

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150519

胜山阔叶红松林群落空间结构的最小面积研究

彭 密 国 庆 喜
(东北林业大学林学院)

摘要:本文依据2012年黑龙江省胜山阔叶红松林10.4 hm²大型样地全面实测数据,基于移动窗口法、GIS技术分析其乔木层生物量空间格局的尺度效应,探究其群落空间结构研究的最小面积,并用计算机模拟随机抽样进一步验证。结果表明:1)通过对10~90 m各个尺度下的样地生物量误差空间分布栅格图的分析,胜山阔叶红松林乔木层生物量空间结构存在着最小研究面积0.49 hm²,不仅具有与样地相同的生物量密度,还能够完整地体现出胜山阔叶红松林生物量的空间变异性,准确地反映其群落结构的真实特征,这为更加精确地估算阔叶红松林生物量提供了理论依据;2)通过计算机模拟随机抽样验证了用移动窗口法所确定的最小面积是准确的,限定在该最小面积(0.49 hm²)范围内的随机取样,仅使用7个20 m×20 m的样方就能够有95.9%的概率把估测的误差范围控制在20%以内,这对于阔叶红松林森林生物量调查样地大小的设置,具有很好的指导作用;3)提出把本文中的最小面积作为衡量森林群落空间结构复杂程度的一个指标,最小面积的大小代表了空间变异的范围,最小面积越大则说明了空间异质性越高。

关键词:最小面积; 空间结构; 乔木层生物量; 阔叶红松林; 胜山保护区

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2016)12-0021-07

PENG Mi; GUO Qing-xi. **Minimum area of the community spatial structure of broadleaf-Korean pine forest in Shengshan Mountain, northeastern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016) **38** (12) 21-27 [Ch, 41 ref.] School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

According to the fully observed data of 10.4 ha (400 m×260 m) large permanent plot of broadleaf-Korean pine forest established in Shengshan Nature Reserve, Heilongjiang Province in 2012, the moving window method and GIS were used to research the scale effect of spatial pattern of tree biomass and the minimum area of community spatial structure, and then computer simulation of the random sampling was used for verification. The results showed that there existed a minimum area of 0.49 ha in community structure of broadleaf-Korean pine forest in Shengshan Nature Reserve, and this area not only had the same biomass density as the entire plot, but also could reflect the spatial variability of biomass of the broadleaf-Korean pine forest in Shengshan. It accurately reflected the characteristics of community structure, providing a theoretical basis for more accurate estimation of biomass of the broadleaf-Korean pine forest. The minimum area determined by the moving window method was verified by the computer simulation of random sampling. For the sampling in the entire plot, only seven 20 m×20 m quadrats were needed to get the result with relative error less than 20% at 95.9% probability, and sampling in the minimum area also had the same effect. It is a good guidance for the investigation of the plot size of forest biomass in broadleaf-Korean pine forest. Based on the above research, we put forward the minimum area as an index to measure the complex degree of spatial structure of forest community. The minimum size of the forest community represents the range of spatial variability, i. e., the larger the minimum area is, the higher the spatial heterogeneity is.

收稿日期: 2015-12-28 修回日期: 2016-06-15
基金项目: 科技部科技基础性工作专项(2012FY112000)。
第一作者: 彭密。主要研究方向: 森林生态学。Email: 1475250990@qq.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路26号东北林业大学林学院。
责任作者: 国庆喜, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生态学。Email: gqx@nefu.edu.cn 地址: 同上
本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Key words minimum area; spatial structure; biomass of arbor layer; broadleaf-Korean pine forest; Shengshan Nature Reserve

植物群落的最小面积,是在一个最小地段内,对一个特定群落类型能提供足够的环境空间(环境和生物的特性),或者能保证展现出该群落类型的种类组成和结构的真实特征所需要的面积^[1]。最小面积同时作为一种或一系列测度方法,在一定程度上可有效反映植物的固有特性及其在一定尺度下的相对均匀性^[2]。关于群落最小面积的问题,始终是植被生态学研究讨论的重点之一,但一直存在着争议。过去的研究往往集中于森林群落的非空间结构方面,常用种—面积曲线^[3-5]方法来确定最小面积。然而,反映群落种类组成的种—面积曲线所给出的最小面积远不能反映种群结构和群落结构的特征^[6];而有关森林群落空间结构的最小面积研究却少有报道,惠刚盈等^[7]利用 Winkelmass 软件模拟确定了角尺度估计准确率达到 95% 以上时的最小调查窗口为 2 500 m²,宫守飞等^[8]利用林分空间结构参数(混交度、角尺度、大小比数)—面积图解分析方法确定了铜陵叶山常绿阔叶林群落空间结构研究的最小面积为 3 600 m²。但关于这 3 个结构参数对林分空间结构形成的作用大小及其相互作用机制仍有待于进一步探讨^[9]。

生物量不仅是研究植被净生产力、衡量林地生产力和经营效果的重要指标,也是度量植被碳库,研究整个生态系统结构的重要参数^[10-14]。Chave 等^[15]和 Mascaro 等^[16]以森林地上生物量为研究对象,发现群落结构具有很大的变异性;林敦梅等^[17]在古田山大型森林动态监测样地的研究表明,森林生物量的变异性随着调查样方面积的增大而变小。那么,是否存在一个最小面积,能够完整体现所在林分生物量的空间变异性,准确地反映群落结构的真实特征? 若其存在,则该最小面积不仅具有与所在林分相同的生物量密度,可以全部包含所在林分生物量水平方向上的变异性,而且对森林生物量的调查取样可以限定在该面积范围内并能达到较高的估测精度。本文依据黑龙江省胜山阔叶红松林 10.4 hm²大型样地全面实测数据,基于移动窗口法、GIS 技术分析其乔木层生物量空间格局的尺度效应,并进一步利用计算机模拟随机抽样,以准确估测阔叶红松林乔木层生物量变异的空间范围,亦为具有相似条件下的阔叶红松林生物量跨尺度信息转译及其相关研究提供理论支持和参考依据。

1 研究区概况

研究区位于黑龙江省胜山国家级自然保护区

(49°27'52"N、126°45'44"E),地处小兴安岭西北坡,毗邻大兴安岭林区,为大、小兴安岭交错过渡地带,属寒温带大陆性季风气候,四季明显,冬季漫长而寒冷干燥,春、秋季短促而温湿。年平均气温 -2℃,最低气温 -40℃,最高气温 36℃,年日照时数 2 500~2 600 h,年平均降水量为 550~620 mm,蒸发量 850~1 200 mm。区内地带性土壤为暗棕壤。地带性植被为阔叶红松林,是天然红松林分布的最北缘。阔叶红松林的组成以红松(*Pinus koraiensis*)为主,伴生树种主要有红皮云杉(*Picea koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、兴安落叶松(*Larix gmelini*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*B. davurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、色木槭(*Acer mono*)等。另外,林内还有发育良好的山葡萄(*Vitis amurensis*)、狗枣猕猴桃(*Actinidia kolomikta*)、五味子(*Schisandra chinensis*)等藤本植物。

2 研究方法

2.1 样地设置和调查

在黑龙江省胜山国家级自然保护区建立了一块 10.4 hm²(400 m×260 m)的阔叶红松林固定样地。样地划分为 260 个 20 m×20 m 的连续样方,每个 20 m×20 m 样方进一步划分成 16 个 5 m×5 m 的亚样方,调查记录样地内所有胸径≥1.0 cm 的木本植株个体种名、胸径、冠幅、坐标等指标。

样地林分特点是小径木多,云冷杉、白桦、山杨(*Populus davidiana*)、落叶松等占优势,红松成斑块状分布。毛榛子(*Corylus mandshurica*)分布广、密度大。乔木种类共有 16 种,灌木种类为 15 种。样地内地形平缓,多数样方坡度在 5°以下,部分地段为沟塘及陡坡。表 1 为胸径≥5.0 cm 的主要乔木树种概况。

2.2 数据处理

针对样地内胸径≥5.0 cm 的乔木树种,按照杨金明等^[18]构建的小兴安岭主要树种常规生物量模型,并参考冯宗炜等^[19]相应地区的模型计算个体生物量。对于超出异速生长方程胸径(DBH)范围的大树,计算地上生物量时采用材积方程与木材密度结合的方法估计树干生物量校对方程误差,再利用生物量扩展因子(地上生物量/树干生物量)计算地上生物量,地下生物量利用根冠比估算^[20],地上生物量与地下生物量之和为总生物量。汇总得到大样地乔木种类

表 1 样地主要树种概况

Tab. 1 Introduction to major tree species of the stand

树种 Species	个体数 Number of individuals	比例 Proportion/%	平均胸径 Average DBH/cm
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	3 529	29. 98	16. 78
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	3 224	27. 39	16. 87
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	1 592	13. 53	12. 29
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	1 590	13. 51	24. 70
兴安落叶松 <i>Larix gmelini</i>	541	4. 60	25. 12
色木槭 <i>Acer mono</i>	512	4. 35	10. 50
山杨 <i>Populus davidiana</i>	419	3. 56	15. 03
裂叶榆 <i>Ulmus laciniata</i>	363	3. 08	14. 41

生物量为 1 607. 0 t,生物量密度为 154. 5 t/hm²。

为了尽可能详细地了解样地内乔木层生物量的空间变异性,采用了移动窗口法进行统计。移动窗口法最早由 Whittaker^[21] 提出用于分析植被沿水分梯度的变化,随后被应用于城乡交错带景观异质性等方面的研究^[22],它从空间尺度上明确展示景观异质性特征和判定研究区域的特征尺度^[23]。移动

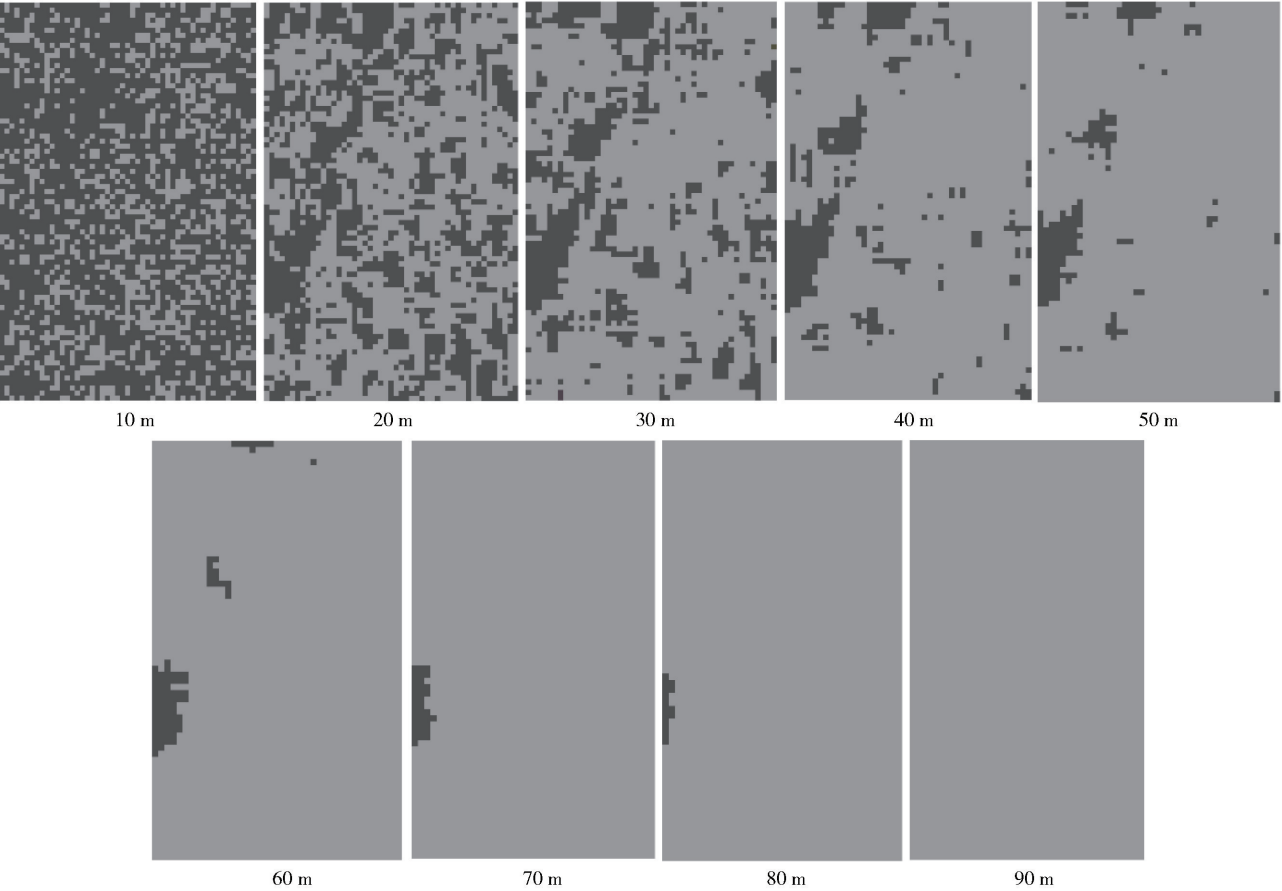
窗口分别设成边长为 10、20、30、…、90 m 的正方形,从样地左下角处开始,统计窗口内生物量密度,然后整个窗口依次向右移动 5 m,每次移动后再次统计窗口内的生物量密度,当到边界时则自动向上移动 5 m 并从左至右继续执行该流程,在整个过程中保证窗口始终在样地内移动,直至遍历整个样地。将采用移动窗口法得到的生物量密度值与样地生物量密度比较,若在样地生物量密度的 20% 误差范围内则把其栅格颜色设置为浅色,反之则设置为深色,最终生成 10 ~ 90 m 共 9 个窗口尺度下的乔木层生物量误差空间分布栅格图。

本研究主要采用 Visual Foxpro 9. 0、ArcGIS10. 0 以及 Excel 等软件。

3 结果与分析

3.1 最小面积的确定

图 1 是采用移动窗口法得到的从 10 ~ 90 m 各个尺度下的样地生物量误差空间分布栅格图。可以看出,当尺度为 10 m 时,整个景观的基质是代表不



深色的栅格是生物量密度在样地生物量密度 20% 误差范围之外,浅色的栅格是生物量密度在样地生物量密度 20% 误差范围之内。The dark grid refers to that biomass density exceeds the actual biomass density of 20% error range, and the light grid refers to the biomass density within the actual biomass density of 20% error range.

图 1 10 ~ 90 m 各个尺度下的生物量误差空间分布栅格

Fig. 1 Spatial distribution of biomass error for scales varing between 10-90 m

在样地生物量密度 20% 误差范围内的深色部分,而从 20 m 尺度开始基质变成了代表符合样地生物量密度 20% 误差范围内的浅色部分,随着尺度的增加深色部分逐渐被合并或消失,在 70 m 时仅剩一个深色斑块,直至 90 m 时整个景观全部由浅色组成。

对应的符合样地生物量密度 20% 误差范围内的栅格数量占比随着窗口尺度的增大而增大(图 2),但当窗口尺度为 0.49 hm² (70 m × 70 m) 时,占比接近 100% 且不再随其尺度增大而有较大变化,当窗口尺度为 0.81 hm² (90 m × 90 m) 时,占比达到并维持在最大值 100%。

对于采用移动窗口法处理得到的 10 ~ 90 m 各个尺度下的样地生物量误差空间分布栅格图(图 1),开始其空间分布的变异性很大,而后随着窗口尺度的增大,生物量误差的空间分布逐渐均匀。当窗口尺度为 70 m 时,其生物量误差分布基本一致,与此对应的符合样地生物量密度 20% 误差范围内的栅格数量占比接近 100% 且不再随其尺度增大而有较大变化(图 2)。这就说明了当窗口尺度达到 70 m 即窗口面积为 0.49 hm² 时,具有与样地相同或相近的生物量密度(20% 误差范围内),可认为是能够完整体现样地生物量空间变异性、准确地显示群落结构真实特征的最小面积。

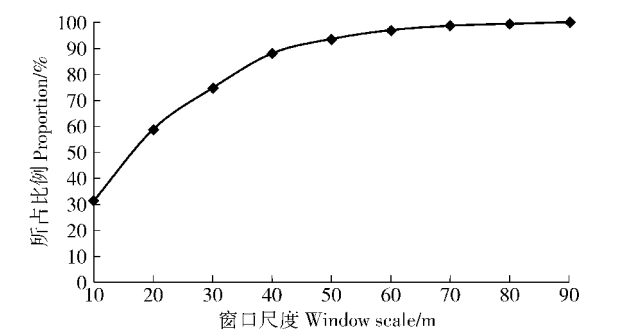


图 2 不同窗口尺度下的栅格数量所占比例

Fig. 2 Proportion of grid number at different window scales

3.2 模拟抽样

为了验证用移动窗口法所确定的最小面积,采用了计算机模拟随机抽样的手段:从 10.4 hm² 样地中随机地选取一块特定面积的正方形区域(0.49 hm² (70 m × 70 m) 和 0.36 hm² (60 m × 60 m) 2 种大小),在该区域内随机布设若干个无重叠的过去研究中经常使用的 20 m × 20 m 样方,计算所有样方的平均乔木层生物量密度(估计值),与样地生物量密度测量值比较并计算相对误差。20 m × 20 m 的样方数量设置为从最少 3 个到正方形区域所能容纳的最大个数(9 个),针对每种面积下的情形重复上述过程 1 000 次。

利用 1 000 次模拟抽样得到的数据集,计算这 2 种面积下相对误差在 20% 以内出现的概率并以此来预测估计值落在测量值 20% 误差范围内发生的可能,最后与在整个样地内重复 1 000 次随机抽取若干个 20 m × 20 m 样方操作中相对误差在 20% 以内发生的概率进行比较。当在整个样地内 (10.4 hm²) 随机抽样时,至少 7 个 20 m × 20 m 的样方就能有 95.0% 以上的置信概率使估测值落在测量值 20% 的误差范围内(表 2)。当样地面积为 0.49 hm² 时,同样面积、数量的样方也能达到同样的置信保证与精度要求。进一步缩小样地面积到 0.36 hm² 时,无论 20 m × 20 m 的样方数量为多少,均不能使估测值落在测量值 20% 的误差范围内的置信概率达到 95.0% (表 2)。

表 2 估计值达到测量值 20% 误差范围内的概率

样方数量 Number of samples	Tab. 2 Probability of estimation of biomass within 20% of the observed value %		
	样地面积/hm ²	Sample plot area/ha	
	10.4	0.49 (70 m × 70 m)	0.36 (60 m × 60 m)
3	81.2	83.2	80.4
4	89.8	86.7	88.2
5	90.5	90.7	91.0
6	94.6	93.9	93.6
7	96.6	95.9	93.7
8	97.2	97.0	94.0
9	98.2	97.4	94.2

注:在相应样地范围内随机抽样使用的样方大小为 20 m × 20 m。
Note: Sample size used for random sampling in the corresponding plot is 20 m × 20 m.

若 0.49 hm² (70 m × 70 m) 为本文中森林群落空间结构研究的最小面积,则在该面积内随机抽样的结果应该与在整个样地范围内随机抽样的结果等效,且当面积为 0.36 hm² (60 m × 60 m) 时恰好达不到此效果。这里的“等效”或“效果”是指有 95.0% 以上的置信概率能使估计值落在测量值 20% 的误差范围内。故符合精度要求与置信保证的最小面积为 0.49 hm²,也验证了用移动窗口法所得的最小面积是准确的。当对森林生物量的调查取样限定在此面积范围内时,不仅具有较高的估测精度,还能够全部包含样地所在林分生物量水平方向上的变异性。

4 讨 论

以往在对阔叶红松林的群落最小面积方面开展了大量工作,但这些研究往往侧重于森林群落的非空间结构方面^[24-29],种—面积关系多被用来确定其

最小面积。森林的复杂性不仅仅体现在它的物种组成、密度、粒级分布等方面,更多的信息则展现在其空间结构上。空间结构的最小面积可以作为衡量森林群落空间结构复杂程度的一个指标,最小面积的大小代表了空间变异的范围,最小面积越大则说明了空间异质性越高。

本文以乔木层生物量为研究对象,探讨了胜山阔叶红松林群落空间结构研究的最小面积。与过去的取样方法如巢式样方法^[30]、套状样方法^[31]等相比,本文基于大型样地全面实测数据,采用了移动窗口法,该方法充分考虑了森林生物量空间分布上的差异性,以移动窗口的形式遍历了整个样地,获得的是各个尺度下整个样地的生物量分布情况;而不是以在样地内选取几个不同面积的样方来代替整个样地的方式,能够有效地避免由于群落空间异质性带来的取样误差,客观的反映样地内生物量的空间格局,进而减小确定最小面积时的误差。移动窗口法正是因为具备了这种使空间信息明晰化的特点,在处理由样线、样带^[32-35]携带的空间信息的尺度效应等问题上颇具优势,被认为是简单而有力地刻画边界动态的工具^[36]。与样线、样带有所不同,本文不是从单一的维度出发,而是通过对样地乔木层生物量的水平维度、垂直维度等空间结构上的探究,展现了阔叶红松林生物量的空间变异性与结构特征。

从单木水平到样地水平再到区域水平,不确定性普遍存在于生物量估测的各个阶段^[37]。在从单木生物量推算到样地、林分及更大尺度生物量时,不确定性主要来源于抽样误差和单木水平生物量外推时传播并累积下来的误差,其中抽样误差是受样地数量、样地大小、抽样方式及自然条件等因素影响的结果^[38]。林敦梅等^[17]利用古田山大型森林动态监测样地调查数据,基于计算机模拟取样分析了限定在整个样地(24 hm²)范围内抽样的不确定性,其研究结果表明在进行调查研究时需要充分考虑群落结构的空间变异性,用一定数量小样方取样的效率一般要高于采用少量的大样方。本文利用了计算机模拟随机抽样的技术,通过限定在面积为 10.4、0.49 和 0.36 hm²等不同样地范围内的抽样并进行分析比较,发现当样地面积为 0.49 hm²时刚好就能达到与在整个样地(10.4 hm²)范围内抽样时相同的置信保证与精度要求,仅用 7 个 20 m × 20 m 的样方(约占最小面积的 60%)就能有 95.9% 的概率把估测的误差范围控制在 20% 以内(表 2)。这表明限定在最小面积范围内的抽样既可以有效地控制在生物量估测时的不确定性,同时也极大地减轻了野外调查工作量。

然而本文也有一定的不足。本文仅研究了乔木层的生物量,忽略了其他部分对森林生物量的贡献,缺乏适用于老龄红松的生物量计算模型,未来可以扩大调查范围及增加相应生物量解析方程的基础性研究。生物量描述的只是森林群落空间结构的一部分,未来可以结合其他指标如重要值、多样性指数等,实现对森林空间结构的综合分析。本文的研究对象只是面积为 10.4 hm² 的胜山阔叶红松林样地,而群落结构的空间变异是环境、群落过程、人为或自然干扰等因素相互作用的结果,不同气候类型、不同地形条件、不同干扰程度等均能引起群落结构的差异^[39-41],故其最小面积在其他地区仅具有参考价值。

5 结 论

本文依据黑龙江胜山阔叶红松林 10.4 hm² 大型样地全面实测数据,基于移动窗口法、GIS 技术分析其乔木层生物量空间格局的尺度效应,探究其群落空间结构研究的最小面积。研究表明,随着窗口尺度的增大,符合样地生物量密度 20% 误差范围内的栅格分布从破碎到逐渐连续起来,在窗口尺度达到 90 m 时,整个景观完全由符合样地生物量密度 20% 误差范围内的栅格组成。通过对不同窗口尺度下符合样地生物量密度 20% 误差范围内的栅格数量占比分析,当窗口尺度为 0.49 hm² (70 m × 70 m) 时,占比接近 100% 且不再随其尺度增大而有较大变化,可作为该森林群落空间结构研究的最小面积,并进一步通过计算机模拟随机抽样验证。因此本文关于胜山阔叶红松林乔木层生物量空间结构的研究存在着最小面积 0.49 hm²,具有与样地相同的生物量密度,能够完整地体现胜山阔叶红松林生物量的空间变异性,准确地反映群落结构的真实特征。

参 考 文 献

[1] 王伯荪, 余世孝, 彭少麟, 等. 植物群落学实验手册[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1996: 10-26.
WANG B S, YU S X, PENG S L, et al. Manual of plant community research [M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1996: 10-26.

[2] HAO Z Q. Analysis of plant community diversities and their gradient patterns on the northern slope of Changbai Mountain [D]. Shenyang: Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2000.

[3] KALLIMANIS A S, HALLEY J M, VOKOU D, et al. The scale of analysis determines the spatial pattern of woody species diversity in the Mediterranean environment [J]. Plant Ecology, 2008, 196 (1): 143-151.

[4] HARTE J, SMITH A B, STORCH D. Biodiversity scales from plots to biomes with a universal species-area curve [J]. Ecology

- Letters, 2009, 12(8): 789-797.
- [5] TIKKANEN O P, PUNTTILA P, HEIKKILA R. Species-area relationships of red-listed species in old boreal forests: a large-scale data analysis [J]. Diversity and Distributions, 2009, 15 (5): 852-862.
- [6] 杨持, 宝荣. 羊草草原种群分布格局的最适取样面积 [J]. 生态学报, 1986, 6(4): 324-329.
- YANG C, BAO R. Optimum sampling area for the studies of distribution pattern in *Aneurolepidium chinensis* steppe community [J]. Acta Ecologica Sinica, 1986, 6(4): 324-329.
- [7] 李丽, 惠刚盈, 惠淑荣, 等. 不同样地大小对天然林林分的密度估计和格局分析影响研究 [J]. 科技导报, 2007, 25(9): 40-46.
- LI L, HUI G Y, HUI S R, et al. Study on the influence of plot area size on estimation of stand density and analysis of patterns of natural forests [J]. Science & Technology Review, 2007, 25(9): 40-46.
- [8] 宫守飞, 许剑辉, 黄庆丰. 铜陵叶山常绿落叶阔叶林群落结构最小取样面积的抽取 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2012, 36(2): 91-94.
- GONG S F, XU J H, HUANG Q F. Study on the minimum sampling area of evergreen-deciduous broadleaf forest community structure in Tongling Yeshan Mountain [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2012, 36(2): 91-94.
- [9] 董灵波, 刘兆刚, 马妍, 等. 天然林林分空间结构综合指数的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 16-22.
- DONG L B, LIU Z G, MA Y, et al. A new composite index of stand spatial structure for natural forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(1): 16-22.
- [10] OVERMAN J P M, WITTE H J L, SALDARRIAGA J G. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest [J]. Journal of Tropical Ecology, 1994, 10(2): 207-218.
- [11] 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.
- FENG Z K, LUO X, SHI L P. Some problems and perfect approaches of research on forest biomass [J]. World Forestry Research, 2005, 18(3): 25-28.
- [12] 樊后保, 李燕燕, 苏兵强, 等. 马尾松-阔叶树混交异龄林生物量与生产力分配格局 [J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2463-2473.
- FAN H B, LI Y Y, SU B Q, et al. Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of Masson's pine and hardwood species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2463-2473.
- [13] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟 [J]. 生态学报, 2013, 26(12): 4156-4163.
- HUANG M, JI J J, CAO M K, et al. Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 26(12): 4156-4163.
- [14] GARKOTI S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas [J]. Ecological Research, 2008, 23(1): 41-49.
- [15] CHAVE J, CONDIT R, AGUILAR S, et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates [J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2004, 359: 409-420.
- [16] MASCARO J, ASNER G P, MULLER-LANDAU H C, et al. Controls over aboveground forest biomass density on Barro Colorado Island, Panama [J]. Biogeosciences, 2011, 8(6): 1615-1629.
- [17] 林敦梅, 赖江山, 米湘成, 等. 亚热带常绿阔叶林群落结构的时空变异及其对取样设计的启示 [J]. 科学通报, 2013, 58 (1): 69-74.
- LIN D M, LAI J S, MI X C, et al. Spatial variation in community structure of a subtropical evergreen broad-leaved forest: implications for sampling design [J]. Chin Sci Bull, 2013, 58 (1): 69-74.
- [18] 杨金明, 范文义. 小兴安岭主要树种生物量的理论模型 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 46-48, 60.
- YANG J M, FAN W Y. Theoretical model for biomass of main tree species in Xiaoxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(3): 46-48, 60.
- [19] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- FENG Z W, WANG X K, WU G. Biomass and productivity of forest ecosystem in China [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [20] 刘帆, 王传宽, 王兴昌, 等. 帽儿山温带落叶阔叶林通量塔风浪区生物量空间格局 [J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6506-6519.
- LIU F, WANG C K, WANG X C, et al. Spatial patterns of biomass in the temperate broadleaved deciduous forest within the fetch of the Maoershan flux tower [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6506-6519.
- [21] WHITTAKER R H. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California [J]. Ecological Monographs, 1960, 30(3): 279-338.
- [22] MCDONNELL M J, PICKETT S T. Ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology [J]. Ecology, 1990, 71(4): 1232-1237.
- [23] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 等. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析 [J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3414-3424.
- LI D K, DING S Y, LIANG G F, et al. Landscape heterogeneity of mountainous and hilly area in the western Henan Province based on moving window method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (12): 3414-3424.
- [24] 郝占庆, 赵士洞. 长白山北坡椴树红松林高等植物物种多样性 [J]. 生态学杂志, 1993, 12(6): 1-5.
- HAO Z Q, ZHAO S D. Species diversity of higher plants in lime Korean pine forest on northern slope of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Ecology, 1993, 12(6): 1-5.
- [25] 孙中伟, 赵士洞. 长白山北坡椴树阔叶红松林群落特征 [J]. 生态学杂志, 1995, 14(5): 26-30.
- SUN Z W, ZHAO S D. Community features of Tilia-Korean pine forest on northern slope of Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 1995, 14(5): 26-30.

[26] 代力民, 王青春, 邓红兵, 等. 二道白河河岸带植物群落最小面积与物种丰富度[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 641-645.

DAI L M, WANG Q C, DENG H B, et al. Minimum sampling area and species richness of riparian community in Erdaobaihe forested watershed [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 641-645.

[27] 吴晓蕾, 朱彪, 赵淑清, 等. 东北地区阔叶红松林的群落结构及其物种多样性比较[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 174-181.

WU X P, ZHU B, ZHAO S Q, et al. Comparison of community structure and species diversity of mixed forests of deciduous broad-leaved tree and Korean pine in Northeast China[J]. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 174-181.

[28] 郝占庆, 李步杭, 张健, 等. 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 238-250.

HAO Z Q, LI B H, ZHANG J, et al. Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: community composition and structure[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(2): 238-250.

[29] 徐丽娜, 金光泽. 小兴安岭凉水典型阔叶红松林动态监测样地: 物种组成与群落结构[J]. 生物多样性, 2012, 20(4): 470-481.

XU L N, JIN G Z. Species composition and community structure of a typical mixed broadleaved-Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest plot in Liangshui Nature Reserve, Northeast China [J]. Biodiversity Science, 2012, 20(4): 470-481.

[30] 蔡锰柯, 林开敏, 赵长存, 等. 杉木老龄林群落的一种—面积关系[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 67-70.

CAI M K, LIN K M, ZHAO C C, et al. Species-area relationship in old Chinese fir plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(12): 67-70.

[31] 张修玉, 许振成, 宋巍巍, 等. 西双版纳紫茎泽兰生物量收获的样方选择与模型[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 85-90.

ZHANG X Y, XU Z C, SONG W W, et al. Selection of quadrat for biomass harvesting and model of *Eupatorium adenophorum* in Xishuangbanna[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(10): 85-90.

[32] 吴祥云, 刘梦旅, 任杰, 等. 辽东山地森林景观界面土壤水分变异特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(4): 56-63.

WU X Y, LIU M L, REN J, et al. Soil moisture variation characteristics at forest landscape boundary of mountainous region in eastern Liaoning[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(4): 56-63.

[33] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 等. 晋西黄土区林草复合系统土壤养分分布特征及边界效应[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 37-42.

YUN L, BI H X, MA W J, et al. Distribution characteristics and boundary effects of soil nutrient in silvopastoral system in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(2): 37-42.

[34] 田晓玲, 毕华兴, 云雷, 等. 晋西黄土区林草复合系统草本植物多样性特征[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 64-69.

TIAN X L, BI H X, YUN L, et al. Herbaceous plant diversity of silvopastoral system in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(1): 64-69.

[35] 张玲玲, 赵永华, 殷莎, 等. 基于移动窗口法的岷江干旱河谷景观格局梯度分析[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3276-3284.

ZHANG L L, ZHAO Y H, YIN S, et al. Gradient analysis of dry valley of Minjiang River landscape pattern, based on moving window method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3276-3284.

[36] LI L G, HE X Y, LI X Z, et al. Depth of edge influence on the field-forest boundary in the arid valley of upper reaches of Minjiang River, China [J]. Chin J Appl Ecol, 2004, 15(10): 1804-1808.

[37] COHEN R, KAINO J, OKELLO J, et al. Propagating uncertainty to estimates of above-ground biomass for Kenyan mangroves: a scaling procedure from tree to landscape level[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 968-982.

[38] 傅煜, 雷渊才, 曾伟生. 区域尺度杉木生物量估计的不确定性度量[J]. 林业科学, 2014, 50(12): 79-86.

FU Y, LEI Y C, ZENG W S. Uncertainty assessment in regional-scale above ground biomass estimation of Chinese fir[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(12): 79-86.

[39] DEWALT S J. Structure and biomass of four lowland neotropical forests[J]. Biotropica, 2004, 36(1): 7-19.

[40] STEGEN J C, SWENSON N G, ENQUIST B J, et al. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients[J]. Global Ecol Biogeogr, 2011, 20(5): 744-754.

[41] MCEWAN R W, LIN Y, SUN I, et al. Topographic and biotic regulation of aboveground carbon storage in subtropical broad-leaved forests of Taiwan [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(9): 1817-1825.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑委 赵秀海)