

ICS 65.020.40

CCS B64

CSF

团 体 标 准

T/CSF 0163—2026

森林采伐与补植决策优化技术规程

Technical regulations for decision optimization in forest harvesting and
enrichment planting

2026 - 09 - 04 发布

2026 - 09 - 04 实施

中 国 林 学 会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 技术流程 5

5 适用场景与约束 4

6 数据要求 5

7 多目标函数构建 6

8 采伐决策优化 7

9 补植决策优化 7

10 成果输出 8

附 录 A（资料性）林分空间结构单元构建样式 10

附 录 B（资料性）空间结构指标说明与目标函数构建原则 12

附 录 C（资料性）采伐与补植决策优化常用算法指南 19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西壮族自治区林业科学研究院与中国林业科学研究院资源信息研究所提出。

本文件由中国林学会归口。

本文件起草单位：广西壮族自治区国有雅长林场、广西壮族自治区林业科学研究院、中国林业科学研究院资源信息研究所、广西壮族自治区国有高峰林场、中南林业科技大学、广西壮族自治区国有大桂山林场、广西壮族自治区国有六万林场、广西壮族自治区国有七坡林场、广西翼界科技有限公司。

本文件主要起草人：余春和、蒙鑫、雷相东、王智慧、欧汉彪、刘宪钊、尹国平、韦铄星、黄莉雅、马金满、李娟、李艳丽、梁惠子、岑祚舟、韩俊学、郑党斌、陆秋洁、王家妍、申礼凤、王光军、余平福、黄康庭、朱原立、罗华龙、何江、覃文浪、孔乐、宋晴川、马天天、吴庆鑫、赵思懿。

森林采伐与补植决策优化技术规程

1 范围

本文件规定了基于单木调查数据进行森林采伐与补植决策优化的总体技术流程、适用场景与约束、数据要求、多目标函数构建、采伐决策优化、补植决策优化、成果输出的技术流程和方法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 38590 森林资源连续清查技术规程

GB/T15776 造林技术规程

GB/T 45088 林木采伐技术规程

LY/T 2811 结构化森林经营数据调查技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

单木调查数据 Individual tree data

在森林样地调查中，以单株林木为基本单元，通过野外实测或无人机遥感获取的各类因子信息，包括单木的位置坐标、胸径、树高、冠幅、树种等因子。

3.2

林分空间结构 Stand spatial structure

指林木在林地上的分布格局，以及林木之间在树种、大小、分布等方面的空间关系。由水平空间结构和垂直空间结构两大维度构成。水平空间结构指在二维平面坐标系中林木个体的空间配置及其属性关联方式，主要体现为树种隔离程度、竞争关系和分布格局；垂直空间结构指在三维空间坐标系中不同林层高度分布的层次关系。

3.3

空间结构单元 Spatial structural unit

指林分中每株林木（参照树）与其若干相邻木组成的结构单元。在森林经营作业中，为实施采伐作业而划定的空间结构单元即为采伐单元，为实施补植作业而划定的空间结构单元即为补植单元。空间结构单元可通过以下方法构建：

固定最近邻数法：以每株林木为中心，选择距离其最近的K株作为邻木，构建“1+K”结构单元，该方法也称为K近邻法。K=4时的结构单元称为“最佳空间结构单元”（推荐示例见附录A.1）。

固定距离法：以每株林木为中心，设定半径R（取林分平均冠幅的1.5~2.0倍，或平均胸径的10~15倍），将该半径范围内的所有林木视为其相邻木。

Delaunay三角网法：基于林木平面坐标构建Delaunay三角网，三角形的边连接的两株林木互为相邻木（推荐示例见附录A.2）。

Voronoi图法：基于林木平面坐标构建Voronoi图，相邻Voronoi多边形对应的林木互为相邻木
[来源：LY/T 2811-2017，3.1，有修改]

3.4

Hegyi 竞争指数 Hegyi competition index

由相邻木的大小（胸径）及其与对象木的距离构成的用于定量描述对象木所承受的竞争压力。

3.5

混交度 Mingling degree

描述林分中树种间隔离（或混交）程度的指标，表达林木与其最近相邻木是否同种的概率。

[来源：LY/T 2811-2017，3.2.2]

3.6

开敞度指数 Openness index

林分内任意1株对象木到n株最近邻木的水平距离与该最近邻木高度比的均值。

3.8

大小比数 Dominance

描述林木与其最近相邻木大小的对比关系，分树种统计的大小比数反映了树种在林分中的优劣程度

[来源：LY/T 2811-2017，3.2.3]

3.9

密集度 Crowding

描述林木与其相邻木的拥挤程度，通过判断树冠重叠与否来分析林木密集程度。

[来源：LY/T 2811-2017，3.2.3]

3.10

角尺度 Uniform angle index

判断林木分布格局的指标，通过分析林木最近4株相邻木的分布情况来衡量林木分布的均匀性

[来源：LY/T 2811-2017，3.2.3]

3.11

空间聚集指数 Spatial aggregation index

描述林木在空间上分布格局的指标，用于判断林木呈聚集分布、随机分布还是均匀分布。

3.12

垂直分层指数 Vertical stratification index

用于衡量森林垂直方向上层次结构复杂程度的定量指标，反映林分在垂直维度上的分化状况及结构多样性。

3.13

参照树（中心木/对象木） Reference tree（Central tree/Object tree）

在林分空间结构分析中，作为核心观测对象的单木，以其与周围相邻木的空间关系为基础计算各项空间结构参数。参照树也称为中心木或对象木。

3.14

补植布局 Planting layout

在补植作业中，补植树点的空间排布方式，包括补植位置、补植密度、补植点之间的空间关系以及补植单元的整体配置方案。

3.15

Pareto 最优解 Pareto optimal solution

在多目标优化问题中，若一个解在任意一个目标函数上都无法在不导致其他至少一个目标函数变差的前提下得到改进，则该解称为Pareto最优解（或称非支配解、非劣解）。所有Pareto最优解的集合构成Pareto前沿。（注：本文件中，采伐与补植决策涉及多个空间结构指标的综合优化，可采用Pareto最优解集作为多目标优化的输出结果，供经营决策者根据实际偏好选择最终方案）

4 技术流程

森林采伐与补植决策优化的技术流程包括适用场景与约束、数据要求、多目标函数构建、采伐决策优化、补植决策优化、成果输出，具体流程见图1。

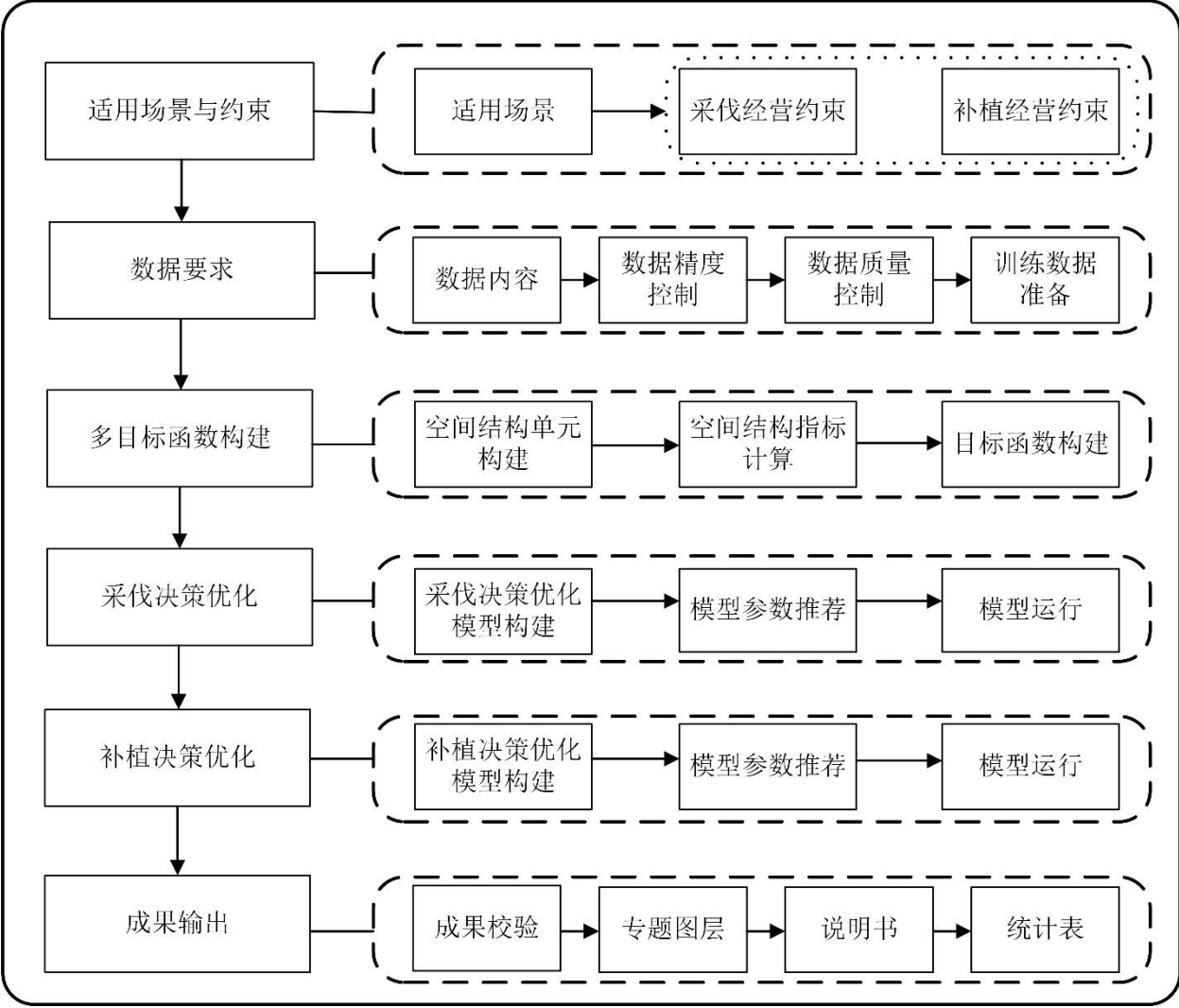


图1 技术流程图

5 适用场景与约束

5.1 适用场景

a) 采伐决策适用于以单株木为最小决策单元的森林经营活动，涵盖择伐、抚育采伐、低产林改造采伐、低效林改造采伐和更新采伐等五种场景。

b) 补植决策适用于需要人工促进更新的林窗或空地，包括择伐、抚育采伐、低产低效林改造后的人工林窗，以及因自然灾害形成的自然林窗。

5.2 经营约束

5.2.1 采伐经营约束

采伐经营约束包括内容：

- a) 采伐方案应在本小班或林权边界范围内编制，不得越界设计。涉及相邻权属单位的，应事先取得其书面同意。
- b) 采伐方案应符合当地采伐限额管理，采伐强度不得超过限额规定。
- c) 采伐作业实施前应核实保护植物分布情况，确保不误采。古树名木、母树、珍稀濒危树种、目标树及优势木不得作为采伐对象。
- d) 采伐方案应根据地形条件合理规划，陡坡地段应谨慎作业。
- e) 采伐木与保留木之间应保持安全作业距离，避免采伐作业对保留木造成损伤。
- f) 采伐木的选取可遵循以下优先级顺序：
 - (1) 病虫害木、濒死木、枯立木。
 - (2) 劣质木（弯曲、尖削、分叉等生长不良或干形差的林木）。
 - (3) 过密木（对目标树或保留木构成过度竞争的非目的树种林木）。
 - (4) 影响林分空间结构均匀性的其他干扰木。

5.2.2 补植经营约束

补植经营约束包括内容：

- a) 补植方案应在本小班或林权边界范围内编制，补植点应布设于林窗或空地内，不得在保留木密集区域强制补植。
- b) 补植点不得设置在保留木的根颈保护范围内（以树冠垂直投影外扩2m为保护半径），避免补植作业对保留木根系造成损伤。
- c) 补植点宜位于人员可及、具备实施补植作业条件的区域。
- d) 补植树种应遵循适地适树原则，优先选择珍贵乡土树种或高价值树种，并宜与现有保留木形成互补关系，避免引入与现有树种存在强烈竞争关系或易引发交叉病虫害的外来物种。
- f) 补植树种的选择宜与林窗面积相匹配。林窗面积较小（ $\leq 10 \text{ m}^2$ ）时，宜配置耐阴树种；林窗面积中等（ $10\text{--}30 \text{ m}^2$ ）时，宜配置中性树种；林窗面积较大（ $\geq 30 \text{ m}^2$ ）时，宜配置喜光树种。

6 数据要求

6.1 数据内容

采伐与补植决策所需的单木调查数据包括但不限于树种、单木位置坐标、树高、胸径、冠幅等因子。可采用以下任一方式获取：

- a) 采用地面每木检尺方法获取。
- b) 采用多模态遥感数据提取单木因子方法。

6.2 数据精度控制

单木位置坐标宜采用RTK或全站仪等设备测定，定位精度不宜低于0.05 cm。其余测树因子可按GB/T 38590相关规定执行。

6.3 数据质量控制

数据质量控制要求如下：

- a) 测量仪器（如RTK、测高仪、围尺等）使用前应进行校准，精度满足6.2节要求后方可使用。
- b) 内业数据宜采用交叉核对方式，确保转录无误。

- c) 采用多源异构数据时，应进行一致性检查与精度验证，确保不同来源数据的可比性和兼容性。
- d) 应在报告中注明数据来源、获取方法及精度验证结果，确保数据可追溯。
- e) 原始调查记录应归档保存。

7 多目标函数构建

7.1 空间结构单元构建

空间结构单元是进行采伐木选择与补植点位优化的基本分析单元，可采用以下方法构建：

- a) 林木分布相对均匀的人工纯林或规则种植林分，宜采用固定最近邻数法或固定距离法。
- b) 林木分布不均匀或结构复杂的林分，宜采用Delaunay三角网法或Voronoi图法。

7.2 空间结构指标计算

在完成空间结构单元构建后，宜参照附录B.3中的公式计算林分空间结构指标，作为采伐与补植决策的量化依据。

7.3 目标函数构建

采伐与补植决策的优化目标应转化为对表征林分空间结构质量的目标函数值进行优化。宜参照表1，根据不同采伐方式和补植场景所对应的经营目标差异确定优化目标，并选择主要林分结构指标构建多目标函数。模型各空间结构指标的优化方向宜符合附录B表B.1的规定。

表1 多目标优化函数主要构建指标选取

经营方式	经营目标	优化目标	主要调整指标
择伐	大径材培育、天然更新促进	林分水平分布格局趋于随机，目标树生长空间改善	角尺度、开敞度
抚育采伐（透光伐/疏伐/生长伐）	林分结构优化、大径材培育	竞争压力减小，密度趋于合理，目标树生长空间充足	大小比数、密集度、开敞度
抚育采伐（卫生伐）	森林健康恢复	病枯木清除，林分健康状况改善	大小比数
低产林改造采伐	大径材培育、林分结构优化	树种组成优化，林分混交度提升	混交度、大小比数
低效林改造采伐	生态功能提升、森林健康恢复	林分空间结构综合优化	角尺度、混交度、开敞度
更新采伐	天然更新促进、生态功能提升	林窗分布合理化，更新条件改善	角尺度、开敞度
择伐后补植	增加树种组成、构建复层异龄结构	树种空间隔离程度提高，林分垂直层次丰富化	混交度、角尺度
抚育采伐后补植	优化物种组成和层次结构	补植树种与保留木形成互补关系，林分结构趋于稳定	混交度、开敞度
低产低效林改造后补植	提升林分经济价值和生态功能	高价值树种占比提高，林分结构优化	混交度、大小比数

自然林窗补植	促进林分恢复	林窗快速郁闭，林分生产力恢复	开敞度、密集度
--------	--------	----------------	---------

8 采伐决策优化

8.1 采伐决策优化模型构建

在符合5.2.1规定下，采伐决策优化模型可采用以下一种或多种优化算法（详见附录C）与7.3构建的多目标函数耦合构建：

- a) 遗传算法及其变体（如君主策略增强遗传算法MEGA、非支配排序遗传算法NSGA-II等）。
- b) 粒子群优化算法（PSO）及多目标粒子群优化算法（MOPSO）；
- c) 差分进化算法。
- d) 模拟退火算法（SA）。
- e) 蚁群算法。
- f) 其他适用的优化算法。

8.2 模型参数推荐

使用上述模型时，推荐参数设置详见附录C表C.2。

8.3 模型运行

采伐决策优化模型按以下步骤运行：

- a) 编码与初始化：将单木信息编码为优化算法可处理的个体（粒子或解向量），形成初始种群或解集。
- b) 多目标函数构建：参考7.3和附录B的构建原则，构建能够评价采伐方案空间结构质量的多目标函数。
- c) 适应度评价：计算每个采伐方案的多目标函数值。
- d) 选择与进化：根据所选算法的策略（如君主选择、非支配排序、轮盘赌、粒子速度更新等）从当前种群中选择优良个体，进行交叉、变异、位置更新等进化操作生成新一代个体。
- e) 迭代优化：重复步骤c-d，当满足最大迭代次数（100-500代）或多目标函数值变化小于0.001%时视为收敛。
- f) 方案输出：输出最优采伐方案，包括采伐木编号、位置坐标、胸径、树高等属性信息。

9 补植决策优化

9.1 补植决策优化模型构建

在符合5.2.2规定下，补植决策优化模型可采用以下一种或多种优化算法（详见附录C）与7.3构建的多目标函数耦合构建：

- a) 力场驱动算法（如Delaunay边界力算法）。
- b) 遗传算法及其变体。
- c) 粒子群优化算法（PSO）及多目标粒子群优化算法(MOPSO)。
- d) 模拟退火算法(SA)。
- e) 贪婪随机自适应搜索过程 (GRASP)。
- f) 其他适用的优化算法。

9.2 模型参数推荐

使用上述模型时，推荐参数设置详见附录C表C.2。

9.3 模型运行

采伐决策优化模型按以下步骤运行：

a) 补植单元初始化：可参考7.1的方法构建空间结构单元，确定各补植区域及其初始补植数量、补植树木初始属性。补植密度宜根据立地条件、保留木密度和经营目标确定，一般为300~900株/hm²。树种选择应遵循“适地适树”原则，优先采用乡土树种或经长期引种驯化成功的树种，避免使用外来入侵物种。

b) 多目标函数构建：可参考7.3和附录B的构建原则，构建能够评价补植方案空间结构质量的多目标函数。

c) 适应度评价：计算每个补植方案的多目标函数值。

d) 位置/布局优化：根据所选算法的策略（如力场位移、粒子速度更新、交叉变异、邻域搜索等）迭代调整补植树木的空间位置，同时可优化补植数量与树种配置。

e) 迭代优化与输出：重复步骤c-d，当满足最大迭代次数（100~500代）或多目标函数值变化小于0.001%时视为收敛。

f) 方案输出：输出最优补植布局方案，包括补植树编号、位置坐标、树种等信息。

10 成果输出

10.1 成果校验

成果输出前宜进行以下校验，校验结果应纳入决策说明书附录。

a) 空间拓扑校验：检查采伐木是否符合5.2.1规定，补植树是否满足5.2.2规定。

b) 指标合理性校验：对比决策前后各指标，确保关键指标（如竞争指数、混交度、开敞度、空间聚集指数等）较优化前有所改善，且满足推荐阈值（参考附录B表B.1）；若未能满足，应分析原因并记录。

10.2 专题图层

输出的专题矢量图层包括采伐木图层、保留木图层和补植树图层。各图层宜采用统一的坐标系统（如CGCS2000）和投影方式，比例尺根据经营单位面积和精度需求确定，一般宜采用1:500~1:5000，小班级别的决策建议不低于1:1000。各图层采用“小班号_图层类型_日期”的格式命名，例如“01_采伐木_20250601”。图层中采伐木用红色圆形符号表示，保留木用绿色圆形符号表示，补植树用蓝色三角形符号表示，不同树种可采用不同填充图案加以区分。各图层的属性数据字段如下：

a) 采伐木图层：单木编号、树种、胸径、树高、空间坐标（X,Y）、采伐优先级、采伐原因（如病虫害、过密、劣质等）、所属小班号。

b) 保留木图层：单木编号、树种、胸径、树高、空间坐标（X,Y）、保留类型（优势木、目标树、母树、林缘木、一般保留木等）、所属小班号。

c) 补植树图层：补植株编号、树种、预期胸径（可选）、预期树高（可选）、空间坐标（X,Y）、补植日期（或规划期）、所属小班号。

10.3 说明书

宜编制补植与采伐智能决策说明书，内容至少包括：

- a) 林分概况（地理位置、面积、林分类型、经营目标）。
- b) 数据来源与预处理情况。
- c) 所选用的空间邻接关系定义方法、优化算法及目标函数设置。
- d) 关键参数取值（如采伐强度上限、最小间距、算法参数等）。
- e) 决策过程（迭代次数、收敛情况）。
- f) 决策结果综述。

10.4 统计表

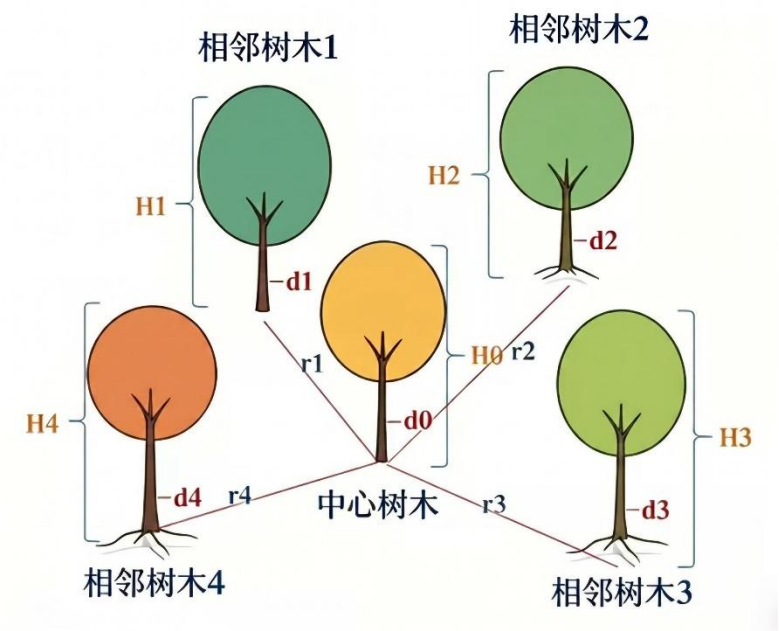
宜输出采伐与补植实施前、后各项林分空间结构指标的对比表，包括但不限于林分密度、树种丰富度、树种多样性、垂直分层指数、Hegyi竞争指数、混交度、开敞度指数、大小分化度、空间聚集指数等指标。对比表应注明各指标的变化率及是否达到推荐阈值。

附 录 A

(资料性)

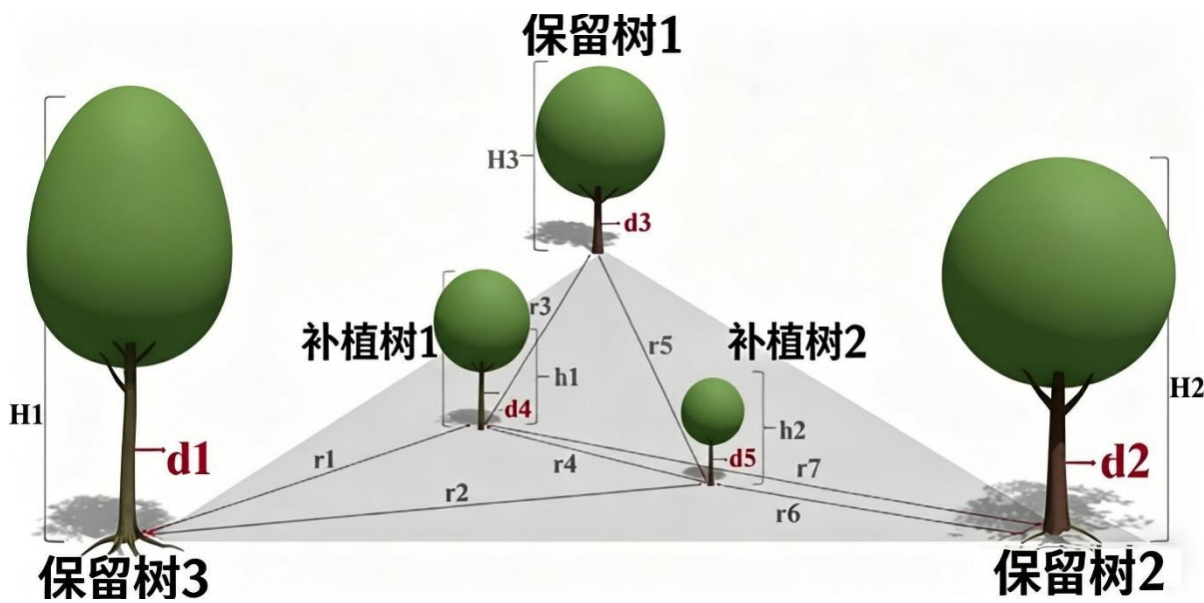
林分空间结构单元构建样式

A.1 四邻域结构单元示意图



四邻域采伐单元由一棵中心树（框架树）和四棵最近的相邻树（“1 + 4”）组成。 $H_0 \sim H_4$ 表示树高， $d_0 \sim d_4$ 表示胸径， $r_0 \sim r_4$ 表示中心树到相邻树的距离。

A.2 Delaunay 结构单元示意图



Delaunay补植单元位于Delaunay三角形单元内，由一棵补植树连同单元内的其他补植树和保留树（“1 + n”）组成。H1~H3代表保留树的高度，h1~h2代表补植树的高度，d1~d5代表胸径，r1~r7代表补植树之间以及补植树与保留树之间的距离。

A.3 r 的计算公式（欧氏距离）

$$r_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} \quad (\text{A. 1})$$

其中， (x_0, y_0) 为中心树平面坐标， (x_i, y_i) 为第*i*棵相邻树的平面坐标。

附 录 B

(资料性)

空间结构指标说明与目标函数构建原则

B. 1 目的

本附录旨在为使用者自行构建采伐与补植决策的目标函数提供原则性指导，而非规定必须使用的具体数学公式。使用者可根据经营目标、林分类型和所选优化算法的特点，参照本附录的指标体系和优化方向，构建适用的目标函数。

B. 2 指标体系

采伐与补植决策涉及的核心空间结构指标及其优化方向见表B. 1。

表 B. 1 空间结构指标及优化方向

指标	含义	最优状态（基于经营目标、目的树种/目标树）	推荐阈值（参考值，应用时可根据林分实际特点和经营目标适当调整）
林分密度	单位面积内的树木数量	一般依据经营目标调整至合理密度区间。用材林一般以地位指数、年龄等参数确定的合理经营密度为目标；生态林一般以自然稀疏曲线或地带性顶级群落的适宜稳定密度为基准。	用材林：现实密度与合理密度的比值宜为0.8~1.1；生态林：相对密度宜为0.6~0.9（依据自然稀疏曲线）
树种丰富度	林分中树种的类别数量	在符合立地条件和自然演替规律的前提下，宜保持较高的丰富度。人工用材林可适度降低丰富度以利于经营管理；生态林一般趋向地带性顶级群落树种组成。	用材林：树种数≥3种；生态林：树种数≥5种（按0.1 hm ² 样地计）
树种多样性	基于树种数量及均匀度的综合指数（如Shannon-Wiener指数）	通常宜追求较高的多样性，但应避免引入不适生树种。防护林或自然保护区一般以天然林多样性水平为目标；短周期用材林可接受较低的多样性。	Shannon-Wiener指数（H'）≥1.5（生态林宜≥2.0）
垂直分层指数	反映林分垂直结构的复杂性	一般增加垂直分层，形成复层林。同时需兼顾经营可行性：用材林可保留2~3层，生态林可追求更多层次。	垂直分层数≥2层（用材林2~3层，生态林≥3层）
Hegyi竞争指数	反映树木间的竞争压力	应区分目的树种（或目标树）与非目的树种。对目标树（或目的树种个体），一般降低其竞争指数（即减少周围竞争木）；对非目的树种或干扰木，可适度保留竞争以控制其生长。整体林分竞争指数一般呈现目标树低竞争、其他树木	目标树竞争指数<1.0（经验值，可根据树种和立地调整）

		合理竞争的空间格局	
混交度	反映树种混交程度	一般增加混交度，避免大面积纯林。用材林可采用团状混交或行间混交；生态林一般趋向随机混交。	混交度>0.53（经验下限，避免纯林化）
开敞度指数	反映林分开敞程度	一般适当增加开敞度，以促进目标树生长及林下更新，但一般避免过度开敞导致林地干燥或杂草滋生。用材林在目标树培育阶段宜逐步增加开敞度；生态林宜维持中等开敞度。	开敞度指数≥0.30（建议范围0.30～0.60）
大小比数	反映树木大小（胸径、树高）的分化程度	应区分目的树种（或目标树）与非目的树种。对目标树，宜使其与周围树木的分化度较大（即目标树显著大于竞争木）；对非目的树种，分化度宜控制在不影响林分整体稳定性的范围内。不宜简单追求整体分化度的减小。	目标树的大小比数≤0.25（即目标树胸径显著大于相邻木）；整体林分胸径变异系数宜为0.2～0.5
空间聚集指数	反映树木的空间分布格局	一般趋向均匀分布，避免过度聚集或随机。以天然更新为主的林分可接受小尺度聚集；人工林一般以规则均匀分布为导向	聚集指数R>1.0（均匀分布），建议R≥1.2
密集度	反映林木间空间占据的紧密程度	应区分目的树种（或目标树）与非目的树种。对目标树，宜适当降低其周边密集度，以释放生长空间（即减少周围邻木数量）；对非目的树种或干扰木，可维持较高密集度以限制其生长。整体林分宜通过采伐调整，使目标树周边形成合理的空间间隙，同时避免林分整体过密或过疏。	目标树周围（半径3～6m内）邻木数≤4株；林分整体密集度宜为0.6～0.8（经验值，视树种和立地而定）
角尺度	反映林木空间分布均匀性的角度指标	一般趋向均匀分布，使各方向光线和生长空间均衡。人工用材林宜以规则均匀分布为导向；生态林或天然次生林可接受小尺度聚集（随机分布）。不宜过度追求绝对均匀，以免破坏自然更新格局。	角尺度W<0.475（均匀分布），0.475≤W≤0.517为随机分布，W>0.517为聚集分布。用材林建议W≤0.49；生态林建议W≤0.52

B. 3 林分空间结构指标计算公式

B.3.1 林分密度

$$D = \frac{N}{A} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：
D——林分密度；
N——为样地内参照树总株数；
A——样地总面积。

B.3.2 树种丰富度 (Margalef 丰富度指数)

$$D_{Mg} = \frac{T-1}{\ln N} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

D_{Mg} ——Margalef丰富度指数;

T——为样地内树种数目

N——为样地内所有树种个体总数之和。

B.3.3 树种多样性 (Shannon-Wiener 多样性指数)

$$H' = -\sum_{i=1}^T p_i \ln p_i \dots\dots\dots (B.3)$$

$$p_i = \frac{N_i}{N} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

H' ——Shannon-Wiener多样性指数;

T——为样地内树种数目;

p_i ——为第*i*个树种的个体数占样地内全部树种个体总数的比例;

N_i ——为第*i*个树种的个体数。

N——为样地内所有树种个体总数之和。

B.3.4 垂直分层指数

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{z_i}{3} \times \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 S_{ij} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

S——垂直分层指数;

N——样地内参照树总数;

z_i ——参照树*i*空间结构单元中出现的林层种数(取值为1-3);

S_{ij} ——参照树*i*与第*j*株相邻木林层的异同情况,不同林层为1,同林层为0;

林层划分——上层: $h \geq 2H/3$, 中层: $H/3 < h < 2H/3$, 下层: $h \leq H/3$ (H 为优势木平均高)。

B.3.5 竞争指数 (Hegy i 竞争指数)

$$HCI = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i} \times I(H_j > H_i) \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

HCI——参照树*i*的竞争指数;

d_i ——参照树*i*的胸径;

d_j ——第*j*株相邻木的胸径;

H_i ——参照树*i*的树高;

H_j ——第*j*株相邻木的树高;

$I(\cdot)$ ——指示函数:条件为真时取1,否则取0;

n——相邻木株数(通常取4)。

B.3.6 混交度

$$MS = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当参照树i与第j株相邻木非同种时} \\ 0, & \text{当参照树i与第j株相邻木同种时} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

$$\overline{MS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MS \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

式中:

MS——参照树i的混交度;

n——与参照树最近的相邻木, 通常n=4;

i——参照树编号;

j——相邻木编号 (j=1, 2, 3, 4);

$\overline{MS}$ ——林分平均混交度;

N——为样地内参照树总株数。

B.3.7 开敞度指数

$$OP = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{H_i}{r_{ij}} \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

式中:

OP——参照树i开敞度指数;

H_i ——参照树i的树高;

r_{ij} ——参照树i与第j株相邻木的水平距离;

n——与参照树最近的相邻木, 通常n=4;

i——参照树编号;

j——相邻木编号 (j=1, 2, 3, 4);

B.3.8 大小比数

$$U = 1 - \frac{\min(d_i, d_j)}{\max(d_i, d_j)} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

$$\overline{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

式中:

U——参照树i的大小分化度;

$\overline{U}$ ——林分平均大小分化度;

d_i ——参照树i的胸径 (或树高);

d_j ——最近一株相邻木的胸径 (或树高);

N——为样地内参照树总株数。

B.3.9 空间聚集指数

$$R = \frac{\bar{r}}{\bar{r}_{exp}} \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

$$\bar{r}_{exp} = \frac{1}{2\sqrt{D}} \quad \dots\dots\dots (B.14)$$

式中：

R ——空间聚集指数（最近邻体指数）；

$\bar{r}$ ——各单木到其最近邻木的实际平均距离；

D ——林分密度；

$\bar{r}_{exp}$ ——随机分布下的期望平均距离。

B. 4 目标函数构建原则及数据处理

构建采伐或补植决策的目标函数时，一般遵循以下原则：

a) 综合性：目标函数一般综合反映林分空间结构的多个维度，避免单一指标优化导致其他指标劣化。

b) 生态优先：当多个优化目标发生冲突时，一般遵循“生态结构优先，兼顾生产”的原则，优先保障林分空间结构健康、生物多样性维持等生态目标，在此基础上优化木材生产等经营目标。

c) 可量化：所选指标一般能够基于单木调查数据（位置、胸径、树高、树种等）进行计算。

d) 方向一致性：目标函数值的优化方向（最大化或最小化）一般与各指标的优化方向协调一致。

e) 算法适配性：目标函数的形式（单目标加权、多目标Pareto排序等）一般与所选优化算法相匹配。

数据处理与参数配置可参照以下方法：

a) 归一化处理（推荐）：不同指标的量纲和数量级存在差异，建议对各指标值进行归一化处理后加权综合，以消除量纲影响。

b) 权重设定：可根据经营目标（如碳汇提升、生物多样性保护、木材生产等）为不同指标分配权重，突出核心目标。

B.5 构建示例

以下为两种典型场景的目标函数构建示例，供使用者参考：

示例一：以调整林分竞争关系和混交度为目标

本示例目标函数（公式B.1~B.4）引自 Lian G J, Zhang H Q, Lei K X, et al. (2025). A novel collaborative planning framework for artificial forest harvesting and replanting. Biosystems Engineering, 104156. 该框架采用“采伐单元（四邻域结构）”与“补植单元（Delaunay三角形）”分层建模，分别构建采伐目标函数（B.1）和补植目标函数（B.2），并分别进行归一化处理（B.3、B.4），以实现采伐与补植环节的空间结构协同优化。公式中的标准差项（ σ ）用于对各指标进行数据驱动的自适应缩放，使不同量纲和变异程度的指标在目标函数中具有可比性，避免人工设定归一化参数的主观影响。公式B.1针对采伐单元，包含垂直分层指数（S）、混交度（MS）和开敞度（OP），分母包含林分密度（D）、大小分化度（U）和Hegyi竞争指数（HCI），整体方向为增大分子指标、减小分母指标。公式B.2针对补植单元，优化空间聚集指数（R）与竞争指数（HCI），其中 $|R_i - 1|$ 表示空间聚集指数偏离1（随机分布）的程度，补植旨在使分布趋于均匀。实际应用时，可分别计算采伐单元目标函数值 L_1^* 与补植单元目标函数值 L_2^* ，并依据经营目标对采伐与补植环节进行独立优化或 Pareto 多目标权衡；无需使用加权综合函数。

$$L_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\frac{1+S_i}{\sigma_{S_i}} \cdot \frac{1+MS_i}{\sigma_{MS_i}} \cdot \frac{1+OP_i}{\sigma_{OP_i}}}{(1+D_i) \cdot \sigma_{D_i} \cdot (1+U_i) \cdot \sigma_{U_i} \cdot (1+HCI_{(h)i}) \cdot \sigma_{HCI_{(h)i}}} \dots \quad (\text{B.15})$$

$$L_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (|R_i - 1|) \cdot \sigma_{|R_i-1|} \cdot HCI_{(r)i} \cdot \sigma_{HCI_{(r)i}} \dots\dots\dots (B.16)$$

$$L_1^* = \frac{L_1 - L_{1min}}{L_{1max} - L_{1min}} \dots\dots\dots (B.17)$$

$$L_2^* = \frac{L_2 - L_{2min}}{L_{2max} - L_{2min}} \dots\dots\dots (B.18)$$

式中：

L_1 ——四邻域采伐单元平均多目标函数值；

L_2 ——Delaunay补植单元的平均多目标函数值；

L_1^* —— L_1 的归一化平均多目标函数值；

L_2^* —— L_2 的归一化平均多目标函数值；

F —— 综合得分函数值；

L_{1min} , L_{1max} —— L_1 的最小和最大值；

L_{2min} , L_{2max} —— L_2 的最小和最大值；

N ——四邻域采伐单元的数量；

σ ——标准差；

i ——索引值；

D ——林分密度；

S ——垂直分层指数；

HCI ——Hegyi 竞争指数；

MS ——树种空间混交度；

OP ——开敞度比较指数；

U ——大小分化度；

R ——空间聚集指数；

示例二：以多目标Pareto优化为目标

本示例给出一种基于加权综合的目标函数形式（公式B.5），适用于将多个子目标转化为单一综合得分的场景。其中， C_{norm} 、 M_{norm} 、 D_{norm} 分别为归一化后的竞争指数、混交度和林分密度取值范围均为[0, 1]；权重系数 w_1 , w_2 , w_3 满足 $w_1+w_2+w_3=1$ ，可根据经营目标（如生态优先、木材生产或碳汇提升）灵活分配。该目标函数对应的三个子目标为：

a) 最小化平均竞争指数（即优化后的 C_{norm} 越小越好，对应公式中（ $1-C_{norm}$ ）越大）。

b) 最大化平均混交度（ M_{norm} 越大越好）。

c) 最小化林分密度（ D_{norm} 越小越好，对应（ $1-D_{norm}$ ）越大）。

使用者可采用非支配排序遗传算法（NSGA-II）等多目标优化算法，直接对上述三个子目标进行Pareto前沿搜索，而不预先设定权重。此时，输出为一组非支配解集，每个解对应不同的采伐-补植方案，经营者可根据实际偏好（如优先降低竞争还是增加混交）从Pareto前沿中择一实施。若需单一方案，则可使用公式B.5并设定权重以计算综合得分。本示例未指定具体参考文献，目标函数形式为多目标优化中常用的加权求和法，使用者可根据实际数据情况调整子目标与归一化方式。

$$F = w_1 \times (1 - C_{norm}) + w_2 \times M_{norm} + w_3 \times (1 - D_{norm}) \dots\dots\dots (B.19)$$

式中：

C_{norm} ——归一化后的竞争指数；

M_{norm} ——归一化后的混交度；

D_{norm} ——归一化后的林分密度；

w_1, w_2, w_3 ——权重系数，且 $w_1+w_2+w_3=1$ 。

B.6 注意事项

a) 竞争指数、混交度等指标的计算依赖于空间邻接关系的定义（见4.1），使用者宜明确所采用的邻接关系定义方法。

b) 目标函数中的各项指标一般在同一空间尺度（如样地、林班、小班）上进行聚合（如取平均值、加权平均等）。

c) 建议在实际应用前，使用历史数据或模拟数据对目标函数进行测试和校准。

附 录 C

(资料性)

采伐与补植决策优化常用算法指南

C.1 算法及其适用场景

表 C.1 采伐与补植决策优化算法及参考文献

序号	算法名称	适用环节	关键特征	适用林分类型	收敛判断条件	参考文献
1	君主策略增强遗传算法 (MEGA)	采伐	君主选择、有序交叉、自适应变异, 优化多目标函数	人工针叶林、阔叶林、针阔混交林 (中龄林、近熟林)	连续20代最优适应度变化小于0.001%; 或达到最大进化代数	Lian G J, Zhang H Q, Lei K X, et al. (2025). A novel collaborative planning framework for artificial forest harvesting and replanting [J]. Biosystems Engineering, 104156.
2	非支配排序遗传算法 (NSGA-II)	采伐	快速非支配排序、拥挤距离、Pareto 最优前沿	各类林分 (尤其适用于多目标冲突明显的情形)	Pareto前沿连续10代不再更新; 或达到最大进化代数	Deb K ,Agrawal S ,Pratap A, et al. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182-197.
3	模拟退火算法 (SA)	采伐/补植	概率接受劣质解、避免局部最优	天然异龄林、结构复杂的混交林	温度降至终止温度 (如 $T < 1 \times 10^{-6}$), 且连续L次迭代无改进	A. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., et al. (1983). Optimization by simulated annealing. Science, 220(4598), 671-680.
4	粒子群优化算法 (PSO)	采伐/补植	个体最优与群体最优引导、收敛速度快	相对规则的人工林 (纯林或简单混交林)	全局最优位置连续20代变化小于 1×10^{-5} ; 或达到最大迭代次数	Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. ICNN, 1942-1948. Yang J H, Yu J H, Huang C.(2022). Adaptive multistrategy ensemble particle swarm optimization with Signal-to-Noise ratio distance metric.Information Sciences, 612, 1066-1094.
5	多目标粒子群优化 (MOPSO)	补植	Pareto 支配、外部存档、自适应网格	补植空间配置 (尤其需要平衡多目标时)	外部存档连续20代无更新; 或达到最大迭代次数	Coello C A C ,Pulido T G ,Lechuga S M. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 8(3), 256-279.
6	Delaunay边界力场算法	补植	力场驱动、三角形单元内自适应位移、与目标函数耦合	天然异龄林或林隙分布不均匀的林分	所有补植节点的位移矢量模长之和小于阈值 (如0.0001 m)	Lian G J, Zhang H Q, Lei K X, et al. (2025). A novel collaborative planning framework for artificial forest harvesting and replanting [J]. Biosystems Engineering, 104156.

7	遗传算法 (GA)	采伐/ 补植	精英保留、 多目标适应 度、全局搜 索	中大规模 林分 (>5 00株)	连续30代最优 适应度变化小 于0.01%; 或达 到最大进化代 数	Holland, J.H. (1975). <i>Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence</i> [M]. The MIT Press
8	贪婪随机自 适应搜索 (GRASP)	补植	随机化贪婪 构造、局部 搜索、快速 初始解	需要快速 获得可行 解的大规 模补植规 划	局部搜索无法 进一步改进当 前解, 且达到 预设迭代次数	Sá M N ,Prata A D B. (2026,. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for the Student Clustering Problem in schools[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 168114060-114060.
9	其他算法	采伐/ 补植	差分进化、 蚁群算法、 禁忌搜索、 贝叶斯优化 等	根据具体 算法选择 适用林分	按所采用算法 的标准收敛判 据执行	Charris S L E, R.Montoya-Torres J, D.Paternina-Arboleda C. (2009). Multi-criteria Optimization Evolving Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique[C]. IEEE, 738-742. 刘鑫,黄浪,卿东升,等. (2023). 基于Voronoi空间单元的林分空间结构智能优化研究[J]. 林业资源管理, (04):27-35. Karppinen S, Ene L, Sundström E L, et al. (2024). Planning cost-effective operational forest inventories.[J]. Biometrics, 80(3).

C.2 算法参数推荐

表 C.2 采伐与补植决策优化算法参数推荐

算法	主要参数	推荐值/范围
遗传算法 (含MEGA、NSGA-II、GA)	种群大小	100~1000
	交叉概率	0.7~0.9
	变异概率	0.01~0.1 (自适应变异时可从0.1递减至0.01)
	最大进化代数	100~500
粒子群优化算法 (PSO、MOPSO)	种群大小	100~1000
	惯性权重	0.4~0.9 (线性递减)
	加速系数 (c1, c2)	1.5~2.0 (推荐c1=c2=1.8)
	最大迭代次数	100~1000
模拟退火算法 (SA)	初始温度	0.85~0.95
	降温速率	0.1~0.9
	终止温度	1×10^{-6}
	每一温度下迭代次数 (马尔可夫链长)	100~500
Delaunay边界力场算法	力场系数	0.1~0.5
	最大位移步长	0.5~1.0m
	力场更新频率	每迭代1次更新

	位移收敛阈值	0.0001m（各节点位移模和）
贪婪随机自适应搜索（GRASP）	贪婪随机化参数（ α ）	0.1~0.3
	局部搜索迭代次数	100~500
	全局循环次数	10~50
差分进化算法	种群大小	100~1000
	缩放因子（F）	0.5~0.9
	交叉概率（CR）	0.1~0.9
	最大迭代次数	100~500
蚁群算法	蚂蚁数量	100~1000
	信息素挥发系数	0.1~0.5
	信息素强度常数	1.0~2.0
	最大迭代次数	100~500

注：上述参数为经验推荐值，用户可根据林分大小、收敛速度及计算结果稳定性进行适当调整。当林分株数大于2000株时，建议适当增加种群大小（如500~1000）或采用并行计算。

C.3 软件实现指南

C.3.1 编程语言与库

表 C.3 编程语言与库

编程语言	推荐库/框架
Python 3.8+	NumPy, SciPy（优化与空间计算），DEAP（遗传算法框架），PySwarms（粒子群），Scikit-optimize（贝叶斯优化）
R 4.0+	GA, nsga2R, adagio（模拟退火），spatstat（空间分析）
MATLAB	Global Optimization Toolbox, Optimization Toolbox, Parallel Computing Toolbox
C++	Shark, EO（Evolutionary Objects），dlib

C.3.2 空间数据结构

单木数据一般存储为点矢量（X, Y坐标），建议使用 shapely（Python）、sf（R）或 shp 文件格式。

空间邻接关系（固定邻居、Delaunay三角网、Voronoi图）可使用以下函数构建：

- a) Python: scipy.spatial.cKDTree（固定邻数法），scipy.spatial.Delaunay（三角网），scipy.spatial.Voronoi（Voronoi图）。
- b) R: spdep::knearneigh, deldir::deldir, spatstat::dirichlet。

C.3.3 算法实现注意事项

- a) 随机数种子应固定（如 random.seed(42)），以保证结果可重复。
- b) 多目标优化时，一般使用Pareto排序或标量化方法，并记录外部存档。
- c) 适应度函数中应包含约束条件的惩罚项（如最小间距违反、连片采伐等），惩罚系数应足够大（例如100倍正常适应度范围）。
- d) 每次迭代后宜记录适应度值、收敛判据等过程数据，以便绘制收敛曲线。

C.3.4 结果输出与验证

- a) 输出最优解对应的采伐木/补植树索引及空间坐标。

- b) 提供优化前后指标对比表，并验证所有约束条件。
- c) 推荐生成收敛曲线图（迭代次数-适应度）和空间布局变化图（优化前、优化后、补植后）。

C.3.5 性能优化建议

- a) 对于大规模林分（>5000株），可先进行林分网格划分（如20m×20m单元），在单元内独立优化，再全局协调。
- b) 使用并行计算（如 multiprocessing（Python）、parallel（R））加速适应度评价。
- c) 缓存空间邻接关系计算结果，避免重复计算。