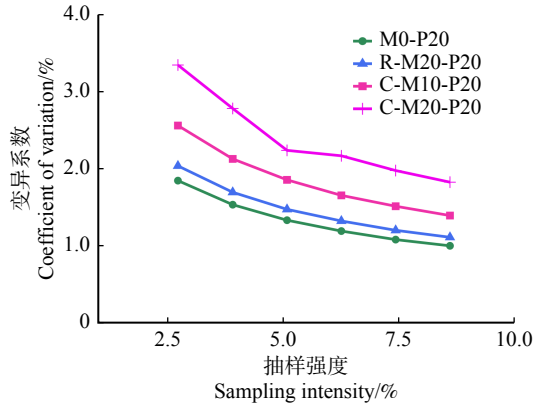


图 5 森林空间自相关对抽样精度的影响

Fig. 5 Effects of forest spatial autocorrelation on sampling accuracy

死亡率 20%。变异系数的变化指示了抽样精度的变化，变异系数越大精度越低，说明森林固有的空间自相关会对抽样精度造成影响，且不同强度的空间自相关作用效果不同。随机模式总体的变异系数均小于聚集模式总体的变异系数，死亡率与变异系数呈正相关，与抽样精度呈负相关。

聚集模式对抽样精度的削弱效果更加显著。相同抽样强度且相同自相关强度下，如抽样强度为 2.73%，死亡率为 20% 时，随机模式下变异系数比聚集模式下变异系数低了 1.3%。聚集模式下，当抽样强度为 2.73% 时，死亡率为 10% 的总体的变异系数较死亡率 20% 的总体的低 0.78%；而死亡率为 0% 的总体变异系数仅比随机模式下死亡率为 20% 的总体低 0.19%。综上，尽管死亡率会降低精度，但在自相关强度相同的情况下，聚集模式会使精度下降更严重。

2.2 样地大小设计对抽样精度的影响

在 4 类人工总体上，均设置了 20 m × 20 m、30 m × 30 m 和 40 m × 40 m 3 个大小的样地，得到 12 个人工总体(图 6)。随机和聚集两种模式下，随

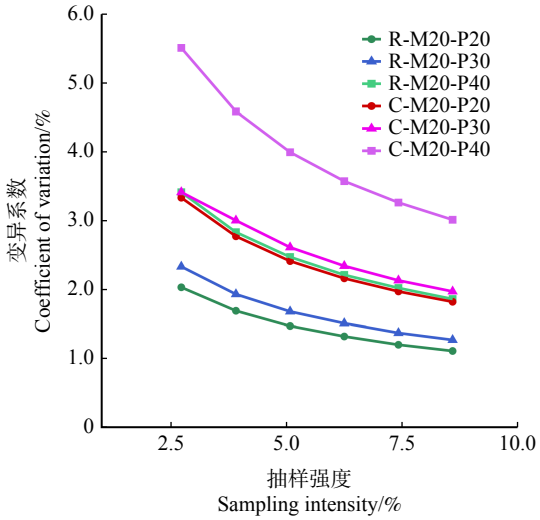


图 6 样地大小设置对抽样精度的影响

Fig. 6 Effects of sample size setting on sampling accuracy

着抽样强度增加，各总体变异系数均呈减小趋势。同模式下，小样地的变异系数始终低于大样地，说明样地大小与抽样精度负相关，这一规律不受抽样强度影响。

从抽样精度随抽样强度收敛速度来看，同种空间模式下，20 m × 20 m 和 30 m × 30 m 两种样地大小设置下收敛速度相近，但 40 m × 40 m 样地的变异系数的收敛速度明显低于前两者。

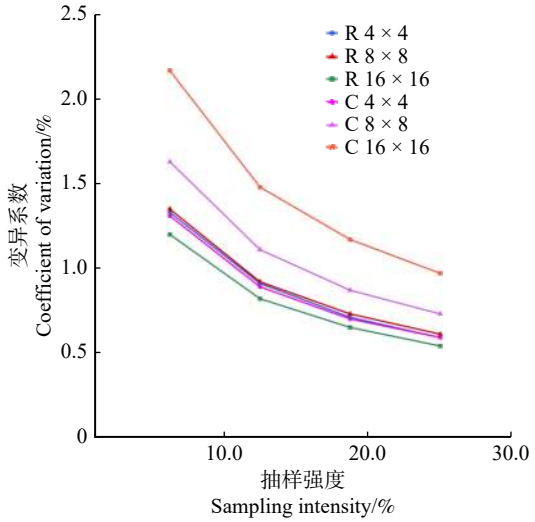
随机和聚集两种模式下，20 m × 20 m 和 30 m × 30 m 两种样地大小设置下的变异系数差别较小，但两者与 40 m × 40 m 样地大小对应的变异系数差别明显。这表明无论总体处于何种空间模式下，尽管小样地可提升精度，但样地越小抽样调查精度提升未必越好。在抽样强度为 2.73% 时，聚集模式下 20 m × 20 m 和 30 m × 30 m 两种样地变异系数相差 0.28%，在随机模式下相差 0.30%，且随着抽样强度的增加，各模式下这种差距均越来越小，整体上这两种样地大小的变异系数相差极小。然而，这两种大小的总体与 40 m × 40 m 的变异系数的差距却是显著的，同等抽样强度下，聚集模式 20 m × 20 m 和 40 m × 40 m 的变异系数相差达到 2.27%，是 20 m × 20 m 和 30 m × 30 m 差距的 8 倍左右；随机模式下 20 m × 20 m 和 40 m × 40 m 的变异系数相差达到 1.38%，是 20 m × 20 m 和 30 m × 30 m 差距的 5 倍左右。在实际调查中要避免样地太大使精度严重削弱，还要考虑到成本与精度二者关系的平衡。

2.3 系统抽样设计对抽样精度的影响

本研究系统抽样设计下，主单元数目 N 包含 3 个类型设计，即主单元数目为 4 × 4、8 × 8、16 × 16。在同等抽样强度之下，样本量 n 随不同的 N 设计而变化。由于已经明确小样地更有利于精度的提升，因此设置两种空间模式总体(死亡率均为 20%)，样地大小 20 m × 20 m，探究抽样调查精度对 3 种 N 设计的响应(图 7)。

不同 N 设计对抽样精度的影响并不显著，各设计之间精度差距较小，且差距不随抽样强度的增强而变化。在抽样强度为 6.25% 时，随机模式下，8 × 8 设计的变异系数较 4 × 4 设计约高 0.02%，较 16 × 16 设计约高 0.15%；在聚集模式下，8 × 8 设计的变异系数较 4 × 4 设计的约高 0.32%，较 16 × 16 设计的约低 0.54%，可见由 N 设计不同产生的抽样调查精度差异小于 1%。

在本研究中，取抽样强度为 6.25%，在系统抽样设计下，N 分别取 16、64、256 时，分别对应 n 取 1、4、16。然而，根据估计量公式(7)，当 $n = 1$ 时，其分母 $n - 1 = 0$，意味着该抽样误差的计量失效。显然在



R.随机模式; C.聚集模式; 两种空间模式下死亡率均为 20%, 样地大小均为 20 m × 20 m。R, Random; C, Cluster; The mortality rate is 20% under both spatial patterns, with plot sizes of 20 m × 20 m in each case.

图 7　系统抽样设计对抽样精度的影响

Fig. 7　Effects of systematic sampling design on sampling accuracy

此种情况下, 应当选择 8 × 8 或 16 × 16 设计, 即在实际开展调查时, 要避免 *n* 取值为 1。

3　讨　　论

本研究利用树木死亡率, 作为森林蓄积量属性的代理变量, 构建不同类型的人工总体, 探究了空间自相关性对森林抽样调查精度的影响。研究结果得到森林的空间自相关强度与抽样精度呈负相关, 随着空间自相关性增强, 抽样误差也增加, 抽样精度降低。其中, 聚集模式明显比随机模式对抽样精度的削弱强度大。这与以往研究结果一致[25], 空间自相关性意味着邻近区域的变量测量值相似性较大, 这会导致有效样本量减少, 样本代表性会降低, 从而削弱抽样方案的精度[30]。相同样地设计下, 聚集分布或空间自相关更强的总体, 由于局部区域内自相关性更强, 从而增强了整体空间自相关。空间自相关作为森林的固有特征, 会削弱抽样调查精度。因此, 森林调查抽样设计时应当重视森林空间自相关的影响, 尤其是设置随机抽样点时, 应考虑目标总体的空间分布模式, 避免聚集区域的过度聚集, 以确保抽样的代表性。

小样地比大样地更有利于精度提升, 但在实际调查中样地大小适中才是最佳选择。小样地内部差异小, 每一样地代表性更强, 计量误差减小, 因而整体精度更高。同等抽样强度下, 随样地大小减小, 样地数量增加, 所需要的劳动力和人工成本也会上升。因此, 合适大小的样地对于保证精度并提升抽样效率来说是最佳选择。此外, 合适的样地设计可以在精度被空间自相关削弱的情况下, 有效弥补精度的损失。在图 8 中, 选取 4 个总体: R-M20-P20, R-M20-P40, C-M20-P20, C-M20-P40 对于该猜想进行验证, 在抽样强度为 2.73% 时, R-M20-P20 和 R-M20-P40, C-M20-P20 和 C-M20-P40 两两比较, 聚集模式下 40 m × 40 m 的样地相对 20 m × 20 m 的样地精度降低了 2.17%; 随机模式下 40 m × 40 m 的样地相对 20 m × 20 m 的样地精度降低了 1.38%, 样地大小设计对精度影响显著, 聚集模式加剧精度削弱。样地大小为 20 m × 20 m 时, 聚集模式使得精度削弱 1.3%; 样地大小为 40 m × 40 m 时, 聚集模式使得精度削弱 2.09%。样地设计不当有可能双倍放大聚集分布对抽样精度的负面效果。R-M20-P40 和 C-M20-P20 相比, 前者变异系数为 3.42%, 后者为 3.34%, 两者精度相差仅 0.08%, 合适大小的样地设计能有效弥补精度损失。因此, 样地大小设计与空间自相关两者对抽样精度的效应是相互叠加的, 实际调查中样地设计应严格进行随机化, 样地大小应当合适, 以有效避免聚集。

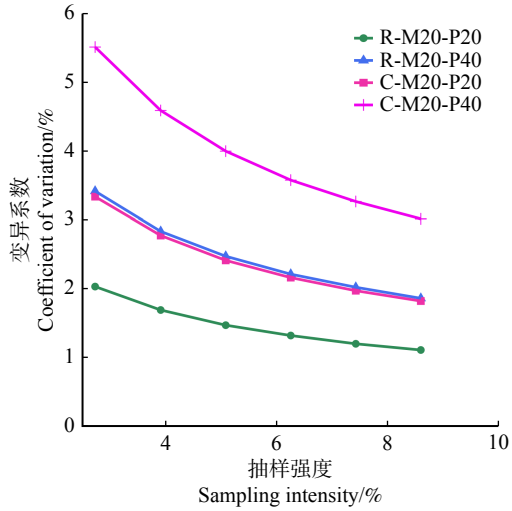


图 8　样地大小与空间模式的联合作用

Fig. 8　Joint action of sample plot size and spatial pattern

基于系统抽样设计, 本研究讨论了系统抽样间距设计, 即系统抽样中主单元和次级单元的多寡问题对于抽样精度的影响。庞丽峰等[26]的研究比较了不同系统抽样间距下精度与成本的响应, 精度与样本量关联很大, 抽样间距越大, 系统抽样法则抽中的样本量少, 对应的抽样强度越低, 在此种情况下抽样精度降低。抽样强度越大精度越高, 但也意味着成本越高昂。因此, 如果在资金充沛的情况下选择系统抽样间距更小、抽样强度更高的样地布设方式去追求高精度是合理的。然而考虑成本节省问题, 只能降低精度要求, 降低抽样强度来减少成本, 因而选择系统抽样间距较大的样地布设方式[26]。值得注意

的是，本研究开展了同系统抽样间距设计，是讨论在抽样强度相当的条件下，改变 n 的数目，来达到不同间距布设样地（对应 N 不同）的目的。结果显示，N 和 n 两者数目在抽样强度相当的情况下变化不会对精度产生明显影响。此外，在选择控制变量抽样强度的范围时，特将幅度扩大，但结果并未有所变化，其结果充分说明了主单元和次级单元的多寡问题并不会造成精度之间显著差距，其差距远不及由空间自相关、样地大小甚至降低抽样强度带来的差距显著。然而主单元和次级单元的多寡问题仍值得注意的是，其直接关系到 n 的数量，在该估计量（公式（7））的限定下，n 值为 1 的方案是不可取的。

4 结　　论

本研究利用蒙特卡洛模拟法，在不同人工总体水平上模拟了森林资源调查的抽样分布。通过以树木死亡率作为代理属性，生成一系列空间自相关程度不同的人工总体，并采用不同的系统抽样设计策略，解析并归纳了基于统计推断估计量精度的影响因素及其作用机制。（1）森林的空间自相关不可避免地会削弱抽样精度。无论是随机分布还是聚集分布，空间自相关程度越强，对精度的削弱效果越显著，尤其以聚集分布模式影响更大。（2）与大样地相比，适度缩小样地面积有利于提高抽样精度和收敛速度。但不能一味追求减小样地，过度缩小后反而不利于成本节约和效率提升。合理设计样地大小可有效弥补空间自相关带来的精度损失。（3）系统抽样设计中主次单元数量对抽样精度的影响不显著，然而，在实际调查中，仍需注意避免选择样本量等于 1 的系统抽样设计方案，因为这会导致无法度量抽样误差。本研究通过理论模拟的方式，定量解析了影响森林资源调查精度的关键因素，为优化抽样设计提供了科学依据。后续研究可扩大验证范围，考虑不同林分类型和多种森林属性，以建立更普适的抽样模型。以期能为规范和指导森林资源调查实践，在满足精度要求的前提下提高效率，发挥理论与应用的双重价值。

参 考 文 献

［1］ 白降丽, 彭道黎, 庾晓红. 我国森林资源调查技术发展研究 [J]. 山西林业科技, 2005(1): 4−7.
Bai J L, Peng D L, Yu X H. Study on the development of forest resource inventory technology in China[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2005(1): 4−7.

［2］ 张会儒, 雷相东, 李凤日. 中国森林经理学研究进展与展望 [J]. 林业科学, 2020, 26(9): 130−142.
Zhang H R, Lei X D, Li F R. Research progress and prospects of forest management science in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 26(9): 130−142.

［3］ 陈盼盼. 地面摄影测量在森林资源调查中的关键技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Chen P P. Study on key technologies of ground photogrammetry in forest inventory[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

［4］ 冯仲科. “互联网+”推进森林资源调查走进精准林业新时代 [J]. 国土绿化, 2019(2): 16−19.
Feng Z K. “Internet+” promotes the forest resource survey to enter the era of precision forestry[J]. Land Greening, 2019(2): 16−19.

［5］ 罗仙仙, 亢新刚, 杨华. 我国森林资源综合监测抽样理论研究综述 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 187−193.
Luo X X, Kang X G, Yang H. A review on the sampling theory of forest resources comprehensive monitoring[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 187−193.

［6］ 曾伟生, 黄国胜, 党永峰, 等. 全国森林资源宏观监测的抽样设计与估计方法探索 [J]. 林业资源管理, 2016(3): 1−6.
Zeng W S, Huang G S, Dang Y F, et al. Discussion on sampling design and estimation methods of national forest resources macro-monitoring[J]. Forest Resources Management, 2016(3): 1−6.

［7］ 高宏. 森林资源抽样调查技术方法 [J]. 林业勘查设计, 2018, 188(4): 87−88.
Gao H. Technical methods of sampling survey of forest resources[J]. Forest Investigation Design, 2018, 188(4): 87−88.

［8］ 李春干, 代华兵. 中国森林资源调查: 历史、现状与趋势 [J]. 世界林业研究, 2021, 34(6): 72−80.
Li C G, Dai H B. Forest management inventory in China: history, current status and trend[J]. World Forestry Research, 2021, 34(6): 72−80.

［9］ Tomppo E. Forest inventory: methodology and applications[M]. Dordrecht: Springer, 2006: 179−194.

［10］ 李明阳, 姜文倩, 徐婷, 等. 基于总体表面属性特征的森林资源抽样调查方法比较 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(9): 49−51, 64.
Li M Y, Jiang W Q, Xu T, et al. Comparison of sampling survey methods of forest resources for populations with different surface attributes[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(9): 49−51, 64.

［11］ Annika K M. Forest inventory: methodology and applications [M]. New York: Springer-Verlag, 2006.

［12］ Cochran W G. Sampling techniques[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1977: 227.

［13］ Mcroberts R E, Westfall J A. Propagating uncertainty through individual tree volume model predictions to large-area volume estimates[J]. Annals of Forest Science, 2016, 73(3): 625−633.

［14］ Särndal C E T, Hoem L, Lindley J M, et al. Design-based and model-based inference in survey sampling[J]. Scandinavian Journal of Statistics, 1978(5): 27−52.

［15］ Schreuder H T, Gregoire T G, Wood G B. Sampling methods for multiresource forest inventory [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993: 446.

［16］ 金勇进, 郝一炜. 非概率样本的模型推断 [J]. 数学的实践与认

识, 2019, 49(5): 246−255.
Jin Y J, Hao Y W. Model-based inference for non-probability sample[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(5): 246−255.

[17] Thompson S K. Sampling[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

[18] Legendre P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm[J]. Ecology, 1993, 74(6): 1659−1673.

[19] Reed D, Burkhart H. Spatial autocorrelation of individual tree characteristics in loblolly pine stands[J]. Forest Science, 1985, 31(3): 575−587.

[20] Penttinen A , Henttonen H M. Marked point processes in forest statistics[J]. Forest Science, 1992, 38(4): 806−824.

[21] Tomppo E. Models and methods for analyzing spatial pattern of trees[J]. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae, 1986(138): 65.

[22] Chou Y H. Spatial patterns and spatial autocorrelation[J]. Lecture Notes in Computer Science, 1995(988): 365−376.

[23] Zeng W S, Tomppo E, Healey S P, et al. The national forest inventory in China: history-results-international context[J]. Forest Ecosystems, 2015(2): 23.

[24] 宋新民, 李金良. 抽样调查技术 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
Song X M, Li J L. Sampling survey technology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.

[25] Hou Z, Xu Q, Hartikainen S, et al. Impact of plot size and spatial pattern of forest attributes on sampling efficacy[J]. Forest Science, 2015, 61(5): 847−860.

[26] 庞丽峰, 雷渊才, 陆元昌, 等. 森林经营单位级系统群团抽样设计比较 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2015, 43(6): 141−152.
Pang L F, Lei Y C, Lu Y C, et al. Comparison of cluster systematic sapling at management unit level[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(6): 141−152.

[27] 嘎拉泰, 朱双双, 徐道春, 等. 鹫峰森林多层土壤温度变化规律的研究 [J]. 林业工程学报, 2018, 3(3): 136−141.
Ga L T, Zhu S S, Xu D C, et al. Investigation of temperature changing patterns of multi-layer soil in Jiufeng forest[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(3): 136−141.

[28] 孟芮萱. 城郊型森林公园游憩功能评价及结构优化方法研究: 以鹫峰国家森林公园为例 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Meng R X. The study on recreation function evaluation and structure optimization methods in the suburban forest park: take Jiufeng National Forest Park as a case[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[29] 蒲莹, 曾伟生, 阳帆. 北京市树高胸径回归模型研建及一元立木材积表检验 [J]. 林业资源管理, 2021(3): 62−66.
Pu Y, Zeng W S, Yang F. Tree height-diameter regression models development and one-variable tree volume tables examination in Beijing[J]. Forest Resources Management, 2021(3): 62−66.

[30] Berrill J P, O'hara K L. Influence of tree spatial pattern and sample plot type and size on inventory estimates for leaf area index, stocking, and tree size parameters[C]//Proceedings of coast redwood forests in a changing California: A symposium for scientists and managers. Albany, CA: Pacific Southwest Research Station, 2012: 485– 497.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　张会儒）