

晋西人工林综合密度效应分析

玉 宝<sup>1,2</sup>,王百田<sup>2\*</sup>,红 玉<sup>3</sup>,张占忠<sup>4</sup>,文万荣<sup>5</sup>

(1. 国家林业局管理干部学院,北京 102600;2. 北京林业大学 水土保持学院,北京 100083;3. 国家林业局调查规划设计院,北京 100714;4. 山西省 临汾市林业局,山西 临汾 041000;5. 山西省 吉县国营红旗林场,山西 吉县 042200)

**摘 要:**以晋西刺槐和油松人工林 59 块样地数据,拟合了其平均胸径、平均单株材积及平均单株地上生物量的密度效应模型,分析了林分密度的综合影响。结果表明:(1)处于初植密度的油松林无林下更新。油松间伐林更新较好,随林分密度增加,更新密度趋于减少。(2)林下死地被物厚度与辛普森、香农多样性指数显著负相关,与生态优势度显著正相关。(3)吉县阴坡油松林,随密度增加,辛普森、香农及均匀度指数均减小,生态优势度增加。间伐林多样性指数明显好于未间伐林。油松间伐林密度与其辛普森、香农多样性指数显著负相关,与生态优势度显著正相关。(4)探讨生态公益林密度效应时,除了用材林密度效应常规指标外,应增加林下更新、林下植物多样性及死地被物厚度等指标。

**关键词:**刺槐;油松;人工林;密度效应;晋西

**中图分类号:** S757.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-7461(2011)04-0167-05

Analysis of Integrated Density Effects of Plantation in Western Shanxi

YU Bao<sup>1,2</sup>, WANG Bai-tian<sup>2\*</sup>, HONG Yu<sup>3</sup>, ZHANG Zhan-zhong<sup>4</sup>, WEN Wan-rong<sup>5</sup>

(1. State Academy of Forestry Administration, Beijing 102600, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Academy of Forest Inventory and Planning S. F. A, Beijing 100714, China; 4. Shanxi Linfen City Forestry Bureau, Linfen, Shanxi 041000, China; 5. Shanxi Ji County State-owned Hongqi Forest Farm, Jixian, Shanxi 042200, China)

**Abstract:** In this paper, the data of 59 sample plots of black locust and pitch pine plantations in western Shanxi were used to establish density effect models of average DBH, average single plant tree volume and aboveground biomass. As well as to analyze the combined effects of forest stand density. The results showed that: (1) There was no regeneration under the pitch pine forest with the first planting density. The regeneration of pitch pine thinning forest was relatively good; with the increase in forest stand density, regeneration density tended to decrease. (2) The dead cover plant thickness under the forest was significantly negatively relevant with Simpson and Shannon diversity indices, and was significantly positively related with the ecological dominance. (3) The pitch pine forest of the shade slope in Ji County increased with density; Simpson, Shannon and evenness indices decreased, the ecological dominance increased. Thinning forest diversity index was better than those non-thinning forests. The pitch pine thinning forest density was significantly negatively related with Simpson and Shannon diversity indices and was significantly positively correlated with the ecological dominance. (4) When exploring the ecological forest density effect, in addition to conventional indicators of timber density effect, we should increase indicators such as the regeneration under the forest, plant diversity under the forest and the thickness of the dead plant cover.

**Key words:** *Robinia pseudoacacia*; *Pinus tabulaeformis*; plantation; density effect; Western Shanxi Province

收稿日期:2010-07-08 修回日期:2010-12-17  
基金项目:林业公益性行业科研专项(200704031)  
作者简介:玉宝,男,博士,从事生态环境建设技术研究。E-mail:nmlyb8@sina.com  
\* 通讯作者:王百田,男,汉族,教授,从事林业生态工程教学与研究。

林分密度不仅影响林木生长,对林下更新、植物多样性以及森林演替等均有直接的影响。吉良龙夫 1953 年在 1 年生草本群落中发现密度效应法则后,许多学者研究提出了一系列密度效应模型:密度效应倒数模型<sup>[1,2]</sup>、密度效应乘幂模型<sup>[3,4]</sup>、密度二次效应<sup>[5,6]</sup>、竞争密度效应<sup>[7]</sup>、生产函数密度效应<sup>[8]</sup>等。在国内,密度效应研究主要以杉木(*Cunninghamia lanceolata* 和马尾松(*Pinus massoniana*)等南方速生用材林为主<sup>[9-11]</sup>。对于旱半干旱区人工林,特别是对生态公益林的密度效应研究不多。

本文以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等主要造林树种为研究对象,探讨其密度效应特征,分析林分密度对人工林的综合影响,旨在为干旱半干旱区人工林抚育经营,提高其生态效益提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于山西方山县和吉县境内,同属吕梁山脉的黄河中游黄土丘陵沟壑区。方山试验地位于峪口镇。属典型黄土丘陵沟壑地貌,平均海拔 1 200 m。年均气温 7.3℃,极端高温 35.6℃,极端低温-25.3℃,≥10℃积温 2 819.7℃。年降水量 416 mm,6—9 月份降水量占全年的 70%以上。年蒸发量 1 864.6 mm,干燥度 1.3,无霜期 140 d,属暖温带大陆性季风气候。土壤为中壤质黄绵土,由黄土母质直接发育形成,土壤容重 120 g·cm<sup>-3</sup>,pH 值 8.0~8.4。

吉县试验地位于蔡家川流域。为典型黄土高原残垣沟壑区侵蚀地形,海拔 904~1 592 m。年均气温 10.6℃,极端高温 38.1℃,极端低温-20.4℃,≥10℃积温 3 357.9℃。年降水量 479.05 mm,主要集中于 7—9 月份,占全年降水量的 59.5%。年蒸发量 1 677.5 mm,无霜期 172 d,年均风速 1.76 m·s<sup>-1</sup>,属暖温带大陆性气候。土壤为褐土,普遍呈碱性。

表 1 样地基本情况

Table 1 General situation in sampling plots

地名	树种	林龄 /a	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	样地数/块
方山县	刺槐	15~25	833~3 333	13
	油松	17~25	1 375~4 489	8
吉县	刺槐	11~18	833~2 000	29
	油松	34~40	929~13 000	9

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

共设置 59 块方形样地(表 1)。根据地形、地貌和林分密度变化,样地面积有所不同,分别为 15 m×20 m,20 m×20 m,20 m×25 m 等。样地内每木

检尺,每样地选择平均木 1 株,进行树干解析。

### 2.2 生物量测定

(1)刺槐树干生物量:对解析木根颈以上部分采取分层切割法,测定各层器官鲜重,并截取圆盘带回实验室测定干重。在实验室置于 105℃ 的烘箱中烘干至恒重(烘干的标准是最后两次的称重相对误差≤0.5%),求出干重与鲜重比,再得出各部分的干重。(2)刺槐枝、叶生物量:将标准木树冠分上、中、下三层,每层四个方向各剪取 1 个标准枝。量其枝、叶鲜重,少量带回实验室测定干重,根据标准木总枝数推算单株枝、叶干重。(3)刺槐单株地上生物量:单株树干(带皮)、枝、叶生物量之和。(4)油松单株地上生物量公式<sup>[12]</sup>: $W_{on}=0.078\ 3(D^2H)^{0.850\ 7}$ 。式中: $D$ 为单株胸径(cm); $H$ 为单株树高(m); $W_{on}$ 为单株地上生物量(kg)。(4)油松单株树高和材积总生长量公式<sup>[13]</sup>。阴坡: $H=0.001\ a^2+0.307\ a-0.431$ ;  $V=0.067a^2-0.297a+0.365$ 。阳坡: $H=-0.005\ a^2+0.387a-0.429$ ;  $V=0.035\times10^{-3}a^2+0.271\times10^{-3}a-0.727\times10^{-3}$ 。式中: $H$ 为树高(m); $V$ 为单株材积(m<sup>3</sup>); $a$ 为树龄。

### 2.3 植物多样性

采用物种丰富度指数( $R$ )、辛普森多样性指数( $D$ )、香农多样性指数( $H'$ )、Alatalo 均匀度指数( $E_a$ )、生态优势度( $C$ )等 5 个指标<sup>[14-19]</sup>来测定。公式如下:

$$R=S/N;$$

$$D=1-\sum_{i=1}^s[n_i(n_i-1)/N(N-1)];$$

$$H'=-\sum_{i=1}^s(n_i/N)\ln(n_i/N);$$

$$E_a=[(\sum_{i=1}^s(n_i/N)^2)^{-1}-1]/$$

$$[\exp(-\sum_{i=1}^s(n_i/N)\ln(n_i/N))-1];$$

$$C=\sum_{i=1}^s[n_i(n_i-1)]/N(N-1)。$$

式中: $n_i$ 为第  $i$  种个体数量; $N$ 为总个体数量; $s$ 为物种总数。

## 3 结果与分析

### 3.1 综合密度效应的界定

以往密度效应研究以用材林密度效应为主。研究生态公益林密度效应时,其评价指标应该与用材林不同。除了用材林密度效应评价指标外,应增加林下更新、土壤肥力<sup>[20]</sup>、林下植物多样性、碳储量<sup>[21]</sup>及死地被物厚度等相关指标。这些指标是影响人工林的水土保持功能、稳定性及持续发挥效益的重要因素<sup>[22]</sup>。因此,人工林综合密度效应是指林分密度对林分生长、林分结构、林下更新、土壤、生物多样

性、稳定性、健康性、发挥各种功能和效益等的综合影响。本文只分析人工林密度对林分生长、林下更新、植物多样性的综合影响。

3.2 密度效应模型

3.2.1 模型拟合 利用陈辉等<sup>[8]</sup>提出的新柯布一道格拉斯生产函数模型,拟合了刺槐及油松林分平均胸径、林分平均单株材积及平均单株地上生物量的密度效应模型(表 2)。其模型形式为:

$$D=aN^{b_1}H^{b_2};V=aN^{b_1}H^{b_2};W=aN^{b_1}H^{b_2}$$

式中: $D$  为林分平均胸径(cm); $V$  为林分平均单株材积( $\text{m}^3\cdot\text{株}^{-1}$ ); $W$  为林分平均单株地上生物量( $\text{t}\cdot\text{株}^{-1}$ ); $N$  为林分密度( $\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ); $H$  为林分优势木平均高度(m); $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为待定参数。

表 2 刺槐、油松林密度效应模型

Table 2 Density effect model

地区	树种	模型	$R^2$	$F$ 值	显著水平 ( $p$ )
方山县	刺槐	$D=11.3097\ 82N^{-0.301\ 796}H^{0.924\ 831}$	0.78	17.72	0.001
		$V=0.203\ 417N^{-1.100\ 395}H^{2.463\ 444}$	0.86	30.10	0.000
		$W=0.364\ 823N^{-0.924\ 173}H^{1.732\ 923}$	0.71	11.93	0.002
	油松	$D=46.610\ 679N^{-0.312\ 988}H^{0.391\ 716}$	0.87	19.44	0.004
		$V=117.810\ 594N^{-0.329\ 201}H^{0.528\ 041}$	0.54	2.92	0.145
		$W=0.328\ 373N^{-0.668\ 035}H^{1.050\ 161}$	0.85	14.09	0.009
吉县	刺槐	$D=1.130\ 009N^{0.000\ 510\ 589}H^{0.903\ 481}$	0.60	19.63	0.000
		$V=3.169\ 693\times10^{-5}N^{0.014\ 087}H^{2.644\ 057}$	0.53	14.46	0.000
		$W=1.221\ 801\times10^{-5}-05N^{0.249\ 632}H^{2.486\ 188}$	0.47	11.33	0.000
	油松	$D=1.250\ 103N^{-0.075\ 690}H^{1.235\ 940}$	0.95	55.53	0.000
		$V=0.357\ 389N^{0.268\ 662}H^{1.475\ 952}$	0.57	3.97	0.080
		$W=4.593\ 643\times10^{-5}-05N^{-0.099\ 084}H^{3.149\ 352}$	0.95	58.23	0.000

3.2.2 模型检验 经检验,除了油松林平均单株材积模型不显著外,其它模型均极显著,模型相关指数达 0.466~0.951, $F$  值为 11.33~58.23,模型有效

(表 2)。从模型参数看出,除吉县刺槐外,其他人工林平均胸径、单株材积及单株地上生物量与林分密度呈负相关,与林分优势木平均高度呈正相关。而吉县刺槐林与两者均正相关。这主要是吉县刺槐林为二代林,另外林分密度、林龄和立地条件不同导致,与王百田等<sup>[23]</sup>研究相符。

3.3 密度对林下植被的影响

发育林下植被是恢复人工林地力的重要途径<sup>[24-25]</sup>。人工林当密度不合理时普遍存在林下植被稀少,天然更新差等现象。若要持续稳定发挥人工林水土保持效益,则必须保证林下更新及林下植被多样性。国内外很多研究已证明,林分密度不仅直接影响林木生长,也是影响林下更新和植物多样性的重要因子之一。

3.3.1 林下更新 方山油松林未进行过间伐,林分密度仍处于初植密度的状态。其林下无更新幼树,林下死地被物厚度达 2.5~6.0 cm(表 3)。吉县油松人工林部分样地抚育间伐过,多数样地林下更新较好,随着林分密度增加,更新密度明显减少(表 3)。密度 3 275 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 林分无更新,原因是该样地未间伐,仅抚育 1 次。密度 4 400 和 13 000 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 林分也未进行间伐,虽有更新,其更新树种为其他阔叶树种。间伐不仅调整林分密度,也改变林下水热条件<sup>[26]</sup>。间伐后雨滴直接滴入林内,减少树冠截留,增加林地湿度,促进死地被物分解,有利于林木种子接触土壤,生根发芽。另外在间伐作业过程中,增加使种子接触到土壤的可能性,促进人工林的天然更新。因此间伐对林分更新具有重要作用。

表 3 不同密度油松林林下植物多样性

Table 3 Plant diversity under forests with different densities

地区	林分密度/ (株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ )	更新密度/ (株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ )	间伐次数/次	死地被物 /cm	多样性指数				
					$R$	$D$	$H'$	$Ea$	$C$
方山县	1 375	0	—	5.0	0.120	0.290	0.530	0.552	0.710
	1 600	0	—	4.5	0.118	0.604	1.022	0.797	0.396
	1 733	0	—	2.8	0.313	0.800	1.474	0.891	0.200
	1 846	0	—	6.0	0.167	0.167	0.287	0.543	0.833
	3 688	0	—	5.0	0.091	0.496	0.890	0.655	0.504
	2 700	0	—	2.5	0.179	0.783	1.677	0.739	0.217
	4 489	0	—	3.0	0.059	0.496	0.866	0.695	0.504
	4 600	0	—	3.7	0.214	0.648	0.992	0.891	0.352
吉县	929	34 000	2(1988;2006)	2.5	0.068	0.842	2.285	0.591	0.158
	1 075	11 000	2(1988;2006)	3.5	0.098	0.804	1.873	0.710	0.196
	1 190	11 200	1(2006)	3.0	0.109	0.875	2.444	0.640	0.125
	1 833	11 923	1(1988)	5.5	0.136	0.901	2.422	0.818	0.099
	2 125	8 400	1(1988)	4.8	0.138	0.743	1.678	0.632	0.257
	3 275	0	抚育 1	3.0	0.054	0.729	1.459	0.795	0.271
	4 400	5 000	—	2.5	0.081	0.757	1.662	0.703	0.243
	4 578	800	抚育 1	5.5	0.178	0.522	1.297	0.399	0.478
	13 000	769	0	3.5	0.273	0.837	1.876	0.780	0.163

表 4 林分密度、死地被物厚与植物多样性相关分析

Table 4 Correlation analysis between density,thickness of dead cover and diversity

项目	方山县死地被物厚			吉县林分密度		
	D	H'	C	D	H'	C
R <sup>2</sup>	−0.854**	−0.863**	0.854**	−0.886**	−0.815*	0.886**
显著水平(ρ)	0.007	0.006	0.007	0.008	0.026	0.008

注：“\*”0.05 水平上显著;“\*\*”0.01 水平上显著。

3.3.2 植物多样性 本研究求算林下植物多样性时未分乔、灌、草,仅求算了综合多样性指数(表 3)。死地被物既是为林分更新提供养分,又影响林分更新。经相关分析,林下死地被物厚度与 D、H'多样性指数显著负相关,与 C 显著正相关,均在 0.01 水平上极显著(表 4)。当死地被物过厚,将影响林木种子接触土壤,抑制种子的萌发。

方山县和吉县油松林密度与林下植物多样性关系有所不同。在方山县,林分密度对林下植物多样性无显著影响。而吉县林分密度对多样性影响较明显。如吉县阴坡油松林,随着林分密度增加,D、H'、Ea 多样性指数均减小,C 增加。尤其间伐过林分的多样性指数明显好于未间伐林分(表 3)。经相关分析,抚育间伐过的林分密度与 D、H'显著负相关,与 C 显著正相关(表 4)。

4 结论与讨论

(1)拟合了刺槐及油松人工林平均胸径、平均单株材积及平均单株地上生物量的密度效应模型。以林分平均胸径或平均单株材积表述的模型拟合效果比较好。

(2)油松人工林密度处于初植密度状态不利于其林下更新。油松间伐林更新较好,且随林分密度增加,更新密度趋于减少。间伐不仅调整林分密度,对林分更新起重要作用。人工林有更新才有持续性,有更新说明林分密度合理,可以认为是步入良性循环的人工林。人工林经营不是简单的密度和产量关系问题,而是涉及到可持续和稳定性关系的问题。考虑人工林生态效益时,必须使密度控制在合理水平,才能保证天然更新,人工林不能更新是密度大导致。若上世纪 60 年代人工林高密度栽植是为了提高成活率,那么现代林业必须考虑人工林功能和稳定性。尤其生态公益林,提高其稳定性和持续发挥水土保持功能至关重要。

(3)油松林下死地被物厚度对植物多样性有显著影响。林下死地被物厚度与 D、H'多样性指数显著负相关,与 C 显著正相关。

(4)人工林间伐与否,对林下植物多样性具有直接关系。但这是否与仅求算乔、灌、草综合多样性指

数有关,需要在深入探讨。吉县阴坡油松林,随密度增加,D、H'、Ea 多样性指数均减小,C 增加。间伐林多样性指数明显好于未间伐林。油松间伐林分密度与其 D、H'显著负相关,与 C 显著正相关。与王克勤等<sup>[26]</sup>的研究结论相符。通过间伐,增加林下光照,加快枯枝落叶分解,提高植物多样性,促进林木生长,增强林分稳定性和健康性,才能保证水土保持功能的更大地发挥。

研究生态公益林密度效应时,其评价指标应该与用材林不同。除了用材林密度效应常规指标外,应增加林下更新、林下植物多样性及死地被物厚度等指标。

参考文献:

[1] SHINOZAKI K, KIRA T. Intraspecific competition among higher plantsⅧ: Logistic theory of the C-D effect[J]. Journal of Institute of Polytechnics,1956(7):35-72.

[2] 吴承祯,洪伟,柳江,等. 封育次生马尾松(*Pinus massoniana*)林优势种群竞争密度效应[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(1):14-17.

WU C Z, HONG W, LIU J, *et al.* Competition density effect of dominant population in secondary *Pinus massoniana* forest by Closing Management[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2005,11(1):14-17.

[3] YODA. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions[J]. J. Biol. Osaya City University,1963,14:107-129.

[4] SILVERTOUN J W. Introduction of pant population ecology [M]. London and New York: Longman, 1982:7-8.

[5] CHEN C M, ROSE D W, LEARY R A. Derivation of optimal stand density over tine-a discrete stage,continuous state dynamic programming solution[J]. For. Sci, 1980,26(2):217-227.

[6] 黄家荣. 人工用材林最优密度控制模型[J]. 浙江林学院学报, 2001,18(1):36-40.

HUANG J R. Optimal density control model of planted timber forests[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2001,18(1):36-40.

[7] XUE L, HAGIHARA A. Growth analysis of the self-thinning stands distribution in of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc[J]. Ecology Research,1998,14:49-58.

[8] 陈辉,何忠明,洪伟. 杉木人工林密度效应模型研究[J]. 福建林学院学报,1992,12(3):277-282.

CHEN H, HE Z M, HONG W. Study of density effect model

for Chinese fir plantation[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1992,12(3):277-282.

[9] 黄家荣. 贵州马尾松人工林经营密度模型初探[J]. 北京林业大学学报,1993,15(4):32-37.

HUANG J R. Preliminary study on management density of masson pine plantation in Guizhou province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1993,15(4):32-37.

[10] 刘金福,洪伟,林芳. 马尾松人工林密度效应模型研究[J]. 西南林学院学报,1998,18(3):148-152.

LIU J F, HONG W, LIN F. A Study on density effect model for *Pinus massoniana* [J]. Journal of Southwest Forestry College, 1998,18(3):148-152.

[11] 童书振,盛炜彤,张建国. 杉木林分密度效应研究[J]. 林业科学研究,2002,15(1):66-75.

TONG S Z, SHENG W T, ZHANG J G. Studies on the density effects of Chinese fir stands[J]. Forest Research, 2002, 15(1):66-75.

[12] 邱扬,张金屯,柴宝峰,等. 晋西油松人工林地上部分生物量与生产力的研究[J]. 河南科学,1999,17(增刊):72-79.

QIU Y, ZHANG J T, CHAI B F, *et al.* Study on the root biomass of *Pinus tabulaeformis* Carr [J]. Henan Science, 1999,17(supl.):72-79.

[13] 张光灿,刘霞,周泽福,等. 黄土陵区油松水土保持林生长过程与直径结构[J]. 应用生态学报,2007,18(4):728-734.

ZHANG G C, LIU X, ZHOU Z F, *et al.* Growth process and diameter structure of *Pinus tabulaeformis* forest for soil and water conservation in loess plateau hilly regions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(4):728-734.

[14] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性,1994,2(3):162-168.

MA K P. Measurement of biotic community diversity ( I ):  $\alpha$  measurement of diversity ( I ) [J]. Chinese Biodiversity, 1994,2(3):162-168.

[15] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法(下) [J]. 生物多样性,1994,2(4):231-239.

MA K P, LIU Y M. Measurement of biotic community diversity ( I ):  $\alpha$  measurement of diversity ( II ) [J]. Chinese Biodiversity, 1994,2(4):231-239.

[16] 马克平,黄建辉,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报,1995,15(3):268-277.

MA K P, HUANG J H, YU S L, *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities[J]. Acta Ecologica Sinica, 1995,15(3):268-277.

[17] 马克平,刘灿然,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 III. 几种类型森林群落的种-多度关系研究[J]. 生态学报,1997,17(6):573-583.

MA K P, LIU C R, YU S L, *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China III. Species-abundance relations of several types of forest communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997,17(6):573-583.

[18] 刘灿然,马克平,吕延华,等. 生物群落多样性的测度方法 VI: 与多样性测度有关的统计问题[J]. 生物多样性,1998,6(3):229-239.

LIU C R, MA K P, LV Y H, *et al.* Measurement of biotic community diversity VI: the statistical aspects of diversity measures[J]. Chinese Biodiversity, 1998,6(3):229-239.

[19] 王贵霞,李传荣,许景伟,等. 温带森林群落多样性的测度方法比较评述[J]. 浙江林学院学报,2004,21(4):486-491.

WANG GX, LI C R, XU J W, *et al.* Review of methods of measuring community biodiversity in temperate forests[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2004,21(4):486-491.

[20] 刘勇,李国雷,李瑞生,等. 密度调控对油松人工林土壤肥力的影响[J]. 西北林学院学报,2008,23(6):18-23.

LIU Y, LI G L, LI R S, *et al.* Effect of tree density on soil fertility in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008,23(6):18-23.

[21] 靳爱仙,周国英,史大林,等. 马尾松人工林碳储量密度控制图的编制[J]. 西北林学院学报,2009,24(3):54-57.

JIN A X, ZHOU G Y, SHI D L, *et al.* Establishment of the *Pinus massoniana* carbon storage density control graph[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009,24(3):54-57.

[22] 段劼,马履一,贾忠奎,等. 抚育强度对侧柏人工林林下植物生长的影响[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):128-135.

DUAN J, MA L Y, JIA Z K, *et al.* Effects of thinning intensity on the undergrowth vegetations under *Platycladus orientalis* Young plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010,25(5):128-135.

[23] 王百田,王颖,郭江红,等. 黄土高原半干旱地区刺槐人工林密度与地上生物量效应[J]. 中国水土保持科学,2005,3(3):35-39.

WANG B T, WANG Y, GUO J H, *et al.* Effect on biomass of stand density of artificial Black Locust forest in semi-arid region of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005,3(3):35-39.

[24] 杨承栋,焦如珍,屠星南,等. 发育林下植被是恢复杉木人工林地力的重要途径[J]. 林业科学,1995,31(3):275-283.

YANG C D, JIAO R Z, TU X N, *et al.* Developing undergrowth vegetation is an important way to recover soil fertility of Chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995,31(3):275-283.

[25] 盛炜彤,杨承栋. 关于杉木林下植被对改良土壤性质效用的研究[J]. 生态学报,1997,17(4):377-385.

SHENG W T, YANG C D. Research on effect of ameliorating soil properties by undergrowth vegetation of China fir [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997,17(4):377-385.

[26] 王克勤,王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究[J]. 应用生态学报,2002,13(1):11-15.

WANG K Q, WANG B R. Study on thinning to *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(1):11-15.