

安溪县福建柏人工林立地质量数量化评价*

刘 聘, 乔一娜, 李静文, 荣俊冬, 陈礼光, 郑郁善**

(福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002)

摘要:【目的】评价福建省安溪县福建柏的立地质量和生产潜力, 为适地适树提供依据。【方法】通过对安溪县福建柏立地因子和生长状况的调查, 应用数量化理论 I, 依据各因子的得分值排序, 筛选出主导因子来划分立地类型, 进而构建数量化预测方程并确定立地质量等级, 对福建柏的立地质量进行数量化评价。【结果】坡向、坡位、坡度、海拔、土层厚度和腐殖质层厚度 6 个立地因子与立地指数相关性达极显著水平; 其中, 坡度、土层厚度和坡向对立地指数的贡献率达 71.42%, 且均影响显著; 采用 3 个主导因子将样地划分为 48 个立地类型, 并根据数量化得分表划分出优、良、中、差 4 个等级; 预测方程经检验达到要求。【结论】安溪县立地条件良好, 适合福建柏生长, 数量化理论方法可应用于评价立地质量和预测福建柏人工林生长趋势。

关键词: 福建柏; 数量化理论; 立地分类; 立地质量评价

中图分类号: Q 949.667.08

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 02-0324-06

Quantitative Evaluation of Site Quality of Fujian Cypress Plantations in Anxi County

LIU Pin, QIAO Yina, LI Jingwen, RONG Jundong, CHEN Liguang, ZHENG Yushan

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Purpose] In order to evaluate the site quality and potential productivity of forest land in Anxi County, Fujian Province, and provide a basis for suitable land and trees. [Method] The investigation of site factors and growth conditions was conducted in Fujian Cypress plantations in Anxi County. According to the score values of site factors, the main factors affecting the growth of the stands were analyzed for dividing the site types by Quantitative Theory I. Then, we determined the site quality grade and established prediction equation of the quantitative theory, which was used to evaluate the site quality quantitatively of Fujian Cypress plantations in Anxi County. [Result] There was a very significant correlation between site index and six site factors, including slope direction, slope position, slope degree, altitude, soil thickness and humus thickness. The contribution rate of slope, soil thickness and slope direction to site index reached up to 71.42%, all of which significantly affected. The plots were divided into 48 site types by three leading factors, and then based on the quantitative score table, the 48 site types were divided into four grades: excellent, good, medium and poor. The result of examination of the prediction model indicated that it met the precision requirements.

收稿日期: 2019-08-13

修回日期: 2020-04-02

网络首发时间: 2021-03-10 16:55:00

*基金项目: 福建省科技重大专项 (2018NZ0001-1)。

作者简介: 刘聘 (1996—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究。

E-mail: 981405869@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 郑郁善 (1960—), 男, 福建福州人, 教授, 主要从事森林培育研究。

E-mail: zys1960@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210309.1740.005.html>



[**Conclusion**] The site is in good condition and suitable for the growth of Fujian Cypress plantations. The quantitative theory method can be applied to evaluate the site quality of forest land and predict the growth trend of the stands.

Keywords: Fujian Cypress; quantitative theory; site classification; site quality evaluation

立地质量是指在某一立地条件上森林植被的生产潜力^[1]。立地条件是影响林地质量和林木生长的自然与环境因子的综合, 包括土壤、地形、气候以及植被之间的竞争等^[2]。立地质量评价则是对该立地条件下的立地因子进行调查, 分析各因子同植被生长之间的关系, 确定其生产潜力^[3]。立地质量评价是合理造林的基础及有效措施, 正确的评价结果能为当地的造林和适地适树提供科学依据^[4]。

目前对于有林地立地质量的评价方法最常见的是地位指数法^[5-7], 对于无林地的评价主要是通过有林地的立地因子来间接评估其生产潜力^[8]。张伏全等^[9]应用数量化理论模型评价了滇西南地区龙竹立地质量; 陈昌雄等^[10]使用数量化的方法, 利用树高与林地立地因子建立回归模型, 编制了南平市延平区天然常绿阔叶林的地位指数表。近年来随着遥感技术的发展, 许多学者可以通过土壤图^[11]、DEM^[12]与遥感数据^[13]的获取来进行立地质量评价。巩垠熙等^[14]利用遥感数据结合 BP 神经网络模型, 进行了落叶松立地质量评价; 张晓丽等^[15]通过遥感数据用 3S 技术对北京地区进行了森林立地分类及质量评价; 丰绪霞等^[16]利用遥感数据, 用 GIS 技术对帽儿山林场进行森林立地分类及质量评价。目前对于福建柏林分的立地质量评价研究较少, 且大多数研究是通过编制立地指数表进行的有林地立地质量评价, 对于无林地的立地质量评价方面的研究十分缺乏。

为进一步加强福建柏人工林的科学造林和合理经营管理, 本研究利用数量化理论 I 方法建立林分优势木平均高与立地因子之间的多元回归方程, 根据筛选出的主导因子划分立地类型, 并构建数量化预测方程对福建安溪福建柏人工林的立地质量进行评价, 以期为提高土地利用率和森林生产潜力提供技术支撑, 为实现有无林地的统一评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安溪县位于福建省东南部的泉州市, 地处 E117°36'~118°17', N24°50'~25°26' 之间, 地势自西北向东南倾斜, 西北部山峦起伏, 坡度大, 平均海拔在 700 m 以上; 东南部地势平缓, 平均海拔在 500 m 以下。安溪县属南、中亚热带海洋性季风气候, 由于地貌差异造成内外安溪气候明显不同。东部外安溪属亚热带, 年平均温度 19~21 ℃, 年降雨量 1 600 mm, 夏季长而炎热, 冬季短而无严寒; 西部内安溪属中亚热带, 年平均温度在 16~18 ℃, 年降雨量 1 800 mm, 全年四季分明, 夏季不酷热, 秋季冷得较早, 春季来得稍迟。

土壤类型主要是红壤、黄红壤和黄壤, 植物种类繁多, 人工林树种主要有福建柏 (*Fokienia hodginsii*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*) 和木荷 (*Schima superba*) 等。安溪县福建柏多见人工林, 主要分布于海拔 400~800 m 之间, 在丰田、半林和竹园等国有林场分布面积较大。

1.2 样地数据来源

采用安溪县林业局 2017—2018 年二类调查数据材料, 小班调查因子主要包括林分起源、造林年度、郁闭度、经营密度、小班面积、海拔、坡向、坡位、坡度和土层厚度等。从中筛选出优势树种为福建柏的人工纯林、林龄为 6~45 年的小班共 75 块。

1.3 立地因子分级

立地因子的选定必须对优势木树高影响较大, 能精准预测福建柏林分生产力, 因此选取 6 个与优势木树高生长密切相关的因子为坡向、坡位、坡度、海拔、土层厚度和腐殖质层厚度。其中坡向和坡位为定性指标, 将其定量化处理后分级赋值; 坡度、海拔、土层厚度和腐殖质层厚度等定量指标依据具体值划分, 对所选指标进行归一化处理, 具体见表 1。

表 1 立地因子分级标准

Tab. 1 Classification standard for site factors

立地因子 site factor	类目等级 category level			
	1	2	3	4
坡向 slope direction (X_1)	阴 shady slope (X_{11})	半阴 semi-shady slope (X_{12})	阳 sunny slope (X_{13})	半阳 semi-sunny slope (X_{14})
坡位 slope position (X_2)	上 upper slope (X_{21})	中 middle slope (X_{22})	下 lower slope (X_{23})	
坡度/(°) slope degree (X_3)	<15 (X_{31})	16~25 (X_{32})	26~35 (X_{33})	>35 (X_{34})
海拔/m altitude (X_4)	<400 (X_{41})	400~800 (X_{42})	>800 (X_{43})	
土层厚度/cm soil thickness (X_5)	≤40 (X_{51})	40~80 (X_{52})	>80 (X_{53})	
腐殖质层厚度/cm humus thickness (X_6)	≤10 (X_{61})	10~20 (X_{62})	>20 (X_{63})	

1.4 试验方法

采用数量化理论 I 预测模型 (公式 1):

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \delta_i(j,k)b_{jk} + \varepsilon_i,$$

定义 $\delta_i(j,k) = \begin{cases} 1 & \text{当第} i \text{个标准地中, } j \text{项目的定性数据为} k \text{类目时的反映} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ (1)

式中, i 为标准地号; j 为项目数; k 为各项目的类目数; b_{jk} 是第 j 个项目第 k 个类目的得分值; ε_i 为随机误差; y_i 为第 i 个标准地的优势木平均高。

引入 (0, 1) 化数量化函数, 实现对定性因子

的定量化推断以及定性与定量因子间的对比。代入各样地立地因子得表 2。

利用数量化理论 I, 通过最小二乘法求出 b_{jk} 的值, 得到预测方程 (公式 2)。

表 2 立地因子原始数据反映表

Tab. 2 Raw data of site factors

样地 sample plot No.	优势高/m dominant height	X_1				X_2			X_3			
		X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}
1	13.5	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
2	11.3	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
3	2.5	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
4	12.8	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
5	12.2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
...												
75	13.6	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0

样地 sample plot No.	优势高/m dominant height	X_4			X_5			X_6		
		X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{61}	X_{62}	X_{63}
1	13.5	0	1	0	0	0	1	1	0	0
2	11.3	0	0	1	0	1	0	0	1	0
3	2.5	0	0	1	1	0	0	0	0	1
4	12.8	0	0	1	0	1	0	0	0	1
5	12.2	0	0	1	1	0	0	0	0	1
...										
75	13.6	0	1	0	0	0	1	0	0	1

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 13.5 \\ 11.3 \\ 2.5 \\ 12.8 \\ 12.2 \\ 12.1 \\ \vdots \\ 13.6 \end{bmatrix}$$

(2)

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \delta_i(j,k) \hat{b}_{jk}, \text{ 其中, } \hat{b}_{jk} = (X'X)^{-1}(X'Y)。$$

1.5 数据处理

运用 Excel 2010 进行数据整理与统计, 用 Matlab 2016 中的矩阵运算函数计算得出 b_{jk} , 运用 SPSS 20.0 计算出各因子的复相关系数及偏相关系数, 并进行显著性 t 检验。

2 结果与分析

2.1 数量化理论预测方程

依据数量化理论得出各样地优势木平均高的预测方程 (公式 3)。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 2.211\ 3\delta(1,1) + 1.926\ 9\delta(1,2) + 1.328\ 3\delta(1,3) + \\ & 0.038\ 5\delta(1,4) + 1.545\ 1\delta(2,1) + 1.966\ 6\delta(2,2) + \\ & 1.993\ 3\delta(2,3) + 2.919\ 3\delta(3,1) + 2.144\ 0\delta(3,2) + \\ & 0.288\ 1\delta(3,3) + 0.153\ 6\delta(3,4) + 2.333\ 2\delta(4,1) + \\ & 1.898\ 9\delta(4,2) + 1.272\ 9\delta(4,3) + 0.949\ 1\delta(5,1) + \\ & 1.934\ 6\delta(5,2) + 2.621\ 4\delta(5,3) + 1.419\ 7\delta(6,1) + \\ & 1.529\ 1\delta(6,2) + 2.556\ 2\delta(6,3) \end{aligned} \tag{3}$$

该方程是关于 6 个项目 20 个类目的数量化方程, 示性函数前的系数表示各类目得分值, 具体见表 3。若已知某一样地各因子, 将对应值代入方程即可预测该样地优势木平均高。

由表 3 可知: X_{11} 与 X_{12} 、 X_{13} 的得分明显高于 X_{14} ; X_{21} 与 X_{22} 和 X_{23} 相比得分最低; X_3 中随着坡度的增加得分值相应减少, 且 X_{31} 与 X_{32} 的得分明显高于 X_{33} 与 X_{34} ; X_4 中随着海拔升高得分值依次降低; 对于 X_5 与 X_6 因子, 均是随着厚度的增加, 得分有所提高。在 6 个项目因子中, 通过各类目得分值可确定出立地因子与林木生长的关系, 在阴坡、坡度 $<15^\circ$ 的下坡位、低海拔、土层厚度 $>80\text{ cm}$ 和腐殖质厚度 $>20\text{ cm}$ 等条件下更有利于福建柏的生长, 得出的结果与我们实践应用中的规律相一致。

2.2 数量化预测方程的检验

2.2.1 复相关系数及 t 检验

运用 SPSS 计算得出 $R_{\text{复}}=0.622$, $F=7.168$, $P<0.001$, 福建柏优势木平均高与 6 个立地因子之间存在较高的线性相关性, 说明本文选取的 6 个因子在很大程度上影响福建柏的生长。

2.2.2 偏相关系数及其 t 检验

如表 4 所示: 优势木平均高与坡向、坡度、

表 3 福建柏立地质量得分表

Tab. 3 The score table for site quality of Fujian Cypress

指标 index	项目 item	类目 category	得分值 score
坡向 slope direction	阴 shady slope	X_{11}	2.211 3
	半阴 semi-shady slope	X_{12}	1.926 9
	半阳 sunny slope	X_{13}	1.328 3
	阳 semi-sunny slope	X_{14}	0.038 5
坡位 slope position	上 upper slope	X_{21}	1.545 1
	中 middle slope	X_{22}	1.966 6
	下 lower slope	X_{23}	1.993 3
坡度/ $(^\circ)$ slope degree	≤ 15	X_{31}	2.919 3
	$>15\sim 25$	X_{32}	2.144 0
	$>25\sim 35$	X_{33}	0.288 1
	>35	X_{34}	0.153 6
海拔/m altitude	≤ 400	X_{41}	2.333 2
	400~800	X_{42}	1.898 9
	>800	X_{43}	1.272 9
土层厚度/cm soil thickness	≤ 40	X_{51}	0.949 1
	40~80	X_{52}	1.934 6
	>80	X_{53}	2.621 4
腐殖质层厚度/cm humus thickness	≤ 10	X_{61}	1.419 7
	10~20	X_{62}	1.529 1
	>20	X_{63}	2.556 2

表 4 各因子偏相关系数及显著性检验

Tab. 4 Partial correlation coefficient and significance test

项目 item	偏相关系数 partial correlation coefficient	显著性 significance(sig.)
坡向 slope direction	0.251	0.036
坡位 slope position	0.059	0.629
坡度 slope degree	0.408	<0.001
海拔 altitude	0.185	0.126
土层厚度 soil thickness	0.275	0.021
腐殖质层厚度 humus thickness	0.216	0.073

土层厚度之间显著相关, 与腐殖质层厚度的相关性较小, 与坡位、海拔则不显著。依据偏相关系数大小得出各因子对立地质量的影响程度排序为: 坡度 $>$ 土层厚度 $>$ 坡向 $>$ 腐殖质厚度 $>$ 海拔 $>$ 坡位, 其中坡度、土层厚度和坡向对立地指数的贡献率达 71.42%, 确定其为主导立地因子。

2.3 立地类型划分与立地质量评价

根据立地质量数量化得分表中各立地因子的得分值划分立地质量评价等级, 用各立地因子中最大得分值的代数和减去最小得分值的代数和然

后进行 3 等分, 根据需要把立地质量分为优、良、中、差 4 个等级 (表 5)。

根据偏相关系数的顺序大小, 采用坡度、土壤厚度和坡向 3 种主导因子对福建柏人工林类型进行了分类。分别采用坡度、土层厚度和坡向来划分立地类型区、立地类型组及立地类型, 共划分为 48 个立地类型。所选样地中共划分出 26 个立地类型, 部分立地类型无样地存在 (表 6)。

表 5 数量化立地质量评价表

Tab. 5 Quantifiable evaluation of site quality		
立地质量等级 site quality level	得分值 score	立地质量评价 site quality evaluation
I	11.549 5~14.634 7	优 excellent
II	8.464 2~11.549 5	良 good
III	5.378 9~8.464 2	中 moderate
IV	<5.378 9	差 poor

表 6 立地类型与立地质量等级表

Tab. 6 Site type and site quality scale

立地类型区 site type zone	立地类型组 site type group	坡向 slope direction	立地得分值 site factor score	标准地数 number of plots	评价结果 evaluation result
缓坡 gentle slope	厚土层 thick soil layer	阴坡 shady slope	13.2570	7	优 excellent
		半阴坡 semi-shady slope	12.9726	2	优 excellent
		半阳坡 semi-sunny slope	12.3740	1	优 excellent
	中土层 middle soil layer	阴坡 shady slope	12.5702	3	优 excellent
		半阴坡 semi-shady slope	12.2858	3	优 excellent
		半阳坡 semi-sunny slope	11.6872	1	优 excellent
	薄土层 thin soil layer	阴坡 shady slope	11.5847	3	优 excellent
		半阳坡 semi-sunny slope	10.7017	3	良 good
		阳坡 sunny slope	9.4119	1	良 good
斜坡 abrupt slope	厚土层 thick soil layer	阴坡 shady slope	12.4817	12	优 excellent
		半阴坡 semi-shady slope	12.1973	1	优 excellent
		半阳坡 semi-sunny slope	11.5987	3	优 excellent
		阳坡 sunny slope	10.3089	1	良 good
	中土层 middle soil layer	阴坡 shady slope	11.7949	1	优 excellent
		半阴坡 semi-shady slope	11.5105	2	良 good
		半阳坡 semi-sunny slope	10.9119	1	良 good
	薄土层 thin soil layer	阴坡 shady slope	10.8094	4	良 good
		半阴坡 semi-shady slope	10.5250	1	良 good
半阳坡 semi-sunny slope		9.9264	6	良 good	
阳坡 sunny slope		8.6366	2	良 good	
陡坡 steep slope	薄土层 thin soil layer	半阳坡 semi-sunny slope	8.0705	1	中 moderate
急坡 acute slope	厚土层 thick soil layer	阴坡 shady slope	10.4913	1	良 good
	中土层 middle soil layer	半阴坡 semi-shady slope	9.5201	1	良 good
		阴坡 shady slope	8.8190	1	良 good
	薄土层 thin soil layer	半阳坡 semi-sunny slope	7.9360	5	中 moderate
		阳坡 sunny slope	6.6462	1	中 moderate

由表 6 可以看出: 福建安溪地区整体立地质量等级在中及以上, 其中立地质量优、良的样地占 85% 以上, 说明该地立地条件良好, 适宜福建柏人工林生长。

3 讨论

目前有关立地质量数量化评价方法应用最广泛的是数量化理论 I 模型^[17], 其主要原理是建立

林木优势平均高与立地因子的回归方程, 从而预测林分生长。本研究中, 选取海拔、坡度、坡向、坡位、土层厚度和腐殖质层厚度 6 个立地因子, 运用数量化理论 I, 根据各因子得分值, 得出因子影响程度排序为: 坡度>土层厚度>坡向>腐殖质厚度>海拔>坡位, 因此选择坡度、土壤厚度和坡向为主导因子。由于安溪地区福建柏在坡度分布上具有一定的规律性, 坡度对于降水的分

配作用直接影响土壤入渗水分, 因此将坡度作为影响福建柏生长的主导因子之一; 林木生长所需要的土壤养分受土壤厚度直接影响, 因此土层厚度也成为主导因子之一; 不同坡向会导致不同日照时间和太阳辐射强度, 进而影响到土壤的水热状况, 因此坡向也成为其中一个主导因子。而坡位、海拔的不显著主要是因为福建柏林分分布的无规律性。庄晨辉等^[18]研究得出地势、地形、坡位、土层厚度和腐殖质层厚度为影响福建柏林分生长的主要立地因子; 易长权等^[19]得出了影响湖北省公安县杨树人工林生长的主导因子为土壤质地、地下水位、排水状况和夹层; 于玉芳等^[20]得出影响昌宁县华山松的主导因子是坡形、土层厚度和海拔。这些结果与本研究有所差异, 可能是由于不同地区的地貌、环境差异以及不同的林分经营密度与模式造成的, 采用坡度、土层厚度和坡向 3 个主导因子将安溪地区划分为 48 个立地类型和该结论与郭艳荣等^[21]和李艳洁等^[22]研究结果相似。

本研究未考虑气候和水文等因素的影响, 在今后的研究中可探讨多因素的交互作用, 在运用立地因子对立地质量进行评价时, 应先采用主成分分析及聚类分析筛选出对林分生长影响较大的立地因子, 运用多元统计法、遥感影像结合 BP 网络模型等多种不同方法, 并结合地位指数表, 进一步提高评价结果的预测精度, 以期对森林立地质量进行更精准的评价, 为福建省适地适树提供理论依据。

4 结论

根据数量化模型得出福建柏优势木平均高的预测方程, 模型经检验符合要求, 可以利用这一模型较好地评价福建柏立地质量, 对于评价林地生产力提供了一种可行方法, 为安溪地区合理造林提供了理论依据。通过各个立地因子得分值的计算, 把 48 个立地类型划分为优、良、中、差 4 个等级, 得分在 11.549 5~14.634 7 的为优, 得分在 8.464 2~11.549 5 之间的为良, 得分在 5.378 9~8.464 2 之间的为中, 得分值小于 5.378 9 的为差。由于部分样地不存在, 根据实际情况共得出 26 个立地类型, 所有样地的立地质量等级均在中等及以上。在实际应用中, 首先调查某林地的立地因子, 再由立地质量得分表查出相应立地因子

得分值, 可确定立地等级, 最后代入数量化理论预测方程即可得出优势木平均高。

[参考文献]

- [1] 郭艳荣, 吴保国, 刘洋, 等. 立地质量评价研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(5): 47. DOI: [10.13348/j.cnki.sjlyyj.2012.05.013](https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2012.05.013).
- [2] LOUW J H, SCHOLLES M. Forest site classification and evaluation: a South African perspective[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 171(1): 153. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00469-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00469-3).
- [3] LEWIS N B, FERGUSON I S, SUTTON W R J, et al. Management of radiata pine[M]. Butterworth: Inkata Press Pty Ltd., 1993.
- [4] 段卫明, 汪昌树, 李朝栋, 等. 永新县用材林基地立地质量评价及二元立木材积动态模型的研究(总报告)[J]. 江西林业科技, 1994(2): 2. DOI: [10.16259/j.cnki.36-1342/s.1994.02.002](https://doi.org/10.16259/j.cnki.36-1342/s.1994.02.002).
- [5] GREEN R N, MARSHALL P L, KLINKA K. Estimating site index of Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] from ecological variables in southwestern British Columbia[J]. Forest Science, 1989, 35(1): 50. DOI: [10.1093/forestscience/35.1.50](https://doi.org/10.1093/forestscience/35.1.50).
- [6] CURT T, BOUCHARD M, AGRECH G. Predicting site index of Douglas-fir plantations from ecological variables in the Massif Central area of France[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 147(1/2/3): 61. DOI: [10.1016/S0378-1127\(00\)00545-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00545-4).
- [7] SKOVSGARRD J P, VANCLAY J K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands[J]. Forestry, 2008, 81(1): 13. DOI: [10.1093/forestry/cpm041](https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041).
- [8] 迟健, 李桂英, 陈家明, 等. 浙江省马尾松人工林立地质量的数量化研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(3): 303. DOI: [10.13275/j.cnki.lykxyj.1995.03.012](https://doi.org/10.13275/j.cnki.lykxyj.1995.03.012).
- [9] 张伏全, 陈远材. 滇西南地区龙竹立地质量评价的研究[J]. 林业科学, 1994, 30(2): 104.
- [10] 陈昌雄, 曹祖宁, 魏铨敢, 等. 天然常绿阔叶林数量化地位指数表的编制[J]. 林业勘察设计, 2009(2): 1. DOI: [10.3969/j.issn.1004-2180.2009.02.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-2180.2009.02.001).
- [11] MCKENNEY D W, PEDLAR J H. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 175(1/2/3): 497. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00186-X).
- [12] MONSERUD R A, HUANG S. Mapping lodgepole pine site index in Alberta[M]. Cambridge: CABI Publishing, 2003.
- [13] SWENSON J H, WARING R H, FAN W, et al. Predicting site index with a physiologically based growth model across Oregon, USA[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(7): 1697. DOI: [10.1139/x05-089](https://doi.org/10.1139/x05-089).

(下转第 358 页)