北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

空间自适应免疫优化框架下的红松籽物流集散中心选址

颜德雯 孙术发 李兴东 张伊淼 杨旭

Immune-optimized, spatially adaptive siting of Korean pine nut hubs

Yan Dewen, Sun Shufa, Li Xingdong, Zhang Yimiao, Yang Xu

引用本文:
颜德雯, 孙术发, 李兴东, 张伊淼, 杨旭. 空间自适应免疫优化框架下的红松籽物流集散中心选址[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9):110–121. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250154
Yan Dewen, Sun Shufa, Li Xingdong, Zhang Yimiao, Yang Xu. Immune–optimized, spatially adaptive siting of Korean pine nut hubs[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9):110–121. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250154

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250154

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

不同提取方法对红松籽油提取效果及功能性质的影响
Effects of different extraction methods on extraction effect and functional properties of Korean pine seed oil
北京林业大学学报, 2021, 43(1): 127–135. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200109

基于Voronoi图的阔叶红松林空间结构特征分析
Quantitative analysis of spatial structural characteristics of broadleaved Korean pine forest based on Voronoi diagram
北京林业大学学报, 2021, 43(1): 20–26. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200056

基于地理加权回归的天然次生林进界木空间分布模拟
Spatial distribution simulation of recruitment trees of natural secondary forest based on geographically weighted regression
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200157

基于AHP–CRITIC组合赋权法的长白山天然林空间结构优化调整
Stand structure optimization and adjustment of natural forest in Changbai Mountains based on AHP–CRITIC combination weight method
北京林业大学学报, 2023, 45(8): 74–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220479

基于自适应遗传优化递归神经网络的木工送料平台补偿控制研究
Compensation control of woodworking feeding platform based on self–adaptive genetic optimization recurrent neural network
北京林业大学学报, 2020, 42(12): 125–134. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200248

以生境保护优先的北京市第二道绿化隔离地区郊野公园选址方法
Site selection methods of country park with priority of habitat protection in the second green isolated area of Beijing
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 127–137. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200135

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250154

空间自适应−免疫优化框架下的红松籽物流集散中心选址

颜德雯[1]　孙术发[1]　李兴东[2]　张伊淼[1]　杨　旭[1]
（1. 东北林业大学土木与交通学院，黑龙江 哈尔滨 150040；2. 东北林业大学机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘要:【目的】红松籽是中国东北林区高价值林产品的典型代表，对区域农村经济和生态安全具有双重意义。然而，不完善的物流基础设施和高昂的运输成本严重制约了其产业潜力。现有物流网络研究普遍忽视了林区特殊空间与环境特征，亟需面向林产品复杂性的专属决策工具。为此，本研究基于空间自适应构建 3 阶段选址框架，旨在为红松籽物流系统提供兼顾生态约束与经济效率的落地方案。**【方法】**研究以伊春市红松主产区为样本，令模型随空间特征自我调整：先用 GIS-BWM-WLC 集成 13 项空间因子生成适宜图；再经布尔运算剔除禁建区，得到备选点。随后按红松几何中心布设供应点，并以凉水自然保护区产量推算各点供应量。最后将备选点、供应点、道路与需求一并输入 MATLAB 的 IOA 模块，求解选址问题，并输出 GIS 可视化方案。**【结果】**框架从 180 个备选点中筛出 32 个集散中心，形成“高适宜−沿路−入林”的空间格局：32 个中心全部落在高适宜区，满足成本与容量约束；70% 以上沿道路线分布，缩短了平均运输距离；3 个中心深入红松籽主产区，降低了红松籽损耗与成本。模型兼顾了交通、基建与产区覆盖，验证其精准性与经济性。**【结论】**本研究提出的“加权线性组合—红松产量预测—智能算法优化”选址模型较传统方法更科学合理，既充分考虑红松空间分布与产量，又兼顾交通、基建与服务多重目标。该模型在红松籽物流集散中心选址中具备有效性与可行性，可为红松籽产业可持续发展提供有力的物流支撑。同时，该框架对同类特色林产品物流系统建设具有普适性参考意义。

关键词：空间自适应框架；选址；红松籽；最佳−最差法 (BWM)；加权线性组合 (WLC)；免疫优化算法 (IOA)；地理信息系统 (GIS)

中图分类号：S783.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)09−0110−12

引文格式：颜德雯，孙术发，李兴东，等. 空间自适应−免疫优化框架下的红松籽物流集散中心选址［J］. 北京林业大学学报，2025，47(9)：110−121. Yan Dewen, Sun Shufa, Li Xingdong, et al. Immune-optimized, spatially adaptive siting of Korean pine nut hubs［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 110−121.

Immune-optimized, spatially adaptive siting of Korean pine nut hubs

Yan Dewen[1]　Sun Shufa[1]　Li Xingdong[2]　Zhang Yimiao[1]　Yang Xu[1]
(1. College of Civil Engineering and Transport, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract:［**Objective**］Korean pine nuts are representative high-value forest products in northeastern China, serving both rural prosperity and ecological security. Yet, poor logistics infrastructure and high transportation costs have limited their industrial potential. Existing studies on logistics networks often neglect the unique spatial and environmental conditions of forest regions. There is a need for decision-making tools tailored to the complexity of forest products. We aim to develop a three-stage location

收稿日期: 2025−04−30　**修回日期:** 2025−08−25

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目（PL2024C003），国家自然科学基金项目（32471857）。

第一作者: 颜德雯。主要研究方向：林产品物流与生态供应链。Email: 18211919073@163.com　地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学土木与交通学院。

责任作者: 孙术发，教授，博士生导师。主要研究方向：特种车辆结构设计、无线通信、新能源技术、物流装备设计、应急物流。Email: ssfangel@163.com　地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

framework with spatial adaptation to provide practical solutions for Korean pine nut logistics that balance ecological constraints and economic efficiency. [**Method**] Yichun, the core Korean pine belt, served as the study area. The model was made to self-adjust to local spatial traits. First, a GIS-BWM-WLC method integrated 13 spatial factors to generate a suitability map. Boolean operations were then applied to exclude restricted areas, leaving candidate sites. Second, supply points were set at the geometric centers of pine stands, and their supply volumes were estimated from the Liangshui Nature Reserve yield data. Finally, candidate sites, supply points, roads, and demand were fed to MATLAB's IOA module to solve the location problem and output the GIS-based visual plan. [**Result**] The framework identified 32 distribution hubs out of 180 candidates, forming a spatial pattern of "high suitability-roadside-into the forest". All hubs sit in high-suitability zones, meeting cost and capacity requirements. Over 70% follow existing roads, shortening the average haul. Three hubs extend into the main Korean-pine belt, reducing nut loss and expense. The model integrates transport, infrastructure, and production coverage, confirming its accuracy and cost-effectiveness. [**Conclusion**] The proposed "weighted linear combination-yield prediction-intelligent optimization" model is more robust than traditional approaches. It considers both spatial distribution and yield of Korean pine while addressing transport, infrastructure, and service goals. The framework proves effective and feasible for locating hubs, and offers strong logistics support for sustainable industry development. It also offers a readily transferable blueprint for designing logistics networks for other high-value forest products.

Key words: spatially adaptive framework; site selection; Korean pine nuts; best-worst method (BWM); weighted linear combination (WLC); immune optimisation algorithm (IOA); geographic information system (GIS)

红松（*Pinus koraiensis*）籽产业是调整林业经济结构、推动林业经济发展的重要途径之一。据中国海关 2019 年 12 月的出口数据显示，松子仁出口量达 1 458 t，全年累计出口金额约 16.159 2 亿元，市场扩张势头强劲。受制于红松资源分布不均衡，构建高效、合理的物流体系已成为当务之急，而集散中心的选址则是该体系的核心。集散中心作为物流网络的关键节点，兼具集中、分拣、仓储、转运等功能；科学选址不仅能降低物流成本，提升运输效率和服务响应速度，还可通过优化空间布局增强产业竞争力，对森林资源保护、林产品供给保障、城乡居民增收均具战略意义。伊春市现有的红松籽收集和分发多依靠分散的通用型集货点，缺乏红松籽专业化集散中心，物流基础设施相对薄弱，当地政府高度重视林业发展，出台了《伊春市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》，积极鼓励红松籽产业的升级和物流基础设施的建设，为红松籽物流集散中心的选址和林业经济发展营造良好的政策环境和产业发展氛围，推动红松籽产业与物流产业的协同发展，也为实现乡村振兴和东北经济繁荣注入新的活力。

现有农林牧渔类产品物流中心选址研究大体沿 3 条技术路径展开。一是以定量分析为核心：宋艳等[1]将重心法与模糊层次分析耦合用于农产品配送中心，周万洋等[2]基于 CFLP 模型探讨“百色一号”冷链物流中心选址，赵迪等[3]则把最大覆盖模型与层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）结合应用于辽宁省农产品物流中心选址。定量分析法在农产品物流中心选址中已形成较为成熟的技术路径，但现有研究仍停留在单目标静态优化层面，难以同时兼顾农林产品特有的生态敏感性与多目标协同需求。二是综合评价法与地理信息系统（geographic information system，GIS）的融合：Suo 等[4]通过 GIS 把生态匹配规则转化为空间约束进行海洋牧场选址，Sun 等[5]以 AHP-熵权法计算权重后再利用 GIS 对水产品物流中心选址，Bandira 等[6]则利用 AHP-GIS 模型将指标标准化后加权叠加进行内陆水产养殖场地的选址。该范式已形成“指标体系—空间分析—方案对比”流程，却因缺乏产量动态预测而陷入重空间展示、轻选址优化的困境。三是智能优化算法[7]的运用，该方法是当前研究的重点。王艺多等[8]提出的无迹变异黏菌算法虽以运输成本最小、服务覆盖最大为目标完成农产品多节点选址，但对生态约束的嵌入机制尚不完善，易导致选址结果与实际政策冲突；吴暖等[9]以 *K*-means 聚类划分需求点确定车场候选位置，却未纳入生态环境考量，导致结果可行性不足；浦徐进等[10]整合了遗传算法的全局搜索能力与模拟退火算法的局部寻优特性，用于选址模型求解。上述智能优化算法虽具备强大的问题求解能力，却难以将红松种质资源的空间异质性、结实量年际波动

及生态敏感性等多元约束同步纳入决策框架，导致选址结果易偏离实际生态阈值与政策红线。

针对上述局限，本文将基于最佳−最差法(best-worst method，BWM)的加权线性组合(weighted linear combination，WLC)与免疫优化算法集成：首先以 BWM 量化 13 项关键影响因素的权重，用较少成对比较次数获得权重，避免传统 AHP 因专家判断不一致导致权重失真，保证后续决策基础客观可靠；继而基于 WLC 评估综合适宜度，在空间约束下生成连续型适宜性面，防止选址结果偏离实际地形、生态及政策条件；最后依据红松籽产地与收获量数据，通过免疫优化算法在适宜区域内锁定最优集散中心。在已划定的适宜区域内，输入红松籽产地坐标与预测产量，全局搜索最小运输成本−最大服务覆盖的点位，克服早熟收敛，确保最终集散中心位置既靠近主产区又满足容量与生态约束。本研究旨在为伊春红松籽产业提供可持续的物流支撑，也为东北林区乃至全国特色林产品物流系统建设提供可复制的技术框架，推动林业经济与生态保护协同发展。

1 红松籽物流集散中心选址模型的构建

1.1 初步选址

为克服林区复杂地形与生态敏感区对物流设施选址的耦合约束，本研究以 BWM-WLC 生成排除生态红线与低适宜地块的连续适宜性面[11]，并提取可建设备选点。具体操作流程如下。

步骤 1 为评价体系构建。首先，结合文献与伊春市实际情况，构建包括影响因素和约束条件[12]的红松籽物流集散中心选址适宜度评价体系。从地理环境、基础建设、周边环境和人文因素的 4 个一级指标分析，选择合适的二级指标。伊春市地形以山地、丘陵为主，地势起伏较大，地质、水文和地形等自然条件对建筑的稳固性有着重要影响[13]。因此，地理环境选取高程、坡度、地形起伏度和土壤类型以反映山地−丘陵地基稳定性。交通条件能提高配送速度，降低运输成本[14]，因此基础建设通过道路密度、铁路邻近度和水系缓冲刻画交通可达性与运输成本。选址时需考虑到原材料供应、生产成本[15]及运营风险[16]等周边环境，因此从红松分布距离、植被覆盖度和自然灾害风险衡量原料获取与运营安全。在选址研究中应考虑到对居民生活等人文活动产生影响[17]，因此人文因素则设置政府机构、住宅区和风景区缓冲以降低对生活与景观的干扰，同时将自然保护区、江河内沙洲、岛屿/湖泊、水库划为禁止建设区[18](图 1)。

步骤 2 为指标权重确定。基于 BWM，由专家遴选“最优”指标与“最劣”指标，给出二者相对于其他指标的偏好比较值，构造最优−最劣比较向量，求解以下模型获得权重[19]。

$$\min\ \xi$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} \left|w'_{\mathrm{B}} - a_{\mathrm{B}j}w'_j\right| \leqslant \xi \\ \left|w'_j - a_{j\mathrm{W}}w'_{\mathrm{W}}\right| \leqslant \xi \\ \sum_{j=1}^{n} w'_j = 1 \\ w'_j > 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：ξ为求解权重结果的指示值，ξ值越接近 0，表明所求解的权重结果误差越小，也说明越可信；w'_{B}为最优指标主观权重；$a_{\mathrm{B}j}$为最具影响力指标相对于指标 j 的重要程度；w'_j为指标 j 的主观权重；$a_{j\mathrm{W}}$为指标 j 相对于影响力最小指标的重要程度；w'_{W}为最差指标主观权重。

为检验一致性，计算一致性比率(C_{R})。

$$\xi^* = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \tag{2}$$

$$C_{\mathrm{R}} = \frac{\xi^*}{C_{\mathrm{I}}} \tag{3}$$

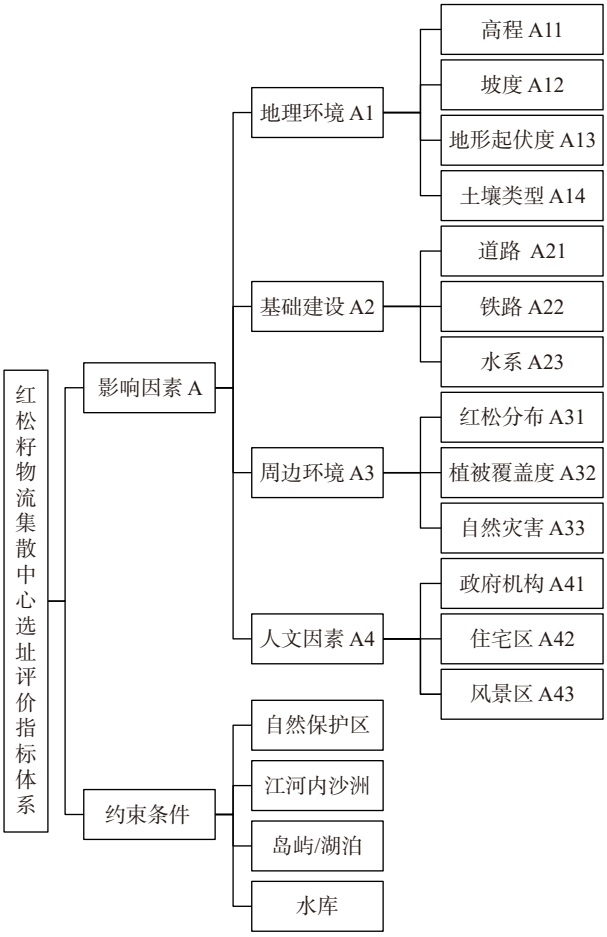


图 1 红松籽物流集散中心选址评价体系

Fig. 1 An evaluation system for site selection of Korean pine nut logistics distribution centers

式中：ξ^*为最大绝对偏差，λ_{max}为最大特征值，n 为指标个数，C_I 为与 n 对应的随机一致性指标。若 $C_R < 0.1$ 时，则通过一致性检验，所得权重合理；否则需重新调整比较矩阵。

步骤 3 为线性加权组合。将标准化后的各指标栅格值与其权重相乘并求和，得到综合适宜性得分[20]。

$$S^* = \sum_{j=1}^{n} w'_j \chi_j \tag{4}$$

式中：S^*为适宜性得分，w'_j为第 j 个评价指标的权重，χ_j为第 j 个评价指标的标准化值。

步骤 4 为评价结果可视化。利用 GIS 软件将适宜性评价结果以地图的形式展示[21]。将适宜性得分从高到低划分为低适宜性区域、较低适宜性区域、中适宜性区域、较高适宜性区域、高适宜性区域，不同等级使用不同的颜色来表示。

1.2　红松籽供应量预测

为解决产量空间异质性导致的供应量不确定性，为后续选址优化模型提供关键的需求输入数据，本研究以红松籽产地的空间分布为核心，基于文献分析法与实地调研预测红松籽供应量。首先，从 1∶100 万《中国植被图集》提取伊春市 36 处红松斑块，以斑块的几何中心作为供应点。随后，以伊春市保存最完好的原始红松林生态系统之一——凉水自然保护区内的红松收获量为标准，通过实地调研及文献[22]的相关研究得到丰年凉水自然保护区不同林龄红松结实量（表 1），根据调研情况，采收中由于空籽和虫蛀损失，收获量约为结实量的 85%，单位产量为 0.16 t/hm^2。由于在一定林龄下，红松林密度越小其结实量越大[23]，因此假设伊春市内红松林林分结构相似[24]，通过 NDVI 对林分密度进行校正，从而完成供应量的空间预测，为后续优化模型提供需求输入。

1.3　选址优化

为在运输总成本最小与服务覆盖最大之间取得平衡，并抑制传统启发式算法易出现的“早熟收敛”问题，本文采用免疫优化算法模拟抗体识别抗原、免疫细胞增殖、选择与记忆的全过程[25]来求解多目标空间配置方案（流程见图 2，伪代码见图 3）。算法首先读取经反复灵敏度测试确定的核心参数：种群规模（sizepop）设为 100，可在保持多样性的同时避免计算量激增；迭代上限（MAXGEN）定为 800 次，既能保证收敛又防止过度运算；记忆库容量（over best）20、交叉概率（pcross）0.5、变异概率（pmutation）0.4、多样性评价阈值（ps）0.95，总种群规模（M）相应取 120（sizepop + over best）。随后，以“各候选集散中心到供应点的运输量 × 距离之和最小”为目标函数（式 5）生成初始抗体群，并按亲和力排序将前 n 个优秀个体存入记忆库，用以引导后续克隆、变异和选择操作，从而在全局范围内持续搜索高质量选址方案。

$$\min F = \sum_{q\in \boldsymbol{N}} \sum_{l\in \boldsymbol{M}_q} \omega_q d_{ql} Z_{ql}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} \sum\limits_{j\in \boldsymbol{M}_q} Z_{ql} = 1,\ q \in \boldsymbol{N} \\ Z_{ql} \leqslant h_l,\ q \in \boldsymbol{N},\ l \in \boldsymbol{M}_q \\ \sum\limits_{l\in \boldsymbol{M}_q} h_l = p \\ Z_{ql},\ h_l \in \{0,\ 1\},\ q \in \boldsymbol{N},\ l \in \boldsymbol{M}_q \\ d_{ql} \leqslant s \end{cases} \tag{5}$$

式中：F 为成本最小化的目标函数；供应点为 q，所有供应点的集合为 $\boldsymbol{N}$，$\boldsymbol{N}$={1, 2,⋯, n}，$q \in \boldsymbol{N}$；s 为新建物流集散中心与由它服务的供应点之间距离的上限；物流集散中心为 l，$\boldsymbol{M}_q$为到供应点 q 的距离小于 s 的物流集散中心集合，$\boldsymbol{M}_q \in \boldsymbol{N}$；$\omega_q$为供应点的供应量；$d_{ql}$为供应点 q 到备选点 l 的距离；Z_{ql}和 h_l为{0,1}变量，当Z_{ql}为 1 时，表示供应点 q 的供应量由备选点 l 供应，当h_l为 1 时，表示 l 为物流集散中心；p 表示物流集散中心的总数量。

2　实证分析——以伊春市为例

2.1　研究区概述及数据来源

黑龙江省伊春市（127°42′～130°14′E，46°28′～49°21′N）坐落于中国东北小兴安岭地区，地貌特征以山地为主，小兴安岭山脉贯穿其中，地势呈西北高、东南低的阶梯状起伏。伊春东接鹤岗市、佳木斯市，南邻哈尔滨市、绥化市，西连庆安县、铁力市，北隔

表 1　凉水自然保护区不同林龄红松分布面积、结实量及收获量

Tab. 1　Distribution area, fruiting, and harvesting of Korean pine across different forest ages in Liangshui Nature Reserve

林龄	面积/hm^2	株数	结实量/t	收获量/t	单产/(t·hm^{-2})
过熟林	1 489.4	75 890	433.1	368.14	0.25
中龄林	1 086.6	49 850	165.8	140.93	0.13
成熟林	958.4	26 570	65.8	55.93	0.06
合计	3 534.4	152 310	664.7	565.00	0.16

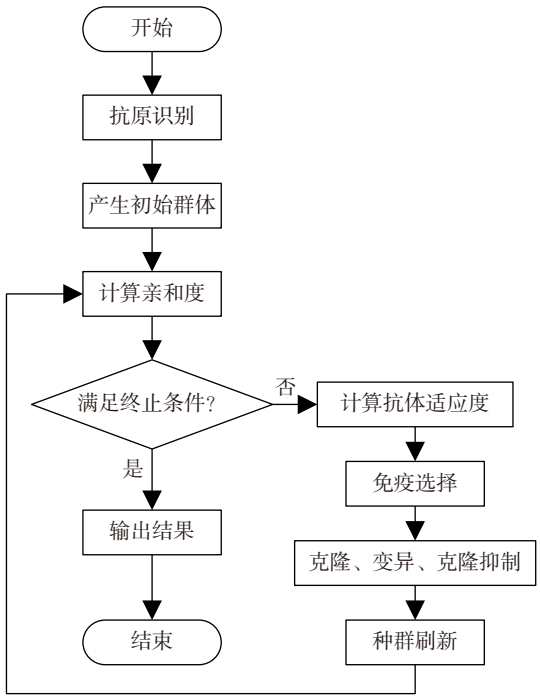


图 2 免疫优化算法流程图

Fig. 2 Flow chart of immune optimisation algorithm

黑龙江与俄罗斯相望，国境线长 249.5 km，是东北亚陆路通道的重要节点。伊春市拥有得天独厚的红松资源，素有“红松故乡”之称。连片天然红松林广泛分布于五营、带岭、丰林、红星、乌马河、汤旺河、凉水自然保护区等地，红松籽产量稳定、品质上乘，为区域特色农林产品物流提供了充沛且优质的货源。然而，全市规模化物流企业不足 50 家，现有集散中心多集中于伊美区、南岔区等非主产区，距核心产区平均运距 50 ~ 80 km，尚缺少面向红松籽的专业化集货、分级、仓储、转运一体化设施。本研究使用的空间数据如表 2 所示，统一所有数据地理坐标系为 WGS-1984。

2.2 选址适宜度评价指标权重的确定

鉴于二级指标较多，一次性通过 BWM 一致性检验难度较大，本研究采用分层赋权：先对 4 个一级指标进行 BWM 比较，再对各自所属的 13 个二级指标分别成对比较，最后将一级权重与对应二级权重相乘得到组合权重。课题组邀请 20 位涵盖红松籽培育加工、物流中心选址及运输管理的专家，通过问卷星和电子邮件填写“红松籽物流中心选址评价打分表”，以 1 ~ 9 标度给出最优−最劣判别向量；经式（3）计算，所有一致性比率 C_R 值均小于 0.1（表 3），分层权重通过一致性检验，权重的赋值结果可信。

Algorithm1：基于免疫算法的物流集散中心选址优化

输入：供应点数据文件，备选点数据文件
输出：最小总成本 best1，用户-物流集散中心分配关系表，活跃物流集散中心列表 INDEX1
预处理：
    提取用户位置矩阵 User[N × 2]，提取用户供应向量UserQuantity[N × 1]
    提取备选物流集散中心位置矩阵 DistributionCentre[M × 2]
    建设成本 DisCenBuildCost[M × 1]，流转成本 DisCenTurnover[M × 1]
    容量 Cap[M × 1] = 5 × 10^6，运输费用矩阵 FeeMat[N × M]
    sizepop = 100，overbest = 20，MAXGEN = 1 000，pcross = 0.5
    pmutation = 0.4，ps = 0.95，M = sizepop + overbest
    根据适应度数组，浓度数组，优秀度数组，染色体矩阵创建抗体结构体 individuals
    生成初始染色体：随机分配用户到物流集散中心
for gen = 1 to MAXGEN:
    遍历每个染色体：
        计算抗体与抗原 = 建设成本 + 运输成本 + 容量惩罚
        约束条件：供应量 ≤容量限制
    通过 concentration 函数并输入相似度，计算抗体浓度
    综合适应度和浓度的评估值：excellence = ps*fitness + (1-ps)*concentration
    调用 chorm 函数和 mean 函数寻找最优抗体并计算平均适应度
    保留最优的 overbest 个抗体，更新记忆库，基于优秀度筛选父代种群
    选择：基于优秀度进行轮盘赌选择
    交叉：单点交叉生成新染色体，变异：随机改变部分用户的分配
    合并父代和记忆库生成新种群
    保存当前最优染色体 bestchrom，记录迭代曲线数据 trace
DistriQuantity = 统计 bestchrom 中每个物流集散中心服务的用户总供应
返回最小总成本 best1，用户-物流集散中心分配关系表，活跃物流集散中心列表 INDEX1
绘制收敛曲线：显示最优和平均适应度随迭代变化
根据用户点，未启用的物流集散中心，启用的物流集散中心，服务关系来绘制拓扑图
将启用的物流集散中心坐标写入 Excel 文件

图 3 免疫优化算法伪代码图

Fig. 3 Pseudocode diagram of immune optimization algorithm

表 2　伊春市红松籽物流集散中心选址研究的空间数据

Tab. 2　Spatial data in the site selection study of Korean pine nut logistics hubs in Yichun City

数据类型	数据内容	数据来源
基础地理数据	伊春市三级行政区划边界	自然资源部标准地图服务网站（http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html）
	伊春市30 m分辨率的高程	地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/search）
	伊春市地形起伏度	基于上述高程，使用ArcGIS软件的“焦点统计”工具计算生成
	伊春市坡度	基于上述高程，使用ArcGIS软件的“坡度”工具提取生成
环境与生态数据	伊春市土壤类型、植被覆盖度	中国科学院资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn）
	全国红松分布	1∶100万中国植被图集（https://www.tpdc.ac.cn）
	全国自然保护区空间分布及边界	国家基础地理信息数据库（https://ngcc.cn/dlxxzy/gjjcdlxxsjk/）
基础设施与兴趣点数据	全国道路、铁路、水系	OpenStreetMap（https://openstreetmap.org）
	伊春市政府机构、住宅区及风景区兴趣点坐标	高德开放平台（https://lbs.amap.com）

表 3　红松籽物流集散中心选址评价指标偏好判断与一致性检验

Tab. 3　Criteria preference judgments and consistency tests for Korean pine seed logistics center site selection

项目	A1	A2	A3	A4	A11	A12	A13	A14	A21	A22	A23	A31	A32	A33	A41	A42	A43
I_{BO}	1	1	2	3	5	3	2	1	1	2	4	1	2	3	3	1	4
I_{OW}	3	2	2	1	1	2	3	5	3	2	1	3	2	1	2	4	1
C_I	1				2.3				1.63			1			1.63		
ξ^*	0.051 282				0.023 077				0.076 923			0.041 667			0.057 143		
C_R	0.051 3				0.01				0.047 2			0.041 7			0.035 1		

注：A1 ~ A4分别表示一级指标地理环境、基础建设、周边环境和人文因素，A11 ~ A14分别表示高程、坡度、地形起伏度、土壤类型，A21 ~ A23分别表示道路、铁路、水系，A31 ~ A33分别表示红松分布、植被覆盖度、自然灾害，A41 ~ A43分别表示政府机构、住宅区、风景区；I_{BO}表示最好指标与各指标的相对重要性，I_{OW}表示各指标与最差指标的相对重要性，C_I表示随机一致性指标，ξ^*表示最大绝对偏差，C_R表示一致性比率。

将一级指标权重与对应二级指标的局部权重相乘，得到各指标的全局权重，并归一化使总和为 1，计算结果见表 4。

2.3　适宜度评估

欧氏距离是计算每个栅格单元到道路、铁路、水系、红松分布区域、自然灾害、政府机构、住宅区、风景区的距离；重分类是将连续数据或分类数据转换为新的分类数据的过程。由于研究所涉及的因素错综复杂，且各项空间数据对红松籽物流集散中心为耕地适宜性的影响效果不同，量纲也有所差异，为能够统一评估各种影响因素，对各参评指标进行重分类并量化分级[26]。以研究区各指标实际取值范围为依据，对土壤类型进行重分类赋值，其余指标用自然间断点法分为高、较高、中、较低、低适宜性区域 5 个等级，依次赋予 5 ~ 1，数值化后生成单因素适宜性图（图 4a ~ m）。其中，分值越高说明该区域的适宜性越高，可以适度地基于实际情况进行开发与建设；相反，分值越低，说明该区域较不适宜进行开发与建设。详细的重分类标准及赋值如表 5 所示。

表 4　红松籽物流集散中心选址评价指标的权重

Tab. 4　Weighting of site selection criteria for Korean pine seed logistics centers

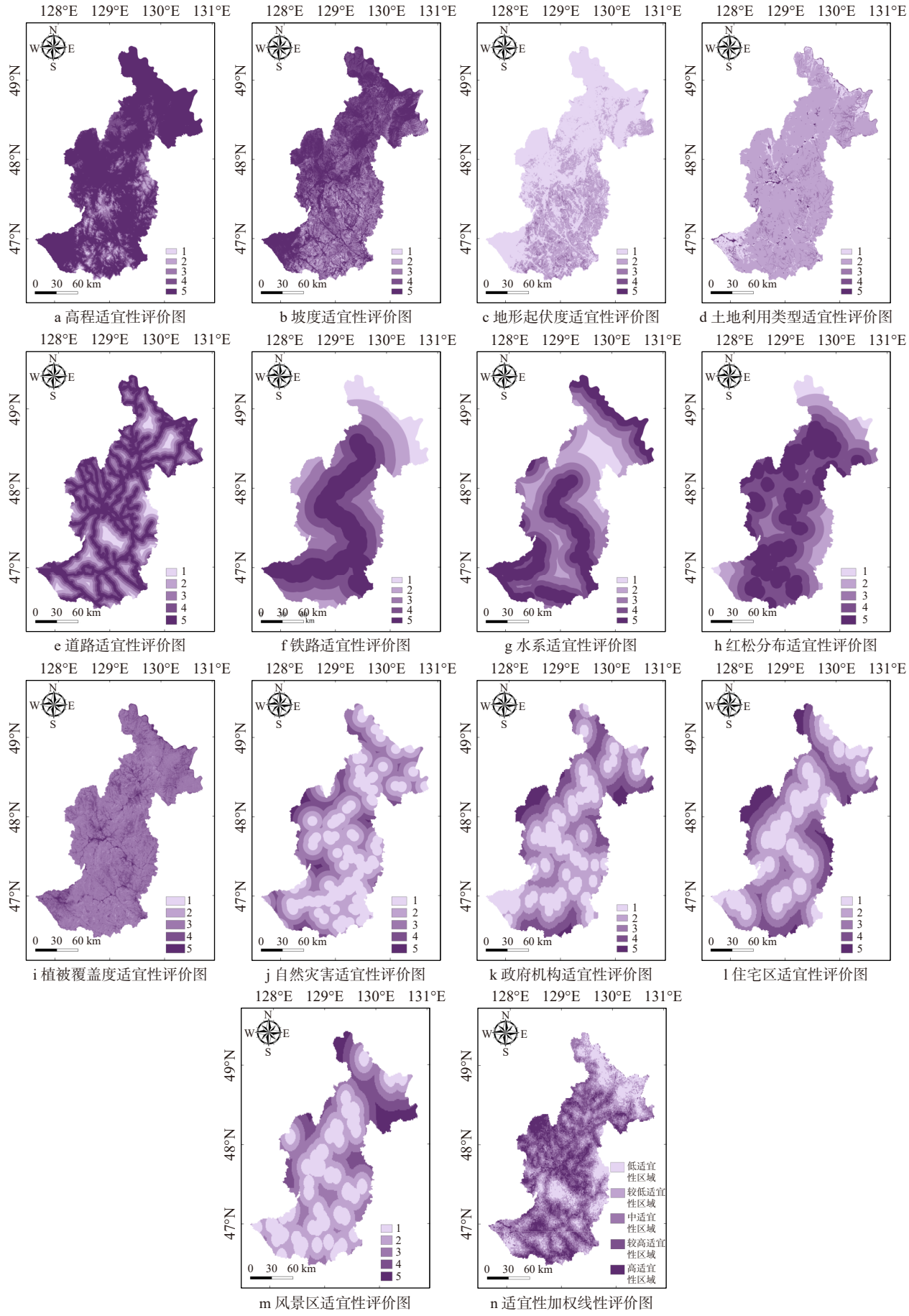
一级指标	权重	二级指标	局部权重	全局权重
A1	0.359 0	A11	0.092 3	0.033 1
		A12	0.169 2	0.060 7
		A13	0.253 8	0.091 1
		A14	0.484 6	0.174 0
A2	0.307 7	A21	0.538 5	0.165 7
		A22	0.307 7	0.094 7
		A23	0.153 8	0.047 3
A3	0.205 1	A31	0.541 7	0.111 1
		A32	0.291 7	0.059 8
		A33	0.166 7	0.034 2
A4	0.128 2	A41	0.228 6	0.029 3
		A42	0.628 6	0.080 6
		A43	0.142 9	0.018 3

按表 2 权重系数赋值各图层，代入式(4)叠加计算，生成伊春市红松籽物流集散中心适宜性加权评价图（图 4n），再用布尔运算绘制禁止建设用地范围（图 5）。

2.4　选址优化

2.4.1　备选点提取

根据适宜性加权线性评价图（图 4n）提取适宜建设物流集散中心的区域，并将栅格数据转化为矢量



a 高程适宜性评价图 b 坡度适宜性评价图 c 地形起伏度适宜性评价图 d 土地利用类型适宜性评价图

e 道路适宜性评价图 f 铁路适宜性评价图 g 水系适宜性评价图 h 红松分布适宜性评价图

i 植被覆盖度适宜性评价图 j 自然灾害适宜性评价图 k 政府机构适宜性评价图 l 住宅区适宜性评价图

m 风景区适宜性评价图 n 适宜性加权线性评价图

图 4 红松籽物流集散中心建设适宜性评价图

Fig. 4 Suitability evaluation chart for construction of Korean pine seed logistics distribution centers

表 5　评价指标重分类标准及赋值

Tab. 5　Evaluation index reclassification criteria and assigned values

评价因素	重分类标准及其赋值					效应	因素说明
高程	1 (＞710 m)	2 (534～710 m)	3 (394～533 m)	4 (260～393 m)	5 (＜260 m)	负	较低海拔地势平坦
坡度	1 (＞50°)	2 (26°～50°)	3 (16°～25°)	4 (5°～15°)	5 (＜5°)	负	坡度小，有利于规划建设
地形起伏度	1 (＞220 m)	2 (154～220 m)	3 (101～153 m)	4 (50～100 m)	5 (＜50 m)	负	地形平坦，有利于规划建设
土壤类型	1 (初育土)	2 (人为土)	3 (钙层土)	4 (水成土、半水成土)	5 (淋溶土、半淋溶土)		土壤的承重能力、稳定性、渗透性好
距离道路的距离	1 (＞11.2 km)	2 (7.6～11.2 km)	3 (4.6～7.5 km)	4 (2.0～4.5 km)	5 (＜2.0 km)	负	运输便利
距离铁路的距离	1 (＞60.6 km)	2 (40.7～60.6 km)	3 (25.2～40.6 km)	4 (11.8～25.1 km)	5 (＜11.8 km)	负	运输便利
距离水系的距离	1 (＞38.0 km)	2 (25.1～38.0 km)	3 (15.4～25.0 km)	4 (6.7～15.3 km)	5 (＜6.7 km)	负	保证充足的水源
距离红松分布区的距离	1 (＞68.0 km)	2 (43.3～68.0 km)	3 (24.7～43.2 km)	4 (10.0～24.6 km)	5 (＜10.0 km)	负	红松籽供应点多且近
森林覆盖度	1 (＞0.91)	2 (0.83～0.91)	3 (0.64～0.82)	4 (0.34～0.63)	5 (＜0.34)	负	避免影响森林生态
距离自然灾害的距离	1 (＜5.6 km)	2 (5.6～10.5 km)	3 (10.6～156 km)	4 (15.7～21.6 km)	5 (＞21.6 km)	正	远离灾害点
距离政府机构的距离	1 (＜1.5 km)	2 (1.5～2.4 km)	3 (2.5～3.4 km)	4 (3.5～5.0 km)	5 (＞5.0 km)	正	避免影响政府活动
距离住宅区的距离	1 (＜1.0 km)	2 (1.0～1.9 km)	3 (2.0～2.9 km)	4 (3.0～4.2 km)	5 (＞4.2 km)	正	避免影响居民生活
距离风景区的距离	1 (＜1.0 km)	2 (1.0～1.7 km)	3 (1.8～2.7 km)	4 (2.8～4.0 km)	5 (＞4.0 km)	正	避免影响景区生态

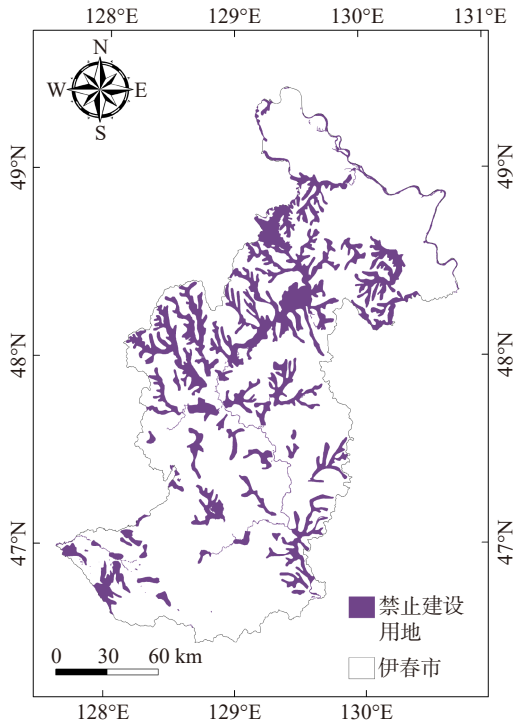


图 5　伊春市红松籽物流集散中心禁止建设用地布尔图

Fig. 5　Boolean map of Korean pine nut logistics distribution center restricted areas in Yichun City

数据，擦除其与禁止建设用地的重合部分后得到最终的适宜建设区域(图 6a)。根据 GB/T 21334—2017《物流园区分类与规划基本要求》中的规定，一般情况下物流园区最小占地面积为 10 hm^2，使用几何计算适宜建设区域内连续的地块面积均大于 10 hm^2，符合物流集散中心建设的地块大小，以每个连续区域内的几何中心点作为红松籽物流集散中心的备选点，共得到 180 处可以建立红松籽物流集散中心的点(图 6a)。

2.4.2　供应点提取与供应量估计

建设红松籽物流集散中心的目的是实现从产地到市场的高效运转，提取红松籽的产地即红松分布区域内的几何中心点作为供应点，共提取到供应点 36 个(表 6、图 6b)，预测 36 个区域的红松收获量作为供应量。以凉水自然保护区这一典型原始红松林区的实地调研(图 7)与文献数据为基准，通过调查不同林龄(过熟林、中龄林、成熟林)红松林的单位面积结实量，并考虑采收过程中的损失(约 15%)，计算出红松籽单位面积收获量为 0.16 t/hm^2。通过 GIS “栅格计算器”工具对伊春市 36 个红松分布区域进行计算，生成供应量空间图层(图 8)。

2.5　选址结果

本研究在 MATLAB R2022b 平台完成建模与仿真，硬件环境为 64 位 Windows 11 操作系统、32 GB 运行内存。免疫优化算法在该环境下迭代 800 次即可收敛：前 100 次最优适应度由 35 骤降至 10 左右，表明全局搜索效率高；随后下降趋缓，500 次后曲线平缓，最终适应度稳定在 5 附近(图 9a)。算法从 180 个备选点中筛选出 32 个集散中心，实现运输成本与服务覆盖的综合最优(图 9b)。

通过提取供应点和备选点的相关空间数据信息，并以空间点的形式通过 GIS 平台实现，将优化选址结果可视化(图 10)，优化后的伊春市红松籽物流集散中心在满足建设成本与运输成本最小化，容量小于等于供应量的基础上，所有点位均位于高适宜性区域，符合生态约束，有效提升基建稳定性。70% 以上的选址点位沿道路线分布，缩短运输距离、降低运

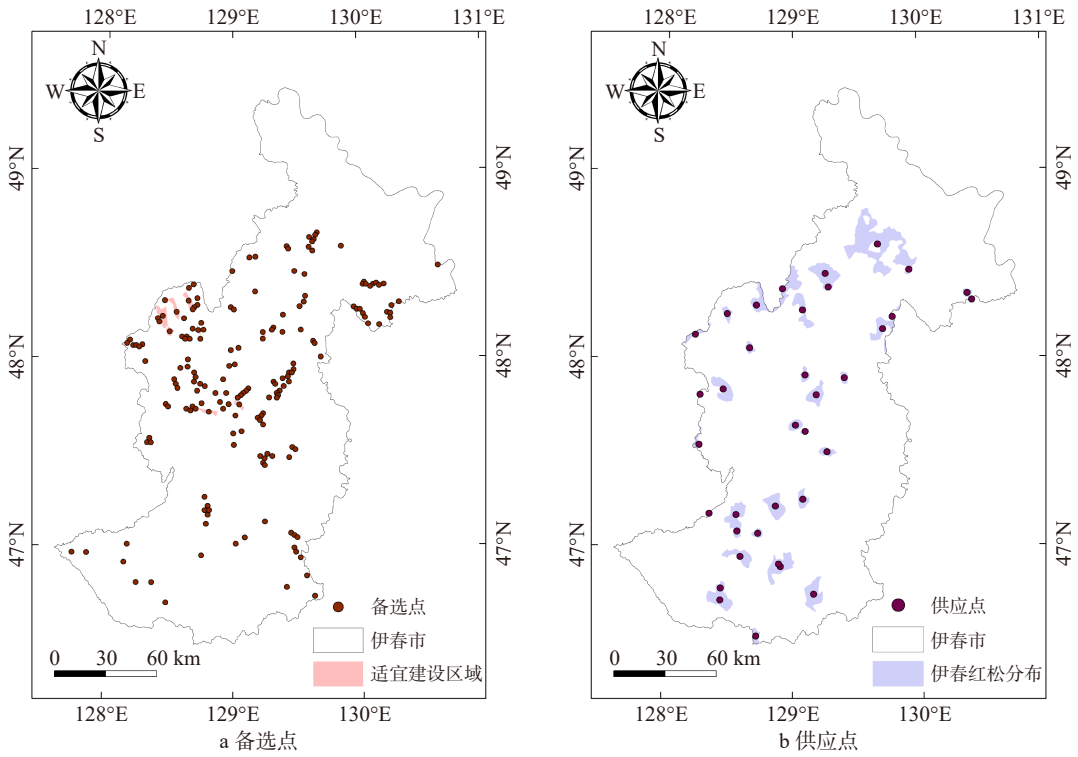


图 6 红松籽物流集散中心备选点、供应点位置

Fig. 6 Locations of candidate sites and supply points for Korean pine nut logistics centers

表 6 红松分布区域的经纬度及面积

Tab. 6 Longitude, latitude and area of distribution area of *P. koraiensis*

区域	地理坐标	面积/hm²	区域	地理坐标	面积/hm²
1	（129°5′50″E，47°54′51″N）	7 262.38	19	（129°9′41″E，46°44′53″N）	28 061.19
2	（129°24′21″E，47°53′56″N）	5 988.25	20	（128°26′43″E，46°46′47″N）	6 648.11
3	（128°27′25″E，47°50′17″N）	23 037.84	21	（128°26′34″E，46°42′56″N）	22 479.68
4	（129°11′7″E，47°48′31″N）	18 944.54	22	（128°43′8″E，46°31′30″N）	6 325.57
5	（128°16′36″E，47°48′33″N）	337.30	23	（129°40′29″E，48°36′32″N）	133 161.42
6	（129°1′23″E，47°38′50″N）	9 352.90	24	（129°15′29″E，48°27′14″N）	33 036.39
7	（128°16′19″E，47°32′34″N）	5 011.57	25	（128°55′15″E，48°22′20″N）	36 319.61
8	（129°5′52″E，47°36′48″N）	2 653.78	26	（129°55′17″E，48°28′20″N）	4 287.91
9	（129°16′6″E，47°30′20″N）	8 364.34	27	（129°16′57″E，48°22′52″N）	3 720.35
10	（128°21′16″E，47°10′36″N）	489.83	28	（130°22′47″E，48°20′41″N）	4 677.14
11	（129°4′45″E，47°15′10″N）	11 286.93	29	（129°4′42″E，48°15′37″N）	21 414.61
12	（128°52′2″E，47°12′59″N）	25 742.72	30	（128°42′55″E，48°17′8″N）	8 741.82
13	（128°33′45″E，47°10′13″N）	23 574.48	31	（130°24′52″E，48°18′34″N）	25.07
14	（128°43′50″E，47°4′18″N）	5 624.21	32	（129°42′35″E，48°9′30″N）	22 293.07
15	（128°34′13″E，47°5′1″N）	6 485.88	33	（128°26′55″E，48°14′21″N）	7 410.31
16	（128°35′45″E，46°56′53″N）	18 698.33	34	（129°47′11″E，48°13′20″N）	1 899.12
17	（128°54′22″E，46°53′39″N）	24 475.61	35	（128°14′9″E，48°7′42″N）	6 710.33
18	（128°53′30″E，46°54′29″N）	5 630.04	36	（128°39′49″E，48°3′30″N）	5 962.06

输成本，区域 23、24、25 与红松分布区域高度契合，靠近产区布局，减少红松籽的损耗率，解决了伊春市现有物流集散中心集中于非红松主产区的问题。本研究从 180 个备选点中遴选 32 个物流集散中心，可全面辐射全部供应点。方案兼顾交通可达性、基建匹配度与区域服务覆盖，并充分耦合红松空间分布



a 原始红松林　　b 红松果

图 7　凉水自然保护区红松林实况

Fig. 7　Current situation of Korean pine in Liangshui Nature Reserve

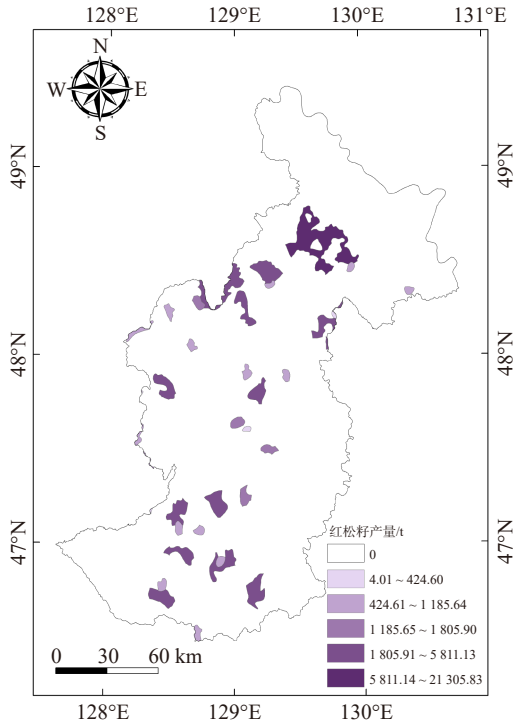


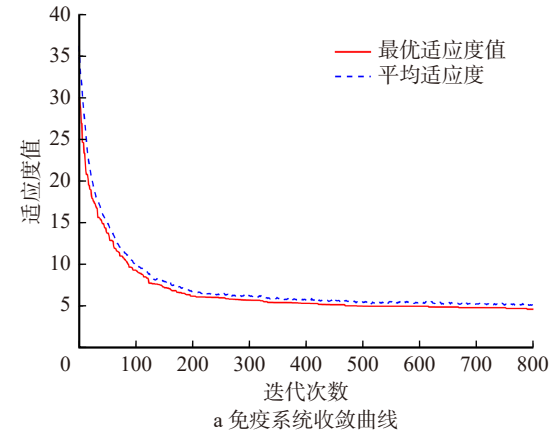
图 8　伊春市红松籽供应量预测图

Fig. 8　Prediction chart of Korean pine nut supply in Yichun City

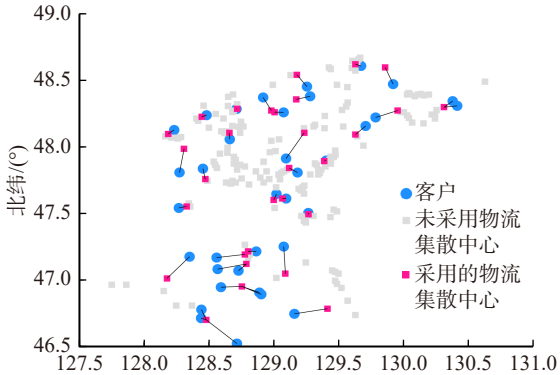
和产量特征，实现运输成本低、服务范围广、基建适配度高，与集散中心“通便利、聚散有序”的核心需求高度契合，验证了模型识别关键区位因素的准确性，也进一步在适宜性基础上优化了选址结果，降低物流成本。

3　结　　论

针对林区破碎空间与生态敏感约束下红松籽物流集散中心“何处可建、何处优建”的难题，本研究将最佳–最差权重法（BWM）、加权线性组合（WLC）与免疫优化算法（IOA）耦合成多阶段空间自适应框架，以伊春市为样区完成实证。研究具体结果有以下 4 点。



a 免疫系统收敛曲线



b 选址情况

图 9　伊春市红松籽物流集散中心选址优化结果

Fig. 9　Optimal locations for Korean pine nut logistics hubs in Yichun City

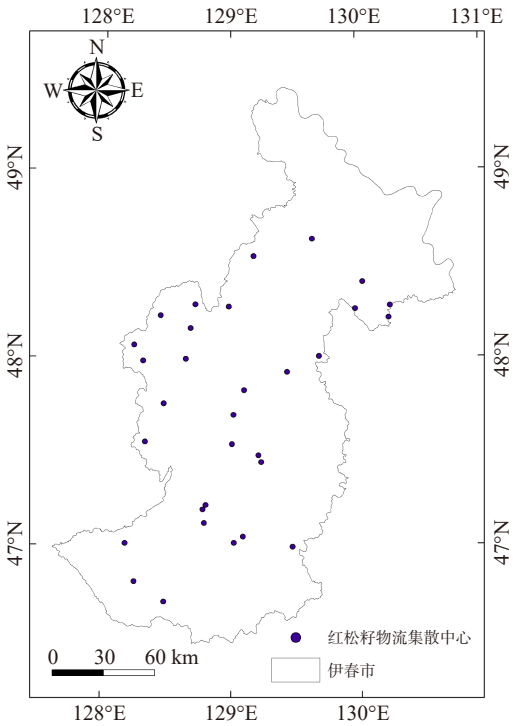


图 10　伊春市红松籽物流集散中心选址点位分布图

Fig. 10　Distribution map of Korean pine nut logistics hubs in Yichun City

（1）框架基于 BWM 的加权线性组合法集成伊春市 13 种相关空间数据信息，减少了两两比较次数，降低了主观偏差，加权叠加生成适宜性加权线性评价图，并擦除其与禁止建设用地的重合部分，完成初步选址，锁定 180 个备选点，实现生态–地形–交通约束一体化初筛。

（2）以 36 个红松斑块几何中心为供应源，引用凉水自然保护区的基准产量并用 NDVI 校正林分密度，完成空间化供应量预测，为后续优化提供需求面。

（3）免疫优化算法在初始阶段最优适应度值迅速降低，搜索效率较高，能够在较少的迭代次数内找到较优解，并随着迭代次数的增加无限接近全局最优，优化效果显著。免疫优化在 800 代迭代内将目标函数由 35 降至 5，选出 32 个中心，全部落入高适宜区；70% 沿道路线分布，3 个深入红松主产区，缩短了运输距离，降低了运输成本。

（4）WLC 与 IOA 的嵌合使模型既尊重地理基底，又兼顾经济–服务目标，一致性比率 C_R 值 < 0.1，权重可信。

本研究构建了基于“加权线性组合–红松产量预测–智能算法优化”的更为科学合理的选址决策模型。其中，BWM 多准则决策解决了空间指标权重量化，WLC 整合了地理空间数据，GIS 进行了空间数据分析及其可视化，IOA 的引入则为复杂约束下的选址问题提供了高效求解工具。WLC 与 IOA 的有机结合，既尊重了地理环境对物流设施的基础性约束，又满足了物流集散中心运营的经济性目标。

本研究首次把“权重随空间变”的自适应思路引入林产品物流选址，为东北林区及类似生态脆弱区提供了可复制、可落地的技术路线。但本模型的建立也存在一定局限：产量预测采用静态单产，未纳入气候年际波动与林分动态。未来可耦合高分遥感与过程结实模型，构建时空三维供应场景，并引入碳排放与需求不确定性，实现“零碳–韧性”林区物流网络优化。

底图审图号：GS（2019）1822。

参 考 文 献

［1］ 宋艳, 余红. 基于重心法和 FAHP 模型的 A 公司农产品配送中心选址研究 [J]. 物流工程与管理, 2023, 45(10): 70−74.
Song Y, Yu H. Research on the location of a company’s agricultural product distribution center based on gravity center method and AHP model[J]. Logistics Engineering and Management, 2023, 45(10): 70−74.

［2］ 周万洋, 付芳, 王力锋. 基于 CFLP 模型的农产品冷链物流配送中心选址研究：以“百色一号”为例 [J]. 物流科技, 2022, 45(11): 146−148.
Zhou W Y, Fu F, Wang L F. Research on agricultural product cold chain logistics distribution center based on CFLP model: taking “Baise No. 1” as an example[J]. Logistics Sci-Tech, 2022, 45(11): 146−148.

［3］ 赵迪, 梁旭, 张思文, 等. 基于最大覆盖模型与 AHP 的选址问题：以辽宁省农产品物流中心选址为例 [J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 114−119.
Zhao D, Liang X, Zhang S W, et al. Location problem based on maximum coverage model and AHP: taking Liaoning agricultural products logistics center location as an example[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2019, 37(2): 114−119.

［4］ Suo A, Zhou W, Ding D. Suitability evaluation on marine ranching in Guangdong, South China[J]. Journal of Oceanol-ogy and Limnology, 2023, 41(2): 778−791.

［5］ Sun Z, Liu Y, Sang H, et al. Site selection decision framework for origin-based aquatic product logistics center under ecological constraints: a case study of the Nansi Lake Region, China[J]. Aquaculture, 2025, 594: 741427.

［6］ Bandira P N A, Mahamud M A, Samat N, et al. Gis-based multi-criteria evaluation for potential inland aquaculture site selection in the George Town Conurbation, Malaysia[J]. Land, 2021, 10(11): 1174.

［7］ 张彪, 康峰, 许舒婷. 基于改进 RRT 与 GA 的多目标路径规划：以无人机林区巡检为例 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4): 129−141.
Zhang B, Kang, Xu S T. Multi-objective path planning based on improved RRT and GA: taking UAV forest inspection as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 129−141.

［8］ 王艺多, 王会阳. 无迹变异黏菌优化农产品物流配送中心选址算法 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(12): 3820−3826.
Wang Y D, Wang H Y. Location algorithm for agricultural logistics distribution center based on traceless variation slime mold optimization[J]. Computer Engineering and Design, 2024, 45(12): 3820−3826.

［9］ 吴暖, 谭力旗, 杜剑. 需求不确定下多周期农产品预冷设施选址−路径优化 [J/OL]. 计算机工程与应用, [2025−06−16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241125.1551.010.html.
Wu N, Tan L Q, Du J. Location-routing optimization of multi-cycle precooling facilities for agricultural products under uncertain demand[J/OL]. Computer Engineering and Applications, [2025−06−16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241125.1551.010.html.

［10］ 浦徐进, 郭瑞, 付亚平. 考虑失效风险的农产品配送中心选址和路径优化研究 [J]. 系统科学与数学, 2023, 43(7): 1862−1877.
Pu X J, Guo R, Fu Y P. An optimization algorithm for the location-routing problem of agricultural product distribution centers considering disruption risk[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(7): 1862−1877.

［11］ Yao Y, Feng C, Xie J, et al. A site selection framework for urban power substation at micro-scale using spatial optimi-zation

strategy and geospatial big data[J]. Transactions in GIS, 2023, 27(6): 1662−1679.

[12] Abdelwaheb, Aydi, Tarek, et al. Assessment of land suitability for olive mill wastewater disposal site selection by i-ntegrating fuzzy logic, AHP, and WLC in a GIS[J]. Assess, 2016, 188: 1−59.

[13] 郜振华, 朱兴伟. 基于 AHP-熵值组合赋权的灰色关联分析在冷链物流配送中心选址中的应用 [J]. 安徽工业大学学报 (社会科学版), 2022, 39(1): 31−33.
Shao Z H, Zhu X W. Application of grey correlation analysis based on AHP-entropy combination weighting in cold chain logistics distribution center location[J]. Journal of Anhui University of Technology (Social Sciences), 2022, 39(1): 31−33.

[14] 陈奕冰. 农产品企业物流配送中心选址评价决策研究 [J]. 物流工程与管理, 2023, 45(10): 84−87.
Chen Y B. Study on evaluation decision of location of logistics distribution center of agricultural products enterprises[J]. Logistics Engineering and Management, 2023, 45(10): 84−87.

[15] 董坤, 钟宇, 徐宏伟, 等. 基于遗传算法的卷烟区域物流配送中心选址方法 [J]. 烟草科技, 2025, 58(3): 103−112.
Dong K, Zhong Y, Xu H W, et al. Genetic algorithm-based site selection method for regional cigarette distribution centers[J]. Tobacco Science & Technology, 2025, 58(3): 103−112.

[16] 蔡怡然, 刘阳, 李柳意, 等. 人居环境安全视角下的北京市浅山区泥石流防灾林规划研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 130−140.
Cai Y R, Liu Y, Li L Y, et al. Planning of debris flow prevention forest in shallow mountain area of Beijing from the perspective of human settlement environment safety[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 130−140.

[17] 李爽, 潘秀. 基于 DEA/AHP 模型的物流配送中心选址研究 [J]. 企业经济, 2017, 36(6): 44−48.
Li S, Pan X. Study on location selection of logistics and distribution centres based on DEA/AHP models[J]. Enterprise Economy, 2017, 36(6): 44−48.

[18] Liu B, Tang J, Qu Y, et al. A GIS-Based method for identification of blindness in former site selection of sewage tre-atment plants and exploration of optimal siting areas: a case study in Liao River Basin[J]. Water, 2022, 14(7): 1092.

[19] 陈鹤元, 钟文博, 杨洪泽, 等. 基于认知负荷的人机界面综合评价方法：以森林消防指挥车显控台为例 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6): 141−151.
Chen H Y, Zhong W B, Yang H Z, et al. Comprehensive evaluation method of human-machine interface based on cognitive load: taking forest firefighting command vehicle display console as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 141−151.

[20] 李岳恒, 刘洪华, 狄胜同, 等. 基于不同组合赋权的滨海城市地下空间开发适宜性评价 [J/OL]. 地质论评, [2025−06−16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1952.p.20241125.1627.020.html.
Li Y H, Liu H H, Di S T, et al. Evaluation of the suitability of underground space development in coastal cities based on different combination weighting methods[J/OL]. Geological Review, [2025−06−16]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1 952.p.20241125.1627.020.html.

[21] Khodaparast M, Rajabi A M, Edalat A. Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process(AHP): a case study in Qom City, Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77: 1−12.

[22] 盛后财, 满秀玲, 蔡体久, 等. 凉水自然保护区红松结实规律及可持续经营 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(12): 4−6.
Sheng H C, Man X L, Cai T J, et al. Cone quantity of *Pinus koraiensis* and sustainable management in Liangshui Nature Reserve[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(12): 4−6.

[23] 王芳, 陆志民, 王君, 等. 不同疏伐密度对红松结实量的影响 [J]. 吉林林业科技, 2023, 52(3): 1−4.
Wang F, Lu Z M, Wang J, et al. Effects of different thinning densities on cone quantity of *Pinus koraiensis*[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2023, 52(3): 1−4.

[24] 曹孟磊, 巩垠熙, 冯仲科, 等. 伊春市朗乡自然保护区原始红松林的结构特征分析 [J]. 林业调查规划, 2012, 37(5): 75−80.
Cao M L, Gong Y X, Feng Z K, et al. Structural analysis of original Korean pine forest in Langxiang Nature Reserve of Yichun[J]. Forest Inventory and Planning, 2012, 37(5): 75−80.

[25] 刘永, 闫世雄, 李子健, 等. 基于 Matlab 免疫算法的畜禽屠宰中心选址方法研究 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2024(6): 1−6.
Liu Y, Yan S X, Li Z J, et al. Research on site selection method of livestock and poultry slaughtering center based on Matlab immune algorithm[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2024(6): 1−6.

[26] 王瑞琦, 仇渊勋, 李雄. 以生境保护优先的北京市第二道绿化隔离地区郊野公园选址方法 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 127−137.
Wang R Q, Qiu Y X, Li X. Site selection methods of country park with priority of habitat protection in the second green isolated area of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 127−137.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　李文彬）