

## 不同林药复合经营模式对杉木生态公益林土壤理化性质的改良效果

李晨晨<sup>1,2</sup>, 周再知<sup>1</sup>, 梁坤南<sup>1</sup>, 黄桂华<sup>1</sup>, 杨光<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 广东省广州市白江湖森林公园管理处, 广东 广州 511390)

**摘要:** 为筛选适宜的林药模式, 促进杉木 *Cunninghamia lanceolata* 生态公益林改造和林下经济的健康发展, 研究了杉木与药用植物复合经营对退化林地土壤理化性质的影响。采用完全随机区组试验设计在杉木生态公益林内构建 8 种复合经营模式。在模式内分层取土测定 6 个物理指标和 9 个化学指标, 并采用灰色关联法对各模式的改良效果进行综合评价。结果表明: 8 种药用植物均能显著 ( $P < 0.05$ ) 改善土壤物理性质和养分质量分数, 尤其是对表层土壤, 其中土壤含水量、田间持水量、总孔隙度以杉木+胆木 *Nauclea officinalis* 模式改良效果为佳, 分别比杉木纯林模式提高 50.5%, 75.1% 和 36.9%; 非毛管孔隙度以杉木+石笔木 *Tutcheria championi* 模式最佳, 是纯林的 1.1 倍; 土壤容重以杉木+梅叶冬青 *Ilex asprella* 模式最低, 比纯林降低了 22.3%。土壤有机质、有效氮、速效钾、全钾和全磷质量分数以杉木+草豆蔻 *Alpinia katsumadai* 最高, 分别比纯林提高了 41.8%, 35.0%, 108.1%, 42.4% 和 37.0%; 土壤有效磷质量分数以杉木+裸花紫珠 *Callicarpa nudiflora* 最高, 是杉木纯林的 2.1 倍; 土壤全氮和阳离子交换量分别以杉木+胆木和杉木+金花茶 *Camellia nitidissima* 模式最高, 分别比杉木纯林提高 32.1% 和 52.0%。20~40 cm 土层中, 土壤物理性质亦有不同程度的提高, 而养分大多差异不显著。灰色关联分析表明: 8 种林药模式对杉木生态公益林土壤理化性质改良效果关联度大小排序为: 杉木+草豆蔻 > 杉木+胆木 > 杉木+梅叶冬青 > 杉木+红豆杉 *Taxus chinensis* > 杉木+石笔木 > 杉木+裸花紫珠 > 杉木+土沉香 *Aquilaria sinensis* > 杉木+金花茶 > 杉木纯林。杉木+草豆蔻模式是本研究中改良杉木生态公益林林地土壤理化性质最佳的复合模式, 可考虑推广应用。图 3 表 3 参 26

**关键词:** 森林土壤学; 复合经营模式; 药用植物; 生态公益林; 土壤物理性质; 土壤化学性质; 灰色关联度分析  
**中图分类号:** S714.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2018)01-0051-09

## Physical and chemical properties of ecological forest soils using different agroforestry patterns of Chinese fir with medicinal plants

LI Chenchen<sup>1,2</sup>, ZHOU Zaizhi<sup>1</sup>, LIANG Kunnan<sup>1</sup>, HUANG Guihua<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;  
2. Administration Office of Baijianghu Forest Park of Guangzhou, Guangzhou 511390, Guangdong, China)

**Abstract:** The objective of this research was to screen out appropriate forest and medicinal plant agroforestry patterns of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) with medicinal plants and determine the effect on soil physical and chemical properties so as to promote the reconstruction of an ecological forest and healthy development of an understory-forest economy. A completely randomized block experimental design was used to establish eight agroforestry patterns including [SD (Chinese fir (Cf) + *Nauclea officinalis*), SS (Cf + *Tutcheria championi*), SM (Cf + *Ilex asprella*), SC (Cf + *Alpinia katsumadai*), SL (Cf + *Callicarpa nudiflora*), SJ (Cf + *Camellia nitidissima*), SH (Cf + *Taxus chinensis*), and ST (Cf + *Aquilaria sinensis*)] and a control of Chinese fir with six physical and nine chemical indexes at 0–20 cm and 20–40 cm soil layers having three replications.

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-04-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0504)

作者简介: 李晨晨, 从事药用植物栽培研究。E-mail: 1432385025@qq.com。通信作者: 周再知, 研究员, 博士生导师, 从事药用植物栽培研究。E-mail: zzzhoucn@126.com

The grey correlation method was used to evaluate the improvement effect. Results showed that eight patterns significantly ( $P < 0.05$ ) improved the surface soil physical properties and nutrient content. SD had the best improvement with higher soil quality water content (50.5%), field water holding capacity (75.1%), and total capillary porosity (36.9%) than the control; whereas, non-capillary porosity in SS was 1.1 times the control. The minimum soil bulk density was reduced 22.3% in SM compared to the control. The highest contents of soil organic matter (41.8%), available N (35.0%), available K (108.1%), total K (35.0%), and total P (108.1%) compared to the control all appeared in SC with soil available P highest in SL. Soil total N reached maximum in SD with cation exchange capacity in SD (32.1%) and SJ (52.0%) higher than the control. The rank of improvement on soil physical and chemical properties for the eight patterns and the control was as  $SC > SD > SM > SH > SS > SL > ST > SJ > \text{control}$ . So Chinese fir and medicinal plant agroforestry patterns improved soil quality with the best pattern being SC (*Alpinia katsumadai* with Chinese fir) which was suitable for popularization and application. [Ch, 3 fig. 3 tab. 26 ref.]

**Key words:** forest soil science; agroforestry pattern; medicinal plants; ecological forest; soil physical properties; soil chemical properties; grey correlation method

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国特有的速生用材树种, 分布广, 栽培历史悠久, 但大面积的纯林经营及连栽, 导致杉木人工林地力严重衰退<sup>[1-3]</sup>。20世纪末, 南方地区大面积杉木人工林被划为生态公益林, 其中绝大部分林分经过多代经营后, 现存林分的生态功能和经济效益十分低下, 生态公益林改造成成为亟待解决的问题。林药复合经营模式是将适宜林下生长的药用植物重新引种到自然环境下进行野生化栽培, 在充分利用林地资源的同时, 使野生药用植物资源得到恢复, 是科学合理的栽植模式<sup>[4]</sup>。杉木和药用植物复合经营一方面能够考虑到复合经营对土壤的改良作用, 另一方面兼顾药用植物带来的经济价值, 逐渐受到人们重视。早期也有少许相关研究, YANG等<sup>[5]</sup>和张鼎华等<sup>[6]</sup>研究发现: 杉木林下栽植砂仁 *Amomum villosum* 后, 土壤容重降低, 土壤孔隙度和持水能力、有机质、全氮、全磷、速效磷、速效钾含量均有不同程度的增加, 各种土壤酶活性提高, 土壤微生物含量增加。选择合适的林药种类是构建林药复合经营模式的关键所在。卢玉鹏等<sup>[7]</sup>研究发现: 秦岭山区太白杨 *Populus purdomii* 林下栽植蒲公英 *Taraxacum mongolicum*, 薄荷 *Mentha haplocalyx* 以及鱼腥草 *Houttuynia cordata* 会对凋落物分解过程中的养分释放和土壤酶活性产生显著的抑制作用, 出现间作劣势。因此, 开展林下适宜栽植的药材品种筛选试验十分有必要。为此, 本试验选取适宜南方地区生长且具有较高经济价值的8种药用植物, 构建林药复合经营模式, 探究不同复合经营模式对退化杉木林地土壤理化性质的影响, 筛选有利于土壤改良的林药经营模式, 为南方生态公益林的可持续经营、高效林药培育体系的建立及林下经济的发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

试验地位于广东省惠州市惠东县梁化林场(23°08'13"~23°13'34"N, 114°42'25"~114°51'05"E), 属亚热带季风气候, 年平均气温为 22.0 °C, 年平均最低气温为 2.9 °C, 最高气温为 36.4 °C, 全年降水量为 1 889.4 mm, 全年平均相对湿度 81%。植被类型为亚热带常绿阔叶林。乔木种类最多的科为樟科 Lauraceae, 壳斗科 Fagaceae 和山茶科 Theaceae。据调查, 试验地于 1956 年砍伐掉原生植被开始栽植杉木, 隔 20~25 a 砍伐 1 次, 上次砍伐是在 2001 年。砍伐后采取萌芽更新, 2006 年被划分为省级生态公益林。现存林分郁闭度为 0.45~0.50, 平均树高为 8.1 m, 平均胸径为 11.2 cm。试验地成土母质是为花岗岩, 土壤属亚热带赤红壤。坡度为 5°~8°, 坡向为阳坡, 坡位为中坡。所选试验地分布为邻近地区, 土壤性质基本保持一致。

### 1.2 试验设计

选用的 8 种药用植物分别为胆木 *Nauclea officinalis*, 石笔木 *Tutcheria championi*, 红豆杉 *Taxus chinensis*, 梅叶冬青 *Ilex asprella*, 金花茶 *Camellia nitidissima*, 裸花紫珠 *Callicarpa nudiflora*, 草豆蔻

*Alpinia katsumadai* 和土沉香 *Aquilaria sinensis*。于 2013 年 4 月, 在杉木萌芽更新林分中构建林药复合经营模式。试验设 9 个处理, 即杉木+胆木(SD), 杉木+石笔木(SS), 杉木+红豆杉(SH), 杉木+梅叶冬青(SM), 杉木+金花茶(SJ), 杉木+裸花紫珠(SL), 杉木+草豆蔻(SC), 杉木+土沉香(ST)及对照(杉木纯林)。采用完全随机区组试验设计, 3 次重复, 小区面积 240 m<sup>2</sup> (20 m × 12 m), 按 1.5 m × 2.0 m 株行距栽植 70 株。小区之间设置 3 m 宽的隔离带。所有小区常规化管理, 每年的 2-3 月除草 1 次, 所除杂草就地覆盖。施肥 2 次·a<sup>-1</sup>, 采用撒施的方式。施用的肥料为氮磷钾复合肥 [m(N):m(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):m(K<sub>2</sub>O)=15:15:15], 施肥量为 730 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 所有小区的施肥量和施肥方式均一致。

### 1.3 土壤取样方法

2016 年 8 月, 在栽植小区内沿对角线, 在两头和中间位置, 距药用植物根部 40 cm 范围处, 挖取土壤剖面, 用环刀法采集 0~20 cm 和 20~40 cm 的土样, 3 次重复, 用于土壤物理性质的测定。同时用土钻, 多点采集相应深度的土样, 充分混合, 经自然分干后, 拣去杂物, 研磨过筛装袋, 3 次重复, 用于养分特性测定。

### 1.4 土壤理化性质分析

土壤物理指标的测定参见 LY/T 1215-1999《森林土壤水分-物理性质的测定》。土壤 pH 值采用电位法测定, 全氮采用凯氏消煮-扩散法测定, 有效氮采用碱解-扩散法, 全磷采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定, 有效磷采用 0.050 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸-0.025 mol·L<sup>-1</sup> 硫酸浸提法测定, 全钾采用氢氧化钠碱液-火焰光度法测定, 速效钾采用 1.000 mol·L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提-火焰光度法测定, 有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 阳离子交换量采用 1.000 mol·L<sup>-1</sup> 乙酸铵交换法测定。

### 1.5 数据分析

采用 Excel 2007 进行数据整理, SPSS 19.0 软件进行统计分析, Duncan 多重比较。应用灰色系统理论的原理和方法<sup>[8-9]</sup>, 对不同复合经营模式土壤理化性质进行灰色关联分析及排序。首先进行数据的标准化, 标准化过程中, 数据分为正负效应 2 种, 其中土壤容重为负效应, 取倒数做正相关处理, 采用极差正规化法。

$$X_{ij} = \frac{t_{ij} - \min t_{ij}}{\max t_{ij} - \min t_{ij}}$$

其中:  $t_{ij}$  表示第  $i$  种模式的第  $j$  个指标,  $i=1, 2, 3, \dots, 9$ ;  $j=1, 2, 3, \dots, 15$ 。  $X_{ij}$  表示标准化后的第  $i$  种模式的第  $j$  个指标。

然后构建参考数列:  $X_0 = \{X_{01}, X_{02}, X_{03}, \dots, X_{0j}\}$  和  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{ij}\}$ 。其中:  $X_0$  为各项指标标准化后的最大值组成的数列,  $X_{0j}$  表示不同模式各项指标标准化后第  $j$  个指标的最大值,  $j=1, 2, 3, \dots, 15$ 。  $X_i$  表示第  $i$  种模式各指标标准化后构成的数列。

计算关联系数:

$$\varepsilon(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0 - X_i| + \rho \max_i \max_k |X_0 - X_i|}{|X_0 - X_i| + \rho \max_i \max_k |X_0 - X_i|}$$

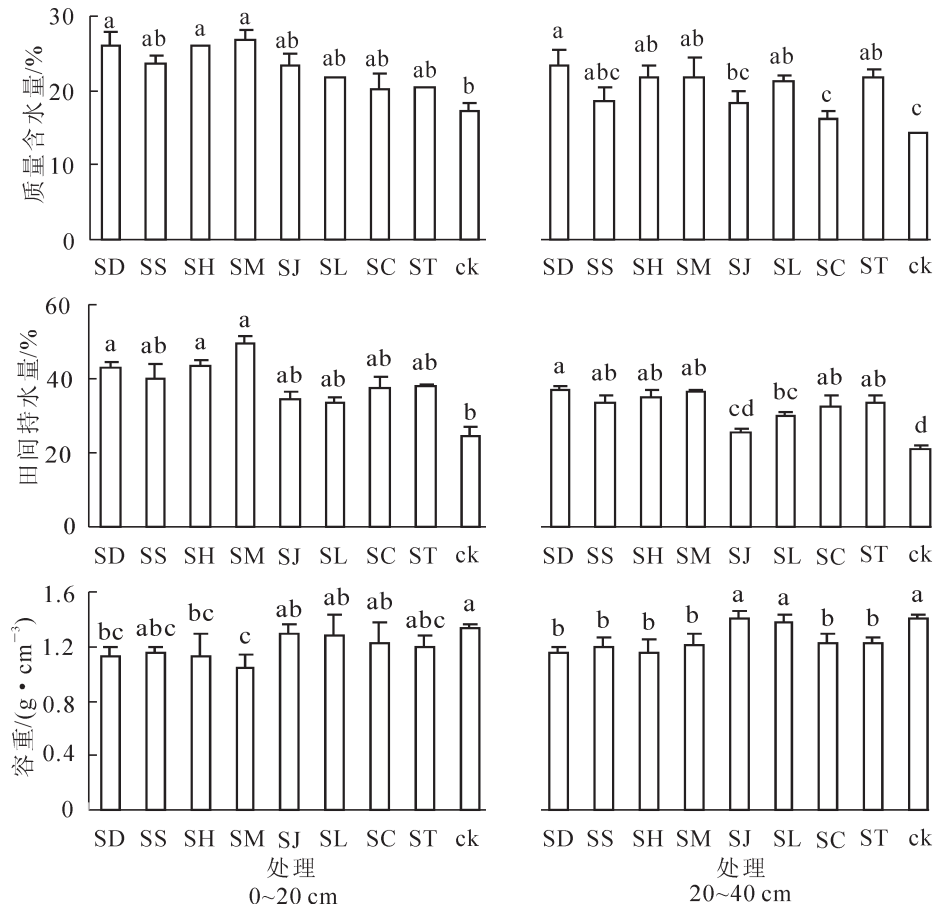
其中:  $\varepsilon(k)$  为第  $i$  种模式第  $j$  个指标的灰色关联系数,  $\rho$  为分辨系数, 通常取 0.5。关联度:

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(k)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 林药复合经营模式对土壤理化性质的影响

2.1.1 林药经营模式对土壤水分和物理性质的影响 由图 1 可知: 8 种林药经营模式 2 个土层的土壤质量含水量和田间持水量均大幅度提高, 不同模式之间的差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 且随土层深度的增加而减小; 0~20 cm 土层, 均是以杉木+梅叶冬青(SM)模式最大, 分别是对照的 1.5 和 2.0 倍; 20~40 cm 土层, 以杉木+胆木(SD)模式最大, 分别是对照的 1.6 和 1.8 倍。相同土层, 不同林药模式之间, 土壤容重差异显著 ( $P < 0.05$ )。与对照相比, 8 种林药模式的土壤容重均呈不同程度下降, 且随土层深度的增



数据为平均值±标准差。同一土层数据不同小写字母表示不同模式差异显著( $P < 0.05$ )

图1 林药模式下土壤水分、容重比较

Figure 1 Comparison of soil moisture, bulk density in different patterns

加而增加。0~20 cm 土层的土壤容重显著降低的模式有杉木+胆木、杉木+红豆杉和杉木+胆木, 降幅为 15.7%~22.3%; 20~40 cm 土层中除了杉木+金花茶和杉木+裸花紫珠模式外其余模式均显著降低, 降幅为 12.7%~17.7%。

由表 1 可知: 土壤非毛管孔隙度各模式 2 个土层之间差异均未达到显著水平。与对照相比, 2 个土层的毛管孔隙度和总孔隙度之间差异显著( $P < 0.05$ ), 且随土层深度的增加呈现减小的趋势。0~20 cm 土层, 毛管孔隙度以杉木+梅叶冬青(SM)模式最大, 杉木+裸花紫珠(SL)模式最小, 但分别比对照提高 44.9%和 21.4%。总孔隙度以杉木+胆木(SD)模式最大, 杉木+裸花紫珠(SL)模式最小, 最大值是最小值的 1.2 倍; 20~40 cm 土层, 各模式毛管孔隙度和总孔隙度均以杉木+胆木(SD)模式最大, 分别比对照提高 43.4%和 43.5%。

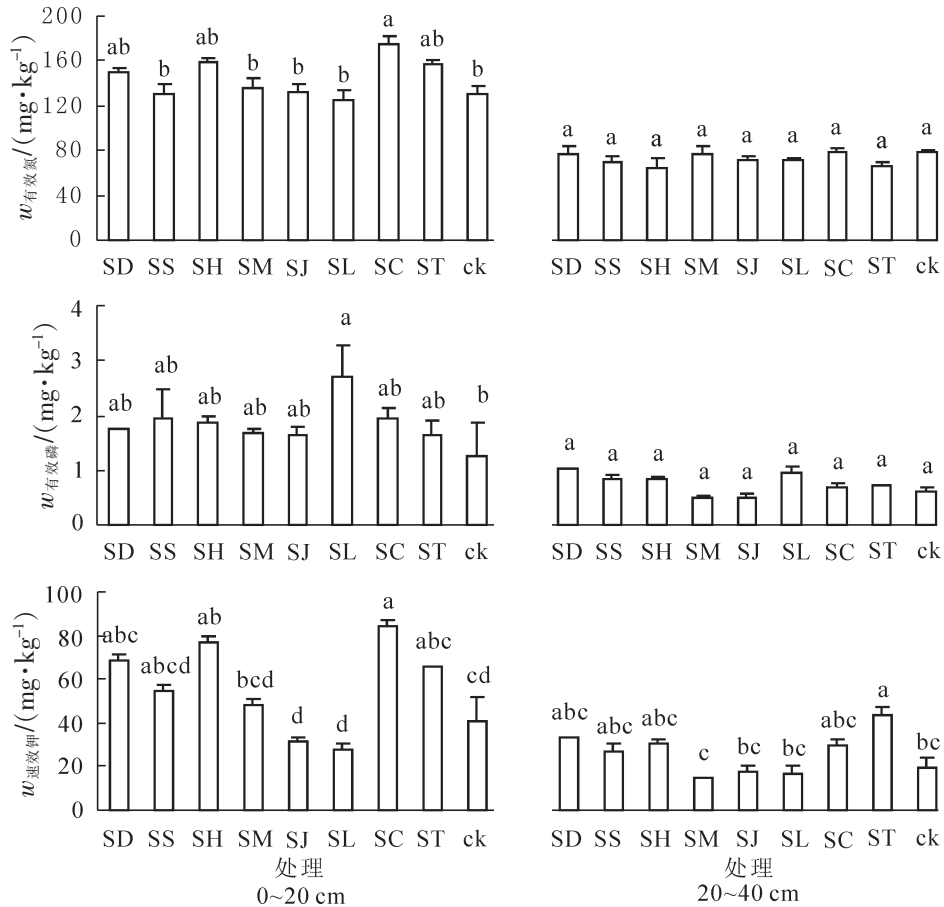
表 1 林药模式下土壤孔隙度的比较

Table 1 Comparison of soil porosity in different patterns

土层/cm	模式	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	土层/cm	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	
0~20	SD	5.60 ± 0.32 a	53.60 ± 1.35 a	59.20 ± 1.93 a	20~40	SD	6.46 ± 0.45 a	48.37 ± 0.65 a	54.93 ± 2.24 a
	SS	6.23 ± 0.04 a	51.67 ± 4.84 a	57.90 ± 2.33 a		SS	5.93 ± 0.07 a	45.23 ± 0.55 ab	51.17 ± 1.50 ab
	SH	4.53 ± 0.93 a	51.17 ± 1.76 a	52.70 ± 0.63 a		SH	6.97 ± 0.21 a	45.73 ± 0.31 ab	52.70 ± 3.61 ab
	SM	4.37 ± 0.21 a	54.77 ± 2.34 a	58.73 ± 0.99 a		SM	4.83 ± 0.51 a	47.43 ± 0.71 a	52.30 ± 2.14 ab
	SJ	4.33 ± 0.12 a	48.77 ± 4.22 ab	53.10 ± 1.82 ab		SJ	4.93 ± 0.42 a	39.73 ± 1.16 b	44.67 ± 1.35 bc
	SL	4.70 ± 0.66 a	45.87 ± 2.11 ab	50.57 ± 2.31 ab		SL	4.30 ± 0.61 a	45.00 ± 1.54 ab	49.30 ± 1.47 ab
	SC	4.50 ± 0.36 a	48.53 ± 2.65 ab	53.03 ± 2.98 ab		SC	7.57 ± 0.40 a	47.13 ± 1.05 a	54.70 ± 0.15 a
	ST	4.47 ± 0.76 a	49.60 ± 0.00 ab	54.27 ± 0.76 ab		ST	6.77 ± 0.07 a	47.37 ± 1.70 a	54.13 ± 1.11 a
	ck	5.43 ± 0.22 a	37.80 ± 2.39 b	43.23 ± 0.55 b		ck	4.53 ± 0.06 a	33.73 ± 1.22 c	38.27 ± 0.21 c

说明: 平均值±标准差。同一土层数据后的不同小写字母表示不同模式差异显著( $P < 0.05$ )。

2.1.2 林药经营模式对土壤化学性质的影响 由图 2 可以看出：0~20 cm 土层中，土壤有效氮、有效磷、速效钾不同模式之间差异达显著水平( $P<0.05$ )，有效氮质量分数各模式差别较大，除杉木+石笔木(SS)模式和杉木+裸花紫珠(SL)模式低于对照外，其他模式比对照均有不同程度的提高，增幅 2.1%~35.1%；土壤有效磷质量分数各模式均显著高于对照( $P<0.05$ )，以杉木+裸花紫珠(SL)模式最高，是对照的 2.1 倍；杉木+草豆蔻(SC)模式的速效钾最高，比对照提高了 108.1%。



数据为平均值±标准差。同一土层数据不同小写字母表示不同模式差异显著( $P<0.05$ )

图 2 不同模式土壤速效养分比较

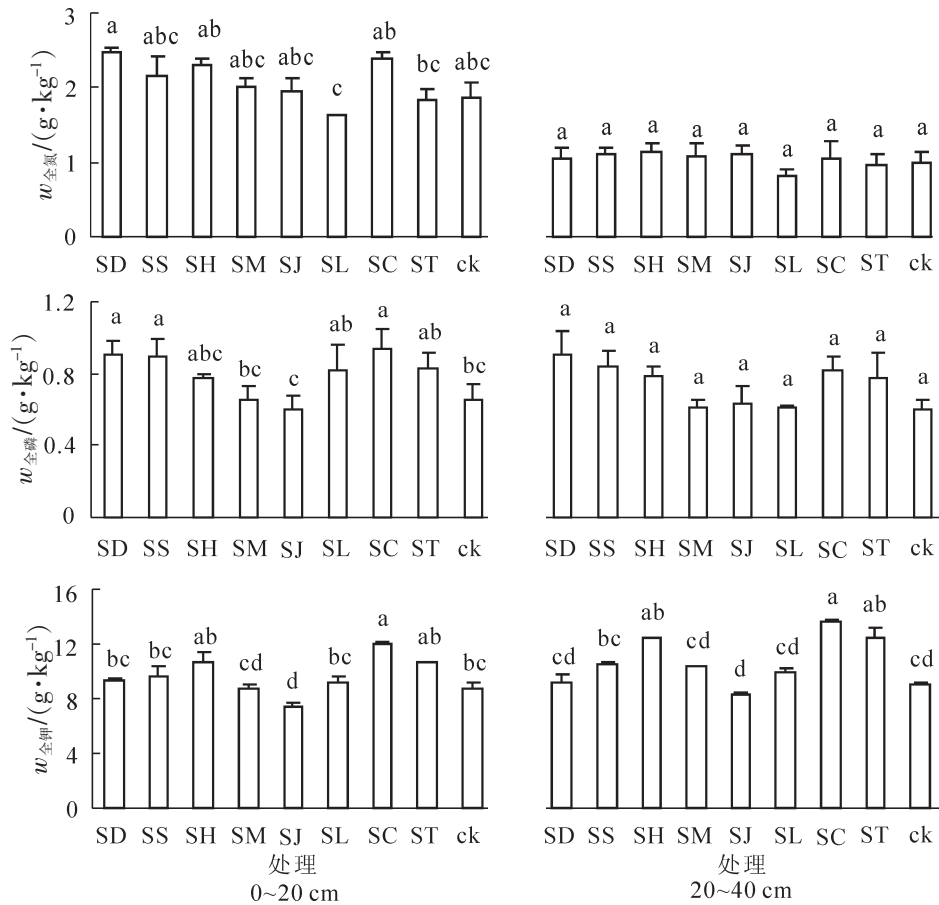
Figure 2 Comparison of soil available N, P, K in different patterns

全量养分方面，0~20 cm 土层中，全氮、全磷、全钾不同模式之间差异达到显著水平( $P<0.05$ ) (图 3)。土壤全氮质量分数以杉木+胆木(SD)模式最高，比对照显著增加了 32.1%，其次是杉木+草豆蔻(SC)模式、杉木+红豆杉(SH)模式，分别增加 27.3%和 23.5%；土壤全磷和全钾质量分数与对照相比，除了杉木+金花茶(SJ)模式下降外，其余各模式都显著增加，且均以杉木+草豆蔻(SC)模式最高，分别是对照的 1.4 和 1.3 倍。

由表 2 可知：在 0~20 cm 土层中，土壤有机质质量分数各模式的之间差异未达到显著水平，但与对照相比，呈现增加的趋势，以杉木+草豆蔻(SC)模式最高，杉木+胆木(SD)模式次之，分别比对照增加 41.8%和 31.4%；土壤 pH 值和阳离子交换量，不同模式之间差异显著( $P<0.05$ )，其中：杉木+裸花紫珠(SL)模式的 pH 值最大，比对照提高了 4.3%；阳离子交换量各模式之间差异显著，在杉木+金花茶(SJ)模式下达到最大，比对照提高了 52.0%。林药模式对 20~40 cm 土层土壤化学性质影响程度要小于 0~20 cm 土层，9 个化学指标中，仅速效钾、全磷、全钾在各模式之间差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

## 2.2 林药复合模式土壤理化指标的关联度分析

为了定量评价杉木林药复合经营模式对土壤理化性质的影响，选择 0~20 cm 土壤容重( $x_1$ )，土壤含水量( $x_2$ )，田间持水量( $x_3$ )，非毛管孔隙度( $x_4$ )，毛管孔隙度( $x_5$ )，总孔隙度( $x_6$ )，pH 值( $x_7$ )，有机质( $x_8$ )，全氮( $x_9$ )，全磷( $x_{10}$ )，全钾( $x_{11}$ )，有效氮( $x_{12}$ )，有效磷( $x_{13}$ )，速效钾( $x_{14}$ )和阳离子交换量( $x_{15}$ )，共



数据为平均值±标准差。同一土层数据不同小写字母表示不同模式差异显著( $P < 0.05$ )

图3 不同模式土壤全量养分比较

Figure 3 Comparison of soil total N, P, K in different patterns

表2 林药模式下土壤pH值和有机质阳离子交换量比较

Table 2 Comparison of soil pH, organic matter, and cation exchange capacity in different patterns

模式	土层/ cm	pH值[ $m_{(土)}:m_{(水)}$ = 1.0:2.5]	有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	阳离子交换量/ ( $cmol \cdot kg^{-1}$ )	土层/cm	pH值[ $m_{(土)}:m_{(水)}$ = 1.0:2.5]	有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	阳离子交换量/ ( $cmol \cdot kg^{-1}$ )
SD		4.13 ± 0.28 ab	60.27 ± 9.21 a	11.71 ± 1.56 ab		4.25 ± 0.44 a	19.43 ± 1.13 a	7.87 ± 0.00 a
SS		4.17 ± 0.05 ab	49.03 ± 2.41 a	10.94 ± 0.94 ab		4.17 ± 0.14 a	21.17 ± 0.44 a	8.68 ± 0.34 a
SH		4.09 ± 0.05 ab	57.17 ± 0.03 a	10.36 ± 0.25 ab		4.25 ± 0.13 a	18.48 ± 2.43 a	8.84 ± 1.35 a
SM		4.08 ± 0.14 ab	49.01 ± 3.48 a	11.16 ± 2.46 ab		4.19 ± 0.10 a	22.24 ± 1.85 a	8.33 ± 0.50 a
SJ	0~20	3.96 ± 0.16 b	52.23 ± 5.03 a	14.17 ± 1.20 a	20~40	4.16 ± 0.04 a	26.43 ± 1.27 a	10.31 ± 0.20 a
SL		4.37 ± 0.31 a	46.80 ± 4.74 a	11.37 ± 1.54 ab		4.27 ± 0.15 a	23.05 ± 2.11 a	7.87 ± 0.08 a
SC		4.09 ± 0.03 ab	65.07 ± 3.37 a	12.43 ± 0.42 ab		4.33 ± 0.16 a	24.09 ± 0.53 a	8.56 ± 1.23 a
ST		4.07 ± 0.16 ab	51.97 ± 5.83 a	10.91 ± 0.15 ab		4.20 ± 0.20 a	19.87 ± 1.47 a	7.22 ± 0.15 a
ck		4.19 ± 0.11 ab	45.88 ± 3.37 a	9.32 ± 0.24 b		4.29 ± 0.08 a	24.87 ± 0.49 a	7.61 ± 0.00 a

说明：数据为平均值±标准差。同一土层数据不同小写字母表示不同模式差异显著( $P < 0.05$ )。

15个指标。各模式各指标的关联系数和关联度见表3。由表3可知：各模式土壤理化性质的关联度即对土壤改良能力大小排序为杉木+草豆蔻(SC)(0.676 9) > 杉木+胆木(SD)(0.672 8) > 杉木+梅叶冬青(SM)(0.604 3) > 杉木+红豆杉(SH)(0.597 3) > 杉木+石笔木(SS)(0.583 8) > 杉木+裸花紫珠(SL)(0.500 5) > 杉木+土沉香(ST)(0.498 4) > 杉木+金花茶(SJ)(0.458 7) > 对照(ck)(0.379 9)。

### 3 讨论

大量研究表明，复合经营模式的土壤容重、孔隙度、水分条件和养分条件要优于单一的模式<sup>[10-12]</sup>。

表 3 各指标关联系数与关联度

Table 4 Relation coefficients and degrees of soil physical and chemical properties indexes

模式	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
SD	0.567 5	0.861 5	0.666 8	0.601 3	0.878 9	1.000 0	0.460 7	0.666 6	1.000 0
SS	0.512 2	0.606 1	0.572 3	1.000 0	0.732 4	0.860 0	0.506 2	0.374 3	0.564 7
SH	0.600 0	0.845 3	0.690 4	0.358 5	0.702 1	0.695 2	0.422 7	0.548 4	0.721 7
SM	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.338 1	1.000 0	0.991 3	0.414 1	0.374 0	0.468 9
SJ	0.355 9	0.580 3	0.457 5	0.333 3	0.585 8	0.566 9	0.333 3	0.427 7	0.443 9
SL	0.368 4	0.484 1	0.435 5	0.383 1	0.488 0	0.480 6	1.000 0	0.344 3	0.333 3
SC	0.411 8	0.419 3	0.509 9	0.354 5	0.576 2	0.564 1	0.422 7	1.000 0	0.821 8
ST	0.466 7	0.424 9	0.523 6	0.350 2	0.621 3	0.618 3	0.405 9	0.422 8	0.393 4
ck	0.333 3	0.333 3	0.333 3	0.542 8	0.333 3	0.333 3	0.532 5	0.333 3	0.408 9

模式	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	关联度	排序
SD	0.850 1	0.469 0	0.503 1	0.432 0	0.638 3	0.496 4	0.672 8	2
SS	0.772 7	0.493 7	0.355 0	0.491 4	0.487 9	0.428 8	0.583 8	5
SH	0.515 1	0.624 0	0.597 2	0.465 8	0.783 7	0.388 9	0.597 3	4
SM	0.377 8	0.413 4	0.392 6	0.409 7	0.438 0	0.446 2	0.604 3	3
SJ	0.333 3	0.333 3	0.371 3	0.407 4	0.350 9	1.000 0	0.458 7	8
SL	0.586 2	0.456 1	0.333 3	1.000 0	0.333 3	0.481 6	0.500 5	6
SC	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.491 4	1.000 0	0.582 2	0.676 9	1
ST	0.607 2	0.632 4	0.582 2	0.402 8	0.598 5	0.426 5	0.498 4	7
ck	0.377 8	0.418 6	0.357 4	0.333 3	0.394 0	0.333 3	0.379 9	9

但是前人对此解释的很少,多数为报道性,重应用而轻原理。本研究发现:8种林药模式对土壤水分-物理条件和养分条件都有不同程度的改善。主要考虑以下原因:林药复合经营模式相对于纯林,凋落物量更大,凋落物种类增加,有助于提高土壤酶活性<sup>[13]</sup>,从而有利于凋落物的分解,使土壤中可利用养分动态循环量增加<sup>[14-15]</sup>。前人研究还发现:在一些森林生态系统中,有超过90%的氮和磷以及超过60%的其他营养元素是通过养分循环从植物体中进入到土壤中的<sup>[16]</sup>。凋落物分解产生的大量有机质能够促进优质土壤团粒结构的形成,有助于土壤通气保水<sup>[17]</sup>。另外,复合经营模式各土层土壤的根系量要大于纯林模式,根系的一些翻转运动和穿插运动,使得土壤更加疏松多孔隙,同时根系的死亡,也能够提高土壤养分的归还量。也有研究发现:复合生态系统中,树木根系能够重新获取深土层中被淋溶作用流失的超过作物根系吸收范围的养分,通过凋落物和根系的翻转作用重新加入养分循环,供给植物生长需要<sup>[18]</sup>。复合经营模式相对于纯林来说,植被覆盖度大,遮光程度要高,能够很好地改变林地表面微环境,起到降温保湿的作用<sup>[19-20]</sup>。同时,本试验区气候属于亚热带季风气候,年降水量在1800mm以上,水分条件良好,能够很好地满足植物生长的水分需求,因此,植物对水分的竞争程度应该是较小的。可见,复合经营模式是一个有机结合的动态系统,组分之间是有“交流”的,它的土壤结构和养分特性要优于纯林。

研究发现:不同的林药模式之间也存在明显的土壤结构和养分的差异,这主要是因为种植的品种不同而引起的差异<sup>[21]</sup>。韦铄星等<sup>[22]</sup>对桉树 *Eucalyptus robusta* 林下扶芳藤 *Euonymus fortunei*, 金银花 *Lonicera japonica* 和鸡骨草 *Abrus cantoniensis* 模式研究发现,桉树下以2m×3m模式种植鸡骨草其生态效益和经济效益最佳。刘伟玮等<sup>[23]</sup>对林参复合经营模式研究发现,林分类型特征和种植年限对土壤质量也会产生不同程度影响。不同林药模式间土壤水分-物理条件和养分条件均存在差异,这主要可能是不同药材品种引起的地上部分凋落物量、根系量、根系分泌物、生化特性等之间存在差异,造成的土壤改良效果不同。这与葛乐等<sup>[24]</sup>对杉木林下套种红茴香 *Illicium henryi* 和红豆杉等以及WANG等<sup>[25]</sup>对不同银杏 *Ginkgo biloba* 复合经营模式的研究结果相似。至于在20~40cm土层中,大部分养分指标差异不显著,可能与植物栽植时间较短,根系生长慢,分布较浅,短期内凋落物分解量对较深土层影响程度较小有关。合理构建林药复合经营模式对加快人工林生态系统的养分循环和地力维护具有重要的意义。

灰色关联分析表明:杉木+草豆蔻模式对土壤理化性质的综合改良效果最好,与对照相比各化学指

标均表现出增加的趋势。这与张鼎华等<sup>[6]</sup>对杉木+砂仁模式的研究结果相似,但李娟等<sup>[26]</sup>对成龄胶园下间作草豆蔻研究发现,橡胶 *Hevea brasiliensis*+草豆蔻模式虽增加了 0~20 cm 土层铵态氮、全钾和速效钾的质量分数,但降低了有机质、全磷、速效磷、全氮质量分数,这与本研究的结论是不太一致的。分析原因可能是试验维持时间长度不一样,橡胶+草豆蔻模式试验期仅在 7 个月,再加上人工干扰较多,对土壤的理化性质的增益效果很小,甚至降低。本试验试验期较长,又属于生态公益林,人为干扰少,足以对土壤产生很好的改良效益。

本研究主要从土壤理化性质变化角度,评价不同林药复合经营模式对退化杉木生态公益林林地土壤的改良效果。然而在实际生产中,尚需从药用植物产量、经济产出等方面进行综合评价。

## 4 结论

林药复合经营模式对退化杉木生态林林地土壤具有显著的改良作用,尤其是对表层土壤。但不同模式对土壤的改良程度存在明显差异,其中以杉木+草豆蔻模式综合改良效果最佳,可以考虑推广应用,为杉木生态公益林的改造与可持续经营提供新思路。

## 5 参考文献

- [1] 林思祖,黄世国,曹光球,等.杉木自毒作用的研究[J].应用生态学报,1999,10(6):661-664.  
LIN Sizu, HUANG Shiguo, CAO Guangqiu, et al. Autointoxication of Chinese fir [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, 10(6): 661-664
- [2] 王清奎,汪思龙,冯宗炜.杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2005,25(6):1299-1305.  
WANG Qingkui, WANG Silong, FENG Zongwei. A study on dissolved organic carbon and nitrogen nutrients under Chinese fir plantation: relationships with soil nutrients [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25(6):1299-1305.
- [3] 田大伦,沈燕,康文星,等.连栽第1和第2代杉木人工林养分循环的比较[J].生态学报,2011,31(17):5025-5032.  
TIAN Dalun, SHEN Yan, KANG Wenxing, et al. Characteristics of nutrient cycling in first and second rotations of Chinese fir plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(17): 5025-5032.
- [4] 邵方丽.林药复合模式研究综述[J].林业建设,2014(5):15-19.  
SHAO Fangli. Research overview on forest-medicinal herb composite pattern [J]. *For Construct*, 2014(5): 15-19.
- [5] YANG Yusheng, CHEN Guangshui, YU Xintuo. Soil fertility in agroforestry system of Chinese fir and villous amomum in subtropical China [J]. *Pedosphere*, 2001, 11(4): 341-348.
- [6] 张鼎华,杨玉盛,邹双全.杉木套种砂仁土壤微生物区系及其生化特性和肥力变化的研究[J].林业科学,1988,24(4):458-465.  
ZHANG Dinghua, YANG Yusheng, ZOU Shuangquan. A study on the microflora and biochemical properties of soil microorganisms and the soil fertility of interplanted forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Amomum villosum* [J]. *Sci Silv Sin*, 1988, 24(4): 458-465.
- [7] 卢玉鹏,许纪元,张晓曦,等.林下药材植物淋出物对太白杨枯落物分解及土壤酶活性的影响[J].土壤学报,2017,54(3):749-758.  
LU Yupeng, XU Jiyuan, ZHANG Xiaoxi, et al. Effects of leachates from understory medicinal plants on decomposition of *Populus purdomii* litters and soil enzyme activity [J]. *Acta Pedol Sin*, 2017, 54(3): 749-758.
- [8] 王昭艳,左长清,曹文洪,等.红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J].土壤学报,2011,48(4):715-724.  
WANG Zhaoyan, ZUO Changqing, CAO Wenhong, et al. Physical and chemical properties of soils under different vegetation restoration models in red soil hilly region [J]. *Acta Pedol Sin*, 2011, 48(4): 715-724.
- [9] 李天阳,何丙辉,田家乐,等.重庆市山地血橙园不同种植模式土壤理化性质关联分析[J].中国生态农业学报,2013,21(11):1395-1402.  
LI Tianyang, HE Binghui, TIAN Jiale, et al. Correlation analysis of soil physical and chemical properties under different planting patterns of blood orange garden in hilly areas of Chongqing City [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21(11):



1395 – 1402.

- [10] WANG Qingkui, WANG Silong. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations [J]. *J For Res*, 2008, **19**(2): 131 – 135.
- [11] PAUDEL B R, UDAWATTA R P, KREMER R J, *et al.* Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management [J]. *Agrofor Syst*, 2011, **84**(2): 311 – 323.
- [12] UDAWATTA R P, KREMER R J, NELSON K A, *et al.* Soil quality of a mature alley cropping agroforestry system in temperate north America [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2014, **45**(19): 2539 – 2551.
- [13] HU Y L, WANG S L, ZENG D H. 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.
- [14] GLOVER N, BEER J. Nutrient cycling in two traditional central American agroforestry systems [J]. *Agrofor Syst*, 1986, **4**(2): 77 – 87.
- [15] LIN Han, HONG Tao, WU Chengzhen, *et al.* Monthly variation in litterfall and the amount of nutrients in an *Aleuroites montana* plantation [J]. *For Ecosyst*, 2012, **14**(1): 30 – 35.
- [16] CHAPIN F S III, MATSON P A, VITOUSEK P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* [M]. 2nd. New York: Springer, 2002: 197 – 223.
- [17] MEALLIA F, RUBIN D B. The role and function of organic matter in tropical soils [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2001, **61**(1/2): 7 – 18.
- [18] ALLEN S C, JOSE S, NAIR P K R, *et al.* Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **192**(2/3): 395 – 407.
- [19] SCHROTH G, SINCLAIR F L. Impacts of trees on the fertility of agricultural soils [G]// SCHROTH G, SINCLAIR F L. *Trees, Crops and Soil Fertility-Concepts and Research Methods*. Wallingford: CABI Publishing, 2003: 1 – 9.
- [20] WANG Qingbin, SHOGREN J F. Characteristics of the crop-paulownia system in China [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 1992, **39**(3/4): 145 – 152.
- [21] 闫德仁, 刘永军, 冯立岭, 等. 农林复合经营土壤养分的变化[J]. 东北林业大学学报, 2001, **29**(1): 53 – 56.  
YAN Deren, LIU Yongjun, FENG Liling, *et al.* Variation of soil nutrient in the combination of forestry and agricultural crops [J]. *J Northeast For Univ*, 2001, **29**(1): 53 – 56.
- [22] 韦铄星, 刘晓蔚, 张焯, 等. 桉树-药材复合经营模式生态经济效益研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(11): 84 – 89.  
WEI Shuoxing, LIU Xiaowei, ZHANG Ye, *et al.* Study on ecology and economy benefit of *Eucalyptus* and medical plantintercropping models of *Eucalyptus* plantation [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(11): 84 – 89.
- [23] 刘伟玮, 刘某承, 李文华, 等. 辽东山区林参复合经营土壤质量评价[J]. 生态学报, 2017, **37**(8): 2631 – 2641.  
LIU Weiwei, LIU Mouchen, LI Wenhua, *et al.* Soil quality assessment of a forest ginseng agroforestry system in the mountainous region of eastern Liaoning Province, Northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(8): 2631 – 2641.
- [24] 葛乐, 虞木奎, 成向荣, 等. 杉木林下套种不同树种对土壤改良效应初探[J]. 土壤通报, 2011, **42**(4): 948 – 952.  
GE Le, YU Mukui, CHENG Xiangrong, *et al.* Preliminary studies on improvement effect of interplantation different trees in Chinese-fir forest on soil physical and chemical properties [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42**(4): 948 – 952.
- [25] WANG Guibin, CAO Fuliang. Integrated evaluation of soil fertility in ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) agroforestry systems in Jiangsu, China [J]. *Agrofor Syst*, 2011, **83**(1): 89 – 100.
- [26] 李娟, 林位夫, 周立军. 成龄胶园间作不同姜科作物对土壤养分与土壤酶的影响[J]. 中国农学通报, 2014, **30**(31): 192 – 198.  
LI Juan, LIN Weifu, ZHOU Lijun. Effects of intercropping different gramineous crops in mature rubber plantations on soil nutrients and soil enzymes [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, **30**(31): 192 – 198.