

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.05.016

杉木和柳杉人工林的土壤理化性质对比

王伟平¹,李绍才¹,孙海龙^{2*},缪宁¹,马瑞¹,陶文静¹,杨皓¹

(1. 四川大学生命科学学院,生物资源和生态环境重点实验室,四川成都 610065;

2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川成都 610065)

摘要:以四川龙门山地区杉木和柳杉人工林为研究对象,对比分析两种人工林林下0~10 cm土层的土壤理化性质,并采用主成分分析法对土壤肥力进行综合评价。两种林型的土壤均呈弱酸性,样地间土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾含量差异显著($p < 0.05$)。基于全国第二次土壤普查养分分级标准,两种林型的全氮和碱解氮含量均呈极富水平。柳杉林样地土壤全氮和碱解氮含量分别为杉木林样地的2.3倍和2.4倍。两个样地的土壤有机质含量处于中等以上水平,柳杉林样地的土壤有机质含量为杉木林样地的2.3倍。两种林分的全钾、速效钾、全磷含量处于中等偏低水平,速效磷含量为缺乏状态。杉木和柳杉人工林土壤肥力质量综合得分分别为-0.434和0.866,表明柳杉人工林的土壤肥力优于杉木人工林的土壤肥力。

关键词:龙门山区;杉木;柳杉;人工林;土壤理化性质;主成分分析;土壤肥力评价

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2018)05-0068-06

A Comparative Study of Soil Physical and Chemical Properties of *Cunninghamia lanceolata* and *Cryptomeria fortunei* Plantations

WANG Wei-ping¹ LI Shao-cai¹ SUN Hai-long^{2*} MIAO Ning¹

MA Rui¹ TAO Wen-jing¹ YANG Hao¹

(1. Key Laboratory of Bio-resources and Eco-environment of Ministry of Education, College of Life Sciences,

Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065, Sichuan, P. R. China)

Abstract: The *Cunninghamia lanceolata* and *Cryptomeria fortunei* plantations were chosen as the research object in the Longmen Mountains. The physical and chemical properties of two plantations were analyzed and compared and principal component analysis (PCA) methods topsoil (0~10 cm) were used to evaluate the soil fertility. The results showed that the soil samples were acidic. The contents of soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen and available potassium were all significantly different between the two types of plantations ($p < 0.05$). The total nitrogen and available nitrogen were high in the two plantations, according to the Second National Soil Nutrient Classification Standard in China. Total nitrogen and available nitrogen in the *Cr. fortunei* plantations were respectively 2.3 and 2.4 times higher than those in the *Cu. lanceolata* plantations. The content of soil organic matter

收稿日期:2018-05-20

基金项目:国家重点研究计划项目(2016YFD0600203)

作者简介:王伟平(1990-),男,山西忻州人,硕士研究生,研究方向:自然保护区、湿地、森林公园建设与管理。E-mail: wwp1761295204@

126.com

* 通讯作者:孙海龙, e-mail: hailongsun999@163.com。

in the two forests showed moderate level, while soil organic matter in the *Cr. fortunei* plantations were 2.3 times higher than that in *Cu. lanceolata* plantations. Available potassium, total potassium and total phosphorus in the two forests were at low level. The soil quality index of *Cu. lanceolata* plantations and *Cr. fortunei* plantations was -0.434 and 0.866, respectively, which suggested that soil fertility of *Cr. fortunei* plantations was higher than that of *Cu. lanceolata* plantations.

Key words: Longmen mountains, *Cunninghamia lanceolata*, *Cryptomeria fortunei*, Plantation, Soil physical and chemical properties, Principal component analysis, Soil fertility evaluation

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 和柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr)同属于杉科,是我国南方优良速生丰产用材树种,也是四川省用于造林的速生丰产树种。目前,四川省杉木人工林种植面积有减小的趋势,经营者以柳杉代替杉木种植的现象较为普遍。这种经营模式的出现,主要原因是杉木的生长状况不及柳杉人工林,但导致这种生长差异的具体原因还不清楚。因此,进一步开展杉木和柳杉人工林的对比研究,为揭示不同林木生长状况及林木适地经营提供科学依据显得尤为重要。

过去对杉木林和柳杉林的研究都较为深入,其中杉木林主要集中在不同产区单个物种土壤肥力质量^[1]、不同发育阶段土壤肥力^[2]、土壤微生物和酶^[3]、土壤有机碳^[4]、及混栽对土壤肥力质量的影响等方面。如唐建等^[5]、李惠通等^[6]在研究杉木人工林土壤肥力时表明不同发育阶段杉木对土壤理化性质有显著影响,中林龄阶段的杉木土壤肥力状况明显恶化,土壤综合质量指数会降低。对柳杉林的研究主要集中在土壤氮、碳动态、及枯落物对土壤微生物和酶的影响等方面^[7-9]。然而关于同龄的杉木和柳杉人工林的土壤理化性质的对比研究还未见报道。本研究以龙门山地区杉木和柳杉人工林为研究对象,对比分析不同林地土壤理化性质的总体特征,采用主成分分析法对土壤肥力状况进行综合评价,从林地土壤质量方面来分析杉木和柳杉人工林的生长差异,以期为该地区杉木和柳杉人工林的合理经营及抚育提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省彭州市通济镇人工林场(东经 103°40' ~ 104°10'、北纬 30°54' ~ 31°26'),该地区气候温暖湿润,雨量充沛,属于中亚热带湿润气候区;年平均气温 15.8 °C,年均降水量 1 126 mm,年

蒸发量为 965 mm,全年无霜期平均为 278 d,其中 7 月份降雨量最多,平均为 237.3 mm,12 月份最少,平均为 5.5 mm;土壤由砂岩发育而成的山地黄壤,质地粘重,土层较厚,土体呈暗黄色或淡黄色^[10]。

2 材料与方法

2.1 样地调查与选取

彭州市龙门山区域的杉木林主要分布在海拔 800 m ~ 1 250 m 的地区,柳杉林主要分布在 1 100 m ~ 1 900 m 的地区。2017 年 7 月份,在彭州林场杉木和柳杉人工林的适宜生境内,各选取了两个具有代表性、面积为 60 m × 60 m 的人工林样地。样地坡向均为南坡,光照充足,调查了林分密度、林分年龄、林分郁闭度,胸径、树高、灌木盖度、草本盖度、坡度和海拔。样地情况见表 1。

表 1 样地概况
Tab. 1 Situation of study plots

林型	林龄 (a)	密度 (n · hm ⁻²)	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	蓄积量 (m ³ · hm ⁻²)	
杉木林	17	3 322	9.94	8.40	122.78	
柳杉林	16	1 206	19.92	11.02	146.21	
林型	林龄 (a)	郁闭度	灌木盖度 (%)	草本盖度 (%)	海拔 (m)	坡度 (°)
杉木林	17	0.90	10	25	960	10 ~ 20
柳杉林	16	0.75	20	40	1850	10 ~ 15

2.2 土壤样品的采集

土壤样品于 2017 年 7 月采集,在土壤采样前,将杉木样地平均分成 5 m × 5 m 的小样方,柳杉样地平均分成 10 m × 10 m 的小样方(柳杉初值密度较小,选取样方较大),并分别将每个样方按照 S 形分布依次编号,杉木编号为 S1、S2……S144,柳杉编号为 L1、L2……L36。采样时,杉木以隔行“S”形路线进行采样,共 37 个采样点,柳杉以“S”形路线选取 18 个采样点,全部用环刀法取样,取样时将表层的枯落物清除掉,选取 0 ~ 10 cm 的表层土壤,最后将

各点采集的土样装入塑料带中,并贴上标签。

2.3 土壤理化性质的测定

环刀取样测定土壤物理性质,包括土壤容重、孔隙度、土壤密度和自然含水量。采集的土样经过自然风干,去除杂质,磨细过孔径为 0.154 mm 的土壤筛,用于土壤有机质、pH 值、氮、磷、钾化学性质的测定。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法;土壤 pH 值采用酸度计法(水土比为 2.5:1);土壤全氮采用半微量凯氏定氮法;碱解氮采用碱解-扩散吸收法;全磷采用硫酸-高氯酸酸溶-钼锑抗比色法测定;有效磷采用盐酸-硫酸浸提,钼锑抗比色法;全钾、速效钾均采用原子吸收分光光度法^[11]。

2.4 土壤肥力质量评价方法

本研究采取主成分分析法,为尽量减少变量之间存在的多重共线性而引起的极大误差,从土壤容重、孔隙度、土壤密度、含水量、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 值和有机质 12 个指标中提取可以反映土壤肥力质量的综合性指标,并用其进行土壤肥力质量的评价。

2.5 土壤养分分级标准

根据土壤肥力质量选择原则,结合四川省彭州市龙门山区土壤的实际情况,将全国第二次土壤普查养分分级标准作为研究土壤肥力状况的基本指标^[12]。

2.6 数据处理

数据处理采用 Excel2003 进行,用 SPSS22.0 统计软件对土壤指标进行基本统计。不同林分类型土壤理化性质比较采用 t 检验,采用主成分分析法对土壤肥力综合指数进行计算。

本研究中,作为土壤肥力评价指标的土壤全氮、

全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、容重、总孔隙度、土壤密度、含水量、有机质和 pH 值在数值上差异较大,评价指标的量纲不同,在研究时对各指标进行标准化处理,其处理方法为^[13]:

$$X'_{ik} = \frac{X_{ik} - \bar{X}_k}{S_k}$$

式中: \bar{X}_k 是各个指标的平均值; X_{ik} 其中 ($i=1,2$ 代表不同样地) $k(1,2,\dots,12)$ 为原始数据; S_k 为第 k 个指标的标准差。

经主成分分析后,得到主成分公因子方差、载荷矩阵和贡献率;主成分特征向量等于对应的载荷矩阵值除以该成分特征值的平方根^[14]。将主成分特征向量与标准化数据相乘得到各样地主成分因子得分。采用加权法计算土壤肥力综合得分,其表达式为^[15]:

$$IFI = \sum W_i \times F_i$$

式中: W_i 为各主成分贡献率; F_i 为各林分主成分因子得分。

3 结果与分析

3.1 不同林分类型土壤物理性质的比较

不同样地的土壤物理性质情况如表 2。结果可知,不同林分 0~10 cm 土层的土壤物理性质差异明显,其中柳杉林土壤含水量远高于杉木林,差异极显著 ($p < 0.01$);土壤密度、容重和总孔隙度均达到一般显著水平 ($p < 0.05$),人工柳杉林的土壤密度和容重明显小于人工杉木林,土壤总孔隙度大于杉木林,表明杉木林土壤相对板结和紧实,人工柳杉林土壤更疏松、通气性更好,更有利于土壤养分循环。

表 2 不同林分类型的土壤物理性质
Tab. 2 Soil physical properties in the different plantations

林型	土层 (cm)	土壤密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量 (%)	容重 ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度 (%)
杉木林	0-10	1.70 ± 0.17a	17.33 ± 6.10A	1.55 ± 0.14a	43.23 ± 5.42a
柳杉林	0-10	1.34 ± 0.21b	29.89 ± 9.60B	1.22 ± 0.19b	53.93 ± 6.01b

注:表中数据为平均值 ± 标准差,a,b 表示两种林分类型的土壤差异显著水平 ($p < 0.05$),A,B 表示差异极显著水平 ($p < 0.01$),不标注则表示差异不显著,n=55,下同。

3.2 不同林分类型土壤化学性质的比较

土壤 pH 值的变异特点 土壤酸碱性作为土壤的基本性质,是土壤肥力的重要影响因素,直接影响土壤化学性质的变化以及养分的迁移和释放。通过对土壤 pH 值的测定,不同人工杉木林和柳杉林土壤

均为弱酸性土壤,杉木样地的土壤 pH 值显著高于柳杉样地 ($p < 0.01$) (见表 3)。

土壤有机质的变异特点 土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分,是植物有机养分和矿质营养的重要来源,是影响土壤肥力的重要指标^[16]。不

同林分土壤有机质含量差异达到极显著水平,柳杉样地有机质含量是杉木样地的 2.3 倍,处于极富水平 ($>40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),而杉木样地的有机质含量处于中等水平 ($20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

土壤大量元素的变异特点 柳杉样地在全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾各个水平上的含量均高于杉木样地,其中全氮、全磷、全钾和碱解氮含量差异均达到极显著水平 ($p < 0.01$),速效钾含量差异达到一般显著水平 ($p < 0.05$),速效磷含量差

异不明显 ($p > 0.05$) (见表 3)。柳杉样地碱解氮平均含量为杉木样地的 2.4 倍,均达到极富水平 ($>150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。杉木样地和柳杉样地速效磷平均含量均小于 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明各样地的速效磷含量比较缺乏。杉木样地速效钾的平均含量明显小于柳杉样地 ($p < 0.05$)。相比之下,柳杉样地土壤速效钾达到中等水平 ($100 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而杉木样地土壤速效钾含量处于较低水平 ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

表 3 不同林分类型的土壤化学性质

Tab. 3 Soil chemical properties in the different plantations

林型	土层 (cm)	pH 值	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
杉木林	0~10	6.58 ± 0.18A	27.91 ± 6.08A	2.10 ± 0.54A	0.27 ± 0.08a	13.37 ± 2.88A	209.21 ± 48.31A	2.38 ± 1.41	86.54 ± 21.82a
柳杉林	0~10	5.35 ± 0.30B	65.26 ± 12.99B	4.92 ± 1.03B	0.37 ± 0.11b	19.52 ± 3.04B	496.85 ± 91.83B	2.86 ± 2.21	150.95 ± 36.46b

3.3 不同人工林土壤肥力的主成分分析

本研究中,选择表层土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、pH 值、质量含水量、总孔隙度和土壤密度组成土壤肥力评价指标体系,进行主成分分析。根据主成分累积贡献率达到 85% 为宜的原则^[17],选取前 3 个特征值,即前 3 个主成分(见表 4)。第 1 主成分方差贡献率为 61.995%,第 2 主成分方差贡献率为 15.268%,第 3 主成分方差贡献率为 7.566%,前 3 个主成分的累积贡献率为 84.892%,因此,前 3 个主成分的综合指标基本能反映土壤肥力评价系统内的变异信息。即前 3 个主成分基本包含了全部 11 个评价因子的所有信息,可以综合反映土壤肥力质量状况。

表 4 总方差解释表

Tab. 4 Interpretation of total variance

成份	初始特征值			提取平方和载入		
	特征根	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)	特征根	方差贡献率 (%)	累积方差贡献率 (%)
1	6.820	61.995	61.995	6.820	61.995	61.995
2	1.679	15.268	77.263	1.679	15.268	77.263
3	0.832	7.566	84.829	0.832	7.566	84.829
4	0.635	5.771	90.601			
5	0.474	4.307	94.907			
6	0.257	2.339	97.246			
7	0.175	1.588	98.834			
8	0.082	0.75	99.584			
9	0.046	0.416	100			
10	1.02E-05	9.31E-05	100			
11	1.61E-16	1.47E-15	100			

由表 5 成分矩阵可知:第 1 主成分中,土壤全氮、全钾、速效钾、有机质、碱解氮和总孔隙度具有较大的负荷量,第 2 主成分中土壤全磷、速效磷质量分数具有较大的负荷量,第 3 主成分中土壤容重和土壤密度具有较大的负荷量。根据土壤肥力指标的得分系数矩阵建立土壤肥力综合得分 (IFI) 的数学模型。经计算,土壤肥力状况的第一主成分 (F_1)、第 2 主成分 (F_2)、第 3 主成分 (F_3) 得分表达式分别为:

$$F_1 = 0.135X_1 + 0.073X_2 + 0.107X_3 + \dots + 0.127X_{11}$$

$$F_2 = 0.029X_1 + 0.312X_2 + 0.107X_3 + \dots - 0.226X_{11}$$

$$F_3 = 0.203X_1 + 0.251X_2 + 0.047X_3 + \dots - 0.387X_{11}$$

式中: $X_1 - X_{11}$ 是标准化变量。最后,将土壤肥力质量评价指标的原始数值标准化后计算各主成分的得分,再以各主成分的贡献率为权重,计算出各样地的肥力质量综合得分(见表 6),土壤肥力质量综合得分表达式:

$$IFI = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \right) F_1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \right) F_2 + \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \right) F_3$$

式中: λ_i 为初始特征根。计算结果表明:杉木和柳杉人工林土壤肥力质量综合得分分别为 -0.434, 0.866。土壤综合肥力表现为:柳杉人工林 > 杉木人工林。

表5 成分矩阵及特征向量矩阵
Tab.5 Coefficient matrix and eigenvector matrix

指标	成分矩阵			特征向量矩阵		
	成分1	成分2	成分3	t_1	t_2	t_3
全氮 (X_1)	0.922*	0.048	0.169	0.135	0.029	0.203
全磷 (X_2)	0.498	0.524*	-0.209	0.073	0.312	-0.251
全钾 (X_3)	0.733*	0.383	-0.039	0.107	0.228	-0.047
速效磷 (X_4)	0.096	0.824*	-0.44	0.014	0.491	-0.529
速效钾 (X_5)	0.706*	0.359	0.269	0.103	0.214	0.324
有机质 (X_6)	0.857*	0.115	0.212	0.126	0.069	0.255
pH (X_7)	-0.927	-0.001	-0.259	-0.136	-0.001	-0.311
含水量 (X_8)	-0.864	0.379	0.522*	-0.127	0.226	0.587
土壤密度 (X_9)	-0.862	0.381	0.523*	-0.126	0.227	0.588
碱解氮 (X_{10})	0.921*	-0.038	0.263	0.135	-0.023	0.316
总孔隙度 (X_{11})	0.864*	-0.379	-0.322	0.127	-0.226	-0.387

注: * 表示各主成分、因子载荷中占比较大元素的系数。

表6 不同林分土壤肥力质量综合得分

Tab.6 Comprehensive scores of soil fertility quality in different stands

林型	主成分1得分	主成分2得分	主成分3得分	综合得分
杉木林	-0.641	-0.240	0.003	-0.434
柳杉林	1.315	0.120	0.423	0.866

4 讨论

研究表明,不同样地的土壤容重和总孔隙度均达到显著差异,杉木样地土壤容重大于柳杉样地,总孔隙度小于柳杉样地。土壤容重和总孔隙度是重要的土壤物理性质指标,容重大小可以反映土壤通气性、透水性和根系伸展的阻力状况,而土壤孔隙是土壤水分、养分等迁移的通道和储存的库,也是根系生长的场所^[18,19],研究表明柳杉样地土壤更疏松、土壤含水量更高、透气性更好,表明柳杉人工林土壤物理性质优于杉木人工林,更利于林木的生长。

土壤氮、磷、钾是植物生长必不可少的大量营养元素,全氮、全磷、全钾是影响土壤肥力的重要因子,其中有效态的氮、磷、钾含量为土壤供应肥力的确切指标,决定土壤肥力水平^[5]。本研究结果表明,柳杉样地和杉木样地土壤全氮、碱解氮含量差异极显著($p < 0.01$)。柳杉人工林全氮、碱解氮含量较高,分别是杉木人工林的2.3倍、2.4倍,均达到极富水平(全氮 $> 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $> 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由于土壤氮素养分的含量与有机质密切相关,虽然研究样地海拔有所差异,土壤温度会影响有机质的矿化率,但是土壤条件基本一致,其影响结果是有限的。研究表明,柳杉人工林土壤有机质含量是

杉木的2.3倍,差异极显著,其主要原因在于不同林分类型的地表枯落物含量、林下植被根系以及部分动物和微生物的残体存在差异,导致不同林分土壤有机质含量不同^[20]。因此导致不同林分类型土壤氮素含量的差异。柳杉样地土壤全磷、速效磷、全钾、速效钾含量均大于杉木样地,且不同样地间全磷含量达到显著水平($p < 0.05$),但均处于缺乏状态;不同样地的全钾和速效钾含量差异显著,杉木样地含量处于偏低水平,柳杉样地含量处于中等水平;而样地间速效磷含量差异不显著,柳杉样地含量稍高,但均处于缺乏水平。周秀英等^[21]在研究闽北山地杉木纯林时也表明土壤全磷含量偏低,而速效磷含量极其缺乏。可能原因是该地区雨量充沛,土壤腐殖质和凋落物的分解物及有机物不断迁移、淋溶而损失的影响^[22]。因此,在林木经营过程中,可以根据土壤具体情况来适当的施加钾肥和磷肥及有机肥等措施,或者通过合理配置树种、可以与乡土树种进行株间行间式混交或块状镶嵌式混交,如厚朴、枫杨、刺楸等;从抚育管理方面讲,杉木人工林林分密度较大,与同龄柳杉林相比,平均胸径和树高均小于柳杉人工林,应及时对杉木林进行抚育和间伐,以提高林木的生产力。

利用主成分分析法对两种林分类型土壤肥力的综合评价表明,不同的林分类型对土壤肥力状况的影响不同,柳杉人工林的土壤肥力状况优于杉木人工林的土壤肥力。这可能与不同林型的林分结构有关。调查显示,柳杉人工林林分密度和林分郁闭低于杉木人工林,林下光照比较充分,可能导致柳杉人工林林下微环境优于杉木人工林,更易于林下凋落物和腐殖质的分解及养分的释放^[23,24]。同时段文霞等^[25]在研究柳杉人工林土壤性质的动态变化时,也表明随着柳杉林龄的增长,柳杉土壤碳蓄积量、关键作用,导致不同林分类型的人工林生长状况有明显差异。

参考文献:

- [1] Yu Y, Yang J, Zeng S, et al. Soil pH, organic matter, and nutrient content change with the continuous cropping of *Cunninghamia lanceolata* plantations in South China [J]. J Soils Sediments 2017, 17 (9): 2230 ~ 2238.
- [2] 吴永铃. 杉木人工林不同发育阶段土壤肥力综合评价研究 [J]. 西北农林科技大学学报, 2011, 39(1): 70 ~ 75.
- [3] Hu Y, Wang S, Zeng D. Effects of single *Chinese fir* and mixed leaf

- litters on soil chemical, microbial properties and soil enzyme activities [J]. *Plant & Soil*, 2006, 282(1/2): 379 ~ 386.
- [4] Cheng X, Yu M, Wang G G. Effects of Thinning on Soil Organic Carbon Fractions and Soil Properties in *Cunninghamia lanceolata* Stands in Eastern China [J]. *Forests*, 2017, 8(6): 198.
- [5] 唐健,覃祚玉,王会利,等. 广西杉木主产区连栽杉木林地土壤肥力综合评价[J]. *环境与科学学报*, 2016, 36(1): 30 ~ 35.
- [6] 李惠通,张芸,魏志超,等. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 322 ~ 328.
- [7] 石薇,王景燕,魏有波,等. 水热条件对华西雨屏区柳杉人工林土壤氮矿化的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(06): 1430 ~ 1436.
- [8] 李鑫,陈先刚,白明锐,等. 宣威市退耕还林柳杉林地土壤有机碳含量及活性组分的林龄变化[J]. *林业科学*, 2017, 53(01): 11 ~ 19.
- [9] 王丹,马元丹,郭慧媛,等. 模拟酸雨胁迫与柳杉凋落物对土壤养分及微生物的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(02): 195 ~ 203.
- [10] 龚杨平. 四川龙门山地区柳杉人工林生长模拟与可视化研究[D]. 四川农业大学, 2011.
- [11] 鲍士旦. 土壤化学分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 25 ~ 109.
- [12] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [13] 钱登峰. 华北土石山区典型植物群落土壤健康评价[D]. 西南大学, 2007.
- [14] 张子龙,王文全,缪作清,等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1636 ~ 1644.
- [15] 靳正忠,雷加强,徐新文,等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤肥力质量变化与评价[J]. *科学通报*, 2008, 53(S2): 112 ~ 122.
- [16] 游秀花,蒋尔可. 不同森林类型土壤化学性质的比较研究[J]. *江西农业大学学报*, 2005, 27(3): 357 ~ 360.
- [17] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009: 153 ~ 169.
- [18] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [19] 杨玉盛,李振问,俞新妥,等. 杉木油桐仙人草复合经营的土壤结构特性与水分性质的研究[J]. *南京林业大学学报*, 1993, 17(3): 75 ~ 79.
- [20] Hardtle W, von Oheimb G, Friedei A, et al. Relationship between pH-values and nutrient availability in forest soils: The consequences for the use of ecograms in forest ecology [J]. *Flora: M., D., F., E. of Plant*, 2004, 199(2): 134 ~ 142.
- [21] 周秀英. 闽北山地杉木纯林和杉阔混交林的土壤肥力[J]. *福建林学院学报*, 2010, 30(2): 150 ~ 153.
- [22] 杨晓娟. 吉林省东部低山丘陵区 4 种林分类型林地的土壤肥力分析[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 143 ~ 148.
- [23] 张昌顺,李昆. 人工林地力的衰退与维护研究综述[J]. *世界林业研究*, 2005, 01: 17 ~ 21.
- [24] 马祥庆,黄宝龙. 人工林地力衰退研究综述[J]. *南京林业大学学报*, 1997, 02: 79 ~ 84.
- [25] 段文霞,朱波,等. 人工柳杉林碳蓄积量及土壤性质的动态变化[J]. *应用与环境生物学报*, 2007(06): 777 ~ 781.

(上接第 28 页)

能获得高含量的桉叶油总量和有效成分,有利于规模化生产桉叶油。因此进一步优化桉叶油提取条件,提高生产率,降低成本将有利于桉叶油的扩大化生产,提高桉树资源的综合利用率。

参考文献:

- [1] 周莉君,丁涛,杨志荣,等. 巨尾桉不同树龄及染虫状态桉叶油的成分分析[J]. *天然产物研究与开发*, 2016, 28(11): 1747 ~ 1751.
- [2] Orafidiya L O, Oladimeji F A. Determination of the required HLB values of some essential oils [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2002, 237(1 ~ 2): 241 ~ 250.
- [3] 涟漪. 桉树油[J]. *国外医药:植物药分册*, 2006, 21(3): 138.
- [4] 田玉红,张祥民,黄泰松,等. 桉叶油的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2007, 33(10): 139 ~ 143.
- [5] Zhou L J, Li F R, Huang L J, et al. Antifungal Activity of *Eucalyptus* Oil against Rice Blast Fungi and the Possible Mechanism of Gene Expression Pattern [J]. *Molecules*, 2016, 21(5): doi: 10.3390/molecules21050621.
- [6] 肖正春,张卫明,张广伦,等. 生物柴油植物桉树类叶油的开发利用[J]. *中国野生植物资源*, 2008, 27(2): 19 ~ 20.
- [7] 田玉红,杨旭,杨昌尚,等. 广林九号桉叶挥发油的化学成分分析[J]. *时珍国医国药*, 2012, 23(2): 302 ~ 303.
- [8] 刘真一,陈月圆,李典鹏. 不同生长年限巨尾桉叶挥发性成分 GC-MS 分析[J]. *广西植物*, 2012, 32(5): 701 ~ 705.
- [9] 田玉红,刘雄民,陶明有. 巨尾桉叶挥发性成分的提取及成分分析[J]. *广西科学院学报*, 2006, 22(s): 466 ~ 468.
- [10] 周莉君,黄丽杰,杨志荣,等. 响应面分析法优化超临界 CO₂ 萃取巨尾桉挥发油的工艺研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2014, 51(6): 1919 ~ 1924.
- [11] 梁呈元,傅晖,李维林,等. 薄荷油不同提取方法的比较[J]. *时珍国医国药*, 2007, 18(9): 2085 ~ 2086.
- [12] 罗嘉良,束永芳. 三种桉叶油化学成分研究[J]. *天然产物研究与开发*, 1991, 3(3): 79 ~ 82.
- [13] 王文元,顾丽莉,关志民. 1,8-桉叶油素的研究进展[J]. *食品与药品*, 2007, 9(2): 56 ~ 59.