



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目：多尺度地质力学约束与融合土壤建模的越野路径规划多级优化方法
作者：王锐，南洋，陈伟涛，王瑞祺，陈浩，秦绪文
收稿日期：2025-07-11
网络首发日期：2025-09-15
引用格式：王锐，南洋，陈伟涛，王瑞祺，陈浩，秦绪文. 多尺度地质力学约束与融合土壤建模的越野路径规划多级优化方法[J/OL]. 地球科学.
<https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250913.2304.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi:10.3799/dqkx.2025.179

多尺度地质力学约束与融合土壤建模的越野路径规划多级优化方法

王锐¹, 南洋¹, 陈伟涛², 王瑞祺¹, 陈浩³, 秦绪文^{1,3}

1. 中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学(武汉)计算机学院, 湖北武汉 430074

3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京海淀, 100083

摘要：越野路径规划在应急救援等特殊场景任务中具有重要战略价值，但现有模型在复杂地形中存在通行性模型精度不足与求解效率低下的问题。为此，本文基于地质力学约束和融合土壤建模的思想，构建了通行性评估支撑的越野路径规划模型。首先，引入土壤湿度-硬度经验模型(SMSP II)预测土壤额定圆锥系数(RCI)，结合车辆额定圆锥指数(VCI)，构建多要素约束且融合土壤通行性指标的通行度栅格图；在此基础上，提出一种融合分治策略与启发式搜索的改进NSGA-II算法，并与Dijkstra算法集成，构建了多级混合路径优化框架。研究表明，论文提出的模型在路径可行性保持不变的前提下，计算效率提升约45%，路径通行度提升2%，路径长度缩短约2.1%。研究验证了论文提出的技术方法体系在复杂地质环境下越野路径规划的优越性能。

关键词：越野路径规划；地质力学约束；土壤建模；NSGA-II算法；多尺度；分治策略

中图分类号：P208

收稿日期：2025-07-11

A Multilevel Optimization Framework for Off-Road Path Planning Incorporating Multiscale Geomechanical Constraints and Integrated Soil Modeling

Wang Rui¹, Nan Yang¹, Chen Weitao², Wang Ruizhen¹, Chen Hao³, Qin Xuwen^{1,3}

1. Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geoscience, Wuhan, China.

2. Faculty of Computer Science, China University of Geoscience, Wuhan, China.

3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing, China

Abstract: Off-road path planning plays a strategically important role in special mission scenarios such as emergency rescue. However, existing algorithmic models often suffer from low accuracy in passability modeling and poor computational efficiency in complex terrains. To improve planning accuracy and efficiency, this study introduces the Soil Moisture-Strength Prediction model (SMSP II) to estimate the Rated Cone Index (RCI) of soil, and combines it with the Vehicle Cone Index (VCI) to construct a traversability grid map that integrates multiple constraints and soil

基金项目：中国地质调查局项目(DD20220301601, 20251960420)，地质探测与评估教育部重点实验室主任基金(GLAB2024ZR01)

王锐(2001-)，男，研究生，主要从事智能地学信息处理理论与方法研究，E-mail:ruiwang1210wr@foxmail.com

通讯作者：陈伟涛(1980-)，男，教授，主要从事地学信息工程理论及方法研究，E-mail:wtchen@cug.edu.cn

passability indicators. On this basis, an improved NSGA-II algorithm is proposed, incorporating a divide-and-conquer strategy and heuristic search, and is further integrated with the Dijkstra algorithm to build a multi-level hybrid path optimization framework. Experimental results demonstrate that the proposed method improves computational efficiency by approximately 45%, enhances path passability by 2%, and reduces path length by about 2.1%, while maintaining path feasibility. The findings verify the superior performance of the proposed technical framework for off-road path planning in complex geological environments.

Key words: Off-road Path Planning; Geomechanical Constraints; Soil Modeling; NSGA-II Algorithm; Multiscale; Divide-and-conquer Strategy

1 引言

路径规划是指在给定的环境模型中，为移动物体（如车辆、机器人、无人机等）寻找一条从起点到目标点的最优或可行运动轨迹的过程（张挥东, 2005）。其中，越野路径规划作为路径规划技术在非结构化环境中的典型应用，旨在通过融合地质特征、地形要素以及车辆性能参数等多维约束条件，构建适用于复杂地形环境的通行路径优化模型。该技术不仅在军事领域的抢险救灾、物资调配等方面具有重要意义（张涵斐等, 2018; 盖森等, 2020; 张昊等, 2024），在民用领域亦发挥着重要作用。例如，在民用生产、地质勘探及野外作业等场景中，越野路径规划技术可为任务执行提供有力支持，推动军民融合深度发展，具有广泛的应用前景与重要的现实意义。

当前，越野路径规划研究主要包括两个方面：通行环境建模与路径规划算法设计。其中，前者为路径生成提供基础数据与评价依据，后者则以建模结果为基础实现路径的高效规划与全局优化。

在通行环境建模方面，越野通行环境建模作为路径规划的基础环节，其研究历程经历了从以坡度为主的单因子分析向多源环境信息耦合建模的系统转变。早期研究多以地形坡度作为核心指

标，尝试对通行能力进行初步的定量评估（Schreier et al., 1978）。随着地理信息系统（GIS）与数字地形分析技术的兴起，研究者相继构建了地形通行性数学模型，并提出从地形数据自动生成模型的思路（张文诗等, 1996; 张继贤等, 1997），显著提高了建模的效率和实用性。随后，研究重心逐步向多维度地形因子拓展。例如，刘华军等（2006）提出“越野高程地形相对不变性”概念，系统分析了坡度、起伏度与粗糙度等稳定因子对通行能力的影响机制。在此基础上，韩光（2008）与黄鲁峰等（2008）引入气象、水文、土壤等非地形因子，构建了多源环境信息融合的综合通行性分析框架，有效提升了模型对复杂环境的适应能力。近年来，三维地形建模、多尺度分析等新技术的引入进一步拓展了模型的表达能力与空间分辨率（袁仁进等, 2017; 李阳等, 2019; 宋伟华等, 2020）。然而，土壤额定圆锥指数(RCI)作为土壤力学中的一个重要参数，用于衡量土壤的抗剪强度和承载力，反应了土壤承载力和剪切强度的综合影响，其在越野路径规划通行环境建模研究中尚未被利用，导致当前模型在土壤环境建模与车-地相互作用机制方面仍存在不足,尤其缺乏土壤 RCI 与车辆 VCI

耦合的系统性研究。

在路径规划算法方面，当前越野路径规划方法呈现出多元发展趋势，主要包括传统图搜索算法、智能优化策略和数据驱动模型。传统方法如 Dijkstra 与 A* 算法因其路径确定性和启发式特征，在规则地形中具备良好稳定性（吴天羿等，2013），但在高维、多约束与动态环境中效率受限，且对通行性建模依赖较强。为提升全局搜索与适应能力，研究者引入模拟退火、蚁群优化、粒子群优化等智能算法，显著增强了对复杂约束的处理能力（宋彩云，2005；王奇胜等，2007）。近年来，强化学习（如 Q-learning）与图神经网络（GNN）等机器学习方法也被应用于路径规划，提升了环境感知与泛化能力（孙雨泽等，2020；李天琪，2021），但存在训练成本高、数据依赖性强等局限。为此，范林林（2022）提出融合地形因子的改进 A* 算法，在启发函数中加入了地形因素的影响量化，进一步优化了路径合理性与求解效率。尽管如此，现有算法仍普遍存在环境因子建模不全面、路径评估标准缺乏客观性等问题，且在应对大范围空间、长距离路径规划及复杂地形条件时，算法效率与结果可行性仍需进一步验证与提升。

总体来说，当前越野路径规划面临着通行性模型精度不足与路径规划效率低下的双重挑战。一方面，大范围格网数据对算法计算负载影响显著，制约其在复杂地形中的实际部署；另一方面，传统模型没有顾及地质力学与土壤建模耦合，导致越野通行性评价模型不够完善，加之车-地交互机制考虑不足，进一步限制了算法与实际应用场景的匹配性与路径可行性。

为解决上述问题，本文聚焦于越野路径规划中的复杂环境建模与算法效率提升问题，旨在构建一套适用于复杂环境与长距离越野任务场景的高效路径规划方法。主要贡献如下：

1) 构建融合多源地学数据的高精度通行度量化模型，综合考虑地形、地表覆盖、土壤与地质灾害等关键环境因素，创新性引入土壤湿度-硬度经验模型（SMSP II）以预测土壤额定圆锥系数，融合地质力学与土壤建模的耦合约束，提升通行能力评估的真实性与空间适应性。

2) 提出一种基于多尺度改进的 NSGA-II 混合优化算法，融合分治策略与启发式搜索技术，显著提高大范围越野路径规划中的计算效率与路径质量，实现更具实际可行性的路径优化框架。

2 研究方法

2.1 数据准备

选取境外某区域作为研究区，面积约为 400 平方公里。越野通行环境所需的实验数据主要通过卫星遥感图像解译与公开数据集获取，并在 ArcGIS Pro 3.0.2 平台上完成数据可视化、缓冲区生成、遥感解译预处理等工作（见图 1）。其中，地形、地表覆盖（水系、道路、冰川）及地层断裂带等 30 m 空间分辨率数据来源于中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心。基于地层断裂带数据构建缓冲区，用以模拟地质灾害胁迫因素。

USCS 工程土壤分类数据是根据 SoilGrids2.0 平台下载开源空间分辨率为 250m 的土壤理化数据集（Poggio,L et al.,2021），通过 Wang 等构建的工程土壤分类模型(Wang,R et al.,2024)生成。所有栅格数据均经过重采样与裁剪操作，确保数据范

围一致、空间分辨率统一。

车辆通行能力数据参考美国华盛顿特区空军联合手册(U.S. Department of the Army & U.S. Department of the Air Force, 1994)中“土壤通行性

(Soils Trafficability)”章节内容，以 M923 军用卡车为例，提取其关键参数，用于评估不同土壤参数下的通行能力。

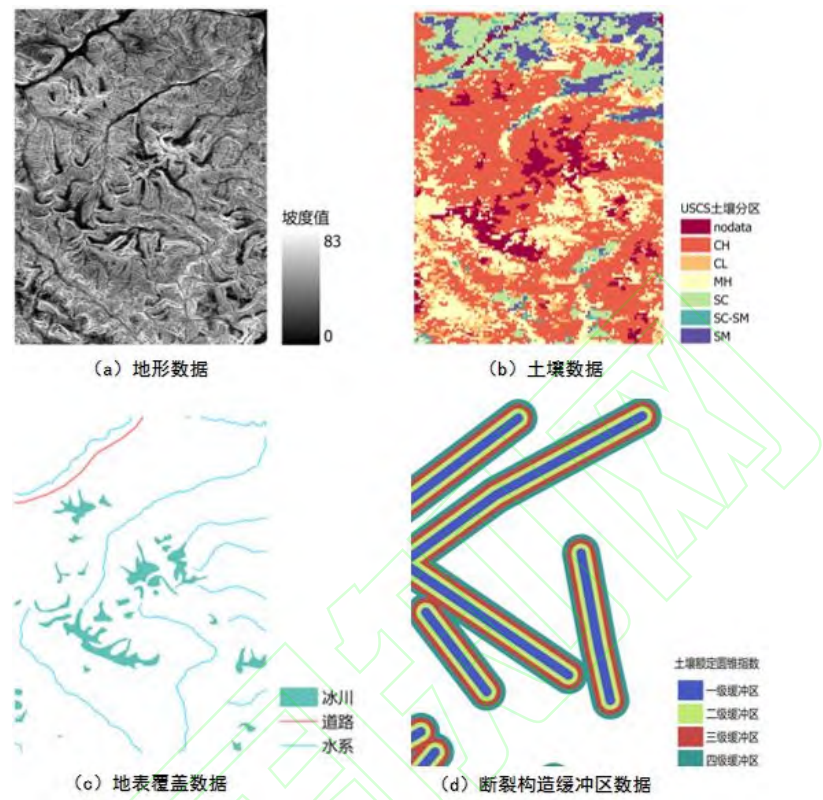


图 1 越野机动环境构建数据

Figure 1. Off-Road Mobility Environment Construction Data. This is the first dataset that fuses 30 m topographic and 250 m soil RCI layers for off-road planning

地形、地表覆盖、断裂构造数据来源于遥感数据解译，土壤数据来自 SoilGrids2.0 平台的空间分辨率为 250m 的数据集。（b）土壤数据中图例代表：CH-高塑性黏土、CL-低塑性黏土、MH-高塑性粉土、SC-黏土质砂、SC-SM-含粉土的黏土质砂、SM-粉土质砂。

2.2 越野通行环境建模

2.2.1 环境因子通行度量化

越野通行度量化是指通过构建数学模型与评价体系，将车辆或装备在复杂越野环境中的通行能力进行数值化表达的过程。本文以 M923 军用卡车为例，综合考虑车辆额定圆锥指数，并结合地形、地表覆盖、地质灾害和土壤等四类环境因子，构建通行度量化指标体系。

1) 地形因子

地形因子主要考虑坡度影响，本文参考《军事地形学》(何西刚等，2004)的某越野车辆速度与坡度数据进行数据拟合。与传统的多项式插值方法相比，指数衰减模型具备更高的拟合优度与良好的外推预测能力，在均方误差（MSE）和决定系数（R²）指标的对比下，指数衰减模型表现出更高的拟合优度，拟合误差更小，且符合通行系数随坡度增加而递减的实际趋势。因此本文采用指数衰减模型进行拟合，最终拟合公式及结果如下所示：

$$Y=1.2796e^{-0.0401x}-0.2685 \tag{1}$$

表 1 多项式插值与指数衰减插值模型效果对比表

Table 1. Performance Comparison Between Polynomial Interpolation and Exponential Decay Interpolation Models

模型	MSE	R ²
三次多项式	0.000196	0.9984
指数衰减	0.000103	0.9991

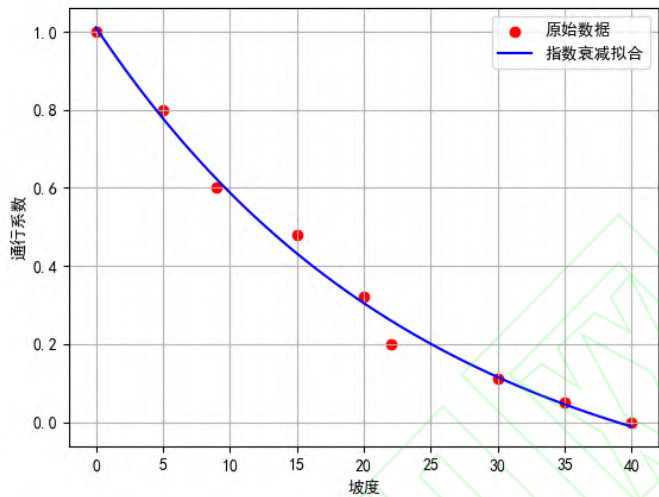


图 2 指数衰减拟合结果

Figure 2. Results of exponential decay fitting

2) 地表覆盖

本研究主要考虑的地表覆盖因素包括冰川、水系及现有道路数据。冰川和水系被视为不可通行区域，现有道路则默认为可通行区域，如图 3 所示：



图 3 地表覆盖因素

Figure 3. Surface cover factors

不规则区域表示研究区内的冰川分布，蓝色线代表水系，红色线代表现有道路，空白区代表不受特殊地表覆盖因素影响区域，后续需进行综合通行能力量化评估。图中清晰显示水系线与冰川

相连，符合高寒地区水系多由冰川融水形成的客观事实。

3) 断裂构造胁迫

地质灾害是越野路径规划中必须重点考虑的重要自然胁迫因素，合理评估并规避地质灾害风险对于保障人员安全、装备完好及任务顺利完成具有重要意义。针对本研究数据，已发生的地质灾害（如泥石流、滑坡等）因其时效性较低，未纳入量化因素，研究重点聚焦于易发地质灾害高胁迫区域。基于研究区地层断裂带，构建地层断裂带胁迫缓冲区，以表征断裂构造对越野路径规划的影响。在缓冲区内断层与滑坡的相关性分析中，采用 Pearson 相关系数法进行缓冲距离选择，结果表明当缓冲距离取值在 300 至 600 米区间时，断层与滑坡的相关性较强（崔伟等，2020）。基于此，本文以 300 米为缓冲区半径，进行缓冲区构建并赋予通行度系数，具体量化结果如表所示：

表 2 地质灾害胁迫缓冲区量化表

Table 2. Quantitative analysis of geological hazard threat buffer zones

缓冲距离	通行度系数
0-300	0.1
300-600	0.25
600-900	0.5
900-1200	0.75
1200 以上	1

4) 土壤数据

土壤因素是影响越野通行能力的基础环境要素。不同土壤类型及其物理性质直接影响车辆的通过性、行进速度及装备的损耗程度。土壤含水量

会引起抗剪强度的变化，而黏粒含量的差异则导致土壤黏聚性不同，进而影响车辆性能。USCS 土壤分类通过界定土壤的颗粒组成、塑性及有机质含量，将土壤物理特性与车辆通过性核心力学参数关联起来，为评估车辆通行度提供了核心依据。因此，基于 USCS 土壤工程分类，结合土壤承载力及物理特性，进行通行影响系数的经验宏观赋值。通常，承载力较高的土壤对应较大的通行度系数，表现出更强的通行能力。

表 3 土壤类型通行量化表

Table 3. Quantitative analysis of soil type traversability

USCS 分类	通行评级	通行度系数
CH	差 (poor)	0.5
CL	中等 (Fair)	0.65
CL-ML	中等 (Fair)	0.6
MH	差 (poor)	0.55
ML	中等 (Fair)	0.7
SC	良好 (Good)	0.85
SC-SM	中等 (Fair)	0.8
SM	中等 (Fair)	0.75
SP	良好 (Good)	0.95
SP-SM	中等 (Fair)	0.9

*本研究首次将 USCS 工程分类与 RCI 阈值联合用于越野通行评级

CH-高塑性黏土、CL-低塑性黏土、CL-ML-低塑性粉质黏土、MH-高塑性粉土、ML-低塑性粉土、SC-黏土质砂、SC-SM-含粉土的黏土质砂、SM-粉土质砂、SP-级配不良砂、SP-SM-含粉土的级配不良砂。

2.2.2 综合通行能力量化

综合通行能力量化包括通行性判断和通行能力量化。通行性判断指基于坡度、RCI、特殊地表覆盖等因素判断车辆能否通过。不能通过的栅格不会进行通行能力量化计算。通行能力量化是指在能通过的区域进行通行度计算。

2.2.2.1 多因子联合通行性判定

在复杂战场环境中，机动车辆常因多种环境因素限制而无法通行，例如坡度超过车辆最大可

通过坡度，或进入某些特定土壤导致车辆陷车等。本文结合地形数据、地表覆盖及土壤数据，首先构建越野机动通行性判定图。在通行度量化之前，对整个研究区进行车辆通行性判定，筛选出不可通行区域。车辆通行性限制因素主要包括以下三个方面：

(1) 坡度

本文车辆设定为 M923 军用卡车，该类型重型军用车辆极限坡度 30°~45°，车辆极限爬坡值与环

境因素、载荷等有密切相关性，为简化计算，本文研究取值为 37°构建坡度通行判定图。

（2）土壤数据

额定圆锥指数数据是基于Sullivan等提出的土壤圆锥指数 - 土壤湿度关系系列模型计算 (Sullivan,P.M et al.,1997)。通过Wang等(Wang.R et al.,2024)构建的基于gSSURGO数据库跨域适配的USCS工程土壤分类预测模型，在研究区基于SoilGrids数据生成250m分辨率工程土壤分类图用于引导关系模型的待定系数,再根据GEE google平台获取的土壤湿度数据，完成研究区土壤额定圆锥指数(RCI)预测生成。土壤额定圆锥指数原始图如下：

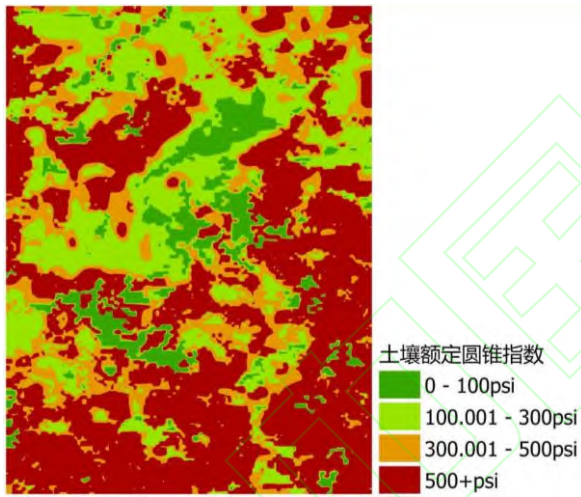


图 4 土壤额定圆锥指数图

Figure 4. Soil rating cone index (RCI) distribution

计算出土壤额定圆锥指数后，参考北约军用车辆手册中 M923 军用卡车的车辆额定圆锥指数（68 psi），结合多源数据的土壤越野通行性评估研究结果表明仅当土壤 RCI 超过该阈值时，车辆才能保证长时间通行（李灏等，2011；李坤伟等，2018；高晖春等，2024）。本文通过将预测的土壤 RCI 与车辆额定圆锥指数进行比较，构建了基于土壤指数的通行性评价图，作为通行度量化模型的基础。

基础。

（3）地表覆盖数据

本文在构建通行性量化指标时，优先考虑冰川、水系线与道路等地表覆盖因素，其判断优先级高于地形、土壤等其他环境因子。通过多层次叠加分析，可清晰识别水系与冰川区域附近的土壤通行性极低，从而进一步验证反演数据的真实性与准确性。

综合三类通行性影响因子，叠加构建得到面向 M923 军用卡车的通行性栅格图，为后续通行度量化计算提供了必要前提，有效规避不可通行区域的无效计算，提高整体计算效率。

2.2.2.2 综合通行能力计算

综合越野机动通行度量化方法主要包括主观赋权法（层次分析法、Delphi Method 德尔菲方法、专家打分法）以及客观方法（熵权法、PCA 主成分分析法、变异系数法、CRITIC 法等），本文基于数据驱动,采用熵权法进行权重赋值。

熵权法基于信息熵原理，需要基于评价因子进行数据标准化、归一化，对每个影响因子 P_{ij} 进行归一化处理：

$$P_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^m P_{ij}} \quad (2)$$

对于第 j 个指标，其熵值 e_j 计算公式如下：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (3)$$

其中 $k = \frac{1}{\ln(m)}$ （归一化系数，保证 $0 \leq e_j \leq 1$ ），

在熵值计算的基础上计算信息熵冗余度，冗余度越大说明该影响因子提供的信息量越多，权重应越大，权重可由公式计算得到。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{k=1}^n d_k} \quad (4)$$

本研究在通行度综合量化中主要考虑三类因素：地形、USCS 土壤分区数据以及地质灾害胁迫。按照熵权法进行计算得到权重分别为 $w_1=0.4162$, $w_2=0.5785$, $w_3=0.0053$, w_1 代表地形影响因子权重, w_2 代表土壤类型影响因子权重, w_3 代表地质灾害因素影响权重。结合通行性判定图, 采用加权叠加方式进行栅格计算, 生成最终的通行度图。

随后, 基于自然断点法 (Natural Breaks, Jenks) 对通行区域进行分级, 将通行能力划分为五个等级: 1—不可通行区域, 2—难通行区域, 3—较难通行区域, 4—较易通行区域, 5—易通行区域。该方法通过最大化类内差异与最小化类间差异, 确定最优分级断点。最终生成的通行区域图如下所示:

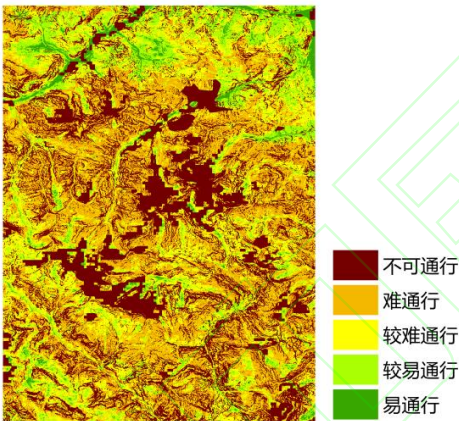


图 5 越野通行度评价结果

Figure 5. Off-road trafficability evaluation results

2.3 改进 NSGA-II 混合越野路径规划算法

2.3.1 多尺度通行图构建

随着越野环境因素日益复杂以及多源数据维度的增加, 传统路径规划方法及智能优化算法在大空间、长距离优化过程中计算效率较低, 易出现因搜索栅格过多而导致的数据灾难问题。为此, 本文提出一种基于改进 NSGA-II 混合算法的多尺度越野路径规划模型。该模型首先采用 Dijkstra 算法进行大尺度全局路径规划, 并将路径进行分段; 随后在局部路径规划阶段, 引入改进的 NSGA-II 算法进行优化, 以在保证路径优度的前提下显著提升规划效率, 满足越野环境下对路径时效性与准确性的双重要求。

本文研究综合多种通行度影响因子, 构建了空间分辨率为 30 m 的通行度图。为实现多尺度快速规划, 提出九宫格滑动重采样策略, 生成 90 m 空间分辨率的大尺度通行度图, 并确保其每个像元中心与原 30 m 图像元中心对齐。栅格合并规则如下:

表 4 栅格合并算法

Table 4. Raster merging process workflow

算法 1 栅格合并算法过程
输入: 栅格文件
步骤 1 读取文件、计算 output_rows、output_cols
步骤 2: for i in 长度 out_rows 按行遍历
for j in 长度 out_clos 按列遍历
Windows 获取, 规则判断:
如果不可通行栅格占优, 合并栅格不可通行
否则, 可通行栅格平均值赋值给中心点
步骤 3 Return output 文件

2.3.2 改进 NSGA-II 混合算法

2.3.2.1 全局路径规划方法

A*算法是一种启发式搜索算法，用于在图中找到从起点到目标点的最优路径(Hart P E,et al.,1974)。它结合了 Dijkstra 算法（保证最优性）和贪婪最佳优先搜索（启发式导向）的优点，通过以下评估函数指导搜索：

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5)$$

$g(n)$ 代表从起点到 n 的实际代价， $h(n)$ 代表从节点 n 到目标点的启发式估计代价， $f(n)$ 代表节点 n 的综合优先级，优先扩展 $f(n)$ 最小的节点。

Dijkstra 算法是一种用于求解单源最短路径问题的经典算法，由荷兰计算机科学家 Edsger W. Dijkstra(Dijkstra E W, 1959)提出，它适用于带非负权重的有向图或无向图，能够找到从起点到图中所有其他节点的最短路径。其主要思想是通过贪心算法选择当前距离起点最近的未处理节点，并更新其邻居节点的最短距离。Dijkstra 算法因其高效性和确定性成为最短路径问题的基石，但在负权或超大图中需选择其他算法，本研究通行度为非 0 值，因此可作为全局的规划算法。

2.3.2.2 NSGA-II 算法

NSGA-II（非支配排序遗传算法 II）是一种经典的多目标优化算法，用于高效解决多目标优化问题(Deb K,et al.,2002)。其核心思想是通过非支配排序和拥挤度比较来平衡解的收敛性和多样性。

多目标优化问题的目标为最小化或最大化多个冲突目标函数：

$$\text{Min or Max} : F(x)=[f(x_1),f(x_2), \dots, f(x_n)] \quad (6)$$

其中 $f(x_i)$ 代表不同冲突函数即影响因子，在本研究中主要以路径长度和通行度作为优化目标，

二者作为冲突因子加入优化计算，目标是得到路径长度和通行度均达到最优的路径。

通过非支配排序可以得到 Pareto 最优解 F_i ，其含义是指在目标空间中不被其他任何解支配（即不存在解在所有目标上均优于 F_i 的个体），所有 Pareto 最优解构成 Pareto 前沿，每个 Pareto 最优解之间的关系称为非支配关系。拥挤度是指为了获得对种群中某一特定解附近的密度估计，沿着对应目标计算这个解两侧的两点间的平均距离。其目的是衡量同一非支配层中解在目标空间的分布密度，保持多样性。

NSGA-II 作为经典智能优化算法，结合选择、交叉、变异和精英保留策略，具备较强的收敛能力与优化性能。但在实际路径规划应用中仍存在对初始种群依赖性强、无法确保可行解始终存在等问题，因此仍需进一步改进以提升其在复杂场景中的适应性和稳定性。

2.3.2.3 初始、变异策略改进

(1)初始种群生成

由于 NSGA-II 算法对于初始种群依赖性强，越野条件下可行路线限制条件复杂，若初始种群分布不均匀或多样性不足，可能导致算法无法找到可行路径亦或者过早收敛到局部区域的问题，难以探索到全局最优解集。

针对此问题，为保证越野机动路径的存在性，基于多尺度分治思想上，本文引入常规高效短距离路径规划算法来保证初始种群的可行性，不是完全随机初始化，而是以算法找到的路径为基础，加入小扰动生成初始种群路径，在保证越野路径存在的条件下再进行路径优化操作，进行最优路径的选取，不仅可以提高初始种群质量，而且可以

加快收敛速度，减少无效搜索。

(2)路径修复与惩罚机制

为提升算法计算效率，增强稳定性与种群多样性，并有效跳出局部最优陷阱，本文从以下两个方面对 NSGA-II 算法进行了改进：

1) 变异修复机制：为加快收敛速度并提升种群质量，设计路径可行性修复机制，确保进化过程中所有路径点均处于可通行区域，从而避免无效解的产生。具体做法是采用多级半径搜索策略，从原始 8 邻域向外扩展，寻找可行路径点，保证变异后路径的连续性和可行性。同时，对变异点与相邻路径点之间的通行性进行检查，采用多级尝试机制提高变异成功率，有效避免陷入局部最优，显著改善算法的全局搜索能力。

2) 惩罚机制优化：在优化过程中引入惩罚因子，用于约束穿越不可通行区域的路径。若变异产生的个体路径穿越障碍区域，则在通行度评价函数中加入惩罚项，且惩罚值随迭代次数递增。该机制不仅增强了算法对不合理的抑制能力，还提高了整体收敛效率和路径优化效果。

3 实验设置及结果

3.1 参数设置

为确保越野路径规划实验的可行性与有效性，本文构建了三种典型路径规划算法模型，并设计对比实验，以筛选出最优优化策略作为最终的路

径规划方案。所采用的三种对比模型包括：Dijkstra 算法、A*算法以及改进的概率道路图（PRM）与改进 NSGA-II 算法相结合的混合优化模型。该实验设计在保证路径可行性与多样性的前提下，进一步提升了路径优化效果与计算效率。本文重点采用的核心算法为改进的 NSGA-II 多目标优化算法，其主要参数设置如下：

表 5 算法参数表

Table5. Algorithm parameters

参数名称	参数值
population	200
generations	300
Crossover_rate	0.5
Mutation_rate	0.5
resolution	30
obstacle_penalty	10 ⁶

在改进的 NSGA-II 算法里，population 代表种群个数，generations 代表迭代次数，crossover_rate 代表交叉概率，mutation_rate 代表变异概率，resolution 代表栅格地图分辨率，obstacle_penalty 代表路过障碍的最大惩罚值。

3.2 改进 NSGA-II 混合算法路径规划结果

3.2.1 全局路径规划方法选取

实验采用在大尺度通行图条件下进行全局路径规划，通过在 90m 空间分辨率、相同起始点条件下进行路径规划，得到 A*和 Dijkstra 算法路径性能对比表如下：

表 6 A*与 Dijkstra 算法全局规划性能对比

Table6. Performance comparison between A* and Dijkstra algorithms for global path planning

算法	路径栅格数	总距离（km）	平均通行度	算法平均时间（秒）
A*算法	211	22.18	0.642	4.2107
Dijkstra 算法	211	22.36	0.771	0.5442

由表可知，在复杂路径的短距离路径规划任务下 Dijkstra 算法相较于 A*算法距离相差较小，但是平均通行度高出约 20%，算法时间缩短 87%，表现出更强的稳定性和效率，因此本文选择 Dijkstra 算法作为大尺度全局规划的基础算法。

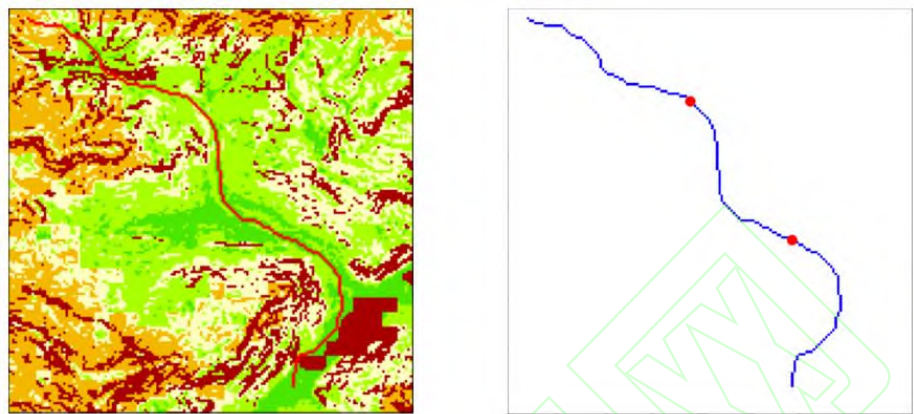


图 6 全局路径规划图

Figure 6. Large-scale global route planning results

左图为 Dijkstra 算法在 90m 空间分辨率通行度栅格图中全局路径规划结果;右图蓝色线代表全局规划路径，红色点代表在全局规划路径上的分段点。

实验中以 8 公里为分段点，将原始路径划分为三段，分别进行局部优化，从而显著提升路径规划效率。以结合 A*算法的改进 NSGA-II 混合算法

为例，经过十次实验取平均，三段局部优化与全局路径直接优化的效率对比结果如表所示：

表 7 全局规划与分段规划对比表

Table 7. Performance comparison between global and segmented planning approaches

路径方法	搜索栅格数	平均通行度	路径距离（km）
全局规划	91351	0.629	19.647
分段规划	50305	0.642	19.234

从表中可以看出，分段优化显著降低了搜索栅格数量，减少约 45%，大幅提升了搜索效率。同时，平均通行度提升约 2%，使得长距离路径更加安全和平坦。此外，路径实际长度也缩短了约 2.1%。该方法尤其适用于长距离路径规划场景。由于本研究区范围有限，性能提升表现相对有限，更多体现在空间层次的优化上，进一步验证了分段策略

的有效性。

4 不同改进 NSGA-II 混合算法路径规划结果对比讨论

本研究选取境外研究区内 15 × 15 公里的子区域进行分析对比实验。实验分别采用 A*、Dijkstra 及 PRM 算法与改进 NSGA-II 算法相结合的混合

算法进行路径规划。此外，设置对比实验以验证分段策略的有效性。为增强算法稳定性并降低随机误差，所有实验均在相同配置下重复运行十次，取平均结果进行算法性能比较。

本文为展示算法在路径规划效率上的差异，选取一种相对最优的改进 NSGA-II 混合路径规划算法作为基准，分别实现了 A*、Dijkstra 和 PRM 三种算法在分段优化策略下的复现与性能对比，相关结果如图所示：

表 8 不同算法性能对比表

算法	搜索栅格数	平均通行度	路径距离(m)
A*+改进 NSGA-II	50305	0.642	19234.00
Dijkstra+改进 NSGA-II	165967	0.663	19516.46
PRM+改进 NSGA-II	-	0.635	19521.17

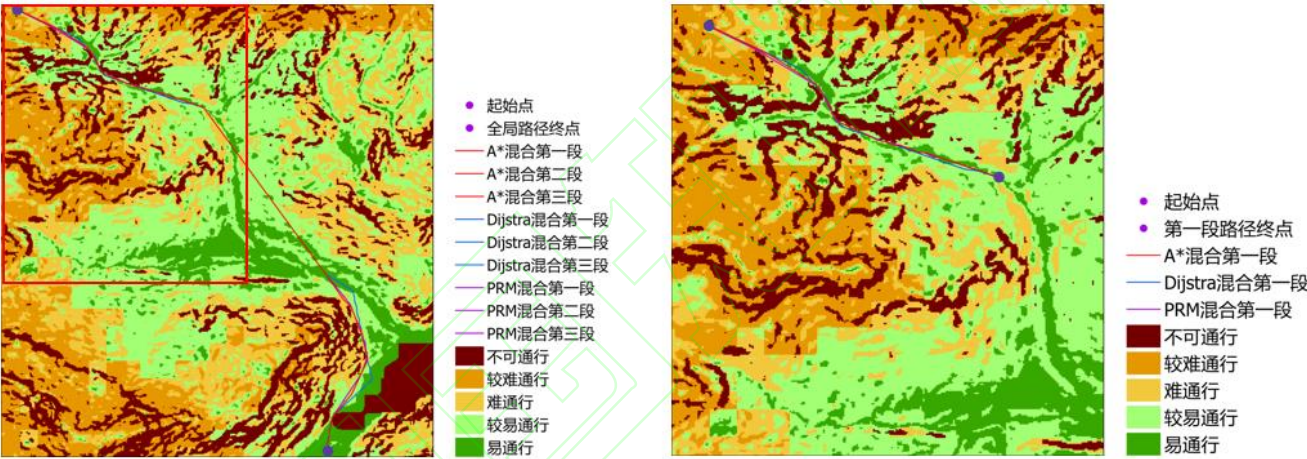


图 7 不同算法路径对比图

Figure 7. Path comparison of different algorithms

左图为 A*、Dijkstra、改进 PRM 三种不同改进混合算法全局路径规划结果；右图为三种算法在采取分段策略后第一段路径规划结果；红色框区域为右图路径规划区域

三种改进混合算法性能对比结果表明，A*与改进 NSGA-II 算法结合的方案效率最高，优化后路径最短且通行度较高，且具备较强的计算效率。尤其在复杂区域路径规划中，A*混合算法表现更加稳定。以第一段和第三段路径为例，第一段规划结果如右图所示，红色路径代表 A*混合算法，该路径在复杂转角处更为简短且圆滑，并且在易通行区域的占比更大，整体效率优于其他算法。

改进的 PRM 算法虽能实现与 A*类似的效果，但高度依赖采样点分布，若采样点距离最优路径较远，路径规划可能难以收敛至最优解，表现出较大的随机性。

相比之下，Dijkstra 与改进 NSGA-II 算法结合的方案路径质量较低，主要由于其搜索栅格数量过多，导致数据量激增和收敛速度缓慢，限制了算法性能的发挥。

5 结论

针对复杂环境下的越野路径规划量化指标构建,本文引入土壤湿度-硬度经验模型(SMSP II)对土壤圆锥指数进行预测,结合车—地交互因素,将土壤额定圆锥指数的预测方法应用于越野路径规划领域,完善了土壤通行性量化指标的构建体系。基于此,研究建立了多尺度通行度模型,并提出一种改进的NSGA-II混合算法用于快速路径规划。该方法不仅在长距离路径规划中实现了空间效率的提升,还通过全局路径的分段局部优化,结合改进NSGA-II算法,实现了快速收敛与路径优化的良好平衡。

面向未来的研究主要的改进方向有:一、并行技术的改进,分段计算在一定的计算方法和硬件加速基础上可以实现同步的并行规划,这将大大提升路径的规划效率。二、多尺度算法的改进,由于实现大尺度的选点,在牺牲精度的条件下实现快速规划,可结合动态算法,对于分段点的选取进行优化,进一步提高改进算法的适配性和灵活性。

References

Dijkstra E W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269-271.

Deb K ,Agrawal S ,Pratap A , et al.A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J].*IEEE Trans. Evolutionary Computation*,2002,6(2):182-197.

FM 5-430-00-1/AFPAM 32-8013, Vol 1. Planning and Design of Roads, Airfields, and Heliports in the Theater of Operations[S]. Washington, D.C.:

Department of the Army and Department of the Air Force, 1994.

Hart P E , Nilsson N J , Raphael B .A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J].*IEEE Transactions on Systems Science & Cybernetics*, 1972, 4(2):28-29.DOI:10.1145/1056777.1056779.

Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing Soil Information for the Globe with Quantified Spatial Uncertainty. *Soil*, 7(1), 217-240.

Schreier H, Lavkulich L M. A Numerical Terrain Classification Scheme for Off-road Terrain Trafficability Assessments[J]. *Geoforum*, 1978,9(3):225-234.

Sullivan,P.M.,Bullock,C.D.,Renfroe,N.A.,Albert,M. R.,Koenig,G.G.,Peck,L.,& O'Neill,K.(1997).Soil Moisture Strength Prediction Model Version II (SMSP II). US Army Waterways Experiment Station Tech. Rep. GL-97-15, 117.

Wang, R., Wan, S., Chen, W., Qin, X., Zhang, G., & Wang, L. (2024). A Novel Finer Soil Strength Mapping Framework Based on Machine Learning and Remote Sensing Images. *Computers & Geosciences*, 182, 105479.

中文参考文献

崔伟,刘高,于飞,等.基于缓冲区GIS断层和滑坡相关性分析中缓冲距离大小选取分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2020,38(01):4-8.

- 范林林,邱德楠,曹震,等.基于优化A*算法的越野最短路径规划研究[J].地理空间信息,2022,20(06):71-73+105.
- 盖森,吴从晖,马雷雷,等.陆战场机动单元路径规划仿真模型研究[J].指挥控制与仿真,2020,42(03):27-32.
- 高晖春,连懿,任杨千千,等.基于圆锥指数与多尺度地形因子的车辆通行性研究——以西藏自治区为例[J].天津师范大学学报(自然科学版),2024,44(03):60-67.DOI:10.19638/j.issn1671-1114.20240309.
- 韩光,赵春霞.融合多可视化特征的可通行性地形分类[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008(S1):105-108.
- 黄鲁峰.基于GIS的战场自然环境因子综合分析研究[D].解放军信息工程大学,2008.
- 何西刚,袁家喻,赖学勇,等.军事地形学[J].训练与科技,2004,25(002):58-59.
- 李天琪.面向车辆野外路径规划的可通行区域建模与路径计算[D].辽宁工程技术大学,2021.DOI:10.27210/d.cnki.glnju.2021.000299.
- 李坤伟,游雄,张欣,等.基于多源数据的土壤越野通行性评估[J].测绘科学技术学报,2018,35(02):206-210.
- 李灏,刘新全.基于圆锥指数评估车辆机动性能综述[J].农业装备与车辆工程,2011,(07):16-20.
- 李阳,周毅,雷雪,等.基于流域单元的黄土地貌正负地形因子量化关系模拟[J].干旱区资源与环境,2019,33(07):78-84.
- 刘华军,陆建峰,杨静宇.基于相对特征的越野地形可通行性分析[J].数据采集与处理,2006(01):58-63.
- 孙玉泽.无人轮式车辆越野路面全局路径规划与轨迹跟踪[D].吉林大学,2020.DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2020.006056.
- 宋伟华,谭衢霖,夏宇,等.线路工程带状走廊三维地形构建及轻量化研究[J].铁路计算机应用,2020,29(01):29-33.
- 宋彩云.基于模拟退火的ALV越野路径规划研究[D].国防科学技术大学,2005.
- 王奇胜,朱长青,张真.越野通道最短路径分析的优化算法[J].测绘科学技术学报,2007,(04):291-293.
- 吴天羿,许继恒,刘建永,等.基于改进A*算法的越野路径规划研究[J].计算机应用研究,2013,30(06):1724-1726.
- 袁仁进,陈刚,王冰冰.地形坡度对越野机动时间影响分析[J].地理信息世界,2017,24(06):87-91.
- 张捍东,郑睿,岑豫皖.移动机器人路径规划技术的现状与展望[J].系统仿真学报,2005,(02):439-443.
- 张文诗,董成全.地形通行性能的研究[J].解放军测绘学院学报,1996(02):143-147.
- 张继贤,柳健.地形数学模型建立的新方法[J].信号处理,1997(04):369-373.
- 张涵斐,王明孝,吴超辉.一种利用改进A算法的部队机动路径规划[J].测绘科学技术学报,2018,35(05):529-532+539.
- 张昊,李苗,翟兴辉,等.基于遗传算法的卫星光学载

荷成像路径规划及参数优化[C]//中国自动化
学会.2024中国自动化大会论文集.上海航天
控制技术研究 所 ,2024:70-
75.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.052346.

