

杉木人工林不同发育阶段土壤肥力综合评价研究

吴永铃¹,王 兵²,赵 超¹,戴 伟¹,李 萍³

(1 北京林业大学 水土保持学院,北京 100083;2 中国林业科学院 森林生态环境与保护研究所,北京 100091;
3 北京市土肥工作站,北京 100029)

【摘 要】 【目的】分析杉木人工林不同发育阶段土壤性质的变化,对各发育阶段的土壤肥力状况进行综合评价。【方法】以江西省大岗山区杉木人工林为研究对象,对幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林土壤主要物理化学性质和生物学性质进行测定,运用方差分析和相关分析法探讨不同发育阶段土壤性质的变化特点,并进一步运用主成分分析法对杉木人工林各发育阶段土壤肥力状况进行综合评价。【结果】(1)中龄林阶段土壤肥力状况表现出明显的恶化现象,但从近熟林阶段开始,随着林下环境的改善,土壤肥力状况出现明显恢复;(2)土壤纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性与土壤理化性质密切相关,但淀粉酶活性的影响不明显;(3)土壤有机质、碱解氮、全氮、放线菌、真菌含量以及纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶和蔗糖酶活性等土壤因子是综合评价土壤肥力的重要指标。【结论】杉木人工林各发育阶段的土壤肥力,由高到低依次为过熟林>成熟林>近熟林>幼龄林>中龄林。

【关键词】 杉木林;林木发育阶段;土壤肥力

【中图分类号】 S714.2;S718 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2011)01-0069-07

Comprehensive evaluation of soil fertility in different developing stages of Chinese Fir Plantations

WU Yong-ling¹,WANG Bing²,ZHAO Chao¹,DAI Wei¹,LI Ping³

(1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 2 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection CAF, Beijing, 100091, China; 3 Beijing Soil and Fertilizer Working Station, Beijing 100029, China)

Abstract: 【Objective】 The research was conducted to analyze the soil properties variations and give comprehensive evaluation of soil fertility status in different developing stages. 【Method】 Based on the determination of main soil physical, chemical and biological properties in the juvenile forest, medium forest, near-mature forest, mature forest and over-mature forest of Chinese fir plantations in Dagang mountain of Jiangxi Province, the variation characteristics of soil properties in different developing stages were explored by analysis of variance and correlation, soil fertility in different developing stages of Chinese fir plantations was further evaluated with principal component analysis. 【Result】 (1) The soil fertility was obviously deteriorated in the medium forest, but recovered in the near-mature forest with the environmental improvement of forest soil; (2) Close correlations were found between the activity of soil cellulose, β -glucosidase, sucrase and polyphenol oxidase and soil physical and chemical properties, but not for the activity of amylase; (3) Soil organic matter content, total and alkali-hydrolyzable nitrogen content, the number of actinomycetes and fungi, along with the activity of cellulase, β -glucosidase and sucrase, played important roles in the evaluation of soil fertility. 【Conclusion】 The soil fertility levels in different developing stages of Chinese fir planta-

* [收稿日期] 2010-04-25
[基金项目] 林业公益性行业科研专项(200804022E、200704005);国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A0702);国家林业局重点项目(2006-67);国家自然科学基金项目(30590381);江西大岗山国家级森林生态站项目
[作者简介] 吴永铃(1984—),女,内蒙古赤峰人,在读硕士,主要从事土壤生态研究。
[通信作者] 戴 伟(1964—),男,北京人,副教授,主要从事土壤生态研究。E-mail: daiw163@163.com

tions are in the order of overmature forest>mature forest> near-mature forest>young forest>medium forest.

Key words:Chinese fir;development stage;soil fertility

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国重要的速生丰产树种,长期以来,针对杉木的相关研究一直是森林生态系统研究中的重要课题^[1-5]。杉木在从幼龄林到过熟林的整个生长发育过程中,由于林木的生长以及随之产生的环境变化,必然会对土壤肥力状况产生强烈影响,导致不同发育阶段土壤肥力间存在差异。为了揭示杉木人工林生长对土壤肥力的影响,部分学者进行了一些相关研究,如王旭琴等^[6]比较了天然次生林更新为杉木林后,土壤性质的变化;焦如珍等^[7]研究了杉木人工林不同发育阶段根际与非根际土壤微生物的变化;孙启武等^[8]探讨了连栽杉木人工林土壤性质的变化特点。但迄今为止,在全面考虑土壤理化性质和生物学性质的基础上,运用合理的数学分析手段,综合评价杉木不同发育阶段土壤肥力状况的研究报道还十分缺乏。为此,本试验以杉木幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林 5 个不同发育阶段的林下土壤为研究对象,对其主要理化性质、土壤微生物数量以及在森林凋落物分解中起重要作用的纤维素酶、淀粉酶、 β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性变化进行了分析,并进一步运用相关分析和主成分分析法,对不同发育阶段下土壤肥力状况进行了综合评价,旨在为维护 and 改善杉木人工林土壤肥力水平、实现林地的可持续发展提供理论依据。

表 1 供试林地的基本概况

Table 1 General situation between different forest stands									
林分类型 Stand type	林龄/年 Stand age	土壤类型 Soil type	坡向 Aspect	坡度/(°) Gradient	平均树高/m Average height	平均 胸径/cm Diameter	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	林下植被 盖度/% Under growth vegetation coverage	林下主要植被类型 Undergrowth main vegetation type
幼龄林 Juvenile	7	红壤 Red soil	东 East	30	7	9.5	2 955	59.0	杜茎山(<i>Maesa japonic</i>)、 欏木(<i>Loropetalum chinense</i>)、 飞蓬(<i>Erigeron acris</i>)
中龄林 Medium	16	红壤 Red soil	东 East	25	9	11.2	3 275	12.0	大青(<i>Clerodendrum cyrtophyllum Turcz</i>)、全药红淡(<i>Adinandra millettii</i>)、狗脊(<i>Blechnum japonica</i>)
近熟林 Near mature	24	红壤 Red soil	东北 Northeast	22	13	14.5	1 385	67.0	毛药红淡(<i>Adinandra millettii</i>)、 木荷(<i>Schima superba Garde</i>)、 狗脊(<i>Blechnum japonica</i>)
成熟林 Mature	28	红壤 Red soil	东北 Northeast	30	14.8	18.5	1155	77.0	狗脊(<i>Blechnum japonica</i>)、 连蕊茶(<i>Camellia fraterna Hance</i>)、 悬钩子(<i>Rubus trianthus Foeke</i>)
过熟林 Over mature	50	红壤 Red soil	东 East	26	32.6	30.8	1050	94.0	木荷(<i>Schima superba Garde</i>)、 欏木(<i>Loropetalum chinense</i>)、 狗脊(<i>Blechnum japonica</i>)

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设置于江西省分宜县大岗山国家级森林生态系统定位站,地处 27°30′ N,114°30′ E,属中亚热带季风气候,年平均气温 17.5℃,年降水量 1 590.9 mm,降水多集中在 4~6 月,无霜期为 268 d。该地区地貌形态主要为低山丘陵地形,整个地势西高东低,母岩以页岩为主,土壤类型为红壤,土壤厚度在 100 cm 以上。试区森林覆盖率 76.4%,植被类型多样,其中杉木人工林主要分布在海拔 800 m 以下,其主要林下植被有狗脊(*Blechnum japonica*)、毛药红淡(*Adinandra millettii*(Hook. Et Arn.) Benth.)、欏木(*Loropetalum chinense*(R. Br)Oliver.)、悬钩子(*Rubus trianthus Foeke.*)、飞蓬(*Erigeron acris* L.)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum Turcz.*)、杜茎山(*Maesa japonica*(Thunb)Moritzi.)、连蕊茶(*Camellia fraterna Hance.*)、油茶(*Camellia oleifera* Abel.)、土茯苓(*Smilax glabra* Roxb.)、木荷(*Schima superba Garde. et Champ.*)等。

在经营措施和土壤类型一致的前提下,充分考虑海拔、坡向、坡度等自然状况,根据文献[9]的分类标准,选择不同发育阶段的杉木林地作为研究样地。各样地基本概况如表 1 所示。

1.2 土壤样品的采集

2009-03 分别在各样地设置 3 个面积为 20 m×20 m 标准地,在每个标准地利用 S 形取样法(共 5 点)采取 0~20 cm 土层土壤混合样品,根据文献[10]进行处理,供土壤化学性质测定用。同时采集环刀样品,测定土壤物理性质。另外留取部分新鲜土壤样品,置于 4 ℃下保存,用于测定土壤酶活性和土壤微生物含量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤酶活性和微生物含量的测定 蔗糖酶、纤维素酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,β-葡糖苷酶用 2,6-二溴醌氯亚胺滴定法测定,淀粉酶用葱酮比色法测定,多酚氧化酶用邻苯三酚比色法测定^[11-13]。

细菌、放线菌、真菌数量用稀释平板法测定^[14]。

1.3.2 土壤理化性质的测定 土壤有机碳含量用 K₂Cr₂O₇ 外加热法测定;全氮含量用 K_{DY}-9830 凯氏定氮仪法测定;碱解氮含量用扩散法测定;速效钾含量用中性 NH₄ Ac 浸提-火焰光度法测定;有效 P

含量用 0.03 mol/L NH₄F-0.025 mol/L HCl 浸提样品后,钼锑抗比色法测定。土壤体积质量、最大持水量、最小持水量、孔隙度用环刀法测定^[15-16]。

1.4 数据处理

试验数据用“平均值±标准误”表示,采用 SPSS 软件对数据进行相关分析和统计分析。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物含量的变化

表 2 显示,在杉木人工林发育过程中,土壤细菌、放线菌、真菌含量以及微生物总量均表现为幼龄林较高、中龄林最低、近熟林开始逐渐恢复增加、过熟林时期达到最高值的变化规律。这种生长阶段性影响对土壤细菌、放线菌含量和微生物总量的影响最为强烈,各发育阶段间差异均达到显著水平;对土壤真菌含量的影响稍显不同,在幼龄林到中龄林的发育过程中,真菌含量未表现出显著差异,自中龄林阶段开始,杉木生长对真菌含量有显著影响。

表 2 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物含量的变化特征

Table 2 Characteristics variations of soil microbial biomass among different developmental phases of Chinese fir plantations					×10 ⁵ /g
林分类型 Stand type	细菌含量 Bacteria	放线菌含量 Actinomycetes	真菌含量 Fungi	微生物总量 Microbe quantity	
幼龄林 Juvenile	8.72±0.11 c	0.53±0.005 d	0.164±0.000 6 d	9.39±0.11 c	
中龄林 Medium	7.10±0.07 e	0.32±0.006 e	0.163±0.000 4 d	7.59±0.08 e	
近熟林 Near mature	7.37±0.09 d	1.19±0.024 c	0.244±0.000 7 c	8.81±0.08 d	
成熟林 Mature	8.80±0.10 b	2.52±0.037 b	0.516±0.011 b	11.84±0.09 b	
过熟林 Over mature	9.20±0.07 a	4.44±0.008 a	0.623±0.011 a	14.27±0.07 a	

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著(P<0.05)。表 3 同。
Note:Data marked with different lower-case letters express significant differences (P<0.05). The same as table 3.

2.2 杉木人工林不同发育阶段土壤酶活性的变化 如表 3 所示。

杉木人工林不同发育阶段土壤酶活性的变化,

表 3 杉木人工林不同发育阶段土壤酶活性的变化特征

Table 3 Characteristics variations of soil enzymes activity between different developmental phases of Chinese fir plantations						mg/g
林分类型 Stand type	纤维素酶 Cellulase	β-葡糖苷酶 β-glucosidase	蔗糖酶 Sucrase	淀粉酶 Amylase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	
幼龄林 Juvenile	0.10±0.01 d	0.41±0.07 d	0.23±0.02 c	2.85±0.84 c	0.09±0.02 b	
中龄林 Medium	0.12±0.01 d	0.38±0.05 d	0.25±0.02 b	5.44±0.52 a	0.13±0.02 a	
近熟林 Near mature	0.20±0.02 c	0.53±0.07 c	0.27±0.02 a	4.19±0.94 b	0.12±0.03 a	
成熟林 Mature	0.30±0.03 b	0.83±0.07 a	0.22±0.02 c	4.99±0.49 a	0.05±0.02 c	
过熟林 Over mature	0.35±0.02 a	0.63±0.04 b	0.15±0.02 d	5.04±0.71 a	0.06±0.02 c	

注:酶活性单位:纤维素酶、蔗糖酶、淀粉酶为每 g 土中含葡萄糖的质量;β-葡糖苷酶为每 g 土中含水杨醇的质量;多酚氧化酶为每 g 土中含没食子素的质量。

Note:Enzymes activity unit: activity unit of Cellulase,Sucrase and Amylase is the quality of glucose per 1 g soils;activity unit of β-glucosidase is the quality of Salicyl alcohol per 1 g soils;activity unit of Polyphenol oxidase is the quality of galloyl modified-cellulose per 1 g soils.

表 3 显示,在杉木人工林发育过程中,土壤不同 酶活性的变化特征不同。随着杉木人工林的生长发

育,纤维素酶活性表现出上升趋势,在中龄林发育阶段后,这种上升趋势表现尤为明显,过熟林土壤酶活性分别比中龄林、近熟林和成熟林高 192%,75%,17%,各阶段差异均达到显著水平($P<0.05$); β -葡萄糖苷酶活性在幼龄林-中龄林阶段表现出的下降趋势不明显,但中龄林阶段后,其活性明显增加,各阶段间差异均达到显著水平($P<0.05$);蔗糖酶、淀粉酶以及多酚氧化酶活性在不同发育阶段间虽表现出一定的差异性,但未显示出明显的规律性变化。

2.3 土壤微生物含量、酶活性与土壤理化性质的相关分析

2.3.1 土壤理化性质特征 表 4 表明,0~20 cm 土层内,土壤体积质量、孔隙度、饱和持水量及田间

持水量受杉木生长的明显影响,在幼龄林到中龄林的发育阶段,土壤物理性质明显恶化,体积质量显著升高,孔隙度、饱和持水量和田间持水量显著降低;近熟林阶段,土壤物理状况明显恢复,该阶段各项指标与中龄林相比差异达到显著水平;过熟林阶段各项土壤物理指标恢复,甚至超过幼龄林阶段水平。土壤有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量等也表现出随林木生长而强烈变化的特征,均表现为幼龄林较高、中龄林最低、近熟林阶段开始恢复增加,并在过熟林阶段达到整个生长发育阶段的最高值,这一变化趋势与前人的研究结果^[7,17]相似。土壤有效磷含量的变化不同,在幼龄林到近熟林阶段显著增加,而近熟林到过熟林阶段则无显著变化。

表 4 杉木人工林不同发育阶段土壤理化性质的变化特征

Table 4 Characteristics variations of soil physical and chemical properties between different developmental phases of Chinese fir plantations

土壤指标 Soil index	幼龄林 Juvenile	中龄林 Medium	近熟林 Near mature	成熟林 Mature	过熟林 Over mature
容重/(g·cm ⁻³)SBD	0.97±0.05 d	1.24±0.02 a	1.15±0.03 c	1.09±0.05 c	0.82±0.06 e
孔隙度/% SP	63.02±1.77 b	55.68±1.03 d	57.95±1.09 c	62.24±1.04 b	68.38±1.85 a
饱和持水量/% SWH	64.87±2.45 a	48.82±1.59 d	58.52±1.31 c	62.23±1.71 b	65.50±1.33 a
田间持水量/% FWH	58.95±1.22 a	33.61±1.02 e	36.17±0.80 d	49.27±1.31 c	56.50±1.53 b
有机质/(g·kg ⁻¹)SOM	32.61±3.93 c	21.02±5.81 d	38.17±5.43 bc	41.82±5.93 b	50.19±5.93 a
全氮/(g·kg ⁻¹) T N	1.56±0.12 c	1.28±0.17 d	1.85±0.36 b	1.99±0.16 b	2.49±0.19 a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹) AHN	152.65±3.90 d	127.92±2.48 e	155.90±3.36 c	223.62±3.41 b	243.27±3.36 a
有效磷/(mg·kg ⁻¹) AP	0.03±0.01 c	0.04±0.01 b	0.06±0.01 a	0.05±0.01 ab	0.05±0.01 ab
速效钾/(mg·kg ⁻¹) PAK	31.09±1.89 d	24.19±1.95 e	38.89±1.81 c	44.14±2.71 b	54.73±1.26 a

注:同行数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。

Note:Row data marked with different lower-case letters express significant difference ($P<0.05$).

2.3.2 土壤生物学性质与土壤理化性质的相关分析 表 5 表明,纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性以及微生物含量与土壤绝大多数理化性质均达到显著或极显著相关水平,表明上述各项土壤生物特征对土壤理化性质有明显影响,但影响方向不完全相同,蔗糖酶和多酚氧化酶活性对土壤理化性质多表现为明显的负作用,而其他生物指标

则表现相反。需要指出的是,除蔗糖酶和淀粉酶外,其他各项生物指标均与土壤容重显著或极显著负相关,这种影响应该和各指标可以显著改变土壤有机质含量,从而改善土壤孔隙和结构状况密切相关。另外,与其他指标相比,淀粉酶活性对土壤理化性质影响较小,因此其活性在评价杉木林土壤肥力状况时意义不大。

表 5 土壤微生物含量及酶活性与土壤理化性质的相关关系

Table 5 Correlation between soil microbial biomass,enzymes activity and soil physical and chemical properties

土壤理化指标 Soil index	纤维素酶 Cellulase	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	蔗糖酶 Sucrase	淀粉酶 Amylase	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	细菌数 Bacteria	放线菌数 Actinomycetes	真菌数 Fungi	微生物总量 Microbe quantity
容重 SBD	-0.510**	-0.208*	0.809**	0.261	-0.670**	-0.851**	-0.704**	-0.599**	-0.799**
孔隙度 SP	0.650**	0.440**	-0.807**	-0.125	-0.772**	0.909**	0.788**	0.729*	0.884**
饱和含水量 SWH	0.475**	0.439**	-0.519**	-0.461**	-0.721**	0.863**	0.567**	0.533**	0.711**
田间持水量 FWH	0.305*	0.256	-0.644**	-0.464**	-0.732**	0.920**	0.466**	0.434**	0.658**
有机质 SOM	0.856**	0.709**	-0.647**	0.020	-0.735**	0.743**	0.883**	0.852**	0.896**
全氮 TN	0.904**	0.671**	-0.719**	0.186	-0.707**	0.690**	0.948**	0.903**	0.837**
碱解氮 AHN	0.936**	0.828**	-0.771**	0.275	-0.884**	0.817**	0.950**	0.982**	0.974**
有效磷 AP	0.659**	0.579**	-0.130	0.577**	-0.157	-0.070	0.549**	0.572**	0.234
速效钾 PAK	0.922**	0.725**	-0.693**	0.194	-0.745**	0.701**	0.951**	0.923**	0.930**

注:*表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.1 水平上显著相关。

Note:* Shows significantly differences at $P=0.05$,** Shows significantly differences at $P=0.1$.

2.4 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物含量和酶活性与土壤肥力的主成分分析

为了进一步探讨不同发育阶段土壤微生物含量、酶活性与土壤肥力的关系,对土壤微生物含量、酶活性及相关肥力因子进行主成分分析,以筛选出不同发育阶段杉木土壤肥力的主要因子群。

表 6 为供试土壤主成分的特征根和方差贡献率,其中特征根指的是累积方差贡献。根据主成分

分析原理,当累计方差贡献率大于 85%时,即可用于反应系统的变异信息。由表 6 可以看出,第 1 主成分(PC1)的方差贡献率最大,为 67. 046%,第 2 (PC2)、3 (PC3) 主成分的方差贡献率分别为 17. 035%,5. 934%,累计方差贡献率为 90. 015%,且无变量丢失,因此前 3 个主成分的综合指标基本能反映出土壤肥力系统的变异信息。

表 6 土壤主成分的特征根和方差贡献率
Table 6 Eigenvalues and variance contribution of soil principal components

项目 Item	第 1 主成分 PC 1	第 2 主成分 PC 2	第 3 主成分 PC 3
特征根 Eigenvalues	12. 068	3. 066	1. 068
方差贡献率/% Proportion of variance	67. 046	17. 035	5. 934
累计方差贡献率/% Proportion of cumulative variance	67. 046	84. 081	90. 015

由表 7 可知,第 1 主成分综合了纤维素酶、β-葡萄糖苷酶、蔗糖酶、多酚氧化酶等酶活性、有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量和孔隙度等理化性质及放线菌、真菌等微生物含量的变异信息;第 2 主成分综合了淀粉酶活性、有效磷含量、田间持水量的变异信

息;第 3 主成分中,土壤体积质量因子载荷较高。可知,第 1 主成分的方差贡献率最大,其所包含的因子可作为评价土壤肥力的指标,这与相关分析所得的结果大致相同。

表 7 土壤主成分因子的载荷
Table 7 Factor loading matrix of main composition of soils

测定项目 Analysis item	载荷 Loading matrix			测定项目 Analysis item	载荷 Loading matrix		
	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3
纤维素酶 Cellulase	0. 898	0. 418	0. 044	速效钾 PAK	0. 949	0. 182	0. 098
β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase	0. 739	0. 382	0. 333	容重 SBD	−0. 656	0. 474	0. 409
蔗糖酶 Sucrase	−0. 775	0. 145	0. 584	孔隙度 SP	0. 874	−0. 330	0. 017
淀粉酶 Amylase	0. 150	0. 853	−0. 335	饱和持水量 SWH	0. 770	−0. 482	0. 397
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	−0. 845	0. 083	−0. 057	田间持水量 FWH	0. 683	−0. 684	0. 075
有机质 SOM	0. 943	0. 030	0. 230	细菌 Bacteria	0. 871	−0. 433	0. 012
全氮 TN	0. 863	0. 162	0. 074	放线菌 Actinomycetes	0. 950	0. 215	−0. 184
碱解氮 AHN	0. 979	0. 146	−0. 006	真菌 Fungi	0. 944	0. 295	−0. 090
有效磷 AP	0. 317	0. 745	0. 204	微生物数量 Microbe quantity	0. 990	0. 009	−0. 121

将表 7 中的 PC1、PC2、PC3 载荷换算为特征向量^[18],得到反映土壤肥力水平的 3 个主成分方程:

$$\begin{aligned} F_1 &= 0. 258\ 499X_1 + 0. 212\ 729X_2 - 0. 223\ 09X_3 + \\ &\quad 0. 043\ 179X_4 - 0. 243\ 24X_5 + 0. 271\ 453X_6 + \\ &\quad 0. 248\ 424X_7 + 0. 281\ 816X_8 + 0. 091\ 252X_9 + \\ &\quad 0. 273\ 18X_{10} - 0. 188\ 84X_{11} + 0. 251\ 59X_{12} + \\ &\quad 0. 221\ 653X_{13} + 0. 196\ 609X_{14} + 0. 250\ 727X_{15} + \\ &\quad 0. 273\ 468X_{16} + 0. 271\ 74X_{17} + 0. 284\ 982X_{18}; \\ F_2 &= 0. 238\ 721X_1 + 0. 218\ 161X_2 + 0. 082\ 81X_3 + \\ &\quad 0. 487\ 15X_4 + 0. 047\ 401X_5 + 0. 017\ 133X_6 + \\ &\quad 0. 092\ 519X_7 + 0. 083\ 381X_8 + 0. 425\ 471X_9 + \\ &\quad 0. 103\ 941X_{10} + 0. 270\ 702X_{11} - 0. 188\ 46X_{12} - \\ &\quad 0. 275\ 27X_{13} - 0. 390\ 63X_{14} - 0. 247\ 29X_{15} + \\ &\quad 0. 122\ 787X_{16} + 0. 168\ 475X_{17} + 0. 005\ 14X_{18}; \\ F_3 &= 0. 042\ 576X_1 + 0. 322\ 225X_2 + 0. 565\ 102X_3 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &0. 324\ 16X_4 - 0. 055\ 16X_5 + 0. 222\ 557X_6 + \\ &0. 071\ 605X_7 - 0. 005\ 81X_8 + 0. 197\ 399X_9 + \\ &0. 094\ 829X_{10} + 0. 395\ 765X_{11} + 0. 016\ 45X_{12} + \\ &0. 384\ 154X_{13} + 0. 072\ 573X_{14} + 0. 011\ 612 \times \\ &X_{15} - 0. 178\ 05X_{16} - 0. 087\ 09X_{17} - 0. 117\ 08X_{18}。 \end{aligned}$$

其中 $X_1, X_2, \dots, X_{18}$ 依次代表表 7 中的 18 项指标的特征值。将各个发育阶段下的土壤酶活性、理化性质、微生物含量值代入上述方程,计算各主成分的得分,再以各总主成分的方差贡献率为权数,对所提取的得分进行加权求和^[19],得到反映土壤肥力水平的综合得分(表 8)。表 8 表明,不同发育阶段杉木土壤肥力水平为幼龄林土壤肥力较高,中龄林最低,近熟林至过熟林阶段逐渐升高并达到最高水平,表现为过熟林>成熟林>近熟林>幼龄林>中龄林。

表 8 杉木人工林不同发育阶段土壤肥力水平的综合得分

Table 8 Integrative scores of soil fertility levels in different developing stages of Chinese fir plantations

林分类型 Stand type	F ₁	F ₂	F ₃	综合得分 Comprehensive scores	综合排名 Comprehensive ranking
幼龄林 Juvenile	-1.23	-3.30	0.34	-1.36	4
中龄林 Medium	-4.59	1.16	-1.07	-2.95	5
近熟林 Near mature	-1.79	0.71	0.99	-1.02	3
成熟林 Mature	2.40	0.98	0.70	1.82	2
过熟林 Over mature	5.21	0.11	-0.96	3.46	1

3 结论与讨论

与幼龄林土壤相比,中龄林土壤在通气性、保水性、化学指标含量以及微生物含量等方面都表现出明显的恶化现象,但进入近熟林阶段后,土壤状况明显恢复,在成熟林-过熟林阶段多数土壤物理、化学和微生物指标都达到甚至超过幼龄林阶段水平。这种规律性变化无疑与整地措施以及林下环境和植被变化等因素密切相关。良好的水热条件以及种植前的整地措施对土壤的改善,不仅促进了草本和灌木的生长,同时也促进了土壤微生物的繁殖和活动,因此在幼龄林阶段土壤的物理性质、化学性质以及微生物含量均处于良好水平。但随着林分郁闭,林下植被逐渐淘汰,枯落物数量降低、种类单一,加之阴湿林下环境的影响,致使土壤微生物含量降低,活动减弱,枯落物分解转化强度下降,土壤状况恶化。此后,由于间伐、自然整枝等原因,水热状况逐渐改善,土壤微生物含量上升,活动增强,加之林下植被的恢复,导致有机质的种类和数量增加,土壤状况明显恢复。

除淀粉酶外,纤维素酶、β-葡糖苷酶、蔗糖酶、多酚氧化酶 4 种土壤酶活性虽然对多数土壤理化性质有强烈影响,但其活性随杉木生长并没有显示出规律性变化的特点。土壤酶作为一类具有专性催化作用的蛋白质,几乎参与了土壤中所有的生物化学过程^[20]。由于土壤酶对环境和管理因素导致的变化具有较强的敏感性,因此其一直被看作是比较理想的反映土壤肥力状况的综合度量指标^[21-25]。但应该指出的是,由于土壤酶活性分析方法的滞后以及土壤酶对土壤肥力响应的复杂性等诸多原因^[26-29],很难建立准确的森林生态系统土壤酶活性与养分有效性的关系。因此,在目前的分析手段和研究基础条件下,仅仅利用一种或几种土壤酶活性特征进行土壤肥力状况评价,其准确性还值得探讨。

作为第 1 主成分因子,土壤有机质、碱解氮、全氮、放线菌、真菌含量以及纤维素酶、β-葡糖苷酶和蔗糖酶活性等土壤因子是综合评价土壤肥力状况的

重要指标。通过计算综合得分得出,不同发育阶段杉木林地土壤肥力由高到低为过熟林>成熟林>近熟林>幼龄林>中龄林。

[参考文献]

[1] 王清奎,汪思龙,冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质与土壤养分的关系 [J]. 生态学报,2005,25(6):1299-1305.
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W. Study on dissolved organic carbon and nitrogen nutrients under Chinese fir plantation; Relationships with soil nutrients [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6):1299-1305. (in Chinese)

[2] 陈龙池,汪思龙,陈楚莹. 杉木人工林衰退机理探讨 [J]. 应用生态学报,2004,15(10):1953-1957.
Chen L C, Wang S L, Chen C Y. Degradation mechanism of Chinese fir plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10):1953-1957. (in Chinese)

[3] 陈光水,何宗明,谢晋升,等. 福建柏和杉木人工林细根生产力、分布及周转的比较 [J]. 林业科学,2004,40(4):15-21.
Chen G S, He Z M, Xie J S, et al. Comparison on fine root production, distribution and turnover between plantations of Fokienia hodginsii and Cunninghamia lanceolata [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(4):15-21. (in Chinese)

[4] 杨玉盛,陈光水,王水国. 皆伐对杉木人工林土壤呼吸的影响 [J]. 土壤学报,2005,42(4):584-590.
Yang Y S, Chen G S, Wang S G. Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 40(4):15-21. (in Chinese)

[5] Huang Z Q, Terr Y H, Wang S L, et al. Autotoxicity of Chinese fir on seed germination and seedling growth [J]. Allelopathy J, 2002, 9(2):187-193.

[6] 王旭琴,戴伟,夏良放,等. 亚热带不同人工林土壤理化性质的研究 [J]. 北京林业大学学报,2006,28(6):56-59.
Wang X Q, Dai W, Xia L F, et al. Effects of different subtropical plantations on physical and chemical properties of soil [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6):56-59. (in Chinese)

[7] 焦如珍,杨承栋. 杉木人工林不同发育阶段根际与非根际土壤微生物变化趋势 [J]. 林业科学研究,1999,35(1):53-59.
Jiao R Z, Yang C D. The changes of the soil microorganism rhizosphere and outside in different developing stages of the Chinese fir plantation [J]. Scientia silvae sinicae, 1999, 35(1):53-59. (in Chinese)

[8] 孙启武,杨承栋,焦如珍. 江西大岗山连栽杉木人工林土壤性质

- 的变化 [J]. 林业科学研究, 2003, 39(3): 1-5.
- Sun Q W, Yang C D, Jiao R Z. The changes of soil properties of the successive Chinese fir plantation in Dagang mountain of Jiangxi Province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(3): 1-5. (in Chinese)
- [9] 《中国森林》编辑委员会. 中国森林: 第一卷总论 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- Editorial Committee of Chinese Forest. Chinese forest: The first coil summary [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997. (in Chinese)
- [10] 国家林业局. 森林土壤分析方法 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- State Forestry Administration. Forest soil analysis methods [M]. Beijing: China Standards Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- Guan S Y. Soil enzyme and research method [M]. Beijing: Agriculture Publishing House, 1986. (in Chinese)
- [12] 周礼凯. 土壤酶学 [M]. 北京: 中国科学出版社, 1987.
- Zhou L K. Soil enzymology [M]. Beijing: China Science Publishing House, 1987. (in Chinese)
- [13] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 40-64.
- Nanjing Institute of Soil Microbial Laboratory, Chinese Academy of Sciences. Microbial research method [M]. Beijing: Science Press, 1985: 40-64. (in Chinese)
- [14] R E 布坎南, N E 吉本斯, 布瑞德, 等. 伯杰细菌鉴定手册 [M]. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组译. 北京: 科学出版社, 1984.
- Bergey R E, Buchanan R E, Krieg N R, et al. Tranlated by Institute of Microbiology [M]. Translated by Chinese Academy of Sciences 《Bergey's Manual of Systematic Bacteriology》. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Agricultural soil analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 林大仪. 土壤学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Lin D Y. Soil experimental guide [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. (in Chinese)
- [17] 盛炜彤, 范少辉. 杉木人工林长期生产力保持机制研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 150-151.
- Sheng W T, Fan S H. To maintain long-term productivity of Chinese fir plantation mechanism [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2005: 150-151. (in Chinese)
- [18] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件 [J]. 统计研究, 2005(3): 65-69.
- Lin H M, Zhang W L. The Relationship between Principal Component Analysis and Factor Analysis and SPSS Software [J]. *Statistical Research*, 2005(3): 65-69. (in Chinese)
- [19] 兰忠明, 王 飞. 多元统计分析在三明烟区土壤肥力评价中的运用 [J]. 中国农学通报, 2004, 41(4): 655-659.
- Lan Z M, Wang F. Multivariate statistical analysis application in evaluation soil fertility in sanming areas [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 41(4): 655-659. (in Chinese)
- [20] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality [M]. Madison: Soil Society of America Special Publication 35, 1994: 107-124.
- [21] Dick R P. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators [M]. Madison: Soil Society of America Special Publication 49, 1996: 247-272.
- [22] Bandick A K, Dick R P. Field management effect on soil enzyme activity [J]. *Soil Biological and Biochemistry*, 1999, 31: 1471-1479.
- [23] 耿玉清, 白翠霞, 赵铁蕊, 等. 北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 7-11.
- Geng Y Q, Bai C X, Zhao T R, et al. Soil enzyme activity and its relationship with the soil fertility in Badaling Mountain Area of Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 7-11. (in Chinese)
- [24] 张玉兰, 陈利军, 张丽莉. 土壤质量的酶学指标研究 [J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 598-604.
- Zhang Y L, Chen L J, Zhang L L. Enzymological Indicators of soil quality [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 598-604. (in Chinese)
- [25] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
- Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1843-1848. (in Chinese)
- [26] Sinsabaugh R L, Antibus R K, Linkins A E. Wood decomposition nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extra-cellular enzyme activity [J]. *Ecology*, 1993, 74: 1586-1593.
- [27] Schloter M, Dilly O, Munch J C. Indicators for evaluating soil quality [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 98: 255-262.
- [28] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extra-cellular enzymes to simple and complex nutrient inputs [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 37-944.
- [29] Fontaine S, Mariotti, A, Abbadié L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 837-843.