

长白山露水河林区乔木层生物量及生产力研究

王亮¹, 彭琦云¹, 耿少波²

(1. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 2. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 长春 130021)

摘要:基于长白山露水河林区 2003 年和 2013 年两次森林资源规划设计调查中固定样地资料, 利用相对生长法, 对长白山露水河林区各林分类型的乔木层生物量和生产力进行了研究, 结果表明: 长白山露水河林区各林分类型乔木层生物量平均为 175.07 t/hm², 其中天然林平均乔木层生物量要高于人工林。天然林中针叶树种和慢阔类树种积累生物量的能力较强, 而人工林中以人工红松林的乔木层生物量最高。半数以上林分类型随着林龄的增长, 乔木层生物量逐步升高; 其他林分类型变化趋势不一。长白山露水河林区各林分类型的乔木层生产力平均 5.00 t/(hm²·a), 总体看来, 人工林的生产力比天然林高。人工林中乔木层生产力最高的是人工红松林, 这与人为抚育有关, 而天然林中以针叶混交林乔木层生产力最高。

关键词:生物量; 生产力; 林分类型; 林龄

中图分类号:S718.55⁺6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0277-05

Study on Tree Layer Biomass and Productivity in Forest in Lushihe Forest Bureau of Changbai Mountains

WANG Liang¹, PENG Qiyun¹, GEN Shaobo²

(1. *Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China*; 2. *China Power Engineering Consulting (Group) Corporation Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130021, China*)

Abstract: Based on the forest management inventories in Lushihe Forest Bureau of Changbai Mountains in 2003 and 2013, and by using relative growth method, we analyzed the biomass and productivity of various forest types in Lushihe Forest Bureau. The results showed that the average of biomass was 175.07 t/hm², and the natural forest biomass was higher than the plantations. Conifer species and the slow accumulation of broad tree species in natural forest have strong capabilities to yield biomass, while biomass of artificial Korean pine forest is the highest, which is on the red pine plantation. With the growth of different types of forest age of stand, biomass trend was different. With age increase of more than half of the growth forest types, biomass gradually increased; other forest types changed irregularly. Average productivity of all forest types in Lushihe Forest Bureau was 5.00 t/(hm²·a), and the natural forest biomass was lower than the plantations. The most productive plantation is artificial Korean pine forest, which is related to nursing, while the productivity of natural coniferous forest is the highest.

Keywords: biomass; productivity; forest age; stand type

生物量和生产力分别是生态系统积累的有机质总量和能力, 是维系生态系统正常运转的能量基础和物质来源^[1]。生物量的测算方法主要有相对生长法和收获法, 以相对生长法应用比较广泛; 而生产力的测算方法主要有树干解析法、相对生长法、比值法和气体交换法, 以前两种方法应用较多^[1-3]。国内对生物量和乔木层生产力的研究很多^[2-9], 但是运用森林资源规划设计调查固定样地数据, 对全局所有林分类型不同林龄的乔木层生物量和生产力进行的研究尚

未见于报道。

长白山林区的生物量和生产力在我国森林总生物量和生产力的构成中占重要地位^[10]。但是近四十年来频繁的森林经营活动(包括种子园经营、育苗、造林、修路、取土、施肥和病虫害防治、林参间作、林蛙养殖及森林旅游等)和采伐利用, 对该区的原始阔叶红松林破坏严重, 目前仅保存有少部分原始阔叶红松林, 大部分林地被天然次生林所代替。森林经营活动对森林的生物量和生产力产生了巨大影响^[11-12]。为

明确目前长白山林区各林分类型乔木层生物量和生产力状况,本研究选取长白山林区具有代表性的长白山露水河林区,采用相对生长法,利用两期森林资源规划设计调查中固定样地资料,以及文献中关于该地区各主要树种的乔木层生物量模型,对长白山露水河林区所有林分类型不同林龄的乔木层生物量和生产力进行研究,以确定各林分类型的乔木层生物量和生产力,以及各自随林龄的变化趋势,为将来合理的进行森林经营提供参考。林龄的划分按照《吉林省森林资源规划设计调查技术细则(2013年)》。

1 研究区概况

长白山露水河林区(42°24′—42°49′N,127°29′—128°02′E)位于吉林省抚松县境内,总经营面积121 295 km²。全局总坡向为西北向,降水多集中在7—8月,年降水量800~1 040 mm。年平均气温11.5℃,最高气温32.2℃,最低气温-44.1℃,≥10℃年积温2 200℃,海拔700~1 000 m,土壤为山地暗棕色森林土,土壤剖面发育明显,平均深度50 cm。研究区属温带大陆性气候,冬夏风向更替明显。地带性植被为阔叶红松林,林木高大茂密,郁闭度高,层次明显,结构复杂。长白山露水河林区共区划为8个林场,主要从事木材和锯材生产。1970年开始森林采伐,经营历史较短,经营措施记录清晰,迄今为止,既有未受干扰保护完好的原始阔叶红松林,又有受不同强度采伐,经不同恢复时间而形成的各种次生林。

2 研究数据与方法

本文利用相对生长法求算长白山露水河林区乔木层生物量和生产力。

数据主要来自长白山露水河林区分别于2003年和2013年森林资源规划设计调查中固定样地资料。本研究共收集有效固定样地1 116块,剔除异常标准地(包括采伐过量、新建样地等),实际用于长白山露水河林区林分类型乔木层生物量和乔木层生产力计算的标准地共计964块。

长白山露水河林区属于长白山林区,该地区的生物量模型很多,利用现有的生物量模型作为长白山露水河林区林木的生物量模型^[13-17]。其中地下生物量的测定是一个难点。可根据每一树种的地上生物量(T)与地下生物量(R)之比,记作 T/R 。根据 T/R ,由地上生物量求算地下生物量。对于红松(*Pinus koraiensis*)、色树(*Acer mono Maxim*)、椴树(*Tilia tuan*)、柞树(*Quercus palustris*)、水曲柳(*Fraxinus manschurica*)等应用徐振帮等^[13]关于长白山阔叶

红松林几种主要树种的生物量比进行推算:各树种 T/R 如下:红松为31:10,色树为62.3:10,椴树为42.5:10,柞树 R 为45.5:10,水曲柳为58.8:10。对于榆树(*Ulmus pumila L.*)、樟子松(*Pinus sylvestris var*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、云杉(*Picea asperata*)、枫桦(*Betula costata Trautv.*)、臭松(*Abies nephrolepis*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄菠萝(*Phellodendron amurense Rupr.*)等树根生物量通过查阅相关资料^[13-17]获得。各树种生物量回归方程见表1:

3 结果与分析

3.1 长白山露水河林区不同林分类型乔木层生物量

长白山露水河林区各林分类型乔木层生物量在58.77~319.17 t/hm²,平均175.07 t/hm²,这与其他学者^[1,12,14,18]所得结果相吻合(表2)。总体看来,天然林平均乔木层生物量(200.03 t/hm²)要高于人工林平均乔木层生物量(136.49 t/hm²),主要是因为人工林林龄要低于天然林林龄,虽然人工林乔木层生产力比天然林高(见表3),但是人工林乔木层生物量积累的时间不够,所以总乔木层生物量要低于天然林。天然林中云杉林和针叶混交林乔木层生物量最高,柞树林和枫桦林次之,说明天然林中针叶树种和慢阔类树种积累乔木层生物量的能力较强。而人工林中以人工红松林的乔木层生物量最高,且比红松天然林乔木层生物量要高。这与当地对人工红松林的人为抚育有关,通过实地调查发现,红松作为当地主要经济树种(主要为出产松籽),人为干扰强烈,林下几乎没有灌草,林木极少被采伐,这对林地红松林乔木层生物量的积累有促进作用。

不同林分类型随林龄的增长,其乔木层生物量变化趋势也不相同。从图1A中可以看出,白桦林、胡桃楸林、落叶松林、云杉林、针阔混交林、阔叶混交林、水曲柳林、柞树林、人工针阔混交林和人工落叶松林等随着林龄的增长,乔木层生物量逐步升高。其中,云杉林乔木层生物量随着林龄的增长上升的幅度最大,表现出良好的乔木层生物量积累能力。其他林分类型生物量随林龄的增长,变化趋势不一。观察图1B可以发现:针叶混交林随着林龄的增长,乔木层生物量反而逐渐降低,通过实地调查我们认为这与采伐和盗采活动有关,采伐严重影响了针叶混交林乔木层生物量的积累;红松林乔木层生物量表现为先降低再逐步升高的现象,红松幼龄林内林木密度较大,经过红松的自疏作用,红松中林龄乔木层生物量急剧下降,随后稳步上升,所以,红松中龄林的乔木密度可以作为红松合理植苗的依据。椴树林、杨树林、人工杨

树林、人工阔叶混交林乔木层生物量随林龄变化趋势 成熟林到过熟林,乔木层生物量有所下降,与榆树过没有一定规律,这与当地的采伐活动有关。榆树林从 熟林林木过多枯死有关。

表 1 各树种生物量回归方程

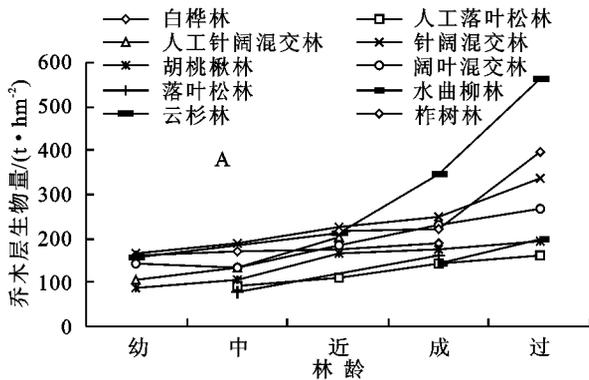
| 树种 | 乔木层生物量回归方程 | 相关系数 | 出处 |
|-----|--|------|-----------|
| 红松 | $W_s = 0.0417D^{2.579}$ | 0.99 | 徐振邦(1985) |
| | $W_b = 0.0178D^{2.417}$ | 0.92 | |
| | $W_l = 3.7 \times 10^{-3} D^{2.282} + 3 \times 10^{-3} D^{2.207}$ | 0.96 | |
| 色树 | $W_s = 0.1355D^{2.329}$ | 0.99 | |
| | $W_b = 5 \times 10^{-5} D^{4.482} + 2.27 \times 10^{-7} D^{4.892}$ | 0.93 | |
| | $W_l = 9.17 \times 10^{-6} D^{4.307}$ | 0.98 | |
| 椴树 | $W_s = 0.098D^{2.353}$ | 0.98 | |
| | $W_b = 2.87 \times 10^{-3} D^{2.99} + 9.23 \times 10^{-5} D^{2.88}$ | 0.97 | |
| | $W_l = 0.469D^{0.714}$ | 0.92 | |
| 榆树 | $W_s = 0.0709D^{2.42}$ | 0.99 | |
| | $W_b = 4.924D^{0.976} + 0.1556D^{969}$ | 0.96 | |
| | $W_l = 1.163D^{0.64}$ | 0.99 | |
| 柞树 | $W_s = 0.0179D^{2.857}$ | 0.97 | |
| | $W_b = 1.97 \times 10^{-5} D^{4.292} + 1.34 \times 10^{-6} D^{4.08}$ | 0.89 | |
| | $W_l = 9.17 \times 10^{-6} D^{4.307}$ | 0.97 | |
| 水曲柳 | $W_s = 1.416D^{1.71}$ | 0.98 | |
| | $W_b = 1.154D^{1.549} + 1.4 \times 10^{-5} D^{3.547}$ | 0.97 | |
| | $W_l = 0.7655D^{0.886}$ | 0.93 | |
| 白桦 | $W_s = 0.0494(D^2 H)^{0.9011}$ | 0.93 | 陈传国(1983) |
| | $W_b = 0.0142(D^2 H)^{0.7686}$ | 0.93 | |
| | $W_l = 0.0109(D^2 H)^{0.6472}$ | 0.91 | |
| | $W_r = 0.011(D^2 H)^{0.9209}$ | 0.91 | |
| | $W_s = 0.2286(D^2 H)^{0.6933}$ | 0.95 | |
| 杨树 | $W_b = 0.0247(D^2 H)^{0.7378}$ | 0.93 | |
| | $W_l = 0.0108(D^2 H)^{0.8181}$ | 0.94 | |
| | $W_r = 0.1553(D^2 H)^{0.5951}$ | 0.91 | |
| 樟子松 | $W_s = 0.0134(D^2 H)^{1.0201}$ | | |
| | $W_b = 0.0105(D^2 H)^{0.7386}$ | | |
| | $W_l = 0.0181D^{1.8415}$ | | |
| 落叶松 | $W_s = 0.025(D^2 H)^{0.96}$ | | |
| | $W_b = 0.0021(D^2 H)^{0.8181}$ | | |
| | $W_l = 0.00126(D^2 H)^{0.9675}$ | | |
| 云杉 | $W_s = 0.057(D^2 H)^{2.4753}$ | | |
| | $W_b = 0.0116(D^2 H)^{2.4054}$ | | |
| | $W_l = 0.0083D^{2.3733}$ | | |
| 枫桦 | $W_s = 0.07936(D^2 H)^{0.90105}$ | | |
| | $W_b = 0.014167(D^2 H)^{0.76358}$ | | |
| | $W_l = 0.01086(D^2 H)^{0.847203}$ | | |
| 臭松 | $W_s = 0.966 \exp(-3.95 + 2.694 \ln D) + 1.069 \exp(-5.204 + 2.591 \ln D)$ | 0.98 | 汪金松(2011) |
| | $W_b = 0.993 \exp(-4.238 + 2.501 \ln D)$ | 0.97 | |
| | $W_l = 0.906 \exp(-4.245 + 2.322 \ln D)$ | 0.95 | |
| | $W_r = 0.963 \exp(-4.46 + 2.601 \ln D)$ | 0.99 | |
| 胡桃楸 | $W_s = 0.02511(D^2 H)^{0.9271}$ | | 李明泽(2011) |
| | $W_b = 0.00957(D^2 H)^{0.947}$ | | |
| | $W_l = 0.8725D^{0.2034}$ | | |
| 黄菠萝 | $W_s = 0.2286(D^2 H)^{0.6938}$ | | |
| | $W_b = 0.0247(D^2 H)^{0.7378}$ | | |
| | $W_l = 0.0108D^{0.8181}$ | | |

表 2 长白山露水河林区各林分类型乔木层生物量

| 林分类型 | 乔木层生物量/ ($t \cdot hm^{-2}$) | 林分类型 | 乔木层生物量/ ($t \cdot hm^{-2}$) |
|---------|----------------------------------|-------|----------------------------------|
| 人工水曲柳林 | 58.77 | 白桦林 | 174.14 |
| 榆树林 | 85.26 | 人工云杉林 | 178.44 |
| 人工针叶混交林 | 93.79 | 椴树林 | 185.20 |
| 人工杨树林 | 107.77 | 阔叶混交林 | 191.70 |
| 人工胡桃楸林 | 110.57 | 红松林 | 201.92 |
| 落叶松林 | 120.32 | 臭松林 | 210.99 |
| 杨树林 | 123.81 | 人工红松林 | 219.44 |
| 人工落叶松林 | 125.94 | 色树林 | 227.98 |
| 人工阔叶混交林 | 133.81 | 针阔混交林 | 233.11 |
| 其他阔叶林 | 136.30 | 枫桦林 | 277.87 |
| 胡桃楸林 | 146.14 | 柞树林 | 278.05 |
| 人工针阔混交林 | 146.58 | 针叶混交林 | 316.82 |
| 人工樟子松林 | 161.13 | 云杉林 | 319.17 |
| 人工白桦林 | 165.20 | 平均 | 175.07 |
| 水曲柳林 | 171.77 | | |

3.2 长白山露水河林区不同林分类型乔木层生产力

长白山露水河林区各林分类型乔木层生产力在



1.84~14.32 $t/(hm^2 \cdot a)$, 平均 5.00 $t/(hm^2 \cdot a)$, 这与其他研究所得结果^[1,12-13,18-22]吻合。从表 3 可以看出,人工林的乔木层生产力(6.23 $t/(hm^2 \cdot a)$)比天然林(4.21 $t/(hm^2 \cdot a)$)高,但是由于人工林林龄较短,所以其乔木层生物量比天然林要低(表 2)。人工林中乔木层生产力最高的是人工红松林,这与人为抚育有关,其次是人工云杉林,说明云杉较为适宜在当地生长,从固碳释氧方面来讲,当地人工林栽植云杉较合适。而天然林中以针叶混交林乔木层生产力最高,所以当地较适合针叶树种的生长。而白桦林的乔木层生产力无论是人工林还是天然林都仅次于针叶林,也是当地进行固碳释氧造林的优良树种,另外,白桦还可作为先锋树种,可以在受严重干扰立地条件下较好的生长,作为林分进一步演替的能量基础和物质来源。榆树林的乔木层生产力最低,在长白山露水河林区,榆树林仅存在两个林龄,分别是成熟林和过熟林,其乔木层生产力分别是 2.75 $t/(hm^2 \cdot a)$ 和 0.93 $t/(hm^2 \cdot a)$,过熟林尤为低,说明榆树过熟林的固碳释氧能力较弱,只有较低的生产能力。

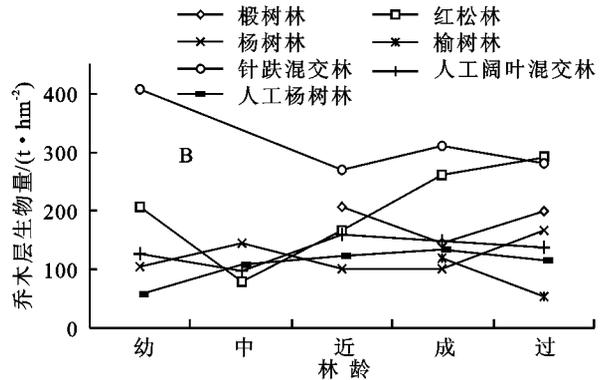


图 1 不同林分类型乔木层生物量随林龄变化趋势

表 3 长白山露水河林区各林分类型乔木层生产力

| 林分类型 | 乔木层生产力/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) | 林分类型 | 乔木层生产力/ ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$) |
|---------|---|---------|---|
| 榆树林 | 1.84 | 人工胡桃楸林 | 4.76 |
| 落叶松林 | 2.75 | 针阔混交林 | 4.80 |
| 水曲柳林 | 2.94 | 柞树林 | 4.88 |
| 其他阔叶林 | 3.03 | 云杉林 | 5.32 |
| 椴树林 | 3.20 | 臭松林 | 5.40 |
| 人工水曲柳林 | 3.24 | 人工落叶松林 | 5.48 |
| 红松林 | 3.53 | 人工阔叶混交林 | 5.53 |
| 人工樟子松林 | 3.89 | 白桦林 | 5.93 |
| 枫桦林 | 4.03 | 人工针阔混交林 | 5.99 |
| 杨树林 | 4.03 | 针叶混交林 | 6.48 |
| 色树林 | 4.17 | 人工白桦林 | 6.86 |
| 人工针叶混交林 | 4.19 | 人工云杉林 | 9.83 |
| 人工杨树林 | 4.45 | 人工红松林 | 14.32 |
| 胡桃楸林 | 4.61 | 平均 | 5.00 |
| 阔叶混交林 | 4.66 | | |

长白山露水河林区东与白河林区相邻,两个林业局环境条件和采伐程度基本一致,郭志伟于 2003 年运用材积元法对白河林区各林分类型的生产力进行了估算,估算结果为 2.45 $t/(hm^2 \cdot a)$,与本研究结果^[5.0 $t/(hm^2 \cdot a)$]相比,材积源法对生产力的估计偏低,与本文用相对生长法计算的结果偏低约 50%。

从表 4 可以看出:各林分类型不同林龄乔木层生产力变化趋势没有一定规律,每种林分类型固有的生长模式是一方面的原因,另外,采伐活动也对其乔木层生产力造成了一定影响^[12,23]。各林分类型乔木层生产力随林龄的变化趋势中,仅柞树林、人工落叶松林和人工针阔混交林的生产力是随林龄增长逐步上升;白桦林的幼龄林和近熟林具有较高的生产力,成熟林较低,随着林龄的升高,生产力有所降低;椴树林近熟林生产力较高,成熟林最低,过熟林有所提高,这是因为椴树过熟林林隙较大,有利于其他树种的生

长,所以其生产力较成熟林开始升高;红松林成熟林生产力最高,中龄林最低;胡桃楸林和阔叶混交林生产力变化趋势不明显;落叶松林、榆树林和水曲柳林林龄发育不完整,仅有两个林龄,各自生产力都较低;杨树林中龄林生产力最高,其他林龄生产力变化不大;云杉林中成熟林拥有极高的生产力,高达 9.77 t/(hm²·a),高出平均水平约一倍,其他林龄均低于平均水平,其中幼龄林生产力最低;针阔混交林生产力变化趋势也不明显,中龄林稍高于其他林龄;针叶混交林四个林龄生产力都较高,其中幼龄林最高,为 8.18 t/(hm²·a),远高于平均水平;人工阔叶混交林中除了中龄林生产力低于平均水平外,其他林龄生产力均高于平均水平,且变化趋势不明显,其中近熟林生产力较高;人工杨树林各林龄中成熟林生产力较高,幼龄林最低。

表4 各林分类型乔木层生产力随林龄变化趋势

| 林龄 林分类型 | t/(hm ² ·a) | | | | |
|------------|------------------------|------|------|------|------|
| | 幼龄林 | 中龄林 | 近熟林 | 成熟林 | 过熟林 |
| 白桦林 | 6.78 | 5.71 | 6.36 | 4.86 | |
| 椴树林 | | | 4.38 | 1.99 | 3.23 |
| 红松林 | 3.81 | 1.85 | 3.09 | 5.18 | 3.72 |
| 胡桃楸林 | 4.65 | 4.22 | 5.15 | 4.01 | 5.03 |
| 阔叶混交林 | 4.80 | 4.75 | 4.47 | 4.67 | 4.62 |
| 落叶松林 | | 3.05 | | 2.45 | |
| 水曲柳林 | | | | 2.29 | 3.58 |
| 杨树林 | 4.01 | 4.93 | 3.61 | 3.96 | 3.63 |
| 榆树林 | | | | 2.75 | 0.93 |
| 云杉林 | 2.88 | | 4.83 | 9.77 | 3.80 |
| 针阔混交林 | 3.87 | 5.54 | 4.89 | 4.73 | 4.96 |
| 针叶混交林 | 8.18 | | 5.36 | 6.73 | 5.64 |
| 柞树林 | | | 3.98 | 4.95 | 5.69 |
| 人工阔叶混交林 | 5.79 | 4.22 | 6.66 | 5.49 | 5.50 |
| 人工落叶松林 | | 3.70 | 4.39 | 6.25 | 7.58 |
| 人工杨树林 | 2.54 | 4.68 | 5.06 | 5.56 | 4.47 |
| 人工针阔混交林 | 4.79 | 6.01 | 7.17 | | |

4 结论

森林资源规划设计调查固定样地数据详实可靠,对其有效利用可以产生事半功倍的效果。目前,利用其数据对研究区生物量和生产力进行详尽论述的研究并不多见。本研究的长白山露水河林区各林分类型乔木层生物量在 58.77~319.17 t/hm²,平均 175.07 t/hm²。与其他研究结果相比较,例如徐振邦对长白山地区林龄为 100~200 a 之间阔叶红松林的生物量研究结果为 199.9~370.2 t/hm²,姜萍利用长白山阔叶红松林 25 hm² 大样地得出的结果 294.8

t/hm²,与本文中混交林在该年龄段的生物量数据相近。说明利用森林资源规划设计调查固定样地数据对林分生物量的估算值较为真实可靠,

本研究还发现天然林平均乔木层生物量(200.03 t/hm²)要高于人工林平均乔木层生物量(136.49 t/hm²)。另外,不同林分类型随林龄的增长,其乔木层生物量变化趋势也不相同。半数林分类型随着林龄的增长,乔木层生物量逐步升高;其他林分类型变化趋势不一。长白山露水河林区各林分类型的乔木层生产力在 1.84~14.32 t/(hm²·a),平均 5.00 t/(hm²·a)。也与徐振邦对长白山地区林龄为 100~200a 阔叶红松林研究得出生产力(6.59 t/(hm²·a))相近,说明该方法的准确性较高。生产力的研究一直备受关注,目前,森林生物多样性等与生产力之间关系的研究^[24]也是热点之一。各地区森林资源规划设计调查固定样地数据都已积累多年,这对林分生产力的研究是极好的资源。

本研究还发现,人工林的乔木层生产力(6.23 t/(hm²·a))比天然林(4.21 t/(hm²·a))高。另外,本文与郭志伟运用材积源法得到的结果进行比较,发现材积源法对生产力的估计偏低,比本文用相对生长法计算的结果偏低约 50%。

总之,对森林资源规划设计调查固定样地数据的有效利用,一方面减少了科研的工作量;另一方面可以更大程度的发挥该数据的价值,建议在以后的科研中能引起足够的重视。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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):129-133.
- [3] 蔡烁. 金钩岭林场三种森林类型生物量研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.
- [4] 敬文茂,刘贤德,赵维俊. 祁连山典型林分生物量与净生产力研究[J]. 甘肃农业大学学报,2011,12(6):81-85.
- [5] 宁波. 樟子松人工林结构动态及生物量的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2007.
- [6] 安慧,上官周平. 密度对刺槐幼苗生物量及异速生长模式的影响[J]. 林业科学,2008,44(3):151-155.
- [7] 王云霓,熊伟,王彦辉. 宁夏六盘山三种针叶林初级净初级生产力年际变化及其气候因子响应[J]. 生态学报,2013,33(15):4808-4817.
- [8] 王培娟,谢东辉,张佳华. 基于过程模型的长白山自然保护区森林植被净第一性生产力空间尺度转换方法[J]. 生态学报,2007,27(8):3215-3223.
- [9] 申贵仓,张旭东,张雷. 蜀南苦竹林生态系统碳储量与碳汇能力估测[J]. 林业科学,2013,49(3):78-84.

- [9] 周云艳,陈建平,王晓梅.植物须根固土护坡的复合材料理论研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(18):103-107.
- [10] 陈丽华,余新晓,宋维峰,等.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.
- [12] 程洪,颜传盛,李建庆,等.草本植物根系的固土机制模式与力学试验研究[J].水土保持研究,2006,13(1):62-65.
- [13] 胡其志,周一鹏,肖本林,等.根土复合体的抗剪强度研究[J].湖北工业大学学报,2011,26(2):101-104.
- [14] 刘艳丽,王全九,杨婷,等.植物叶片截留特征分析[J].水土保持研究,2015,22(4):143-154.
- [15] 余冬立,刘营营,邵明安,等.黄土坡面不同植被冠层降雨截留模型模拟效果及适用性评价[J].农业工程学报,2012,28(16):115-120.
- [16] 余新晓.森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析[J].水土保持学报,1988,2(2):24-30.
- [17] 胡夏嵩,李国荣,朱海丽,等.寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J].岩土力学与工程学报,2009,28(3):613-620.
- [18] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983,109(3):335-353.
- [19] 格日乐,左志严,蒙仲举,等.杨柴根系提高土体抗剪特性的研究[J].水土保持学报,2014,28(4):72-77.
- [20] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的室内三轴试验研究[J].岩土力学,2007,18(10):2041-2045.
- [21] 冀晓东,陈丽华,张超波.林木根系对土壤的增强作用与机理分析[J].中国水土保持,2009(10):19-21.
- [22] Wu T H, Beal P E, Lan C. In-situ shear test of soil-root systems[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988,114(12):1376-1394.
- [23] 周云艳,陈建平,杨倩,等.植物根系固土护坡效应的原位测定[J].北京林业大学学报,2010,32(6):66-70.
- [24] Micheli E R, Kirchner J W. Effects of wet meadow riparian vegetation on streambank erosion. 2. Measurements of vegetated bank strength and consequences for failure mechanics [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002,27(7):687-697.
- [25] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的护坡机理及强度准则试验研究[J].中南公路工程,2006,31(2):14-17.
- [26] 赵惇廉.西宁市山地崩塌、滑坡灾害及其防治对策[J].青海环境,2004,4(1):29-31.
- [27] 余芹芹,乔娜,卢海静,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(Z1):3216-3223.
- [28] 余芹芹,胡夏嵩,李国荣,等.寒旱环境灌木植物根—土复合体强度模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):1020-1031.
- [29] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区草本与灌木植物根—土相互作用力学机理及其模型研究[J].中国水土保持,2013(7):37-41.
- [30] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.
- [31] 孟高头.土体原位测试机理、方法及其工程应用[M].北京:地质出版社,1997.

(上接第281页)

- [10] 杨金明,范文义,李明泽,等.长白山林区森林生物量变化定量驱动分析[J].应用生态学报,2011,22(1):47-52.
- [11] 杨丽韞,罗天祥,罗松涛.长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及其次生林细根生物量与垂直分布特征[J].生态学报,2007,27(9):3609-3618.
- [12] 齐麟,与大炮,周旺明,等.采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响[J].生态学报,2013,33(10):3065-3073.
- [13] 徐振邦,李昕,戴洪才.长白山阔叶红松林生物生产量的研究[J].森林生态系统研究,1985(5):33-48.
- [14] 姜萍,叶吉,吴刚.长白山阔叶红松林大样地木本植物组成及主要树种的生物量[J].北京林业大学学报,2005,27:112-115.
- [15] 李明泽.东北林区森林生物量遥感估算及分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [16] 汪金松,张春雨,范秀华,等.臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J].生态学报,2011,31(14):3918-3927.
- [17] 董利虎.黑龙江省主要树种相容性生物量模型研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2012.
- [18] 邢邵朋.吉林森林[M].长春:吉林科学技术出版社,1988.
- [19] 王淼,关德新,王跃思,等.长白山红松针阔叶混交林生态系统生产力的估算[J].中国科学: D 辑,2006,36(A01):70-82.
- [20] 赵俊卉.长白山云冷杉混交林生长模型的研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [21] 唐凤德,韩士杰,张军辉.长白山阔叶红松林生态系统碳动态及其对气候变化的响应[J].应用生态学报,2009,20(6):1285-1292.
- [22] 闫平,冯晓川.原始阔叶红松林碳素储量及空间分布[J].东北林业大学学报,2006,34(5):23-25.
- [23] 谷会岩,代力民.人为干扰对长白山红松针阔叶混交林粗木质残体的影响[J].林业科学,2006,42(10):1-5.
- [24] 方升佐,田野.人工林生态系统生物多样性与生产力的关系[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(4):1-5