

融合InVEST碳汇的步道多点网络路径规划： 生态约束与视觉优化协同

何梓润

云南大学国际河流与生态保护研究院，云南 昆明

收稿日期：2025年11月30日；录用日期：2025年12月23日；发布日期：2025年12月30日

摘要

为解决传统登山健身步道规划中生态保护维度缺失、单一路径规划效率低及未兼顾安全 - 生态 - 景观协同的问题，实现步道建设对自然生态系统的最小化干扰，同时满足步道使用需求，本研究以植被生态保护与地形耦合为核心开展路径规划。研究构建“安全 - 生态 - 景观”三维选线评价体系并采用多方法协同。地形坡度方面，将坡度大于50 (不符合国标)设为硬约束，符合国标的坡度标准化；安全因子层面，结合历史滑坡样本，用XGBoost模型量化滑坡风险，以贝叶斯优化超参数，通过SHAP值确定权重；生态因子层面，基于InVEST-Carbon模块核算碳储量损失，修正不同土地利用碳密度计算损失栅格面；通过熵权法确定指标权重，采用多起点 - 多中途点 - 多终点网络化最小成本路径规划，以景观因子VM结合帕累托非劣解综合筛选路径。本研究提出的网络化规划模式与多因子耦合方法，可有效平衡生态保护，维持碳汇功能、安全保障与景观体验，解决传统规划缺陷，为登山健身步道低干扰路径带规划提供科学支撑。

关键词

InVEST, 碳储量, XGBoost, 路径规划, 景观评价, 帕累托优化

Multi-Point Network Path Planning for Trails Integrating InVEST Carbon Sinks: Synergy between Ecological Constraints and Visual Optimization

Zirun He

Institute of International Rivers and Ecological Conservation, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: November 30, 2025; accepted: December 23, 2025; published: December 30, 2025

文章引用：何梓润. 融合 InVEST 碳汇的步道多点网络路径规划：生态约束与视觉优化协同[J]. 测绘科学技术, 2026, 14(1): 1-17. DOI: [10.12677/gst.2026.141001](https://doi.org/10.12677/gst.2026.141001)

Abstract

To address the lack of ecological conservation considerations, inefficient single-path planning, and the failure to integrate safety, ecology, and landscape in traditional mountain fitness trail design, this study focuses on path planning that minimizes disturbance to natural ecosystems while meeting trail usage demands. It centers on the coupling of vegetation ecology conservation and topography. A three-dimensional route evaluation system integrating safety, ecology, and landscape was established, employing a multi-method approach. Regarding terrain slope, gradients exceeding 50 degrees (non-compliant with national standards) were set as hard constraints, while compliant slopes were standardized. For safety factors, a XGBoost model quantifies landslide risk using 175 positive and 175 negative landslide samples, with Bayesian optimization for hyperparameters and SHAP values determining weights. For ecological factors, carbon stock loss was calculated using the InVEST-Carbon module, and loss grids were adjusted based on carbon density calculations for different land uses. Indicator weights were determined via the entropy weight method. Multi-origin-multi-intermediate-multi-destination networked minimum-cost path planning was employed, with paths comprehensively screened using the VM landscape factor combined with Pareto non-dominated solutions. The proposed networked planning model and multi-factor coupling method effectively balance ecological conservation, carbon sink functionality, safety assurance, and landscape experience. This approach addresses limitations of traditional planning and provides scientific support for designing low-impact pathway corridors for mountain fitness trails.

Keywords

InVEST, Carbon Storage, XGBoost, Route Planning, Landscape Evaluation, Pareto Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着《全民健身计划(2021~2025 年)》将国家步道体系纳入全民健身公共服务核心载体，登山健身步道已成为衔接国民户外健身需求的关键基础设施。截至 2023 年 9 月，我国已建成国家登山健身步道 30 条，总里程近 3130 公里，在建 16 条步道预计新增里程 1660 公里，覆盖 14 个省、自治区、直辖市，步道建设进入快速发展阶段。但快速扩张背后，生态保护与建设需求的矛盾日益凸显：一方面，游客数量激增导致步道沿线植被践踏、土壤压实、垃圾污染等问题频发；另一方面，我国步道建设起步较晚，配套理论与标准设计刚发布，尚未形成成熟的规划体系，与全球成熟步道建设存在差距。美国早在 1921~1937 年便建成 3575 千米的阿巴拉契亚国家步道，1968 年通过《国家步道系统法案》形成标准化管理，英国自 1965 年规划奔宁线国家步道后，目前总里程已超 18000 公里，这些国家均将生态保护与地形适配作为步道规划的核心准则，而我国传统规划多聚焦单一目标，难以满足“低干扰”建设要求。

当前登山健身步道相关研究已形成多个聚焦方向。在步道规划核心方向上，现有研究多围绕“景观优化”与“安全保障”展开：张冠婷等(2012)基于 GIS 构建鹅形山森林公园游步道选线系统，通过优化路线视觉视野增强游客对自然景观的敏感度[1]；左国良等(2021)结合数字技术开展森林公园游步道选线，

侧重串联沿线景点以提升游览价值[2]；国外研究中，Sitzia 等(2014)以游客视距为分辨率，采用最小成本路径(LCP)分析规划森林沙丘栖息地步道[3]；Chiou 等(2010)则通过 GIS 动态分割技术优化台湾中部森林步道网络，提升路径网络的实用性[4]。然而，这类研究普遍忽视《登山健身步道配置要求》中“生态保护”的核心通则“维持经过地区的自然环境、生态、历史文化和景观原有特征”，未将生态指标纳入规划体系，导致部分规划步道建成后出现土壤碳密度下降、植被裸露等问题，违背步道可持续发展的核心目标[5]，并且在景观优化上，传统二值视域仍是主流分析手段。

在地形与灾害防控研究领域，学者已明确地形因子对步道安全的关键影响：Raso 等(2019)对意大利五渔村国家公园的研究指出，滑坡是对步道破坏最显著的灾害类型，其与步道空间重叠度高且破坏具有累积性、难恢复性，危害强度远超其他灾害[6]；当坡度 $> 15\%$ 时，步道土壤流失量会显著增加，直接威胁自然生态系统平衡[7]。Tešić, Đorđević 及贾涵姝等学者进一步总结，土地覆盖类型、高程、坡度是影响滑坡灾害发生的核心指标[8]。但传统研究多采用“指标叠加”的简单方法，如陈国平(2007)利用 DEM 技术分析景观工程道路选线中的坡度风险，未实现灾害风险的量化与权重分配，无法精准识别高风险区域，导致步道安全防控精度不足[9]。

综合来看，当前步道规划研究存在四方面局限：一是规划模式单一，多采用“点 - 多中途点 - 点”的单一路径设计，面对多入口、多出口、多中途景点的复杂区域时，规划效率低下，难以满足实际需求；二是缺乏生态约束，未系统整合碳汇损失等核心生态指标，缺乏 InVEST 等专业生态模型耦合，生态保护缺乏量化支撑；三是景观评价方法有限，多采用传统二值视域，未考虑视角面积、距离衰减等影响行进者主观感知的因素，无法精准量化景观体验质量。

针对上述不足，本研究以“安全 - 生态 - 景观”为核心，旨在构建覆盖三个维度的选线评价体系，突破传统规划模式局限，提出“多起点 - 多中途点 - 多终点”网络化最小成本路径规划方法。通过 InVEST-Carbon 模块量化不同土地利用类型的碳储量损失，结合 XGBoost 模型与 SHAP 值分析实现滑坡风险精准评估，引入 Visual Magnitude (VM) 指标量化景观视觉质量，同时采用熵权法客观确定各指标权重，结合帕累托非劣解筛选最优路径，最终实现登山健身步道的路径规划。既满足游客健身需求与景观体验，又减少对生态系统的干扰，填补当前研究在多维度协同规划与网络化路径设计上的空白。

研究成果包括：完成雷公山自然保护区不同土地利用类型的碳密度修正，明确林地、草地、耕地等主要用地类型的地上生物碳、地下生物碳及土壤碳密度基准值；生成研究区滑坡易发性空间分布栅格，精准识别高风险区域以规避路径选线；得到体现“路径长度 - VM 值”折衷关系的帕累托前沿路径集，为规划者提供多场景下的最优路径选择；基于路径带与水源地缓冲区叠加、地形条件初筛及山洪易发区规避，确定山体稳定、临近水源的露营地选址范围。最后成果验证了“多起点网络化规划 + 多因子耦合”方法的科学性与可行性，为登山健身步道路径规划提供了具体的技术方案与数据支撑。

2. 研究区域与数据来源

本研究以雷公山自然保护区为研究区域。该保护区生态系统完整，涵盖林地、草地、耕地、建筑用地、裸地等土地利用类型，植被覆盖度高且碳汇功能突出，不同用地类型的碳储量基准数据清晰，为步道规划的碳储量损失核算提供了基础条件。同时保护区地形存在合理坡度梯度，且存在滑坡灾害潜在风险，能够模拟真实复杂的步道建设场景。

雷公山虽已建成 20 km 林间步道等基础设施，但是多为零散分布的“林间小道，未形成串联核心景观的系统性网络，所在的黔东南州正推进“生态旅游提质”，雷公山周边区域正推进“茶叶 + 旅游”的产业融合，步道作为关键配套设施的需求日益凸显。综上选取雷公山作为本次的研究区域能具有针对性与实践价值。

自然保护区数据及矢量边界、土地利用类型数据来源于 Zenodo 平台；地形数据来源于欧洲航天局：基于 TanDEM-X 任务的全球雷达卫星数据，经干涉处理、人工参与的半自动编辑，形成 30 米格网间距的哥白尼 30 米分辨率 DEM；研究区降水、气温数据来源于贵州省林业局资源概况文件；历史灾害数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心。

3. 研究方法

依据国家关于户外登山活动中保障游客乐趣、安全及自然保护的相关通则，综合考虑步道选线需求，筛选出地形坡度因子、生态保护因子、景观视觉因子共 3 类核心因子，构建起覆盖“安全 - 生态 - 景观”的选线评价体系，核心流程图如图 1。

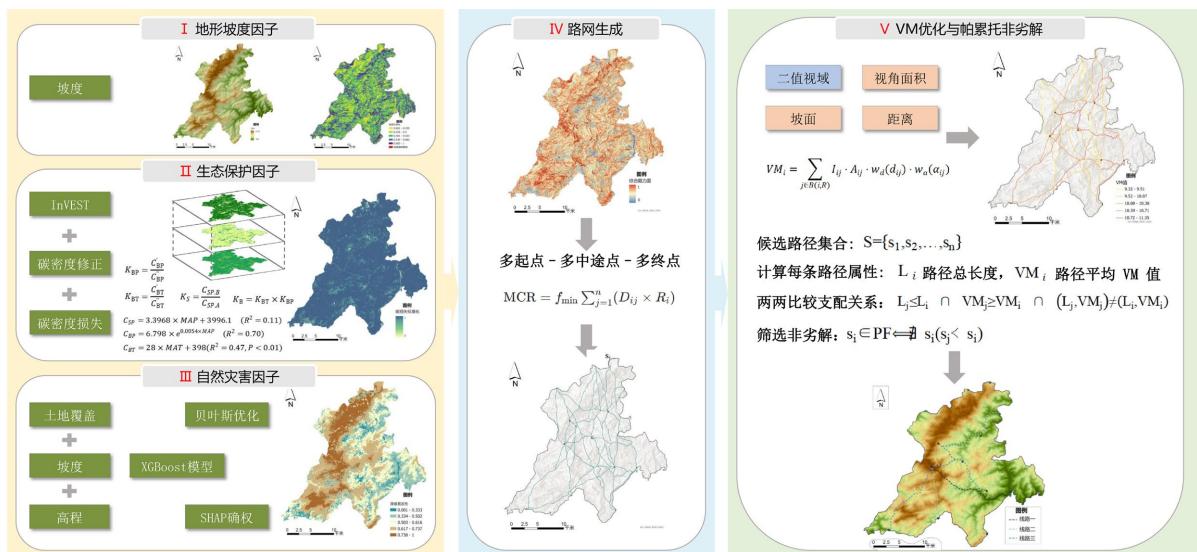


Figure 1. Core process flowchart

图 1. 核心流程图

3.1. 熵权法

熵权法是客观确定权重研究中的经典方法，其基于数据自身离散程度确定权重的客观方法。在熵权法使用前，需要对数据进行标准化处理。将各个指标所得的结果使用栅格计算器进行标准化，研究所有指标均为负向指标，标准化公式分别如下式：

$$Y_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (1)$$

式中： Y_{ij} 为第 i 个指标的第 j 项标准化后的值， x_{ij} 为第 i 个指标的第 j 项的原值。

熵权法的核心逻辑是通过指标数据的信息熵量化其离散程度，信息熵越小，表明指标数据的分布差异越显著，对评价目标的区分能力越强，对应的权重占比越高。具体公式如下式：

$$w_j = \frac{1 - \left[-\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X'_i}{\sum_{i=1}^n X'_i} \right) \ln \left(\frac{X'_i}{\sum_{i=1}^n X'_i} \right) \right]}{\sum_{j=1}^m \left\{ 1 - \left[-\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X'_i}{\sum_{i=1}^n X'_i} \right) \ln \left(\frac{X'_i}{\sum_{i=1}^n X'_i} \right) \right] \right\}} \quad (2)$$

式中： w_j 是第 j 个评价指标的权重值； x'_i 是第 i 个基本评价单元各评价指标预处理后的值； r_{ij} 是第 i 个基本评价单元中第 j 个评价指标加权后的值； n 为基本评价单元数量； m 为评价指标个数。

3.2. 路径规划

本研究的路径规划以最小成本路径分析，核心是计算“起点、中途点(M)、终点”间的累积成本最低路径，适用于规划中规避高阻力区域的需求。构建全局图可直接整合多维度权重，通过调整权重快速实现后续 VM 等目标的优化，公式如下：

$$w(V_i, V_j) = \begin{cases} \frac{\text{Cost}(V_i) + \text{Cost}(V_j)}{2} & (\text{相邻单元格, 水平/垂直}) \\ \frac{\text{Cost}(V_i) + \text{Cost}(V_j)}{2} \times \sqrt{2} & (\text{对角线单元格, 距离修正}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： V 为网格单元格， E 为相邻单元格的连接边， w 代表移动成本。

其中， $\text{Cost}(V_i)$ 为顶点 V_i 的相对成本值。即从起点到该顶点的所有边权重之和的最小值，最终追溯终点的累积成本路径，得到单条最小成本路径。

3.3. 目标优化与帕累托非劣解

在 M 数量增长时，LCP 枚举 M 的全排列计算量呈指数增长。但通过 GIS 成本网格与图论算法，通过一次构建全局图，后续所有路径求解基于此图复用，能够降低信息冗余，减少重复计算。但在路径规划中，存在多个相互冲突的优化目标，为同时兼顾两类目标，本研究引入帕累托最优解(Pareto Optimal Solutions)思想进行筛选，其中候选路径集为式(4)，若存在路径 s_j 满足式(5)，则称 s_i 支配 s_j ；若某路径不被任何其他路径支配，则记为帕累托非劣解式(6)。

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (4)$$

$$L_j \leq L_i \cap \text{VM}_j \leq \text{VM}_i \cap (L_j, \text{VM}_j) \neq (L_i, \text{VM}_i) \quad (5)$$

$$s_i \in PF \Leftrightarrow \nexists s_j (s_i < s_j) \quad (6)$$

式中：路径 s_i 有属性 L_i 为路径总长度； VM_i 为路径总 VM 值。

非劣解集合 PF 构成帕累托前沿(Pareto Front)，在二维坐标系(L, VM)上表现为一条曲线，揭示了“最短路径”与“最佳景观体验”之间的折衷关系。

3.4. 指标选择

3.4.1. 地形坡度因子

在登山健身步道规划中，坡度是核心约束因子之一。坡度与攀爬难度与危险程度直接关联。道路坡度高增加了打滑与重心失衡的风险。在 J. L. Marion 的步道土壤流失研究中，坡度是土壤流失的关键影响因子，且在坡度 $> 15\%$ 时土壤流失显著增加。并且根据《GB/T44090-2024 登山健身步道配置要求》，坡度超 25% 时需铺设石板或木台阶以避免水土流失，而台阶建设需开挖山体、搬运材料，会破坏原生植被与土壤结构，对生态环境的干扰随坡度增大而加剧。因此，坡度不仅是影响步道适宜性的关键生态位指标，也体现了工程建设对生态系统干扰的强度。

因此，本研究将坡度设定为硬约束因子。参考国家标准《GB/T44090-2024 登山健身步道配置要求》，将步道坡度划分为 A、B、C 三个等级，并规定当坡度超过 C 类最大值(50%)时，该区域不再纳入路径规划范围。

3.4.2. 生态保护因子

随着登山健身步道的普及，游客数量的增加给生态环境带来了巨大压力。践踏植被、垃圾污染、水土流失等问题日益突出，严重破坏了自然生态系统的平衡。如香格里拉五凤山的健身步道沿线垃圾成堆，对当地生态环境造成了巨大影响，如图 2。



Figure 2. Environmental problems around the trail

图 2. 步道周边环境问题

登山健身步道的绿色发展强调生态优先，将生态保护贯穿于步道建设、运营和管理的全过程。通过科学规划和设计，避免对自然环境的过度干扰，减少对植被、土壤、水体等生态要素的破坏。而碳储量是直观反映植被覆盖度、净初级生产力等指标的重要维度，将其考虑到道路规划中，可以有效规避因植被践踏、土壤压实导致的碳汇能力下降，实现对植物生态系统完整性与生态服务功能的保护。

将碳汇纳入到阻力的框架之下，是响应“绿水青山就是金山银山”理念的实践需求、步道可持续发展核心目标，也是源于对现有研究缺陷的补充。

在相关碳密度的研究中，Kissling 等(2009)通过 suburban 山毛榉林实验发现，短期踩踏对土壤有机质含量无显著影响，但长期硬化步道铺设会导致土壤孔隙减少、通气不足，进而改变微生物活性影响碳周转[10]；杨洁等(2021)基于 InVEST 模型与 CA-Markov 模型，量化黄河流域碳储量时空变化，验证了 InVEST 模型在生态评估中的适用性。但这些研究未将碳储量损失、植被践踏等生态因子与步道路径规划直接耦合，缺乏对“地上生物碳 - 地下生物碳 - 土壤有机碳”损失的量化核算，导致生态保护难以转化为具体的约束条件，无法切实指导步道建设[11]。

本研究对研究区域不同土地利用类型中各部分碳密度与步道建设对四种碳密度的影响因子进行加权处理，目的是通过 InVEST 模型得到步道建设对碳储量损失的栅格面。

对于每一种土地利用类型，步道建设造成的碳密度损失，等于该类原本的碳密度乘以步道对该碳密度的影响因子。例如：

$$L_{\text{above},i} = C_{\text{above},i} \times K_{\text{above}} \quad (7)$$

$L_{\text{above},i}$ 是第 i 种土地利用类型下，步道建设造成的地上生物碳损失密度。

其中 i 为第 i 种土地利用类型(如耕地、林地、草地等)， above 为地上生物碳、 below 地下生物碳、 soil 土壤有机碳、 dead 枯落物碳的碳密度。

步道建设对不同维度的碳密度的影响有显著区别，步道建设通过“人为踩踏”导致植被覆盖度降低。当步道使用强度较高时，植被覆盖度减少，部分区域出现植被裸露的情况，步道附近植物高度通常降低，树木大小减小、树冠覆盖度下降。硬化步道对边缘植被的影响范围更广，部分情况下影响可延伸至步道

边缘 20 米处，且因建设和维护过程更会对植被生长造成更多影响[7] [12]。

对地下生物碳与土壤碳的研究，在 K. Tessa Hegetschweiler 的模拟实验中，短期踩踏对总土壤有机质含量无显著影响。但长期看，硬化步道铺设对土壤的路基压实度远超自然踩踏，两者同时对土壤的压实作用导致其孔隙减少、通气不足，改变了微生物活性间接影响碳周转，并且凋落物输入不足，最后形成“碳封存但低效循环”状态[10]。

步道建设与踩踏通过降低植被覆盖度，直接导致凋落物的源头输入减少，但死亡有机物碳储量由于在碳库中所占比重较小，故在本研究中不予考虑。

各影响因子的设定值来源于以上文献中对生态环境和步道的研究结果。由于不同研究区之间的环境条件存在差异，为避免单一研究的偏差，参考各文献中量化数据并与路面情况比例，对影响数值进行统计，采用其平均值作为代表性参数输入模型，用以表征该类生态系统的典型状态，最终将各维度影响强度映射为 0~1 区间数值，如表 1。

Table 1. Carbon density type affected by trail impact intensity table
表 1. 碳密度类型受步道影响强度表

碳密度类型	影响因子	核心支撑
地上生物碳密度	0.455	植被覆盖度降低 30%~70%，敏感物种生物量降幅超 50%
地下生物碳密度	0.325	表层根系生物量减少 50%，深层根系保留部分碳储存能力
土壤碳密度	0.220	表层土壤碳密度降低 30%~45%，深层碳密度降幅仅 5%~15%
凋落物碳密度	-	-

本文使用的碳密度数据来源于全国研究范围结果，其中死亡有机物碳储量由于在本严重中影响比重较小，故在本研究中不予考虑。所有本研究碳密度主要考虑各土地利用地上植被、地下植被和土壤碳密度值，由于研究聚焦路径规划，不考虑水域的碳储量影响，在最后的路径规划算法中将水域面阻力设置为 ∞ （表 2）。

Table 2. Carbon density of different land use components
表 2. 不同土地利用各部分的碳密度($t \cdot hm^{-2}$)

土地利用	地上生物碳密度		地下生物碳密度		土壤碳密度	
	碳密度	研究范围	碳密度	研究范围	碳密度	研究范围
林地	41.89	梁王山	10.39	梁王山	65.70	梁王山
草地	8.40	梁王山	1.72	梁王山	46.70	梁王山
耕地	4.11	梁王山	0.95	梁王山	59.30	梁王山
建筑用地	2.5	全国	27.5	全国	0.00	全国
裸地	0.13	全国	0.00	全国	0.00	全国
水域	0	-	0.00	-	0	-

由于本研究的碳密度数据来源于全国性研究结果，并不是实际的测量结果，而碳密度值随气候、土壤性质和土地利用的不同而不同，所以需对其进行修正。采用 Alam 等(2013)的研究成果公式修正土壤碳密度，因为气温对土壤碳密度的相关性远低于降水，因此本文仅考虑年降水量构建修正土壤碳密度。年均温与生物量碳密度的关系借鉴 Giardina、陈光水等人研究中的公式[13]-[15]。

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \quad (R^2 = 0.11) \quad (8)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times MAP} \quad (R^2 = 0.70) \quad (9)$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \quad (R^2 = 0.47, P < 0.01) \quad (10)$$

式中： C_{SP} 为根据年降水量得到的土壤碳密度， C_{BP} 、 C_{BT} 分别是根据年降水量和年均温得到的生物量碳密度， MAP 是年均降水量(mm)， MAT 是年均气温(°C)。

分别将雷公山研究区域和对应研究区域的年均温和年降水量代入上述公式，二者之比为雷公山区域的修正系数(全国年均气温 10.25°C，年降水量 695 mm；晴隆孟寨年均气温 14.95°C，年降水量 1450 mm；雷公山年均气温 14.5°C，年降水量 1350 mm；梁王山年均气温 11.7°C，年降水量 1250 mm)。

$$K_{BP} = \frac{C_{BP}}{C''_{BP}} \quad (11)$$

$$K_{BT} = \frac{C_{BT}}{C''_{BT}} \quad (12)$$

$$K_B = K_{BT} \times K_{BP} \quad (13)$$

$$K_S = \frac{C_{SP,B}}{C_{SP,A}} \quad (14)$$

式中： K_{BP} 、 K_{BT} 分别为生物量碳密度的降水因子和气温因子修正系数， C' 和 C'' 分别是雷公山和全国的碳密度数据； K_B 、 K_S 分别为生物量碳密度修正系数和土壤碳密度修正系数。将碳密度修正系数与原区域碳密度数值相乘即是雷公山碳密度数据。最终修订碳密度值如表 3。

Table 3. Revised carbon density values

表 3. 修订碳密度值

土地利用	地上生物碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度
林地	79.65	19.76	88.70
草地	15.97	3.27	63.05
耕地	7.81	1.81	61.74
建筑用地	10.08	0.00	0.00
裸地	5.24	0.00	0.00
水域	0.00	0.00	0.00

3.4.3. 自然灾害因子

在 Raso 对意大利五渔村国家公园步道面临的各种自然灾害风险研究中，滑坡是对步道影响最核心的灾害因子，在空间维度上，步道与滑坡高发区高度重叠，且对步道的破坏具有累积性与难以恢复的特点，从危害强度、空间覆盖还是长期影响上都显著高于其他灾害类型。因此，研究将以滑坡为核心自然灾害因子，减少二者在空间上的重叠度。

根据 Tešić, Đorđević、Zhang、贾涵姝的研究总结对滑坡影响最大的核心指标，包括土地覆盖类型、高程、坡度，结合历史滑坡灾害点数据，使用 XGBoost 模型量化各指标对滑坡灾害发生的贡献度，最后进行叠加分析生成滑坡易发性数据。

在超参数调优中，相比等距搜索和随机搜索，以贝叶斯优化选择最优参数，能够在有限的试验次数

内逐步逼近最优解，从而显著提升搜索效率，降低计算成本[16] [17]。其中对土地覆盖类型进行独立热编码。

3.4.4. 景观视觉因子

在路径规划、景观资源评估领域，视野作为景观视觉因子的核心载体，是连接景观客观特征与人类主观感知的关键纽带。Chamberlain (2013)将传统点视域(二值可见/不可见)扩展为路线化的可视性评价，强调用视角/坡度与距离联合权重来得到显著度指标，侧重反映行进者沿路线的视觉体验。提出 Visual Magnitude (VM)旨在量化被观察区域在视场中所占“感知显著性”[18]。VM 处理流程如下：

将路线按固定抽样间距 s 抽样为观测点，每个观测点设定观测者高度 h ，最大视距 R ；

在每个观察点处，首先计算其二值视域 $I_{ij} \in \{0, 1\}$ ，并对视角面积 A_{ij} 、距离 $w_d(d_{ij})$ 与坡面 $w_a(\alpha_{ij})$ 进行加权。其中 $w_d(d_{ij})$ 和 $w_a(\alpha_{ij})$ 均采用线性衰减函数，距离权重 w_d 随 d 增大单调递减；坡度权重 w_a 随坡面倾角增大衰减。视角面积 A_{ij} 表示像元 j 在观察点 i 的立体角面积，依据 DEM 分辨率和与观察点的相对几何关系计算。因此单点 VM 定义为：

$$\text{VM}_i = \sum_{j \in B(i, R)} I_{ij} \cdot A_{ij} \cdot w_d(d_{ij}) \cdot w_a(\alpha_{ij}) \quad (15)$$

最后将观测点的 VM 沿路线进行平均，得到该路线的景观驱动度指标，确保不同长度路线的可比性。

3.4.5. 步道系统配套设施选址

依据国标要求，露营地的建立应该在山体结构稳定、无塌方洪水危险、干燥平整、靠近水源地的安全地区。首先将路径带缓冲区与水源地缓冲区进行叠加，获取露营点选址的基础范围，再开展地形条件初筛，排除坡度超标、起伏过大等不适宜地形。结合安全约束，避开山洪易发区，进一步优化选址范围，最后剔除过小的碎片化区域。具体实现路线如图 3。

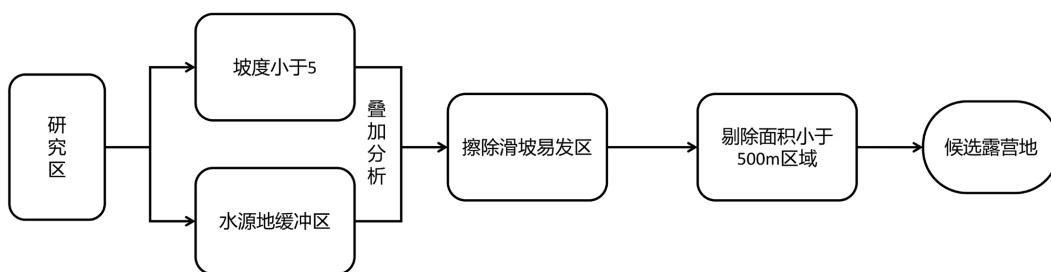


Figure 3. Campsite selection technical roadmap
图 3. 露营地选址技术路线图

3.5. 过程与结果

3.5.1. 指标处理与计算

将坡度大于 50° 的作为硬约束的障碍栅格，其余标准化以便后续加权求和，最后结果如下图 4。

将表 3 的研究区域修正碳密度数据与图 5 的土地利用类型数据，输入到 InVEST 模型后单独计算各碳密度类型下的碳汇，结合式(7)计算各类型碳汇损失，最后累加得到图 6 碳损失栅格。

使用 XGBoost 训练自然灾害因子，模型样本点中灾害点正样本数量 175 个，负样本数量由研究区域内排除正样本后随机选择 175 个，最终训练样本量 350 个。

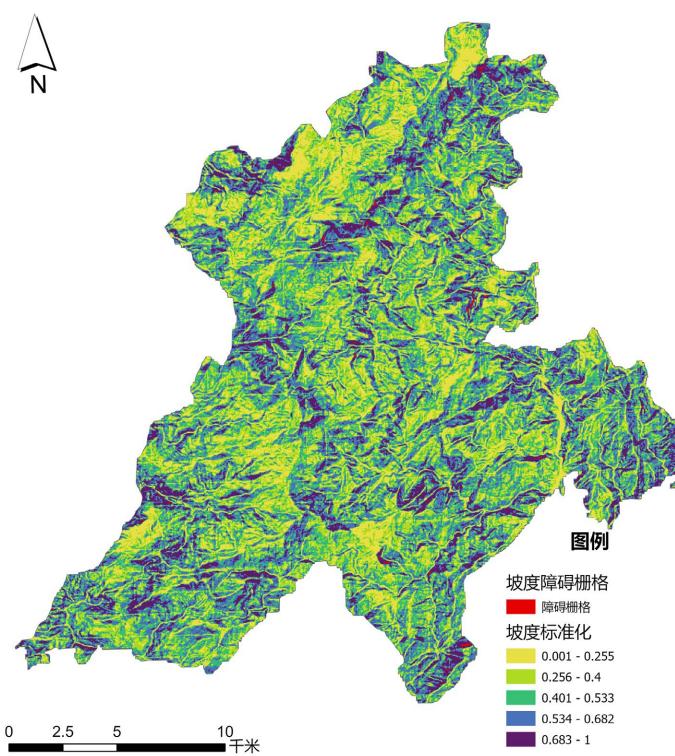


Figure 4. Slope factor

图 4. 坡度因子

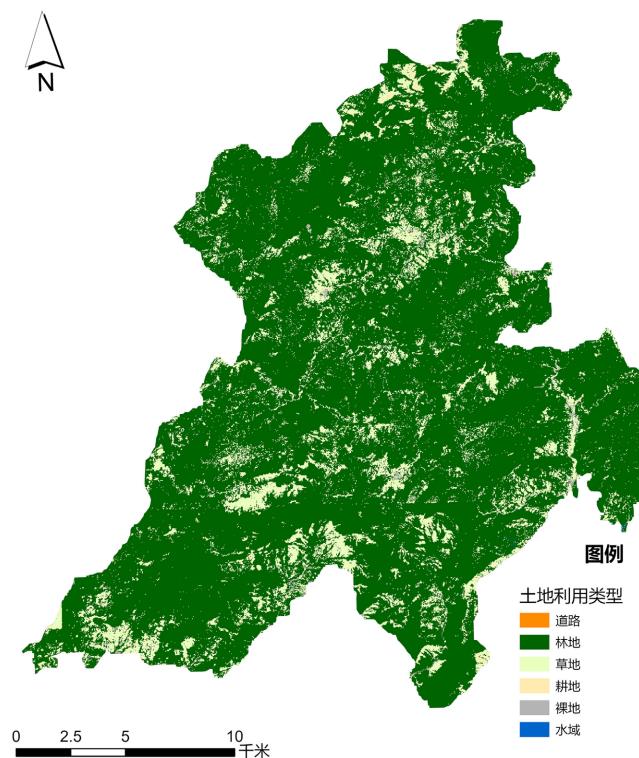


Figure 5. Land use type

图 5. 土地利用类型

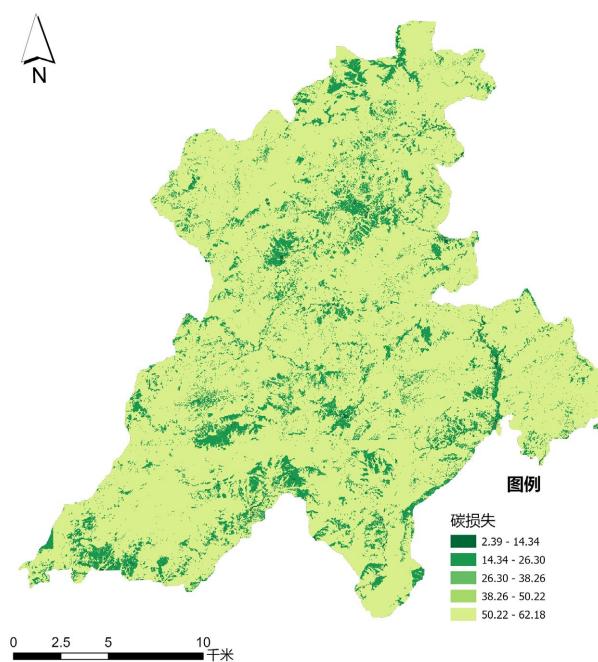


Figure 6. Carbon loss
图 6. 碳损失

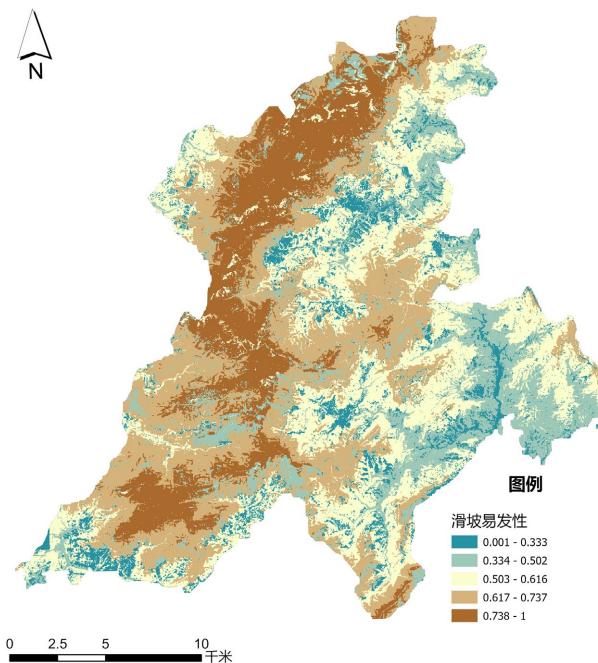


Figure 7. Landslide susceptibility
图 7. 滑坡易发性

通过 5 折分层交叉验证，实现 4 份训练 + 1 份验证的循环迭代，取 5 次 AUC 的平均值作为模型性能指标，最终以最优 AUC 0.9160 的参数进行模型训练后，使用 SHAP 解释 XGBoost 模型，计算每个特征的 SHAP 值。最终的原始特征标准化 SHAP 权重结果如下表 4 所示，结合权重进行指标加权求和得到如图 7。

Table 4. SHAP weight results
表 4. SHAP 权重结果

类型	高程	土地覆盖类型	坡度
权重	0.5759	0.2493	0.1748
子类型	-	林地	裸地
子权重	-	0.175594	0.054079

3.5.2. 熵权法与路网生成

将坡度、碳损失、滑坡易发性栅格融合为三个波段的栅格，以 tif 的格式导出，在外部用 python 代码运行熵权法，计算各指标信息熵量化其离散程度，权重合理性验证中，信息熵 $\in [0, 1]$ ，权重和为 1，相关性 $r=1$ 均通过，说明计算结果在学术严谨性上满足论文要求，可作为后续的核心参数，具体结果如表 5，最终加权求和得到如图 8。

对各起点、终点到景点，景点之间做 LCP 最小成本路径分析，通过 Python 代码进行 Dijkstra 算法计算综合阻力面“两个有效像素间”的累积成本，累积成本最低路径最终得到如图 9。

Table 5. SHAP weight results
表 5. 熵权法权重

指标	坡度因子	生态因子	灾害因子
权重	0.4892	0.2561	0.2547
比重	48.92%	25.61%	25.47%

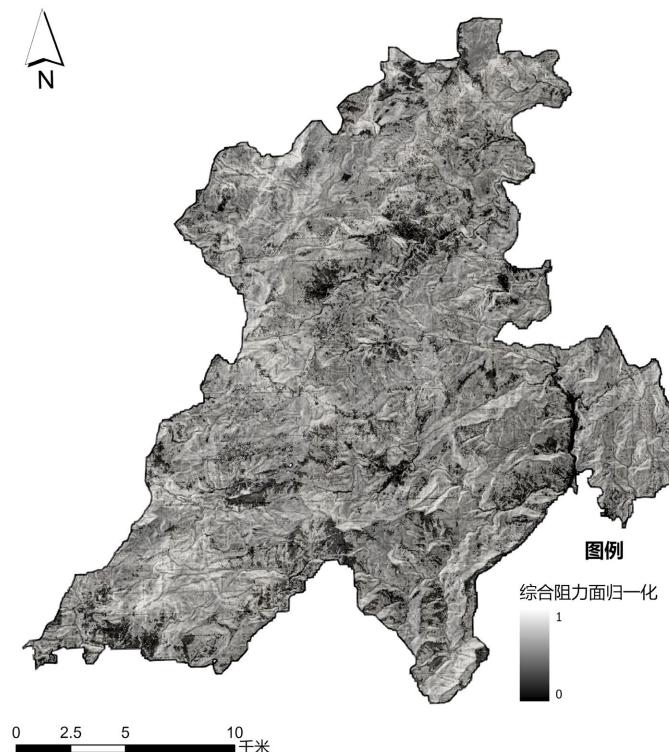


Figure 8. Comprehensive resistance surface
图 8. 综合阻力面

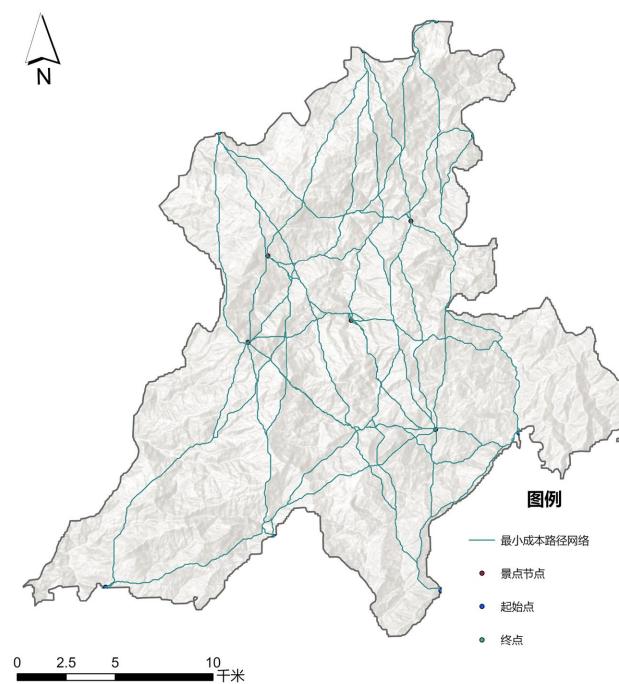


Figure 9. Minimum-cost network
图 9. 最小成本路网

3.5.3. VM 优化与帕累托分析

本研究参考空间分辨率将抽样间距设置 50 m，观察者高度设置 1.7 m，最大视距 5 km。对最小成本路网的各个路段进行 VM 平均计算，结果如图 10 所示。

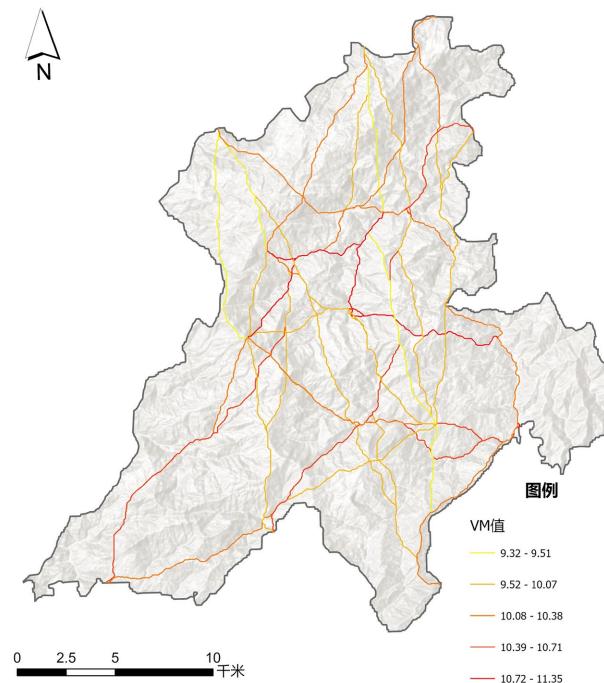


Figure 10. VM average chart
图 10. VM 平均图

帕累托分析用于解决“路径长度最小化”与“景观视觉质量最大化”这两个相互冲突的优化目标。先通过图模型与中途景点全排列，生成所有满足“起点 - 中途点 - 终点”的有效性路线。通过“支配关系判断”筛选非劣解路线：对每一条候选路线，逐一比对其他路线，若存在某条路线能同时满足“总长度 \leq 当前路线”且“总 VM 值 \geq 当前路线”，则当前路线为“劣解”；若不存在这样的路线，意味着它在“短路径”和“好景观”的权衡中，是当前最优路径。经计算，如图 11，可知有 3 条非劣解存在，路线如下图 12。

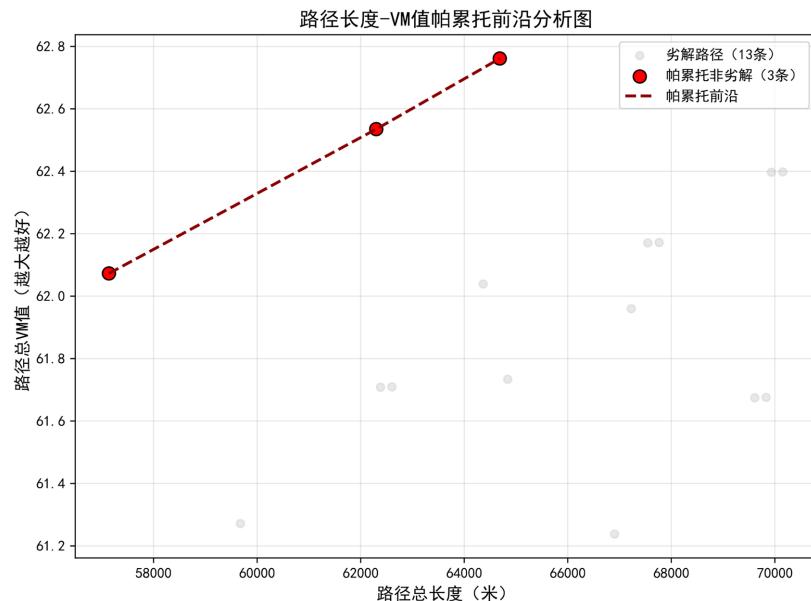


Figure 11. Pareto frontier analysis chart

图 11. 帕累托前沿分析图

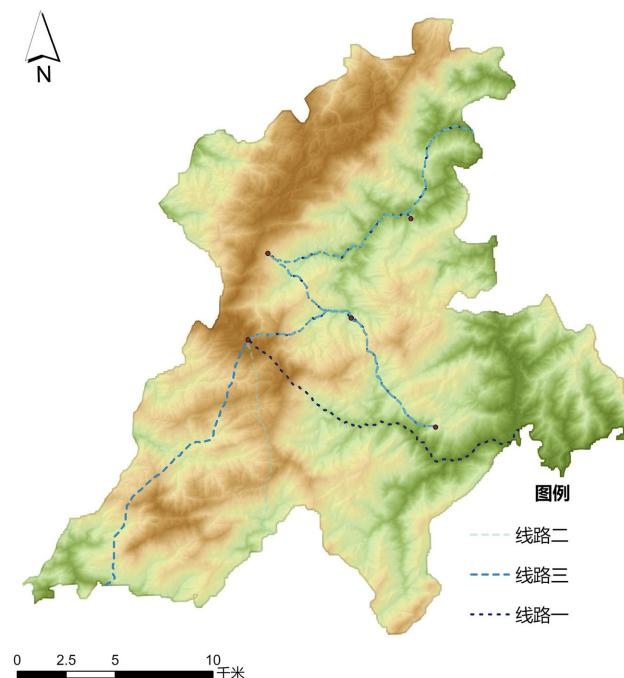


Figure 12. Optimal path map

图 12. 最优路径图

3.5.4. 基础设施选址

在露营地选取过程中，设置 100 米的河流缓冲区，既能有效保障露营安全，作为防洪与撤离安全缓冲，又可使露营地便捷靠近水源以满足用水需求；同时，剔除面积小于 500 平方米的区域，以此保证露营地具备充足的活动与设施布置空间，用于保证私密与公共服务空间满足露营活动的基本场地要求。最终露营点结果如图 13。

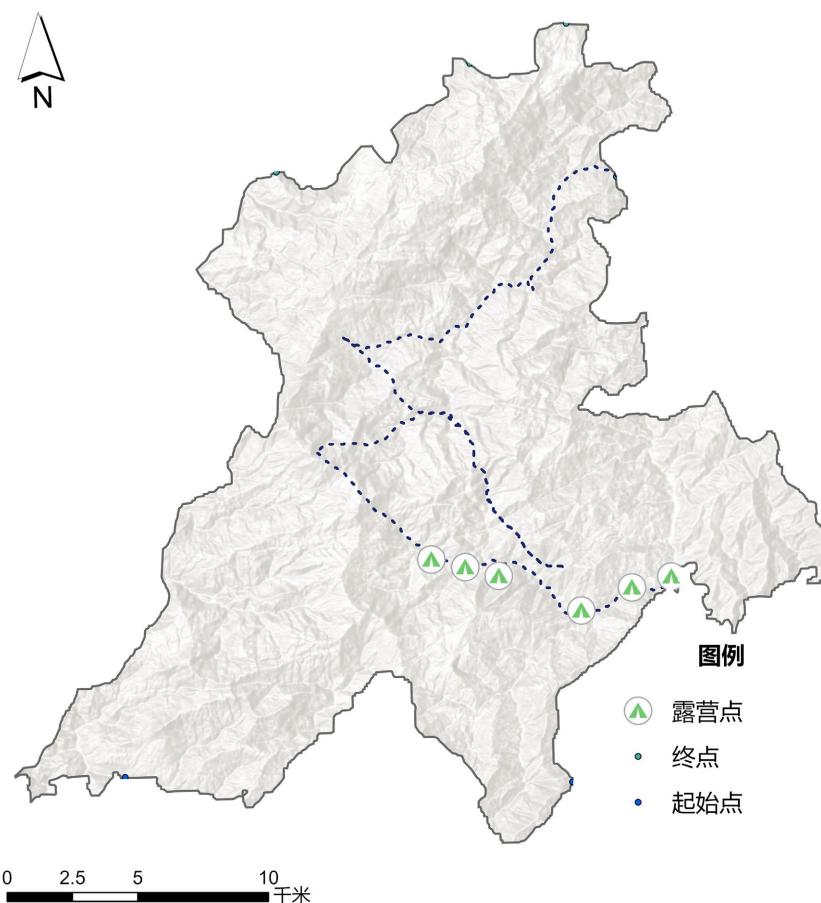


Figure 13. Pareto frontier analysis chart

图 13. 露营点选址图

4. 结语

本研究对传统登山步道规划中生态维度缺失、单一路径效率低、多目标协同不足等问题，以雷公山自然保护区为对象，构建“安全 - 生态 - 景观”三维选线体系：通过 InVEST-Carbon 模块修正区域碳密度(如林地上生物碳 $79.65 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、土壤碳 $88.70 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)，量化步道建设的碳汇损失；结合 350 个滑坡正负样本，用 XGBoost 模型(最优 AUC 0.9160)与 SHAP 值(高程权重 0.5759、林地权重 0.1756)精准评估滑坡风险；引入 VM 指标改进景观评价，替代传统二值视域分析；最终以“多起点 - 多中途点 - 多终点”网络化规划为框架，用熵权法(坡度权重 0.4892、生态因子 0.2561、灾害因子 0.2547)加权，通过帕累托非劣解筛选出 3 条兼顾“长度 - 景观”的最优路径，并确定山体稳定、近水源的露营地范围，形成“因子量化 - 网络规划 - 优化筛选”的技术闭环。

研究成果可直接服务于雷公山步道建设规划，3 条最优路径与露营选址地方案能直接落地。同时也能够

推广至南部众多保护区、山地的步道规划，契合《GB/T44090-2024》“低干扰”要求，弥补行业量化生态约束的技术空白。

此外，实地验证对于本研究的理论成果转化具有重要意义。尽管本研究通过模型模拟与数据分析实现了生态、景观与安全的综合优化，但步道建设的生态干扰效应、碳储量损失及景观体验等仍需通过实地调查与长期监测加以验证。后续研究可在典型路径段设置样地，监测植被恢复率、土壤压实度与碳密度变化，验证模型预测结果的可靠性与适用性。

与此同时，本研究仍存在一定的局限性。首先，研究区域仅聚焦于雷公山亚热带山地生态系统，模型参数与结果的适用性在温带、高原等不同地貌类型中尚未得到验证，其普适性仍需进一步探讨。其次，生态与景观指标的构建未充分考虑物候变化与气象条件对植被动态特征的影响，难以全面反映不同季节或时段下生态质量与景观感知的时变性。再次，在碳汇损失核算方面，由于有机碳密度数据获取受限，部分土壤碳汇的空间异质性未能完全反映，可能导致碳储量损失估算存在一定误差。

未来研究可从两个方向进一步深化：一是以秦岭(温带)、香格里拉(高原)等典型区域为代表，开展跨区域对比与参数校准，建立多地貌分区的步道规划参数库，以提升模型的通用性与推广价值；二是结合高时空分辨率的时序遥感数据，引入物候期动态权重，完善生态指标体系，构建基于时间序列的VM视觉动态评价模型，从而实现对步道生态与景观质量的时空一体化评估。

参考文献

- [1] 张冠婷, 吴越. 基于 GIS 的鹅形山森林公园游步道选线系统的建立[J]. 中外建筑, 2012(5): 111-113.
- [2] 左国良, 胡海辉. 基于数字技术的森林公园游步道选线研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 168-175.
- [3] Sitzia, T., Rizzi, A., Cattaneo, D. and Semenzato, P. (2014) Designing Recreational Trails in a Forest Dune Habitat Using Least-Cost Path Analysis at the Resolution of Visitor Sight Distance. *Urban Forestry & Urban Greening*, **13**, 861-868. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.011>
- [4] Chiou, C., Tsai, W. and Leung, Y. (2010) A GIS-Dynamic Segmentation Approach to Planning Travel Routes on Forest Trail Networks in Central Taiwan Region. *Landscape and Urban Planning*, **97**, 221-228. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.06.004>
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T44090-2024 登山健身步道配置要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [6] Raso, E., Cevasco, A., Di Martire, D., Pepe, G., Scarpellini, P., Calcaterra, D., et al. (2019) Landslide-inventory of the Cinque Terre National Park (Italy) and Quantitative Interaction with the Trail Network. *Journal of Maps*, **15**, 818-830. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1657511>
- [7] Marion, J.L. and Wimpey, J. (2017) Assessing the Influence of Sustainable Trail Design and Maintenance on Soil Loss. *Journal of Environmental Management*, **189**, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.074>
- [8] Tešić, D., Đorđević, J., Hölbling, D., Đorđević, T., Blagojević, D., Tomić, N., et al. (2020) Landslide Susceptibility Mapping Using AHP and GIS Weighted Overlay Method: A Case Study from Ljig, Serbia. *Serbian Journal of Geosciences*, **6**, 9-21. <https://doi.org/10.18485/srbjgeosci.2020.6.1.2>
- [9] 陈国平, 赵俊三, 魏保峰. DEM 技术在景观工程道路选线中的应用[J]. 测绘工程, 2007(3): 59-62.
- [10] Kissling, M., Hegetschweiler, K.T., Rusterholz, H. and Baur, B. (2009) Short-Term and Long-Term Effects of Human Trampling on Above-Ground Vegetation, Soil Density, Soil Organic Matter and Soil Microbial Processes in Suburban Beech Forests. *Applied Soil Ecology*, **42**, 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.008>
- [11] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1018-1029.
- [12] Ballantyne, M. and Pickering, C.M. (2015) The Impacts of Trail Infrastructure on Vegetation and Soils: Current Literature and Future Directions. *Journal of Environmental Management*, **164**, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.032>
- [13] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007(1): 34-42.

-
- [14] Alam, S.A., Starr, M. and Clark, B.J.F. (2013) Tree Biomass and Soil Organic Carbon Densities across the Sudanese Woodland Savannah: A Regional Carbon Sequestration Study. *Journal of Arid Environments*, **89**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.002>
 - [15] Giardina, C.P. and Ryan, M.G. (2000) Evidence That Decomposition Rates of Organic Carbon in Mineral Soil Do Not Vary with Temperature. *Nature*, **404**, 858-861. <https://doi.org/10.1038/35009076>
 - [16] Brochu, E., Cora, V.M. and de Freitas, N. (2010) A Tutorial on Bayesian Optimization of Expensive Cost Functions, with Application to Active User Modeling and Hierarchical Reinforcement Learning. arXiv: 1012.2599.
 - [17] Snoek, J., Larochelle, H. and Adams, R.P. (2012) Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms. arXiv: 1206.2944.
 - [18] Chamberlain, B.C. and Meitner, M.J. (2013) A Route-Based Visibility Analysis for Landscape Management. *Landscape and Urban Planning*, **111**, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.004>