地貌格局约束下秦直道布线规律与最优路径重构研究

黄文乐[1]，刘泽宜[1]，马伊琳[1]，邵涵[2]，杨永霞[1*]
1. 广东培正学院 经济学院，广东 广州 510830
2. 广东培正学院 管理学院，广东 广州 510830
DOI:10.61369/ASDS.2026100004

摘　　要： 本文以陕甘八县子午岭段的秦直道为实证案例，围绕地形约束下的古道路选线问题，大致按照地形特征提取、选线规律验证、最优路径重构和防御设施布局几个环节展开。研究把地理信息分析与数学建模结合起来，构建了一套多模块耦合的技术框架并做了多维度检验，试图摸索出一条适用于古道路数字化研究的实践路径。具体从 DEM 高程数据入手，借助 Sobel 算子和 KDTree 近邻检索，提取坡度、曲率、空间距离等 10 项地形因子；随后利用熵权法、KS 检验和蒙特卡洛模拟建立路线规划契合度（RPI）模型，对坡度控制、河网避让、分水岭依靠等六项古代选线原则进行统计验证。验证得到的规则被量化为可计算的代价指标，接下来用 MCP 最小成本路径算法在现代地形条件下重新生成路线方案，并评估路线总长、弯曲系数等指标。在优化路线的基础上，又增设了多类约束，使烽火台与关隘的选址能够协同考虑，进而提出遗迹保护治理的相关建议。整个建模过程把古代偏定性的选址经验转化成了定量分析模型，但也存在一些局限，比如地形被视为静态条件、人文因素考虑不充分、权重赋值方法比较单一等。从通用性上讲，该方法对古道路复原、山地工程选线以及文化遗产保护中的路径优化问题，能够提供方法层面的参考。

关 键 词： 秦直道；地形约束；选线特征；最小成本路径；路径优化

Research on Layout Rules and Optimal Path Reconstruction of the Qin-Zhidao under Geomorphological Pattern Constraints

Huang Wenle[1], Liu Zeyi[1], Ma Yilin[1], Shao Han[2], Yang Yongxia[1*]
1.School of Economics, Guangdong Peizheng College, Guangzhou, Guangdong 510830
2.School of Management, Guangdong Peizheng College, Guangzhou, Guangdong 510830

Abstract: Taking the Qin–Zhidao in the Ziwuling area covering eight counties of Shaanxi–Gansu as an empirical case, this paper carries out research on ancient–road route–selection under topographic constraints following the complete modeling workflow of "terrain–feature extraction, validation of route–selection rules, optimal path reconstruction and defensive–facility layout". Integrating geographic–information analysis and mathematical–modeling methods, a multi–module coupled technical system is constructed and multi–dimensional tests are implemented to form a digital–research paradigm for ancient roads. Based on DEM elevation data, ten–dimensional terrain factors such as slope, curvature and spatial distance are quantitatively extracted with the Sobel operator and KD–Tree nearest–neighbor retrieval. Combined with the entropy–weight method, KS test and Monte–Carlo simulation, the Route–Planning–Index (RPI) model is established to statistically verify six ancient route–selection principles including slope control and river–network avoidance. The validated rules are transformed into computable cost indicators, and the Minimum–Cost–Path (MCP) algorithm is adopted to reconstruct paths under modern–terrain conditions. Schemes are further evaluated via total route length and sinuosity index. On the basis of optimized routes, multiple constraints are set to realize collaborative siting for beacon towers and mountain passes, and countermeasures for heritage conservation are proposed. The whole workflow realizes the transformation from qualitative ancient site–selection ideas to quantitative models, whereas limitations remain including static–terrain assumption, insufficient human–related constraints and single weighting method. With good generality, this approach can provide references for path–optimization problems such as ancient–road restoration, mountain–engineering alignment and cultural–heritage conservation.

Keywords: Qin–Zhidao; topographic constraint; route–selection characteristic; minimum–cost path; path optimization

作者简介：
黄文乐，广东培正学院经济学院，本科在读，研究方向为经济统计分析；
刘泽宜，广东培正学院经济学院，本科在读，研究方向为大数据管理与运用；
马伊琳，广东培正学院经济学院，本科在读，研究方向为大数据管理与运用；
邵涵，广东培正学院管理学院，本科在读，研究方向为市场营销分析。
通讯作者：杨永霞，广东培正学院，硕士，助教，研究方向为应用统计分析，邮箱：1440646145@qq.com。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

引言

古代陆路交通遗迹在历史地理研究中一直占有重要位置，陕甘交界子午岭区域的秦直道，恰好为理解山地环境下大型古代工程的选址逻辑提供了一个难得的样本。由于长期遭受风力侵蚀、流水冲刷等外力作用，古道不少段落已经损毁甚至完全湮灭，保存状况差异很大。以往对秦直道的研究主要依赖考古调查和文献梳理，得到了沿山脊布线、避让河谷等一些定性认识[1]；近年来 GIS 和 DEM 技术的引入虽然推动了地形量化分析[2]，但多数成果仍停留在描述性统计层面，缺少能够复现的建模流程，也很少把选线规则验证、路径模拟和防御设施布局放在同一个框架中考虑，传统方法因此难以支撑选址规律的定量解读。基于这些情况，本文以陕甘八县子午岭段的秦直道为研究对象，大致沿着地形特征提取、选线规律验证、最优路径重构到防御设施布局的线索展开。具体做法是对沿线多类地形因子进行量化提取，用统计方法检验六项主要选线原则，并将验证后的规则用于现代地形条件下的最优路线重构，同时兼顾烽火台与关隘的协同选址。研究希望构建一套地形约束下路径优化的定量方法，为秦直道数字化保护以及同类山地线路规划提供理论依据和实践参考。

一、研究数据与研究方法

陕甘八县子午岭片区留存大量秦直道遗存，是探究地貌格局对古道布线约束的理想研究区[3]。为实现古道路数字化路径重构，本研究整合 DEM 高程栅格、秦直道历史矢量路线、分水岭、河网水系、烽火台与关隘遗迹多源空间数据，完成数据清洗、坐标系统一等预处理工作。综合运用 Sobel 地形梯度计算、KDTree 空间近邻检索、熵权赋权、统计显著性检验、蒙特卡洛模拟、最小成本路径算法，依次完成地形量化解析、选线原则校验、最优路径生成、防御设施选址整套研究流程。

（一）符号说明

符号	意义
Z_p	采样点的高程值
S	局部坡度
K_p	剖面曲率
K_{p1}	平面曲率
SI	路线顺直性指数
C	综合地形代价函数值
W_i	第 i 个地形因子的权重系数
L_{hist}	历史秦直道路线总长度
L_{opt}	优化后秦直道路线总长度

二、秦直道沿线地形特征量化分析

古代道路走向并非完全人为主观决定，很大程度上会被区域地形条件所限制。为客观揭示秦直道对周边地貌环境的适应模式，不能仅依靠肉眼观察图纸或者野外记录，需要借助栅格地形模型开展定量化测算。

本文基于经过预处理的 DEM 数据集构建地形特征参数模型[4]，定量测算坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、地形起伏度、地表粗糙度以及各类空间距离指标。依托矢量 – 栅格坐标映射方法以及 KD-Tree 近邻检索算法，完成全线采样点位与关键遗迹点位的地形信息批量提取，结合统计表格、空间可视化图表解析沿线地貌空间格局，为后面挖掘、验证秦直道选线内在规律提供标准化的数据集支撑。

（一）地形特征参数模型的建立与原理

1.DEM 数据预处理

对研究区 DEM 栅格开展无效像元识别与剔除，过滤掉研究区边界外以及数据缺损的栅格单元，只保留研究范围内有效的高程数据，保障后续各项地形参数计算结果不会被异常值干扰。本研究采用 Sobel 邻域差分算子求解地表高程梯度，在此基础上进一步换算得到坡度、坡向；通过高程二阶偏导数计算剖面曲率与平面曲率，分别刻画坡面纵向起伏形态和地表横向汇散特征；借助 3×3 滑动窗口统计窗口内部高程极差得到地形起伏度，并基于坡度完成地表粗糙度换算[5]。

在得到全部栅格地形图层之后，利用 KD-Tree 近邻检索算法快速计算每一个路线采样点到分水岭、河网水系的欧氏距离，将地形参数与距离参数组合，最终组装得到包含 10 个维度的地形特征向量，实现对古道全线地形环境的数字化刻画。

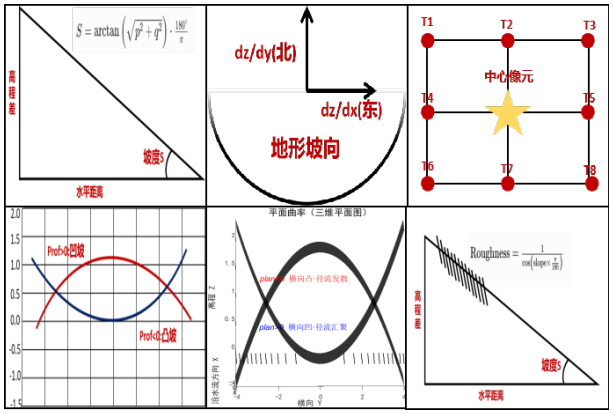


图 1：DEM 地形因子计算原理示意图

2. 核心地形指标计算公式

坡度反映地表单元倾斜程度，是古代山地道路选址时首要考量的地形指标，坡度过大会大幅提升施工难度，同时不利于部队行军与物资车马通行。

$$S = \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \qquad (1)$$

地形起伏度表征局部窗口内部地势高差[5]，能够直观反映区域

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

地表破碎程度，起伏度越高代表地表沟壑越多，道路修建通行条件越差。

$$relief = \underset{3\times3}{max}(Z) - \underset{3\times3}{min}(Z) \quad (2)$$

（二）模型结果分析与可视化表达

完成 DEM 数据预处理与地形参数提取后，本研究结合历史文献、已有考古研究成果，借助可视化软件开展地貌特征挖掘。像《史记·秦始皇本纪》就提到秦直道修建时追求线形顺直、坡度可控，史念海先生在《秦直道遗迹的探索》中也注意到了这条古道常依托分水岭、同时避开河网沟谷的布线习惯；陕西考古研究院对遗址的调查则进一步说明，选线并不只看地形本身，高程是否平顺、遗迹之间能否协同布局，同样是实际需要面对的约束。这些来自不同角度的认识，为后续选线规则的提取和验证提供了基础。

在文献史料的基础上，借助 DEM 输出的多组可视化成果开展地形特征观察，图件包含研究区秦直道历史路线分布图、河网水系分布图、秦直道高程纵断面曲线、研究区坡度空间栅格图。一方面通过高程纵断面、坡度沿程变化曲线，解析整条古道行进过程中的高程起伏与坡度波动；另一方面通过全域空间栅格图，直观呈现古道与山地、水系、陡坡等地貌单元的空间位置关系。

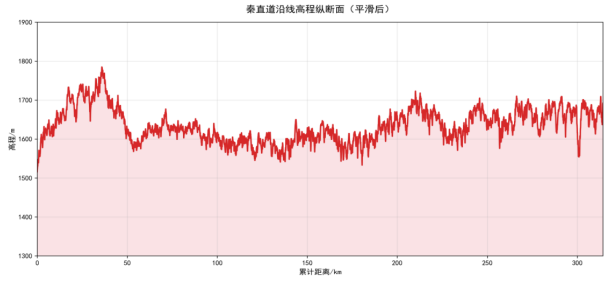


图2：秦直道高程纵断面

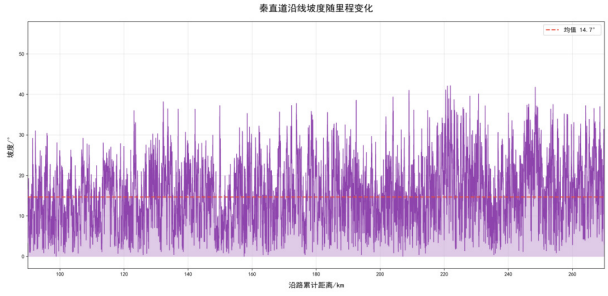


图3：秦直道坡度沿程变化图

结合剖面图表可以观察到，秦直道主线高程整体波动幅度有限，大部分通行路段坡度条件良好，仅穿越沟谷的局部区段出现短距离陡坡。

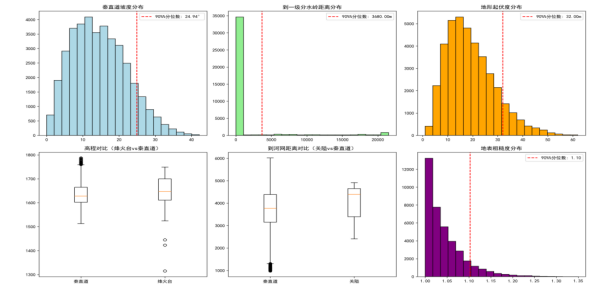


图4：全特征可视化

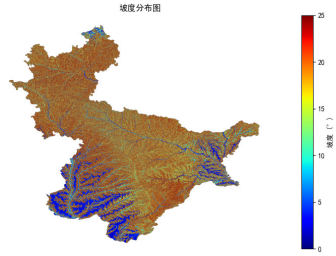


图5：坡度分布图

从全域空间格局来看，秦直道主线整体偏向山脊分水岭地带布设，主动避开大面积陡坡与河网洼地。综合文献记载与 DEM 可视化呈现的地貌现象，初步归纳出坡度控制、河网规避、分水岭依托、高程集中平顺、线形顺直、遗迹协同布局六大候选选线约束原则。

为进一步具象化地展示古道、烽火台、关隘等点位的地形条件，提高相关数据进行分析，以下是部分数据：

表1：10点地形特征采样结果（部分示例）

序号	类型	高程 (m)	坡度 (°)	到河网距离 (m)
1	秦直道	1617	29.01	4230.57
2	秦直道	1679	12.47	2153.89
3	秦直道	1593	35.02	3022.82
4	秦直道	1553	38.2	4277.97
5	秦直道	1571	11.26	4113.01
6	秦直道	1754	5.58	4376.69
7	烽火台	1702	3.59	3469.94
8	烽火台	1629	2.5	4486.1
9	关隘	1742	11.45	2404.4
10	关隘	1656	11.57	4912.9

采样统计结果进一步印证可视化图件反映出的地貌特征，上述六大候选选线约束将进入下一环节，开展各约束变量有效性的定量检验，为后续路径规划模型构建提供评价依据。

三、秦直道选线原则挖掘与定量验证

过去对秦直道选线规律的认识，更多是依靠考古调查和历史文献里那些定性的说法，缺乏统计学层面的量化检验，难以区分其选线特征是古人主动规划的结果，还是地形随机分布带来的偶然结果。

基于前文构建的全线多维地形数据集，再结合已有的考古研究成果，大致归纳出秦直道的六条选线准则。通过单因子统计建模，并对多个指标进行标准化处理，消除不同量纲的影响，在这个基础上构建路线规划契合度（RPI）综合评价模型，然后用 KS 检验和蒙特卡洛模拟来做统计验证，目的是把人为选址偏好和自然地形随机效应区分开来，进而还原这条古代军事通道背后完整的选址决策逻辑。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

（一）路线规划原则与理论建模

1. 坡度控制原则（P1）：沿线坡度维持适中水平，主动避开长距离大陡坡，保障军队行军、车马物资转运的通行条件，同时降低开山修筑道路的工程成本。

2. 河网规避原则（P2）：路线主体与水系河道保持足够安全距离，减少汛期洪水冲刷、河道泛滥损毁路基的风险，降低跨河修建桥梁的工程投入。

3. 分水岭依托原则（P3）：线路尽量沿着山脊分水岭走向进行布设，山脊高地既能够获得开阔瞭望视野，又拥有相对稳定的路基条件。

4. 高程集中与平顺原则（P4）：路线高程不宜发生频繁剧烈升降，尽量减少大填大挖，降低工程开挖填筑的人力物力消耗。

5. 线形顺直与走向原则（P5）：线路整体以南北向作为主干走向，减少不必要的迂回绕行，契合秦直道作为快速军事通道的功能定位。

6. 遗迹协同布局原则（P6）：烽火台、关隘这类防御设施要和主线道路在空间上相互匹配，共同完成防御、预警、通讯整套军事功能。

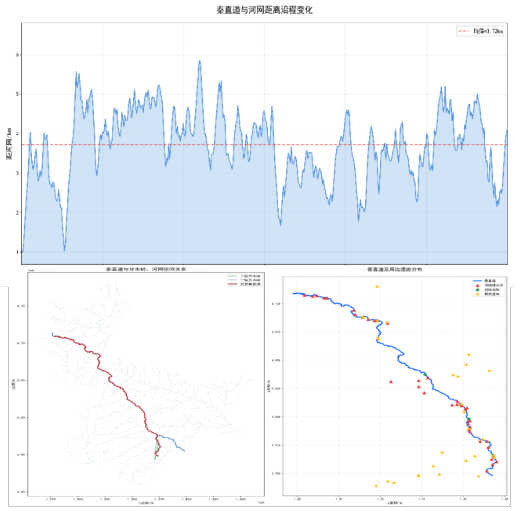


图6：秦直道沿程与河网距离变化及空间分布

各个原始评价指标量纲、数值区间各不相同，因此需要经过极差标准化消除量纲带来的干扰，之后采用熵权法客观确定各项选线原则的权重，得到路线规划契合度 RPI 综合评价公式。RPI 指数越高，代表该栅格单元越符合秦直道古代选线综合要求。

$$RPI_i = \sum_{j=1}^{6} w_j \cdot f'_{ij} \tag{3}$$

式中：w_j 为熵权法计算得到的第 j 项选线原则权重；f'_{ij} 为经过标准化处理之后的评价指标。

（二）模型算法流程与求解实现

完整计算流程分为四个步骤：第一步完成多源空间数据导入以及全部评价指标的标准化处理；第二步针对六大选线原则逐项开展定量测算；第三步依托熵权法求取各项指标权重，计算得到每一个栅格单元的 RPI 指数；第四步开展权重阈值扰动的敏感性测试，评判模型输出结果的稳定程度，同时根据 RPI 数值高低划分地形道路适配等级。

（三）模型结果与图表对应分析

经过模型测算可以得到一系列统计特征：秦直道沿线平均坡度14.66°，长距离陡坡片段占比很低；路线距离河网平均3.72km，基本不存在紧贴河道延伸的路段；到一级分水岭平均距离1470.60m；高程主要集中分布于1513–1787m 区间；线路整体呈南北走向，迂回程度有限；烽火台、关隘大多选址在地势高地，与主线道路空间匹配度较高。上述多项统计结果从定量层面证实六大选线原则客观存在，并非单纯来自文献主观推断。

四、基于综合代价栅格与 MCP 算法的路径重构

历史遗存秦直道受千年地貌变迁、人为损毁、遗迹断续等因素影响，现存线路存在局部迂回、断点缺失等问题，无法完全还原古代最优规划线路。本章将前文验证的六大选线原则转化为量化代价指标，构建综合地形代价模型，采用 MCP 最小成本路径算法实现现代地形条件下的最优路径重构 [6]，还原古人理想选线方案。

（一）构建模型思路

以秦直道军事通行、低耗建设、稳定存续的核心需求为导向，将坡度、水系、山脊、高程、地形平顺、遗迹适配六大约束转化为分级代价栅格，通过加权融合构建全域综合代价图层，搜寻累计代价最低的最优通行路径。

（二）综合地形代价栅格构建

综合地形代价由六项单因子代价加权构成，公式如下：

$$C_{total} = w_1 C_{slope} + w_2 C_{river} + w_3 C_{ridge} + w_4 C_{site} + w_5 C_{elev} + w_6 C_{terrain} \tag{4}$$

代入熵权计算所得权重：

$$C_{total} = 0.12 C_{slope} + 0.10 C_{river} + 0.30 C_{ridge} + 0.10 C_{site} + 0.16 C_{elev} + 0.22 C_{terrain} \tag{5}$$

由权重结果可知，山脊依托因子权重最高，是秦直道选线的核心控制条件，其次为地形平顺与高程约束，符合古代山地通道的建设逻辑。

（三）最小成本路径规划模型

以全域累计地形代价最小为目标 [7,8]，求解最优路径：

$$P^* = \arg\min_{P} \sum_{(i,j)\in P} C_{total}(i,j) \tag{6}$$

（四）路线评价指标

采用路线总长与弯曲系数两大指标量化评价线路优劣。路线总长公式：

$$L = \sum_{k=1}^{M-1} \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \tag{7}$$

弯曲系数用于表征线路顺直程度，数值越接近 1 线路越优：

$$SI = \frac{L}{\sqrt{(x_M - x_1)^2 + (y_M - y_1)^2}} \tag{8}$$

（五）新旧路线对比

重构路线与历史路线对比结果，重构线路总长更短、弯曲系

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

数更低，整体更加顺直高效，更契合古代军事快速通行需求。

表2：历史线路与新规划线路数据对比图

路线	总长度 /km	弯曲系数	点数
历史路线	301.07	1.6758	1800
新规划路线	251.08	1.339	2715

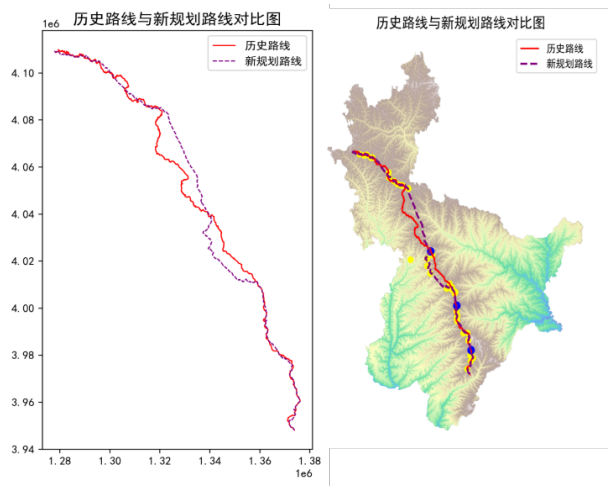


图7：秦直道历史路线与新规划路线空间对比

五、烽火台 – 关隘防御设施协同选址研究

秦直道并非单一交通线路，而是集通行、预警、防御于一体的复合型军事体系，烽火台与关隘的空间布局直接决定整体防御效能。本文依托重构最优路线，结合地形约束与古代军事布设经验，开展防御设施协同选址。

（一）选址约束条件

参考考古发现和同类古驿道的布设经验，约束条件并不是简单地按统一标准来设。烽火台和关隘的选址都限定在主线两侧300米以内，这样与主干道的联动才有保障。高程方面，百分位不低于70%，意味着要优先挑高地，瞭望需求才能满足。地面坡度控制在20° 以下，这主要是考虑到当时的修筑技术条件。至于间距，烽火台之间不小于5000米，关隘之间则不小于15000米，目的是让全线都能覆盖到，避免出现预警盲区。

（二）模型结果与分析

模型最终输出3处关隘、22座烽火台，点位整体位于山脊高地、地形平缓、通视条件优异，平均布设间距合理，通视检验覆盖率100%，能够完整实现古代分段预警、层层防御的军事功能。图6为重构路线与防御设施整体成果对比图，完整展示本研究最终优化成果。

六、模型有效性检验

为确保模型结果科学可信，本文从地形差异性、权重稳健性、路径显著性、设施布局合理性四个维度开展统计检验，排除算法随机误差与主观偏差。

（一）地形特征参数显著性检验

采用独立样本 t 检验对比古道点位与全域随机地形样本[9]，公式如下：

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (9)$$

在0.05显著性水平下，坡度、高程、水系距离、山脊距离均显著拒绝原假设，证明秦直道选址存在明确地形偏好，并非随机分布。

（二）选线原则权重稳健性检验

对六大指标权重进行 ±10% 扰动测试，RPI 指数波动小于5%，无结果反转现象，模型稳健性良好；单因素方差分析显示各原则权重差异显著，赋权结果科学合理。

（三）重构路径蒙特卡洛模拟检验

通过随机路径对照模拟，重构路径 Z 统计量大于3，显著优于随机线路，证明路径重构结果具备统计可信度。

（四）防御设施布局统计检验

设施点位与随机点位对比检验结果显著，说明烽火台、关隘选址严格受高地、平缓地形约束，符合古代军事选址逻辑。

综合多维度检验可知，本文模型体系稳定可靠，选线规律、重构路径、设施布局结果均具备科学依据。

七、结果讨论

（一）主要研究发现

本文实现了秦直道传统定性选线思想的定量化、模型化表达，成功揭示古道六大核心选线规律，完成最优路径重构与防御设施协同选址，构建了一套可迁移、可复现的古道路数字化研究范式。

（二）研究存在局限

研究采用现代 DEM 数据推演，未充分考虑千年地貌变迁；仅采用熵权单一赋权方式，缺少主观经验修正；模型侧重地形约束，尚未充分纳入人文、军事、工程技术等多维因素[10]。

（三）后续研究展望

后续可结合古地貌数据还原秦代地形环境，采用主客观组合赋权，引入人文与工程约束，构建多维度综合选线模型，进一步完善古道路复原研究体系。

八、结论

本文以陕甘子午岭段秦直道为研究对象，基于 DEM 地形数据与考古遗迹资料，同时也参考了文献记载和地理建模方法，系统

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

开展了地形量化分析、选线原则验证、最优路径重构及防御设施布局等工作。研究发现秦直道沿线确实存在六条比较稳定的选线约束规律，并据此构建 $C_{total} = w_1C_{slope} + w_2C_{river} + w_3C_{ridge} + w_4C_{site} + w_5C_{elev} + w_6C_{terrain}$ 的最优路径方案。重构出来的路线跟历史遗存线路比起来，显得更顺直、更高效，和地形条件的匹配也比较好。防御设施的布局结果，也能较好地满足古代军事预警与防御方面的需求。这样一来，传统上偏定性的历史认知就被转成了可量化的模型成果，对秦直道遗产保护、古道路复原以及山地路径优化来说，都有一定的参考价值。

参考文献

[1] 史念海 . 秦始皇直道遗迹的探索 [J]. 文物 ,1975 (10):2837.

[2] 张健 , 王浩 . 基于 DEM 的秦直道沿线地形量化与空间分布分析 [J]. 地理科学进展 ,2022,41 (7):11451156.

[3] 孙洁 , 李婧 . 秦直道子午岭段地理环境与选线特征研究 [J]. 干旱区地理 ,2023,46 (5):891899.

[4]Wood J.The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models[J]. Geomorphology,1996,16 (1):1935.

[5] 王玲 , 吕新 . 基于 DEM 的新疆地势起伏度分析 [J]. 测绘科学 ,2009,34 (1):113116. [6] 刘学锋 , 孟令奎 . 基于栅格数据最优路径的公路选线分析 [J]. 地理空间信息 ,2011,9 (3):4547.

[7] 鲁敏 , 张金芳 . 栅格地形的最优路径分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版),2010,35 (1):5963.

[8]Fisher T. LeastCost Path Modelling for Archaeological Landscape Reconstruction [J]. Journal of Archaeological Science,2011,38 (6):12561265.

[9] 姜启源 , 谢金星 . 数学模型 (第 5 版)[M]. 北京：高等教育出版社 ,2018.

[10] 王金铜 , 佳鑫 . 基于改进 A * 算法的施工道路智能选线方法研究 [J]. 土木建筑工程信息技术 ,2025,17 (3):4551.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License