

文章编号:2095-6134(2017)04-0521-08

# 不同采伐年限马尾松人工林伐桩的 胡敏酸和富里酸动态特征<sup>\*</sup>

周 蛟<sup>1</sup>,杨万勤<sup>1,2†</sup>,吴福忠<sup>1,2</sup>,谭 波<sup>1,2</sup>,段 斐<sup>1</sup>,刘 辉<sup>1</sup>

(1 四川农业大学生态林业研究所长江上游林业生态工程省级重点实验室,成都 611130;

2 长江上游生态安全协同创新中心,成都 611130)

(2016 年 4 月 6 日收稿;2016 年 7 月 18 日收修改稿)

Zhou J, Yang W Q, Wu F Z, et al. Dynamics on humic acid and fulvic acid in the stump systems with different log years in the *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017,34(4):521-528.

**摘 要** 伐桩腐殖化中胡敏酸和富里酸的周转是人工林土壤碳吸存和地力维持等关键生态过程的重要途径,尚缺乏必要关注。根据地方采伐档案,以 1999—2013 年四川盆地马尾松人工林采伐剩余的伐桩为研究对象,用年龄序列分解实验研究伐桩系统中木桩(SW)、根桩(SR)、树皮(B)和不同径级的根系(R1: 0 mm < 径级 ≤ 10 mm, R2: 10 mm < 径级 ≤ 25 mm, R3: 25 mm < 径级 ≤ 100 mm, R4: 径级 > 100 mm)的胡敏酸与富里酸的动态特征。结果表明:经过 15 年的腐解,伐桩的胡敏酸含量增加,但储量减少;富里酸含量和储量都减少;胡敏酸/富里酸增大。伐桩系统的胡敏酸和富里酸储量分别介于 1 688.35 ~ 4 434.99 kg/hm<sup>2</sup> 和 822.86 ~ 6 159.29 kg/hm<sup>2</sup> 之间。相对于其他组分,根桩的胡敏酸和富里酸储量大于木桩和树皮,大径级根系的胡敏酸和富里酸储量大于小径级根系。可见,马尾松人工林伐桩系统具有较高的胡敏酸和富里酸储量,随腐解进行,其腐殖化程度逐渐增加。这些结果对于理解粗木质残体分解及人工林碳吸存过程具有重要意义。

**关键词** 马尾松人工林;伐桩;胡敏酸;富里酸;HA/FA

**中图分类号:**Q948.11;S718.5 **文献标志码:**A **doi:**10.7523/j.issn.2095-6134.2017.04.015

## Dynamics on humic acid and fulvic acid in the stump systems with different log years in the *Pinus massoniana* plantations

ZHOU Jiao<sup>1</sup>, YANG Wanqin<sup>1,2</sup>, WU Fuzhong<sup>1,2</sup>, TAN Bo<sup>1,2</sup>, DUAN Fei<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1 Sichuan Provincial Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches Yangtze River, Institute of Forestry & Ecology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Chengdu 611130, China)

**Abstract** The turnover of humic acid (HA) and fulvic acid (FA) during stump humification plays crucial roles in sequestering carbon and maintaining soil fertility in plantation ecosystems, but little related information has been available. A field experiment was conducted in Masson pine (*P.*

<sup>\*</sup> 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC09B05)、国家自然科学基金(31370628)、四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008)和中国博士后科学基金特别资助(2013M540714,2012T50782)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: scyangwq@163.com

massoniana) plantations in Sichuan Basin. The decaying stumps were sampled based on the local log file records from 1999 to 2013, and the stump system was further divided into stump wood (SW), stump root (SR), bark (B), and linked roots (Rn) with different diameters. After 15-year decomposition, HA concentration and HA/FA in the stump system increased significantly, while the stocks of HA and FA and FA concentration in the stump system decreased significantly. The stocks of HA and FA in the stump system ranged from 1 688.35 to 4 434.99 kg·hm<sup>-2</sup> and from 822.86 to 6 159.29 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, in the Masson pine plantation. SR had higher HA and FA stocks than SW and B. Moreover, the roots with larger diameter had higher HA and FA stocks than those with smaller diameters. In conclusion the stump system in the Masson pine plantation has high stocks of HA and FA and the humification degree increases in decaying process. The results provide basic information for understanding the processes of coarse wood debris decomposition and carbon sequestration in the plantations.

**Keywords** *Pinus massoniana* plantations; stump systems; humic acid; fulvic acid; HA/FA

人工林伐桩系统往往是指采伐之后残留于地表的木桩、根桩和不同径级的根系等<sup>[1]</sup>。大多数林地采伐过后遗留的伐桩及地下部分的生物量往往可占林木总生物量的 20%<sup>[2]</sup>。伐桩系统在土壤中的腐解不仅是生态系统养分循环的重要内容,也是生态系统光合碳向土壤转移的重要过程和土壤有机质的重要来源<sup>[3]</sup>。林龄在影响森林系统碳储量的过程中具有重要的作用<sup>[4]</sup>,不同林龄会影响林地伐桩的数量和质量,这对林地上营养元素的平衡会造成重大影响。目前,国内外学者对伐桩分解过程的研究主要集中在养分动态<sup>[5-6]</sup>,分解速率<sup>[7-9]</sup>,微生物演替<sup>[10-11]</sup>等方面。研究表明,漫长的降解时间使伐桩成为森林生态系统的长期碳库<sup>[12-13]</sup>,且地上和地下部分的分解存在差异<sup>[14]</sup>,但有关伐桩系统的腐殖质动态研究尚未见报道。胡敏酸(humic acid, HA)和富里酸(fulvic acid, FA)是腐殖质的重要组分,其累积特征是形成土壤有机质的重要内容。然而,受不同物理和化学环境的影响,胡敏酸和富里酸往往存在积累、降解和相互转化的过程<sup>[15]</sup>。同时,由于粗木质残体的分解受不同环境特征<sup>[16-17]</sup>、基质质量<sup>[18]</sup>的调控,伐桩系统的各组分可能在不同的降解时间具有不同的腐殖质累积特征。

马尾松(*P. massoniana*)是中国南方最重要的造林树种之一,具有耐干旱、耐贫瘠和适应性强等特点,在中国生态建设和林业产业中具有十分重要的作用<sup>[19-20]</sup>,其分布面积达 14.34 万 hm<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。采伐之后遗留在生态系统中的伐桩是其物质循环和地力维持的重要内

容,不同采伐年限的同类型人工林伐桩系统可以在一定程度上很好地代表伐桩不同阶段的降解特征,这为认识伐桩系统腐解过程提供了良好的思路和研究对象。因此,在前期调查的基础上,我们根据采伐记录用年龄序列法研究不同采伐年限的马尾松伐桩系统的胡敏酸和富里酸动态过程,以期从伐桩腐殖化过程的角度为马尾松可持续经营管理提供一定的基础数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域为地处长江上游和四川盆地南缘的宜宾市高县来复镇森林经营所国有林区。东经 104°21′~104°48′、北纬 28°11′~28°47′,气候类型属中亚热带湿润季风气候。年平均气温 18.1℃,最高气温(7月)36.8℃,最低气温(1月)7.8℃,年均降雨量 1 021 mm。土壤为山地黄壤,土层厚度约 50 cm。原生植被为亚热带常绿阔叶林,但现已基本垦殖为马尾松人工林,林下灌木为梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius*)、枹栎(*Quercus serrate*)、油樟(*Cinnamomum longepaniculatum*)、野桐(*Mallotus japonicas*)、铁仔(*Myrsine africana*)、茶茱萸(*Viburnum setigerum*)、展毛野牡丹(*Melastoma normale*)等;草本为蕨(*Pteridium aquilinum*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、皱叶狗尾草(*Setaria plicata*)和淡竹叶(*Lophatherum gracile*)等。森林经营所的采伐年代记录档案显示研究所经营的林区具有不同年代

皆伐保留下来的伐桩,这为研究伐桩分解过程提供了关键的实验材料。

1.2 样地设置

2013年8月,根据采伐年代记录档案,对经营所1999年以来皆伐的马尾松人工林进行踏查。在此基础上,选择采伐林龄为29~30 a、坡向与坡度基本一致、皆伐后重造的马尾松人工林立地的马尾松伐桩为实验材料,在每个立地

设置3个20 m×20 m的样地,对样地内所有伐桩进行调查,并测量伐桩的直径、高度等。以调查结果为依据建立1~15 a的分解序列实验样地,样地基本概况如表1。采用年龄序列法分别研究已腐解1、3、5、7、9、11、13、15 a的伐桩系统的木桩、根桩、树皮和不同径级根系的胡敏酸和富里酸的含量及储量,胡敏酸/富里酸(HA/FA)的动态变化特征。

表1 研究样地基本概况  
Table 1 Basic information of the sampling sites

研究样地	1	3	5	7	9	11	13	15
坡向/坡度/(°)	NW/21	NW/20	NW/17	NW/20	NW/20	NW/19	NW/21	NW/17
伐桩密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	2 050	2 100	2 405	2 150	2 130	2 200	2 070	2 380
伐桩直径/cm	16.4±0.48	17.2±0.53	15.6±0.56	16.2±0.39	16.3±0.47	16.1±0.32	16.7±0.29	15.8±0.48

1.3 样品处理与分析

在每个立地内各选取5个平均直径大小相近的伐桩,将其掘出,在挖掘过程中尽量保证伐桩地上和地下部分的完整性。将伐桩分为木桩(SW:树桩地上直径≥10 cm,长度<1 m的部分)、根桩(SR:伐桩地下直径≥15 cm,长度<1 m的部分)<sup>[22]</sup>、树皮(B)和地下根系(R)四部分。根系按0~10、10~25、25~100和大于100 mm<sup>[23]</sup>分为4个径级(R1、R2、R3、R4)。将分解后的伐桩各部分称重,并测量每个径级根长及两端直径。木桩采样时,先除去桩头5 cm,再截取厚度为5 cm的圆盘,将心材与树皮剥离,分别称重后带回;根

桩采样时,分别在根桩的上部、中部、下部截取样品,称量后带回;将测量过的粗根全部带回。

将样品带回实验室,仔细清除泥土等杂物。伐桩各组分样品密度的测定参照《中华人民共和国国家标准 GB/T 1933—2009》。取部分样品进入水中使之达到饱和水状态,用水置换法测定体积(在测定过程中始终保持样品表面湿润),然后将样品于70℃下烘干至恒重并称重,测定其含水率,得出伐桩各组分的密度(干重/体积,g·cm<sup>-3</sup>)。最后,将样品粉碎,过0.25 mm筛。15 a腐解过程中伐桩系统各组分的密度变化如表2<sup>[24]</sup>。

表2 马尾松伐桩各组分在15年腐解过程中的密度变化<sup>[24]</sup>  
Table 2 Changes in densities of different components in the *P. massoniana* stump systems

腐解时间/a	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )							
	Stump	SR	SW	Bark	R1	R2	R3	R4
1	0.78(0.08) <sup>a</sup>	0.60(0.13) <sup>a</sup>	0.89(0.07) <sup>a</sup>	0.47(0.17) <sup>b</sup>	0.69(0.3) <sup>a</sup>	0.58(0.07) <sup>ab</sup>	0.59(0.09) <sup>ab</sup>	1.66(1.31) <sup>a</sup>
3	0.54(0.01) <sup>b</sup>	0.11(0.00) <sup>b</sup>	0.46(0.34) <sup>b</sup>	0.46(0.10) <sup>b</sup>	0.69(0.22) <sup>a</sup>	0.63(0.22) <sup>ab</sup>	0.67(0.08) <sup>a</sup>	0.78(0.20) <sup>b</sup>
5	0.33(0.01) <sup>b</sup>	0.29(0.03) <sup>bc</sup>	0.31(0.00) <sup>b</sup>	0.54(0.04) <sup>ab</sup>	0.35(0.18) <sup>a</sup>	0.30(0.03) <sup>b</sup>	0.23(0.22) <sup>c</sup>	0.27(0.05) <sup>b</sup>
7	0.36(0.07) <sup>b</sup>	0.60(0.62) <sup>c</sup>	0.39(0.16) <sup>b</sup>	0.34(0.11) <sup>b</sup>	0.22(0.24) <sup>a</sup>	0.43(0.25) <sup>ab</sup>	0.27(0.04) <sup>bc</sup>	0.27(0.02) <sup>b</sup>
9	0.32(0.04) <sup>b</sup>	0.26(0.03) <sup>bc</sup>	0.32(0.2) <sup>b</sup>	0.40(0.12) <sup>b</sup>	0.30(0.29) <sup>a</sup>	0.32(0.44) <sup>b</sup>	0.29(0.05) <sup>bc</sup>	0.36(0.09) <sup>b</sup>
11	0.41(0.06) <sup>b</sup>	0.29(0.09) <sup>bc</sup>	0.37(0.07) <sup>b</sup>	0.41(0.04) <sup>b</sup>	0.16(0.01) <sup>a</sup>	0.98(0.75) <sup>a</sup>	0.32(0.06) <sup>bc</sup>	0.31(0.04) <sup>b</sup>
13	0.40(0.05) <sup>b</sup>	0.28(0.05) <sup>bc</sup>	0.35(0.22) <sup>b</sup>	0.50(0.09) <sup>ab</sup>	0.51(0.50) <sup>a</sup>	0.56(0.13) <sup>ab</sup>	0.29(0.02) <sup>bc</sup>	0.28(0.03) <sup>b</sup>
15	0.31(0.02) <sup>b</sup>	0.40(0.24) <sup>bc</sup>	0.36(0.11) <sup>b</sup>	0.32(0.05) <sup>b</sup>	0.21(0.12) <sup>a</sup>	0.31(0.07) <sup>a</sup>	0.29(0.05) <sup>bc</sup>	0.28(0.03) <sup>b</sup>

注:Stump,伐桩系统;SR,根桩;SW,木桩;Bark,树皮;R1:0 mm<径级≤10 mm;R2:10 mm<径级≤25 mm;R3:25 mm<径级≤100 mm;R4:径级>100 mm。数值为平均值±标准误(n=3)。不同字母表示同一组分的密度在不同腐解年限之间差异显著(P<0.05)。

腐殖质的提取参考《中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1238—1999》。准确称取烘干样品1.00 g于150 mL锥形瓶中,加入100 mL混合提

取液(0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH+0.1 mol·L<sup>-1</sup> Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·10 H<sub>2</sub>O),加塞震荡10 min,沸水浴1 h,冷却至室温后用过0.45 μm滤膜过滤,滤液即为浸提液。

使用 TOC (multi N/C 2100, Analytic Jena, Thüringen, Germany)测定部分浸提液的可提取性腐殖酸含量(该部分为胡敏酸和富里酸的总量)。之后,取浸提液 20 mL 于试管中,水浴加热近沸后逐滴加入  $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_2\text{SO}_4$  至 pH 2 并出现絮状沉淀。 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  水浴 30 min,过夜,滤液用  $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{H}_2\text{SO}_4$  洗涤,过滤后沉淀即为胡敏酸;然后,用热的  $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaOH}$  少量多次洗涤沉淀,滤液至 100 mL 容量瓶定容,取溶解的胡敏酸溶液过  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  滤膜,同样使用 TOC(multi N/C 2100, Analytic Jena, Thüringen, Germany)测定胡敏酸含量。富里酸含量则可按差值算出。

富里酸(FA) = 可提取性腐殖酸 - 胡敏酸(HA)。

(1)

用不同腐解时间的胡敏酸/富里酸表征马尾松伐桩腐殖化过程中胡敏酸、富里酸的相对含量和形成速度<sup>[25]</sup>。

$$\text{HA/FA} = C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}, \tag{2}$$

伐桩各组分的单位面积储量 = 各组分的

质量均值 × 样地伐桩数 / 样地面积。 (3)

以马尾松伐桩各组分的胡敏酸和富里酸含量与相应组分储量的乘积表示各组分的胡敏酸和富里酸储量。 (4)

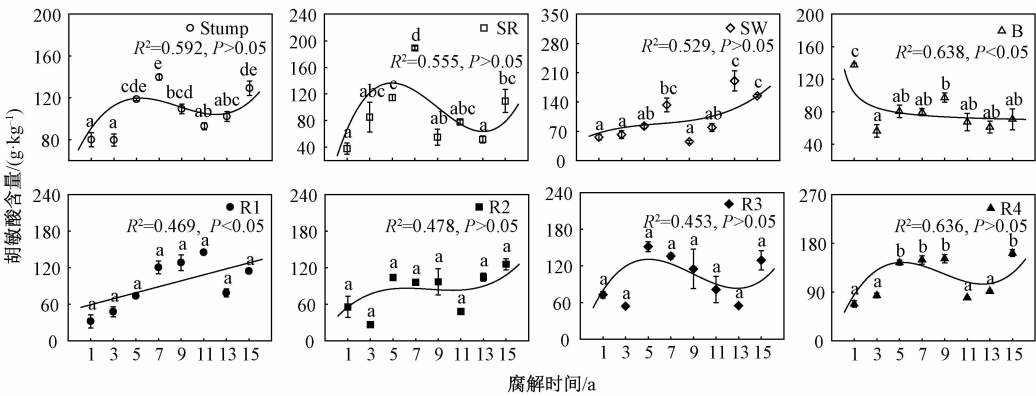
1.4 数据统计与分析

数据分析和绘图采用 SPSS 20.0 和 Sigmaplot 12.5 完成。用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 检验伐桩系统各组分的胡敏酸和富里酸含量与储量在不同腐解时间的差异显著性;用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 检验伐桩的不同组分和腐解时间对其胡敏酸和富里酸储量的影响;显著性水平设为  $P = 0.05$ 。数值以平均值 ± 标准误 (mean ± SE) 表示。

2 结果与分析

2.1 马尾松伐桩腐解过程中胡敏酸的动态过程

不同腐解阶段的伐桩系统的胡敏酸含量介于  $79.61 \sim 139.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,在腐解 7 a 时达到最大值。经过 15 a 的腐解,伐桩系统的胡敏酸含量差异极显著 ( $P < 0.01$ ),由  $82.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  增加到  $129.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除树皮的胡敏酸含量降低外,伐桩其他组分的变化与伐桩系统呈相似的变化规律 (图 1);木桩、根桩、树皮和 R4 的胡敏酸含量差异都极显著 ( $P < 0.01$ ),而 R1、R2、R3 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。



Stump, 伐桩系统;SR,根桩;SW,木桩;Bark,树皮;R1: 0 mm < 径级 ≤ 10 mm; R2: 10 mm < 径级 ≤ 25 mm; R3: 25 mm < 径级 ≤ 100 mm; R4: 径级 > 100 mm。

图 1 马尾松伐桩的胡敏酸含量(平均值 ± 标准误, n = 3)

Fig.1 Content of humic acid in the stump system of *P. massoniana*

腐解时间极显著影响伐桩系统的胡敏酸储量(表 3)。经过 15a 的腐解,伐桩系统的胡敏酸储量变化介于  $1\,688.35 \sim 4\,434.99\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间,显著减小 ( $P < 0.05$ )。除木桩,树皮外,各组分的胡敏酸储量变化与伐桩系统趋势相同;根桩、木桩和树皮的胡敏酸储量变化范围分别为  $473.40 \sim$

$988.50, 291.70 \sim 395.30$  和  $42.60 \sim 114.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; R1、R2、R3、R4 的胡敏酸储量变化范围分别为  $3.61 \sim 42.31, 19.26 \sim 66.50, 237.58 \sim 356.01$  和  $170.5 \sim 1\,495.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (图 2)。R1 的胡敏酸储量变化极显著 ( $P < 0.01$ ),树皮和 R2、R3 的胡敏酸储量变化显著 ( $P < 0.05$ ), R4、木

桩和根桩的变化则不显著。伐桩胡敏酸储量的大小为根桩>木桩>树皮,不同径级根系的胡敏酸储量从大到小为 R4>R3>R2>R1。

表 3 腐解时间、不同组分对胡敏酸(HA)和富里酸(FA)储量的双因素方差分析

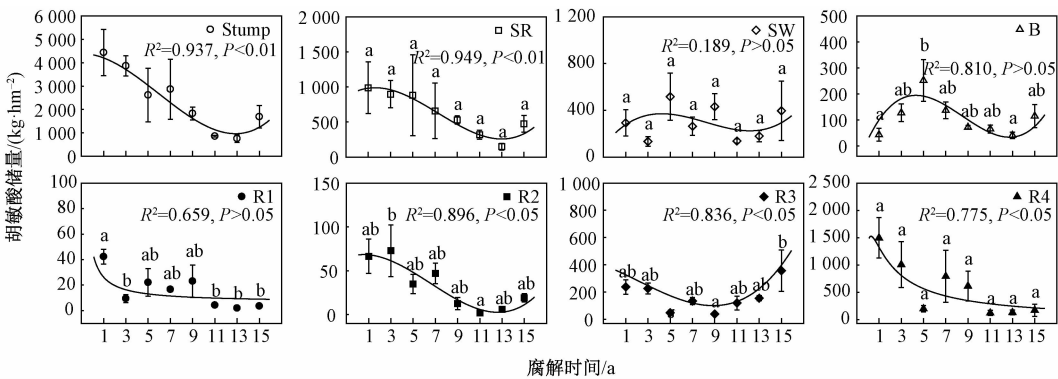
Table 3 Two-way ANOVA of HA and FA stocks with respect to the decay year and components

因子	自由度	F 胡敏酸储量 $F_{\text{HAC}}$	F 富里酸储量 $F_{\text{FAC}}$
腐解时间/a	7	6.21 **	13.69 **
组分	6	51.92 **	34.84 *
腐解时间×组分	42	2.42 **	4.04 **

注: \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ 。

2.2 马尾松伐桩腐解过程中富里酸的动态过程

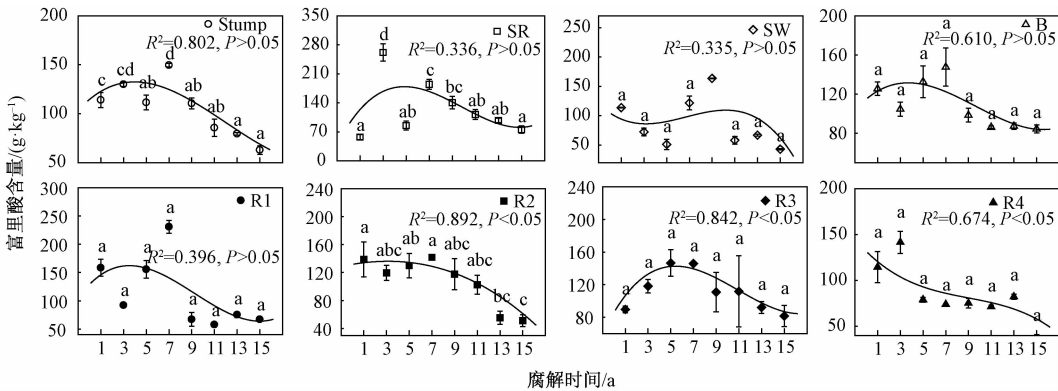
随腐解进行,伐桩系统的富里酸含量在 62.94~149.56 g·kg<sup>-1</sup>之间变化,其富里酸含量先增加后降低,在第 7 年达到最大值。经过 15 a 的腐解,伐桩系统的富里酸含量由 114.02 g·kg<sup>-1</sup>降低到 62.94 g·kg<sup>-1</sup>。除根桩的富里酸含量升高外,伐桩其他组分的变化与伐桩系统呈相似的变化规律(图 3);仅根桩和 R2 的富里酸含量差异极显著( $P<0.01$ ),伐桩其他组分变化的差异不显著( $P>0.05$ )。



Stump, 伐桩系统;SR,根桩;SW,木桩;Bark,树皮;R1: 0 mm<径级≤10 mm; R2: 10 mm<径级≤25 mm; R3: 25 mm<径级≤100 mm; R4: 径级>100 mm。

图 2 马尾松伐桩的胡敏酸储量(平均值±标准误, n=3)

Fig. 2 Stock of humic acid in the stump system of *P. massoniana*



Stump, 伐桩系统;SR,根桩;SW,木桩;Bark,树皮;R1: 0 mm<径级≤10 mm; R2: 10 mm<径级≤25 mm; R3: 25 mm<径级≤100 mm; R4: 径级>100 mm。

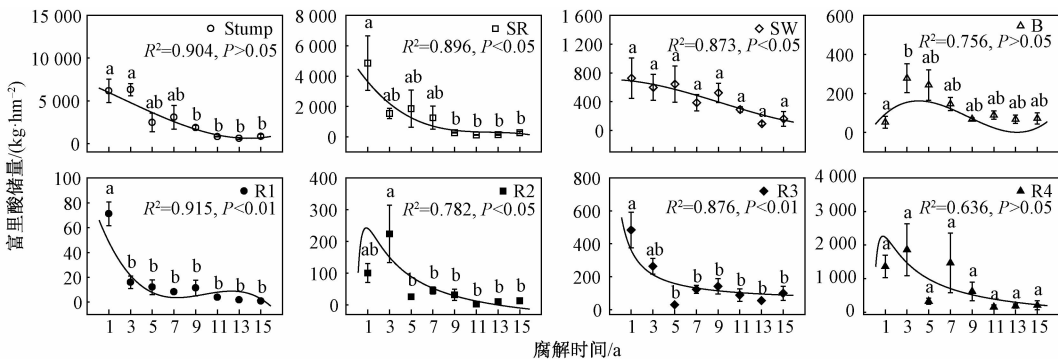
图 3 马尾松伐桩的富里酸含量(平均值±标准误, n=3)

Fig. 3 Content of fulvic acid in the stump system of *P. massoniana*

腐解时间极显著影响伐桩系统的富里酸储量(表 3)。经过 15 a 的腐解,伐桩系统的富里酸储量变化介于 822.86~6 159.29 kg·hm<sup>-2</sup>之间,极显著减小( $P<0.01$ )。木桩、根桩和树皮的富里酸储量分别在 161.25~726.70、277.11

~4 861.68 和 52.48~72.22 kg·hm<sup>-2</sup>之间变化;R1、R2、R3、R4 的富里酸储量变化范围为 0.84~71.17、13.31~101.04、98.91~483.83 和 203.54~1 364.69 kg·hm<sup>-2</sup>(图 4)。根桩、树皮和 R2 之间的差异显著( $P<0.05$ ),R1 与 R3

差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 木桩与 R4 差异不显著 ( $P > 0.05$ )。伐桩富里酸储量的大小为根桩 > 木桩 > 树皮, 不同径级的根系为 R4 > R3 > R2 > R1。



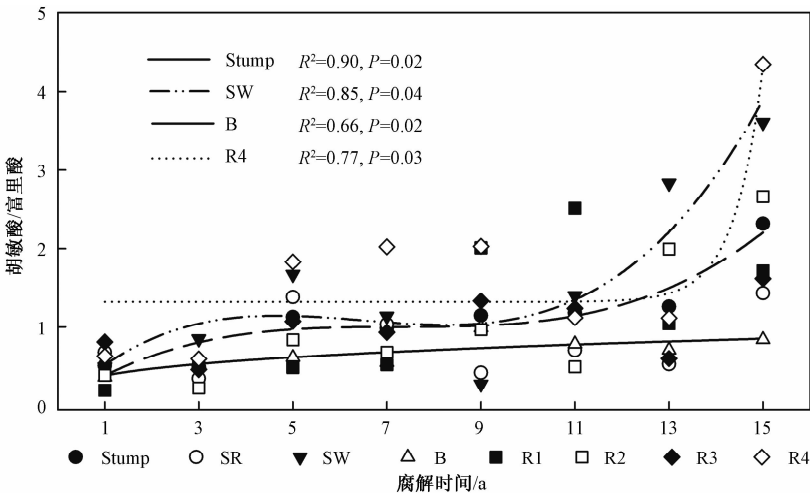
Stump, 伐桩系统; SR, 根桩; SW, 木桩; Bark, 树皮; R1: 0 mm < 径级 ≤ 10 mm; R2: 10 mm < 径级 ≤ 25 mm; R3: 25 mm < 径级 ≤ 100 mm; R4: 径级 > 100 mm。

图 4 马尾松伐桩的富里酸储量 (平均值 ± 标准误,  $n = 3$ )  
Fig. 4 Stock of fulvic acid in the stump system of *P. massoniana*

2.3 马尾松伐桩腐解过程中的胡敏酸/富里酸动态

马尾松人工林伐桩各组分的胡敏酸/富里酸

(HA/FA) 都随腐解时间变长而变大, 各组分的变化趋势与伐桩系统相似 (图 5)。HA/FA 在 0.61 ~ 2.32 之间变化。



Stump, 伐桩系统; SR, 根桩; SW, 木桩; Bark, 树皮; R1: 0 mm < 径级 ≤ 10 mm; R2: 10 mm < 径级 ≤ 25 mm; R3: 25 mm < 径级 ≤ 100 mm; R4: 径级 > 100 mm。

图 5 马尾松伐桩的胡敏酸/富里酸 (平均值 ± 标准误,  $n = 3$ )

Fig. 5 Ratio of humic acid to fulvic acid (HA/FA) in the stump system of *P. massoniana*

3 讨论

伐桩是人工林储量最大的粗木质残体, 其腐解形成的腐殖质是人工林土壤有机质的重要组成部分<sup>[26]</sup>。伐桩的胡敏酸和富里酸动态变化直接影响土壤肥力性质, 能够揭示伐桩腐解过程对地下部分碳库输入、土壤保育和生态系统养分循环的维持的影响。受不同生物、物理和化学环境的影响, 腐殖质积累往往伴随着两个过程<sup>[17]</sup>: 一方面, 木质素、纤维素和酚等难降解物质通过腐解形

成腐殖质; 另一方面, 易分解物质或者早期形成的不稳定腐殖质矿化。本研究中, 马尾松人工林伐桩可提取腐殖质的总储量介于 2 454.07 ~ 9 710.50 kg·hm<sup>-2</sup> 之间 (图 2, 图 4), 充分表明伐桩系统具有明显的腐殖化特征。腐解时间和不同组分对伐桩胡敏酸、富里酸的动态影响显著 (表 3)。伐桩的可提取腐殖质碳总量约占整个人工林生态系统碳储量的 3.5% ~ 10%<sup>[27-29]</sup>, 是马尾松人工林土壤碳吸存的重要形式。同时, 本项研究中马尾松人工林伐桩的胡敏酸和富里酸总储量

高于福建格氏栲人工林和杉木林<sup>[30]</sup>,与纳板河常绿阔叶林的碳储量相当<sup>[31]</sup>,但远小于川西暗针叶林的粗木质残体碳储量<sup>[32]</sup>。

理论上,粗木质残体近地面部分的分解更快<sup>[33-34]</sup>。根桩的胡敏酸和富里酸储量大于木桩和树皮,主要是因为根桩主要分布于近地面和地下,相对稳定的环境和较高的水分更适宜微生物(尤其是真菌)的定殖,使其活性更高,腐殖质的积累主要受微生物的驱使,因而根桩在腐解过程中可能积累更多胡敏酸和富里酸。当腐殖化进行到一定程度时,逐渐增加的难降解组分可能成为限制腐殖化的主要因子<sup>[35]</sup>。已有研究表明,树皮中的难降解物质含量相对较高<sup>[18]</sup>,腐殖质的累积也可能相应增加,但本研究发现,树皮的胡敏酸和富里酸储量均最小。这可能是因为树皮处于伐桩系统的最外部,树皮比木桩更易受土壤动物的啃食和环境变化的影响,降水的淋洗能使大量的可溶性组分流失(尤其是酸溶性组分)<sup>[15]</sup>,从而导致树皮的可提取腐殖质碳储量降低。对于不同径级的根系而言,径级的大小一定程度上可以反映根系的物理和化学性质<sup>[35]</sup>。一般地,径级小的根系有较大的比表面积,这可能会加速其破碎、分解的速率<sup>[13, 36]</sup>,但也有学者认为根系径级的大小对其分解没有显著影响<sup>[37]</sup>。本研究表明,大径级根系的胡敏酸和富里酸储量大于小径级根系,这可能是受根系质量的影响<sup>[38]</sup>;较大的比根长和比根表面积使得径级小的根系与土壤动物和微生物接触的机会更多,其难降解物质可能积累较少,这阻碍了小径级根系的腐殖化进程,故小径级根系上络合的胡敏酸和富里酸较少。

相对于富里酸而言,胡敏酸聚合程度更高,并拥有更多的脂肪族基团和更少的芳香族基团及羧基<sup>[39]</sup>。本研究中胡敏酸含量(图 1)和 HA/FA(图 5)逐渐增加,而富里酸含量逐渐减小(图 3),说明马尾松人工林根桩系统各组分的胡敏酸形成速度逐渐大于富里酸,至此腐殖质的形成由简单到复杂,聚合程度逐渐变大。该结果与堆肥过程中可提取腐殖质碳演化规律一致<sup>[40-41]</sup>,说明富里酸可能是腐殖质向胡敏酸转化的中间产物。伐桩系统的胡敏酸和富里酸含量都在第 7 年出现最大值(图 1),可能是微生物和土壤动物在伐桩上的定植需要一定时间使得其含量的增加出现滞后性。此外,本研究还发现,对于不同径级的根系而言,径级大于 100 mm 的根系(R4)的胡敏酸/富里

酸增加量最大,但是径级为 25 ~ 100 mm 的根系(R3)最小,胡敏酸/富里酸的变化并没有随根系径级大小表现出相应变化,这表明根系的径级大小对其腐熟化程度没有显著影响,可能它主要受到根系质量的控制。

### 4 结论

马尾松人工林的伐桩经过 15 a 的腐解后,胡敏酸含量变大,富里酸含量减小;胡敏酸和富里酸的储量都降低。各组分的积累动态多与伐桩系统相似。总体而言,根桩对马尾松伐桩胡敏酸、富里酸的影响大于木桩和树皮;大径级根系对其的影响大于小径级根系。由于伐桩在林地表面的存留时间较长,存在状态和生态功能对森林生态系统碳循环的影响较为复杂,尽管本研究结果与马尾松伐桩实际的腐解过程还存在一定差异,但仍可以为其腐解过程中的碳吸存与自肥作用提供科学依据,为马尾松人工林的经营与调控提供理论参考。

### 参考文献

[ 1 ] Hakkila P, Parikka M. Bioenergy from sustainable forestry [M]. Austin: Springer Netherlands, 2006.

[ 2 ] Palviainen M, Finér L, Laiho R, et al. Carbon and nitrogen release from decomposing Scots pine, Norway spruce and silver birch stumps [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3): 390-398.

[ 3 ] Lal R. Forest soils and carbon sequestration [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/3): 242-258.

[ 4 ] Pregitzer K S, Eugénie S E. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age [J]. Global Change Biology, 2004, 10(12): 2 052-2 077.

[ 5 ] 黄志群,徐志红,Boyd S,等. 连栽杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)林中树桩分解过程中的化学组分变化趋势[J]. 科学通报,2005,50(21):2 365-2 369.

[ 6 ] Strömgren M, Egnell G, Olsson B A. Carbon stocks in four forest stands in Sweden 25 years after harvesting of slash and stumps [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 290(3): 59-66.

[ 7 ] Melin Y, Petersson H, Nordfjell T. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden: a modelling approach [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(5): 1 445-1 451.

[ 8 ] Shorohova E, Ignatyeva O, Kapitsa E, et al. Stump decomposition rates after clear-felling with and without prescribed burning in southern and northern boreal forests in Finland [J]. Fuel and Energy Abstracts, 2012, 263(1):74-84.

[ 9 ] Grégoire T F, Weedon J T, Aerts R, et al. Interspecific

- differences in wood decay rates: insights from a new short-term method to study long-term wood decomposition [J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(1): 161-170.
- [10] 法蕾,张春雨,赵秀海,等. 长白山地区阔叶红松林水曲柳伐根分解过程中真菌动态研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(1): 13-17.
- [11] Cleary M R, Arhipova N, Morrison D J, et al. Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: a synthesis of results from long-term trials [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 290(1): 5-14.
- [12] Kueppers L, Southon J P, Harte J. Dead wood biomass and turnover time, measured by radiocarbon, along a subalpine elevation gradient[J]. *Oecologia*, 2004, 141(4): 641-651.
- [13] Palviainen M, Finér L. Decomposition and nutrient release from Norway spruce coarse roots and stumps: a 40-year chronosequence study[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 358: 1-11.
- [14] Gonzalez-Benecke C A, Gezan S A, Albaugh T J, et al. Local and general above-stump biomass functions for loblolly pine and slash pine trees [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334(suppl 1): 254-276.
- [15] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] Shorohova E, Kapitsa E. Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 315(315): 173-184.
- [17] 倪祥银,杨万勤,徐李亚,等. 雪被斑块对高山森林凋落叶腐殖化过程中胡敏酸和富里酸累积的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1138-1152.
- [18] 常晨晖,吴福忠,杨万勤,等. 高寒森林倒木在不同分解阶段的质量变化[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 14-22.
- [19] Kuang Y W, Sun F F, Wen D Z, et al. Tree-ring growth patterns of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) during the recent decades in the acidification Pearl River Delta of China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(8/9): 534-540.
- [20] 徐云岩,宫渊波,付万权,等. 川南马尾松低效林不同改造措施对土壤碳、氮特征及其碳稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 225-230.
- [21] Zhao M, Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 207(3): 295-313.
- [22] 闫恩荣,王希华,黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 158-167.
- [23] Wang W, Zhang X, Tao N, et al. Effects of litter types, microsite and root diameters on litter decomposition in *Pinus sylvestris* plantations of northern China [J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 677-688.
- [24] 汪沁,杨万勤,吴福忠,等. 马尾松人工林伐桩储量与分解特征[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(5): 458-468.
- [25] 矫丽娜,李志洪,殷程程,等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 665-672.
- [26] 窦森,周桂玉,杨翔宇,等. 生物质炭及其与土壤腐殖质质的关系[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 796-802.
- [27] 方晰,田大伦,胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态[J]. *中南林业科技大学学报*, 2003, 23(2): 11-15.
- [28] 徐慧芳,宋同清,黄国勤,等. 广西不同林龄马尾松碳储量及分配格局[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(1): 195-203.
- [29] 巫涛,彭重华,田大伦,等. 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布[J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4034-4042.
- [30] 杨玉盛,郭剑芬,林鹏,等. 格氏栲天然林与人工林粗木质残体碳库及养分库[J]. *林业科学*, 2005, 41(3): 7-11.
- [31] 刘峰,杨雪青,李忠清. 纳板河流域季风常绿阔叶林碳蓄积潜能初探[J]. *环境科学导刊*, 2016, 35(3): 1-5.
- [32] 肖洒,吴福忠,杨万勤,等. 高山峡谷区暗针叶林木质残体储量及其分布特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1352-1359.
- [33] Mattson K G, Swank W T, Waide J B. Decomposition of woody debris in a regenerating, clear-cut forest in the Southern Appalachians [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(7): 712-721.
- [34] Garrett L G, Kimberley M O, Oliver G R, et al. Decomposition of woody debris in managed *Pinus radiata* plantations in New Zealand [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(8): 1389-1398.
- [35] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects [J]. *Oecologia*, 2001, 129(3): 407-419.
- [36] 唐仕姗,杨万勤,王海鹏,等. 川西亚高山 3 个优势树种不同径级根系分解特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 2921-2927.
- [37] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P. Decomposition and nitrogen release from decomposing woody roots in coniferous forests of the Pacific Northwest: a chronosequence approach [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(2): 246-260.
- [38] Tamura M, Tharayil N. Plant litter chemistry and microbial priming regulate the accrual, composition and stability of soil carbon in invaded ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 110-124.
- [39] Waksman S A. What is humus? [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1925, 11(8): 463-468.
- [40] 李翠兰,张晋京,窦森,等. 玉米秸秆分解期间土壤腐殖质数量动态变化的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2009, 31(6): 729-732.
- [41] 刘鑫,窦森,李长龙,等. 开垦年限对稻田土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 137-145.