

不同密度油松人工林生长更新状况及群落结构

王 梅¹, 张文辉²

(1 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2 西部环境与生态教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】阐明黄土高原森林区油松人工林初植密度对群落更新和持续发育的影响, 为当地油松人工林经营管理提供参考。【方法】通过野外调查和室内分析相结合的方法, 研究了陕西宜川地区不同初植密度(1 m×1 m(密度Ⅰ), 1 m×2 m(密度Ⅱ), 2 m×2.5 m(密度Ⅲ))35 年生油松人工林的林木个体生长、林地更新、群落物种多样性及土壤养分特征。【结果】油松人工林的死亡率随初植密度的增大呈增加趋势, 油松死亡年龄、胸径、树高、冠高和冠幅随初植密度的增加而减小; 油松死亡率、胸径、冠高和冠幅与初植密度之间有显著的相关关系, 但油松树高与初植密度之间的相关性不显著。油松人工林林下幼苗(树)的更新状况在低密度林地内最好。在各初植密度油松人工林中, 各层物种丰富度指数、均匀度指数和多样性指数均表现为灌木层>草本层。群落总体多样性表现为丰富度指数和多样性指数在 3 种初植密度间的变化趋势一致, 均为Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ; 均匀度指数 J_{sw} 和 Ea 则表现为Ⅰ>Ⅲ>Ⅱ, 而 J_s 表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ。不同初植密度林地间土壤养分和水分存在显著差异。【结论】根据样地数据和野外实地观察结果认为, 宜川地区油松初始造林密度应在 2 800~3 000 株/hm², 在进入生长高峰期后, 适时间伐至 1 200~1 500 株/hm² 比较合适。

[关键词] 造林密度; 生长状况; 更新; 物种多样性; 油松人工林

[中图分类号] S791.254.05

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)07-0075-06

Growth, regeneration and community structure of *Pinus tabulaeformis* artificial forest under different densities

WANG Mei¹, ZHANG Wen-hui²

(1 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Key Laboratory of Environment and Ecology in Western China, Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】To assess the original density impact on community regeneration and development and to provide some scientific basis for reasonable management, *Pinus tabulaeformis* artificial forest was investigated and studied in Yichuan. 【Method】Field investigations and inside experiment were conducted to study the growth of *Pinus tabulaeformis*, saplings and seedlings regeneration, species diversity and soil nutrient under different densities. 【Result】Death rate increased with the increase of density. The death age, stem diameter, height, crown height and crown width decreased with the increase of density. The death age, stem diameter, crown height and crown width were significantly correlated with density. Height wasn't significantly correlated with density. Saplings and seedlings regeneration was the best in plots of low density. Species richness, evenness index and diversity index in the shrub layer were higher than those in the herb layer in the different density plots. The community species richness and diversity index followed such order as densityⅢ>densityⅡ>densityⅠ; evenness index (J_{sw} , Ea) was densityⅠ>densityⅢ>densi-

* [收稿日期] 2009-01-05

[基金项目] 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05); 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAD09B03)

[作者简介] 王 梅(1977—), 女, 新疆石河子人, 在读博士, 主要从事植物生态和生物多样性保护研究。

E-mail: wangm1205@163.com

[通信作者] 张文辉(1955—), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士, 主要从事植物生态和生物多样性保护研究。E-mail: zwhckh@163.com

ty II, but J_{si} was density III > density I > density II. There were significant differences in the soil nutrient and soil moisture among different densities. 【Conclusion】 According to the results and field observation, we think that the original density should be controlled under 2 800—3 000 trees/hm². At the same time, intermediate cutting should be taken into account when growing-peak is coming. It is reasonable that the density is about 1 200—1 500 trees per hectare.

Key words: density; growth; regeneration; species diversity; *Pinus tabulaeformis* artificial forest

人工林持续发育的基本条件是建群种种群可以自我更新。人工林造林工程结束后,随着乡土物种的入侵,乡土种和建群种将共同构建群落复层结构,为人工群落天然化和持续发育奠定基础。黄土高原人工林建设是生态建设的主要内容之一。但是,很多人工林由于造林密度设置不当,或者管理措施滞后,致使林木个体生长不良,群落衰退。因此,探索人工林的初植密度及适宜的初伐时间,使人工林在不同发育时期都能处于合理的密度范围,不仅对培养高品质的木材有重要意义,而且对人工林天然化培育、发挥水土保持功能具有参考价值。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是黄土高原地区广泛栽植的人工林树种。由于其耐干旱、瘠薄,有较强适应性和抗逆性,被认为是黄土高原地区适宜的造林树种之一。有关黄土区油松人工林的林分生长、冠层特性、群落特征及物种多样性的研究已有不少报道^[1-5],但对油松人工林初植密度及人工林林分生长和群落结构的研究较少,而这些问题正是油松人工林造林和经营管理所面临的最迫切问题。为此,本研究选择了陕西宜川地区相似生境条件下,不同密度处理的 35 年生油松人工林为研究对象,通过对目前林地内群落特征及油松林木个体生长状况的调查,分析了不同密度条件下油松人工林的生长状况、林地更新状况、群落土壤养分及群落物种多样性差异,旨在阐明黄土高原森林区油松人工林初植密度对群落更新和持续发育的影响,以期为当地油松人工林的经营管理提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原南部森林区的宜川县铁龙湾林场森林水文和水土保持效益监测站。该区海拔 860~1 200 m,年均温 9.7 ℃,≥10 ℃年积温 3 429 ℃,年均降水量 574.0 mm,年均蒸发量 1 542.9 mm,年均日照时数 2 435.6 h,土壤以灰褐土为主。

供研究的油松人工林于 1975 年营造,是群落生境相似、密度处理不同的试验林。林地处于阴坡,坡

度 20~25°。当年采用植苗造林,密度分 3 个处理,株行距 1 m×1 m 为密度 I,1 m×2 m 为密度 II,2 m×2.5 m 为密度 III。造林后 1~2 年内对当年死亡植株进行补植,3 年后 3 种造林密度处理的成活率均达到 95% 以上。种植时采用 3 年生油松幼苗,平均高度约 30 cm。造林整地方式均为台阶地基础上的穴状整地,除种植时浇水 1 次外,其后未采取任何人工抚育措施。

1.2 样地调查

在不同造林密度处理的油松人工林内,各设置 20 m×20 m 样地 3 块。每块样地沿对角线设置 5 m×5 m 灌木样方 3 个,及 1 m×1 m 草本样方 3 个。调查内容包括:①群落学特征。记录每株乔木(油松)的树高、胸径、冠幅、冠高,分物种调查灌木、草本的名称、高度、盖度、多度和频度。②由于竞争导致油松个体枯死的调查。在样地内统计枯死油松个体(13 年以上)数量和年龄(林木冠幅全部枯死定义为树木死亡,死树的年龄即是树木死亡时的年龄,由主干的轮生枝确定)。③群落更新调查。在灌木样方中,详细寻找每一油松幼苗(树),并记录树高、年龄(通过轮生枝确定),并由此推算整个样地内幼苗(树)密度和生长状况。

1.3 物种多样性的测度方法

物种丰富度指数(S)= 出现在样地的物种数。

物种多样性指数的测定采用 Simpson 指数(D)和 Shannon-wiener 指数(H'),公式为: $D = 1 / \sum [N_i(N_i - 1) / N(N - 1)]$; $H' = - \sum P_i \ln P_i$ 。式中: N_i 为种 i 的绝对重要值, N 为种 i 所在样方的各个种的重要值之和, P_i 为种 i 的相对重要值, $P_i = N_i / N$ 。

均匀度指数采用 Pielou 指数(J_{sw} , J_{si})和 Alatalo 指数(Ea),公式为: $J_{sw} = H' / \ln S$; $J_{si} = (- \sum P_i^2) / (1 - 1/S)$; $Ea = [1 / (\sum P_i^2) - 1] / [\exp(H') - 1]$ 。式中: S 为种 i 所在样方的物种总数。

灌木和草本的重要值(IV)计算公式为: $IV = \text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}$ ^[6]。

不同生长型的叶层(林冠)的相对厚度和相对盖

度之和,可作为测度群落物种总体多样性时,不同生长型的多样性指数进行加权的参数。加权参数的计算公式为: $W_i=(C_i/C+H_i/H)/2$ 。式中: W_i 为群落第 i 个生长型多样性指数的加权参数, C_i 为第 i 个生长型的盖度, H_i 为第 i 个生长型的平均高度, C 为群落的总盖度($C=\sum C_i$), H 为群落各生长型平均高度之和($H=\sum H_i$)^[7]。对群落不同生长型的加权参数进行计算后,再计算各个群落总体物种多样性指数和均匀度指数。

1.4 土壤测定

每块样地沿对角线取地表 0~20 cm 土样 3 份,充分混合后测定养分含量。速效氮用碱解扩散法测定,速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,土壤有机质用重铬酸钾容量法(外加热法)测定,土壤 pH 用 ZD-2 型电位滴定计测定,土壤含水率采用烘干法测定^[8]。

表 1 不同初植密度下油松人工林的各生长指标

Table 1 Growth factors of *Pinus tabulaeformis* forest under different original densities

密度类型 Density type	死亡率/% Death rate	死亡年龄/a Death age		胸径/cm DBH			树高/m Height			冠高/m Crown height			冠幅/m Crown width		
		平均 Ave.	最早 Early	平均 Ave.	最大 Max.	最小 Min.	平均 Ave.	最大 Max.	最小 Min.	平均 Ave.	最大 Max.	最小 Min.	平均 Ave.	最大 Max.	最小 Min.
I	15.52 a	15	14	7.89 c	14.96	3.18	8.22 c	9.8	4.3	2.70 b	4.6	0.8	3.35 c	4.65	0.9
II	5.26 b	17	15	8.55 b	19.10	5.41	9.28 a	10.6	6.1	2.85 b	5.1	1.1	3.65 b	4.7	1.7
III	0 c	0	0	15.54 a	19.56	11.29	8.9 b	10.5	7.9	5.31 a	6.47	3.8	4.5 a	4.95	3.9

注:同列数据后标不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。表 5 同。
Note:Data in the same column with different letters indicate significant differences at $P<0.05$. Table 5 is same.

油松人工林各生长指标与初植密度的相关性分析结果见表 2。

表 2 油松人工林林木各生长指标与初植密度之间的相关关系
Table 2 Relationships between growth factors and original densities

指标 Index	回归方程 Regression equation	R^2	相关系数 Correlation coefficient
死亡率 Death rate	$y=0.000\ 02x^2-0.000\ 11x-0.000\ 16$	0.995	0.967**
死亡年龄 Death age	平均 Average $y=-0.004\ 46x^2+0.638\ 29x-5.286\ 78$ 最早 Early $y=-0.003\ 71x^2+0.547\ 47x-4.540\ 60$	0.989 0.988	0.836** 0.860**
胸径 DBH	平均 Average $y=0.001\ 42x^2-0.237\ 56x+17.537\ 63$ 最大 Maximum $y=-0.001\ 20x^2+0.064\ 14x+19.074$ 最小 Minimum $y=0.000\ 72x^2-0.167\ 63x+12.710\ 85$	0.997 0.997 0.995	-0.928** -0.878** -0.980**
树高 Height	平均 Average $y=-0.000\ 39x^2+0.034\ 03x+8.628\ 63$ 最大 Maximum $y=-0.000\ 25x^2+0.018\ 67x+10.363\ 64$ 最小 Minimum $y=-0.000\ 10x^2-0.029\ 79x+8.172\ 54$	0.987 0.937 0.998	-0.581 -0.750* -0.997**
冠高 Crown height	平均 Average $y=0.000\ 52x^2-0.085\ 26x+6.027\ 55$ 最大 Maximum $y=0.000\ 17x^2-0.039\ 31x+6.809\ 98$ 最小 Minimum $y=0.000\ 55x^2-0.092\ 44x+4.615\ 97$	0.998 0.993 0.999	-0.969** -0.721* -0.976**
冠幅 Crown width	平均 Average $y=0.000\ 10x^2-0.023\ 74x+4.697\ 20$ 最大 Maximum $y=0.000\ 02x^2-0.005\ 47x+4.954\ 56$ 最小 Minimum $y=0.000\ 26x^2-0.061\ 89x+4.422\ 17$	0.973 0.539 0.986	-0.969** -0.721* -0.976**

注: ** . 相关系数的显著性概率水平为 0.01; * . 相关系数的显著性概率水平为 0.05。y 表示生长指标, x 表示初植密度。
Note: ** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). y is growth factor, x is density.

由表 2 可见,除平均树高与初植密度相关不显著外,林木的胸径、树高、冠高和冠幅的平均值、最大

值和最小值与初植密度之间存在显著或极显著的负相关关系,林木死亡率与林木密度之间服从很好的二项式函数关系。

2.2 不同初植密度下油松人工林的林下更新情况

对 3 种初植密度下油松人工林的更新情况进行调查(表 3)发现,随着初植密度的减小,林下更新幼苗(树)的数量增大。在密度Ⅰ条件下,仅见 1 年生

油松幼苗,高度为 6.5 cm,更新密度为 20 株/dam²;在密度Ⅲ条件下,最大更新年龄为 10 年,更新密度为 160 株/dam²,在调查时还发现多处由 1 个球果种子形成的成丛油松幼树。由于缺乏光照,密度Ⅰ中 2 年生以上和密度Ⅱ中 5 年生以上的幼苗(树)全部死亡,密度Ⅲ幼苗(树)的数量也不多。可见,初植密度直接影响了油松人工林幼苗(树)的更新。

表 3 不同初植密度下油松人工林林下幼苗(树)的更新密度和高度

Table 3 Natural regeneration density and height of seedling and sapling under different original densities										株/dam ²
密度类型 Density type	不同年龄幼苗(树)的更新密度 Number of seedling and sapling									
	1 年 1 year	2 年 2 year	3 年 3 year	4 年 4 year	5 年 5 year	6 年 6 year	7 年 7 year	8 年 8 year	9 年 9 year	10 年 10 year
Ⅰ	20(6.5)									
Ⅱ	36(9)	4(10)	20(9)	4(13)						
Ⅲ	8(6)	24(9)	32(12)	42(20)	38(26)	9(31)	0	5(65)	0	2(58)

注:括号内数据为树高(cm)。
Note: Number in bracket is height of seedling (cm).

2.3 不同初植密度下油松人工林林下植物的物种多样性

2.3.1 不同层次物种多样性特征的比较 群落内垂直结构上物种丰富度指数和均匀度指数的变化出现分异现象,这主要与群落内某个种群的绝对数量及其在群落内的分布有关,在一个特定群落内的某一生长型,丰富度指数与物种总数成正比,与个体数在群落内的分布无关;而均匀度指数强调个体在群落内的分布,即群落内个体数分布越均匀,均匀度指数越高^[9]。

用上述测度方法,对宜川 3 种初植密度下油松人工林样地的林下植物,分灌木层和草本层分别进行测度,结果见表 4。由表 4 可见,在各密度油松人工林中,物种丰富度指数、均匀度指数和多样性指数均表现为灌木层>草本层。草本层位于植物群落垂直结构的最下层,受其上层植物的影响最大,在林内分布不均匀,并且苔草在草本层中占有较大优势,降低了多样性指数;而灌木受到的影响较草本小,在林内的分布要均匀得多,故其多样性指数高于草本。

表 4 不同初植密度下油松人工林林下植物物种的多样性指数

Table 4 Diversity index of *Pinus tabulaeformis* forest undergrowth under different original densities

林层 Forest layer	多样性指数 Diversity index	密度类型 Density type		
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
草本层 Herb layer	丰富度指数 Richness (S)	4	5	5
	Shannon-wiener 指数(H')	0.698 6	0.731 2	0.713 5
	Simpson 指数(D)	0.539 8	0.518 5	0.490 0
	Pielou 指数(J _{sw})	0.503 9	0.454 3	0.443 4
	Pielou 指数(J _{si})	0.479 8	0.432 1	0.408 4
	Alatalo 指数(Ea)	0.556 0	0.490 3	0.466 0
灌木层 Shrub layer	丰富度指数 Richness (S)	6	7	7
	Shannon-wiener 指数(H')	1.682 5	1.639 3	1.589 7
	Simpson 指数(D)	1.203 9	1.148 1	1.136 3
	Pielou 指数(J _{sw})	0.939 0	0.842 5	0.816 9
	Pielou 指数(J _{si})	0.963 1	0.893 0	0.883 8
	Alatalo 指数(Ea)	0.928 4	0.785 8	0.800 7
总体 General	丰富度指数 Richness (S)	10	12	12
	Shannon-wiener 指数(H')	1.167 9	1.275 7	1.336 1
	Simpson 指数(D)	0.856 6	0.896 0	0.949 3
	Pielou 指数(J _{sw})	0.711 5	0.687 1	0.708 8
	Pielou 指数(J _{si})	0.710 3	0.708 4	0.746 2
	Alatalo 指数(Ea)	0.733 7	0.667 5	0.703 8

2.3.2 总体物种多样性特征的比较 从表 4 可以看出,总体的丰富度指数和多样性指数在 3 种初植

密度间的变化趋势一致,均表现为Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ;均匀度指数 J_{sw} 和 Ea 则表现为Ⅰ>Ⅲ>Ⅱ;而 J_{si} 则表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ。密度Ⅲ条件下林木郁闭度小,林窗作用较强,林内光照充足,给部分喜光草本和灌木的生长提供了机会,因此增加了林下的物种数目。密度Ⅰ条件下林分郁闭度大,林下植物获取光照的机会少,只有耐阴的草本和灌木适合生长,因此植物种类少,多样性降低。

表 5 不同初植密度下油松人工林林地的土壤因子
Table 5 Soil factors of *Pinus tabulaeformis* forest under different original densities

密度类型 Density type	速效 N/ (mg·kg ⁻¹) Available N	速效 P/ (mg·kg ⁻¹) Available P	有机质/ (mg·kg ⁻¹) Organic matter	pH	土壤含水率/% Soil moisture
Ⅰ	214.81 b	54.06 b	15.7 b	6.9	9.97 a
Ⅱ	254.46 a	83.32 a	18.3 a	7.0	9.16 a
Ⅲ	145.23 c	46.10 c	12.9 c	7.2	7.98 b

3 结论与讨论

林木生长发育受遗传和环境因子的共同影响。林分密度反映了林木对其空间的利用程度,是影响林木生长和林下植物的重要因子。Daniel 等^[10]和 Hummel^[11]的研究结果表明,林木的树高相对而言不受竞争的影响。Harper^[12]和 Drew 等^[13]研究认为,林木的冠幅和胸径随着密度的增加而减小。从本研究结果来看,油松死亡率、胸径、冠高和冠幅与初植密度之间有显著的相关关系,林木的树高与初植密度之间的相关性不显著。栽植密度与林木的生长状况存在明显的相关性,是决定油松生长的主要因素,这与前人的研究结论一致^[10-14]。高密度的林地要求更多的水分和养分,从而导致种内竞争加剧。栽植密度越大,林木的生长由于受到水分不足的制约,死亡率越高,生长状况变差;密度适中,竞争压力减小,林木生长状况良好,死亡率降低。

在一个局部地区,在较小的尺度上,物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数受环境因素的影响。因为物理因子和生物因子的异质性发生在空间的各个尺度上,即使微生境如 1 棵树或 1 束灌丛也可产生资源的异质性,如树下的光照强度、土壤水分及土壤养分与树冠外往往相差很大,从而影响其他生命体的分布(包括种类和数量)^[15-17]。林木栽植密度不同改变了光照在林内的分布,进而改变各种植物对光资源的利用潜力。灌木层主要受其上层乔木层的影响,较草本层获取光照资源的机会多,因此灌木层的植物种类较草本层多。栽植密度小,林分郁闭度小,林内光照充足,为林下植物提供了更多的生长机会,使植物种类增加,多样性提高。因此,物种丰富

2.4 不同初植密度下油松人工林林地土壤因子的比较

表 5 结果表明,不同初植密度下油松人工林林地间土壤养分存在显著差异,土壤速效 P、速效 N、有机质最大值均出现在密度Ⅱ条件下,土壤含水率为密度Ⅰ>密度Ⅱ>密度Ⅲ;pH 值则表现为密度Ⅲ>密度Ⅱ>密度Ⅰ。

度指数、多样性指数和均匀度指数,在各层次间和不同栽植密度的林地之间均具有差异。

森林培育过程的最基本要求之一,就是通过人为干预使森林在整个生长过程中能保持最适密度,以便提供最高的木材产量或发挥最大的防护作用^[18]。作为黄土高原主要的水土保持造林树种之一,选择合适的造林密度,对油松的生长至关重要。在所研究的样地中,密度Ⅲ已经出现枝条相互遮挡、生长过密的问题;密度Ⅰ和密度Ⅱ栽植密度过高,导致林木生长不良,甚至死亡,影响了林木的生长状况。因此,适时间伐仍然是森林培育中的重要措施。曾德慧等^[18]利用自然稀疏—3/2 法则推断,辽宁省章古台地区樟子松人工林适宜的栽植密度为 3 000~3 500 株/hm²。移小勇等^[14]认为,科尔沁地区沙地樟子松的初始栽植密度应控制在 2 800 株/hm² 左右较为适宜,在林木生长进入高峰期后,应适时间伐至 2 100 株/hm² 左右。本研究根据样地数据和野外实地观察认为,宜川地区油松人工林初始造林密度应在 2 800~3 000 株/hm²,以后根据林木生长情况适时间伐,在进入生长高峰期后,林木间伐至 1 200~1 500 株/hm² 比较适宜。

对于现有林木,应根据其生长状况采取不同的措施加强后期管理。对于较高密度的林地,间伐一些生长状况差的林木,使林木密度保持在一个合适的范围;对于密度较低的林地,应充分利用有利的生态因素,促进油松自然更新。

[参考文献]

[1] 张光灿,刘 霞,周泽福,等.黄土丘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. (in Chinese)
- [2] 韩恩贤, 韩 刚, 薄颖生. 黄土高原油松、侧柏与沙棘人工混交林生长及土壤特性研究 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 100-104.
- Han E X, Han G, Bo Y S. Studies on the growth and soil properties of *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, and *Hippophae rhamnoides* mixed plantation on Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(3): 100-104. (in Chinese)
- [3] 郭 华, 王孝安. 黄土高原子午岭人工油松林冠层特性研究 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1335-1339.
- Guo H, Wang X A. Canopy characteristics of the man-made *Pinus tabulaeformis* forests in the Ziwuling mountain of the Loess Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(7): 1335-1339. (in Chinese)
- [4] 李裕元, 郑纪勇, 邵明安. 子午岭天然林与人工林群落特征比较研究 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(12): 2447-2456.
- Li Y Y, Zheng J Y, Shao M A. Comparison of the attributes of natural forests and plantations in Ziwuling mountain [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(12): 2447-2456. (in Chinese)
- [5] 邓 娟, 上官周平. 黄土丘陵区人工和天然油松林物种多样性比较 [J]. 西北农业学报, 2008, 17(2): 126-131, 136.
- Deng J, Shangguan Z P. Comparison of the species diversity of natural and artificial *Pinus tabulaeformis* in hilly Loess Regions [J]. Acta Agriculture Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 17(2): 126-131, 136. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 等. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究 II: 演替系列的群落 α 多样性特征 [J]. 生态学报, 1997, 17(6): 619-625.
- Gao X M, Huang J H, Wan S Q, et al. Ecological studies on the plant community succession on the abandoned cropland in Taibaishan, Qinling Mountains II: The community α diversity feature of the successional series [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(6): 619-625. (in Chinese)
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Lu R K. Soil agricultural chemistry analytical method [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 郭正刚, 刘慧霞, 孙学刚, 等. 白龙江上游地区森林植物群落物种多样性的研究 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 388-395.
- Guo Z G, Liu H X, Sun X G, et al. Characteristic of species diversity of plant communities in the upper reaches of Bailong river [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(3): 388-395. (in Chinese)
- [10] Daniel T, Helms J, Baker F S. Principles of silviculture [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.
- [11] Hummel S. Height, diameter and crown diameter of *Cordia alliodora* associated tree density [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 127: 31-40.
- [12] Harper J L. Population biology of plants [M]. London: Academic Press, 1977.
- [13] Drew T J, Flewelling J W. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantation [J]. Forest Science, 1979, 25: 518-532.
- [14] 移小勇, 赵哈林, 崔建垣, 等. 科尔沁沙地不同密度(小面积)樟子松人工林生长状况 [J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1200-1206.
- Yi X Y, Zhao H L, Cui J Y, et al. Growth of small area *Pinus sylvestris* var. *mongolica* artificial forest under different densities in Horqin Sandy Land, North of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1200-1206. (in Chinese)
- [15] Alpert P, Mooney H A. Resource heterogeneity generated by shrubs and topography on coastal sand dunes [J]. Vegetation, 1996, 122(1): 83-93.
- [16] Palmer M W, White P S. Scale dependence and the species-area relationship [J]. The American Naturalist, 1994, 144(5): 717-740.
- [17] Russel S K, Schupp E W. Effects of microhabitats patchiness on patterns of seed dispersal and seed predation of *Cerocarpus ledifolius* (Rosaceae) [J]. Oikos, 1998, 81: 434-443.
- [18] 曾德慧, 姜凤歧, 范志平. 沙地樟子松人工林自然稀疏规律 [J]. 生态学报, 2000, 20(2): 235-242.
- Zeng D H, Jiang F Q, Fan Z P. Self-thinning of even-aged pure plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 235-242. (in Chinese)