林业科学研究 2017,30(2):322～328
Forest Research

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.02.019

不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析

李惠通[1,2], 张 芸[1,2], 魏志超[1,2], 贾代东[1,2], 刘雨晖[3], 刘爱琴[1,2]*

(1.福建农林大学林学院,福建 福州 350002;2.国家林业局杉木工程技术研究中心,福建 福州 350002;
3.福建农林大学莘口教学林场,福建 三明 365002)

摘要:[**目的**]研究不同发育阶段(幼龄林、中龄林、成熟林)对杉木人工林土壤肥力的影响,为揭示杉木地力衰退的原因提供依据。[**方法**]通过对南方杉木中心产区不同发育阶段杉木人工林土壤理化性质的测定,利用数学模糊评价和主成分分析2种方法,综合比较不同发育阶段杉木人工林土壤肥力。[**结果**]不同发育阶段对人工林土壤物理、化学性质均有显著影响。在同一发育阶段中,杉木人工林表层土与底层土之间存在差异($p<0.001$);土壤质量含水量对土壤物理性质具有显著指示作用,有机质、pH值与土壤养分指标呈显著相关;主成分分析和模糊评价方法均得出不同发育阶段杉木林土壤肥力呈现幼龄林>成熟林>中龄林的规律。[**结论**]随着杉木栽植时间的增长,需要采取施肥、间伐等人工干预恢复地力,进而满足杉木速生需求。

关键词:杉木;发育阶段;土壤肥力;主成分分析;数学模糊评价方法

中图分类号:S791.27 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1498(2017)02-0322-07

Evaluation on Soil Fertility of Chinese Fir Plantations in Different Development Stages

LI Hui-tong[1,2], *ZHANG Yun*[1,2], *WEI Zhi-chao*[1,2], *JIA Dai-dong*[1,2], *LIU Yu-hui*[3], *LIU Ai-qin*[1,2]

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. Chinese Fir Engineering Research Centre of State Forestry Administration, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. Xinkou Experimental Forest Farm of Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming 365002, Fujian, China)

Abstract: [**Objective**] To investigate the dynamics of soil fertility at different development stages (young forest, middle aged forest and mature forest) of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations. [Method] The soil fertility level at different development stages in Chinese fir plantation located at central and south China was investigated using fuzzy mathematical evaluation and principal component analysis. [**Result**] The results showed that the age of plantation had a significant impact on forest soil and its physical and chemical properties. Moreover, at each age there were significant differences ($p<0.001$) in soil properties between topsoil and subsoil. The correlation analysis revealed significant relation between water quality and soil physical properties. The organic matter, pH value also showed a significant relationship with soil chemical properties. The results of principal component analysis and fuzzy evaluation method indicated that the fertility level of Chinese fir plantations at northern Fujian hilly area followed the order of mature forest > young forest > middle aged forest. [**Conclusion**] With the growth of trees, it is needed to restore fertility by fertilizing, thinning and other manual intervention in order to satisfying the demand of Chinese fir for fast-growing.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; forest development stage; soil fertility; PCA; Fuzzy mathematics evaluation

---

收稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0600301),国家科技支撑计划项目(2015BAD09B010102)和福建农林大学科技创新专项基金项目(KF2015034)资助。

作者简介: 李惠通(1992—),男,重庆涪陵,硕士研究生,研究方向:自然资源管理。E-mail:huitongli1314@163.com

* 通讯作者:刘爱琴(1966—),女,研究员,硕士生导师,研究方向:森林土壤及林木生理生化,森林与环境。E-mail:fjlaq@126.com

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)是我国南方特有的速生用材树种,具生长快、材质好、用途广等特点,目前栽植面积占全国人工林面积的30%以上[1-2],大量研究表明,杉木人工林生产力下降和地力衰退现象明显,连栽[3-4]、不合理经营措施[5-7]、短轮伐期[8-9]、杉木自身生物学特性[10]等均可能是引起地力衰退的原因。但由于研究地区和研究对象空间异质性以及林业研究的长期性,目前国内外对导致杉木地力衰退的原因还没有完全弄清,因此进一步开展杉木人工林土壤肥力的规律研究,为揭示杉木地力衰退的原因提供科学依据显得极为必要。

人工林的不同发育阶段贯穿林木生长的整个生命周期,了解林木不同发育阶段土壤肥力及林木的需肥特性对人工林经营具重要生态学意义[11]。王宏星[12]、崔宁洁[13]和衣晓丹[14]等对日本落叶松(*Larix kaempferi* Carr.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)和杉木等人工林不同发育阶段的土壤理化性质进行过探讨,表明在林木整个生长发育过程中,由于生长环境不断变化,不可避免的对土壤肥力状况产生影响,导致不同发育阶段土壤肥力间存在差异。

土壤肥力评价能够揭示土壤利用和功能有关的土壤内在属性之间的异同,科学的确定森林土壤肥力指标并进行评价,对立地生产力和多目标森林经营的研究也具有重要价值[15]。虽然目前已有不少杉木人工林土壤肥力评价方面的研究[16-17],但运用多种合理的数学分析方法在相同条件下不同发育阶段杉木人工林土壤肥力的综合比较研究相对较少[18]。有鉴于此,本研究选择位于全国杉木中心产区的福建农林大学莘口教学林场不同发育阶段的杉木人工林(幼龄林、中龄林、成熟林)为研究对象,研究测定不同发育阶段杉木人工林土壤肥力指标,在分析不同发育阶段和不同土层土壤肥力指标基础上,采用数学模糊评价[19]和主成分分析[20]2 种方法,综合比较不同发育阶段杉木人工林土壤肥力,揭示土壤肥力随林分生长和土层深度的变化规律,为进一步揭示杉木人工林地力衰退提供科学依据。

1　试验地概况

试验地位于福建省三明市福建农林大学莘口教学林场(26°7′～26°12′N,117°25′～117°32′E),为低山丘陵地貌,属典型亚热带季风气候,年平均气温19.1℃,年平均降水量1 749 mm,为粉砂岩发育的山地红壤,土层厚度1 m 以上。试验地均为二代经营的杉木人工林,造林前经炼山整地,造林后除草抚育6 次,每年 2 次,并且没有经过人工施肥,中龄林和成熟林分别在 2011 和 2004 年进行间伐,样地基本情况见表 1。

表 1　不同发育阶段杉木人工林样地概况

Table 1　Situation of the sites of Chinese fir in different development

发育阶段 Stand	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m	林分密度 Density/(n·hm^{-2})	海拔 Altitude/m	灌木层主要物种 Shrub layer dominant species	草本层主要物种 Herbaceous layer dominant species
幼龄林 Juvenile	7.17	5.57	2 267	230	山苍子(*Litsea cubeba* (Lour.) Pers.)	枇杷叶紫株(*Callicarpa kochiana* Makino.)
					楤木(*Aralia chinensis* L.)	乌毛蕨(*Lechnum orientale* L.)
					东南野桐(*Mallotus lianus* Croiz.)	五节芒(*Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb.)
中龄林 Medium	15.52	12.52	1 375	229	杜茎山(*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi.)	乌毛蕨(*Lechnum orientale* L.)
					箬竹(*Indocalamus tessellatus* (Munro) Keng f.)	金毛狗(*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.)
					粗叶榕(*Ficus hirta* Vahl.)	福建莲座蕨(*Angiopteris fokiensis* Hieron.)
成熟林 Mature	20.99	20.62	1 225	226	箬竹(*Indocalamus tessellatus* (Munro) Keng f.)	金毛狗(*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.)
					粗叶榕(*Ficus hirta* Vahl.)	华山姜(*Alpinia chinensis* (Retz.) Rosc.)
					细圆藤(*Pericampylus glaucus* (Lam.) Merr.)	福建莲座蕨(*Angiopteris fokiensis* Hieron.)

注:表中幼龄林林龄为 5 年,中龄林林龄为 15 年,成熟林林龄为 24 年,均按采样时间计算。

Note: In the table, the Juvenile age is 5, the Medium age is 15, the Mature age is 24, and the calculation according to the sampling time.

2　研究方法

2.1　样地设置

2015 年 1 月,在福建三明莘口教学林场内,选择海拔、母岩、立地等条件相近的杉木幼龄林(2010 年造林)、中龄林(2000 年造林)和成熟林(1991 年造林)为试验林分,在每个发育阶段的杉木林中设 20 m×20 m 标准地 9 个,共设 27 个标准地。

2.2 土样采集

在每个标准地内按S型挖取5个土壤剖面,分别按0～20、20～40、40～60 cm土层采集1 kg土样,相同土层混合均匀后,去除石砾和植物根系,取一部分新鲜土样置于4℃冰箱保存,用于无机态氮测定。另取1 kg混合均匀的土壤,风干后过筛,测定土壤化学性质指标;同时在每个标准地内用环刀取原状土测定土壤水分物理性质指标。

2.3 测定方法

采用环刀法测定土壤密度、质量含水量、孔隙度、持水量等水分物理性质指标。采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机质。土壤总氮用碳氮元素分析仪(德国Elementar)测定,铵态氮和硝态氮用AA3型双通道流动分析仪(德国Seal)测定,全磷、有效磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度法测定,pH值采用电位法(土:水=1:2.5)测定[21]。

2.4 土壤肥力评价方法

利用主成分分析法和模糊评判法,选用0～20 cm表土层土壤理化指标对不同发育阶段的杉木林土壤肥力进行综合评价。采用SPSS 19、Excel和Origin Pro 8处理图表。

2.4.1 *主成分分析法* 主成分分析(PCA)[22]的综合评价模型为:

$$F = \sum_{i=1}^{n} (\lambda_i / \sum \lambda) \times f_i$$

其中,F为综合评价值,λ为特征值,f为主成分值。

2.4.2 *模糊评价方法* 模糊数学综合评判法是在确定各因子隶属函数前提下,确定各层次的模糊矩阵,最后自下而上逐层进行模糊综合评价的方法。

土壤肥力综合评价值(SFI)是把各肥力指标的权重和隶属度,利用加乘法则进行合成,进而评价土壤肥力优良的一种方法。计算公式为:

$$SFI = \sum_{i=1}^{n} W_i P_i$$

其中,W_i和P_i分别是第i项肥力指标的权重和隶属度;n表示总肥力指标数。

3 结果与分析

3.1 不同发育阶段杉木人工林土壤物理性质的比较

表2看出,土壤物理性质指标随着发育过程表现出显著的变化规律。幼龄林与成熟林0～20 cm土层的最大持水量、田间持水量、总孔隙度和土壤密度与20～40 cm、40～60 cm土层差异达显著水平。随着土层的增加,最大持水量、田间持水量和总孔隙度减少,土壤密度则增加。中龄林不同层次土壤最大持水量均存在显著差异,而毛管孔隙度与质量含水量在同一发育阶段不同土层之间无显著差异。

表2 不同发育阶段杉木人工林土壤水分物理性质

Table 2 Soil physical properties of Chinese fir plantation at different stages

发育阶段 Stage	土层 Layer cm	最大持水量 MWH (g·kg^{-1})	田间持水量 FWH (g·kg^{-1})	总孔隙度 SP %	毛管孔隙度 CSP %	土壤密度 BD (g$_s$·cm^{-3})	质量含水量 QWH %
幼龄林 Juvenile	0～20	579.84±80.08Aa	449.76±16.67Aa	55.23±2.40Aa	41.22±2.97Aa	0.98±0.12Bb	31.57±4.01Aa
	20～40	468.12±34.93Ab	345.47±16.87Ab	51.45±1.26Ab	40.84±2.60Aa	1.11±0.08Aa	29.03±2.70Aa
	40～60	427.35±41.84Ab	332.38±26.31Ab	49.85±2.50Ab	41.46±2.71Ba	1.17±0.08Ba	28.04±3.66Ba
中龄林 Medium	0～20	479.93±66.66Ba	351.73±23.05Aa	53.93±2.98Aa	43.10±1.91Aa	1.26±0.09Aa	29.58±2.33Aa
	20～40	409.04±40.89Bb	323.07±30.23Ab	50.48±2.25Aab	42.86±3.11Aa	1.24±0.20Aab	29.51±2.53Aa
	40～60	376.09±58.68Bc	319.04±49.31Ab	48.98±2.56Ab	44.19±3.85ABa	1.21±0.10ABb	30.26±5.04ABa
成熟林 Mature	0～20	493.19±63.60Ba	359.00±33.16Aa	54.72±2.93Aa	43.41±2.03Aa	1.14±0.10Ab	33.55±3.27Aa
	20～40	440.31±38.60ABb	338.62±15.26Ab	52.59±1.93Ab	43.71±1.99Aa	1.20±0.09Aa	32.10±2.46Aa
	40～60	418.88±25.37Ab	347.16±14.93Ab	51.64±1.63Ab	45.43±1.72Aa	1.24±0.20Aa	32.77±1.70Aa
F值		3.42*	0.83	6.09**	18.96**	7.43**	12.11*

注:表中数据为平均值±标准差,**表示在0.01水平差异显著,*表示在0.05水平差异显著。小写字母表示同一发育阶段不同土层间的差异显著水平,大写字母表示同一土层不同发育阶段土壤各指标的差异显著水平($P<0.05$),F值反映了林龄因素对土壤各指标的显著水平,$n=9$。

Note: Data in the table as mean ± standard deviation, ** Shows significantly differences at $P=0.01$, * Shows significantly differences at $P=0.05$, Small letters represent the same stage of development differences among the significant level of soil, Big letters indicate differences in the same layer of soil at different developmental stages of each index significant ($P<0.05$). F values reflect the significant level forest age factor of soil each index, $n=9$.

不同土层土壤水分物理指标随发育阶段的增加呈先减少后增加的趋势。0～20 cm 土层的最大持水量和土壤密度表现出幼龄林分别与成熟林和中龄林存在显著差异,最大持水量在幼龄林最高,到中龄林时降到最低,成熟林有所上升,而土壤密度与之相反,其余指标未达显著水平。在 20～40 cm 土层,除了最大持水量之外,其余指标差异均不显著。在 40～60 cm 土层,毛管孔隙度、土壤密度和质量含水量,幼龄林与成熟林存在显著差异,均表现出成熟林大于中龄林和幼龄林,而最大持水量则表现出幼龄林和成熟林大于中龄林。

3.2　不同发育阶段杉木人工林土壤化学性质的比较

表 3 看出,幼龄林与成熟林 0～20 cm 土层有机质、全氮和硝态氮均显著高于 20～40 cm 和 40～60 cm 土层。幼龄林不同层次的全钾均有显著差异,并且逐层递增。中龄林土壤有机质、铵态氮、硝态氮、有效磷表现为 0～20 cm 和 20～40 cm 土层显著高于 40～60 cm 土层,全磷出现相反显著趋势,而 0～20 cm 与 20～40 cm 土层间差异仅有机质表现出显著差异。

表 3　不同发育阶段杉木人工林土壤化学性质

Table 3　Soil chemical properties of Chinese fir plantation at different stages

发育阶段 Stage	土层 Layer	有机质 SOM	全氮 TN	铵态氮 $(NH_4^+)N$	硝态氮 $(NO_3^-)N$	全磷 TP	有效磷 AP	全钾 TK	pH
	cm	$(g \cdot kg^{-1})$		$(mg \cdot L^{-1})$		$(g \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(g \cdot kg^{-1})$	H_2O
幼龄林 Juvenile	0～20	29.54 ±4.40Aa	1.59 ±0.16Ba	3.75 ±0.86Aa	0.28 ±0.08Ba	0.53 ±0.10Ba	3.35 ±1.06Aa	19.03 ±3.04Bc	4.43 ±0.17Aa
	20～40	16.18 ±5.0ABb	1.14 ±0.22Bb	3.36 ±0.69Aa	0.24 ±0.05Cb	0.45 ±0.07Ba	2.68 ±0.83Aa	19.54 ±3.67Cb	4.41 ±0.14Aa
	40～60	10.55 ±2.30Ab	1.01 ±0.24Bb	2.75 ±0.75Aa	0.23 ±0.05Bb	0.41 ±0.09Ba	2.15 ±0.86Aa	20.68 ±4.56Ca	4.45 ±0.07Aa
中龄林 Medium	0～20	24.91 ±3.52Aa	1.83 ±0.2ABa	3.15 ±0.32Aa	0.68 ±0.12Aa	0.32 ±0.12Ca	8.10 ±1.53Aa	26.83 ±2.51Ab	4.05 ±0.42Ba
	20～40	13.35 ±3.00Bb	1.42 ±0.22Aa	2.87 ±0.18Aa	0.50 ±0.09Aa	0.28 ±0.10Ca	7.29 ±8.09Aa	29.37 ±2.33Ab	4.26 ±0.17Ba
	40～60	10.65 ±2.01Ab	1.36 ±0.13Aa	2.44 ±0.15Ab	0.42 ±0.06Ab	0.26 ±0.10Ca	3.32 ±3.42Ab	32.74 ±2.06Aa	4.20 ±0.23Ba
成熟林 Mature	0～20	31.36 ±8.20Aa	1.97 ±0.36Aa	3.44 ±1.38Aa	0.62 ±0.18Aa	0.69 ±0.18Aa	2.55 ±0.63Aa	24.57 ±2.55Aa	4.20 ±0.1ABa
	20～40	19.53 ±5.08Ab	1.60 ±0.14Ab	2.63 ±1.31Aa	0.39 ±0.03Bb	0.60 ±0.10Aa	1.93 ±0.59Aa	26.08 ±1.56Ba	4.22 ±0.06Ba
	40～60	15.62 ±7.60Ab	1.51 ±0.31Ab	2.36 ±1.15Aa	0.36 ±0.02Ab	0.54 ±0.09Aa	1.27 ±0.78Ab	26.44 ±4.59Ba	4.23 ±0.05Ba
F 值		3.42*	0.83	6.09**	18.96**	7.43**	12.11*	0.41	2.13

注:同上。

Note: The same as table 2

从同一土层看,成熟林 0～20 cm 土层全氮、全磷均显著高于中龄林和幼龄林。中龄林硝态氮、有效磷和全钾高于幼龄林和中龄林,其中硝态氮和全钾显著高于幼龄林。幼龄林的铵态氮和 pH 值高于中龄林和成熟林,pH 值达显著水平。20～40 cm 土层与 0～20 cm 土层差异不大。不同发育阶段杉木林 40～60 cm 土层有机质、铵态氮和有效磷差异不显著。成熟林全氮、硝态氮和全磷均高于幼龄林与中龄林,其中全磷成熟林达显著水平。中龄林全钾显著高于成熟林和幼龄林。

3.3　不同发育阶段杉木人工林土壤肥力因子相关分析

表 4 可见,不同发育阶段杉木人工林各个土壤肥力因子之间关系较为密切。其中,土壤水分物理性质各指标间的相关性较为显著。质量含水量除与土壤密度呈显著负相关外,与其他土壤物理指标均呈显著正相关,说明质量含水量对土壤水分物理性质具有明显指示作用。土壤有机质除与有效磷和 pH 值无关,与其他化学性质指标均表现出显著正相关,而且 pH 值与全氮、硝态氮、有效磷和全钾也表现出显著负相关,说明有机质与 pH 值对土壤化学性质具有明显的指示作用。

3.4　不同发育阶段杉木人工林土壤肥力的综合评价

3.4.1　主成分分析　选择表层土壤最大持水量、田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、土壤密度、质量含水量、有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、全磷、有效磷、全钾和 pH 值组成该区域的土壤肥力评价指标体系,进行主成分分析。设置特征值大于 1 的抽取方法,得出表 5 中前 5 个主成分,第一主成分的方差贡献率最大,为 38.86%,第二、三、四主成分的方差贡献率分别为 20.93%、10.24% 和 8.36%,第五主成分的方差贡献率相对最小,为 7.206%,并且抽取出的主成分累积方差贡献率为 85.59%(>85%),证明可以基本反映土壤肥力系统的变异程度[23]。

表4 土壤肥力因子的相关系数

Table 4 The correlation coefficient of soil fertility factor

项目 Items	最大持水量 MWH	田间持水量 FWH	总孔隙度 SP	毛管孔隙度 CSP	土壤密度 BD	质量含水量 QWH	有机质 SOM	全氮 TN	铵态氮 (NH_4^+) N	硝态氮 (NO_3^-) N	全磷 TP	有效磷 AP	全钾 TK
田间持水量 FWH	0.76**												
总孔隙度 SP	0.82**	0.73**											
毛管孔隙度 CSP	-0.17	0.21	0.10										
土壤密度 BD	-0.77**	-0.69**	-0.63**	0.09									
质量含水量 QWH	0.39**	0.56**	0.47**	0.48**	-0.32**								
有机质 SOM	0.62**	0.52**	0.67**	-0.03	-0.45**	0.20							
全氮 TN	0.33**	0.35**	0.49**	0.14	-0.20	0.27*	0.80**						
铵态氮(NH_4^+)N	-0.36*	0.33*	0.29	0.02	-0.25	0.21	0.38*	0.09					
硝态氮(NO_3^-)N	-0.19	-0.05	0.10	0.16	0.24	-0.09	0.32*	0.58**	0.09				
全磷 TP	0.28*	0.30**	0.28*	0.05	-0.29**	0.20	0.44**	0.35**	0.22	-0.04			
有效磷 AP	-0.08	-0.08	-0.08	-0.02	0.06	-0.15	-0.01	-0.01	-0.01	0.24	-0.20		
全钾 TK	-0.46**	-0.28*	-0.29**	0.31**	0.48**	0.11	-0.30**	0.21	-0.18	0.39**	-0.22	0.07	
pH	0.21	0.05	0.07	-0.13	-0.16	0.04	-0.08	-0.34**	0.10	-0.43**	0.05	-0.34**	-0.33**

注：*表示在0.05水平上显著相关，**表示在0.01水平上显著相关。$n=8$

Note: * Shows significantly differences at $P=0.05$, ** Shows significantly differences at $P=0.01$, $n=8$.

表5 各变量的特征根及相应的贡献率

Table 5 Characteristic roots of the variables and the corresponding contribution rate

成分 Ingredient	初始特征值 Initial eigenvalues 合计 Total	方差的百分比 Variance /%	累积的百分比 Accumulation /%	提取平方和载入 Extract the sum of square 合计 Total	方差的百分比 Variance /%	累积的百分比 Accumulation /%
1	5.44	38.86	38.86	5.44	38.86	38.86
2	2.93	20.93	59.78	2.93	20.93	59.78
3	1.43	10.24	70.02	1.43	10.24	70.02
4	1.17	8.36	78.38	1.17	8.36	78.38
5	1.01	7.21	85.59	1.01	7.21	85.59
6	0.76	5.44	91.03			
7	0.55	3.91	94.94			
8	0.42	3.02	97.96			
9	0.15	1.04	98.99			
10	0.09	0.67	99.67			
11	0.03	0.19	99.86			
12	0.02	0.12	99.98			
13	0.00	0.01	99.99			
14	0.00	0.00	100.00			

表6为5个主成分的特征向量值，可看出不同土壤肥力因子对该主成分的贡献与反馈特征。

运用主成分分析综合评价模型，得到不同发育阶段杉木林土壤肥力的综合得分。从表7看出，不同发育阶段杉木林土壤肥力的综合得分分别为1.90、0.92、-1.26，其中以杉木幼龄林土壤肥力较高，随后中龄林土壤肥力下降，到成熟林阶段土壤肥力又有所恢复。

表6 5个主成分的特征向量

Table 6 The feature vector of five main components

因子 Factors	成份 Ingredient 1	2	3	4	5
最大持水量 MWH(x_1)	0.95	-0.17	-0.11	0.11	0.01
田间持水量 FWH(x_2)	0.20	-0.65	0.07	-0.53	0.45
总孔隙度 SP(x_3)	0.90	-0.01	-0.04	0.13	-0.11
毛管孔隙度 CSP(x_4)	0.01	-0.41	0.76	-0.20	-0.26
土壤密度 BD(x_5)	-0.90	0.13	0.33	-0.14	0.07
质量含水量 QWH(x_6)	0.59	-0.17	-0.57	0.17	-0.03
有机质 SOM(x_7)	0.48	0.81	0.18	0.13	0.11
全氮 TN(x_8)	-0.27	0.86	0.12	-0.10	0.06
铵态氮 $NH4^+N$(x_9)	0.23	0.10	0.41	0.52	0.63
硝态氮 $NO3^-N$(x_{10})	-0.75	0.28	0.20	0.24	-0.29
全磷 TP(x_{11})	0.34	0.74	0.07	0.38	-0.09
有效磷 AP(x_{12})	-0.46	-0.45	-0.12	0.52	-0.21
全钾 TK(x_{13})	-0.83	-0.17	0.24	-0.06	0.08
pH(x_{14})	0.75	-0.07	0.28	-0.07	-0.41

表7 不同发育阶段土壤肥力综合得分

Table 7 Comprehensive scores of soil fertility quality in different age

发育阶段 Stage	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	综合得分 Score
幼龄林 Juvenile	3.80	0.05	0.48	0.63	0.55	1.90
中龄林 Medium	-3.10	-0.02	1.38	0.33	-0.54	-1.26
成熟林 Mature	0.50	1.97	1.36	0.74	-0.25	0.92

3.4.2 *模糊评价方法* 根据前人研究[24-28]，利用各评价指标与植物生长效应确定隶属度函数。由于不同肥力指标对土壤的贡献不同，应赋予不同权重。为避免主观因素影响，采用相关系数法来计算。即

首先根据之前各土壤因子的相关性分析分别求出各单项指标与其余指标的相关系数平均值,再以该单项指标占所有指标相关系数平均值总和的百分比,作为该单项肥力指标的权重。

表 8　土壤肥力指标的隶属度、相关系数均值、权重及最后得分

Table 8　Membership, the average correlation coefficient, the weight and the final score of soil fertility

因子 Factors	幼龄林 Juvenile	中龄林 Medium	成熟林 Mature	相关系数均值 Correlation coefficient	权重 Weights
最大持水量 MWH(x_1)	1.00	0.01	0.56	0.16	0.13
田间持水量 FWH(x_2)	1.00	0.02	0.62	0.21	0.17
总孔隙度 SP(x_3)	0.57	0.54	1.00	0.23	0.19
毛管孔隙度 CSP(x_4)	0.24	0.73	1.00	0.05	0.04
土壤密度 BD(x_5)	0.55	1.00	1.00	-0.22	-0.18
质量含水量 QWH(x_6)	0.31	0.23	1.00	0.18	0.15
有机质 SOM(x_7)	0.63	0.54	0.74	0.24	0.19
全氮 TN(x_8)	0.50	0.62	0.68	0.24	0.19
铵态氮 $NH4^+N$(x_9)	0.22	0.19	0.19	0.13	0.10
硝态氮 $NO3^-N$(x_{10})	0.13	0.26	0.23	0.10	0.08
全磷 TP(x_{11})	0.93	0.57	1.00	0.11	0.09
有效磷 AP(x_{12})	0.27	0.62	0.19	-0.05	-0.04
全钾 TK(x_{13})	0.56	0.85	0.74	-0.04	-0.03
pH(x_{14})	0.10	0.10	0.10	-0.10	-0.08
SFI	0.73	0.24	0.66		

由表 8 得出,不同发育阶段杉木人工林的土壤肥力综合评价指数(*SFI*)分别是 0.73、0.66 和0.24,以幼龄林最高,成熟林其次,中龄林最低。

4　讨论

不同发育阶段对杉木人工林土壤物理和化学性质有显著影响。随发育阶段的增加,土壤密度先增大后减少,而土壤总孔隙度先减少后增加。说明随着杉木的生长,在幼龄林至中龄林阶段,林分郁闭度增加,林下光线愈发不足,使土壤水分条件下降,土壤密度和土壤总孔隙度朝恶化方向发展。但在中龄林至老龄林阶段,土壤物理性质又得到了好转。这与王宏星[12]对日本落叶松人工林不同发育阶段土壤理化性质变化研究所得结果一致。土壤有机质、总氮和全磷含量均以成熟林为最大,铵态氮和 pH 以幼龄林最大,硝态氮、有效磷和全钾以中龄林最大。说明在不同林龄下土壤化学性质都会因为林下植被、微生物数量和人为活动等因素影响。因此,在林业经营过程中,可以根据土壤具体条件来适当添加肥料,保持杉木持续速生。

在同一发育阶段中,杉木人工林表层土与底层土之间存在差异;随着土层的加深,土壤密度逐渐增大,土壤含水率和孔隙度指标呈递减趋势。除全钾外,其余化学性质指标均随着层次的加深而减少,0～20 cm 土层和其下土层的差异显著,说明土壤肥力指标具有明显的表聚效应,这与周德明[29]、吴永铃[17]、衣晓丹[14]等研究结论一致。另外,土壤质量含水量对土壤水分物理性质具有显著指示作用,有机质、pH 值与土壤养分指标呈显著相关,与李沛霖[30]的研究结果不完全相同,说明在不同环境、不同发育阶段、不同立地条件下土壤的理化性质相关性存在空间异质性。因此,要进一步揭示杉木不同发育阶段土壤因子之间的关系,还需更深入的研究。

利用主成分分析法和模糊评价法对不同发育阶段杉木人工林土壤肥力的综合评价表明,不同发育阶段杉木人工林土壤肥力的优劣排序为:幼龄林 > 成熟林 > 中龄林。这可能与不同发育阶段杉木的经营措施有关。杉木幼龄林虽有进行幼林抚育,但林分郁闭前林下植被较多,土壤肥力较好;中龄林后随杉木生长和林分郁闭,林下光照不足,林下植被少,杉木生长消耗了土壤大量养分,导致其土壤肥力下降;当杉木进入成熟后,通过间伐和自然整枝等,林下光照条件改善,林下植被发育较快,其土壤肥力得到一定改善。这与张昌顺[31]、马祥庆[32]等研究结论一致。此外为逐步恢复杉木人工林地土壤条件,可根据不同发育阶段的土壤肥力状况采取测土配方施肥技术,对人工林进行集约化管理,充分发挥闽北地区森林资源优势,彰显杉木人工林的生态—经济效益。

5　结论

(1)不同发育阶段、同一发育阶段不同土层之间人工林土壤物理、化学性质均存在差异。

(2)土壤质量含水量对土壤水分物理性质具有显著指示作用,而有机质、pH 值对土壤养分指标有显著指示作用。

(3)通过主成分分析和模糊数学评价两种方法,均得出幼龄林土壤肥力最好,其次是成熟林,中龄林土壤肥力较差。建议在杉木生长达中龄时适当进行施肥、间伐等人工干预,增加杉木人工林的经济—生态效益。

参考文献:

[1] Wang S, Zhang W F. Relating net primary productivity to soil organic matter decomposition rates in pure and mixed Chinese fir plantations. [J] Plant and Soil, 2010, 334(1-2): 501-510.

[2] Anonymous. National Forest Inventory Report of China[M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House,2010:11-20.

[3] 马祥庆,范少辉,刘爱琴,等. 不同栽植代数杉木人工林土壤肥力的比较研究[J]. 林业科学研究, 2000, 13(6): 557-582.

[4] 马祥庆,刘爱琴,马 壮,等. 不同代数杉木林养分积累和分布的比较研究[J]. 应用生态学报, 2000,11(4): 501-506.

[5] 陈 雄. 杉木林采伐迹地不炼山造杉木试验研究[J]. 农村经济与科技,2011, 22(8): 32-33.

[6] 苏英吾. 论炼山对森林土壤生态系统的影响[J]. 中南林业调查规划,1998, 17(1):9-12.

[7] 马祥庆,刘爱琴,何智英,等. 整地方式对杉木人工林生态系统的影响[J]. 山地学报,2000, 18(3):37-243.

[8] 张正雄,周新年,高 山,等. 皆伐作业对林地土壤因子的影响[J]. 安全与环境学报,2004, 4(4):35-37.

[9] 周新年,游明兴,邱仁辉,等. 我国南方集体林区伐区采集作业模式选优[J]. 林业科学,2001,37(4): 99-106.

[10] 周丽丽. 不同发育阶段杉木人工林养分内循环与周转利用效率的研究[D]. 福州:福建农林大学,2014.

[11] 程 谊,贾云生,汪 玉,等. 太湖竺山湾小流域果园养分投入特征及其土壤肥力状况分析[J]. 农业环境科学学报,2014,10: 1940-1947.

[12] 王宏星,孙晓梅,陈东升,等. 甘肃小陇山日本落叶松人工林不同发育阶段土壤理化性质的变化[J]. 林业科学研究,2012,25(3):294-301.

[13] 崔宁洁,张丹桔,刘 洋,等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志,2014,10: 2610-2617.

[14] 衣晓丹. 不同发育阶段杉木人工林土壤理化性质及凋落物养分储存量研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[15] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报,2014,34(9):2297-2307.

[16] 王 刚. 杉木人工林土壤肥力指标及其评价[D]. 南京:南京林业大学,2008.

[17] 吴永铃,王 兵,赵 超,等. 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:自然科学版,2011,1(1):69-75.

[18] 覃祚玉,唐 健,曹继钊,等. 基于主成分和聚类分析相结合的连栽杉木土壤肥力评价[J]. 林业资源管理,2015,10(5):81-87.

[19] Kaufmann M. Tobias S. Schulin R. Quality evaluation of restored soils with a fuzzy logic expert system [J]. Geoderma, 2009, 151(34):290-302.

[20] 李 旭,王海燕,杨晓娟,等. 东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度土壤肥力研究[J]. 西北林学院学报,2015,02:1-7.

[21] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科技出版社,1978.

[22] 杨晓娟. 东北长白山系低山丘陵区不同林分土壤肥力质量研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.

[23] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008.

[24] 郑粉莉,张 锋,王 彬. 近100年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价[J]. 生态学报,2010,22:6044-6051.

[25] 张俊华. 渭北黄土高原植被恢复过程土壤肥力质量研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2004.

[26] 于寒青,徐明岗,吕家珑,等. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J]. 应用生态学报,2010,07:1772-1778.

[27] 包耀贤,黄庆海,徐明岗,等. 长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应[J]. 植物营养与肥料学报,2013,01:74-81.

[28] 王丽琴. 滨海盐碱地不同造林模式对土壤理化性质及水盐运动的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2014.

[29] 周德明,马玉莹,梅 杰. 不同林龄杉木林地土壤特性分析[J]. 土壤通报,2012,2(4):353-356.

[30] 李沛霖. 杉木林土壤理化性质与水源涵养功能及相关性研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014.

[31] 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.

[32] 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.

(责任编辑:彭南轩)