

融合生态扰动控制的森林采伐-运输多目标优化调度方法

韩东涛^{1,2,3}, 马跃威^{3,4*}

(1. 呼伦贝尔学院, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2. 内蒙古自治区高校矿产资源安全开采与综合利用工程研究中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 3. 北京林业大学 工学院, 北京 100083; 4. 国家林业和草原局林业装备与自动化重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 在森林采伐作业中, 运输路径规划与作业调度高度耦合, 传统单目标优化方法难以兼顾效率与生态影响。为此, 提出一种融合地表扰动控制的多目标路径调度方法, 实现林区采伐与运输的协同优化。构建以最小运输距离、最小完工时间和最小地表扰动为目标的多目标调度模型, 重点引入道路扰动因子与区域敏感系数以精细化地表扰动的评估。采用改进的非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithms II, NSGA-II), 通过特定编码与进化策略, 进行多目标优化求解。仿真结果显示, 相比贪婪路径法与蚁群算法, 所提方法在运输距离上降低约 14.3%, 地表扰动下降近 32%, 同时保持完工时间基本可比。多目标折中方案在 3 项指标均衡性方面优于各类单目标极端方案。该研究方法在不显著牺牲效率的前提下, 有效降低环境扰动, 实现森林采运任务的调度优化与生态控制的有效协同, 适用于生态约束条件下的智能林业调度场景, 具备良好的推广价值和可持续应用前景。

关键词: 木材采运; 路径调度; 多目标优化; 地表扰动; NSGA-II; 生态约束; 作业调度; 智能林业

中图分类号: S785.1+7

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.jissn.1006-8023.2025.06.019

Multi-Objective Scheduling Optimization for Forest Harvesting and Transportation with Integrated Ecological Disturbance Control

HAN Dongtao^{1,2,3}, MA Yuewei^{3,4*}

(1. Hulunbuir University, Hulunbuir 021000, China; 2. Engineering Research Center for the Safe Exploitation and Comprehensive Utilization of Mineral Resources at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hulunbuir 021000, China; 3. The School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Forestry Equipment and Automation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: In forest harvesting operations, transportation routing and task scheduling are highly coupled. Traditional single-objective optimization approaches often fail to balance operational efficiency with ecological impact. This study proposes a multi-objective scheduling method integrating ecological disturbance control for coordinated optimization of harvesting and transportation. A multi-objective model is developed to minimize total transportation distance, makespan, and surface disturbance. Road-level disturbance coefficients and regional sensitivity factors are prominently introduced for refined assessment of surface disturbance. An improved non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is employed, utilizing specific encoding and evolutionary strategies for multi-objective optimization. Simulation results show that the proposed method reduces transportation distance by approximately 14.3% and surface disturbance by nearly 32% compared to greedy and ACO-based algorithms, while maintaining comparable completion times. The multi-objective compromise solution demonstrates superior to single objective extreme solutions in terms of the balance of three indicators. The method effectively reduces environmental disturbance without significantly sacrificing efficiency, achieves efficient coordination between scheduling optimization of forest harvesting tasks and ecological control, and is suitable for smart forestry scheduling scenarios under ecological constraints and showcasing strong potential for practical

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 2020 年内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY20309); 2023 年呼伦贝尔市“揭榜挂帅”项目 (JBGS-2023001)。

第一作者简介: 韩东涛, 博士, 副教授。研究方向为森林工程装备及其自动化。E-mail: hdt@hlbec.edu.cn

* 通信作者: 马跃威, 博士研究生。研究方向为林业装备与信息化。E-mail: nanlinbeima1@bjfu.edu.cn

引文格式: 韩东涛, 马跃威. 融合生态扰动控制的森林采伐-运输多目标优化调度方法 [J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1299-1309.

HAN D T, MA Y W. Multi-objective scheduling optimization for forest harvesting and transportation with integrated ecological disturbance control [J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1299-1309.

application.

Keywords: Timber harvesting and transportation; routing and scheduling; multi-objective optimization; surface disturbance; NSGA-II; ecological constraints; task scheduling; smart forestry

0 引言

森林采伐与木材运输是林业生产中至关重要的环节,其决策优化直接影响森林经营的经济效益和生态影响^[1]。传统上,采伐作业计划和运输路径规划往往分开进行,各自追求成本或效率最优。然而,在实际操作中,采伐和运输过程相互耦合:采伐作业的位置和时间安排会影响运输距离与时间,运输线路的选择也会影响到作业效率和区域生态。因此,有必要将二者协同考虑,通过多目标优化方法,在提高运营效率的同时兼顾生态环境。

森林采伐调度通常涉及多层次、多目标的规划问题。从战略层面(多年规划)到战术层面(年度、季度)以及作业层面(每日调度),规划重点各有侧重^[2-3]。战略和战术规划多关注长期产量、龄级结构和道路建设布局等,相关研究较为丰富^[4-6]。然而,操作层面的短期采伐与运输协调由于问题复杂度高,研究相对较少。近年来,随着运筹学和智能优化技术的发展,相关学者开始关注作业层面的综合优化。一些研究将采伐作业安排与运材车辆调度同步考虑,旨在提高短期计划的可操作性和效率^[7]。Santos等^[8]提出每日和每周尺度的采伐与运输统筹模型,以获取最小化机械作业和运输总成本。结果表明,运输成本在总成本中占比很高,需协同优化以提升整体效益。诸多成果将林区道路网络、木材场地布局纳入采伐计划模型,以减少重复道路建设和运输里程,提升作业效率。例如,某些研究采用混合整数规划优化森林道路布局和木材运输路径,降低道路施工和维护及运输的总费用^[9]。这些工作为采伐与运输协同提供了思路,但大多以单一经济目标为主。为进一步提高模型实用性,近年开始引入多目标优化理念,将生态、社会指标与经济目标一并考虑^[10]。国内研究也开展了木材采运一体化方面的探索^[11],但研究较少且并不深入。

在森林运输路径优化方面,已有研究广泛应用车辆路径问题模型和启发式算法。传统车辆路径(vehicle routing problem, VRP)聚焦于最小运输距离或成本,对于林业应用,需要考虑山区路网的特殊性和资源分布特征。一方面,林区道路包括主干道和临时作业道,其拓扑通常稀疏且不规则。为此,国外学者开发了基于图论的森林路网模型,将采伐点、集材路径和堆场位置表示为节点和边,以便在算法中灵活表示各种通

行约束^[12]。例如, Mesquita等^[10]构建了包含1 137个林分的大规模路网模型,通过图化方法简化求解空间^[1]。另一方面,由于林区道路条件复杂,通行能力和速度各异,需要在路径规划中纳入路况因子。一些研究通过路网分级和通行时间估算提高模型贴近实际的程度^[13]。也有学者关注低等级作业道的选线优化,应用A*算法、蚁群算法等为林内运输生成高效路径^[14]。总的来看,森林运输路径优化已从早期的简单距离最短模型发展为综合考虑道路网络、运材机械性能和地形因子的复杂问题。最近的综述研究表明,智能算法(遗传算法、贪婪算法等)在林业路径规划中应用广泛。Holmström等^[9]针对北欧林业的集材路径提出一种多目标蚁群优化策略,同时优化路线长度、作业时间和土壤扰动。该研究证实了在不增加太多计算量的情况下,通过启发式算法可以求解3个目标优化问题并获得良好的帕累托解集。国内车辆相关领域也逐渐重视环境友好型路径优化,考虑降低油耗碳排放和地形破坏等要求^[15]。这些研究进展为本研究提供了模型构建和算法设计的依据。

非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithms II, NSGA-II)是当前应用最广泛的多目标进化算法之一,由Deb等^[16]提出。该算法在标准遗传算法基础上引入了快速非支配排序和拥挤度比较等机制,实现对种群个体的帕累托排序及多样性保持^[17]。由于其高效的拥挤度计算和精英保留策略,NSGA-II在求解调度、路径规划等非确定性多项式难题的多目标优化时表现出良好的性能和鲁棒性。调度领域已有大量文献成功应用NSGA-II,如工厂作业调度中的生产周期与能源消耗双目标优化、交通物流中的成本与服务水平权衡等^[18-20]。相比之下,在森林采运调度方面对NSGA-II的应用尚处于起步。国外已有尝试将NSGA-II用于林业多目标规划,例如Santos等^[8]将NSGA-II用于同时优化森林采伐收益和道路建设成本,得到一系列折中方案供决策者选择。这些成果表明,NSGA-II能够较好地处理林业调度问题中的多个冲突目标。本研究采用NSGA-II作为求解器,对所构建的森林多车路径调度模型进行多目标优化求解。通过引入适应本研究问题特性的编码方式和遗传操作,将在算法性能上进行改进,并与单目标优化结果以及其他启发式算法进行对比验证NSGA-II的有效性。

本研究采用一种多车辆路径调度优化方法,综合

考虑最小运输距离、最小总作业时间和最小地表扰动 3 项目标,建立采运调度的数学模型,包括变量定义和三目标函数形式;设计改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解,并通过算例仿真对单目标优化方案与多目标帕累托解集进行对比分析,总结方法的有效性和优势。

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

本研究面向一个包含若干采伐作业点和一个集材中心(林场或贮木场)的森林区域。假设有一支由 K 台运输车辆组成的车队参与木材转运,每台车辆从集材中心出发,前往若干采伐点装载木材后返回。采伐-运输-路径调度的一体化问题可表述为:在给定采伐点位置和待运木材量的条件下,规划每辆车的行驶路线和服务顺序,使总运输距离、总作业时间和地表扰动总量 3 个目标同时达到较优折中。需要满足的基本约束包括:每个采伐作业点的木材须被至少一辆车运输,不得遗漏或重复运输;每辆车的载重不超过其容量;车辆在任意时刻只能服务一个作业点,且单车路线起讫于集材中心。各车辆行驶路径限于森林路网所提供的道路,路网可表示为包含节点和边的图结构,其中节点集 V 由集材中心节点 0 和采伐点节点集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 组成,边集 E 表示节点之间可通行的道路段。表 1 列出了模型中主要用到的符号和参数。

表 1 模型参数符号表

Tab. 1 Notation and description of model parameters

符号 Symbol	含义 Definition
N	采伐作业点集合
K	车辆集合
E	林区运输网络中的路径段集合,即所有可通行道路边
V	林区运输网络中的节点集合,即所有作业点及集材点
d_{ij}	节点 i 到 j 的距离 /km
t_{ij}	节点 i 到 j 的行驶时间 /h
q_i	作业点 i 的木材体积或重量
Q	单辆车的核定载重容量
s_i	作业点 i 的装载服务时间 /h
x_{ijk}	0-1 变量,车 k 是否行驶边 (i,j)
T_k	车辆 k 完成其路线的总用时 /h
T	所有任务完成的总作业时间(完工时间)

在上述符号定义下,可将问题抽象为一个带容量约束的多旅行商问题(multi-depot VRP)的变体。模型需要决定每个车辆的任务分配(即服务哪些采伐点)以及服务顺序(即行驶路径)。由于考虑多目标优化,不同目标往往存在冲突,例如,为减少单车行驶距离,可以让一辆车多服务几个临近作业点,但这会延长该车作业完成时间;又如,为避开易扰动土壤的路段可能需要绕行更远的路径,增加总体距离。因此,本研究需在可行域内同时权衡多个目标,求解帕累托最优解集。接下来将详细给出目标函数的数学形式及模型约束条件。

1.2 目标函数建模

为全面衡量采伐与运输调度方案的优劣,本研究从运输总距离、总作业时间和地表扰动总量 3 方面建立评价指标,并作为优化目标。下面分别对 3 项目标进行建模推导。

1.2.1 最小运输总距离

运输总距离目标 F_1 表示所有车辆行驶的总里程之和,直接反映运输成本和燃料消耗。其数学表达可通过对车辆行驶边的距离累加得到。公式为

$$F_1 = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

式中: x_{ijk} 为 0-1 决策变量,表示车辆 k 是否行驶道路段 (i,j) ; d_{ij} 为该段距离; E 为林区运输网络中所有可通行路径段(边)的集合; $(i,j) \in E$ 表示车辆可从节点 i 行驶至节点 j 。

该目标在许多路径规划研究中被广泛采用,通常与降低运输费用直接相关。在模型中,通过最小化 F_1 可期望减少车辆总行驶里程,从而降低燃油消耗和运营成本。与传统单目标 VRP 不同的是,在满足此目标的同时,还需兼顾其他目标,因此最终解的 F_1 可能略高于纯距离最优的方案,以换取时间或环境指标的改善。

1.2.2 最小总作业时间

总作业时间 F_2 用于衡量所有运输任务完成所需的时间长度。在多车辆并行作业情况下,常用完工时间(makespan)表示,即所有车辆完成其路线的最大结束时间。在此采用完工时间作为时间目标

$$F_2 = \max_{k \in K} \{T_k\} \quad (2)$$

式中: T_k 为车辆 k 执行完其分配任务所用时间,包括行驶和装载作业时间之和。

由于难以直接优化含最大值运算的目标函数,故本研究将含有最大值运算(max)的目标函数通过辅助变量与线性约束进行等价转换,以便将其纳入标准的

混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)求解框架中。引入辅助变量 T 替代原始目标中的最大值,增加如下线性约束,公式为

$$T \geq T_k, \forall k \in K. \quad (3)$$

并令该目标函数 F_2 表述为最小 T 加以线性化处理。完工时间目标反映了采运调度的效率,希望尽可能缩短最后一辆车返回的时间,从而提高整体作业进度。在多目标情境下, F_2 与 F_1 并非完全一致,当增加车辆数量或均衡任务分配可降低完工时间,但可能增加总行驶里程。因此需要在算法中针对 F_2 与其他目标进行折中求解,以实现作业效率和成本的平衡。需要注意,如果不考虑完工时间而采用所有车辆时间之和作为目标,可能会得到不合理的结果(如为了缩短总时间而让部分车辆空跑),因此本研究选取完工时间更符合实际调度需求。

1.2.3 最小地表扰动总量

森林地表扰动指运输车辆反复碾压对土壤和植被造成的破坏程度,是评价作业环境影响的关键指标。在模型中用 F_3 表示所有车辆行驶引起的地表扰动总量。由于地表扰动难以直接测量,通常通过道路或地块的易损性指数和车辆通过次数进行估算。本研究借鉴相关研究,引入道路扰动系数 w_{ij} 来表征车辆每次经过边 (i,j) 对土壤造成的扰动“代价”^[9]。例如,软土或高湿地段的 w_{ij} 取值较大,坚硬路面的 w_{ij} 较小。则可定义为

$$F_3 = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} x_{ijk}. \quad (4)$$

该目标实际计算各车辆路线经过的所有道路段的扰动代价之和。当道路允许多辆车通行时, x_{ijk} 的累加效应会体现重复碾压导致的扰动叠加。如果需要考虑更精细的影响,可将 w_{ij} 设定为非线性函数,例如随着通过次数增加而单位扰动加剧。但为保持模型简洁,本研究采用线性近似,即每次通过贡献固定扰动量,重复通过则累加。本目标的优化将倾向于选择对环境影

1.3 约束条件

在优化上述目标的同时,模型需满足以下约束条件。

任务分配约束:每个采伐点的运输任务必须被且仅被一辆车辆执行。用变量表示,对于每个采伐点

$i \in N$,有且仅有一条由某车辆 k 从 i 离开的路径,公式为

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{j,i,k} = 1, \forall i \in N. \quad (5)$$

同样,每个采伐点也仅能被一辆车到达,公式为

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{j,i,k} = 1, \forall i \in N. \quad (6)$$

以上保证每个作业点被一次完整服务,不会重复或遗漏。

流平衡约束:对于每辆车 k ,其路线应首尾相接,且满足路径连续性。对于除集材中心(节点0)外的任意节点 i ,公式为

$$\sum_{j \in V} x_{ij,k} = \sum_{j \in V} x_{ji,k}, \forall k \in K, i \in N. \quad (7)$$

这表示车辆进出任意中间节点的次数相等,以防止出现车辆路径断裂或飞车现象。

车辆容量约束:每辆车运输的木材总量不得超过其容量 Q 。若用辅助变量 y_{ik} 表示车辆 k 服务了采伐点 i ,可线性化表示为

$$\sum_{i \in N} q_i y_{ik} \leq Q, \forall k \in K. \quad (8)$$

并通过约束

$$y_{ik} \geq \sum_{j \in V} x_{ji,k}. \quad (9)$$

其作用在于,若车辆 k 的路径覆盖了节点 i ,则相应的 y_{ik} 必须为1^[15]。该约束保证装载不超限。

子路径消除约束:为防止生成不经过集材中心的闭合回路(子环路),可采用MTZ格式等经典方法添加约束。由于属于标准VRP约束,此处不再赘述。

满足上述约束的所有解构成了问题的可行解集。在此基础上,以向量 $F = (F_1, F_2, F_3)$ 衡量解的质量,并定义帕累托最优解为:不存在另一可行解使得3个目标中任意一个不劣且至少一个更优。

2 算法设计

针对上述多目标优化模型,本研究设计了基于改进NSGA-II的求解算法。算法包括编码解码、种群初始化、快速非支配排序、拥挤度计算、遗传算子和终止条件等模块,整体流程如图3所示。在实现过程中,针对森林采运调度问题的特点对标准NSGA-II进行了改进,以提高搜索效率和解的质量。

2.1 染色体编码及解码方式

为适应车辆路径的染色体表示,本研究采用整数序列编码。每条染色体用一个整数串表示一条综合路线,串长为 $n + k - 1$,其中, n 是作业点数, k 是车辆数。整数串包含所有采伐点编号以及 $(k - 1)$ 个特殊分隔符,用于划分不同车辆的路线。例如,对于 $k = 3$ 辆车、

$n = 6$ 个采伐点的方案,可编码为序列:“3 | 5 2 7 | 4 1 6”。其中符号“|”表示分隔符,将序列划分为3段,分别

对应车辆 1、2、3 的服务点序列。图 1 给出了染色体编码结构示意图。

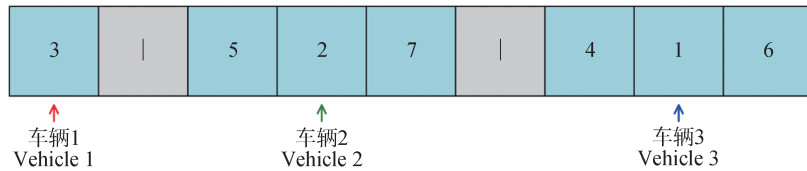


图 1 染色体编码示意图

Fig. 1 Chromosome encoding diagram

在解码时,读取染色体序列,按照分隔符将其切分为 k 段,对应每辆车的访问顺序。然后在每段首尾添加集材中心节点 0,即可还原为实际的车辆行驶路径序列。对于上述示例,解码得到:车辆 1 路线 0—3—0, 车辆 2 路线 0—5—2—7—0, 车辆 3 路线 0—4—1—6—0。需要检查并修复解码所得路线是否违反容量等约束,若有则需在初始化或进化过程中进行调整(例如重新分配部分任务给其他车辆)。本研究参考丁澍等^[15]的编码模式,这种编码方式简单直观,能够有效表示不同车辆的任务划分和顺序信息,相比直接用固定长度向量表示每辆车路径的编码,本模式更灵活,允许在交叉变异中车辆间交换任务,增强了搜索空间探索能力。

2.2 初始种群生成策略

初始种群的多样性对算法性能有重要影响。采用启发式构造与随机生成相结合的策略产生初始解集。一方面,基于最近邻启发式构造 k 条贪心路径:优先将地理位置接近且满足容量约束的作业点分配给同一车辆,可得到距离较短的可行解;另一方面,生成一定数量的随机染色体,通过随机打乱作业点顺序和车辆分配来提供解的多样性。在随机生成时确保每辆车至少分到一个任务并不超载,以满足基本约束。将启发式解和随机解混合组成初始种群,这种方法既保证了初始解的质量,又避免过于集中在一个解附近。初始种群规模设为 P (通常取 50~100),包含的个体均为可行解。初始种群经过非支配排序后,各前沿层个体将参与后续繁衍操作。

2.3 快速非支配排序算法

NSGA-II 的核心在于对种群进行非支配排序^[17]。按照 Deb 等^[16]提出的快速非支配排序方法对个体进行分层:对于种群中每个个体,统计其支配的个体集合 S 和被支配数 n_p 。首先扫描整个种群,将 $n_p = 0$ 的个体归为第 1 非支配层(帕累托前沿)。然后,将这些个体从种群移除,并将其支配的个体的 n_p 各减 1,若某个个体的 n_p 降为 0,则归入第 2 层。如此迭代,直至分层完毕。经过非支配排序,种群被划分为 F_1, F_2, \dots 多个

层级,其中 F_1 为当前帕累托最优集。非支配排序为多目标选择提供了依据。相比朴素的两两比较,快速排序利用支配集记录避免了重复比较,复杂度降为 $O(MN^2)$ (M 为目标数, N 为种群规模)。在本研究实现中,针对 3 目标优化进行了相应调整,排序结果可靠地降解分层,为拥挤度计算和选择操作奠定了基础。

2.4 拥挤度距离计算

为保持种群多样性,NSGA-II 在选择时引入拥挤度距离(crowding distance, CD, 式中记为 C_{Di})评价个体相对密集程度^[17]。具体而言,对每一非支配层内的个体,在每个目标维度按照目标值大小排序,计算相邻个体之间目标函数值差距之和作为拥挤度距离 C_{Di} ,公式为

$$C_{Di} = \sum_{f=1}^M \frac{f_i^{(f)} - f_{i-1}^{(f)}}{f_{\max}^{(f)} - f_{\min}^{(f)}} \quad (10)$$

式中: $f_i^{(f)}$ 表示层内按目标 f 排序后第 i 个个体的目标函数值; $f_{\max}^{(f)}$ 和 $f_{\min}^{(f)}$ 为该层此目标的最大值和最小值。

边界个体的拥挤度取无限大,以保证帕累托边界两端的极端解被保留。拥挤度反映了个体周围解的稀疏程度,拥挤距离大的个体所在区域解稀少,更应被保留以维持解集分布的均匀性。在实现时,依次对 F_1, F_2, \dots 各层个体根据式(10)计算拥挤度。由于优化目标为 3 个,需要在 3 个维度上计算距离并归一化累加。特别注意,如果某目标层内个体值都相等,则该目标对拥挤度无贡献。计算完成后,在同一层选择时将优先保留拥挤距离大的个体。拥挤度算子的应用确保算法不仅追求帕累托逼近性,也关注解在帕累托前沿上的分布多样性。

2.5 遗传操作流程

综合非支配排序和拥挤度信息,NSGA-II 采用锦标赛选择机制从当前种群中筛选出父代个体,随后对这些个体执行交叉和变异操作,以产生新一代。遗传操作包括选择(selection)、交叉(crossover)和变异(mutation)。在选择阶段,采用二元锦标赛:每次随机挑选 2 个个体,首先比较其所属层次,层次低(非支配层级

高)的个体胜出;若层次相同则比较拥挤度,拥挤度大的胜出。这一选择机制偏好帕累托层高且分布广的个体。

随后进行交叉操作。针对染色体的整数序列编码设计了部分匹配交叉(PMX)。随机选择2个染色体,将其中一段子串互换,并通过修复确保每个任务点在子代中仍只出现一次。具体实现是:随机确定2个交叉点,将父代A、B染色体间该区段子串交换到对方产生子代,然后扫描子代序列,对重复出现的任务点进行调整,用相应缺失的任务点替换,从而保持解的可行性。交叉操作概率 P_c 设为0.8,以平衡解结构重组和保留。

在变异操作方面,采用交换变异和转位变异相结合。交换变异是随机选择染色体中的2个任务基因对调,改变车辆任务分配或顺序;转位变异是将一段子串

在染色体中移动位置。对于编码,变异可能引起分隔符位置变化,即任务在不同车辆之间转移,从而探索新的任务分配方式。变异概率 P_m 相对较小以防止解过度随机化。

交叉和变异产生的后代解往往需要检查容量等约束,若有违约则应用简单修复策略,如调整分隔符位置重新划分负载或丢弃重插。完成遗传操作后,将得到规模为 P 的子代种群。将当前父代种群与子代合并,大小 $2P$,对其按照本研究的快速非支配排序方法重新进行非支配排序。随后从第1层开始逐层选取个体进入新的父代种群,直到选满 P 个个体。若选至某层时超出 P ,则根据拥挤度大小选取所需数量。这样生成的新种群包含上一代精英解和新探索解,进入下一代循环。整个进化流程如图2所示。

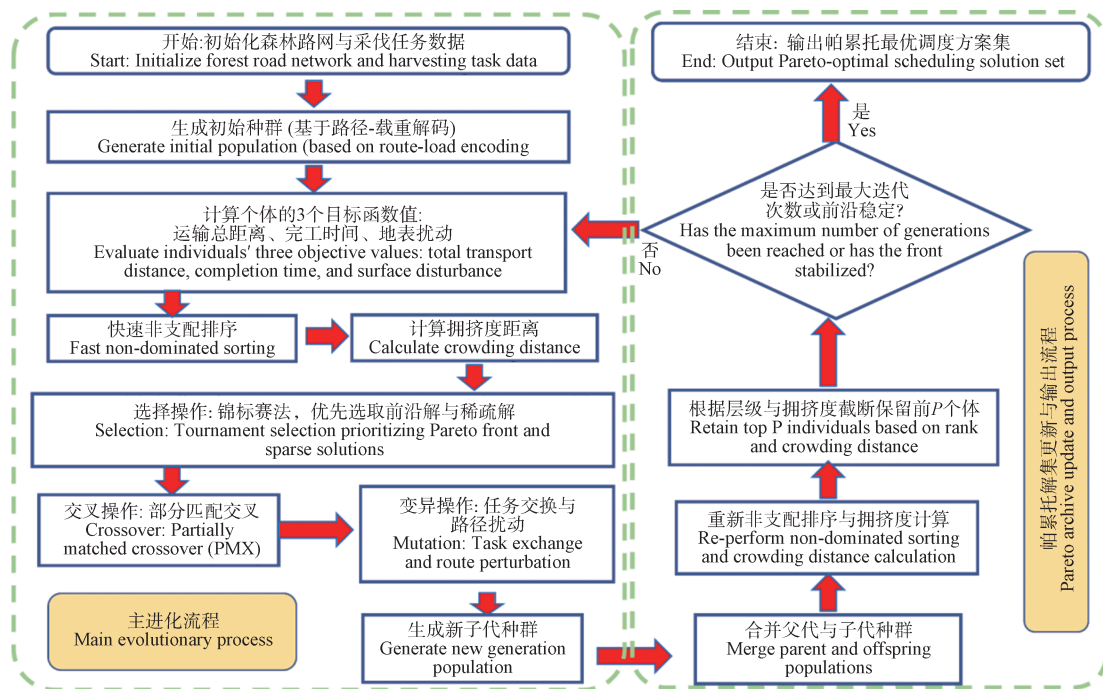


图2 本研究NSGA-II算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the NSGA-II

由图2可知,算法首先初始化种群,评估目标函数后进行非支配排序和拥挤距离计算,然后进入迭代。在每次迭代中,通过选择、交叉、变异得到子代,并将父代和子代合并排序,择优组成下一代。如此循环,直到满足终止条件。依托这一流程,算法逐步逼近帕累托最优前沿。

2.6 迭代终止条件设定

为判断算法何时停止,采用最大代数和收敛判据相结合的策略。首先设定一个最大的进化代数 G_{max} ,例如500代,作为强制终止条件。如果算法达到该代

数则停止并输出当前非支配解集。同时,引入收敛检测:每隔若干代检查帕累托前沿的变化,如果前沿在连续 T 代(如50代)内无明显改进(例如前沿解的目标值变化幅度低于阈值),则认为算法趋于收敛,可以提前终止。这一软条件避免了不必要的迭代,节省计算时间。在实践中,也监控种群的多样性指标,如拥挤距离平均值,防止过早收敛陷入局部最优。当发现种群多样性急剧下降时,可增加少量随机个体以重新扩散种群。综合采用以上终止条件,算法既能保证基本代数的搜索,又能根据收敛情况灵活停止。在算例测试中,

将给出终止代数的典型取值和收敛判断效果。

3 案例仿真与分析

3.1 试验设置

为了验证本研究所提出的多目标协同优化调度模型及算法的有效性,构建一个模拟森林采伐与运输调度的仿真实例,采伐点数量设为 10 个,车辆数量为 3 辆,集材中心位于坐标原点(0,0)。本试验模拟的地理空间为二维平面,所有位置均以平面坐标表示。采伐点的位置分布与木材量、服务时间等基础信息见表 2。NSGA-II 参数设定为:种群规模 $P=50$,最大迭代代数 $G_{max}=300$,交叉概率 0.8,变异概率 0.1。

为更贴近森林作业环境的实际情况,本研究在建模中假设林区内部构成一张完全图,如图 3 所示。道路间距离采用欧氏距离计算,车辆平均行驶速度设为 30 km/h。同时,为反映不同道路类型与区域土壤敏感性对地表扰动的影响,引入扰动系数 w_{ij} ,具体设定如下:根据道路等级划分,主干道路段扰动系数取值为 0.8~1.0,次干道路段为 1.0~1.2,支线道路段为 1.2~1.5;同时,根据作业区域的地质条件引入区域敏感度系数,如东部松软地带设为 1.2,北部相对稳定区域设为 0.9,南部为 1.0,集材中心周边硬质区域为 0.8。

表 2 伐点信息仿真参数设定

Tab. 2 Simulation parameters of harvesting points

采伐点 Harvesting point	坐标位置(x, y) Coordinate position	木材量 q_i /t Timber volume	服务时间 s_i /h Service time
1	(18, 3)	10	1.0
2	(20, 1)	8	1.0
3	(18, -3)	9	1.0
4	(20, -1)	7	1.0
5	(-2, 12)	5	0.5
6	(2, 12)	6	0.5
7	(0, 8)	4	0.5
8	(0, -8)	5	0.5
9	(-3, -12)	6	0.5
10	(3, -12)	7	0.5
集材中心 Skidding center	(0, 0)	-	-

最终的路径扰动系数由道路等级与区域敏感度共同决定,作为地表扰动目标函数的输入因子参与优化建模。

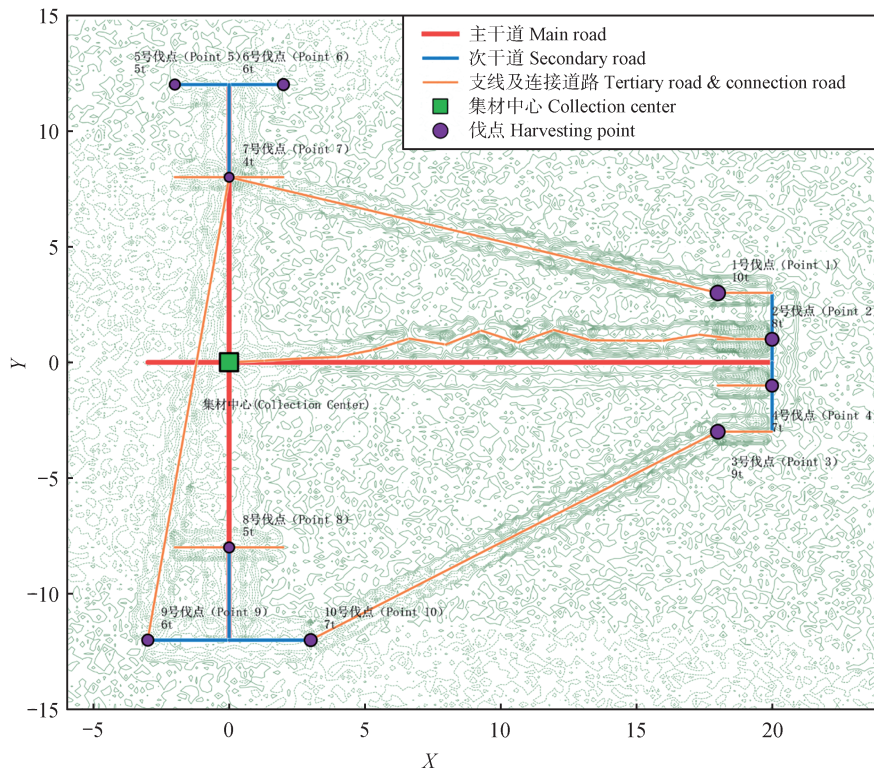


图 3 试验区节点与路网分布图

Fig. 3 Distribution map of nodes and road network in the experimental area

3.2 与其他遗传算法的对比

为验证本研究所提出的NSGA-II多目标优化算法在采伐-运输协同路径调度问题中的优越性,选取2种典型对比算法作为参照:1)传统的贪婪最近邻路径法(greedy nearest neighbor, GNN),该方法在森林作业调度中常作为启发式基准;2)Holmström等^[9]提出了基

于线性加权蚁群优化的调度方法(ACO),该方法已在林业采运路径优化中应用并获得较好结果。对3种算法在总距离、完工时间和地表扰动3个目标函数上的优化过程进行跟踪比较,绘制其随迭代代数变化的收敛曲线,结果如图4—图6所示。

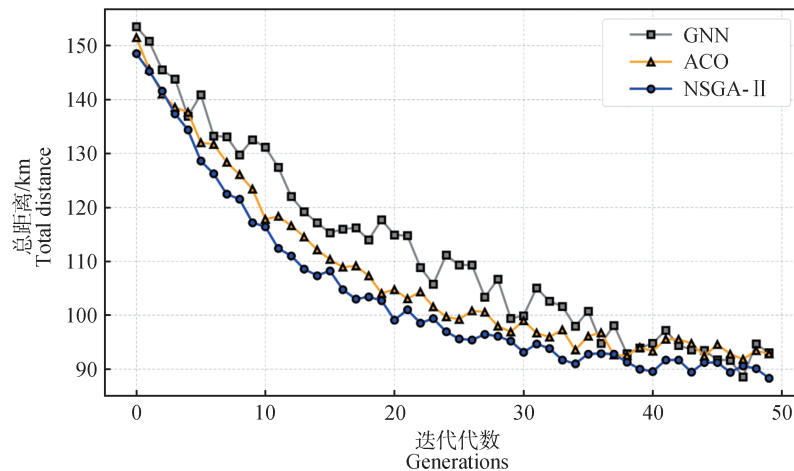


图4 各个方法总距离目标的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of the total distance objective for different algorithms

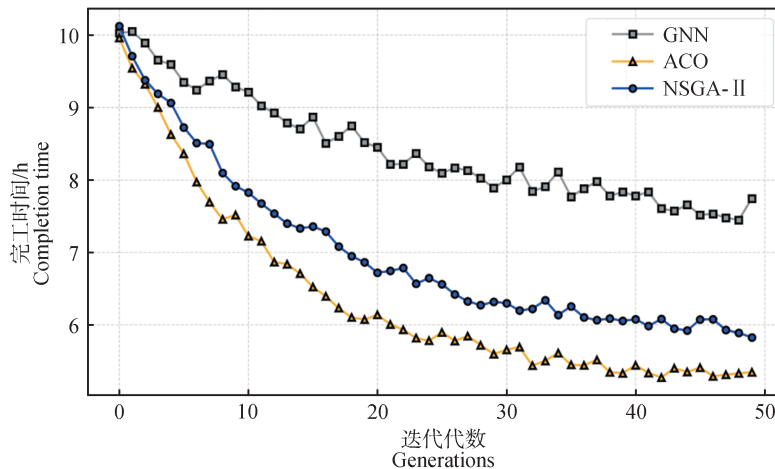


图5 各个方法完工时间目标的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of the makespan objective for different algorithms

图4展示了3种方法在优化“总运输距离”目标上的收敛曲线。可以观察到,初始阶段各算法在总距离指标上均有显著下降,但随着迭代进行,NSGA-II的收敛速度和最终结果最优,约在第30代后稳定于90 km左右,而ACO方法最终停留在95 km附近,GNN则较差,稳定在105 km以上。这表明NSGA-II在保持种群多样性基础上,能够持续挖掘全局更优解,其染色体结构和多目标演化机制在减少不必要路径跳跃、合并近

邻任务方面表现出色。相比之下,ACO方法虽引入了启发信息素调节,但受限于线性加权策略,其不同目标冲突权衡中容易陷入局部较优区间。

图5给出了各方法在最小化作业完工时间(即最长车辆任务时长)的优化曲线。初始阶段三者完工时间均接近10 h,随后快速下降。ACO方法在前20代的下降速度最快,并最终稳定在约5.3 h,在完工时间这一单项指标上相较于NSGA-II(最终稳定在约6.0 h)

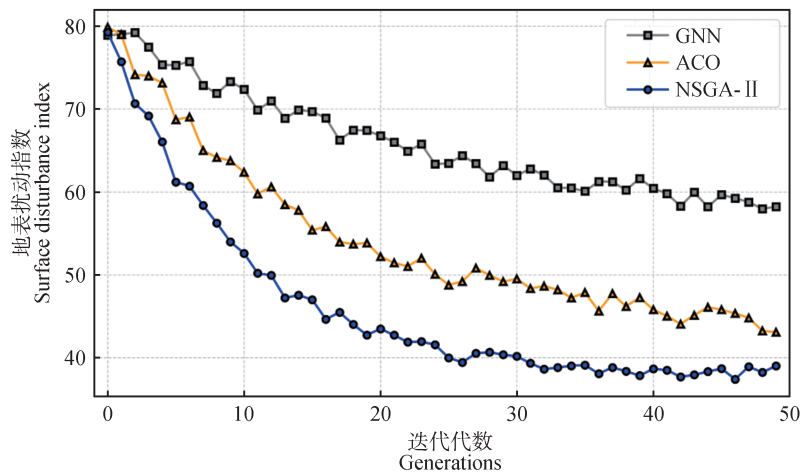


图 6 各个方法地表扰动目标的收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of the surface disturbance objective for different algorithms

表现更优,而GNN方法则在7.2 h时左右停滞,明显劣于其余2种方法。值得注意的是,尽管NSGA-II在该单一目标上略逊于ACO,但期解分布更加均衡,避免了ACO可能出现的路径片段重复问题。特别在多目标解空间中,NSGA-II所获得的路径分配更加合理,有效避免了作业过度集中在单车而导致其时间激增的现象。

图6显示了3种方法在地表扰动指数上的收敛性能。扰动指数是衡量作业路径对环境影响程度的重要指标,考虑了道路等级与区域土壤敏感性的复合影响。从结果看,NSGA-II再次明显优于其他方法,在第50代后将扰动值稳定在40以下,ACO方法约在50附近,而GNN方法在60以上振荡。分析认为,NSGA-II在进化过程中倾向于重用已有路径并减少车辆重复碾压敏感区域,从而有效降低了整体扰动;而GNN和ACO路径选择过程中未将扰动显式作为可独立优化目标,导致多次进入敏感区域、重复穿越软土地段等问题较突出。

从3项指标的收敛曲线综合观察,NSGA-II表现出更稳定的多目标协同优化能力:其保持了总距离最短,虽然完工时间略慢于ACO方法,但该方法显著降低了地表扰动。该结果验证了本研究算法在兼顾效率与环境可持续性方面的优越性,特别适用于对生态约束要求较高的森林作业场景。

3.3 单目标与多目标对比分析

通过前文算法对比试验证明,NSGA-II多目标进化策略在采伐与运输任务路径协同优化中展现出显著优势,能够在复杂约束下有效协调多目标之间的冲突,生成分布合理的非支配解集。为进一步验证其在调度系统层面产生的综合效益,本节从作业路径、调度效率和地表扰动3方面入手,选取一组典型的NSGA-II帕累托前沿折中解,分别与3个单目标优化方案进行深

入对比分析,力图揭示多目标优化方案在实际部署中的可取性与调度均衡性。

图7展示了多目标折中方案下3辆作业车辆的甘特图调度流程。图7中每辆车对应一条水平作业时间轴,淡蓝色区段表示行驶时间,淡绿色区段表示在各采伐点的装载服务时间,区段上的数字为作业点编号。由图7可见,车辆1承担了1号、2号、4号等东侧远距离采伐点的运输任务,任务间衔接紧凑,作业安排流畅;车辆2服务于较为中部的3号、7号、8号,在短时间内完成双点往返;车辆3则覆盖了北侧5号、6号和南侧9号、10号,作业路径横跨南北,通过适当的时间调度与路径划分,有效压缩了整体作业时长。3辆车的作业时段整体控制在5 h以内,且无明显空驶或等待现象,调度整体表现均衡,既兼顾了运输效率,又未出现任务过度集中在单一车辆的现象,体现出NSGA-II优化机制在任务划分、路径顺序与车队协同方面的显著调控能力。

为系统评估各调度方案的综合性能,图8将3项关键目标指标(总运输距离、作业完工时间和地表扰动程度)进行归一化处理,并以柱状图形式展示4类方案在各指标上的相对表现。其中,归一化值为1.0表示在该目标上的最优解,其余方案在该目标上的值越接近1,表示性能越接近最优。对于最小化目标,性能值通过 $f_{norm} = f_{min}/f_i$ 的方式计算,其中, f_i 表示第*i*个方案在该目标上的原始值, f_{min} 为所有方案中该目标的最小值, f_{norm} 为第*i*个方案归一化后的性能值,值越接近1表示性能越优。

由图8可见,3类单目标方案在其各自目标上均达到最优状态,但往往伴随着对其他目标的明显牺牲。例如,距离最优方案(MinDist)虽然在总里程上控制最为紧凑,但其作业时间和扰动值均显著高于其他方案;

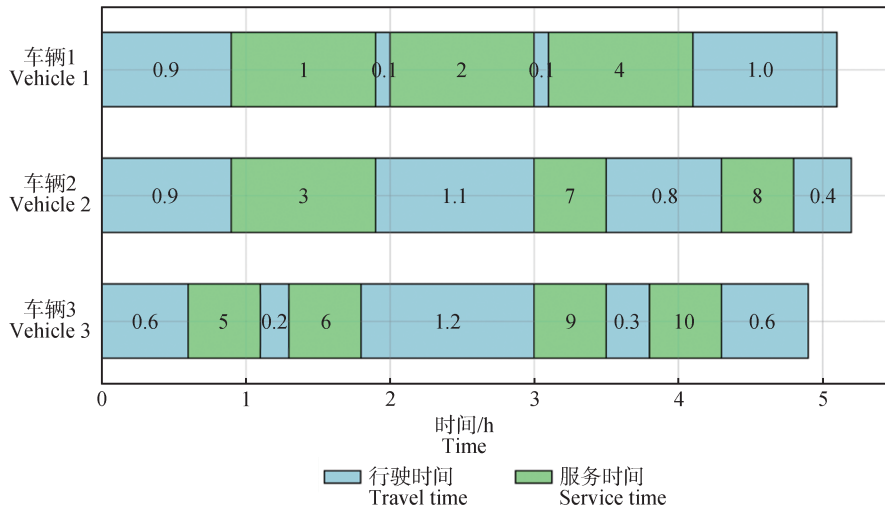


图7 折中方案车辆调度甘特图 (显示任务分配与作业时序)

Fig. 7 Vehicle scheduling Gantt chart for the compromise solution (showing task allocation and operational timing)

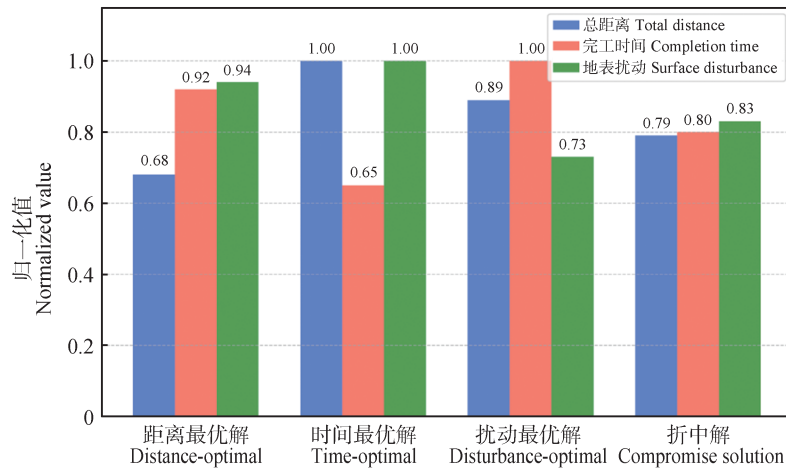


图8 各优化方案性能归一化比较

Fig. 8 Normalized performance comparison of optimization solutions

时间最优方案(MinTime)为压缩完工时间动用了更多车辆并加快了路径切换频率,造成了地表扰动的大幅增加;而扰动最优方案(MinDamage)虽在生态影响控制方面最具优势,但其对应的运输距离与作业时长相应升高,调度节奏不如其他方案高效。相比之下,多目标折中方案在3个目标上虽均未达到绝对最优,但在总体性能上实现了良好的权衡:其在距离、时间、扰动3项指标上归一化值分别为0.79、0.80、0.83,均控制在较优水平,且无一项性能表现明显失衡。该结果表明,NSGA-II所生成的折中解在不显著损失任一指标性能的前提下,获得了更加稳健与实用的调度执行方案,具备较高的工程可部署性与决策参考价值。

总体而言,单目标优化方法虽在其特定目标上表现突出,但其解空间受限,缺乏对系统整体性的全局把控。而多目标协同优化方法则提供了一个均衡且多样

化的非劣解集,在森林采伐与运输路径调度这一典型“多目标、强制约”问题中,展现出更优越的系统适应性与调度弹性。

4 结论

本研究针对森林采伐与运输多车路径调度问题,构建了一个多目标协同优化模型,并提出基于NSGA-II的求解方法。通过将运输总距离、总作业时间和地表扰动纳入目标函数,模型实现了对经济效率和生态影响的综合平衡优化。主要创新和研究贡献如下。

1)提出了森林采运调度多目标优化模型:将传统车辆路径问题扩展到森林采伐-运输一体化情景,首次在研究中将土壤扰动等环境因素作为独立优化目标明确引入模型,为森林工程调度提供了更全面的决策支持框架。

2)设计了适应问题特点的遗传编码与NSGA-II算法:采用整数编码和分隔符表示多车辆路径,实现染色体对任务分配和顺序的统一表示,结合改进的PMX交叉和变异操作,有效探索了解空间。通过非支配排序和拥挤度维持策略,算法获得了分布均衡的帕累托最优解集。

3)通过仿真试验验证,所提出算法能够在较短时间内稳定收敛,输出均衡分布的帕累托非劣解集。对比贪婪路径法(GNN)与蚁群算法(ACO)结果表明,NSGA-II在优化总距离与降低扰动方面具有明显优势,且在完工时间控制方面具备较强竞争力。此外,本研究进一步分析了3类单目标优化方案与一类多目标折中解的调度效果,结果显示多目标方案在效率与环境影响之间取得良好平衡,更符合实际林业作业对综合绩效的要求。

参 考 文 献

- [1] 李微,万志芳. 关于林业产业演进的理论探讨[J]. 世界林业研究,2013,26(4):87-92.
LI W, WAN Z F. Theoretic discussion on forestry industry evolution[J]. World Forestry Research,2013,26(4):87-92.
- [2] WEINTRAUB A, CHOLAKY A. A hierarchical approach to forest planning [J]. Forest Science, 1991, 37 (2) : 439-460.
- [3] MITCHELL S A. Operational forest harvest scheduling optimisation; A mathematical model and solution strategy [D]. Auckland:University of Auckland,2004.
- [4] BONT L G, FRAEFEL M, FISCHER C. A spatially explicit method to assess the economic suitability of a forest road network for timber harvest in steep terrain [J]. Forests, 2018,9(4):169.
- [5] MCDILL M E, REBAIN S A, BRAZE J. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints [J]. Forest Science,2002,48(4):631-642.
- [6] YOSHIMOTO A, ASANTE P. A new optimization model for spatially constrained harvest scheduling under area restrictions through maximum flow problem [J]. Forest Science,2018,64(4):392-406.
- [7] RÖNNQVIST M, D'AMOURS S, WEINTRAUB A, et al. Operations research challenges in forestry: 33 open problems [J]. Annals of Operations Research,2015,232:11-40.
- [8] SANTOS P A V H D, DA SILVA A C L, ARCE J E, et al. A mathematical model for the integrated optimization of harvest and transport scheduling of forest products [J]. Forests, 2019, 10(12) : 1110.
- [9] HOLMSTRÖM E, NIKANDER J, BACKMAN J, et al. A multi-objective optimization strategy for timber forwarding in cut-to-length harvesting operations [J]. International Journal of Forest Engineering, 2023, 34(2) : 267-283.
- [10] MESQUITA M, MARQUES S, MARQUES M, et al. An optimization approach to design forest road networks and plan timber transportation [J]. Operational Research, 2022,22(3):2973-3001.
- [11] 王永清,万志芳. 论国有林区营林与采运生产间关系的制度安排[J]. 林业科学,2006(8):74-81.
WANG Y Q, WAN Z F. Discuss the system arrangement of new relation between planting forest and cutting-transport production in state-owned forest region [J]. Scientia Silvae Sinicae,2006(8):74-81.
- [12] TOTH P, VIGO D. Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem [J]. Discrete Applied Mathematics,2002,123(1-3):487-512.
- [13] IASEVOLI G, MASSI M. The relationship between sustainable business management and competitiveness: Research trends and challenge [J]. International Journal of Technology Management, 2012, 58(1/2) : 32-48.
- [14] VEISI O, MORADI M A, GHARAEI B, et al. Sustainable forestry logistics: Using modified A-star algorithm for efficient timber transportation route optimization [J]. Forest Policy and Economics, 2025, 173: 103456.
- [15] 丁澍,邱玉琢. 考虑低碳的多目标冷链混合车队路径规划研究[J]. 计算机工程与应用,2024,60(14):337-347.
DING S, QIU Y Z. Research on route planning of multi-objective cold chain mixed fleet considering low carbon [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(14) : 337-347.
- [16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2) : 182-197.
- [17] RAHIMI I, GANDOMI A H, DEB K, et al. Scheduling by NSGA-II : Review and bibliometric analysis [J]. Processes,2022,10(1):98.
- [18] YUSOFF Y, NGADIMAN M S, ZAIN A M. Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 3978-3983.
- [19] DEB K, RAO U B N, KARTHIK S. Dynamic multi-objective optimization and decision-making using modified NSGA-II : A case study on hydro-thermal power scheduling [C]//Proceedings of the International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Matsushima, Japan:Springer,2007:803-817.
- [20] BEKELE E G, NICKLOW J W. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II [J]. Journal of Hydrology, 2007, 341(3-4) : 165-176.