

基于群团抽样技术的森林资源监测方案研究

阳帆¹ 王海宾² 胡晟² 彭道黎¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 国家林业局林产工业规划设计院, 北京 100010)

摘要: 为探索适合我国森林资源实情的监测抽样新技术, 借鉴美国森林资源年度监测技术方案, 以北京市延庆区为研究区, 进行森林蓄积量群团抽样试验研究。首先在美国森林资源年度监测体系基础上, 根据所选研究区域的森林资源分布状况, 确定适宜的正六边形抽样框架尺度以及抽样比例, 在抽选的正六边形抽样框架内布设圆形群团样地并进行实地调查, 从而获取研究区当年森林蓄积量信息。结果表明, 采用正六边形抽样框架在北京市延庆区开展森林资源年度监测的适宜面积为 2 338 hm², 边长为 3 000 m, 最适抽样比例为 66%; 根据所设计的群团抽样方案进行实地调查获取延庆区 2016 年的森林蓄积量为 16.6 m³/hm², 抽样调查精度达 85.4%, 符合《国家森林资源连续清查技术规定》对抽样精度的要求, 验证了基于圆形群团样地在我国区、县级尺度上开展森林资源监测的可行性。

关键词: 群团抽样技术; 正六边形抽样框架; 圆形群团样地; 森林蓄积量; 抽样精度

中图分类号: S757.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0212-06

Forest Resource Monitoring Based on Cluster Sampling Techniques

YANG Fan¹ WANG Haibin² HU Sheng² PENG Daoli¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Planning and Design Institute of Forest Products Industry, State Forestry Administration, Beijing 100010, China)

Abstract: In order to explore the new monitoring sampling technology suitable for the situation of forest resources in China, based on the annual monitoring technology of forest resources in the United States, the annual monitoring of forest volume was researched in Yanqing District, Beijing. Firstly, according to the actual situation of forest resource distribution in research area and based on the design of American annual monitoring system of forest resources, some optimization and improvement in the size of hexagonal sampling frame and sampling rate were done, and a system sampling scheme for annual forest inventory monitoring was designed. The result showed that using the positive hexagonal sampling frame to do annual monitoring of forest resources can receive an optimal scale area, an optimal side length and an optimal sampling fraction, and the amount was 2 338 hm², 3 000 m and 66%, respectively. According to the systematic sampling scheme, and combining with field investigation, the volume amount received in Yanqing was 16.6 m³/hm², the sampling monitoring accuracy was 85.4%, which was all conformity with NFI Technical Regulations. Therefore, the feasibility of the proposed forest resource monitoring scheme based on cluster sampling technology in China was verified. The main points of cluster sampling technology and the method of forest accumulation amount output based on circular cluster were introduced in detail. The research result can provide reference for the optimization and improvement of the national forest resources continuous inventory system and the field sampling survey technology.

Key words: cluster sampling technique; positive hexagonal sampling frame; clustered circular sample plots; forest growing stock; sampling accuracy

收稿日期: 2018-08-07 修回日期: 2018-08-31

基金项目: 农业部引进国际先进农业科学技术计划项目(2015-4-32)

作者简介: 阳帆(1992—), 男, 博士生, 主要从事森林资源监测与抽样技术研究, E-mail: 1609646304@qq.com

通信作者: 彭道黎(1963—), 男, 教授, 主要从事森林资源监测与评价和森林经营管理研究, E-mail: dlpeng@bjfu.edu.cn

0 引言

森林生态系统是陆地生态系统的主体,做好森林资源监测工作,掌握森林资源生长及动态变化,能够为国家和林业部门制定发展方针和计划提供数据支撑。不论是国家决策层面还是社会公众层面,都迫切要求及时掌握全国森林资源变化信息^[1-2]。为探索适合我国森林资源实情的森林资源监测新技术,国内林业学者进行了大量的研究,从世界各国的国家级监测体系中寻找适合我国监测体系优化和改革的方法^[3-19],然而这些研究仅停留在理论的介绍和分析上,没有结合我国森林资源的实际情况并采用相应的理论技术进行实地试验研究。

美国是世界上森林资源最多的国家之一,同时也是最早研究和开展森林资源年度清查、技术较为成熟的国家^[20]。其采用三阶圆形群团抽样调查技术,每个州每年调查 20% 的固定样地取代原来每年调查若干个州的固定样地,采用数理统计方法对森林资源的属性信息进行外推计算,获得森林资源属性的年度变化信息。目前我国森林资源野外调查大部分使用的是单一方形样地,而美国所采用的圆形群团样地相对于单一方形样地具有以下优点:①样本单元采用群团状,在工作量一定的前提下,可取得最大的抽样效益,减少调查时间^[10, 19]。②样地形状采用圆形样地,在一定程度上能减少“边界木效应”,减少抽样误差^[21],且圆形样地只需要固定样地中心,不需要设置四角标桩^[22],隐蔽性能好,不容易遭到破坏。③群团样地相对于单一样地而言不仅能够捕捉样地内的最大信息量,而且可以降低野外样地调查的交通成本和设置时间,从而提高调查效率^[13]。目前美国设计的正六边形抽样框架结合圆形群团样地开展的多阶抽样技术已被韩国引进应用,并取得了较好的监测效果。我国在广东省集体林区也采用了群团抽样的方法进行了森林资源调查试验,研究结果表明群团抽样作为对抽样总体总蓄积的控制和建立县级森林资源连续清查体系是可行的,相比系统抽样能节省大量人力和野外调查时间,节约调查经费^[23]。

基于上述分析,为优化我国森林资源监测技术,提高野外森林资源抽样调查效率,本文以北京市延庆区为研究区域,以森林蓄积量为研究对象,在借鉴美国森林资源年度监测技术基础上,以圆形群团样地为监测样地,并根据研究区的森林资源分布状况,对不同尺度正六边形抽样框架和不同抽样比例进行改进测试和研究。采用群团抽样方法进行实地调查并获取研究区域当年森林蓄积量信息,通过抽样精

度验证本研究所提出的群团抽样技术方案的可行性。

1 研究区及实验数据

1.1 研究区概况

研究区位于北京市延庆区,处在北京市的西北部(115°44'~116°34'E,40°16'~40°47'N),东邻怀柔区,南接昌平区,西面和北面与河北省怀来县、赤城县相接,三面环山,总面积达 1 993.75 km²。该区属大陆性季风气候,是暖温带与中温带、半干旱与半湿润的过渡带。年平均温度 8.8℃,无霜期 150~160 d。年平均降雨量为 467 mm,降水主要集中在 6—8 月。该区内森林植被属于针阔混交林,现存植被主要为人工林以及一些次生植被类型。主要森林类型有:油松林(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏林(*Platycladus orientalis*)、华北落叶松林(*Larix principis-rupprechtii*)、蒙古栎林(*Quercus liaotungensis*)、刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)、白桦林(*Betula platyphylla*)、杨树林(*Populus spp*)、山杨林(*Populus davidiana*)及其他阔叶林等。

1.2 数据来源

主要数据有 2009 年二类小班调查数据,2015—2016 年 114 块圆形群团样地数据,样地主要调查记录因子有:抽样框架号、圆形群团样地 GPS 横纵坐标、子样圆编号、树种、胸径、树高、坡向、坡度、海拔、株数、年龄等,以及北京市延庆区行政边界矢量数据。

2 研究方法

2.1 抽样框架

在森林资源调查中,抽样框架是将大尺度监测区域内的森林资源切割成若干个面积相同的样本个体,其主要目的是提高抽样效率,降低调查成本。针对一个研究区而言,其森林资源的分布概况在短时间内不会发生较大变化,因此不同尺度的抽样框架将会决定调查总体的方差与标准差,从而影响抽样样本量与抽样精度。群团抽样误差主要来源于群间、群内方差,要减少调查工作量,只有扩大群内方差,缩小群间方差^[23]。通过制定合适尺度的抽样框架,将研究区域的森林资源划分成若干个方差较小的调查区域,可以降低群间方差^[23]。鉴于此,在开展抽样调查之前可以利用前期森林资源调查数据分析研究区域内森林资源在不同尺度正六边形抽样框架下森林面积、蓄积量变异系数的变化情况^[24-25],从而确定适合研究区域进行抽样调查的抽样框架尺度。

本研究借鉴美国的正六边形抽样框架进行样地点布设与抽样,首先通过计算不同尺度正六边形抽样框架下延庆区的森林面积以及森林蓄积量的变异系数来确定研究区域正六边形抽样框架适宜的尺度。

利用 ArcGIS 10.1 的 Create Hexagon Tessellation 插件,在延庆区行政范围内布设不同尺度的正六边形抽样框架,边长分别为 500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500、5 000 m,分别生成抽样框架 3 282、867、409、237、160、114、89、71、52、45 个。其次利用 ArcGIS 10.1 的叠加分析功能,将不同尺度的正六边形抽样框与延庆区 2009 年二类小班数据进行相交处理,通过数理统计的方法获取各个正六边形抽样框的森林蓄积量、面积信息。获取不同尺度正六边形抽样框架下研究区域的森林面积、蓄积量变异系数为

$$c = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_1)^2}}{\bar{y}_1} \quad (1)$$

式中 n ——延庆区内布设的不同尺度正六边形抽样框架个数

y_i ——计算森林面积、蓄积量变异系数时,第 i 个抽样框架内的森林面积(蓄积量)

\bar{y}_1 ——延庆区内所有正六边形抽样框架的森林面积平均值(森林蓄积量平均值)

2.2 抽样比例

抽样比例一般由总体方差、调查精度以及概率保证程度决定。对于任何一个研究区域而言,在抽样框架尺度确定后,总样本的方差也基本确定,因此都会存在一个能够达到国家或者部门对抽样精度要

求的最小抽样比例。本文在此提出最适抽样比例的概念,即针对一个研究区,在抽样框架尺度确定之后,通过不断增加抽样样本量来达到抽样精度要求,最终以稳定达到精度要求的抽样比例最小值作为该研究区最适抽样比例。根据《国家森林资源连续清查技术规定》,北京市森林蓄积量抽样调查精度应控制在 85% 以上。

以 2.1 节确定布设的抽样框架为抽样总体,以 20% 的抽样比例为起始点,以 10% 为一个梯度增加抽样比例,共设计 8 个抽样方案进行最适抽样比例的确定,各方案的抽样比例分别为 20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%,为确保结果的无偏性,每个方案进行 30 次重复试验,计算各抽样方案的森林蓄积量平均抽样精度,以达到 85% 稳定抽样精度时的最低抽样比例作为该区域的最适抽样比例。抽样精度计算公式为

$$p = \frac{\sum \left(1 - \frac{ts}{y\sqrt{n}}\right)}{30} \quad (2)$$

式中 s ——抽取调查样本的标准差

\bar{y} ——所抽取的样本蓄积量平均值, m^3

n ——抽取的样本量

t ——抽样可靠性定值

2.3 圆形群团样地的布设

以 2.1 节所确定的抽样框架为总体,以 2.2 节所确定的最适抽样比例进行抽取。在抽取的正六边形框架中心点处布设圆形群团样地,并进行实地调查,获取研究区当年森林资源蓄积量信息。

如图 1 所示,圆形群团样地由 4 个子样地组成,1 号子样地位于中心,2、3、4 号子样地分别位于 1 号子样地的 0° 、 120° 、 240° 方向。每个子样地布设

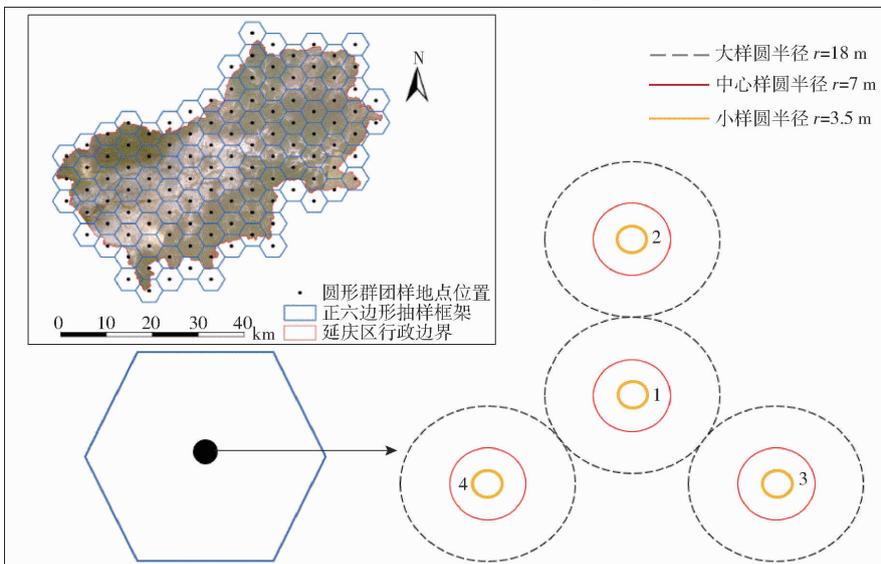


图 1 抽样框架与圆形群团样地布设示意图

Fig. 1 Schematic of sampling frame and circular cluster layout

3 个不同半径 (3.5、7、18 m) 的同心圆小样地。如图 1 所示,中间红圈为中心样圆样地,测量树木胸径为 5 ~ 50 cm。嵌套在中心样圆内的黄圈为小样圆样地,用于测量树木胸径在 2.5 ~ 5 cm 的幼树,布设在中心样圆外的虚线为大样圆,用于测量树木胸径 50 cm 以上的大树。布设好圆形群团样地后,在样地内进行每木检尺调查,分别记录抽样框架号、子样圆号、树种、胸径、树高、坡向、坡度、海拔、株数、年龄等调查因子。

2.4 基于圆形群团样地的森林蓄积量监测

考虑到获取延庆全区森林蓄积量信息进行全面调查的工作量及成本因素,同时兼顾调查的可行性及精度要求,本研究采用群团抽样方法进行森林蓄积量年度监测。首先,采用 2.1 节确定的适宜尺度的正六边形框架在研究区域内进行系统布设。其次,以 2.2 节所确定的最适抽样比例进行抽样,在抽取的正六边形抽样框架中心点处布设圆形群团样地并进行实地调查,获取当年森林蓄积量。基于圆形群团样地的森林蓄积量与抽样精度计算公式为

$$V = aD^b H^c \quad (3)$$

$$V_{kj7} = \frac{1}{s_1} \sum_{i=1}^{n_3} V_i \quad (4)$$

$$V_{kj18} = \frac{1}{s_2} \sum_{i=1}^{n_4} V_i \quad (5)$$

$$V_{kj3.5} = \frac{1}{s_3} \sum_{i=1}^{n_5} V_i \quad (6)$$

$$V_k = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (V_{kj7} + V_{kj18} + V_{kj3.5}) \quad (7)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^i V_k \quad (8)$$

$$S_{V_k}^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{k=1}^i (V_k - \bar{V})^2 \quad (9)$$

$$S_{\bar{V}_k} = \frac{S_{V_k}^2}{\sqrt{k}} \quad (10)$$

$$E_{V_k} = \frac{tS_{\bar{V}_k}}{\bar{V}} \times 100\% \quad (11)$$

$$P_{V_k} = 1 - E_{V_k} \quad (12)$$

式中 V ——单株立木蓄积量, m^3
 a, b, c ——北京市不同树种立木材积公式参数
 D ——样木胸径, cm H ——树高, m
 V_{kj7} ——第 k 个正六边形抽样框架内第 j 个子样圆样地内半径为 7 m 的中心样圆的单位面积蓄积量, m^3/hm^2
 V_{kj18} ——第 k 个正六边形抽样框架内第 j 个子样圆样地内半径为 18 m 大样圆的

单位面积蓄积量, m^3/hm^2
 $V_{kj3.5}$ ——第 k 个正六边形抽样框架内第 j 个子样圆样地内半径为 3.5 m 的小样圆的单位面积蓄积量, m^3/hm^2
 n_3 ——半径为 7 m 的中心样圆内胸径在 5 ~ 50 cm 的林木总株数
 s_1 ——中心样圆面积, hm^2
 n_4 ——半径为 18 m 的大样圆内胸径在 50 cm 以上的林木总株数
 s_2 ——大样圆面积, hm^2
 n_5 ——半径为 3.5 m 小样圆内胸径在 2.5 ~ 5 cm 之间的幼树总株数
 s_3 ——小样圆面积, hm^2
 V_k ——第 k 个正六边形抽样框架的单位面积蓄积量, m^3/hm^2
 \bar{V} ——延庆区平均每公顷森林蓄积量估测值, m^3/hm^2
 k ——抽样样本量
 $S_{V_k}^2$ ——抽样样本方差
 $S_{\bar{V}_k}$ ——样本标准差
 E_{V_k} ——抽样样本误差
 P_{V_k} ——抽样样本精度
 i ——圆形样地内的样木编号
 V_i ——圆形样地内第 i 株样木的单株立木蓄积量, m^3

3 结果与分析

3.1 正六边形抽样框架研究结果

根据式(1)分别计算边长为 500 ~ 5 000 m 的正六边形抽样框架下延庆全区的森林面积、蓄积量变异系数,其结果如表 1 所示。

表 1 不同尺度抽样框架下的变异系数与变化量

Tab.1 Variation coefficient and variation rate under different scale sampling frames

正六边形 抽样框架 边长/m	变异系数/%		变化量/%		总体样本 单元数量
	森林 面积	森林 蓄积量	森林 面积	森林 蓄积量	
500	83.89	92.82			3 282
1 000	77.81	85.71	6.08	17.11	867
1 500	73.83	78.89	3.98	6.82	409
2 000	68.12	76.45	5.71	2.44	237
2 500	65.72	74.27	2.40	2.18	160
3 000	64.51	72.62	1.21	1.65	114
3 500	63.18	71.36	1.33	1.26	89
4 000	62.47	70.78	0.71	0.58	71
4 500	62.08	70.47	0.39	0.31	52
5 000	61.83	70.31	0.25	0.16	45

变异系数实质是样本标准差的去量纲化,反映样本之间监测指标属性值的变动情况,变异系数越小,达到保证抽样精度所需的样本量越少,抽样效率越高,因此单从该方面分析,边长为 5 000 m 的正六边形抽样框架划分的森林面积、蓄积量变异系数最小,最为合适。然而用 5 000 m 的抽样框架在研究区域进行系统布设,仅产生 45 个样本单位,样本量太小,不利于抽样精度的保障。其次,从表 1 可知,在边长为 500 ~ 5 000 m 的正六边形抽样框架下,随着抽样框架单元面积的增大,延庆区森林面积、蓄积量变异系数逐渐减小,在抽样框边长增至 3 000 m 后,变异系数的变化情况基本趋于稳定状态(变化量小于 2%)。综合考虑变异系数变化情况以及样本量,最终确定在延庆区开展森林资源抽样调查的最适宜正六边形抽样框架的边长为 3 000 m,面积为 2 338 hm²,通过 ArcGIS 10.1 软件在研究区行政范围内共生成 114 个样本单元。

3.2 抽样比例研究结果

在 114 个样本单元中,以 2.2 节确定的抽样方案进行试验,结果如表 2 所示。

表 2 不同抽样比例下 30 次重复试验结果

Tab. 2 Results of 30 repeated tests with different sampling ratios %

抽样比例	20	30	40	50	60	70	80	90
平均抽样精度	69.2	77.0	80.4	82.1	85.3	86.2	86.5	86.3

由表 2 可知,研究区域森林蓄积量的平均抽样精度随着抽样比例的增加逐渐增高并趋于稳定。当抽样比例达到 60% 时,30 次重复试验的平均精度达到 85.3%,满足《国家森林资源连续清查技术规定》对抽样精度要求,即北京市森林蓄积量抽样调查精度应控制在 85% 以上。因此,综合考虑抽样精度、抽样工作量以及方案的可靠性,在 60% 抽样比例基础上增加 10% 的保险系数作为群团抽样最适宜的抽样比例,即 66%。

3.3 基于圆形群团样地的森林蓄积量年度监测结果

首先,在延庆区行政范围内以边长为 3 000 m 的正六边形抽样框架进行系统布设,共生成 114 个抽样框架。其后,从 114 个抽样框架中,以 66% 的抽样比例进行抽样,抽取 76 个圆形群团样地进行实地调查。根据式(3)~(12)估测延庆区 2016 年森林蓄积量。

延庆区 2016 年全区蓄积量为 16.6 m³/hm²,抽样精度达 85.4%,标准差为 10.8 m³/hm²,符合《国

家森林资源连续清查技术规定》对北京市抽样精度的要求,表明基于圆形群团样地森林蓄积量抽样监测方案是可行的。

4 讨论

本研究于 2016 年在研究区域采用群团抽样方法成功获取了延庆区当年森林蓄积量信息,可为今后我国森林资源监测体系与野外调查技术的优化改进提供参考。本研究提出的基于圆形群团样地的抽样监测方案在县级区域尺度进行应用验证,并取得较好的监测效果,然而在省级、国家级区域尺度上的监测效果仍待进一步验证。

我国有大量林业学者详细介绍了美国森林资源年度监测技术,并与我国森林资源监测技术对比分析,从理论上提出了森林资源监测体系优化改进的建议,而本文则应用实际调查数据验证了应用美国的四点圆形群团样地在我国开展森林资源监测的可行性,并且详细介绍了群团抽样技术与基于圆形群团样地森林蓄积计算方法,对今后森林资源体系的改革具有借鉴作用。目前,森林资源年度监测是当今各国研究的热点^[26],高效的抽样方案不仅在保证抽样精度前提下提高抽样效率,更应该提高监测数据的时效性。因此应用圆形群团样地监测森林资源信息时,如何在既能保证抽样精度的前提下设计抽样方案,又能实现年度动态监测是本次研究没有解决的问题,也是今后的研究关键点。

5 结论

(1) 利用延庆区前期二类小班调查数据计算不同尺度正六边形抽样框架的森林面积、蓄积量变异系数,通过变异系数的变化率以及样本量的综合分析,最终验证应用正六边形抽样框架在北京市延庆区开展森林资源监测的适宜面积为 2 338 hm²,边长为 3 000 m。

(2) 通过 8 种抽样方案 30 次重复试验,最终验证在 3 000 m 正六边形抽样框架下,延庆区开展森林资源抽样调查适宜的抽样比例为 66%。

(3) 以圆形群团样地作监测样地,利用适宜的抽样框架以及适宜的抽样比例设计群团抽样方案,成功获取 2016 年延庆区森林蓄积量,且抽样精度达 85.4%,满足《国家森林资源连续清查技术规定》对北京市森林蓄积量抽样调查精度要求,表明了基于圆形群团样地在我国开展森林资源抽样调查的可行性。

参 考 文 献

- [1] 王雪军,张焜星,黄国胜,等. 全国森林面积和森林蓄积年度出数方法探讨[J]. 江西农业大学学报, 2016,38(1): 9-18.
WANG Xuejun, ZHANG Yuxing, HUANG Guosheng, et al. Discussion on methods for annual national producing estimates of forest area and forest stock in China[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2016, 38(1): 9-18. (in Chinese)
- [2] 王海宾,彭道黎,范应龙,等. 基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(6): 283-289.
WANG Haibin, PENG Daoli, FAN Yinglong, et al. Spatial modeling of forest stock volume based on auxiliary information[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 283-289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160637&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.037. (in Chinese)
- [3] 曾伟生,程志楚,夏朝宗. 一种衔接森林资源一类清查和二类调查的新方案[J]. 中南林业调查规划, 2012,31(3): 1-4.
ZENG Weisheng, CHENG Zhichu, XIA Chaozong. A new scheme for coordinating continuous forest inventory with forest management inventory[J]. Central South Forestry Survey Planning, 2012, 31(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 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 Weisheng, HUANG Guosheng, DANG Yongfeng, et al. Discussion on sampling design and estimation methods of national forest resources Macro-Monitoring[J]. Forest Resource Management, 2016(3): 1-6. (in Chinese)
- [5] 曾伟生,周佑明. 森林资源一类和二类调查存在的主要问题与对策[J]. 中南林业调查规划, 2003, 22(4): 8-11.
ZENG Weisheng, ZHOU Youming. Discussion on main problems and countermeasures to continuous forest inventory and forest management inventory[J]. Central South Forestry Survey Planning, 2003, 22(4): 8-11. (in Chinese)
- [6] 孟京辉,陆元昌,柳新红,等. 国家森林资源调查体系改进探讨[J]. 浙江林业科技, 2009, 29(6): 77-79.
MENG Jinghui, LU Yuanchang, LIU Xinhong, et al. Study on improvement for national forest inventory[J]. Zhejiang Forestry Technology, 2009, 29(6): 77-79. (in Chinese)
- [7] 曾伟生. 全国森林资源年度出数方法探讨[J]. 林业资源管理, 2013, 4(1): 27-31.
ZENG Weisheng. Discussion on methods for producing annual national estimates of forest resources[J]. Forest Resource Management, 2013, 4(1): 27-31. (in Chinese)
- [8] 刘华,陈永富,鞠洪波. 美国森林资源监测技术对我国森林资源一体化监测体系建设的启示[J]. 世界林业研究, 2012, 25(6): 64-68.
LIU Hua, CHEN Yongfu, JU Hongbo. Inspiration of forest resources monitoring in USA for integrated forest resources monitoring system in China [J]. World Forestry Research, 2012, 25(6): 64-68. (in Chinese)
- [9] 曾伟生,闫宏伟. 森林资源监测有关问题的思考[J]. 林业资源管理, 2013(6): 14-18.
ZENG Weisheng, YAN Hongwei. Considerations on related issues of forest resource monitoring [J]. Forest Resource Management, 2013(6): 14-18. (in Chinese)
- [10] 张治军,唐芳林,李华,等. 美国和德国森林资源监测主要做法及启示[J]. 林业建设, 2013(4): 1-7.
ZHANG Zhijun, TANG Fanglin, LI Hua, et al. Main practices and implications of forest resource monitoring in the United States and Germany[J]. Forestry Construction, 2013(4): 1-7. (in Chinese)
- [11] 叶荣华. 美国国家森林资源清查体系的新设计[J]. 林业资源管理, 2003(3): 65-68.
YE Ronghua. New design of the US national forest inventory and analysis system[J]. Forest Resource Management, 2003(3): 65-68. (in Chinese)
- [12] 韦希勤. 美国森林资源调查方法的变化对我们的启示[J]. 中南林业调查规划, 2005, 24(2): 42-46.
WEI Xiqin. The implications of changes in forest resource survey methods in the United States [J]. Central South Forestry Survey Planning, 2005, 24(2): 42-46. (in Chinese)
- [13] 韦希勤. 国家级森林资源监测体系中的地面样地设计[J]. 世界林业研究, 1996, 9(3): 24-28.
WEI Xiqin. Ground sample design in national forest resources monitoring system[J]. World Forestry Research, 1996, 9(3): 24-28. (in Chinese)
- [14] 舒清态,唐守正. 国际森林资源监测的现状与发展趋势[J]. 世界林业研究, 2005, 18(3): 33-37.
SHU Qingtai, TANG Shouzheng. The status and trend of international forest resources monitoring [J]. World Forestry Research, 2005, 18(3): 33-37. (in Chinese)
- [15] 沙琢. 加拿大森林资源清查方法[J]. 林业资源管理, 1979(4): 46-50.
SHA Zhuo. Canadian forest resource inventory method [J]. Forest Resource Management, 1979(4): 46-50. (in Chinese)
- [16] 马茂江,张文,万国礼. 德国森林资源调查与监测对我国的启示[J]. 世界林业研究, 2008, 21(2): 9-10.
MA Maojiang, ZHANG Wen, WAN Guoli. The revelation of forestry resource monitoring and inventory contrasted Germany with China [J]. World Forestry Research, 2008, 21(2): 9-10. (in Chinese)
- [17] 李云,陈晓,张英团. 美国、德国、法国和日本森林资源调查体系对我国森林资源调查与监测的启示[J]. 林业建设, 2016(1): 1-9.
LI Yun, CHEN Xiao, ZHANG Yingtuan. Implications of forest resource survey systems in the United States, Germany, France and Japan on forest resource survey and monitoring in China [J]. Forestry Construction, 2016(1): 1-9. (in Chinese)

- [20] BRUUN S, ELZAHERY T, JENSEN L. Carbon sequestration with biochar-stability and effect on decomposition of soil organic matter [C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, 6(24):242011.
- [21] TRYON E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils [J]. Ecological Monographs, 1948, 18(1):81-115.
- [22] BROCKHOFF S R, CHRISTIANS N E, KILLOM R J, et al. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar [J]. Agronomy Journal, 2010, 102(6):1627-1631.
- [23] 田丹, 屈忠义, 李波, 等. 生物质炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 135-137.
TIAN Dan, QU Zhongyi, LI Bo, et al. Influence of biochar on sandy soil hydraulic characteristic parameters and moisture holding properties [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3):135-137. (in Chinese)
- [24] 李品芳, 杨永利, 兰天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(7):149-156.
LI Pinfang, YANG Yongli, LAN Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7):149-156. (in Chinese)
- [25] 程珊珊, 李瑞利, 石福臣. 应用耐盐植物改良滨海盐渍土的研究 [C] // 2015 年中国环境科学学会年会论文集, 2015: 4418-4424.
- [26] 刘建立, 徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线: 分形模型的应用 [J]. 土壤学报, 2003, 40(1):46-52.
LIU Jianli, XU Shaohui. Figuring soil water characteristic curve based on particle size distribution data: application of fractal models [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(1):46-52. (in Chinese)
- [27] KATUWAL S, MOLDRUP P, LAMANDE M, et al. Effects of CT number derived matrix density on preferential flow and transport in a macroporous agricultural soil [J]. Vadose Zone Journal, 2015, 14(7):1-13.
- [28] 程亚南. 土壤孔隙结构的微观模拟 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
CHENG Ya'nan. Micro-simulation of soil pore structure [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [29] PERIARD Y, GUMIERE S J, LONG B, et al. Use of X-ray CT scan to characterize the evolution of the hydraulic properties of a soil under drainage conditions [J]. Geoderma, 2016, 279:22-30.

(上接第 217 页)

- [18] 雷相东, 洪玲霞, 陆元昌, 等. 国家级森林资源清查地面样地设计 [J]. 世界林业研究, 2008, 21(4): 36-40.
LEI Xiangdong, HONG Lingxia, LU Yuanchang, et al. Revelation on forestry resource inventory and monitoring contrasted the United States, France, Germany and Japan with China 2008 [J]. World Forestry Research, 2008, 21(4): 36-40. (in Chinese)
- [19] 邓成, 梁志斌. 国内外森林资源调查对比分析 [J]. 林业资源管理, 2012(5): 13-17.
DENG Cheng, LIANG Zhibin. The comparative analysis on forest resources inventories of China and other countries [J]. Forest Resource Management, 2012(5): 13-17. (in Chinese)
- [20] 叶荣华. 年度森林资源清查: 美国的经验与借鉴 [J]. 林业资源管理, 2013(4): 1-4, 10.
YE Ronghua. Annual forest inventory: US experience and lessons [J]. Forest Resource Management, 2013(4): 1-4, 10. (in Chinese)
- [21] FOWLER G W, 唐宗楨. 森林边界效应引起的固定面积圆形样地的统计偏差 [J]. 林业资源管理, 1982(4): 51-56.
FOWLER G W, TANG Zongzhen. Statistical deviation of fixed area circular plot caused by forest boundary effect [J]. Forest Resource Management, 1982(4): 51-56. (in Chinese)
- [22] 姜文军, 那海豹. 对控制样地调查采用圆形调查方法优越性的讨论 [J]. 林业勘查设计, 2004(2): 42.
JIANG Wenjun, NA Haibao. Discussion on the advantages of circular survey method in control sample survey [J]. Forest Exploration Design, 2004(2): 42. (in Chinese)
- [23] 李茂深. 群状抽样在森林资源调查中的应用 [J]. 林业资源管理, 1987(3): 42-46.
LI Maoshen. Application of cluster sampling in forest resource survey [J]. Forest Resource Management, 1987(3): 42-46. (in Chinese)
- [24] 王海宾, 邓华锋, 程志楚, 等. 基于 3S 的森林植被面积空间抽样方法 [J]. 森林与环境学报, 2015, 35(1): 74-80.
WANG Haibin, DENG Huafeng, CHENG Zhichu, et al. Study on forest vegetation area spatial sampling method based on 3S [J]. Journal of Forest and Environment, 2015, 35(1): 74-80. (in Chinese)
- [25] 李云霄, 彭道黎, 何彦然, 等. 基于多阶抽样的林地蓄积量估测方法——以三峡库区为例 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(5): 130-133.
LI Yunxiao, PENG Daoli, HE Yanran, et al. Estimating method of the forest volume based on multi-stage sampling—taking Three Gorges Reservoir area as an example [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(5): 130-133. (in Chinese)
- [26] TOMTER S M, KULIESIS A, GSCHWANTNER T. Annual volume increment of the European forests—description and evaluation of the national methods used [J]. Annals of Forest Science, 2016, 73(4): 849-856.