

红树林空间结构均质性指数

李建军¹ 李际平¹ 刘素青² 张宏伟¹ 冯湘兰¹

(1. 中南林业科技大学 长沙410004; 2. 广东海洋大学 湛江524000)

摘要: 根据国内外天然林空间结构已有的研究成果,结合景观生态学理论,提出红树林林分空间结构优化的均质性目标和均质性指数的新概念;对影响林分空间结构均质性目标的各参数进行多目标规划,并给出均质性指数的定义和量化公式;首次使用灰色关联度分析法对广东湛江红树林自然保护区不同潮带林分空间结构影响因子调查数据与林木均质性指数的关联度进行分析,实例分析表明,各影响因子与均质性指数的关联度大小表现为竞争指数 0.716 > 混交度 0.686 > 空间密度指数 0.670 > 目的树种特性指数 0.644 > 角尺度 0.638 > 大小比数 0.616 > 健康指数 0.607。林木均质性指数能较客观地反映红树林林木对所在林分均质性的影响,为建立红树林生态系统林分空间优化模型提供理论依据。

关键词: 红树林生态系统; 林分空间结构; 均质性目标; 均质性指数; 灰色关联度分析法

中图分类号: S757.1, TP18 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2010)06-0006-06

Homogeneity Index of Stand Spatial Structure of Mangrove Ecological System

Li Jianjun¹ Li Jiping¹ Liu Suqing² Zhang Hongwei¹ Feng Xianglan¹

(1. Central South University of Forest Science and Technology Changsha 410004; 2. Guangdong Ocean University Zhanjiang 524000)

Abstract: Based on the research of natural forest spatial structure in China and abroad, and combined with the theory of landscape ecology, this paper proposed the homogeneity target optimizing the forest stand spatial structure of mangrove, and the new concept of homogeneity index. Parameters affecting the forest stand spatial structure homogeneity were formatted into multiple-objectives parameters. We also put forward the definition and the quantifying formula of homogeneity index. GRA (grey relation analysis) was for the first time used to analyze relationship between forest homogeneity index and factors, which were derived a set of survey data, influencing mangrove forest stand spatial structure in different tidal zones in Mangrove Nation Natural Reserve at Zhanjiang, Guangdong. The case study indicated that the relationship and priority order between influencing factors and homogeneity index are: competition index 0.716 > mingling 0.686 > spatial density index 0.670 > Purpose tree species characteristic index 0.644 > neighborhood pattern 0.638 > neighborhood comparison 0.616 > Health index 0.607. The forest homogeneity index can objectively reflect mangrove's influences on forest stand homogeneity, and this study provided a theoretical basis for establishing an optimized model of forest spatial structure in mangrove ecological systems.

Key words: mangrove ecological system; stand spatial structure; target of spatial structure; homogeneity index; grey relation analysis

红树林生态系统是处于海洋生态系统与陆地生态系统之间经长期演替形成的一种系统结构稳定、生产力高的特殊森林生态系统,可看做一种顶极群落景观,在生物多样性与减灾防灾功能上具有不可替代的作用(韩维栋等,2009)。在保护和恢复红树林中,如何重构林分空间结构,恢复红树林的功能,发挥其系统功能和减灾防灾效用成为当前迫切需要解决的问题。林分空间结构是从单木的角度表达林分在某一时刻的空间信息,决定了林木之间的竞争

势及其空间生态位,从而很大程度上决定了林分的稳定性。林分空间结构理论的主要研究内容为在空间上优化和调整林分内的林木分布,建立林木的空间因子指标体系(Mark *et al.*, 1998.)。而如何确定林分的空间结构优化目标、合理选择其影响因子,同样是天然林生态系统恢复和经营研究的焦点(汤孟平等,2004),在此背景下,研究红树林生态系统空间结构优化目标、建立其影响因子指标体系具有重要的理论意义和实践意义。

景观生态学的景观、斑块理论中,斑块内部要求均质且与邻近斑块有着本质不同的特征(Weintraub *et al.*, 1991),近年来国内外学者在研究天然林次生林生态采伐时把林分作为空间结构研究的基本单位,将斑块均质性理解为林分空间结构的均质性(张会儒等, 2006)。景观生态学理论和国内外天然林空间结构已有的研究成果,为明确红树林生态系统空间结构优化目标、量化指标参数及建立空间结构指标体系提供了参考和理论依据。本研究提出红树林林分空间结构优化目标及描述红树林林分内各单株林木空间结构特征的量化指标—均质性指数,并应用灰色关联度分析法研究广东湛江红树林国家自然保护区不同潮带林分空间结构因子与均质性指数的关联程度。

1 研究区概况

研究区位于广东湛江红树林国家自然保护区(109°40′—110°35′E, 20°14′—21°35′N),其红树林面积占全国红树林面积的33%。红树林中以白骨壤(*Avicennia marina*)为优势种的林分最多,其次为以红海榄(*Rhizophora stylosa*)和秋茄(*Kandelia candel*)为优势树种的林分。广东湛江廉江市高桥红树林保护区,属于受过干扰后有所恢复的天然红

树混交林,该保护区始建于1991年7月,地处广东、广西交界的北部湾英罗港,东侧为卖皂海,西侧为官寨海。1997年12月经国务院批准,由省级自然保护区晋升为国家级自然保护区。全保护区总面积1.3万 hm^2 ,是我国最大的红树林自然保护区。主要保护对象是红树林、鸟类及其栖息地、浅海生物资源等。区内有珍贵红树林树种24种,鱼类127种,贝类110种,鸟类190多种。2002年保护区加入拉姆萨公约,成为国际重要湿地。

2 数据来源

根据林分空间结构理论和森林生态系统经营理论(惠刚盈等, 2003; 刘素青, 2006)和红树林生长环境特殊性等特点,分析红树林保护区典型林分,按照研究数据调查要求,选择7个具有代表性的典型地段设立标准样地7块,分别编号为 $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ 和 Q_7 ,样地概况见表1。样地面积为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$,样地起测径级为3 cm。对每个样地进行每木调查,调查内容包括调查木和周围4株最近邻近木的树种、胸径、树高、枝下高、冠幅、目的树种特性指数、健康指数、角尺度、树种多样性指数(混交度)和大小比数10个指标以及调查木与4株相邻木的距离(刘素青, 2006; 惠刚盈等, 2007; 李建军等, 2008)。

表1 样地概况

Tab. 1 Survey of sample plots

样地编号 Plot No.	树种 Tree species	株数 Tree number	底质 Fundus	潮带 Tidal zone	郁闭度 Canopy density
Q_1	木榄(<i>Bruguiera gymnorrhiz</i>), 桐花(<i>Aegiceras corniculatum</i>), 秋茄(<i>Kandelia candel</i>)	38	淤泥 Silt	高潮带 Climax zones	0.80
Q_2	红海榄(<i>Rhizophora stylosa</i>), 木榄(<i>B. gymnorrhiz</i>), 秋茄(<i>K. candel</i>)	47	淤泥 Silt	中潮带 Moderate tidal zones	0.90
Q_3	秋茄(<i>K. candel</i>), 木榄(<i>B. gymnorrhiz</i>), 桐花(<i>Aegiceras corniculatum</i>)	41	淤泥 Silt	高潮带 Climax zones	0.80
Q_4	白骨壤(<i>Avicennia marina</i>), 桐花(<i>A. corniculatum</i>), 木榄(<i>B. gymnorrhiz</i>)	38	淤泥 Silt	中潮带 Moderate tidal zones	0.85
Q_5	红海榄(<i>R. stylosa</i>), 木榄(<i>B. gymnorrhiz</i>), 秋茄(<i>K. candel</i>)	43	淤泥 Silt	中潮带 Moderate tidal zones	0.90
Q_6	红海榄(<i>R. stylosa</i>), 白骨壤(<i>A. marina</i>), 木榄(<i>B. gymnorrhiz</i>)	37	淤泥 Silt	低潮带 Low tidal zones	0.80
Q_7	白骨壤(<i>A. marina</i>), 木榄(<i>B. gymnorrhiz</i>), 桐花(<i>A. corniculatum</i>), 红海榄(<i>R. stylosa</i>)	42	淤泥 Silt	低潮带 Low tidal zones	0.85

3 林分空间结构均质性指数

3.1 均质性指数的参数

林分内林木均质性指数定义的关键问题是合理选择反映红树林特征的参数和影响因子。林分空间结构包括混交、竞争和林木空间分布格局3方面

(惠刚盈等, 2001; 雷相东等, 2002),根据林分空间结构从单株林木的角度表达林分在某一时刻的空间信息的特点,结合红树林生态系统的特殊性,研究红树林林分均质性指数从林分内单株林木的树种特性、生长状况、混交、竞争和林木空间分布格局5方面选择参数。

1) 树种特性方面的均质性反映林木是否为顶级群落景观树种, 当地顶级群落景观是长期演替形成的一种系统结构稳定、生产力高的森林生态系统, 是森林生态系统经营的目标群落景观, 用目的树种特性指数反映顶级群落景观树种关系 (Hof *et al.*, 2000; 刘素青, 2006)。根据群落演替形成过程的树种组成特点, 目的树种特性分成 5 种类型 (刘素青, 2006): ① 顶级群组成树种, $A_i = 1$; ② 过度性群落树种, $A_i = 0.75$; ③ 先锋群树种, $A_i = 0.5$; ④ 非乡土树种, $A_i = 0.25$; ⑤ 入侵树种, $A_i = 0$ (A_i 为第 i 株林木的目的树种特性指数)。

2) 根据古树群古树植株生长情况按标准将每株红树生长势分级, 确定林木的生长情况 (韩维栋等, 2009), 林分在生长状况方面的均质性是不同林木与周围树木相比所处的健康地位, 用健康指数 H_i (刘素青, 2006) 描述林木的生长状况。健康指数是近自然经营单木营林技术的一个操作标准 (刘素青, 2006; 韩维栋等, 2009)。

$$H_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为健康指数变量, 属于 2 点变量, 当参照树 i 比邻近木 j 的健康状况差, $x_{ij} = 0$, 否则 $x_{ij} = 1$; n 为邻近木株数。当邻近树木取 4 株进行观察时, 健康指数 H_i 可能取值为: ① $H_i = 0$, 参照树的健康差于相邻的 4 株树木; ② $H_i = 0.25$, 参照树的健康差于相邻的 3 株树木; ③ $H_i = 0.5$, 参照树的健康差于相邻的 2 株树木; ④ $H_i = 0.75$, 参照树的健康差于相邻的 1 株树木; ⑤ $H_i = 1$, 参照树的健康与相邻的 4 株树木一致。

3) 林分在混交方面的均质性是不同树种林木之间充分隔离, 混交林中树种相互隔离程度越高, 林分稳定性越高 (张会儒等, 2006), 均质性指数在混交方面从树种和大小分化 2 方面考虑选择树种多样性指数 M_i (惠刚盈, 2003 等; 刘素青, 2006) (以下简称混交度) 和大小比数 U_i (惠刚盈等, 2003) 作为混交均质量化参数。多样性指数 (混交度) (刘素青, 2006) 用来说明混交林中树种空间隔离的程度。它被定义为参照树 i 的 n 株最近相邻木中与参照树不属同种的个体所占的比例, 用公式表示为:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij}, \quad (2)$$

式中: M_i 为林木 i 点混交度; v_{ij} 是一个离散型的变量, 当参照树 i 与第 j 株相邻木非同种时 $v_{ij} = 1$, 反之, $v_{ij} = 0$ 。大小比数 (u_i) (惠刚盈等, 1999) 被定义为大于参照树的相邻木数占所考察的全部最近相邻

木的比例, 公式表示为:

$$u_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij}, \quad (3)$$

式中: u_i 为大小比数, u_i 值越小, 说明该树种在某一比较指标 (胸径、树高或树冠等) 上越优先, 依 u_i 值大小升序排列即可表明林分中所有树种在某一比较指标上的优劣程度; k_{ij} 为离散变量, 若参照树 i 比邻近树 j 小, $k_{ij} = 1$, 若参照树 i 比邻近树 j 大, $k_{ij} = 0$ 。

4) 竞争指标通常分为 2 种: 一种与距离有关, 一种与距离无关。按照既要考虑理论上的合理性又要兼顾实践的可行性的原则, 选择与距离有关的竞争指标, 采用 Hegyi (1974) 提出的竞争指数模型:

$$CI_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i \cdot L_{ij}}, \quad (4)$$

式中: CI_i 为林木 i 的点竞争指数; L_{ij} 为对象木 i 与竞争木 j 之间的距离; d_i 是对象木 i 的胸径; d_j 为竞争木 j 的胸径。

5) 林分在空间分布格局的均质性是林木均匀分布, 天然林空间分布格局总的趋势是均匀分布 (张会儒 2006), 考虑林木在水平距离、角度和分布密度几方面选择均质性的指标参数, 采用与树木分布状况和距离相关的角尺度 W_i 及空间密度指数 D_i (惠刚盈等, 2003; 刘素青, 2006; 安慧君, 2003) 确定林木空间分布格局均质性的量化指标。角尺度 (W_i) 是反映树木分布状况的一种空间指标, 它用来描述相邻树木围绕参照树 i 的均匀性。用下式来表示:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}, \quad (5)$$

式中: W_i 为角尺度; z_{ij} 为角尺度取值变量, 它是离散型的, $z_{ij} = 1$ 。空间密度指数 D_i 反映林木空间分布密度的指标。其公式为:

$$D_i = 1 - \frac{r_i}{r_{\max}}, \quad (6)$$

式中: r_i 为参照树 i 包含相邻 n 株树木时的最小半径; r_{\max} 为林分中相邻 2 株林木的最大距离。

3.2 均质性指数的计算

综合林分空间结构树种特性、生长状况、混交、竞争、林木空间分布格局 5 个方面的分析, 为使林木均质性指数能客观地描述林分内林木均质性, 最大发挥影响林分空间结构均质性多方面的作用, 研究采用乘除法 (钱颂迪, 1990) 对各被选指标进行多目标规划, 根据乘除法的基本思想, x 是决策向量, 当在 m 个目标 $f(x_1), \dots, f(x_m)$ 中, 有 k 个 $f(x_1), \dots, f(x_k)$ 要求实现最大, 其余 $f(x_{k+1}), \dots, f(x_m)$ 要求实现最小, 同时有 $f(x_1), \dots, f(x_m) > 0$, 采用评

价函数：

$$Q(x) = \frac{f(x_1)f(x_2)\cdots f(x_k)}{f(x_{k+1})f(x_{k+2})\cdots f(x_m)} \quad (7)$$

根据乘法的基本思想,对林分空间结构 5 个方面的均质性要求为:目的树种特性指数、健康指数、树种多样性指数(混交度)和大小比数以取大为优,而竞争指数、角尺度、和空间密度指数是取小为优。按公式(7)对林分空间结构均质性指标的 5 个子目标进行综合,确定林木均质性指数的计算公式如下:

$$L(g) = \frac{\frac{M(g)}{\sigma_M} \cdot \frac{U(g)}{\sigma_U} \cdot \frac{A(g)}{\sigma_A} \cdot \frac{H(g)}{\sigma_H}}{CI(g) \cdot \sigma_{CI} \cdot D(g) \cdot \sigma_D \cdot W(g) \cdot \sigma_W} \quad (8)$$

$$L(g) = \frac{\frac{1 + M(g)}{\sigma_M} \cdot \frac{1 + U(g)}{\sigma_U} \cdot \frac{1 + A(g)}{\sigma_A} \cdot \frac{1 + H(g)}{\sigma_H}}{[1 + CI(g)] \cdot \sigma_{CI} \cdot [1 + D(g)] \cdot \sigma_D \cdot [1 + W(g)] \cdot \sigma_W} \quad (9)$$

根据每木调查数据及公式(1—6)(惠刚盈等,2003;刘素青,2006;张会儒等,2006)和公式(9)计算出样地 Q₃ 各林木均质性指数(表 2)。

4 均质性指数与其参数的灰色关联度分析

灰色关联法是灰色理论中一种常用的灰色系统分析方法,灰色系统是指部分信息明确、部分信息不明确的贫信息、不确定性系统(邓聚龙,2002),灰色关联分析是灰色理论中的一种分析方法,这种方法的基本思想是根据所研究的因子间变化的相似程度来判断关联程度,近年来在军事、农作物新品种选育及评价中得到广泛应用。红树林生态系统林分空间结构就可以看作是一个灰色系统。对于灰色系统,可以利用小样本数据建模,依据信息覆盖,通过序列生成寻求系统本身存在的规律。灰色关联分析的基本思想就是,根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越相似,相应序列之间的关联度就越大,反之就越小。该方法既可以用于因素间关联度的分析,又可以用来对由多层次综合指标体系所描述的总体的优劣程度做出评判(黄振瑞等,2007)。

按照灰色关联度分析的要求,将林木均质性指数及其 7 个参数和样地 38 株红树林林木视为一个灰色系统。以林木均质性指数为参考数列 X₀,目的树种特性指数、健康指数、多样性指数(混交度)、角尺度、空间密度指数、竞争指数和大小比数 7 个参数分别作为被比较数列 X_i, i = 1, 2, ..., n, 且 X₀ =

式中: L(g) 为单木均质性指数; M(g) 为混交度, σ_M 为混交度标准差; U(g) 为大小比数, σ_U 为大小比数标准差; A(g) 为目的树种特性指数, σ_A 为目的树种特性指数标准差; H(g) 为健康指数, σ_H 为健康指数标准差; CI(g) 为单木竞争指数, σ_{CI} 为竞争指数标准差; D(g) 为空间密度指数, σ_D 为空间密度指数标准差; W(g) 为角尺度, σ_W 为角尺度标准差; g = (g₁, g₂, ..., g_n)。

利用公式(8)对红树林林分进行数据处理时,由于混交度 M、角尺度 W 等作为乘数因子都会有 0 数据出现,难以直接进行比较,故需要对公式(8)进行变换,根据乘法的特点,将公式(8)各参数加 1,得到公式(9)。林木均质性指标反映和衡量的林木与林分均质性目标不变。

[X₀(1), X₀(2), X₀(3), ..., X₀(k)], X_i = [X_i(1), X_i(2), X_i(3), ..., X_i(k)], n 为参试林分内红树林起测林木株数, k 为参试系数,(本研究中 n = 38, k = 7) 则其关联系数 ε_i(k) 如公式(10):

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (10)$$

式中: Δ_i(k) = |X₀(k) - X_i(k)| 为 X₀ 数列与 X_i 数列在第 k 点的绝对差值; 在所有绝对差值中, Δ_{min} 和 Δ_{max} 分别表示所有比较序列各个时刻绝对差中的最小值和最大值; ρ 称为分辨系数, 其意义是削弱最大绝对差数值太大引起的失真, 提高关联系数之间的差异显著性, 取值 [0, 1], 通常取 ρ = 0.5。由于关联系数数目较多, 为了避免信息过于分散, 便于比较, 将各因子同等重要计算等权关联度 r_i, 即得到公式(11):

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (11)$$

由 r_i 依大小排成的数列为关联序列, 根据排序位次确定各影响因子对林木均质性指数的影响程度(唐启义等, 2002)。

在表 2 中, 由于各参数原始数据量纲不同, 难以直接进行比较, 故需要对原始数据进行无量纲化处理, 即以各性状的平均值去除该因子所有数据, 得到一个新的数据列, 所得具体数据见表 3。

根据无量纲处理所得到的数据(表 3), 求得各参数与林分空间结构均质性指数的绝对差值, 即 Δ_i(k) = |X₀(k) - X_i(k)|, 数据见表 4。

表 2 样地林分空间结构均质性指数及其参数

Tab. 2 Stand spatial structure homogeneity index and its parameters in investigation plots

编号 No.	树种 Tree species	目的树种 特性指数 Purpose tree species characteristic index	健康 指数 Health index	多样性指数 (混交度) Mingling	角尺度 Neighborhood pattern	空间密度 指数 Spatial density index	竞争指数 Competition index	大小比数 Neighborhood comparison	均质性指数 Homogeneity index
1	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.75	0	0.75	0.59	0.032	1	117 983.53
2	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	1	0	0.5	0.51	0.057	0.25	132 667.43
3	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0.25	0.25	0.71	0.102	0	179 787.11
4	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.75	0.5	0.5	0.60	0.046	0.75	394 876.26
5	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.75	0.5	0.5	0.57	0.043	1	543 102.24
6	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.25	0.75	0.25	0.71	0.065	0.5	598 213.11
7	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0	0.25	0.75	0.75	0.097	0	252 112.01
8	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.75	0.25	0.5	0.75	0.065	0.5	511 259.18
9	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	1	0.5	0.5	0.93	0.090	1	161 355.16
10	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.5	0	0.5	0.85	0.070	0.5	56 255.2
11	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0	0.25	0.5	0.61	0.038	1	84 311.58
12	木榄 <i>B. gymnorhiz</i>	0.5	0.5	0	0.25	0.69	0.064	0.25	70 813.99
13	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	1	0.25	0.5	0.62	0.052	1	165 678.26
14	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.5	1	0.25	0.77	0.085	0.25	115 554.12
15	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	1	0.25	0.75	0.65	0.032	1	141 871.24
16	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0	0.5	0.77	0.134	0.25	44 054.53
17	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	1	0	0.5	0.79	0.092	0.25	72 340.13
18	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.25	0.75	0.5	0.85	0.137	0.5	76 920.48
19	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	1	0.75	0.75	0.85	0.193	0.25	83 769.27
20	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0.25	0.5	0.85	0.057	1	90 083.98
21	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0.25	0.5	0.64	0.055	0.25	63 740.98
22	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.5	0	0.5	0.71	0.053	1	94 094.51
23	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0	0.5	0.84	0.110	0.25	43 198.06
24	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	1	0	0.5	0.68	0.048	0.75	112 227.58
25	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0.75	0.25	0.85	0.061	1	151 243.49
26	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	1	0.75	0.5	0.51	0.046	0.5	163 817.97
27	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.25	0.25	0.5	0.73	0.067	0.5	71 839.63
28	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.75	0.5	0.75	0.69	0.041	1	144 105.04
29	木榄 <i>B. gymnorhiz</i>	0.5	1	1	0.5	0.74	0.074	0.5	136 033.61
30	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.5	0.25	0.25	0.74	0.051	0.75	121 623.9
31	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.5	0.5	0.25	0.63	0.052	0.5	133 687.52
32	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	1	0.5	0.25	0.89	0.099	0.5	128 698.35
33	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.5	0	0.25	0.52	0.057	0	55 379.94
34	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0.75	0.25	0.75	0.53	0.068	0	56 585.94
35	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.5	0.75	0.5	0.53	0.025	1	188 691.95
36	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0.5	0.25	0.75	0.69	0.062	0.25	63 054.92
37	白骨壤 <i>A. marina</i>	1	0	0.5	0.5	0.68	0.041	0.75	84 785.42
38	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.75	0	0.5	0.5	0.63	0.055	0.75	75 279.62

从表 4 得到各因子的最小差值 Δ_{\min} 为 0 和最大差值 Δ_{\max} 为 3.39, 将 $\Delta_{\min}X_i(k)$ 和 $\Delta_{\max}X_i(k)$ 的值代入 (10) 式, 并取系数 $\rho = 0.5$, 即得到各主要影响因子与林木均质性指数之间的关联系数计算公式 (12) 式:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\Delta_{\min}X_i(k) + 0.5 \times \Delta_{\max}X_i(k)}{\Delta_i(k) + 0.5 \times \Delta_{\max}X_i(k)} \quad (12)$$

把表 4 中相对应的数值代入 (11) 式即可得到各参

数与林木均质性指数之间的关联系数 $\varepsilon_i(k)$ (表 5)。由于关联系数只反映 2 个被比较序列在某一时刻的紧密程度, 因此关联度取 2 个比较序列在各个时刻的关联系数的平均值 (邓聚龙, 2002)。

将求得的关联系数值代入公式 (12) 式, 得到红树林林分空间结构均质性指数与混交度、角尺度、空间密度指数、竞争指数和大小比数等 7 个参数的关联度分别为 0.644, 0.607, 0.686, 0.638, 0.670, 0.716 和 0.616, 关联度大小见表 5 (黄振瑞等, 2007)。

表3 无量纲化样地林分空间结构均质性及其参数

Tab. 3 Stand spatial structure homogeneity index and its parameters data non-dimensional table

编号 No.	树种 Tree species	$X_i(1)$	$X_i(2)$	$X_i(3)$	$X_i(4)$	$X_i(5)$	$X_i(6)$	$X_i(7)$	X_0
1	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.34	0.00	1.53	0.84	0.46	1.75	0.86
2	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.79	0.00	1.02	0.73	0.81	0.44	0.65
3	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	0.69	0.51	1.01	1.46	0.00	0.66
4	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	1.34	1.39	1.02	0.81	0.66	1.32	1.32
5	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	1.34	1.39	1.02	0.81	0.61	1.75	1.51
6	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	0.45	2.08	0.51	1.01	0.93	0.88	1.43
7	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0	0.69	1.53	1.07	1.39	0.00	0.46
8	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.34	0.69	1.02	1.07	0.93	0.88	0.83
9	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.79	1.39	1.02	1.33	1.29	1.75	1.18
10	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	0.89	0.00	1.02	1.21	1.00	0.88	0.63
11	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0	0.69	1.02	0.87	0.54	1.75	1.23
12	木榄 <i>B. gymnorrhiz</i>	1.1	0.89	0.00	0.51	0.99	0.91	0.44	0.69
13	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.79	0.69	1.02	0.89	0.74	1.75	1.21
14	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	0.89	2.78	0.51	1.10	1.21	0.44	1.29
15	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.79	0.69	1.53	0.93	0.46	1.75	1.04
16	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	0.00	1.02	1.10	1.91	0.44	0.52
17	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.79	0.00	1.02	1.13	1.31	0.44	0.53
18	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	0.45	2.08	1.02	1.21	1.96	0.88	1.03
19	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	1.79	2.08	1.53	1.21	2.76	0.44	0.70
20	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	0.69	1.02	1.21	0.81	1.75	1.05
21	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	0.69	1.02	0.91	0.79	0.44	0.75
22	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.89	0.00	1.02	1.01	0.76	1.75	0.92
23	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	0.00	1.02	1.20	1.57	0.44	0.51
24	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.79	0.00	1.02	0.97	0.69	1.32	0.82
25	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	2.08	0.51	1.21	0.87	1.75	1.77
26	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	1.79	2.08	1.02	0.73	0.66	0.88	1.37
27	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.45	0.69	1.02	1.04	0.96	0.88	0.84
28	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	1.34	1.39	1.53	0.99	0.59	1.75	1.20
29	木榄 <i>B. gymnorrhiz</i>	0.55	1.79	2.78	1.02	1.06	1.06	0.88	1.33
30	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.89	0.69	0.51	1.06	0.73	1.32	1.19
31	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.89	1.39	0.51	0.90	0.74	0.88	1.30
32	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	1.79	1.39	0.51	1.27	1.41	0.88	1.08
33	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	0.89	0.00	0.51	0.74	0.81	0.00	0.62
34	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	1.34	0.69	1.53	0.76	0.97	0.00	0.54
35	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.89	2.08	1.02	0.76	0.36	1.75	1.84
36	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0.89	0.69	1.53	0.99	0.89	0.44	0.61
37	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.1	0	1.39	1.02	0.97	0.59	1.32	1.24
38	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.82	0	1.39	1.02	0.90	0.79	1.32	1.26

由表5得知,湛江红树林保护区不同潮带林分空间结构各均质性指数参数与均质性指数的关联度大小表现为竞争指数 > 多样性指数(混交度) > 空间密度指数 > 目的树种特性指数 > 角尺度 > 大小比 > 健康指数。

应用同样的方法研究另外6个调查样地,所得结果与上述结果基本一致,各参数与均质性指数关联度排序不变,关联度大小误差未超过5%。说明研究结果较为真实。

5 结论与讨论

本研究通过借鉴国内天然林林分空间结构已有的研究成果,应用景观生态学理论,首次尝试提出优

化林分空间结构均质性目标,创新了林分空间结构优化目标,同时提出了林分空间结构林木均质性指数的新概念。并使用多目标规划方法中的乘法将影响林分空间结构均质性的树种特性指数、健康指数、竞争指数、多样性指数、空间密度指数、角尺度和大小比数7个参数进行目标归一,获得了林木均质性指数的定义和计算公式,为优化红树林林分空间结构提供了重要的理论数据。还在天然红树林中首次尝试使用了灰色关联度分析法对广东湛江红树林自然保护区不同潮带林分空间结构影响因子与林木均质性指数的关联度进行了分析,获得各影响因子与均质性指数的关联度大小:竞争指数 0.716 > 混交度 0.686 > 空间密度指数 0.670 > 目的

表 4 均质性指数参数与均质性指数的绝对差值

Tab. 4 Absolute differences between homogeneity index and its parameters

编号 No.	树种 Tree species	$X_i(1)$	$X_i(2)$	$X_i(3)$	$X_i(4)$	$X_i(5)$	$X_i(6)$	$X_i(7)$	X_0
1	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.24	0.48	0.86	0.67	0.02	0.40	0.89	0.86
2	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.45	1.14	0.65	0.37	0.08	0.16	0.21	0.65
3	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.44	0.21	0.03	0.15	0.35	0.80	0.66	0.66
4	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.5	0.02	0.07	0.30	0.51	0.66	0.00	1.32
5	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.69	0.17	0.12	0.49	0.70	0.90	0.24	1.51
6	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.61	0.98	0.65	0.92	0.42	0.50	0.55	1.43
7	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.64	0.46	0.23	1.07	0.61	0.93	0.46	0.46
8	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.27	0.51	0.14	0.19	0.24	0.10	0.05	0.83
9	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.08	0.61	0.21	0.16	0.15	0.11	0.57	1.18
10	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.19	0.26	0.63	0.39	0.58	0.37	0.25	0.63
11	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.13	1.23	0.54	0.21	0.36	0.69	0.52	1.23
12	木榄 <i>B. gymnorhiz</i>	0.41	0.2	0.69	0.18	0.30	0.22	0.25	0.69
13	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.11	0.58	0.52	0.19	0.32	0.47	0.54	1.21
14	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.47	0.4	1.49	0.78	0.19	0.08	0.85	1.29
15	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.06	0.75	0.35	0.49	0.11	0.58	0.71	1.04
16	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.58	0.07	0.52	0.50	0.58	1.39	0.08	0.52
17	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.57	1.26	0.53	0.49	0.60	0.78	0.09	0.53
18	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.21	0.58	1.05	0.01	0.18	0.93	0.15	1.03
19	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.12	1.09	1.38	0.83	0.51	2.06	0.26	0.70
20	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.05	0.6	0.36	0.03	0.16	0.24	0.70	1.05
21	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.35	0.3	0.06	0.27	0.16	0.04	0.31	0.75
22	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.18	0.03	0.92	0.10	0.09	0.16	0.83	0.92
23	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.59	0.06	0.51	0.51	0.69	1.06	0.07	0.51
24	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.28	0.97	0.82	0.20	0.15	0.13	0.50	0.82
25	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.67	1.32	0.31	1.26	0.56	0.90	0.02	1.77
26	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.55	0.42	0.71	0.35	0.64	0.71	0.49	1.37
27	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.26	0.39	0.15	0.18	0.20	0.12	0.04	0.84
28	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.1	0.14	0.19	0.33	0.21	0.61	0.55	1.20
29	木榄 <i>B. gymnorhiz</i>	0.78	0.46	1.45	0.31	0.27	0.27	0.45	1.33
30	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.09	0.3	0.50	0.68	0.13	0.46	0.13	1.19
31	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.2	0.41	0.09	0.79	0.40	0.56	0.42	1.30
32	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.26	0.71	0.31	0.57	0.19	0.33	0.20	1.08
33	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.2	0.27	0.62	0.11	0.12	0.19	0.62	0.62
34	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.28	0.8	0.15	0.99	0.22	0.43	0.54	0.54
35	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.74	0.95	0.24	0.82	1.08	1.48	0.09	1.84
36	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.49	0.28	0.08	0.92	0.38	0.28	0.17	0.61
37	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.14	1.24	0.15	0.22	0.27	0.65	0.08	1.24
38	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.44	1.26	0.13	0.24	0.36	0.47	0.06	1.26

树种特性指数 0.644 > 角尺度 0.638 > 大小比数 0.616 > 健康指数 0.607。

林分空间结构均质性指数能较客观真实地描述林木对林分空间结构的影响,同时以均质性为目标优化红树林空间结构不失为一种良好的选择。根据各参数与均质性指数的相关度大小,在红树林空间结构优化时应考虑多样性、竞争和水平均匀分布等相关指标。

本研究关联度检验时使用的参数和树木株数并不多,故用于分析的数据样本也不多,而样本数越多,关联度值越精确,越能更客观全面反映指标参数的真实性和实用行。

不同地带具有不同的森林类型,红树林林分空间结构均质性指标体系中的某些指标可能不具有普适性,因此在应用过程中可作相应的调整;同时林分空间结构影响因子的评价十分复杂,难以完全量

表 5 红树林林分空间结构均质性指数与其参数的关联系数

Tab. 5 Correlative coefficient between mangrove stand spatial structure homogeneity index and its parameters

编号 No.	树种 Tree species	$X_i(1)$	$X_i(2)$	$X_i(3)$	$X_i(4)$	$X_i(5)$	$X_i(6)$	$X_i(7)$	X_0
1	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.698	0.596	0.483	0.492	1.000	0.748	0.333	0.86
2	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.524	0.378	0.556	0.640	0.903	0.899	0.679	0.65
3	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.530	0.782	1.000	0.821	0.629	0.585	0.403	0.66
4	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.494	1.000	0.951	0.688	0.533	0.633	1.000	1.32
5	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.407	0.819	0.896	0.571	0.452	0.554	0.650	1.51
6	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.440	0.415	0.556	0.413	0.583	0.699	0.447	1.43
7	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.427	0.607	0.795	0.376	0.487	0.546	0.492	0.46
8	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.667	0.581	0.876	0.780	0.718	0.947	0.899	0.83
9	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.936	0.535	0.812	0.810	0.812	0.939	0.438	1.18
10	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.759	0.739	0.564	0.627	0.500	0.764	0.640	0.63
11	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.846	0.360	0.603	0.762	0.622	0.622	0.461	1.23
12	木榄 <i>B. gymnorhiz</i>	0.550	0.791	0.540	0.790	0.667	0.856	0.640	0.69
13	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.880	0.548	0.613	0.780	0.651	0.713	0.452	1.21
14	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.512	0.642	0.347	0.454	0.767	0.964	0.344	1.29
15	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.978	0.482	0.708	0.571	0.862	0.665	0.385	1.04
16	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.454	0.932	0.613	0.566	0.500	0.442	0.848	0.52
17	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.458	0.354	0.608	0.571	0.491	0.591	0.832	0.53
18	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.733	0.548	0.432	1.000	0.778	0.546	0.748	1.03
19	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.863	0.389	0.365	0.438	0.533	0.346	0.631	0.70
20	白骨壤 <i>A. marina</i>	1.000	0.540	0.701	0.970	0.800	0.843	0.389	1.05
21	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.595	0.708	0.963	0.711	0.800	1.000	0.589	0.75
22	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.772	0.986	0.465	0.877	0.889	0.899	0.349	0.92
23	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.449	0.944	0.618	0.561	0.455	0.512	0.864	0.51
24	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.657	0.417	0.495	0.771	0.812	0.922	0.471	0.82
25	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.415	0.343	0.735	0.339	0.509	0.554	0.957	1.77
26	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.468	0.630	0.533	0.653	0.475	0.615	0.476	1.37
27	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.677	0.648	0.866	0.790	0.757	0.930	0.918	0.84
28	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.898	0.850	0.829	0.667	0.747	0.652	0.447	1.20
29	木榄 <i>B. gymnorhiz</i>	0.376	0.607	0.353	0.681	0.691	0.823	0.497	1.33
30	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.917	0.708	0.622	0.489	0.836	0.718	0.774	1.19
31	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.746	0.636	0.928	0.451	0.596	0.673	0.514	1.30
32	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.677	0.496	0.735	0.533	0.767	0.787	0.690	1.08
33	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.746	0.731	0.568	0.865	0.848	0.877	0.418	0.62
34	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.657	0.466	0.866	0.395	0.737	0.733	0.452	0.54
35	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.389	0.422	0.787	0.441	0.346	0.426	0.832	1.84
36	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.500	0.723	0.939	0.413	0.609	0.817	0.724	0.61
37	白骨壤 <i>A. marina</i>	0.830	0.358	0.866	0.753	0.691	0.637	0.848	1.24
38	桐花 <i>A. corniculatum</i>	0.530	0.354	0.886	0.736	0.622	0.713	0.881	1.26

化,在实际操作过程中尊重专家的经验 and 知识仍然是十分重要的。

参 考 文 献

安慧君. 2003. 阔叶红松林空间结构研究. 北京林业大学资源与环境学院博士学位论文.
 邓聚龙. 2002. 灰色理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社, 166 - 198.
 韩维栋, 高秀敏. 2009. 雷州半岛红树林生态系统及其保护策略. 广

州: 华南理工大学出版社, 170 - 190.
 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 2003. 森林空间结构量化分析方法. 北京: 中国科学技术出版社.
 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多, 胡艳波, 等. 2007. 结构化森林经营. 北京: 中国林业出版社.
 惠刚盈, 胡艳波. 2001. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究. 林业科学研究, 14(1): 23 - 27.
 惠刚盈, Gadow K, Albert M, 1999. 一个新的林分空间结构参数大小比数. 林业科学研究, 12(1): 1 - 6.

- 黄振瑞,潘方胤,陈月桂,等. 2007. 用灰色关联法对 11 个甘蔗新品系主要数量性状与产量关联度的分析. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23(12): 198 - 201.
- 雷相东,唐守正. 2002. 林分结构多样性指标研究综述. *林业科学*, 38(3): 141 - 146.
- 李建军,李际平. 2008. 基于粗糙集的林分经营决策因子分类研究. *福建林业科技*, 35(3): 4 - 9.
- 刘素青. 2006. 森林生态系统经营与自适应模型研究. 中南林业科技大学林学院博士学位论文, 38 - 61.
- 钱颂迪. 1990. 运筹学. 北京: 清华大学出版社, 444 - 466.
- 汤孟平,唐守正. 2004. 林分择伐空间结构优化模型研究. *林业科学*, 40(5): 25 - 31.
- 唐启义,冯明光. 2002. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社, 614 - 621.
- 张会儒,汤孟平,舒清态,等. 2006. 森林生态采伐的理论与实践. 北京: 中国林业出版社, 248 - 255.
- Hegy F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands// Fries J. Growth models for tree and stand simulation. Swede: Royal College of Forestry, Stockholm, 74 - 90.
- Hof J, Bevers M. 2000. Optimizing forest stand management with natural regeneration and single - tree choice variables. *Forest Science*, 46(2): 168 - 175.
- Mark L H, David W H. 1998. Reconstructing the spatial pattern of trees from routine stand examination measurements. *Forest Science*, 44(1): 125 - 133.
- Weintraub A, Cholaky A. 1991. A hierarchical approach to forest planning. *Forest Science*, 37(2): 439 - 460.

(责任编辑 于静娴)