

广西大青山西南桦人工林立地类型划分及评价

唐 诚^{1,2},王春胜²,庞圣江³,贾宏炎³,曾 杰^{2*}

(1.石河子大学 农学院,新疆 石河子 832003; 2.中国林业科学研究院 热带林业研究所,广东 广州 510520;
3.中国林业科学研究院 热带林业实验中心,广西 凭祥 536000)

摘 要:以广西大青山林区西南桦人工林为研究对象,通过调查测定 47 块临时样地的常规立地因子和西南桦生长状况,应用主成分分析、数量化理论 I 等方法探讨立地指数与立地因子间的关系,系统评价西南桦人工林立地生产潜力。结果表明,坡位、海拔、土壤养分、坡向、坡度、土壤质地和土壤容重 7 个立地因子与立地指数数量化拟合的复相关系数为 0.964,达极显著水平($P<0.01$);7 个因子中,坡位、海拔和土壤养分对立地指数的贡献达 59.36%,且影响均极显著。采用坡位、海拔和坡向 3 个因子组合划分立地类型,并对 47 个样地所属立地类型的立地质量进行分析得出,西南桦喜温凉气候,在较高海拔,阴坡、半阴坡立地栽培时生产力较高。
关键词:西南桦人工林;立地质量评价;立地分类;数量化理论 I
中图分类号:S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)04-0052-06

Site Classification and Evaluation of *Betula alnoides* Plantations at Guangxi Daqing Mountain

TANG Cheng^{1,2}, WANG Chun-sheng², PANG Sheng-jiang³, JIA Hong-yan³, ZENG Jie^{2*}

(1. Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;
2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China;
3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi 536000, China)

Abstract: Conventional site factors and tree growth performance were investigated in 47 temporary sample plots of *Betula alnoides* plantations at Daqing Mountain in Guangxi. Relationship between site index and site factors was explored through principal component analysis and quantification theory I so as to evaluate site potential productivity of *B. alnoides* plantations. The results showed that site index fitted significantly ($P<0.01$) with seven site factors, including slope position, altitude, soil nutrition, slope orientation, degree, soil texture and soil bulk density, and the multiple correlation coefficient of quantified model was 0.964. The contribution rate of slope position, altitude and soil nutrition to site index reached up to 59.36%, indicating a highly significant correlation in the quantified model. Combination of slope position, altitude and slope orientation was used to classify site type and then evaluated site quality of 47 plots, it was indicated that *B. alnoides* liked “warm-cool” climate, and was of high site productivity when planted at sites with higher altitudes, shady or semi-shady slopes.
Key words: *Betula alnoides* plantation; site quality evaluation; site classification; quantification theory I

立地类型划分与评价是科学造林、育林的基础工作^[1],对评价立地生产潜力至关重要^[2]。立地生产潜力与树种紧密相关,不同树种在相同立地或者同一树种在不同立地,其生产潜力均有差异。立地质量是影响林分生产力的关键要素,其准确评价是科学营林的前提^[3]。对于同龄林,常采用回归方法

收稿日期:2018-02-05 修回日期:2018-03-23
基金项目:国家重点研发计划课题“西南桦高效培育技术研究”(2016YFD0600604)。
作者简介:唐 诚,男,博士,讲师,研究方向:热带林培育及经营。E-mail:tangcheng1983@163.com
* 通信作者:曾 杰,男,研究员,博士生导师,研究方向:森林培育与生态遗传。E-mail:zengjie69@caf.ac.cn

建立林分平均高或优势高与年龄间的立地指数方程进行立地质量评价^[4]。由于立地因子影响立地质量高低,有学者将立地因子引入立地指数模型,以提高模型拟合的精确性^[5-6]。也有学者应用数量化理论方法探讨立地因子对立地质量的影响,如我国学者在上世纪采用数量化理论方法对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[7]、油松(*Pinus tabulaeformis*)^[8]、马尾松(*Pinus massoniana*)^[9-10]等树种进行了立地类型划分及立地质量评价。本世纪以来,国内有关立地质量评价的研究成果相对较少,尤其是珍贵树种更少^[11-12],西南桦(*Betula alnoides*)人工林的立地类型划分与评价研究则尚未见报道。

西南桦为桦木科(*Betulaceae*)桦木属(*Betula* L.)高大落叶乔木,天然分布于我国云南省西南、东南和南部,广西壮族自治区西南、西北和西部以及贵州省西南部等地区,与我国接壤的越南、老挝、缅甸、印度、尼泊尔亦有其天然分布^[13]。西南桦干形通直、材质优良,是我国热带、亚热带地区的一个珍贵用材树种,可用于制作高档家具及装饰材料、乐器等。上世纪末,随着西南桦木材需求量剧增,其天然林面积消减严重,人工种植随之兴起。近 20 a 来,西南桦人工林面积迅速扩大,已逾 15 万 hm²,广西、云南、贵州、广东、福建各省均有栽培。然而,在西南桦人工林快速发展过程中,有关生长与立地之间关系的研究严重滞后,大量存在因立地选择不当导致林木生长不良、林分分化严重以及林分生产力低下等现象^[14]。因此,开展西南桦人工林生长与立地间关系研究,划分立地类型和评价立地质量对于西南桦人工林的快速发展、健康经营至关重要。

广西大青山林区是我国西南桦人工林发展最早的地区^[14]。本研究以其西南桦人工林为研究对象,通过 47 块临时样地的林木生长测定、常规立地因子调查、土壤理化性质分析,应用主成分分析、数量化理论等方法探讨西南桦人工林立地指数与立地因子间的关系,评价不同立地条件下西南桦人工林的生产潜力,为西南桦造林地选择和林分科学经营提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心(106°47′-53°E,22°02′-06°N),属南亚热带季风气候区,年均气温 19.5~21.5℃,年降水量 1 200~1 550 mm,干湿季分明,每年 4—9 月为雨季,相对湿度在 80%以上。研究区海拔 190~680 m,土壤类型主要为砖红壤性红壤和红壤。

1.2 研究方法

1.2.1 调查、取样、测定 基于年龄、坡向、坡位等因素,在热带林业实验中心的青山、白云和伏波 3 个试验场分别设置 17、14、16 块 600 m² 的典型样地,进行立地因子调查及常规生长测定。每个样地的对角线上挖取 3 个土壤剖面,取 0~30 cm 土壤约 1 kg 带回实验室,按国家林业局土壤养分分析标准制样并测定土壤 pH 值、有机质、全 N、全 P、全 K、有效 N、有效 P、速效 K、交换性镁、活性铝含量^[15]。环刀法测定土壤容重,采用中华人民共和国国家标准 GB 7845-87 森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定方法测定土壤颗粒组成,确定土壤质地。样地各立地因子信息见表 1。

1.2.2 土壤养分等级划分 10 项土壤化学性质经主成分分析,共提取 4 个主成分。计算每个主成分得分,进而获得各样地土壤养分综合得分值,以综合得分值进一步进行聚类分析^[11,16-17]。所有样地聚为 4 类(过程略),根据聚类结果将土壤养分划分为高、中、底、贫 4 个等级(表 1)。

1.2.3 立地指数获取 每个样地的立地指数来自文献^[18]中的“广西热林中心西南桦人工林立地指数表”。根据样地调查资料,每个样地选取 5 株优势木或亚优势木求其平均高,查表获得其立地指数(表 1)。

1.3 数据分析

采用数量化理论方法 I^[19]进行立地质量评价,其中类目范围的划分以其对西南桦生长影响是否显著,实践中是否便于调查和应用为依据^[20]。所有数据均利用 SPSS 21 和 Excel 2010 软件进行分析和分析。

2 结果与分析

2.1 立地因子类目划分

由表 1 可知,样地海拔 190~670 m,土壤容重 0.922~1.441 g·cm⁻³,依据海拔和容重影响西南桦生长的显著性划分类目范围;坡向、坡位、坡度的类目划分根据森林资源调查技术标准进行,便于调查和应用;土壤养分依据其等级划分结果进行类目划分,见表 2。

2.2 数量化立地质量方程拟合及检验

结合类目划分(表 2),对样地各立地因子数据进行(0,1)化,采用数量化理论 I 将(0,1)化后数据与各样地立地指数建模,拟合得出模型回归系数及有关参数(表 2)。

由表 2 可知,立地因子与立地指数间偏相关系数的 *t* 检验结果表明,7 个立地因子偏相关系数均

表 1 样地信息
Table 1 Plot infomation

样地	立地指数	林龄/a	海拔/m	坡向	坡位	坡度/(°)	养分	质地	容重/(g·cm ⁻³)
b1	20	14	670	阴坡	上	28	高	粘壤土	0.922
b2	18	14	670	阴坡	上	16	高	粘壤土	0.923
b3	18	14	670	阴坡	上	28	中	粘壤土	0.938
b4	20	17	460	半阴坡	中	36	低	粘土	1.321
b5	24	17	460	半阴坡	中	37	低	粘土	1.135
b6	22	17	455	半阴坡	中	39	低	粘土	1.235
b7	20	17	564	半阳坡	中	14	低	粘土	1.328
b8	18	17	485	阳坡	中	31	低	粘土	1.379
b9	16	17	485	阳坡	中	32	低	粘土	1.389
b10	18	17	390	半阳坡	下	37	中	粘土	1.128
b11	18	17	390	半阳坡	下	28	中	粘土	1.156
b12	16	17	400	阳坡	中	22	低	粘土	1.363
b13	20	17	400	阳坡	下	28	低	粘土	1.334
b14	22	17	405	阳坡	下	34	中	粘壤土	1.186
f1	22	14	460	半阳坡	下	39	低	粘壤土	1.243
f2	26	14	460	阴坡	下	34	低	粘壤土	1.202
f3	24	14	460	阴坡	下	26	贫	粘壤土	1.339
f4	26	14	460	阴坡	下	24	贫	砂粘壤	1.186
f7	22	28	600	半阳坡	上	36	低	壤土	1.277
f8	18	28	600	阴坡	上	32	低	砂粘壤	1.285
f9	20	24	600	阴坡	上	42	低	粘壤土	1.269
f11	16	13	640	阳坡	上	28	低	粘壤土	1.372
f12	20	13	640	阳坡	上	31	低	粘壤土	1.161
f13	28	13	640	半阳坡	中	32	低	粘壤土	1.210
f14	20	13	640	阴坡	上	37	贫	砂粘壤	1.219
f15	22	13	640	半阴坡	上	34	贫	粘壤土	1.099
f16	18	15	440	半阳坡	中	31	贫	砂粘壤	1.326
f18	18	15	440	半阳坡	中	31	贫	砂粘壤	1.354
f21	20	16	480	阴坡	中	28	低	壤土	1.190
f23	20	16	480	阴坡	中	32	低	壤土	1.143
q1	18	12	230	阴坡	上	14	贫	粘壤土	1.441
q2	18	12	230	阴坡	上	9	贫	粘壤土	1.334
q3	18	12	230	阴坡	上	23	中	粘壤土	1.362
q4	18	13	190	阴坡	上	15	低	粘土	1.242
q5	20	13	190	阴坡	上	22	低	粘土	1.306
q6	18	13	190	阴坡	上	26	低	粘壤土	1.383
q7	20	24	260	半阳坡	上	23	低	粘壤土	1.439
q8	18	20	240	半阳坡	上	21	低	粘壤土	1.371
q9	20	20	250	阳坡	上	25	低	粘壤土	1.367
q10	20	20	250	阳坡	上	21	低	粘壤土	1.373
q11	18	20	250	阳坡	上	21	贫	粘土	1.341
q12	18	20	240	阳坡	上	18	低	粘土	1.395
q14	16	12	523	半阳坡	中	37	中	粘壤土	1.389
q15	16	12	500	半阳坡	中	37	中	粘壤土	1.388
q16	20	12	550	半阳坡	中	34	中	粘壤土	1.296
q17	22	12	550	阳坡	中	32	低	粘土	1.142
q18	20	12	550	阳坡	中	31	中	粘土	1.294

达到极显著水平($P<0.01$),模型的复相关系数 $R=0.964$,剩余标准差为 0.782,并未超出一个立地指数级(2 m),模型达到极显著水平($F_{(7,39)}=72.256$

$>F_{0.01(7,39)}=3.14$)。因此,选取的 7 个因子与立地指数之间关系紧密,应用此方程评价西南桦人工林立地质量,理论上是可行的。

数量化立地质量方程如下：

$$SI=14.23+5.025X_{12}+7.401X_{13}+5.720X_{21}+4.210X_{23}+2.509X_{31}+3.490X_{33}+3.185X_{34}-1.950X_{41}-0.645X_{42}+1.444X_{44}-3.017X_{51}-1.244X_{53}-2.814X_{61}-2.044X_{62}-2.561X_{64}-0.440X_{71}-1.088X_{73}-2.146X_{74}$$

利用立地因子调查值,查表 2 可得类目得分值,或代入数量化方程,可预估立地指数值,以便于野外快速评价此类立地的生产潜力。

表 2 数量化立地质量得分

Table 2 Site quality quantitative score by quantity regression				
项目	类目	代码	得分	偏相关系数 得分范围
坡位	上	X ₁₁	0	0.891**
	中	X ₁₂	5.025	7.401
	下	X ₁₃	7.401	
海拔/m	<300	X ₂₁	5.720	0.847**
	300~500	X ₂₂	0	5.720
	>500	X ₂₃	4.210	
土壤养分	高	X ₃₁	2.509	0.858**
	中	X ₃₂	0	3.490
	低	X ₃₃	3.490	
	贫	X ₃₄	3.185	
坡向	阳坡	X ₄₁	-1.950	0.690**
	半阳坡	X ₄₂	-0.645	3.394
	阴坡	X ₄₃	0	
	半阴坡	X ₄₄	1.444	
坡度/(°)	<20	X ₅₁	-3.017	0.777**
	20~35	X ₅₂	0	3.017
	>35	X ₅₃	-1.244	
土壤质地	壤土	X ₆₁	-2.814	0.844**
	砂粘壤土	X ₆₂	-2.044	2.814
	粘壤土	X ₆₃	0	
	粘土	X ₆₄	-2.561	
土壤容重	<1.0	X ₇₁	-0.440	0.704**
/(g·cm ⁻³)	1.0~1.25	X ₇₂	0	2.146
	1.25~1.35	X ₇₃	-1.088	
	1.35~1.45	X ₇₄	-2.146	
	常数项		14.230	
	复相关系数		0.964	
	剩余标准差		0.782	
	F 检验		F=72.256**	

注：* * 表示 P<0.01 水平极显著差异。

2.3 立地类型划分及评价

由表 2 可知,立地因子得分值范围大小依次为坡位>海拔>土壤养分>坡向>坡度>土壤质地>土壤容重,前 3 项因子得分比达 59.36%。地形因子中,坡位对西南桦人工林生长的影响大于坡向和坡度。由于在造林实践中土壤养分测定费时且成本高,而坡向与土壤养分得分值范围相差不大,按照简单实用原则^[20],将易于测定的坡向替代土壤养分因

子纳入主导因子,采用主导因子组合法划分立地类型。坡位、海拔、坡向可组合为 36 个立地类型,本研究中,部分立地类型无样地存在(表 3)。

由表 3 可知,47 个样地隶属于 16 个立地类型,各立地类型中,上坡位的 7 个立地类型中,“上坡位高海拔阳坡”平均立地指数值最低,“上坡位高海拔半阴坡”平均立地指数值最高,两者相差近 7 m;中坡位 7 个立地类型中,“中坡位中海拔阳坡”平均立地指数最低,“中坡位高海拔阴坡”立地指数最高,两者相差近 11 m;下坡位 2 个立地类型中,“下坡位中海拔阴坡”平均立地指数明显高于“下坡位中海拔半阳坡”。综合分析表明,同坡位高海拔立地指数略高于低海拔;同坡位阴坡、半阴坡立地指数高于阳坡、半阳坡。可见,西南桦喜温凉气候,在较高海拔,阴坡、半阴坡立地栽培时立地生产力较高。

3 结论与讨论

运用数量化方法进行立地质量评价,一般采用立地指数作为基准变量与诸多立地因子进行线性拟合^[21-22],部分研究以优势木年平均高作为基准变量^[11-12]。立地指数是基准年龄时优势木高,不同林龄的林分如果具有相同的立地指数即表示其立地质量亦一致,但林龄不同时,优势木年平均高相同,立地质量则多不同,故用优势木年平均高作为基准变量进行立地质量评价,适用于所有样地林龄相差不大时。本研究中林龄介于 12~28 a(表 1),因此,采用立地指数作为基准变量进行方程拟合和检验,获取数量化回归模型,能较好地应用于营林实践。

由于气候、土壤、地形等立地因子都能影响立地质量^[6,23-24],在研究区域跨度比较大时,气候要素应考虑在内^[10,24-25],否则会影响评价结果的可靠性,本研究区域跨度较小,故未考虑气候因子。地形和土壤因子则是影响立地质量的重要因子,对于丘陵山地立地质量评价,地形因子相对于土壤因子具有稳定和易测的优势^[26]。地形因子与土壤因子之间亦是紧密相关的,坡向影响光照,海拔高度、坡位、坡度则通常会影响到土壤水分和养分状况^[27]。本研究中,经数量化分析,坡位和海拔对西南桦人工林地指数的影响大于其他因子,其次为土壤养分与坡向,两者的贡献相差不大。以坡位、海拔和坡向作为主导立地因子划分立地类型,分析得出西南桦喜温凉气候,在较高海拔以及阴坡、半阴坡生长潜力较高,这与曾杰^[13]等对我国西南桦的地理分布与适生条件的研究结果一致。

树木生长与立地因子紧密相关,各立地因子包含很多测量指标。利用立地指数与立地因子建模评

表 3 广西大青山西南桦人工林立地类型划分

Table 3 Site type division of *B. alnoides* plantation in Daqing Mountain in Guangxi

序号	划分依据			立地类型名称	立地指数		样地
	坡位	海拔/m	坡向		平均值	变动范围	
1	上坡	<300 低海拔	阳坡	上坡低海拔阳坡	18.5	17.5~19.3	q9,q10,q11,q12
2			半阳坡	上坡低海拔半阳坡	19.4	18.1~20.6	q7,q8
3			阴坡	上坡低海拔阴坡	18.5	17.8~19.8	q1,q2,q3,q4,q5,q6
4		>500 高海拔	阳坡	上坡高海拔阳坡	15.3	—	f11
5			半阳坡	上坡高海拔半阳坡	19.7	18.2~21.3	f8,f12
6			阴坡	上坡高海拔阴坡	19.0	17.5~20.5	b1,b2,b3,f9,f14
7			半阴坡	上坡高海拔半阴坡	22.1	21.0~23.1	f7,f15
8	中坡	300~500 中海拔	阳坡	中坡中海拔阳坡	16.0	—	b9,b12
9			半阳坡	中坡中海拔半阳坡	17.9	17.3~18.7	b8,f16,f18
10			阴坡	中坡中海拔阴坡	20.1	19.9~20.4	b4,f21,f23
11		>500 高海拔	半阴坡	中坡中海拔半阴坡	23.0	22.0~24.0	b5,b6
12			阳坡	中坡高海拔阳坡	19.9	16.8~22.4	q14,q15,q17,q18
13			半阳坡	中坡高海拔半阳坡	19.3	18.9~19.6	b7,q16
14			阴坡	中坡高海拔阴坡	26.9	—	f13
15	下坡	300~500 中海拔	半阳坡	下坡中海拔半阳坡	17.8	17.2~18.4	b10,b11
16			阴坡	下坡中海拔阴坡	23.4	21.2~25.1	b13,b14,f1,f2,f3,f4

价立地质量高低时,由于大量立地因子的调查及测定成本高,模型中不可能引入所有的立地因子进行拟合。因此,能否正确选择影响某树种生长的主导或限制因子,将影响数量化立地质量评价的精度。本研究仅针对广西大青山局域范围,后续研究中,其他区域影响西南桦人工林生长的主导立地因子筛选及立地质量评价还有待进行。

通过广西大青山 47 块西南桦人工林样地立地因子与立地指数的数量化分析,得出立地因子的得分范围从大到小依次为坡位>海拔>土壤养分>坡向>坡度>土壤质地>土壤容重。

以坡位、海拔和坡向为主导立地因子,大青山西南桦人工林理论上可划分出 36 个立地类型,47 个样地隶属于 16 个立地类型。分析各立地类型的立地指数大小得出,西南桦喜温凉气候,在较高海拔,阴坡、半阴坡立地栽培时生产力较高。

参考文献:

[1] 樊良新,刘悦翠. 基于 GIS 的晋西王家沟小流域造林立地条件类型划分研究[J]. 西北林学院学报,2006,21(3):184-188.
FAN L X,LIU Y C. Division of afforestation site type in small watershed of Wangjiagou gully of West Shanxi on GIS[J]. Journal of Northwest Forestry University,2006,21(3):184-188. (in Chinese)

[2] LOUW J H,SCHOLES M. Forest site classification and evaluation:a South African perspective[J]. Forest Ecology & Management,2002,171(1-2):153-168.

[3] 郭小阳,吴恒,田相林,等. 基于优势高模型分析多源数据对立地质量评价的影响[J]. 西北林学院学报,2017,32(6):184-

189.

GUO X Y,WU H,TIAN X L,*et al.* Effects of multiple source data on site evaluation based on dominant height modeling[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(6):184-189. (in Chinese)

[4] SCHOENHOLTZ S H,VAN M H,BURGER J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality:challenges and opportunities[J]. Forest Ecology & Management,2000,138(1-3):335-356.

[5] BERG S L,CHEVALIER R,DUMAS Y,*et al.* Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate,topography and soil in even-aged high-forest stands in Northern France[J]. Annals of Forest Science,2005,62(5):391-402.

[6] SHARMA R P,BRUNNER A,EID T. Site index prediction from site and climate variables for norway spruce and scots pine in norway[J]. Scandinavian Journal of Forest Research,2012,27(7):619-636.

[7] 蒋菊生,彭金莲. 杉木数量化立地质量评定表的编制及其问题探讨[J]. 林业资源管理,1987(5):40-44.

[8] 张康健,薛德自,孙长忠. 渭北黄土高原油松数量化立地质量得分表的编制及其应用[J]. 西北林学院学报,1984,1(1):60-71.
ZHANG K J,XUE D Z,SUN C Z. The formation and application of the quatification score table of the site quality for the plantations of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau to the North of the Wei River[J]. Journal of Northwest Forestry University,1984,1(1):60-71. (in Chinese)

[9] 浦瑞良,杨金中,刘毓起,等. 紫金山彩红外片马尾松数量化立地指数表的编制[J]. 浙江林学院学报,1994,11(1):64-68.
PU R L,YANG J Z,LIU Y Q,*et al.* Tabulation of quantification color infrared aerial photo site-index for *Pinus massoniana* in Mt. Zijin[J]. Journal of Zhejiang Forestry College,1994,11(1):64-68. (in Chinese)

[10] 叶要妹,凌远云,庄尔奇. 湖北省马尾松人工林数量化地位指数表的编制[J]. 华中农业大学学报,1996,15(2):186-189.
YE Y M, LING Y Y, ZHUANG E Q. Complication of the quantitive site index table for masson pine plantation in Hubei Province[J]. Journal of Huangzhong Agriculture University, 1996,15(2):186-189. (in Chinese)

[11] 杜健,梁坤南,周再知,等. 云南西双版纳柚木人工林立地类型划分及评价[J]. 林业科学,2016,52(9):1-10.
DU J, LIANG K N, ZHOU Z Z, *et al.* Site classification and e-valuation of teak plantation in Xishuangbanna, Yunnan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(9): 1-10. (in Chinese)

[12] 郭艳荣,刘洋,吴保国. 福建省宜林地立地质量的分级与数量化评价[J]. 东北林业大学学报,2014(10):54-59.
GUO Y R, LIU Y, WU B G. Evaluating dividing rank and quantification of site quality of suitable land for forest in Fujian Province, China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014(10): 54-59. (in Chinese)

[13] 曾杰,郑海水,翁启杰. 我国西南桦的地理分布与适生条件[J]. 林业科学研究,1999(5):479-484.
ZENG J, ZHENG H S, WENG Q J. Geographic distributions and ecological conditions of *Betula alnoides* in China[J]. Forest Research, 1999(5): 479-484. (in Chinese)

[14] 曾杰,郭文福,赵志刚,等. 我国西南桦研究的回顾与展望[J]. 林业科学研究,2006,19(3):379-384.
ZENG J, GUO W F, ZHAO Z G, *et al.* Domestication of *Betula alnoides* in China: current status and perspectives[J]. Forest Research, 2006, 19(3): 379-384. (in Chinese)

[15] 国家林业局. 森林土壤分析方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2000.

[16] 刘勇,李国雷,林平,等. 华北落叶松人工幼、中龄林土壤肥力变化[J]. 北京林业大学学报,2009,31(3):17-23.
LIU Y, LI G L, LIN P, *et al.* Changes of soil fertility in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(3): 17-23. (in Chinese)

[17] 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(5):81-87.
QIN Z Y, TANG J, CAO J Z, *et al.* Assessment of soil fertility of continuous plantation of Chinese fir based on principal component and cluster analysis[J]. Forest Resources Management, 2015(5): 81-87. (in Chinese)

[18] 唐诚. 西南桦人工林生长模拟及立地质量评价[D]. 北京:中国林业科学研究院,2017.

[19] 周光亚,董文泉,夏立显. 关于数量化理论 I、II 的数学模型[J]. 吉林大学自然科学学报,1979(1):11-18.
ZHOU G Y, DONG W Q, XIA L X. On the mathematical models of quatification theories I & II [J]. Journal of Jinlin University: Natural Science, 1979(1): 11-18. (in Chinese)

[20] 建德林场杉木课题组. 建德林场杉木林数量化立地质量评定表的编制及应用[J]. 浙江林学院学报,1988,5(1):16-27.

[21] 胡兴宜,宋从文,张家来. 湖北省秃杉立地类型划分及立地质量评价[J]. 江西农业大学学报,2004,26(4):532-535.
HU X Y, SONG C W, ZHANG J L. Classification of *Taiwania flousiana* in Hubei Province and assessment of its forest stands[J]. Acta Agriculturae Universitis Jiangxiensis, 2004, 26(4): 532-535. (in Chinese)

[22] 黄家荣,马天晓,王艳梅,等. 基于 BP 网络的无林地立地质量评价模型研究[J]. 山地农业生物学报,2006,25(6):479-483.
HUANG J R, MA T X, WANG Y M, *et al.* Forest site evaluation model studies on the basis of BP neural network[J]. Journal of Mountain Agriculture & Biology, 2006, 25(6): 479-483. (in Chinese)

[23] SCHMIDT M G, CARMEAN W H. Jack pine site quality in relation to soil and topography in Northcen [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 18(3): 297-305.

[24] ALBERT M, SCHMIDT M. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.) [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(4): 739-749.

[25] AERTSEN W, KINT V, VAN ORSHOVEN J, *et al.* Evaluation of modelling techniques for forest site productivity prediction in contrasting ecoregions using stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA) [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(7): 929-937.

[26] 杨承栋. 对我国森林立地分类与评价问题的几点看法[J]. 林业科学,1991,27(1):60-64.
YANG C D. Opinions on China forest site classification and e-valuation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1991, 27(1): 60-64. (in Chinese)

[27] 曹瑞致,周自云,靳鹏博,等. 黄土丘陵区不同立地条件下人工杜仲林土壤水分变化和生长规律研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 12-18.
CAO R Z, ZHOU Z Y, JIN P B, *et al.* Dynamic regularities of soil water and growth in artificial *Eucommia ulmoides* plantations with different site conditions in Loess gullied-hilly regions[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 12-18. (in Chinese)