

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230489

马尾松人工林碳储量密度控制图研建及应用研究

李宇昊¹, 牛青云^{2*}, 孟京辉²

(1. 国家林草局调查规划设计院, 北京 100714; 2. 北京林业大学, 国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: [目的] 马尾松是我国重要的人工林树种, 不但发挥着重要的经济效益, 而且在固碳释氧, 应对气候变化等生态服务方面发挥着重要的作用。开展抚育间伐, 调控林分密度是人工林经营过程中的重要手段, 而当前马尾松人工林抚育间伐存在“定性”不“定量”的问题, 制约着经营目标的实现。本研究拟构建马尾松人工林碳储量密度控制图, 实现马尾松人工林抚育间伐过程中的精准化。[方法] 首先, 以湖南省马尾松人工纯林为研究对象, 基于森林资源连续清查(一类清查)数据, 以 Reineke 自然稀疏模型为基础, 构建湖南省马尾松基本密度控制图。其次, 将碳储量等高线加入到基本密度控制图上, 构建了碳储量密度控制图, 增加了以碳储量调控为目标的密度调控功能。再次, 基于所构建的密度控制图, 以湖南慈利县为例, 对马尾松人工林的林分密度合理性进行诊断, 生成密度诊断图, 并提出相关经营建议。[结果] 湖南省慈利县(1) 绝大部分马尾松人工林的密度高于合理密度区间, 林木对有限的光照、温度、水分等自然资源产生强烈竞争, 甚至有些林分会产生严重的自然枯死现象, 亟待开展抚育间伐, 降低林分密度;(2) 少部分林分位于合理密度区间范围内, 此时的林分能够充分利用自然资源, 林木个体之间处于互相促进的状态;(3) 少部分林分密度低于最优密度下限, 此时的林地空间没有得到充分的利用, 造成林地资源的浪费, 亟待开展林下补植作业。[结论] 本研究所构建的马尾松林分密度控制图, 能够精准指导森林抚育, 此外还能够对森林经营单位的林分密度合理性进行诊断, 形成林分密度诊断图, 进而为合理经营措施的制定提供依据。

关键词: 马尾松人工林; Reineke 自然稀疏; 马尾松碳储量密度控制图; 密度诊断图

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1001-1498(2024)x-0001-11

合理的林分密度能够使林木充分利用林地空间和资源, 从而提升优质木材的产量、林分的生产力及碳汇能力, 能够增强林分稳定性和抗逆性, 最大程度地发挥森林多种生态效应^[1,2]。林分密度控制图通过图形化展示了林分密度、树高、直径、蓄积量或碳储量等林分参数之间的关系, 为通过间伐等措施调整林分密度, 控制林分的生长量和生长期, 实现不同目标下的森林管理提供决策依据^[3]。

1968年, 日本林学家 Ando^[4] 基于自然稀疏法则和林分密度效应法则, 编制了第一个密度控制图, 即日本红松密度控制图。随后, 国内外学者陆续编制了不同树种的林分密度控制图。例如, 美国黄松 (*Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson)^[5]、欧洲赤松 (*Pinus sylvestris* L.)^[6]、辐射松 (*Pinus radiata* D. Don)^[7]、欧洲云杉 (*Picea abies* (L.) H. Karst.)^[8]、杉木 (*Cunninghamia*

收稿日期: 修回日期:

基金项目: 江西省林业局林业科技创新专项 [2019]13 号、国家自然科学基金 (32271871)

作者简介: 李宇昊, 高级工程师。主要研究方向: 森林调查与森林经营。电话: 18510186512, Email: 13522330586@sina.cn 地址: 100714, 国家林草局调查规划设计院

* 通讯作者: 牛青云, 硕士学位(在读), 学生。主要研究方向: 森林生长收获与模型模拟。电话: 18732447785, Email: nqy_679998@163.com 地址:100083, 北京林业大学林学院

lanceolata (Lamb.) Hook.)^[9, 10]、油松 (*Pinus tabuliformis* Carrière)^[11]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)^[12, 13]等。

林分密度控制图不仅能够为密度控制、产量预估、间伐量设计等传统经营活动提供科学理论依据,还在提高森林生态服务功能,规避森林火灾、风灾等自然灾害方面发挥重要的作用。例如 Tang^[14]在安徽省杉木林林分密度控制图的构建过程中添加 SC 系数 (SC, slenderness coefficient) 来描述林分的稳定性,通过密度管理来调整 SC 系数,进而提高林分抗风、抗雪灾的能力。汪晶等^[15]对不同的立地条件,构建吉林金沟岭兴安落叶松人工林的水源涵养量生长模型,绘制了水源涵养量密度控制图,为提高森林涵养能力提供了参考。

随着全球变暖带来的一系列生态问题,应对气候变化成为当今全球的焦点问题。2020年9月中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标。森林是陆地生态系统的主体,在固碳释氧,应对气候变化中发挥着重要作用^[16]。很多研究表明,林分密度对森林固碳能力有着显著的影响。例如,陈怀祥^[17]对比了间伐强度为5%,10%,15%,20%下的红桦林,发现15%采伐强度下红桦林的固碳能力最高。因此,科学管理森林密度,提升森林固碳能力的研究显得尤为必要。

马尾松,属松科松属的常绿乔木,根据第八次全国森林资源连续清查结果,我国马尾松林面积占比为6.08%,蓄积占比为4%,是我国重要的人工林树种^[18]。湖南省马尾松林面积共有224万hm²,占全省用材林面积的49.6%^[19]。作为一种耐瘠薄、抗逆性强的树种,其生长迅速,能够在恶劣的自然环境条件下生长^[20],因此,马尾松林在应对气候变化等方面发挥着十分重要的作用。本研究首先以湖南省马尾松为研究对象,采用第9期森林资源连续清查数据构建碳储量密度控制图,实现其不同发育阶段林分密度的科学管理。其次,基于所构建的碳储量密度控制图,对湖南省慈利县马尾松人工林进行密度合理性诊断并研制密度诊断图,提出密度调控建议。

1 研究区概况

湖南省位于中国中部、长江中游,省境绝大部

分在洞庭湖以南,故称湖南;湘江贯穿省境南北,故简称湘。湖南省位于东经108°47′~114°15′,北纬24°38′~30°08′之间,为大陆性亚热带季风湿润气候,冬寒冷而夏酷热,春温多变,秋温陡降,春夏多雨,秋冬干旱^[21]。气候的年际变化也较大。年均气温一般为16-19摄氏度,热量充足,雨水集中,日平均气温稳定,无霜期253-311天,年均降水量在1200-1700mm之间。湖南省是我国林业大省,属于亚热带常绿阔叶林带,森林资源丰富,2020年底,湖南省林地面积为 1.298×10^7 hm²,森林面积为 1.002×10^7 hm²,全省森林覆盖率大于59%^[22],森林蓄积量达 5.88×10^8 hm³,湖南省天然林的主要组成树种为马尾松、杉木、栎类、樟树 (*Cinnamomum camphora* Nees ex Wall)、木荷 (*Schima superba* Gardner & Champ.)、枫香 (*Liquidamba formosana* Hance)等;人工林的主要组成树种为马尾松、杉木、柏木 (*Cupressus funebris* Endl.)、木荷、桉树 (*Eucalyptus robusta* Smith)等^[23]。

2 材料与方 法

2.1 数据来源

本研究数据来源于湖南省第9期森林资源连续清查数据,包括样地信息和样地每木检尺数据。每木检尺数据针对样地内胸径 ≥ 5 厘米 ($DBH \geq 5$ cm)的乔木,测定并记录了样地号、样木号、树种、胸径等信息。样地信息记录样地号、样地类别海拔、坡向、坡位、坡度等信息。调查样地是面积为0.06公顷的方形样地,调查间隔期为5年。本研究对数据进行筛选,共计835块马尾松人工林纯林样地用于密度控制图研建。835块样地统计信息如表1所示。从表1中可知,林分密度 N 的平均值为 358 株·hm⁻² ($15 \sim 2850$ 株·hm⁻²),公顷断面面积 BA 为 5.74 m²·hm⁻² ($0.03 \sim 31.9$ m²·hm⁻²),林分平均胸径 QMD 为 16.6 cm ($5 \sim 59.8$ cm),公顷蓄积量 VOL 为 35.474 m³·hm⁻² ($0.094 \sim 229.304$ m³·hm⁻²),碳储量 CS 为 15.37 Mg·hm⁻² ($0.0458 \sim 100.93$ Mg·hm⁻²)。将生物量乘以生物量-碳的转换系数(也就是碳含量比例)从而得到碳储量,其中生物量-碳转化系数(即含碳率)取0.5^[24],马尾松生物量方程如表2。

表 1 马尾松人工林基本特征信息表

Table 1 Descriptive statistics of stand and site variables for *Pinus massoniana* plantation.

变量 Variable	最小值 Min.	平均值 Mean	最大值 Max.	标准差 SD
密度N (株·hm ⁻²) Stand density/(tree·ha ⁻¹)	15	358	2850	449
公顷断面积 (m ² ·hm ⁻²) Basal area (m ² ·hm ⁻²)	0.03	5.74	31.90	5.98
林分平方平均直径 (cm) Quadratic mean diameter (cm)	5.0	16.6	59.8	7.54
公顷蓄积 (m ³ ·hm ⁻²) Volume (m ³ ·hm ⁻²)	0.094	35.474	229.304	38.317
碳储量CS (Mg·hm ⁻²) Carbon stock (Mg·hm ⁻²)	0.0458	15.37	100.93	12.62

表 2 马尾松生物量方程

Table 2 Biomass equation of *Pinus massoniana* plantation.

树种 species	生物量方程 Biomass equation	文献 literature
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$W(\text{干}) = 0.0345 \times DBH^{0.0719}$ $W(\text{枝}) = 0.0719 \times DBH^{1.9864}$ $W(\text{叶}) = 0.1103 \times DBH^{1.4658}$ $W(\text{根}) = 0.0079 \times DBH^{2.6849}$	周国逸等 ^[25]

2.2 密度控制图构建

2.2.1 完满立木度样地的确定 完满立木度林分样地的筛选采用 Solomon^[26] 提出的确定方法, 在双对数坐标的条件下 $\ln(N)$ - $\ln(QMD)$ 的关系中, 斜率为 -1.605 恒定值, 之后利用最大 $\ln(N)$ 和 $\ln(QMD)$ 组合的样地数据, 计算出截距 a ; 然后用得出的自然稀疏模型计算每块纯林样地的最大林分密度 (N_{max}); 根据 N/N_{max} 求出每块样地的相对密度指数 (RD), 当 $RD > 0.7$ 就可以视为完满立木度样地, 用于构建自然稀疏模型。

2.2.2 自然稀疏模型构建 本研究采用 Reineke 自然稀疏模型^[27], 该模型描述了林分平方平均胸径和每公顷株数的关系, 模型的方程形式如下:

$$\ln(N) = -1.605 \ln(QMD) + \alpha_1 \quad (1)$$

式中: N 表示每公顷林木株数, QMD 表示林分平方平均直径 (cm), α_1 为模型的截距系数。

普通最小二乘法 (OLS) 是线性回归模型最基本的参数估计方法, 也常用于树木生长模型的估计^[28, 29]。然而在生态数据中的大多数变量存在多重共线性、离异值等缺点, 很难满足这些要求^[30]; 且普通最小二乘法 (OLS) 拟合出的通常是一条体现数据点分布的中心趋势线而非最大密度线, 因此普通最小二乘法 (OLS) 拟合出来的模型参数有其局限性。分位数回归法 (QR) 对于异常点较为敏感, 尤其是林分自疏线上限附近的异常点, 且进行统计推断比较困难^[31]; 部分学者认为 RMA 法比

OLS 法更客观科学, 更适合被用在拟合最大密度线上, 其能够阐明植物个体大小与密度之间的真实关系^[32-34]。因此, 本研究采用 RMA 对 Reineke 自然稀疏模型进行拟合。

2.2.3 辅助模型构建 为了能更准确反映马尾松人工林的生长状况, 碳储量密度控制图除自然稀疏模型外, 还有优势高模型、蓄积模型、碳储量模型及立地指数等 4 个辅助模型构成。本研究采用非线性最小二乘法 (nonlinear least squares, NLS) 拟合优势高模型、蓄积模型、碳储量模型。相关辅助模型的方程式如下所示:

$$DH = a \cdot QMD^b \cdot N^c \quad (2)$$

$$V = a \cdot N \cdot (QMD - b)^c \quad (3)$$

$$CS = a \cdot QMD^b \cdot N^c \cdot DH^d \quad (4)$$

式中: QMD 为林分平方平均直径 (cm), N 为每公顷株数 (株·hm⁻²), DH 为林分优势高 (m), V 指材积 (m³), CS 为碳储量 (Mg·hm⁻²), t 为林龄, a 、 b 、 c 、 d 均为模型参数。

优势木树高根据 Tang^[14] 和 Castedo^[35] 以每公顷 100 株最大的优势木平均高来确定, 本研究的样地为一亩地, 所以样地内取 7 株胸径最大的优势木的平均高来计算优势木树高^[36]。由于一类数据没有观测林木树高, 本研究采用杜志^[37] 建立的湖南省马尾松树高方程计算林木树高, 具体方程式如下:

$$H = 1.41 * DBH^{0.7448} \quad (5)$$

式中： H 为林木树高（m）， DBH 为林木胸径（cm）。

本研究利用刘燕英等^[38]建立的马尾松人工林立地指数模型，模型具体形式如下：

$$Hd = 439.93 * [1 - \exp(-0.001 * t)]^{0.914} \quad (6)$$

式中： Hd 为优势木高（m）， t 为林龄。

2.2.4 模型检验评价 本研究采用均方根误差（ $RMSE$ ）、绝对偏差（ $Absolute\ bias$ ）、决定系数（ R_{adj}^2 ）3个统计量对模型的拟合优度进行评价，相关统计量公式如下所示：

$$\text{均方根误差 (RMSE)} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (7)$$

$$\text{绝对偏差 (Absolute bias)} \quad bias = \frac{\sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j|}{n} \quad (8)$$

$$\text{调整后决定系数 (Adjusted } R_{adj}^2) \quad R_{adj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \times \frac{n-1}{n-p} \quad (9)$$

式中： L 是对数似然函数的最大值； p 是模型参数个数； n 是样本单元的数量； y_i 和 \hat{y}_i 分别是因变量的观察值和预测值， \bar{y} 是观察值的均值。

2.2.5 林分碳储量密度控制图绘制 密度控制图在坐标轴上进行绘制，其中以林分平均胸径 QMD 为横坐标，以每公顷株数密度 N 为纵坐标。Vacchiano^[8] 建议将自然稀疏模型的截距向上平移到其 95% 置信区间的上限，作为最大密度线。相关学者^[13, 39, 40] 指出，一般将最大密度线的 60% 作为最优密度的上限，保证了林木不会因为密度过高而出现激烈竞争，导致林木个体死亡；最大密度线的 30% 作为最优密度的下限，保证林木能够具有充足的生长空间，林地空间得到有效利用；最大密度线的 20% 作为林分郁闭值，保证林分的郁闭状态。将上述 3 条密度线、等优势高线、等蓄积量线、等碳储量线叠加到坐标系上，生成最终的碳储量密度控制图。本研究采用 R 语言的 *ggplot2* 包进行密度控制图绘制。

2.2.6 慈利县马尾松人工林密度诊断图的研制

当林分密度位于合理密度区间范围内（最大密度线的 30%-60%），此时的林分中的林木个体处于互利竞争状态，即不会发生因为对自然资源的恶性竞

争，所导致的自然稀疏现象。此时的林分处于一种合理、稳定、健康的状态；当林分密度高于最优密度上限时（最大密度线的 60%），此时的林木个体之间会发生对温度、光照、养分等自然资源的互斥性竞争，导致林木死亡现象的发生，造成了碳释放；当林分密度低于最优密度下限时（最大密度线的 30%），会造成林地空间资源的浪费。本研究以湖南省慈利县马尾松林为例，基于二类调查数据马尾松小班林分密度，将位于最大密度线 30%-60% 的林分，定义为合理密度林分，将位于最大密度线的 30% 以下的林分定义为低密度林分，将位于最大密度线的 60% 以上的林分定义为高密度林分，最终构建慈利县马尾松人工林密度状态分布诊断图。

3 研究结果

3.1 自然稀疏方程构建

基于马尾松人工纯林 835 个样地数据，采用 Solomon 提出的完满立木度样地确定的方法，计算每一块样地的相对密度指数（RD），当相对密度指数（RD）大于等于 0.70，就属于完满立木度样地。本研究最终从 835 块马尾松相对纯林中筛选出 54 块完满立木度样地（如图 1）。采用 RMA 回归，拟合得到湖南马尾松纯林 Reineke 自然稀疏模型：

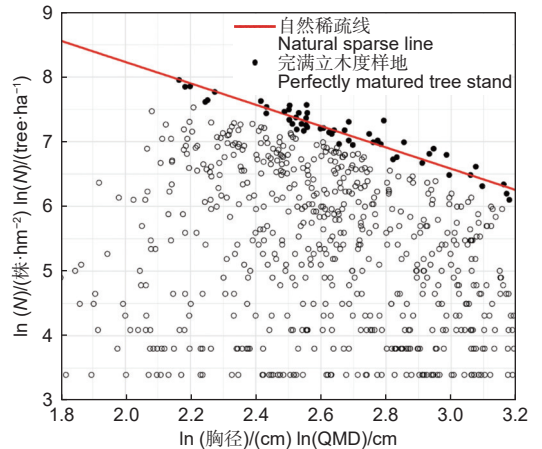


图 1 自然稀疏线及完满立木度样地
Fig. 1 Natural sparse line and perfect standing degree plot.

$$\ln(N) = 11.533 - 1.650 \times \ln(QMD) \quad (10)$$

式中 R^2 为 0.926， $RMSE$ 为 0.127。

3.2 辅助模型构建

基于马尾松人工纯林 835 个样地数据，对优

势高模型 (式 2)、蓄积量模型 (式 3)、碳储量模型 (式 4) 进行了拟合, 模型参数估计结果与拟合优度统计量如表 3、表 4 所示。辅助模型的参数估计值均表现出显著性 ($p < 0.05$), 决定系数

R^2_{adj} 均在 0.90 以上, 均方根误差 RMSE 和绝对偏差 Bias 较小 (表 4), 说明马尾松人工纯林数据对三个辅助模型方程的拟合效果较好。

表 3 马尾松人工纯林辅助模型参数估计结果

Table 3 Regression analysis results of coefficients of equations to calculate dominant height, stand volume and carbon storage for *Pinus massoniana* plantation.

参数 parameter	优势高模型 Dominance height model			蓄积量模型 volume model			碳储量模型 Carbon stock model		
	参数 估计值 Estimation	标准差 SD	Pr(> t)	参数 估计值 Estimation	标准差 SD	Pr(> t)	参数 估计值 Estimation	标准差 SD	Pr(> t)
a	0.758973	0.031265	<2e-16 ***	1.726e-04	1.059e-05	<2e-16 ***	5.388e-05	2.100e-06	<2e-16 ***
b	0.732092	0.008699	<2e-16 ***	5.383e-01	1.144e-01	2.97e-06 ***	2.144e+00	2.016e-02	<2e-16 ***
c	0.144165	0.003694	<2e-16 ***	2.399e+00	1.569e-02	<2e-16 ***	9.435e-01	4.650e-03	<2e-16 ***
d							4.896e-01	2.656e-02	<2e-16 ***

表 4 马尾松人工纯林辅助模型拟合优度统计量

Table 4 Goodness-of-fit of equations to calculate dominant height, stand volume and carbon storage for *Pinus massoniana* plantation.

	R^2_{adj}	RMSE	Bias
优势高模型 Dominance height model	0.938	0.727	0.536
蓄积模型 volume model	0.997	2.006	0.976
碳储量模型 Carbon stock model	0.997	0.917	0.409

注: R^2_{adj} 为决定系数, RMSE 为均方根误差, Bias 为绝对偏差。

马尾松蓄积模型:

$$V = 1.726e - 04 \times N \times (QMD - 5.383e - 01)^{2.399e+00} \quad (11)$$

马尾松优势高模型:

$$DH = 0.758973 \times QMD^{0.732092} \times N^{0.144165} \quad (12)$$

马尾松碳储量模型:

$$CS = 5.388e-05 \times QMD^{2.144e+00} \times N^{9.435e-01} \times DH^{4.896e-01} \quad (13)$$

3.3 林分密度控制图构建

将自然稀疏线方程 (式 10) 水平上移到截距的 95% 置信区间的上限, 得到最大密度线。将最大密度线, 分别乘以 60%, 30%, 20%, 得到最优密度上限、最优密度下限及林分郁闭度线, 其方程式如下所示:

$$\text{最大密度线 } \ln(N) = 11.880 - 1.650 \times \ln(QMD) \quad (14)$$

$$\text{最优密度线的上限 } \ln(N) = 11.369 - 1.650 \times \ln(QMD) \quad (15)$$

$$\text{最优密度线的下限 } \ln(N) = 10.676 - 1.650 \times \ln(QMD) \quad (16)$$

$$\text{林分郁闭线 } \ln(N) = 10.270 - 1.650 \times \ln(QMD) \quad (17)$$

基于上述密度线模型, 将最大密度线、最优密度线上限、最优密度线下限、林分郁闭线添加到对数轴上, 密度平行线都采用红色线条。此外, 基于辅助模型, 添加等优势高线、等蓄积量线、等碳储量线。蓝色线条表示 12、15、20、25 m 的林分等树高线, 绿色线条表示 50、100、200、300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 的等蓄积量线, 紫色线条表示 10、25、50、100 $Mg \cdot hm^{-2}$ 的等碳储量线。马尾松人工林碳储量密度控制图如图 2 所示。

将林分平均胸径值带入最大密度线、最优密度线上限、最优密度线下限、林分郁闭线方程式, 得到马尾松人工纯林不同林分平均胸径下的株数密度

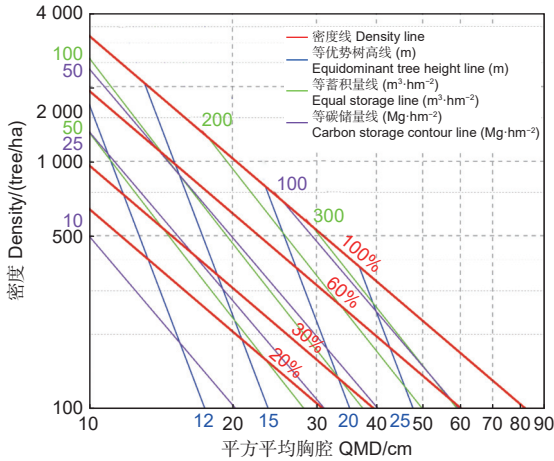


图 2 马尾松人工纯林碳储量密度控制图

Fig. 2 Density management diagram for carbon sequestration of *Pinus massoniana* plantation.

阈值 (表 5)。例如, 当林分平均胸径为 10 cm 时, 林分最大密度为 $3231 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最优密度区间 (最大密度线的 35%~60%) 为 $1130\text{-}1938 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 林分郁闭时 (最大密度线的 20%) 的密度值为 $645 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.4 林分密度控制图应用

基于慈利县二类调查数据, 采用所构建的马尾松碳储量密度控制图, 对慈利县马尾松人工林密度合理性进行诊断, 生成湖南慈利县马尾松人工林密度诊断图 (图 3)。淡黄色区域代表非马尾松林地, 其余 3 个颜色是马尾松林地。其中, 绿色表示最优密度区间的马尾松人工林, 即林分的密度在最优密度上、下限之间; 蓝色表示马尾松人工林的密度较大, 高于最优密度上限; 红色表示马尾松人

工林的密度较小, 低于最优密度下限。从马尾松密度诊断图可以看出, 高密度的马尾松人工林所占比例占压倒性优势, 急需开展密度调控。

4 讨论

本研究基于湖南省第 9 期森林资源连续清查数据, 构建了湖南马尾松人工林碳储量密度控制图, 根据构建出的密度控制图, 利用慈利县二类调查样地数据, 研建了慈利县马尾松人工林的密度诊断图, 通过密度诊断图可以对慈利县马尾松人工林密度情况进行诊断。结果显示: (1) 绝大部分马尾松人工林的密度高于合理密度区间, 林木就会对有限的资源产生竞争, 甚至有些林分会因为竞争产生严重的自然枯死现象; (2) 少部分林分位于合理密度区间范围内, 此时的林分能够充分利用光照、温度、水分等自然资源条件, 同时林木个体之间处于互相促进的状态; (3) 少部分林分密度低于最优密度下限, 此时的林分不能充分利用林地空间, 造成林地资源的浪费。通过抚育间伐、林下补植等措施, 将林分密度调整到合理的密度是促进人工林正向发展的关键措施^[41]。本研究针对慈利县马尾松人工林密度问题, 提出如下建议:

(1) 高密度林分 (高于最优密度的上限)。高密度林分蓄积量集中在 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}\text{-}300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 其碳储量集中在 $50 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}\text{-}100 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。对于高密度的中幼龄林, 采用目标树作业体系, 选择目标树, 伐除目标树周围的干扰树, 为目标树做自由冠, 同时伐除林内 IV、V 级

表 5 马尾松人工纯林不同林分平均胸径下林木株数

Table 5 Maximum density of different diameter of *Pinus massoniana* plantation.

林分平均胸径 (cm) Quadratic mean diameter (cm)	林分最大密度 (株·hm ⁻²) Maximum density of stand/(tree·ha ⁻¹)			
	100%	60%	35%	20%
10 (5.9-9.9)	3231	1938	1130	645
15 (10.0-14.9)	1655	992	579	330
20 (15.0-19.9)	1029	617	360	205
25 (20.0-24.9)	712	427	249	142
30 (25.0-29.9)	527	316	184	105
35 (30.0-34.9)	408	245	143	81
40 (35.0-39.9)	328	196	114	65
45 (40.0-44.9)	270	162	94	54
50 (45.0-49.9)	227	136	79	45

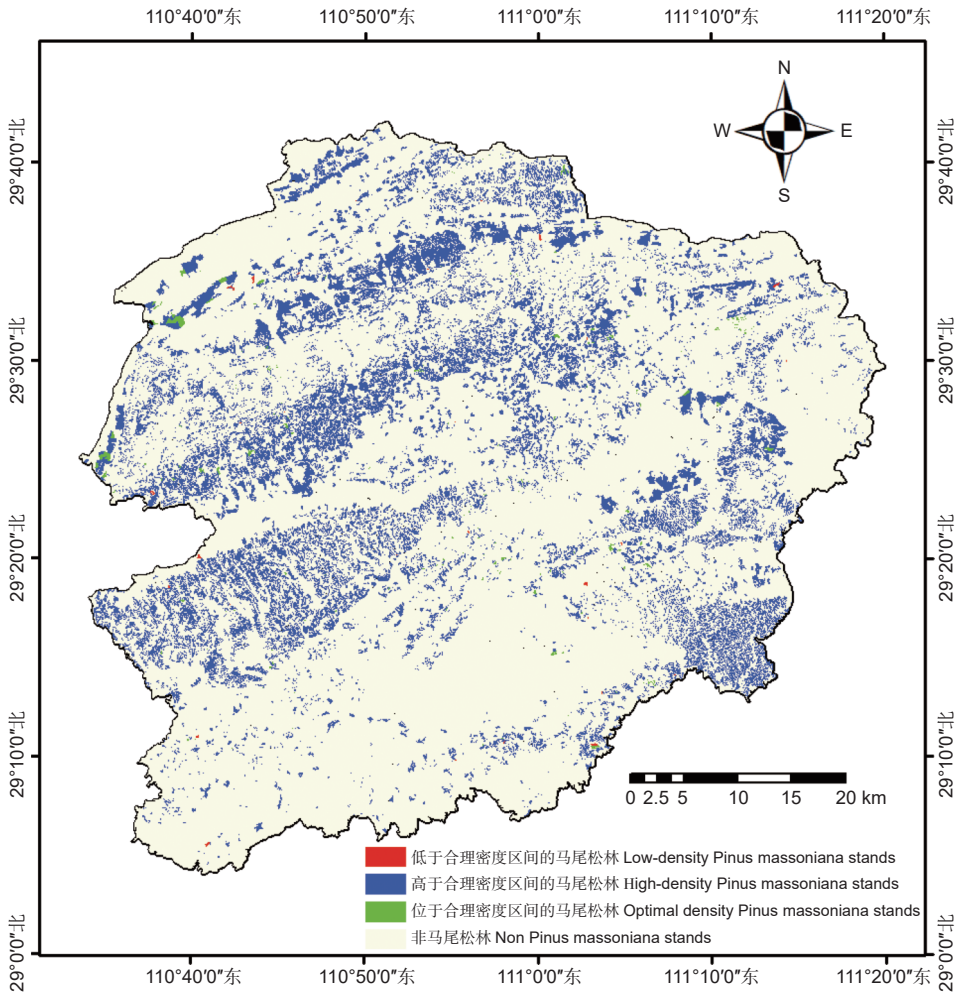


图3 慈利县马尾松人工纯林密度诊断图

Fig. 3 Density warning diagram of *Pinus massoniana*

立木,降低林分密度。此外,在产生的林窗下补植红锥、香樟、桢楠等乡土阔叶树种,营造近自然异龄复层混交林。Andrew^[42]研究发现楠木、青冈、黄檀、香樟等慢生树种的固碳能力远高于速生树种;对于高密度的近熟林,如维持同龄林作业体系,则可以开展渐伐作业,在一个龄级期内分批次收获主林层林木,并同时完成林下造林。此外,也可以采用目标树作业体系,将当前林分改造为异龄复层混交林;对于高密度过成熟林,则急需开展皆伐作业,避免出现因森林自然成熟而导致的碳排放。森林自然成熟是当林分或树木生长到开始枯萎阶段时的状态,出现负生长,是森林收获的底线,自然成熟的不会再储存额外的碳^[43,44]。此外,值得说明的是抚育间伐使活立木的碳转移到木材产品中去,收获林木虽然减少了森林生态系统碳储量,但是只要木材产品不被燃烧,则不被视为森林碳排放^[45]。

(2) 位于合理密度区间范围内的林分(高于最优密度的下限且低于最优密度上限)。合理密度林分蓄积量多集中在 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ - $200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,其碳储量集中在 $25 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ - $100 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。如果继续维持当前的皆伐作业体系,此时的林分不需要采取任何林分密度调控措施,但是需要根据林分密度控制图,及时监测未来森林密度情况,当超出最优密度范围,则需要及时开展森林抚育,将林分密度维持在合理区间范围内;如果计划将当前单层马尾松纯林导向异龄复层混交林,则需要选取目标树,低密度采伐影响目标树生长的干扰树,在产生的林窗下补植红锥、香樟、桢楠等乡土树种,将当前林分逐步导向以乡土树种为主体的异龄复层混交林。

(3) 低密度林分(低于最优密度的下限)。对于低密度林分,首先,建议在林下及时补植红锥、香樟、桢楠等乡土树种,必要时辅助于扩堰、

松土等措施,促进其尽快进入主林层。其次,在主林层选择干形通直、生活力旺盛的林木作为目标树,对目标树进行适当修枝等作业措施,促进目标树的快速生长。

本研究所构建的马尾松碳储量密度控制图是典型的全林分模型,仅从林分密度方面给出森林经营决策信息。因此,适应于马尾松人工纯林,而对于以马尾松为优势树种的多树种混交林并不适应。国内外众多研究表明,生物多样性与森林固碳能力呈现正相关^[46-51]例如, Mensah^[49]通过研究南非云雾带森林生物多样性和生态系统功能之间的关系发现,树种多样性(丰富度)与地上碳储量呈正相关。Huang^[51]发现,物种多样性对亚热带森林的碳汇具有积极的影响,并强调了混交林在缓解气候变化和维护生物保护方面的重要性。此外,异龄复层混交林在生物多样性保护^[52]、水源涵养^[53, 54]、森林游憩^[55]等生态服务功能上,对于人工纯林具有不可比拟的优势。因此,构建多树种混交林密度控制图显得尤为必要。国外不乏多树种混交林密度控制图的案例。例如, Edwin^[56]构建了云杉和冷杉混交林的密度控制图,主要目的是在混交林中如何实施有效的经营管理工作,为我国类似地区的森林经营管理提供参考依据; Mehari^[57]研制了非洲山地冷杉和罗汉松混交天然同龄林的密度控制图,在实施疏伐管理时,既要提高森林的生产力,也要维护生态平衡和生物多样性。

此外,本研究密度控制图的功能仅聚焦于碳储量、蓄积等目标,而密度控制图可以解决林冠火规避^[58]、动物栖息生境构建^[59]、水源涵养^[15]以及防风灾能力提升^[60]等问题,例如 Barrio^[58]通过使用密度控制图,可以有效地监测和控制森林密度,降低林冠火的发生概率; John^[59]发现啄木鸟种群的恢复和整个共同分布区的长叶松树林的恢复之间有着重要的联系,构建了为维持濒危啄木鸟的栖息地的密度控制图。因此,建议将森林的其他功能的等密度线加入到密度控制图,构建多目标密度控制图,有助于更全面地评估森林的可持续发展状况,为我国森林资源的经营管理提供科学依据。

5 结论

林分密度控制图是森林可持续经营的一个有效工具,本研究通过林分密度状况与固碳能力之

间的量化关系,合理调控湖南省马尾松人工林的经营密度,使其向最优密度范围内发展,有利于提升森林的固碳能力,发挥森林多重功能与效益。对于森林经营管理者来说,利用林分密度控制图确定合理密度区间,对于低密度林分,及时补植固碳能力强的树种,对于高密度林分,确定合理的采伐强度促进碳储量的增长,精准确定采伐强度,对于提高不同林分的碳汇功能具有重要意义,为其经营管理森林提供决策支持依据。除此之外,随着人工林的多目标经营,单一目标的密度控制图向多功能密度控制图转变,根据不同地区不同树种的具体情况来构建才能满足当地经营目标的需求,能够更精准的预测林分生长状态,为森林经营者提供更优的抚育方案,对提高森林结构多样性和功能具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 李永宁,张宾兰,秦淑英,等.郁闭度及其测定方法研究与应用[J].世界林业研究,2008,21(1):40-46.
- [2] 欧建德.造林密度对大杉生长形质及林分分化的影响[J].东北林业大学学报,2018,46(1):7-11.
- [3] NEWTON P F. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 98(3):251-265.
- [4] ANDO T. Growth analysis on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.). II. Analysis of stand density and growth[J]. Bulletin of the Forestry & Forest Products Research Institute Tokyo, 1962, 147: 45-77.
- [5] LONG J N, SHAW J D. A Density Management Diagram for Even-aged Ponderosa Pine Stands[J]. *Western Journal of Applied Forestry*, 2005, 20(4):205-215.
- [6] VACCHIANO G, MOTTA R, LONG J N, et al. A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): A tool for assessing the forest's protective effect[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7):2542-2554.
- [7] CASTEDO-DORADO F, CRECENTE-CAMPO F, ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P, et al. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability[J]. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2009, 82(1):1-16.
- [8] VACCHIANO G, DEROSE R J, Shaw J D, et al. A density management diagram for Norway spruce in the temperate European montane region[J]. *European Journal of Forest Research volume*, 2013, 132(3):535-549.
- [9] 吴承祯,洪伟.杉木人工林自然稀疏规律研究[J].林业科学,

- 2000, 36 (4): 97-101.
- [10] 向玉国, 郑小贤, 刘波云, 等. 福建将乐林场杉木碳储量密度控制图的编制 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2014, 42 (8): 99-104.
- [11] 刘占朝, 王团荣, 张宏文, 等. 河南省油松飞播林分密度控制图编制 [J]. 林业资源管理, 2003, 4 (4): 24-27.
- [12] 靳爱仙, 周国英, 史大林, 等. 马尾松人工林碳储量密度控制图的编制 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24 (3): 54-57.
- [13] 王建军, 陆元昌, 赵秀海, 等. 马尾松人工林密度控制图及密度预警研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41 (05): 31-37.
- [14] Xiaolu T, César P-C, Torsten V, *et al.* Development of stand density management diagrams for Chinese fir plantations [J]. *Forestry*, 2016, 89 (1): 36-45.
- [15] 汪 晶, 向玉国, 郑小贤. 落叶松人工林水源涵养量密度控制图的编制与应用 [J]. 林业资源管理, 2015 (1): 49-53.
- [16] 曹宗英, 勾晓华, 高琳琳, 等. "双碳"背景下的祁连山森林碳汇研究与对策建议 [R]. 祁连山生态系统发展报告, 2021: 127-136.
- [17] 陈怀祥. 抚育间伐对秦岭南坡红桦林生长及固碳能力的影响 [D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2018.
- [18] 刘宗飞, 赵伟峰, 庞文静. 中国各地区森林资源相对变化分析——基于单一量化的森林资源丰裕度指数 [J]. 林业经济问题, 2017, 37 (5): 6-11 + 98.
- [19] 祁承经. 湖南植被 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1990.
- [20] 吴 毅, 周国英, 祁承经, 等. 湖南紫金山马尾松的群落特征及物种多样性分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31 (11): 120-124.
- [21] 彭其龙, 陈哲夫, 陈端吕. 湖南栎类-马尾松天然混交林单木生长模型研究 [J]. 林业资源管理, 2020 (2): 94-102 + 134.
- [22] 陈 政, 陈国生. 湖南省森林植被空间分布及影响因子 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42 (8): 128-136.
- [23] 石振威, 曾思齐, 龙时胜, 等. 湖南针栎混交林直径分布及演替动向 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34 (5): 172-178.
- [24] 李海奎, 雷洲才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [25] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 等. 中国森林生态系统碳储量——生物量方程 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [26] SOLOMON D S, ZHANG L. Maximum size-density relationships for mixed softwoods in the northeastern USA [J]. *Forest Ecology & Management*, 2002, 155 (1): 163-170.
- [27] REINEKE L H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests [J]. *Journal of Agricultural Research*, 1933, 46 (7): 627-638.
- [28] ZHANG L, BI H, GOVE J H, *et al.* A comparison of alternative methods for estimating the self-thinning boundary line [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35 (6): 1507-1514.
- [29] 孙洪刚, 张建国, 段爱国. 数据点选择与参数估计方法对杉木人工林自疏边界线的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34 (4): 409-417.
- [30] 车少辉. 基于神经网络方法的杉木人工林林分生长模拟研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [31] WELLER D E, GARDNER R H, SHUGART H H. Mathematical and statistical analysis of the $-3/2$ power rule of self-thinning in even-aged plant populations [J]. *weller donald e*, 1985, 57: 23-43.
- [32] ZEIDE. ANALYSIS OF THE $3/2$ POWER LAW OF SELF-THINNING [J]. *FOREST SCI*, 1987, 33 (2): 517-537.
- [33] WELLER D E. Self-Thinning Exponent Correlated with Allometric Measures of Plant Geometry [J]. *Ecology*, 1987, 68 (4): 813-821.
- [34] BÉGIN E, BÉGIN J, BÉLANGER L, *et al.* Balsam fir self-thinning relationship and its constancy among different ecological regions [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31 (6): 950-959.
- [35] CASTEDO-DORADO F, CRECENTE-CAMPO F, P. Á-Á, *et al.* Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability [J]. *Forestry*, 2009, 82 (1): 1-16.
- [36] 雷相东, 朱光玉, 卢 军. 云杉冷阔叶混交过伐林林分优势高估计方法的研究 [J]. 林业科学研究, 2018, 31 (1): 36-41.
- [37] 杜 志, 甘世书. 基于 BP 神经网络的杉木和马尾松树高曲线模型研究 [J]. 中南林业调查规划, 2017, 36 (4): 36-39.
- [38] 刘燕英, 郭文清, 刘崇艺. 溆浦县马尾松人工林立地指数简表编制 [J]. 湖南林业科技, 2015, 42 (1): 44-48.
- [39] LUIS J F S, FONSECA T F. The allometric model in the stand density management of *Pinus pinaster* Ait. in Portugal [J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61 (8): 807-814.
- [40] 田 猛, 曾伟生, 孟京辉, 等. 福建杉木人工林密度控制图研制及应用 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30 (3): 157-163.
- [41] 田宇明. 水曲柳人工幼龄林密度效应的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [42] ANDREW S. Slow-growing trees sequester more carbon [J]. *Science*, 2019, 364 (6447): 1248-1249.
- [43] JIANG M, MEDLYN B E, DRAKE J E, *et al.* The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment [J]. *Cold Spring Harbor Laboratory*, 2019 (7802): 227-231.
- [44] LUO Y, NIUS. Mature forest shows little increase in carbon uptake in a CO₂-enriched atmosphere [J]. *Nature*, 2020, 580 (7802): 191-192.
- [45] 刘巍巍, 王效科, 逯 非, 等. 造林再造林、森林采伐、气候变化、CO₂ 浓度升高、火灾和虫害对森林固碳能力的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36 (8): 2113-2122.
- [46] RUIZ-JAEN M C, POTVIN C. Tree Diversity Explains Variation in Ecosystem Function in a Neotropical Forest in Panama [J]. *Biotropica*, 2010, 42 (6): 638-646.
- [47] WEIFENG W, XIANGDONG L, ZHIHAI M, *et al.* Positive Relationship between Aboveground Carbon Stocks and Structural Diversity in Spruce-Dominated Forest Stands in New Brun-

- swick, Canada[J]. *Forest Science*, 2011, 57 (6) : 506-515.
- [48] RUIZ - BENITO P, GÓMEZ - APARICIO L, PAQUETTE A, *et al.* Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23 (3) : 311-322.
- [49] MENSAH S, VELDTMAN R, ASSOGBADJO A E, *et al.* Tree species diversity promotes aboveground carbon storage through functional diversity and functional dominance[J]. *Ecology and evolution*, 2016, 6 (20) : 7546-7557.
- [50] ERCANLI, IIKER. Positive effect of forest structural diversity on aboveground stand carbon stocks for even-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the Sarcicek Forest, Northern Turkey[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2018, 33 (5) : 455-463.
- [51] HUANG Y C Y, CASTRO-IZAGUIRRE N, BARUFFOL M, *et al.* Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment[J]. *Science*, 2018, 362 (6410) : 80-83.
- [52] 鲁绍伟, 刘凤芹, 余新晓, 等. 北京市八达岭林场森林生态系统健康性评价 [J]. *水土保持学报*, 2006 (03) : 79-82 + 105.
- [53] 黄修麟. 马尾松细柄阿丁枫异龄复层混交林的水源涵养功能 [J]. *福建林业科技*, 2011, 38 (2) : 22-24.
- [54] 王会利, 唐玉贵, 韦娇媚. 低效林改造对土壤理化性质及水源涵养功能的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2010, 008 (005) : 72-78,85.
- [55] 郭二果, 王 成, 郟光发, 等. 北京西山典型游憩林空气悬浮颗粒物季节变化规律 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38 (10) : 55-57
- [56] EDWIN S, MARGARET P, ROLLAND G, *et al.* A stand density management diagram for spruce-balsam fir mixtures in New Brunswick[J]. *Forestry Chronicle*, 2007, 83 (2) : 187-197.
- [57] TESFAYE M A, BRAVO F, BRAVO-OVIEDO A. Alternative silvicultural stand density management options for Chilimo dry afro-montane mixed natural uneven-aged forest using species proportion in Central Highlands, Ethiopia[J]. *European Journal of Forest Research*, 2016, 135 (5) : 1-12.
- [58] BARRIO A M, J. G. Á G. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules[J]. *Forestry*, 2005, 78 (3) : 209-216.
- [59] SHAW J D, LONG J N. A density management diagram for longleaf pine stands with application to red-cockaded woodpecker habitat[J]. *Southern Journal of Applied Forestry*, 2007, 31 (1) : 28-38.
- [60] MENG J, BAI Y, ZENG W, *et al.* A management tool for reducing the potential risk of windthrow for coastal *Casuarina equisetifolia* L. stands on Hainan Island, China[J]. *European Journal of Forest Research*, 2017, 136 (3) : 543-554.

Development of Stand Density Management Diagram for Carbon Storage Management for Masson Pine Plantations

LI Yu-hao¹, NIU Qing-yun², MENG Jing-hui²

(1. Survey & Planning Institute of State Forestry and grass Administration, Beijing 100714, China; 2. Beijing Forestry University, Research Center of Forest Management Engineering of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) is an important plantation species in China. It not only provides essential economic benefits but also plays a crucial role in ecological services such as carbon sequestration, and adaption to climate change. Thinning is a vital technique in the management of plantations. However, the current practice of thinning in Masson pine plantations suffers from a qualitative rather than quantitative issue, which restricts the plantation management. This study aims to establish a density management diagram for Masson pine plantations to guide the precise thinning process. [Method] Based on the permanent plot of pure Masson pine plantations in Hunan Province, the basic density management diagram was constructed obeying to the Reineke rule. Subsequently, carbon storage contours was further imposed on the basic stand density management diagram to produce the carbon storage management diagram. Finally, using the management diagram, the stand density of Masson pine plantations in Cili County in Hunan Province was evaluated. [Result] In Cili County, Hunan Province, most of the stand density of Masson pine plantations were larger than the reasonable density range. This resulted in intense competition among trees for limited resources such as light, temperature, and moisture, and, in some stands, even severe natural mortality occurred. Thinning is urgently required to reduce stand density. A small number of stands were within the reasonable density range. These stands fully utilized natural resources with trees mutually promoting one another. Some stands had densities below the lower limit of the optimal range, resulting in inefficient utilization of forest land space and resource wastage. Understory planting is urgently needed. [Conclusion] The stand density management diagram for Masson pine trees developed in this study can accurately guide forest management practices. Furthermore, it can provide an assessment of the rationality of stand density for forest management enterprise.

Keywords: Masson pine plantations; Reineke model; carbon storage stand density management diagram; Density diagnostic chart

(责任编辑: 崔 贝)