

森林立地生产力评价指标与方法

朱光玉^{1,2,3},康 立¹

(1. 中南林业科技大学 林学院,湖南 长沙 410004;2. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所,北京 100091;
3. 中国林业科学研究院 资源信息研究所,北京 100091)

摘要:对国内外森林立地生产力评价指标和方法的现状、问题及发展趋势进行了综述。森林立地生产力评价指标可归纳为4类:林分高、林分的蓄积或者断面积生长量、林分特征和立地属性,基于4类评价指标产生了多种评价方法,不同方法各有利弊,其中,以立地指数评价最为常用。最后讨论了立地生长潜力评价方法、天然混交林立地生长潜力评价、区域性立地生长潜力评价研究及空间制图技术研究的发展。

关键词:森林;立地生产力;立地生产潜力;评价指标与方法

中图分类号:S758.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)06-0275-07

A Review of Forest Site Productivity Evaluation Indicators and Methods

ZHU Guang-yu^{1,2,3}, KANG Li³

(1. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;
2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
3. Research Institute of Forestry Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In this study, the current situations, existing problems and development trends of the evaluation indexes and methods for forest site productivity both at home and abroad were reviewed. Forest site productivity evaluation index can be classified into four categories, including stand height, stand volume or basal area growth, stand characteristics and site attributes. On the basis of the above four evaluation indexes, a variety of evaluation methods are generated, and each method has its advantages and disadvantages, of which the method of site index evaluation is the most popular one. Finally, the evaluation method for site growth potential, site growth potential evaluation of natural mixed forest, the study of regional site growth potential evaluation and space mapping technique are all discussed.

Key words: forest; site productivity; site potential productivity; evaluation indicator and method

立地质量(site quality)是指某一立地上既定森林或其他植被类型的生产潜力(potential productivity),是随树种(森林类型)不同而变化的;森林立地生产力(site productivity)指立地生产植物生物量潜力的量化估计指标,包括立地潜力(site potential)和现实生产力(对于一个既定林分所能实现的部分立地潜力)。可见,立地质量与立地生产力在使用时,是相互兼容的,但并不是等同的^[1-5]。目前,关于

立地评价的研究主要集中于现实生产力,而对于立地质量(生产潜力)的研究甚少,也是现有评价方法和结果难以直接用于林分生长收获的原因^[1-4]。评价森林立地生产力的指标和方法有多种,常用的指标可以归纳为:1)林分高,2)林分的蓄积或者断面积生长量,3)林分特征评价,4)立地属性。至今,森林立地生产力评价研究成熟的方法和结果主要集中于简单林分(如纯林),而对于复杂林分(尤其是天然混

交林)仍处于探索阶段,其混交格局规律、年龄问题表达是研究中的难点。关于立地的评价,立地质量是营林和研究者关注的话题:对于一块地,其生产潜力多少,现实生产力是多少,适宜于种植什么树种,是需要回答的问题。本研究论述了森林立地生产力评价的指标和方法类型与发展趋势。

1 森林立地生产力评价指标

立地质量和立地生产力评价目的是为森林经营管理者提供选择产量最高,价值最大的树种。关于立地评价分类的方法有多种,较早的是将纯林的立地生产潜力进行了论述:1)立地分级采用树高;2)艾希霍恩的规则(Eichhorn's rule),3)间伐响应假设(the thinning response hypothesis),4)阿斯曼理论(Asmann's yield level theory)^[2]。后来对热带雨林的立地生产力评价指标进行了分类:1)林分表现(stand appearance),2)自然断面积(natural basal area),3)林分高(stand height),4)高-胸径关系(height-diameter relationship),5)蓄积产量(volume production),6)生长指数(growth index),7)立地属性(site properties),8)植被特征(vegetative characteristics)^[1]。各种分类方法均是基于测树因子指标、立地因子指标或者综合指标。据此,将评价指标归纳为林分高、林分的蓄积或者断面积生长量、林分特征和立地属性4类较为适宜。

1.1 林分高

最初提出将林分高作为立地生产力的评价指标是基于林分平均高随年龄的变化与林分蓄积量随年龄的变化关系是类似的假设。立论的有效性是基于当时的实际情况:在那时候,森林很少受到间伐,间伐的也仅是枯死木和被压木。尽管如此,其关键问题是林分高生长和蓄积量的生长要紧密相关。

1.1.1 林分平均高 19世纪末,既定年龄下的林分平均高(stand mean height)是一种可以用于衡量、测定、计量(measure)立地生产力的指标。采用此方法评价阿拉斯加云杉(*Picea asperata*)的立地生产力。将50 a的林分平均高划分为4级:1、2、3级和4级,分别对应树高28、24、20 m和16 m。此法称为立地级法,最初通过描述立地因子的属性(如低海拔-粘壤土)来划分立地等级^[2]。

广义而言,使用林分高作为生产力指标,通常在同龄纯林中最粗树的高生长基本不受林分密度(stem number)的影响的前提。这就要求范围广的初始空间和间伐强度/等级,通常在许多的物种的森林实践中采用^[2,6-8]。但是,高和林分密度是由空间或间伐决定的,在正常的林分密度下,同样的林分密

度,林分高会受到影响,包括立地条件、年龄和树种的耐荫性(shade tolerance of the species)^[9-15]。该方法的缺点是林分的平均高容易受到干扰,已逐渐被立地指数取代。

1.1.2 优势木高 由于林分优势木高度受林分密度影响较少,是目前立地质量评价采用最广泛的指标。当前利用优势高来评价立地质量的方法有2种,利用林分的优势木高和年龄的关系(立地指数法)与利用林分的优势木高和胸径的关系。

立地指数的概念最早产生于18世纪^[16],被作为评价立地生产潜力的指标。利用林分中的平均优势木高和年龄的关系以基准年龄时的优势木高作为衡量立地生产潜力的指标。R. Calamaa^[17]等考虑了区域对立地指数曲线的影响,建立了西班牙石松(*Lycopodium japonicum*)纯林立地指数曲线。B. O. Andrés^[18]等在建立优势高曲线时考虑了气候因子,结果表明,气候对模型有显著性影响,提高了模型的精度。T. Johansson^[19]对瑞典的27块白杨(*Populus adenopoda*)林树干解析木数据进行了分析,建立优势木高曲线模型的时候考虑了3种土壤类型对模型的影响,结果表明,土壤类型对该地区的优势木高-年龄曲线模型无显著影响。20世纪80年代末和90年代初研究了多型立地指数曲线^[20-21]。马炜^[22]等采用相对优势木高法编制了兴安落叶松(*Larix gmelinii*)人工林的立地指数表,并采用数式法编制了胸径地位级表。

有些树种的生长习性相近,其立地质量之间存在紧密的相关性。国内主要研究对象为杉木和马尾松,国外应用的树种组对象较多。早期,R. W. Foster^[23]对白皮松(*Pinus bungeana*)和鸡爪槭(*Acer palmatum*)的立地指数的相关关系进行了模拟,发现两者存在线性关系。G. D. Nigh^[24]对混交林中的优势树种进行了立地指数转化研究。T. JOHANSSON^[25]等对瑞典的5种阔叶树的立地指数相关关系进行了模拟。骆其邦^[26]和朱光玉^[27]等对南方的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Pinus massoniana*)立地指数转换关系进行了研究。立地指数转换模型均取得了较好的效果。

由于树木的树高与胸径存在密切的关系,而树木年龄不易获取,可以利用它们之间的关系,选取基准胸径时的优势木高作为立地评价指标(site form)。S. Huang^[28]等采用差分方程研究了混交林优势高和胸径的相关关系模型。P. Adame^[29]等以西班牙950块国家森林资源清查样地数据为基础,建立了基于混合效应的非线性树高-胸径模型,提高了模型的精度。孟宪宇^[30]等采用此指标评价了兴

安落叶松(*Larix gmelini*)立地质量。陈永富^[31]等分析了海南岛热带天然山地雨林3个群系的树高和胸径之间的相关关系,并编制了相应的立地评价数表。

1.1.3 树高生长截距 定期的高生长被作为森林立地生产力的可选指标^[32-36]。后被称为高生长截距法(height growthintercept method),如胸高后5 a内树高生长量作为评价指标,对于幼龄林,高生长截距法是一种值得信赖的方法。在林分年龄未知的情况下,林分蓄积生长目前的潜力并不能很好的反映在林分高之中(例如高生长受到了阻碍:霜冻和放牧)。当林分幼龄林受到霜冻和放牧的影响时,立地指标估计通常基于年龄和高,并在某种确定的水平上,如1.3 m处以上固定年龄的树高,此法多用于幼龄针叶纯林。

采用高和高生长作为立地生产力指标,其前提是林分高或高生长与蓄积生长紧密相关。此外,高易于测量、测量费用不贵、受经营管理影响较小。采用林分高的立地分级,要求种植同质的规则林分:良好的经营记录、同龄林纯林、已知年龄和较好的保留木蓄积。然而,也有用于复杂或异质的林分类型^[1]。

1.1.4 建模方法 建立树高-年龄或树高-胸径方程时,除采用常规的回归分析方法外,还有基于哑变量或者混合效应的回归分析方法^[20,29,37],在树种立地指数转换时,考虑了自变量和因变量均含误差的度量误差模型^[27]。

1.2 林分蓄积/断面积生长量

F. Eichhorn^[38]于1902年,最先提出用既定的树种和林分高的蓄积产量作为标识不同的立地分类等级,即艾希霍恩规则(Eichhorn's rule)。在低间伐强度的欧洲银杉林中,最先发现其蓄积与林分高(不论年龄和胸高断面积)存在函数关系。随后被在其它3个树种中也得到了证实^[39],并被扩展用于全林分蓄积量或毛蓄积收获量^[40]。扩展的艾希霍恩的规则被广泛用于构建林分收获表和生长模型^[41-45]。扩展的规则假设,任意两林分只要具有相同的高生长和初高则其蓄积生长相同。意味着林分蓄积量的生长可通过高生长估计,给定可用的通用模型和标准林分(reference stand),其林分物种相同。

1923年美国林协曾确认材积生长量是立地质量的主要量度方法,并建议为生长良好的天然林制订收获表。J. C. Sammi^[46]呼吁用林分蓄积生长量来评价立地质量。20世纪70年代,材积作为评价指标重新引起重视。瑞典著名立地评价专家B. H gglund^[47]提出用立地特性直接表达蓄积生长量的

函数。M. Kimberley^[48]等提出以30 a时300株·hm⁻²的蓄积生长量作为评价立地质量高低的指标,后来又提出以40 a时500株·hm⁻²的蓄积生长量作为评价立地质量高低的指标,均获得较好的效果。J. K. Vanclay^[49]提出林分基准胸高断面积(20 m²·hm⁻²)时胸高断面积生长量作为评价立地生产潜力的指标。此方法对于慢生长耐阴树种估计偏低,而对于先锋和喜光树种估计偏高。J. K. Vanclay^[50]提出了一种胸径生长指数GI,可以不考虑年龄和树高,并避免了Andel提出的BAI指数(胸径生长量)遇到的树种组成问题。J. P. Berrill^[51]等对加拿大北部沿海234块固定红木样地,提出了一种新的胸径生长指数(BAI)用以评价不规则林分的立地生产力,发现该指数与蓄积生长量的关系比立地指数与蓄积生长量的关系更加密切。根据南岭山地湖南、广东等省5个林场的25块杉木人工林标准地解析木资料,建立了以地位指数和年龄为解释变量的多形标准蓄积量收获模型,用以评价林地立地质量^[52]。在建模方法上和评价思路上,与国外相比,国内相对单一。但是均没有涉及到特定立地条件下林分蓄积或断面积生长潜力的研究。

1.3 指示植物

在人为干扰少,原始林分布面积广的国家,常应用指示植物来评价立地质量^[53-56]。指示植物可选用乔木、灌木、草木和苔藓。下层植被生态适应性比乔木窄,尤其在北方森林中的云杉、冷杉和落叶松林中能较好指示立地环境和质量。林下植被类型和指示种均可作为杉木人工林立地分类及评价的依据之一,但其应用有局限性^[57]。

1.4 立地因子属性

利用环境因子与林木生长之间的关系,采用多元回归、主分量分析等方法,以立地指数或蓄积等生长量为因变量,环境因子为自变量建立数量化地位指数模型,用以评价立地质量^[58]。立地因子主要包括气候、地形和土壤3方面。白皮松的立地指数和蓄积定期生长量与地形地貌及土壤(化学和物理)变量有强相关性;而地形地貌和土壤对立地指数和蓄积定期生长量无显著性影响^[57]。对3个树种(white oak、red oak 和 yellow poplar)16个土壤理化性质与立地指数的相关关系分析、多元回归分析方法建立了立地指数预测模型^[58]。以松树和杉木林数据为基础,分析了土壤有机C储量和pH等性质与立地生长潜力指标之间的相关关系构建了立地生产潜力预估模型^[59]。以湖北省秃杉(*Taiwania flousiana*)人工林调查的样地资料,建立了秃杉数量化地位指数模型,且发现秃杉的生长与土壤有机

质含量和土层厚度呈正相关、与土壤容重呈负相关，并受土壤容重的影响较大^[60]。立地因子于立地评价指标的关系非常复杂。可见，对于不同树种，影响立地评价指标的主导立地因子会有差异。

2 立地评价方法分析

立地指数评价是当前应用最广泛的一种评价方法，已成功用于人工纯林的研究中，并进一步用于生长收获实践经营活动中^[61]，然而，用于天然林的时候，受到了质疑，但是仍然有尝试用于异龄纯林^[62]和混交林^[63]的研究，树种间地位指数（立地指数）转换评价立地质量，有助于在采伐现有树种林分时，想获知未来树种林分的生产潜力。

以优势木高与胸径的关系评价立地质量，避开了年龄，有些学者认为这种方法在天然林的评价中能取得较好的效果。但是，仍存在疑问，当基准胸径确定时，具有相同优势高的林分，按照此评价方法，它们的立地质量是相同的，却忽略了林分生长时间的差异，导致不同生长年龄的林分可能具有相同的立地质量评价结果^[64]。

采用林分的平均高和林分的年龄关系评价立地质量，由于林分的平均高容易受到人为和自然的干扰，因此，其评价效果尚不及立地指数^[5]。

树高生长截距法适宜于幼龄林的立地生产力评价，应用时要求易于获取确定年龄间的高生长。此法多用于针叶树^[33-36]，针叶树枝条的轮生性质有助于判断，年龄间距，对于阔叶树有待于进一步研究。

利用林分的蓄积量评价立地质量是一种理想的方法，然而，影响林分蓄积量的因子太多，模型的构建与求解相对复杂。现有的方法主要评价立地生产力，直接用于林分生长收获实践仍存在一些问题需要进一步探索^[1]。因为对于一块立地，知道了具体适生树种的生产潜力，可以做到更加精确的适地适树，对于立地的最大生产力即生产潜力有待于进一步探讨。

指示植物法评价立地质量，适宜于地貌、地势变化不大的林区，其野外调查数据不易获取，对调查人员专业素质要求比较高^[53,55]。

利用立地因子评价立地质量，可以较好的解决有林地和无林地统一评价的问题，然而，评价指数和立地因子间是否存在紧密的关系仍有争议^[59]，对于树种、地形复杂的林分不一定适用^[57]。

3 结论与讨论

3.1 立地生长潜力评价方法研究

立地评价包括立地生产力的评价和立地生产潜

力（立地质量）的评价。现有的立地评价研究主要集中于立地生产力的研究，对于生产潜力的研究甚少^[1-4]，这在一定程度上制约了其应用，评价立地对于既定立地条件和给定林分需要回答一些问题：生产潜力是多少，立地生产力（现实生产力）是多少，最后为帮助森林经营提高现实生产力做决策，从而实现适地适树、合理科学经营。

3.2 天然混交林立地生长潜力评价研究

在森林生态可持续经营的理念下，天然林的面积越来越大。开展天然林的科学经营管理其前提是解决天然林的立地评价问题，由于多树种混交和年龄难以获得，当前虽有部分评价理论研究，如利用树高与胸径的关系指标立地型、立地指数等^[64-66]，但均未较好的指示天然林的立地生产潜力或者生产力。

3.3 区域性立地生长潜力评价研究

立地研究的成果不仅要应用于经营单位的生产实践，还需考虑市局级、省级、国家林业管理水平上的经营决策。为此，需要开展区域水平上的立地评价研究。开展区域水平上的研究时需考虑几个问题：1) 长期固定样地的连续观测数据获取，由于调查数据的广泛性和大量性，需要国家级的观测样地数据支持，如国家一类清查样地。一类样地是点上数据，要推广到面还需要考虑使用面上数据，如二类清查数据。2) 立地评价总体和单元的研究。区域性水平的立地研究，其总体即森林类型甚至林分类型的划分需要考虑，现有的林分类型划分结果难以满足立地评价的需求；评价单元，立地因子的组合—立地类型的划分有待于深入研究。

3.4 空间制图与在线查询与决策技术研究

随着森林可持续经营的发展，对于连续性立地和同质性森林，立地-生长模型的评价结果用图来表达是一种需求。制图技术有传统的空间地理信息处理技术^[67-68]，最近出现了基于激光雷达数据的立地制图技术^[69-70]。图形图像的表达直观、易于管理层做决策。立地制图单位需要考虑：区域、森林、经营单位或者亚经营单位。根据建立的立地质量评价模型，结合二类调查小班数据，可以通过在线决策系统查询任一小班的立地质量和适宜树种。

参考文献：

- [1] VANCLAY J K. Assessing site productivity in tropical moist forests: a review[J]. Forest Ecology and Management, 1992, 54(1): 257-287.
- [2] SKOVSGAARD 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): 13-31.

- [3] SKOVSGAARD J P, VANCLAY J K. Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions[J]. *Forestry*, 2013, 86(3): 305-315.
- [4] BONTEMPS J D, BOURIAUD O. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives[J]. *Forestry*, 2014, 87(1): 109-128.
- [5] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社, 2006.
- [6] SJOLTE-JØRGENSEN J. The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations [J]. *Int. Rev. For. Res.*, 1967, 2, 43-94.
- [7] BREDENKAMP B. The CCT concept in spacing research, a review[C]. Pretoria, South Africa: Symposium on Site and Productivity of Fast Growing Plantations, 1984; 313-332.
- [8] LANNER R M. On the insensitivity of height growth to spacing[J]. *For. Ecol. Manage.*, 1985, 13(3/4): 143-148.
- [9] BRYNDUM H. Buchendurchforstungsversuche in Dänemark [J]. *Allg. Forst. Jagdztg*, 1987, 158(7/8): 115-125.
- [10] JOHANNSEN V K. A growth model for oak in Denmark [D]. Copenhagen: Royal Veterinary and Agricultural University, 1999.
- [11] MACFARLANE D W, GREEN E J, BURKHART H E. Population density influences assessment and application of site index[J]. *Can. J. For. Res.*, 2000, 30(9): 1472-1475.
- [12] KERR G. Effects of spacing on the early growth of planted *Fraxinus excelsior* L. [J]. *Can. J. For. Res.*, 2003, 33(7): 1196-1207.
- [13] 周春国, 徐雁南. 地位级表编制的新方法[J]. 华东森林经理, 1997, 11(2): 11-13.
- [14] 林昌庚, 周春国, 林俊钦, 等, 余松柏关于地位级表[J]. 林业资源管理, 1997(5): 30-33.
- [15] 刘建军, 薛智德. 森林立地分类及质量评价[J]. 西北林学院学报, 1994, 9(3): 79-84.
- LIU J J, XUE D Z. Forest site classification and evaluation [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1994, 9(3): 79-84. (in Chinese)
- [16] PERTHUIS DE LAILLEVAULT R D. *Traité de l'ame nagement et de la restauration des bois et forêts de la France* [M]. Madame Huzard, 1803: 384.
- [17] CALAMAA R, CAÑADASB N, MONTEROA G. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine(*Pinus pinea* L.) in Spain[J]. *Ann. For. Sci.*, 2003, 60: 259-269.
- [18] ANDRÉS B O, TOMÉ M, BRAVO F, et al. Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(9): 2348-2358.
- [19] JOHANSSON T. A site dependent top height growth model for hybrid aspen[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4): 691-698.
- [20] 李希菲, 洪玲霞. 用哑变量法求算立地指数曲线族的研究[J]. 林业科学研究, 1997, 10(2): 215-219.
- LI X F, HONG L X. Research on the use of dummy variables method to calculate the family of site index curves[J]. *Forest Research*, 1997, 10(2): 215-219. (in Chinese)
- [21] 段爱国, 张建国. 杉木人工林优势高生长模拟及多形地位指数方程[J]. *林业科学*, 2004, 40(6): 13-19.
- DUAN A G, ZHANG J G. Modeling of dominant height growth and building of polymorphic site index equations of Chinese fir plantation [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(6): 13-19. (in Chinese)
- [22] 马炜, 孙玉军. 长白落叶松人工林立地指数表和胸径地位级表的编制[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(12): 21-25.
- MA W, SUN Y J. Compilation of site index table and site class table for *Larix olgensis* plantations [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(12): 21-25. (in Chinese)
- [23] FOSTER R W. Relation between site indices of eastern white pine and red maple[J]. *Forest Science*, 1959, 5: 279-281.
- [24] NIGH G D. Site index conversion equations for mixed trembling aspen and white spruce stands in northern British Columbia[J]. *Silva Fennica*, 2002, 36: 789-797.
- [25] JOHANSSON T. Site index conversion equations for *Picea abies* and five broadleaved species in Sweden: *Alnus glutinosa*, *Alnus incana*, *Betula pendula*, *Betula pubescens* and *Populus tremula* [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2006, 21: 14-19.
- [26] 骆其邦. 南嶺山地森林立地分类、评价研究[M]. 长沙:林业部中南林业调查规划设计院, 1990.
- [27] 朱光玉, 吕勇, 林辉, 等. 三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5862-5867.
- ZHU G Y, LU Y, LIN H, et al. Comparison of the three linear models applied for studying of the correlation of site-indexes between *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* stands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5862-5867. (in Chinese)
- [28] HUANG S, TITUS, S. J. An index of site productivity for uneven-aged or mixed-species stands[J]. *Can. J. For. Res.*, 1993, 23(3): 558-562.
- [29] ADAME P, MIRENDEL R, CAÑELLAS I. A mixed non-linear height-diameter model for Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(1): 88-98.
- [30] 孟宪宇, 张弘. 天然异龄兴安落叶松林地位质量评估方法的研究[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(2): 46-53.
- MENG X Y, ZHANG H. Study on method for estimating site quality of uneven-aged natural *Larix gmelini* Stands [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1993, 15(2): 46-53. (in Chinese)
- [31] 陈永富, 杨秀森. 海南岛热带天然山地雨林立地质量评价研究[J]. *林业科学研究*, 2000, 13(2): 134-140.
- CHEN Y F, YANG X S. A study on site quality evaluation of natural tropical mountainous rain forest in Hainan Island [J]. *Forest Research*, 2000, 13(2): 134-140. (in Chinese)
- [32] BULL H. The use of polymorphic curves in determining site quality in young red pine plantations[J]. *J. Agric. Res.*, 1931, 43: 1-29.
- [33] BROWN J H, STIRES J L. Notes: a modified growth intercept method for predicting site index in young white pine stands[J]. *Forest Science*, 1981, 27(1): 162-166.

- [34] ECONOMOU A. Growth intercept as an indicator of site quality for planted and natural stands of *Pinus nigra* var. *pallasiana* in Greece[J]. Forest Ecology and Management, 1990, 32(2): 103-115.
- [35] MAILLY D, GAUDREAULT M. Growth intercept models for black spruce, jack pine and balsam fir in Quebec[J]. The Forestry Chronicle, 2005, 81(1): 104-113.
- [36] GUO J, WANG J R. Comparison of height growth and growth intercept models of jack pine plantations and natural stands in northern Ontario[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(9): 2179-2188.
- [37] UZOH F C C, OLIVER W W. Individual tree height increment model for managed even-aged stands of ponderosa pine throughout the western United States using linear mixed effects models[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 221(1): 147-154.
- [38] EICHHORN F. Beziehungen zwischen bestandshöhe und bestandsmasse[J]. Allg. Forst. Jagdztg., 1904, 80: 45-49.
- [39] GEHRHARDT E. Ueber bestandes-wachstumsgesetze und ihre anwendung zur aufstellung von ertragstafeln[J]. Allg. Forst. Jagdztg., 1909, 85: 117-128.
- [40] GEHRHARDT E. Eine neue Kiefern-Ertragstafel[J]. Allg. Forst. Jagdztg., 1921, 97: 145-156.
- [41] MITCHELL K J. Dynamics and simulated yield of Douglas-fir [J]. For. Sci. Monogr., 1975, 17: 1-39.
- [42] ALDER D. Forest volume estimation and yield prediction, vol. 2: yield prediction[M]. Rome: UN Food and Agriculture Organization, 1980.
- [43] HOLTEN-ANDERSEN P. Danish yield tables in the past century [M]. Forstlige Forsoegsvaesen in Danmark(Denmark), 1989.
- [44] PHILIP M S. Measuring trees and forests[M], 2nd. Wallingford: CAB International, 1994: 310.
- [45] PETERSON E B, PETERSON N M, WEETMAN G F, et al. Ecology and management of sitka spruce[J]. Vancouver: UBC Press, 1997.
- [46] SAMMI J C. An appeal for a better index of site[J]. J. For., 1965, 63(3): 174-176.
- [47] HäGGLUND B. Evaluation of forest site productivity[J]. Forestry Abstracts, 1981, 42(11): 515-527.
- [48] KIMBERLEY M, WEST G, DEAN M, et al. The 300 Index-a volume productivity index for radiata pine[J]. Nz Journal of Forestry. 2005, 50: 13-18.
- [49] VANCLAY J K. Assessing site productivity in tropical moist forests: a review[J]. Forest Ecology & Management, 1992, 54: 257-287.
- [50] VANCLAY J K. Site productivity assessment in rainforests: an objective approach using indicator species[C]// MOHD W R, CHAN H T, APPANAH S. Proceedings of the seminar on growth and yield in tropical mixed/moist forests, Kuala Lumpur, Malaysia: Forest Research Institute, 1989: 225-241.
- [51] BERRILL J P, OHARA K L. Estimating site productivity in irregular stand structures by indexing the basal area or volume increment of the dominant species[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2014, 44(1): 92-100.
- [52] 骆期邦, 吴志德, 蒋菊生, 等. 用于立地质量评价的杉木标准蓄积量收获模型[J]. 林业科学研究, 1989, 2(5): 447-453.
- [53] LUO Q B, WU Z D, JIANG J S. A standard volume yielding model of Chinese fir used for site quality evaluation [J]. Forest Research, 1989, 2(5): 447-453. (in Chinese)
- [54] WIANT H V, RAMIREZ M A, BARNARD J E. Predicting oak site index by species composition in west Virginia[J]. Journal of Forestry, 1975, 73(10): 666-667.
- [55] SMALLEY G W. Classification and evaluation of forest sites on the southern Cumberland Plateau[R]. New Orleans, LA: USDA For. Serv., 1986.
- [56] ZAS R, ALONSO M. Understory vegetation as indicators of soil characteristics in northwest Spain[J]. Forest Ecology & Management, 2002, 171(11): 101-111.
- [57] ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P, BARRIO-ANTA M, CÁMARA-OBREGÓN A, et al. Ground vegetation as an indicator of site quality: effect of non-site factors on the productivity of newly established chestnut plantations in northwestern Spain[J]. Journal of Forest Research, 2013, 18(5): 407-417.
- [58] 姚茂, 盛炜形, 熊有强. 杉木人工林林下植被对立地的指示意义[J]. 林业科学, 1992, 28(3): 209-212.
- [59] YAO M, SHENG W T, XIONG Y Q. The indicating significance of understory in Chinese fir plantation to sites[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1992, 28(3): 209-212. (in Chinese)
- [60] 李根前, 王波, 聂新军, 等. 西南桦人工幼林生长与立地条件的关系[J]. 西南林学院学报, 2001, 21(3): 129-132.
- [61] LI G Q, WANG B, NIE X J, et al. A study on the relationship between height increment of *Betula alnoides* plantation and site condition[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2001, 21(3): 129-132. (in Chinese)
- [62] FRALISH J S, LOUCKS O L. Site quality evaluation models for aspen (*Populus tremuloides* Mich.) in Wisconsin[J]. Can. J. For. Res., 1975, 5(4): 523-528.
- [63] WOOLERY M E, OLSON K R, DAWSON J O, et al. Using soil properties to predict forest productivity in southern Illinois[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57(1): 37-45.
- [64] PEÑA-RAMÍREZ V M, VÁZQUEZ-SELEM L, SIEBE C. Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835 - 30, 500 years B. P.) in Mexico[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 224-234.
- [65] 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.
- [66] HU X Y, SONG C W, ZHANG J L. Classification of *Taiwania flousiana* Gaussen in Hubei Province and assessment of its forest stands[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26(4): 532-535. (in Chinese)
- [67] PRETZSCH H. Forest dynamics, growth and yield from management to model[M]. TU Munchen, Germany: Springer, 2009.
- [68] OUZENNOUN H, POTHIER D, RAULIER F. Adjustment of the age-height relationship for uneven-aged black spruce stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38(7): 2003-2012.
- [69] ERIKSSON H, JOHANSSON U, KIVISTE A. A site - index model for pure and mixed stands of *Betula pendula* and *Betula*

- la pubescens* in Sweden[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1997, 12(2): 149-156.
- [66] REINHARDT E D. Influence of site quality on the height-diameter relationship of western larch[D]. Ann Arbor, MI, USA: University of Montana, 1982.
- [67] AUSTIN M P, CUNNINGHAM R B, FLEMING P M. New approaches to direct gradient analysis using environmental scalars and statistical curve-fitting procedures[J]. Plant Ecology, 1984, 55(1): 11-27.
- [68] MOORE D M, LEES B G, DAVEY S M. A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a geographic information system[J]. Environ. Manage., 1990, 15(1): 59-71.
- [69] NÆSSET E. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser[J]. Scand. J. Forest Res., 2004, 19(2): 164-179.
- [70] ANDERSEN H E, MCGAUGHEY R J, REUTEBUCH S E. Forest measurement and monitoring using high-resolution airborne lidar[C]// HARRINGTON C A, SCHOENHOLTZ S H. Productivity of western forests: a forest products focus. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, 2005: 109-120.

(上接第256页)

- [14] 薛阿亮,常庆瑞,吴琴.基于遥感影像的吴起县土地利用/覆盖动态监测分析[J].西北林学院学报,2008,23(2):168-172.
XUE A L, CHANG Q R, WU Q. Dynamic monitoring and analysis of land use/cover based on remote sensing image in Wuqi County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 168-172. (in Chinese)
- [15] 彭道黎,赵永泉.基于RS的河北沽源县土地利用动态监测研究[J].西北林学院学报,2009,24(2):152-156.
PENG D L, ZHAO Y Q. Study on dynamic monitoring of land use in Guyuan County of Hebei Province based on RS[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(2): 152-156. (in Chinese)
- [16] 杨朝俊,胡庭兴,刘波,等.基于GIS的退耕还林工程区林地动态变化遥感监测研究[J].遥感信息应用技术,2006(1):38-40.
YANG C J, HU T X, LIU B, et al. Research on remote sensing monitoring of forest land dynamic change based on GIS in the project of returning farmland to forest[J]. Application Technology of Remote Sensing Information, 2006(1): 38-40. (in Chinese)
- [17] 张利利,余济云,李锐,等.1998—2010年五指山市土地利用景观格局变化分析[J].西北林学院学报,2016,31(1):221-225.
ZHANG L L, SHE J Y, LI R, et al. Changes of Land Use and Landscape Pattern in Wuzhishan During 1998—2010 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 221-225. (in Chinese)
- [18] 225. (in Chinese)
- [19] 张春华,王宗明,宋开山,等.基于马尔可夫过程的三江平原土地利用动态变化预测[J].遥感技术与应用,2009,24(2):210-216.
ZHANG C H, WANG Z M, SONG K S, et al. Prediction of dynamic change of land use in Sanjiang Plain based on Markov process[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 210-216. (in Chinese)
- [20] 刘艳丽,刘觉夫,谢昕.基于马尔可夫模型的地理信息系统研究[J].华东交通大学学报,2006,23(2):67-70.
LI Y L, LIU J F, XIE X. Research on geographic information system based on Markov model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(2): 67-70. (in Chinese)
- [21] 陈江龙,曲福田,王启仿.经济发达地区土地利用结构变化预测—以江苏省江阴市为例[J].长江流域资源与环境,2003,12(4):317-321.
CHEN J L, QU F T, WANG Q F. Prediction of land use structure change in economically developed areas-a case study of Jiangyin City, Jiangsu Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2003, 12(4): 317-321. (in Chinese)
- [22] 谈兵,翟文侠,宋成舜,等.西宁市土地利用与覆盖的Markov分析[J].安徽农业科学,2012,40(7):4129-4130,4164.
TAN B, ZHAI W X, SONG C S, et al. Markov analysis of land use and cover in Xining City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 4129-4130,4164. (in Chinese)