

间伐对杉木低效林生物多样性及土壤养分的影响

蔡卫兵

(安徽省林业调查规划院, 合肥 230001)

摘要: 以 15 年生杉木低效林为研究对象, 设计间伐强度为 20% (T_{20})、30% (T_{30})、40% (T_{40}) 及未间伐 (T_0) 4 种间伐处理, 探讨间伐 2 年后杉木林下生物多样性及土壤养分的变化, 并采用改进层次分析法对间伐成效进行综合评价。结果表明: (1) 间伐对林下植物生长具有积极的促进作用, 有效提高林分的生物多样性, 且林下植物种类、灌木层 Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数随着间伐强度增大而增加, T_0 、 T_{20} 、 T_{30} 和 T_{40} 处理林下分别出现 0 种、12 种、14 种和 16 种植物; (2) 间伐有利于改善土壤养分状况, 间伐后杉木林土壤有机质含量、全磷含量、全钾含量和水解氮含量增幅依次为 2.20~38.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.19~0.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、6.36~13.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 19.13~154.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; (3) 综合评价得到 T_0 、 T_{20} 、 T_{30} 和 T_{40} 处理的间伐成效指数依次为 0.294、0.503、0.724 和 0.732, 说明 T_{30} 、 T_{40} 处理的间伐成效要明显好于 T_{20} 处理。因此, 建议对密度较大的杉木低效林按照 30%~40% 的株数间伐强度进行间伐改造, 并保留阔叶树种, 以形成多树种、结构比较稳定、生态和经济效益更高的针阔混交林, 实现可持续经营。

关键词: 杉木低效林; 间伐; 生物多样性; 土壤养分

中图分类号: S753

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)04-0649-05

Effect of thinning on biodiversity and soil nutrient in the low-benefit Chinese fir forest

CAI Weibing

(Forest Inventory and Planning Institute of Anhui Province, Hefei 230001)

Abstract: The effects of four thinning intensities [20% (T_{20}), 30% (T_{30}), 40% (T_{40}) and the control (T_0)] on the changes of biodiversity and soil nutrient in a 15-year old low-benefit Chinese fir forest were investigated. A modified hierarchical analysis was used to comprehensively evaluate the effect of thinning two years after the treatment. The results showed that: (1) Thinning promoted the growth and biodiversity of understory plants. The understory species number, Simpson and Shannon-Weiner index in shrub layer increased with an increase of the thinning intensity. The understory plant species numbers were 0, 12, 14 and 16 in T_0 , T_{20} , T_{30} and T_{40} , respectively; (2) Thinning improved the soil nutrient. Soil organic matter, total P, total K and hydrolytic N increased to 2.20-38.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0.19-0.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 6.36 -13.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 19.13-154.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. (3) A comprehensive evaluation showed the effect index of thinning for T_0 , T_{20} , T_{30} and T_{40} was 0.294, 0.503, 0.724 and 0.732, respectively, suggesting that T_{30} and T_{40} had better effects than T_{20} . Therefore, thinning intensity of 30%-40% should be recommended for the high density and low-benefit Chinese fir forest, and broad-leaf trees should be retained to form a stable multi-species and mixed broadleaf-conifer forest with high ecological and economic benefit to achieve the sustainable forest management.

Key words: low-benefit Chinese fir forest; thinning; biodiversity; soil nutrient

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 是秦岭以南地区主要的用材林造林树种, 具有生长快、材质好、产量高和用途广等特点, 在林业建设中具有重要的地位^[1]。由于密度过大、地力衰退, 既影响了杉木直径和单株材积的生长, 也阻碍了杉

木和其他阔叶乔木树种的天然更新, 使得林地的理化性质长期得不到改善, 林分的生态与经济效益难以得到提高。为了改善林分结构与提高林分质量, 必须采取间伐这一森林经营技术措施, 来合理调整林分密度, 改变林内光、温度、土壤养分及水分等

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (200904015) 资助。

作者简介: 蔡卫兵, 高级工程师。E-mail: cwb1968@126.com

微环境,对林分生长、林下植被发育和分布、土壤改良等具有重要的促进作用^[2-3]。张水松等^[4]、徐金良等^[5]研究表明间伐促进了杉木单株树木胸径和树高的生长,也增加了单株材积;杉木林大径材材积及其比例随着间伐强度增大而显著增加。于立忠等^[6]、王祖华等^[3]及李瑞霞等^[7]研究表明杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)、红松(*Pinus koraiensis*)等主要造林树种间伐后短期内林下生物多样性比对照显著增加。张鼎华等^[8]研究认为杉木、马尾松、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)和木荷(*Schima superba*)林分间伐2年后土壤微生物数量增加、酶活性增强、土壤容重降低、总孔隙度和速效养分均提高,土壤肥力得到了改善和提高。安徽现有杉木低效林约18万hm²,如何通过合理有效的抚育间伐,使得杉木林内生境与林分结构明显改善、林分质量与林地生产力持续提高,显得尤其重要。为此,开展不同间伐强度对杉木低效林改造成效的研究,分析间伐对杉木林下生物多样性与土壤养分的短期影响,再采用改进层次分析法的综合评价模型来评价间伐成效,旨在为杉木低效林改造提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地设在安徽省石台县矾滩乡,地处皖南山区西北部,属中亚热带北缘湿润季风性气候区,年平均气温16℃,年平均降水量1626mm,无霜期234d,土壤为板岩、页岩等发育的山地黄壤或花岗岩发育的山地黄红壤。

1.2 研究对象及调查方法

以1996年春营造的杉木林为研究对象,其造林密度为2550株·hm⁻²。2010年底,间伐前对杉木林进行本底调查,其基本状况为林分密度2100株·hm⁻²、平均胸径14.5cm、平均树高11.4m;按照留优去劣、间密留匀及兼顾株间距的原则,按株数间伐强度20%(T₂₀)、30%(T₃₀)和40%(T₄₀)进行间伐处理,并设未间伐(T₀)的杉木林为对照。2012年9月,在每种处理杉木林内设3个20m×20m样地,分别对乔木(胸径≥5cm)进行每木检尺,计测树种、胸径和树高;灌木层调查采用小样方法,在12个样地内以对角线交点为中心各设1个4m×4m的样方,计测灌木的种类和株数等;同时在4m×4m的样方内以对角线交点为中心各设1个1m×1m的样方,调查草本层地被物,包括草本种类和盖度等。

1.3 土壤化学性质测定

2012年9月在杉木林4种处理的每个样地内按“S”法采集5个0~40cm土层的土样,混匀后作为该样地的土样,带回实验室风干,研磨过10目、100目筛,作为待测样品。土壤pH值采用电位法(LY/T1239-1999)测定;土壤有机质含量用重铬酸钾氧化-外加热法(LY/T1237-1999)测定;土壤全氮含量用扩散法(LY/T1228-1999)测定;土壤全磷含量用酸溶-钼锑抗比色法(LY/T1232-1999)测定;土壤全钾含量用酸溶-火焰光度法(LY/T1234-1999)测定;土壤水解氮含量采用碱解-扩散法(LY/T1229-1999)测定;有效磷含量采用碳酸氢钠浸提法(LY/T1233-1999)测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法(LY/T1236-1999)测定^[9]。

1.4 数据处理

1.4.1 生物多样性指数^[10] 生物多样性指数最常用的是Simpson指数和Shannon-Weiner指数,具体计算如下:

$$\text{Simpson 指数 } D = 1 - \sum_{i=1}^s \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)}$$

Shannon-Weiner 指数

$$H = 3.3219[\lg N - 1/N \sum_{i=1}^s (n_i \lg n_i)]$$

其中:*S*为样方内植物的种类数;*N*为样方内所有植物的总个体数;*n_i*为第*i*种植物的个体数。

1.4.2 综合评价方法 采用改进层次分析法的综合评价模型^[11]来评价杉木低效林的间伐成效。

用SPSS 13.0和Excel软件对各指标进行方差分析、Duncan多重比较和综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同间伐处理杉木林下生物多样性的差异

由表1可知,间伐后杉木林下共出现21种植物,其中T₂₀处理出现12种植物,T₃₀处理14种,T₄₀处理16种,而T₀处理林下无植物生长。T₂₀、T₃₀和T₄₀处理灌木植物种类数依次为9种、9种和11种,其中T₂₀处理灌木优势植物有杉木幼树和漆树,T₃₀处理灌木优势植物有欆木、漆树、野茉莉和构树,T₄₀处理灌木优势植物有连蕊茶、茶树、漆树和构树;T₂₀、T₃₀和T₄₀处理草本植物种类数分别为3种、5种和5种,这3种间伐处理草本优势植物均为蓬蒿,其盖度均超过30%。这表明林下植物种类随间伐强度增大而增多,林下植物以灌木为主。据测算,T₂₀、T₃₀和T₄₀处理灌木层Simpson指数、Shannon-Weiner

指数依次为 0.86、9.19, 0.87、9.70, 0.89 和 9.71。各指数在不同间伐强度间无显著差异, 但这 3 种间伐强度生物多样性指数显著高于 T_0 处理。由此可见, 间伐对杉木林下植物生长具有积极的促进作用, 有效提高林分的生物多样性, 为形成针阔混交林奠定坚实的基础。

2.2 不同间伐处理杉木林土壤养分的差异

由表 2 可知, 不同间伐处理杉木林土壤养分存在差异。 T_{20} 、 T_{30} 和 T_{40} 处理土壤含有机质、全磷、全钾和水解氮均高于 T_0 处理, 其增幅依次为 2.20~

38.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、0.19~0.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、6.36~13.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 19.13~154.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 但各指标在处理间的差异水平表现不一, 其中 T_{40} 处理有机质含量显著高于其他 3 种处理, T_{20} 、 T_{30} 和 T_{40} 处理全钾含量也显著高于 T_0 处理, T_{30} 处理水解氮含量显著高于 T_0 、 T_{20} 处理; 全磷含量未达到显著差异。相对于 T_0 处理, T_{20} 、 T_{30} 和 T_{40} 处理全氮含量、有效磷含量有所下降。总的来看, 间伐有利于改善土壤养分状况, 这可能与土壤养分来源多样化和生境的改变有关。

表 1 不同间伐处理杉木林下生物多样性
Table 1 Biodiversity under Chinese fir for different thinning treatments

	植物 Plant	间伐处理 Thinning treatment			
		T_0	T_{20}	T_{30}	T_{40}
灌木层 Shrub layer	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	(0)	(125)	(42)	(83)
	榿木 <i>Loropetalum chinensis</i> (R. Br.) Oliv.	(0)	(42)	(167)	(0)
	椴木 <i>Aralia chinensis</i> L.	(0)	(42)	(42)	(0)
	乌饭树 <i>Vaccinium bracteatum</i> Thunb.	(0)	(42)	(0)	(0)
	连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i> (Kochs) Bean	(0)	(0)	(0)	(125)
	茶树 <i>Camellia sinensis</i>	(0)	(42)	(0)	(125)
	野桐 <i>Mallotus japonicus</i> (Thunb.) Muell.	(0)	(83)	(42)	(42)
	漆树 <i>Toxicodendron vernicifluum</i> (Stokes) F. A. Barkl.	(0)	(125)	(125)	(125)
	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i> Mill.	(0)	(0)	(83)	(42)
	野茉莉 <i>Styrax japonicus</i> Sieb.	(0)	(0)	(125)	(0)
	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	(0)	(0)	(125)	(125)
	叶下珠 <i>Phyllanthus urinaria</i> L.	(0)	(42)	(0)	(42)
	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	(0)	(0)	(0)	(42)
	紫珠 <i>Callicarpa bodinieri</i> Levl.	(0)	(42)	(83)	(42)
	山苍子 <i>Litsea cubeba</i> (Lour.) Pers.	(0)	(0)	(0)	(42)
	种类数 Species number	0	9	9	11
	Simpson 指数 Simpson index	0	0.86	0.87	0.89
	Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner index	0	9.19	9.70	9.71
	草本层 Herbaceous layer	蓬蒿 <i>Rubus hirsutus</i>	(0)	(40.2)	(32.2)
山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>		(0)	(0)	(5.3)	(14.1)
莎草 <i>Cyperus rotundus</i> L.		(0)	(0)	(1.6)	(6.3)
绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i> (Thunb.) Makino		(0)	(5.6)	(3.1)	(2.3)
蕨菜 <i>Pteridium aquilinum</i>		(0)	(4.2)	(1.3)	(0)
猕猴桃 <i>Actinidia chinensis</i> Planch		(0)	(0)	(0)	(1.3)
种类数 Species number		0	3	5	5

注: 灌木层、草本层括号内数字分别为多度 (株·667m⁻²) 和盖度 (%)。

Note: The number of brackets in shrub layer and herbaceous layer is abundance (plants·667m⁻²) and coverage (%) ,respectively.

2.3 杉木林间伐成效的综合评价

采用改进层次分析法对杉木低效林的间伐成效进行综合评价。首先利用各评价指标的标准差构建出判断矩阵 $B_{11\times 11}$ 。

根据矩阵 $B_{11\times 11}$, 求出最大特征根所对应的特

征向量, $W=(0.438, 0.111, 0.096, 0.059, 0.053, 0.047, 0.045, 0.038, 0.038, 0.037, 0.037)$ 。再利用公式 $CR=CI/RI$ 来检验判断矩阵 B 的一致性, 经计算得到 CI 为 0.0463, 查得 RI 为 1.52, 进一步计算得到 $CR=0.0305<0.10$, 满足判断矩阵的一致性

要求。因此，上面得到的特征向量可作为这 11 个评价指标的权重值，对应的指标依次为水解氮、速效钾、有机质、全钾、林下植物的种类数、

Shannon-Weiner 指数、有效磷、全磷、Simpson 指数、全氮和 pH 值。

表 2 不同间伐处理杉木林土壤养分

Table 2 Soil nutrient under Chinese fir for different thinning treatments

间伐处理 Thinning treatment	pH 值 pH value	有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	全氮/g·kg ⁻¹ Total N	全磷/g·kg ⁻¹ Total P	全钾/g·kg ⁻¹ Total K	水解氮 /mg·kg ⁻¹ Hydrolytic N	有效磷 /mg·kg ⁻¹ Available P	速效钾 /mg·kg ⁻¹ Available K
T ₀	4.61±0.18	40.00±8.24 ^a	3.00±0.02	3.76±0.23	13.38±4.78 ^a	196.20±0.94 ^a	4.63±0.54	96.46±18.77 ^a
T ₂₀	4.82±0.02	42.02±4.41 ^a	2.40±0.02	3.95±0.98	21.31±0.85 ^b	215.33±44.47 ^a	3.87±1.84	130.35±11.67 ^c
T ₃₀	4.65±0.08	44.53±13.10 ^a	2.94±0.04	4.74±0.15	19.74±5.42 ^b	350.39±49.93 ^b	3.59±0.74	87.49±11.12 ^a
T ₄₀	4.76±0.08	78.08±17.47 ^b	2.77±0.40	4.42±0.16	27.37±4.91 ^c	254.99±68.52 ^{ab}	3.91±3.85	84.48±1.07 ^a

注：同列小写字母表示不同间伐处理间差异达到 0.05 水平。

Note: Small letters in the same column mean significant difference at the 0.05 level between different thinning treatments.

B _{11×11} =	水解氮	速效钾	有机质	全钾	林下植物 的种类数	Shannon- Weiner 指数	有效磷	全磷	Simpson 指数	全氮	pH 值
	1.00	7.06	7.36	8.29	8.46	8.65	8.68	8.96	8.98	8.98	9.00
0.14	1.00	1.30	2.23	2.40	2.58	2.62	2.89	2.91	2.92	2.94	
0.14	0.77	1.00	1.93	2.10	2.28	2.32	2.59	2.62	2.62	2.64	
0.12	0.45	0.52	1.00	1.17	1.35	1.39	1.66	1.69	1.69	1.71	
0.12	0.39	0.48	0.86	1.00	1.19	1.22	1.50	1.52	1.52	1.54	
0.12	0.38	0.44	0.74	0.84	1.00	1.04	1.31	1.33	1.34	1.35	
0.11	0.35	0.43	0.72	0.82	0.96	1.00	1.27	1.29	1.30	1.32	
0.11	0.35	0.39	0.60	0.67	0.76	0.79	1.00	1.02	1.03	1.04	
0.11	0.34	0.38	0.59	0.66	0.75	0.77	0.98	1.00	1.01	1.02	
0.11	0.34	0.38	0.59	0.66	0.75	0.77	0.97	0.99	1.00	1.02	
0.11	0.34	0.38	0.59	0.65	0.74	0.76	0.96	0.98	0.98	1.00	

根据综合评价模型和评价指标的权重值，计算得到 T₀、T₂₀、T₃₀ 和 T₄₀ 处理的间伐成效指数值依次为 0.294、0.503、0.724 和 0.732，说明 T₃₀ 和 T₄₀ 处理的间伐成效要明显好于 T₂₀ 处理。

3 讨论与结论

间伐作为杉木人工林经营的最重要措施，被认为是促进林分生长与林下植被发育、提高土壤肥力的重要途径，而间伐成效受林分结构、立地条件、间伐方式、间伐强度和间伐年限等多种因素制约^[5]。本研究探讨了间伐强度对杉木林下生物多样性的短期影响，结果表明间伐促进了林下植物生长，且植物种类随间伐强度增大而增多，T₂₀、T₃₀ 和 T₄₀ 处理林下植物依次有 12 种、14 种和 16 种。成向荣等^[12]研究得到类似结论，杉木林间伐 15 年后对照、中度间伐、强度间伐处理林下植物种类数分别为 18 种、17 种和 20 种，林下植被总密度和盖度均随间伐强度增加而增大。这是因为间伐后短期内林分生境改

善，尤其是增加林下光照，促进林下植被发育。本研究中杉木林下植物以灌木为主，以 Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数来分析灌木层的生物多样性，据测算 T₂₀、T₃₀ 和 T₄₀ 处理 Simpson 指数、Shannon-Weiner 指数依次为 0.86、9.19，0.87、9.70，0.89 和 9.71，各指数在不同间伐强度间无显著差异，但这 3 种间伐强度生物多样性指数显著高于 T₀ 处理。这与王祖华等^[3]研究结论相似，其结论为杉木间伐 4 年后间伐处理显著提高了林下植被的物种丰富度、Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数。但是，随着林木生长和郁闭度增加，不同间伐处理林下生境逐渐趋于一致，导致不同间伐处理林下植物种类差异减小。马履一等^[13]研究指出间伐 6 年后油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 林下植物种类明显少于间伐 2 年后。美国花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 间伐试验也表明，间伐 11 年后林下植被盖度和丰富度随间伐强度增大而增加^[14]，间伐 27 年后林下植被盖度和丰富度与对照处理之间无显著差异^[15]。这

些研究结果说明间伐后林下植物生物多样性会随着间伐期的延长而发生改变。

间伐导致林下植物生物多样性的变化必然引起土壤肥力的改变。一般而言, 间伐前期土壤肥力随着林下植被的增加而增强。张鼎华等^[8]研究表明杉木间伐 2 年后林分土壤肥力明显改善, 表现在土壤微生物数量增加、酶活性增强和土壤速效养分提高。本研究得到类似结论, 间伐有利于改善土壤养分状况, 间伐 2 年后杉木林土壤有机质含量、全磷含量、全钾含量和水解氮含量均高于未间伐处理。这可能是间伐后林下生物多样性的提高诱发了土壤微生物多样性和数量的提高, 并由此而增强了土壤的生物活性, 加速了土壤养分的循环。另外, 本研究 3 种间伐强度处理土壤养分状况存在一定差异, 这可能是林下植物种类组成的不同造成的。也有研究表明土壤养分会随着间伐期的延长、林下植物的变化而发生相应的改变。王东等^[16]研究认为间伐 7 年后林内土壤全氮和全磷含量在一定程度上有所降低, 尤其是土壤全磷含量; 成向荣等^[12]试验结果说明杉木人工林间伐 15 年后间伐强度不会显著影响营养元素的积累; 其原因是林下植被和保留木的迅速生长会从土壤中吸收较多的营养物质, 加上林分郁闭, 枯落物的减少及其分解较慢, 难以向土壤中输送足够的营养元素^[17]。

本研究还采用改进层次分析法对杉木低效林的间伐成效进行综合评价, T_0 、 T_{20} 、 T_{30} 和 T_{40} 处理的间伐成效指数值依次为 0.294、0.503、0.724 和 0.732, 说明 T_{30} 、 T_{40} 处理的间伐成效要明显好于 T_{20} 处理。因此, 建议对密度较大的杉木低效林按照 30%~40% 的株数间伐强度进行间伐改造, 并保留阔叶树种, 以形成多树种、结构比较稳定及生态和经济效益更高的针阔混交林, 实现可持续经营。

参考文献:

- [1] 程鹏, 罗宁, 余本付, 等. 安徽省不同区域造林树种选择及栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
[2] VERSCHUYL J, RIFFELL S, MILLER D, et al. Biodi-

versity response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests: a meta-analysis[J]. *Forest Ecol Manag*, 2011, 261(2): 221-232.

- [3] 王祖华, 李瑞霞, 王晓杰, 等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2778-2782.
[4] 张水松, 陈长发, 吴克选, 等. 杉木林间伐强度材种出材量和经济效果的研究[J]. *林业科学*, 2006, 42(7): 37-46.
[5] 徐金良, 毛玉明, 郑成忠, 等. 抚育间伐对杉木人工林生长及出材量的影响[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(1): 99-107.
[6] 于立忠, 朱教君, 孔祥文, 等. 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3757-3764.
[7] 李瑞霞, 马洪靖, 闵建刚, 等. 间伐对马尾松人工林林下植物多样性的短期和长期影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(5): 807-812.
[8] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 672-676.
[9] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 森林土壤速效钾的测定: LY/T 1236-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
[10] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
[11] 梁迪, 董海. 系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
[12] 成向荣, 徐金良, 刘佳, 等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及其营养元素现存量影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(1): 30-34.
[13] 马履一, 李春义, 王希群. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. *林业科学*, 2007, 43(5): 1-9.
[14] ARES A, NEILL A R, PUETTSMANN K J. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands[J]. *Forest Ecol Manag*, 2010, 260(7): 1104-1113.
[15] HE F, BARCLAY H J. Long-term response of understory plant species to thinning and fertilization in a Douglas-fir plantation on southern Vancouver Island, British Columbia[J]. *Can J Forest Res*, 2000, 30(4): 566-572.
[16] 王东, 王艳平, 陈信力, 等. 间伐对杉木人工林土壤理化性质的季节影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 69-73.
[17] 丁松, 应学亮, 吕丹, 等. 赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 31-36.