

基于优势高模型分析多源数据对立地质量评价的影响

郭小阳^{1,2}, 吴恒^{1,2}, 田相林^{1,2}, 韩福利³, 陈书军^{1,4}, 曹田健^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 生态仿真优化实验室, 陕西 杨陵 712100;
3. 陕西省森林资源管理局, 陕西 西安 710082; 4. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 宁陕 711600)

摘要:立地质量的准确评价是森林科学经营的前提, 采用不同的数据类型拟合优势树高生长, 建立立地指数模型和立地形模型, 与其他立地质量评价模型进行对比分析。结果表明, 临时或固定样地调查数据建立立地质量评价模型会导致幼龄林高估和成熟林低估, 解析木数据无法解释优势木早期受到的压迫和干扰; 采用多源数据建立立地质量评价模型能有效降低系统性误差, 拟合优势树高生长决定系数从大到小依次是解析木数据、固定样地数据、多源数据和临时样地数据; 相较于其他立地质量评价模型, 多源数据立地质量评价模型能更准确反映优势树高生长规律, 且能有效降低立地质量评价误差; 基于多林区不同数据类型建立的立地质量评价模型具有更好的普适性和外推效能。

关键词:立地质量; 多源数据; 评价误差; 秦岭

中图分类号:S757.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)06-0184-06

Effects of Multiple Source Data on Site Evaluation Based on Dominant Height Modeling

GUO Xiao-yang^{1,2}, WU Heng^{1,2}, TIAN Xiang-lin^{1,2}, HAN Fu-li³, CHEN Shu-jun^{1,4}, CAO Tian-jian^{1,2*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Simulation Optimization Laboratory, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Forest Resources Administration Bureau, Xi'an, Shaanxi 710082, China;
4. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Accurate evaluation on site quality is the premise for the scientific management of forest stands. In order to establish site index and site form models, different datum sources were employed to fit the dominant height growth. The models established were compared with other models that were used for the estimation of site quality. The models based on temporal and permanent sample plots gave overestimations for young forests and underestimations for mature forests. The guide curve estimated by stem analysis data was unable to explain the competition pressure at the young age. Considering the systematic error, multiple source data were used to constructed site evaluation models, to reveal the trends of dominant height growth. Extrapolation of these models was also validated.

Key words: Site quality; multiple source data; evaluation error; Qinling Mountains

立地质量的准确评价在造林规划设计、森林经营管理等林业生产实践中具有重要的现实意义^[1-2]。立地质量评价模型误差包括有系统性误差(数据性误差、技术性误差)和偶然性误差。建模技术的发展降低了技术性误差, 重复试验能校正具有随机性的

偶然误差。数据性误差分析的缺失限制了数据性误差的降低。

数据类型会通过优势木选择和导向曲线形式两个方面对立地指数模型产生影响。临时样地数据^[3]被用于很多的立地质量评价模型中, 特别是当固定

样地数据较少时。由于临时样地数据是在短期内测量完成的,就使得测量数据更容易受抽样误差和测量误差的影响。固定样地能提供较为详细的连续型数据,且能运用组内和组间的统计值验证立地质量评价模型的准确性,但固定样地数据量不足和间隔期短限制其在立地质量评价中的运用。解析木数据被广泛地用于立地指数模型^[4],但也存在很多局限性,如传统建模技术不能反映其生长率变化和早期受压迫和干扰问题。多源数据立地质量评价模型用于天然次生林^[5-7]和人工林^[3]立地质量评价具有良好效果,但缺少对不同数据类型立地质量评价模型的差异性分析限制了多源数据立地质量评价模型的运用和推广。

秦岭具有重要的生态功能意义,地域范围广阔、普适性好的立地质量评价模型对秦岭林区的林业实践活动显得尤为重要。吴恒^[7]等编制的秦岭林区天然次生林和人工林立地指数表和立地形表仅采用火地塘林区数据,不能准确对秦岭林区立地质量进行可靠评价。本研究对秦岭林区不同类型数据编制立地指数表和立地形表具有现实意义。

1 研究区概况

研究区包括西北农林科技大学火地塘林场(34°25′—34°33′N, 108°25′—108°30′E), 辛家山林区(34°10′—34°20′N, 106°28′—106°38′E), 宁东林业局新矿林区、沙沟林区、火地塘林区、高桥林区及旬阳坝林区(33°14′—33°50′N, 108°16′—108°56′E), 宁西林业局桦树坪林区、菜子坪林区及两河林区(33°27′—33°50′N, 108°04′—108°31′E)和太白林业局的黄柏源林区(33°42′—33°54′N, 107°31′—107°42′E)。秦岭南坡调查林区, 年降雨量 800~1 000 mm, 年平均气温 13.5~14.5℃, 海拔 1 280~2 474 m, 属暖温带湿润气候类型。土壤主要有黄棕壤、棕壤、暗棕壤和山地草甸土^[8]。林分优势的天然树种有华山松(*Pinus armandii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)、云杉(*Picea asperata*)、铁杉(*Tsuga chinensis*)等。1 400~1 900 m 为松栎林带, 主要树种有锐齿栎、油松、华山松、光皮桦(*Betula luminifera*)等^[8-11]。

2 材料与方法

2.1 数据特征分析

采用的数据来源于西北农林科技大学火地塘教学试验林场 1990 年森林资源二类调查数据、生态仿

真优化实验室 2012—2014 年调查数据, 宁东林业局 2003 年调查数据, 宁西林业局 2004 年调查数据和太白林业局 2003 年调查数据, 合计固定样地 20 m×20 m 共 161 块, 25 m×40 m 共 73 块, 临时样地(圆形样方)1 453 块, 解析木 98 株。

临时样地采用分层随机抽样的方法, 首先筛选研究树种占优势的小班, 然后在小班内部随机取点, 进行角规绕测, 从而建立无边界圆形临时样地。固定样地则采用立意抽样方法, 结合森林踏查和临时样地的分析结果, 选取具有代表性的林分, 设定固定边界 20 m×20 m 矩形样地, 进行每木检尺。所涉及样地多为天然次生林, 按照断面积比重 65% 标准分别筛选油松、华山松和锐齿栎中的相对纯林样地数据, 对每木检尺样地的直径分布进行 Shapiro-Wilk 统计量正态性检验, 用三次抛物线方程拟合肩形曲线, 计算相对直径为 1 时的株树累积百分数。结果表明本研究涉及的自然次生林与正态分布无显著差异, 符合相对同龄林标准。

在 20 m×20 m 固定样地选取 4 株最高优势木做为高选样本, 临时样地在半径为 10 m 的圆形样方内选取 3 株最高优势木作为高选样本。优势木年龄通过每个样地内选取一株优势木, 在胸高 1.3 m 处钻取生长锥木芯, 结合部分地径木芯数据和幼树树高生长调查资料, 推算优势木生物年龄。以优势木平均高为准, ±3 倍标准差为界限剔除异常值后对优势木进行描述性统计(表 1)。

2.2 多源数据立地指数和立地形模型建立

2.2.1 导向曲线拟合 导向曲线的选择直接影响到立地指数模型对立地质量评价的准确性, 需要导向曲线的形式既要符合树高生长的生物学规律, 又要能对数据进行最优拟合^[1]。常用的导向曲线有抛物线式、双曲线式、单分子式和理查兹式等^[2], 本研究采用 4 个年龄树高模型分不同数据类型拟合优势木年龄和树高关系, 采用 4 个胸径树高模型不同数据类型拟合优势木胸径和树高关系(表 2)。根据决定系数 R^2 、标准估计误差 SE 及曲线形式筛选适宜的导向曲线模型。基准年龄的确定以各树种自然成熟龄的 1/2 年龄为准^[1]。在选取基准胸径时, 计算建模样本各个径阶对应的树高变异系数及树高变异系数的相对变化幅度, 选取树高值趋于稳定的径阶中值作为基准胸径。

2.2.2 立地指数表和立地形表的编制 采用标准差调整法形成立地指数曲线簇, 编制各树种的立地指数表。各龄阶树高标准差方程采用各龄阶树高标准差 S_i 与龄阶平均年龄 A_i 拟合。将各龄阶树高标准差拟合值代入调整式, 编制立地指数表。

表 1 各树种优势木特征值
Table 1 Characteristics of dominant trees by species

数据类型	树种	优势木	平均值	标准差	样本量	最小值	最大值
临时样地(TSP)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	年龄	35.3	13.17	251	15.0	70.0
		胸径	20.1	7.16	251	6.0	44.0
		树高	12.3	3.60	251	5.0	21.0
	华山松(<i>P. armandii</i>)	年龄	38.4	12.30	681	15.0	74.0
		胸径	20.5	6.77	681	6.0	58.6
		树高	12.3	2.90	681	4.8	23.2
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	年龄	41.2	12.80	479	15.0	70.0
		胸径	21.9	9.54	479	6.0	75.0
		树高	12.2	2.70	479	4.0	19.1
固定样地(PSP)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	年龄	32.8	14.72	189	6.0	67.7
		胸径	16.5	9.01	189	6.0	40.3
		树高	15.3	6.93	189	1.5	32.6
	华山松(<i>P. armandii</i>)	年龄	44.7	16.29	199	5.0	72.0
		胸径	22.4	7.94	199	7.0	38.5
		树高	13.5	3.48	199	1.8	21.0
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	年龄	38.0	17.18	211	5.0	70.0
		胸径	17.4	10.02	211	1.4	51.4
		树高	12.5	3.10	211	2.1	17.8
解析木(SA)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	年龄	30.9	20.22	117	2.0	70.0
		胸径	15.3	10.56	117	0.7	39.8
		树高	12.3	7.60	117	0.5	28.9
	华山松(<i>P. armandii</i>)	年龄	36.2	17.62	55	10.0	70.0
		胸径	17.5	11.51	55	0.5	41.8
		树高	13.2	7.34	55	1.9	25.5
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	年龄	30.3	18.63	177	4.0	84.0
		胸径	8.3	4.86	177	0.6	21.3
		树高	10.0	4.77	177	0.8	21.0

表 2 优势树高生长备选模型

Table 2 Models for dominant tree height growth

序号	模型变量	名称	表达式
1	$Age-H_T$	Schumacher	$H_T=a*\exp(-b/Age)$
2	$Age-H_T$	Weibull	$H_T=a*(1-\exp(-b*Age^c))$
3	$Age-H_T$	Compertz	$H_T=a*\exp(-b*\exp(-c*Age))$
4	$Age-H_T$	Richards	$H_T=a*(1-\exp(-c*Age))^b$
5	$DBH-H_T$	Schumacher	$H_T=13.+a*\exp(-b/DBH)$
6	$DBH-H_T$	Weibull	$H_T=1.3+a*(1-\exp(-b*DBH^c))$
7	$DBH-H_T$	Compertz	$H_T=1.3+a*\exp(-b*\exp(-c*DBH))$
8	$DBH-H_T$	Richards	$H_T=1.3+a*(1-\exp(-c*DBH))^b$

注: H_T 为优势树的树高, Age 为年龄, DBH 为胸径, a 、 b 、 c 为参数,下同。

$$S_i=a+b*\log_{10}^A$$

(1)

$$H_{ij}=H_{ik}\pm\left[\left(\frac{H_{0j}-H_{0k}}{S_0}\right)\cdot S_i\right]$$

(2)

式中: H_{ij} 为第 i 龄阶第 j 指数级调整后的树高; H_{ik} 为第 i 龄阶的导向曲线树高; H_{0j} 为基准年龄时第 j

指数级的树高; H_{0k} 为基准年龄时导向曲线树高; S_0 为基准年龄所在龄阶树高标准差理论值; S_i 为第 i 龄阶树高标准差理论值。立地形表的编制方法参照立地指数表编制方法。

3 结果与分析

3.1 不同数据类型导向曲线差异

临时样地(TSP)数据拟合油松和华山松年龄树高曲线 5~15 a 树高值显著($P<0.05$)高于其它数据类型拟合树高值,油松、华山松和锐齿栎 40 a 后树高值低于其它数据类型拟合树高值(图 1a、1b、1c)。临时样地数据拟合胸径树高规律与年龄树高规律相近。临时样地数据油松平均年龄为 35 a、华山松为 38 a、锐齿栎为 41 a,缺少幼龄林和成熟林数据容易导致幼龄林的高估和成熟林的低估。

固定样地(PSP)数据拟合油松优势木年龄树高曲线 5~10 a 增长缓慢,10~30 a 呈快速上升趋势,30 a 后呈平滑直线(图 1a)。拟合优势木胸径树高曲线胸径 5~15 cm 呈快速上升趋势,15 cm 后呈平

滑直线(图 1d)。华山松和锐齿栎优势树高生长趋势与油松相似。固定样地拟合优势树高生长会出现明显“拐点”,“拐点”出现前树高快速生长,“拐点”出现后树高生长达到上限渐近线水平。固定样地平均年龄油松为 33 a、华山松为 45 a、锐齿栎为 38 a,连续观测间隔短和数据缺失导致立地质量评价误差增加。

解析木(SA)数据拟合油松和华山松树高生长曲线近似呈“直线”形,40 a 或 25 cm 后解析木拟合优势木生长树高值显著高于其它数据类型拟合优势树高值,幼龄阶段和快速生长期与其它数据类型拟合结果无显著性差异(图 1a、1b、1d、1e)。解析木数

据拟合锐齿栎胸径树高关系与其它数据类型差异更为显著(图 1f)。解析木树高生长早期受到的压迫或干扰会增加立地质量评价误差。

通过对比分析解析木的调查数据(图 1)发现相对于解析木数据,无论是基于固定样地或临时样地所构建的树高生长曲线,都存在更加明显的拐点和上渐近线,多源数据(MSD)拟合优势树高生长曲线介于不同类型数据拟合曲线中间。单一数据类型与多源数据差异主要存在幼龄林和成熟林阶段,多源数据拟合优势树高生长能降低单一数据类型评价立地质量造成的系统性误差。

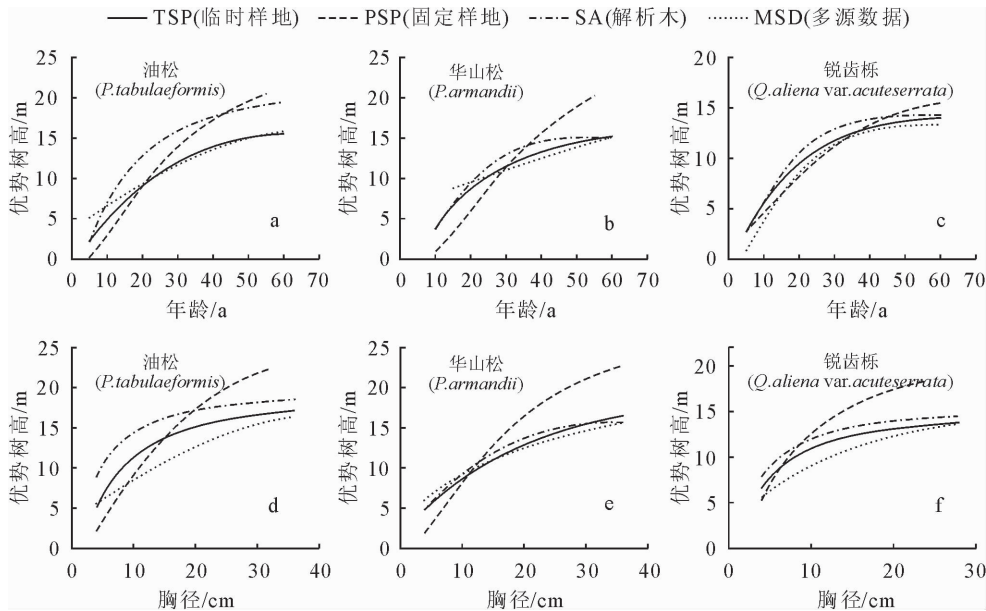


图 1 不同数据类型导向曲线拟合

Fig. 1 Curves of dominant height by different datum types

临时样地数据拟合导向曲线模型决定系数介于 0.29~0.43,平均值为 0.36;固定样地数据拟合导向曲线模型决定系数介于 0.23~0.72,平均值为 0.55;解析木数据拟合导向曲线模型决定系数介于 0.72~0.94,平均值为 0.82;多源数据拟合导向曲线模型决定系数介于 0.32~0.57,平均值为 0.50(表 3)。解析木数据和固定样地数据具有连续性,能提高树高生长模型拟合的决定系数。临时样地数据不具有连续性且分布较为离散,因此,树高生长模型拟合决定系数低于其它数据类型。解析木拟合优势树高生长参数 a(参数 a 为优势树高生长平均值上限水平)与其它数据类型存在显著差异表明解析木拟合优势树高生长较难到达上限渐近线水平,容易导致优势树高生长拟合的高估误差。

3.2 不同立地质量评价模型准确性对比

基于多源数据建立的立地指数模型在 40 a 左右达到上限渐近线水平,表明吴恒^[7]等建立的立地

指数模型假设林区油松在林龄 50 a 前处于快速生长期,油松快速生长期延长增加立地质量高估误差(图 2a)。吴恒^[7]等建立的华山松立地指数模型,当林龄为 10 a 时立地指数级为 14 m 和 16 m 的华山松树高为 8.0 m 和 10.0 m,此立地指数模型对华山松幼龄阶段存在明显高估误差。基于多源数据建立的华山松立地指数模型,当林龄为 10 a 时立地指数级为 14 m 和 16 m 的华山松树高为 5.4 m 和 6.6 m(图 2b)。

4 结论与讨论

4.1 立地评价模型建模数据

多源数据建立立地指数模型^[6-7]能保证不同立地条件、数据类型和不同时期数据均能反映到立地指数模型中,能较低因数据类型单一造成的抽样误差。单一数据类型建立立地质量评价模型^[3]容易导致幼龄阶段的高估和成熟林阶段低估等系统性误

表 3 不同数据类型优势高拟合结果

Table 3 Fitting results of dominant height by different datum types

数据类型	树种	模型变量	模型形式	决定系数 (R^2)	标准误差 (SE)	参数		
						a	b	c
临时样地(TSP)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	$Age-H_T$	Compertz	0.377	2.854 2	17.586 7	1.599 1	0.045 6
		$DBH-H_T$	Compertz	0.433	2.721 4	17.086 1	1.922 1	0.077 8
	华山松(<i>P. armandii</i>)	$Age-H_T$	Compertz	0.361	2.323 1	26.144 1	1.362 7	0.015 5
		$DBH-H_T$	Weibull	0.326	2.386 0	22.808 2	0.091 3	0.664 1
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	$Age-H_T$	Richards	0.286	2.284 6	13.494 3	2.957 5	0.096 4
		$DBH-H_T$	Weibull	0.399	2.096 9	14.945 2	0.102 2	0.854 7
固定样地(PSP)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	$Age-H_T$	Schumacher	0.317	5.739 4	24.243 0	12.593 9	
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.234	6.076 0	19.144 7	3.767 8	
	华山松(<i>P. armandii</i>)	$Age-H_T$	Weibull	0.683	1.967 0	15.054 8	0.004 3	1.805 8
		$DBH-H_T$	Compertz	0.718	1.857 4	14.780 4	2.623 3	0.137 5
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	$Age-H_T$	Weibull	0.711	1.675 5	14.314 5	0.016 7	1.460 3
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.637	1.873 7	14.720 9	3.202 8	
解析木(SA)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	$Age-H_T$	Schumacher	0.801	3.401 4	32.682 9	25.507 7	
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.856	2.899 6	33.045 7	14.529 1	
	华山松(<i>P. armandii</i>)	$Age-H_T$	Schumacher	0.766	3.584 7	40.620 3	38.091 8	
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.935	1.881 8	33.575 5	16.020 6	
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	$Age-H_T$	Compertz	0.717	2.549 8	16.415 5	2.374 2	0.060 6
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.859	1.794 0	22.899 7	7.098 2	
多源数据(MSD)	油松(<i>P. tabulaeformis</i>)	$Age-H_T$	Weibull	0.544	2.768 6	16.293 4	0.019 5	1.243 8
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.318	4.965 3	18.818 7	6.345 7	
	华山松(<i>P. armandii</i>)	$Age-H_T$	Schumacher	0.541	2.067 1	20.035 6	16.609 7	
		$DBH-H_T$	Richards	0.498	2.464 7	18.434 9	0.903 9	0.045 1
	锐齿栎(<i>Q. aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>)	$Age-H_T$	Richards	0.570	2.114 0	14.448 2	1.287 4	0.062 8
		$DBH-H_T$	Schumacher	0.547	2.321 0	14.374 4	4.002 4	

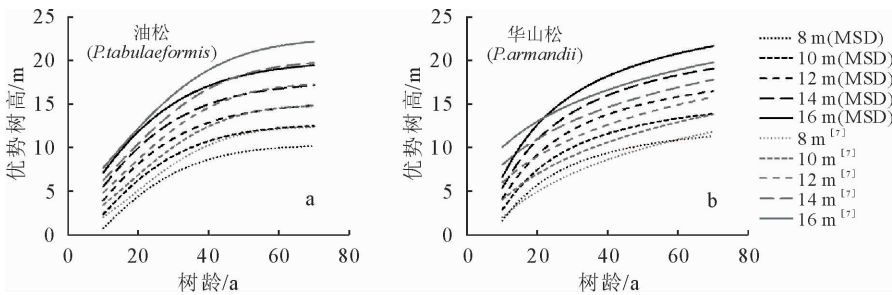


图 2 不同立地质量评价模型曲线

Fig. 2 Curves of site evaluation by different models

差,且模型的外推效果和普适性较差。尽管固定样地也只采用一次调查的数据,但是临时样地与固定样地所采用的抽样及计测方法均不相同。虽然固定样地具有更好的代表性,但由于设置成本相对更高,因此数量明显低于临时样地。提高建模技术如采用解析木数据运用差分模型^[4]能降低对幼龄林和成熟林的估计误差,但解析木数据仍然无法解决解析木早期生长受到压迫和干扰^[12]对立地质量评价造成影响的问题。无论是临时样地或固定样地,对于树高的估计都存在较高的误差,这与林内复杂观测条件和调查人员技术水平等诸多因素有关。临时样地

由于缺少幼龄林和成熟林数据容易造成立地质量评价误差,使用临时样地建立的挪威云杉树高生长模型会低估树高的生长^[13-14],与本研究结果相似。

固定样地数据是建立立地质量评价模型的良好数据,因为固定样地提供的是连续型数据,但固定样地数据的缺乏和间隔期短也限制了固定样地的使用。多源数据能保障有效的数据量和避免单一数据类型造成的系统性误差,运用于立地质量评价建模能取得较好效果。

4.2 模型形式与筛选

本研究采用的 8 个模型形式能确保树高生长曲

线通过原点,前人的在建立立地指数导向曲线时选用模型不能通过原点^[5-7],不符合树木生长的生物学规律^[15],导向曲线形式不合理导致树高生长幼龄阶段的高估。本研究解析木数据和固定样地数据的模型拟合决定系数大于临时样地数据,因此,仅根据模型拟合决定系数选择立地质量评价备选模型会导致评价误差。尽管决定系数普遍用于导向曲线模型的选择^[3],但仍应结合曲线形式分析、模型特性及更多统计验证指标的综合评价。模型的拟合和筛选与选择的数据类型直接相关。

立地质量的准确评价是森林集约经营的基础,采用多源数据编制的各树种立地指数表和立地形表,多源数据拟合导向曲线具有较好效果,能降低单一数据类型建立的模型对立地质量评价产生的误差,具有较好的普适性,能够用于指导林区生产经营活动。由于数据量的限制,本研究缺少建模样本量对立地质量评价误差影响的分析,在后续的研究中,针对不同数据类型及数据信息缺少等因素对立地质量评价误差的影响仍需要进一步探索分析。

参考文献:

[1] WEISKITTEL A R, HANN D W, KERSHAW J A, *et al.* Forest growth and yield modeling [M]. New York: Wiley, 2011.

[2] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.

[3] 段劼, 马履一, 贾黎明, 等. 北京低山地区油松人工林立地指数表的编制及应用[J]. 林业科学, 2009, 45(3): 7-12.

DUAN J, MA L Y, JIA L M, *et al.* Establishment and application of site index table for *Pinus tabulaeformis* plantation in the low elevation area of Beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(3): 7-12. (in Chinese)

[4] 赵磊, 倪成才, NIGH G, 等. 加拿大哥伦比亚省美国黄松广义代数差分型地位指数模型[J]. 林业科学, 2012, 48(3): 74-81.

ZHAO L, NI C C, NIGH G, *et al.* Generalized algebraic difference site index model for ponderosa pine in British Columbia, Canada[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(3): 74-81. (in Chinese)

[5] 郑聪慧, 贾黎明, 段劼, 等. 华北地区栓皮栎天然次生林地位指

数表的编制[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 79-85.

ZHENG C H, JIA L M, DUAN J, *et al.* Establishment of site index table for *Quercus variabilis* natural secondary forest in north China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 79-85. (in Chinese)

[6] 张瑜, 贾黎明, 郑聪慧, 等. 秦岭地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 林业科学, 2014, 50(4): 47-54. (in Chinese)

ZHANG Y, JIA L M, ZHENG C H, *et al.* Establishment of a site index table for *Quercus variabilis* natural secondary stand in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(4): 47-54. (in Chinese)

[7] 吴恒, 党坤良, 田相林, 等. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价[J]. 林业科学, 2015, 51(4): 78-88. (in Chinese)

WU H, DANG K L, TIAN X L, *et al.* Evaluating site quality for secondary forests and plantation in Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(4): 78-88. (in Chinese)

[8] 陕西森林编辑委员会. 陕西森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.

[9] 王志彬. 秦岭中段南坡森林景观格局研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2011.

[10] 陈存根, 龚立群, 彭鸿, 等. 秦岭锐齿栎林的生物量和生产力[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(Supp. 1): 103-114.

[11] 陈存根. 秦岭华山松林生产力的研究华山松林乔木层的生物产量[J]. 西北林学院学报, 1984, 1(1): 1-18.

CHEN C G. Studies on the production of *Pinus armandii* forest in Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1984, 1(1): 1-18. (in Chinese)

[12] RAULIER F, LAMBERT M C, POTHIER D, *et al.* Impact of dominant tree dynamics on site index curves[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 184(1): 65-78.

[13] PERIN J, HéBERT J, BROSTAU X Y, *et al.* Modelling the top-height growth and site index of Norway spruce in Southern Belgium[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 298(3): 62-70.

[14] DAGNELIE P, PALM R, RONDEUX J, *et al.* Tables de production relatives à l' épicéa commun [M]. Les presses agronomiques de Gembloux, 1988.

[15] WEISKITTEL A R, HANN D W, HIBBS D E, *et al.* Modeling top height growth of red alder plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 323-331