

# 马尾松人工林采伐剩余物生物量及养分贮量

李 华<sup>1,2</sup> 郑 路<sup>1,2\*</sup> 李朝英<sup>1,2</sup> 卢立华<sup>1,2</sup> 明安刚<sup>1,2</sup> 农 友<sup>1,2</sup> 孙冬婧<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600; <sup>2</sup>广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西凭祥 532600)

**摘 要** 研究马尾松人工林采伐剩余物各组分生物量和养分贮量分配特征, 可为其地力维护研究提供基础数据, 为人工林的科学经营和生态管理提供理论依据。在广西南部马尾松人工林皆伐林地采用样方收获法获取采伐剩余物各组分生物量, 测定其养分含量并计算养分贮量。结果表明: 马尾松人工纯林皆伐后林地采伐剩余物生物量为  $39.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 碳、氮、磷、钾、钙和镁贮量分别为 18303、101.2、8.3、73.4、96.0 和  $24.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同组分间比较, 生物量和碳贮量均是小枝最高(分别占总量的 25.3% 和 23.3%), 其次是大枝(21.7% 和 21.1%) 和主根(17.1% 和 18.5%), 粗根(11.5% 和 12.4%) 和叶(9.2% 和 9.1%) 也较高; 氮、磷、钾、钙和镁贮量排在前三位的组分均是叶、小枝和大枝(三者之和分别占各养分总量的 70.5%、76.5%、72.2%、76.2% 和 72.6%), 其次为主根和粗根; 而中根、小根和细根无论是生物量还是各养分贮量均很低。马尾松人工林采伐剩余物的生物量和养分贮量庞大, 尤其是残留在地表的枝和叶, 因此保留采伐剩余物的林地更新方式对于维护其林地生产力具有重要意义。

**关键词** 南亚热带; 采伐迹地; 生物量方程; 养分含量

**Biomass and nutrient storage of logging residues of *Pinus massoniana* plantation.** LI Hua<sup>1,2</sup>, ZHENG Lu<sup>1,2\*</sup>, LI Zhao-ying<sup>1,2</sup>, LU Li-hua<sup>1,2</sup>, MING An-gang<sup>1,2</sup>, NONG You<sup>1,2</sup>, SUN Dong-jing<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, Guangxi, China; <sup>2</sup>Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, Guangxi, China).

**Abstract:** To understand soil productivity maintenance and provide reliable scientific basis for plantation management, biomass and nutrient allocation in different components of logging residues were examined in the clearcutting land of a 31-year-old *Pinus massoniana* plantation. We measured biomass and nutrient concentration of logging residue's components, and then calculated nutrient storage. The results showed that the total biomass of logging residues was  $39.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the storage of carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium was 18303, 101.2, 8.3, 73.4, 96.0 and  $24.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , respectively. Among different components, the biomass and carbon storage were in the order of sprig (accounting for 25.3% and 23.3% of total biomass and carbon storage, respectively) > branch (21.7% and 21.1%) and taproot (17.1% and 18.5%) > coarse root (11.5% and 12.4%) and leaf (9.2% and 9.1%). Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium were mainly stored in sprig, branch, and leaf (the sum of those components were 70.5%, 76.5%, 72.2%, 76.2% and 72.6%, respectively), followed by taproot and coarse root. The middle-sized root, small root and fine root had the lowest biomass and nutrient storage. The biomass and nutrient storage of logging residues were enormous, especially in branch and leaf. Therefore, retaining logging residues during forest regeneration is important for forest productivity maintenance.

**Key words:** subtropical China; clearcutting land; biomass equation; nutrient concentration.

我国人工林发展迅速,面积居世界首位,在生态功能维护和经济发展中发挥着重大的作用,并随着时间的推移,其地位和作用还将不断提升(国家林业局森林资源管理司,2010)。但由于缺乏科学的理论指导和实用的可持续经营技术,过分追求经济利益,致使部分人工林出现较为明显的地力衰退,导致长期生产力降低,阻碍人工林的可持续经营和生态服务功能的发挥。

采伐剩余物是森林采伐后,在采伐林地上残留下来的不适于加工为经济材、薪炭材和小规格材的所有废弃物(高金铎,1982)。我国南方人工林经营中仍然沿用传统的皆伐后“炼山”(人为放火烧掉采伐剩余物和地被物)的更新造林方式。已有研究表明,与炼山相比,保留采伐剩余物能显著减少林地水、土、肥的流失,且在皆伐后的前两年效果最好(马祥庆等,1996)。分析认为,一方面树木采伐后,其枝、叶、皮等采伐剩余物堆积在土层表面,在地表形成一个保护层,可减弱雨滴对土壤颗粒的分散力,同时增加地表糙率,促进降水入渗,并降低流量的挟沙能力(Facelli *et al.*, 1991; 马祥庆等, 1996; 高光耀等, 2013; 李强等, 2014); 另一方面深入土壤的伐根对土壤颗粒的机械缠绕和网结作用,可防止土体内团聚体雨水分散,下移堵塞土壤大空隙,而且当根系腐烂后,根系生长所形成的大空隙便留在土体内,亦可增加土壤的入渗性能(王力等, 2005)。此外,保留采伐剩余物还可为土壤生物提供食物,而生物活动(如白蚁、蚂蚁、蚯蚓、蜚蠊、蜘蛛等)也能在土壤内形成大空隙,增加土壤入渗(Sarr *et al.*, 2001; Harden *et al.*, 2003)。保留采伐剩余物不仅能增加土壤入渗,减少林地水土肥的流失,还能显著增加土壤表层(0~10 cm)有机碳含量(吴君君等, 2015),提高土壤碱解氮和有效钾含量(薛立等, 2005); 增加土壤可溶性有机碳、可溶性有机氮含量,提高土壤碳矿化速率(吴波波等, 2014),降低土壤容重,提高pH值,有利于维护土壤肥力和促进林木生长(何宗明等, 2006)。但以上报道仅研究了保留采伐剩余物产生的作用和功能,而有关采伐剩余物的生物量和养分含量等的研究较少。为此,本研究以马尾松人工林皆伐迹地残留的采伐剩余物为研究对象,开展了马尾松采伐剩余物生物量、养分含量和贮量的研究,为采伐剩余物的分解及地力维护研究提供基础数据,为人工林的科学经营和生态管理提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站热林中心站点,地理位置为106°48'12" E, 22°05'00" N,属南亚热带季风气候。其干湿季节明显,年均温度21.0℃,≥10℃积温7600℃,年均降水量1400 mm,多集中在4—9月。研究区为低山丘陵地貌,坡度20°~30°,海拔260 m,土壤为赤红壤,土层厚度大于100 cm。

调查样地面积15.8 hm<sup>2</sup>。其经营历史:于1982年2月全面整地后,挖穴定植一年生马尾松纯林(当地种源),初值密度3000株·hm<sup>-2</sup>,分别在1989、1993、1997和2002年进行透光伐和3次生长伐,保留密度为450株·hm<sup>-2</sup>,从2003年开始采割松脂,连续割脂至2013年,并在2013年夏秋季皆伐。皆伐前马尾松林郁闭度为0.7,平均树高15.2 m,平均胸径25.4 cm,林分密度为442株·hm<sup>-2</sup>。皆伐后伐根保留高度为4.2~8.8 cm,平均为5.1 cm。

### 1.2 研究方法

样地设置及采样方法:在马尾松人工林皆伐迹地,沿等高线S形布点取样,样方大小为5 m×5 m,10个重复。收集样方内除伐根外的所有采伐剩余物,分别叶、小枝(直径在25 mm以下)、大枝(直径在25 mm以上)和树皮称湿重,取样后装入塑封袋内带回实验室称量鲜重,在90℃下杀青30 min,再在70℃下烘干至恒重,称其干重,计算含水率,由此推算单位面积上残留在地表的采伐剩余物生物量。另外随机设置5个10 m×10 m样方,调查样方内所有根桩直径、高度和数量。样方内所有伐根,采用分层挖掘法,根据林木的冠幅和现存密度以及前期调查,将根系挖掘的水平范围确定为以树干基部为中心,半径为1.5 m,垂直深度1 m。每挖掘0.2 m的深度,分别将伐根按根桩(伐根地表以上的部分)、主根和各级侧根称重并取样,侧根按照细根(根径小于2 mm)、小根(根径2~5 mm)、中根(根径5~20 mm)、大根(根径20~50 mm)和粗根(根径大于50 mm)进行分级。样品带回实验室称量鲜重,90℃下杀青30 min,再在70℃下烘干至恒重,称干重,计算含水率,由此推算单位面积伐根生物量。并在调查伐桩直径(平均值为29.4 cm,最大值为38.0 cm,最小值为20.0 cm)和伐根数量(21株)的基础上,以伐根各组分生物量( $W$ :kg)为因变量,以伐桩直径( $D$ :

cm) 为自变量,采用数学模型对马尾松常规经营林分皆伐后单株伐根各组分生物量与伐桩直径进行拟合,发现幂函数模型相关系数最大, $F$  检验值也最大。故以幂函数模型拟合,结果见表 1。

养分测定方法:所有样品粉碎后,采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定有机碳含量;采用浓硫酸双氧水消煮法消煮样品后,凯氏定氮法测定氮含量,钒钼黄比色法测定磷含量,火焰光度计法测定钾含量。植物样品经干灰化后用稀盐酸煮沸,用原子吸收分光光度计法测定钙和镁含量(鲍士旦,2000)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 19.0 统计软件包进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和回归分析,不同组分间多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 马尾松采伐剩余物生物量

2.1.1 采伐剩余物各组分生物量 从图 1 可以看出,亚热带 31 年生马尾松纯林皆伐后,采伐剩余物总量为  $39.07\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其中残留在地表的生物量(叶、枝、皮)有  $23.63\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占总生物量的60.5%,是伐根生物量 1.53 倍。采伐剩余物各组分生物量由大到小的排列顺序为:小枝>大枝>主根>粗根、叶>根桩、皮、大根>中根、小根、细根。其中小枝生物量高达  $9.88\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、占总生物量 25.3%,大枝为  $8.48\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、21.7%,主根  $6.70\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、17.1%,粗根  $4.49\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、11.5%,叶  $3.59\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、9.2%,根桩  $2.42\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、6.1%,皮  $1.67\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、4.3%,大根1.40

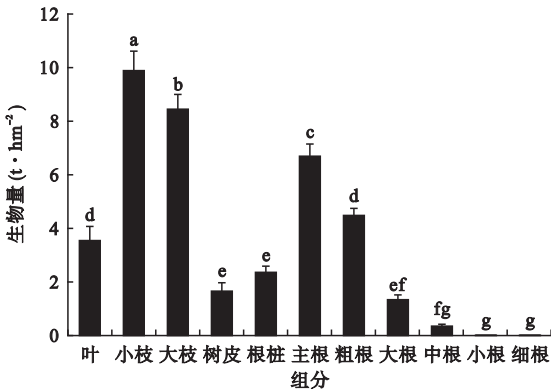


图 1 采伐剩余物不同组分生物量  
Fig.1 Biomass of logging residue constituents of *Pinus massoniana* plantation  
不同字母表示采伐剩余物不同组分间生物量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、3.6%。而中根、小根和细根生物量之和仅为  $0.42\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,仅占总生物量的 1.1%,尤其是小根和细根,其生物量每公顷仅几十千克,两者之和仅占总生物量的 0.1%。

2.1.2 伐根各组分生物量与伐桩直径的相关关系

以伐根各组分生物量( $W$ )为因变量,以伐桩直径( $D$ )为自变量,采用数学模型拟合,幂函数模型拟合的相关系数和  $F$  值均最大,其拟合结果见表 1。从表 1 可知,当地常规经营的马尾松纯林皆伐后,单株伐根各组分生物量与伐桩直径密切相关。其中根桩、主根、粗根和整个伐根生物量与伐桩直径所拟合的 4 个回归模型的相关系数介于 0.76~0.89,大根和中根拟合模型的相关系数分别为 0.59 和 0.58,均高于自由度为 19 的极显著相关系数的临界值(0.55),其回归模型的  $F$  统计量值介于 9.53~69.72,均高于  $F_{0.01(1,19)}$  的临界值(8.18);小根和细根拟合模型的相关系数分别为 0.52 和 0.54,其显著性仅达到显著相关( $r_{0.05}=0.43$ ), $F$  值也高于  $F_{0.05}$  的临界值(4.38)。说明除小根和细根外,其他伐根各组分及伐根总生物量的拟合精度均较高,其生物量均可用幂函数拟合。

2.2 马尾松采伐剩余物的养分含量

马尾松采伐剩余物不同组分间养分含量差异显著(表 2),各组分碳含量介于  $414\sim 506\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,除细根外,伐根的各组分碳含量均显著高于叶、大枝等地上部分,而小枝、皮和细根的碳含量最低。各组分氮含量介于  $1.28\sim 11.53\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,不同组分间差异达近 10 倍。其中叶的氮含量远高于其他组分,其次是细根,小根和皮亦有较高的氮含量,其余各组分的氮含量则无显著差异,在  $1.50\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右。磷含量依然是叶最高,细根次之,小枝和小根含量也较高,大枝、皮、中根、粗根和主根的磷含量较低,均在  $0.15\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右,而大根和根桩的磷含量最低。各组分

表 1 单株伐根各组分生物量与伐桩直径的相互关系  
Table 1 Correlation between the biomass of stump constituents and stump diameter in single tree

| 伐根组分 | 回归模型                         | 相关系数 | df | F     | 显著性  |
|------|------------------------------|------|----|-------|------|
| 根桩   | $W=0.0013 \times D^{2.5039}$ | 0.77 | 19 | 28.20 | 0.00 |
| 主根   | $W=0.0079 \times D^{2.2646}$ | 0.76 | 19 | 25.37 | 0.00 |
| 粗根   | $W=8E-05 \times D^{3.4999}$  | 0.89 | 19 | 69.72 | 0.00 |
| 大根   | $W=0.018 \times D^{1.564}$   | 0.59 | 19 | 10.04 | 0.01 |
| 中根   | $W=0.0025 \times D^{1.7496}$ | 0.58 | 19 | 9.53  | 0.01 |
| 小根   | $W=0.0007 \times D^{1.3963}$ | 0.52 | 19 | 7.03  | 0.02 |
| 细根   | $W=0.0001 \times D^{1.534}$  | 0.54 | 19 | 7.67  | 0.01 |
| 伐根   | $W=0.0104 \times D^{2.4357}$ | 0.85 | 19 | 47.69 | 0.00 |

钾含量介于 0.57~4.97 g · kg<sup>-1</sup>,其中叶和细根钾含量最高,其次是小根,中根、粗根和枝也较高,皮和大根次之,主根和根桩最低。钙含量则以皮最高,其次是小枝、细根和叶,根桩、主根、粗根和大根的钙含量最低,在 0.95 g · kg<sup>-1</sup>左右。镁含量依然以叶最高,细根次之,小根、中根和小枝镁含量也较高,根桩、主根和大根最低。由表 2 可看出,在马尾松采伐剩余物中,除钙含量外,叶中其他矿质养分含量均显著高于枝、皮及伐根等组分,与叶相反,根桩的氮、磷、钾、钙和镁含量均最低,主根、粗根和大根与根桩相似,也具有低的矿质元素含量和高的碳含量,但细根具有较高的矿质元素含量和低的碳含量。

2.3 马尾松采伐剩余物的养分贮量

马尾松人工林皆伐后,留在林地的采伐剩余物贮存着大量的碳和矿质元素。由表 3 可知,采伐剩

余物中碳的总贮量为 18303 kg · hm<sup>-2</sup>,其中残留在地表的枝、叶和皮中的碳贮量为 10507 kg · hm<sup>-2</sup>,占总量的 57.4%,是伐根的 1.3 倍;氮素总贮量为 101.2 kg · hm<sup>-2</sup>,残留在地表的贮量为 77.3 kg · hm<sup>-2</sup>,占总量的 76.4%,是伐根的 3.2 倍;磷素总贮量为 8.3 kg · hm<sup>-2</sup>,残留在地表的贮量为 6.6 kg · hm<sup>-2</sup>,占总量的 79.6%,是伐根的 3.9 倍;钾素总贮量为 73.4 kg · hm<sup>-2</sup>,残留在地表的贮量为 55.1 kg · hm<sup>-2</sup>,占总量的 75.1%,是伐根的 3.0 倍;钙素总贮量为 96.0 kg · hm<sup>-2</sup>,残留在地表的贮量为 80.8 kg · hm<sup>-2</sup>,占总量的 84.2%,是伐根的 5.3 倍;镁素总贮量为 24.7 kg · hm<sup>-2</sup>,残留在地表的贮量为 18.9 kg · hm<sup>-2</sup>,占总量的 76.3%,是伐根的 3.2 倍。

对表 3 分析发现,碳贮量各组分由高到低的排列顺序为:小枝>大枝、主根>粗根>叶、根桩>大根、

表 2 马尾松采伐剩余物各组分养分含量 (g · kg<sup>-1</sup>)  
Table 2 Nutrient contents in logging residue constituents of *Pinus massoniana* plantation

| 组分 | C               | N            | P              | K           | Ca           | Mg            |
|----|-----------------|--------------|----------------|-------------|--------------|---------------|
| 叶  | 468.42±11.34 bc | 11.53±1.47 a | 0.69±0.09 a    | 4.97±0.15 a | 3.03±0.30 c  | 1.48±0.09 a   |
| 皮  | 420.40±22.51 d  | 3.61±0.85 c  | 0.16±0.03 def  | 1.35±0.43 d | 4.72±1.64 a  | 0.54±0.09 de  |
| 小枝 | 430.40±21.78 d  | 1.54±0.25 d  | 0.23±0.05 c    | 1.92±0.48 c | 4.10±1.24 ab | 0.72±0.17 cd  |
| 大枝 | 453.34±26.09 c  | 1.78±0.53 d  | 0.18±0.07 cde  | 1.86±0.11 c | 2.40±0.53 cd | 0.63±0.23 cde |
| 根桩 | 505.35±7.72 a   | 1.28±0.43 d  | 0.08±0.00 h    | 0.57±0.06 e | 0.80±0.20 e  | 0.26±0.08 f   |
| 主根 | 506.79±8.66 a   | 1.44±0.52 d  | 0.11±0.03 fgh  | 0.71±0.19 e | 1.04±0.14 e  | 0.31±0.11 f   |
| 粗根 | 503.55±6.10 a   | 1.76±0.45 d  | 0.12±0.02 efgh | 2.10±0.63 c | 0.98±0.33 e  | 0.53±0.12 e   |
| 大根 | 504.46±9.69 a   | 1.65±0.39 d  | 0.10±0.02 gh   | 1.19±0.39 d | 0.75±0.09 e  | 0.36±0.03 f   |
| 中根 | 503.20±10.51a   | 2.43±0.08 d  | 0.15±0.01 efg  | 2.25±0.14 c | 1.69±0.40 de | 0.72±0.07 cd  |
| 小根 | 485.07±7.88 ab  | 3.71±0.48 c  | 0.22±0.01 cd   | 3.49±0.18 b | 2.55±0.26 cd | 0.81±0.12 c   |
| 细根 | 414.35±11.63 d  | 5.70±1.17 b  | 0.35±0.03 b    | 4.57±0.21 a | 3.19±0.52 bc | 1.27±0.07 b   |

数值为平均值±标准差。同列不同字母表示同一养分含量在采伐剩余物不同组分间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 3 马尾松采伐剩余物养分贮量 (kg · hm<sup>-2</sup>)  
Table 3 Nutrient storage in logging residue constituents of *Pinus massoniana* plantation

| 组分    | C            | N             | P            | K            | Ca            | Mg            |
|-------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 叶     | 1675±449 d   | 40.80±10.67 a | 2.46±0.81 a  | 17.78±4.95 a | 10.96±3.32 c  | 5.27±1.41 b   |
| 皮     | 704±247 ef   | 6.01±2.52 cde | 0.26±0.07 cd | 2.13±0.61 c  | 7.68±3.39 cd  | 0.93±0.40 cde |
| 小枝    | 4270±761 a   | 15.42±4.48 b  | 2.37±0.77 a  | 19.43±7.20 a | 41.78±16.70 a | 7.27±2.53 a   |
| 大枝    | 3859±604ab   | 15.10±4.88 b  | 1.51±0.68 b  | 15.80±2.06 a | 20.36±5.39 b  | 5.42±2.43 b   |
| 根桩    | 1224±187 de  | 3.05±0.92 de  | 0.20±0.02 cd | 1.09±0.60 c  | 1.90±0.42 d   | 0.62±0.19 cde |
| 主根    | 3392±480 b   | 9.33±2.08 c   | 0.74±0.33 c  | 4.88±1.99 c  | 7.05±1.72 cd  | 2.00±0.51 cd  |
| 粗根    | 2262±250 c   | 7.97±2.52 cd  | 0.55±0.13 cd | 9.64±3.78 b  | 4.43±1.71 cd  | 2.42±0.73 c   |
| 大根    | 708±140 ef   | 2.39±1.06 de  | 0.14±0.05 cd | 1.64±0.50 c  | 1.05±0.25 d   | 0.50±0.08 de  |
| 中根    | 190±32 fg    | 0.92±0.17 e   | 0.06±0.01 d  | 0.86±0.20 c  | 0.64±0.22 d   | 0.27±0.07 de  |
| 小根    | 16±4 g       | 0.12±0.04 e   | 0.01±0.00 d  | 0.12±0.03 c  | 0.08±0.03 d   | 0.03±0.00 e   |
| 细根    | 4±0 g        | 0.06±0.01 e   | 0.00±0.00 d  | 0.04±0.01 c  | 0.03±0.00 d   | 0.01±0.00 e   |
| 地上部合计 | 10507±1082 A | 77.3±11.8 A   | 6.6±1.6 A    | 55.1±11.1 A  | 80.8±25.8 A   | 18.9±5.4 A    |
| 伐根合计  | 7796±946 B   | 23.8±3.0 B    | 1.7±0.5 B    | 18.3±6.0 B   | 15.2±3.5 B    | 5.9±0.2 B     |
| 总计    | 18303±1717   | 101.2±13.1    | 8.3±1.9      | 73.4±14.3    | 96.0±27.0     | 24.7±5.3      |

数值为平均值±标准差。同列不同小写字母表示同一养分贮量在采伐剩余物不同组分间差异显著 ( $P<0.05$ );同列不同大写字母表示同一养分在采伐剩余物的地上部和伐根间差异显著 ( $P<0.05$ )。



皮>中根、小根和细根,其中小枝占总量的23.3%,大枝占21.1%,主根18.5%,粗根12.4%,叶和根桩分别为9.1%和6.7%,大根和皮分别占3.9%和3.8%,而中根、小根和细根这三者之和仅占1.1%。从氮、磷、钾、钙、镁5种矿质元素贮存总量来看,采伐剩余物的各组分排列顺序为:小枝、叶>大枝>粗根、主根、皮>根桩、大根>中根、小根、细根,其中小枝占28.4%,叶占25.5%,大枝占19.2%,粗根、主根和皮分别占8.2%、7.9%和5.6%,根桩和大根分别占2.3%和1.9%,而中根、小根和细根三者之和仅占1.1%。

进一步对各矿质元素分析发现,氮、磷、钾、钙和镁5种元素贮量排在前三位的组分均为叶、小枝和大枝。叶、小枝和大枝分别占氮素总贮量的40.3%、15.2%和14.9%,三者之和占总氮量的70.5%;分别占磷素总贮量的29.7%、28.6%和18.2%,之和占总量的76.5%;分别占钾素总贮量的24.2%、26.5%和21.5%,之和占72.2%;分别占钙素总贮量的11.4%、43.8%和21.2%,之和占76.2%,分别占镁素总贮量的21.3%、29.4%和21.9%,之和占72.6%。而对伐根来说,各矿质养分主要贮存在主根和粗根中,两者之和分别占氮、磷、钾、钙和镁总量的17.1%、15.5%、19.8%、12.0%和17.9%。可见,采伐剩余物的各矿质养分主要贮存在残留于地表的枝和叶中。

### 3 讨论

我国南方山地山高坡陡,土层浅薄,降雨量集中且强度大,极易引起水土流失,如果再加上经营措施不当,将会造成严重的水土流失(赵其国,2006)。与炼山相比,保留采伐剩余物能显著减少林地水土流失。炼山后第一年水土流失量分别是保留采伐剩余物的2.3和13倍(林思祖等,1987),11和88倍(俞新妥等,1989);马祥庆等(1996)在福建长期定位观测研究也表明,在皆伐炼山方式下更新的林地前两年水、土流失量尤为严重,可分别高达5179.0  $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$ 和35.1  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而保留采伐剩余物的林地水、土流失量分别是631.2  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和0.6  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,降低了8.2和58.5倍。林地保留采伐剩余物的作用和功能与凋落物的相似,均能减少水土流失、促进降水入渗,为土壤生物提供碳源和养分。然而两者来源却不同,采伐剩余物是上一代林分收获后残留下来的不具经济价值的废弃物,而凋落物是树木生长过程中由地上部分产生并归还到地面的新陈代谢的产物,因此采伐剩余物和凋落物的组分不同,各组分

生物量及占比、养分含量等差异也较大。本实验对31年生马尾松人工林采伐剩余物的研究显示,叶、枝和皮等残留在土壤表面的采伐剩余物生物量为23.63  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,是同区域同树种年凋落物量的2.1~6.5倍(田大伦等,1995;杨会侠等,2010;徐旺明等,2013),是凋落物现存量的1.8~4.7倍(田大伦等,1995)。其中,树枝的生物量最高,小枝和大枝生物量分别是9.88和8.48  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,分别占采伐剩余物地上部生物量的41.8%和35.9%,可见,残留在地表的采伐剩余物有77.7%都是树枝,而凋落物中树枝仅占1.1%~3.0%;树叶在凋落物中的比例高达61.6%~84.5%(田大伦等,1995;杨会侠等,2010),但残留在地面的采伐剩余物中只有15.2%。与杨会侠等(2010)对不同年龄马尾松凋落物的研究结果相比,采伐剩余物中叶的氮磷钾和镁含量明显高于凋落物的,分别高出44.8%、56.8%、77.2%和60.9%,而枝中的氮磷含量则较凋落物的降低83.6%和66.7%。采伐剩余物中残留在地表的叶、枝和皮中的氮磷钾钙和镁贮量分别是77.34、6.61、55.15、80.77和18.88  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;与年凋落物中矿质元素归还量相比,氮磷钾钙镁分别提高0.9~1.6倍、1.2~2.7倍、3.5~10.5倍、0.8~2.0倍和2.5~6.5倍(杨会侠等,2010);与现存地表凋落物中各矿质养分贮量相比,氮磷钾钙镁分别提高0.6~1.7、1.6~5.2、2.2~8.6、1.4~2.8和1.7~7.6倍(田大伦等,1995)。可见,人工林皆伐后,地表残留着大量的采伐剩余物,储存着大量的矿质养分。

除地上部的枝叶皮等,伐根也是采伐剩余物的重要组成部分,包括地上部分的根桩和深入地下的根系。伐根不仅能影响森林更新、野生动物的栖息、真菌的寄生,还能影响土壤的稳定性和养分循环等(Anders *et al.*, 2004; 法蕾等, 2004, 2006; 孟春等, 2005; 田子珩等, 2007),是森林生态系统的重要组成部分。目前对伐根的研究主要集中在伐根的分解、养分的释放,以及与真菌、土壤动物等方面,而有关伐根组分及生物量的研究很少。我们在马尾松皆伐后,采用挖掘法研究了伐根各组分的生物量及养分贮量,结果表明:伐根生物量为15.44  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占采伐剩余物总生物量的39.5%,其中主根生物量最大,远高于其他根系组分,每公顷高达6.70  $\text{t}$ ,占伐根生物量的43.4%,其次依次是粗根、根桩和大根,生物量分别为4.49、2.42和1.40  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,分别占伐根生物量的29.1%、15.7%和9.1%,中根、小根和细根生

物量很低,三者之和仅  $0.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占伐根生物量的2.7%。伐根中碳贮量为  $7796 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占采伐剩余物总碳量的42.6%;伐根中氮、磷、钾、钙和镁贮量分别是23.8、1.7、18.3、15.2和  $5.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,均显著低于残留在地表的采伐剩余物,其分别占采伐剩余物中氮、磷、钾、钙和镁贮量的23.6%、20.4%、24.9%、15.8%和23.7%。

尽管伐根的生物量和养分贮量显著低于残留在地表的采伐剩余物,但因伐根深入土壤,无论炼山与否均能保存下来,而且伐根分解是一个缓慢的过程,可以持续向土壤生物及伐根周围的土壤提供碳、氮等养分,同时随着伐根的分解,还可在土壤中形成大的空隙,促进降水入渗。目前有关伐根生物量的研究很少,而且在根系生物量研究中,因其测定费时费力,多采用数学模型进行拟合(张艳杰等,2011;明安刚等,2013;贾呈鑫卓等,2017)。因此,我们在马尾松皆伐林地布设样方,实测样方内所有伐桩直径和伐根各组分生物量,在此基础上采用数学模型对伐根各组分生物量与伐桩直径进行拟合。拟合结果表明,除小根和细根生物量与伐桩直径相关系数较低,呈显著相关外,其他伐根各组分生物量与伐桩直径均呈极显著相关。说明在测定伐桩直径的情况下,采用本文拟合方程,可估算主根、根桩、粗根、大根、中根以及整个伐根的生物量。另外,与土芯法(土钻法)相比,文中细根生物量的实测值和拟合方程估算值均偏低,可能的原因有:我们在测定伐根各组分生物量时采用挖掘法,在此过程中尽管我们仔细挑拣,但因细根(根径小于2 mm)细小,可能存在遗漏;此外,我们研究的对象是生长31年、割完脂、要采伐的马尾松,树的生长势弱,可能导致了细根生物量减少。

项文化等(2002)对不同年龄马尾松人工林的研究发现,叶、枝和皮生物量之和占总生物量的20.5%~37.2%,伐根占总生物量的11.0%~14.3%;叶、枝和皮中氮磷钾钙镁贮量分别占相应总贮量的54.3%~80.6%、62.8%~89.6%、52.3%~74.7%、50.4%~65.0%和27.7%~67.7%,伐根中氮磷钾钙镁贮量分别占相应总贮量的8.4%~24.2%、8.7%~16.6%、12.6%~25.3%、12.7%~15.6%和9.8%~29.1%。李淑仪等(2007)研究结果也显示,桉树人工林采伐时,树木吸收累积养分的45%贮存在采伐剩余物中。我们对广西南部31年生马尾松人工林的研究也表明,皆伐后林地上残留着大量的采伐剩

余物,其生物量为  $39.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,氮、磷、钾、钙、镁矿质元素贮量分别是101.2、8.3、73.4、96.0和  $24.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见,林木采伐后,林地残留的采伐剩余物生物量庞大,而且通过采伐剩余物归还林地的矿质养分量也较大,而另一方面,在进入衰老之前,因林木养分年吸收量远高于凋落物中的年归还量,土壤养分长期处在严重的消耗状态,土壤肥力不断下降(陈楚莹等,1990)。因此,从养分平衡的角度来看,合理利用采伐剩余物对人工林地力维持至关重要。

杨承栋(2016)认为,土壤有机质的量和质下降是制约我国人工林林木生长的关键因子,同时指出,采伐剩余物和林地枯落物是土壤有机质的重要来源。而皆伐迹地人工更新林地的前3年因幼树未能郁闭成林,也不能产生较多的凋落物,在此阶段采伐剩余物是林地土壤有机质和养分元素的主要来源,因此在林业生产中应合理利用采伐剩余物,以达到长期维护地力、保持生产力的作用。

#### 参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 陈楚莹, 张家武, 周崇莲, 等. 1990. 改善杉木人工林的林地质量和提高生产力的研究. 应用生态学报, **1**(2): 97-106.
- 法 蕾, 李文宁. 2004. 试述粗木质残体及伐根分解的研究进展. 地质技术经济管理, **26**(6): 54-57.
- 法 蕾, 赵秀海. 2006. 阔叶红松林山杨伐根分解过程中真菌动态研究. 北京林业大学学报, **28**(supp. 2): 90-94.
- 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 2013. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, **33**(1): 12-22.
- 高金铎. 1982. 谈采伐剩余物. 内蒙古林业, (10): 35.
- 国家林业局森林资源管理司. 2010. 中国森林资源第七次清查结果及其分析. 林业经济, (2): 66-72.
- 何宗明, 范少辉, 卢镜铭. 2006. 立地管理措施对2代6年生杉木林生长的影响. 林业科学, **42**(11): 47-51.
- 贾呈鑫卓, 李帅锋, 苏建荣, 等. 2017. 思茅松人工林根系特征与生物量分配. 生态学杂志, **36**(1): 21-28.
- 李 强, 周道玮, 陈笑莹. 2014. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. 生态学报, **34**(14): 3807-3819.
- 李淑仪, 钟继洪, 莫晓勇, 等. 2007. 桉树土壤与营养研究. 广州: 广东科技出版社.
- 林思祖, 俞新妥, 吴耀溪, 等. 1987. 炼山对水土流失影响的初步研究. 热带林业科技, (4): 51-54.
- 马祥庆, 俞新妥, 何智英, 等. 1996. 不同林地清理方式对杉木幼林生态系统水土流失的影响. 自然资源学报, **11**(1): 33-40.
- 孟 春, 庞凤艳. 2005. 伐根研究进展. 森林工程, **21**(4): 11-13.

- 明安刚, 张治军, 谌红辉, 等. 2013. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响. 林业科学, **49**(10): 1-6.
- 田大伦, 宁晓波. 1995. 不同龄组马尾松林凋落物量及养分归还量研究. 中南林学院学报, **15**(2): 163-169.
- 田子珩, 张春雨, 赵秀海. 2007. 红松伐根分解过程中土壤动物动态. 生态学杂志, **26**(2): 286-290.
- 王 力, 邵明安, 王全九. 2005. 林地土壤水分运动研究评述. 林业科学, **41**(2): 147-153.
- 吴波波, 郭剑芬, 吴君君, 等. 2014. 采伐剩余物对林地表层土壤生化特性和酶活性的影响. 生态学报, **34**(7): 1645-1653.
- 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 等. 2015. 火烧和保留采伐剩余物对土壤有机碳矿化的影响. 土壤学报, **52**(1): 203-211.
- 项文化, 田大伦. 2002. 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究. 植物生态学报, **26**(1): 89-95.
- 徐旺明, 闫文德, 李洁冰, 等. 2013. 亚热带4种森林凋落物量及其动态特征. 生态学报, **33**(23): 7570-7575.
- 薛 立, 向文静, 何跃君, 等. 2005. 不同林地清理方式对杉木林土壤肥力的影响. 应用生态学报, **16**(8): 1417-1422.
- 杨承栋. 2016. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子. 林业科学, **52**(12): 1-12.
- 杨会侠, 汪思龙, 范 冰, 等. 2010. 不同林龄马尾松人工林年凋落物量与养分归还动态. 生态学杂志, **29**(12): 2334-2340.
- 俞新妥, 杨玉盛, 何智英, 等. 1989. 炼山对杉木人工林生态系统的影响. I. 炼山初期林地水土流失的初步研究. 福建林学院学报, **9**(3): 238-255.
- 张艳杰, 温佐吾. 2011. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量. 林业科学, **47**(3): 75-81.
- 赵其国. 2006. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题. 水土保持通报, **26**(2): 1-8.
- Anders L, Ake L. 2004. Cut high stumps of spruce, birch, aspen and oak as breeding substrates for saproxylic beetles. *Forest Ecology and Management*, **203**: 1-20.
- Facelli JM, Pickett S TA. 1991. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure. *Botanical Review*, **57**: 1-32.
- Harden CP, Scruggs PD. 2003. Infiltration on mountain slopes: A comparison of three environments. *Geomorphology*, **55**: 5-24.
- Sarr M, Agbogba C, Russell-Smith A, *et al.* 2001. Effects of soil faunal activity and woody shrubs on water infiltration rates in a semi-arid fallow of Senegal. *Applied Soil Ecology*, **16**: 283-290.
- 
- 作者简介** 李 华,女,1978年生,博士,主要从事人工林不同经营模式下土壤肥力和林木生长的研究。E-mail: li-hua782003@163.com
- 责任编辑** 张 敏
-