科学通报 2025 年 第 70 卷 第 36 期: 6204 ~ 6218
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

古代人群迁徙路径定量模拟研究进展和展望

王琳[1], 彭培洺[2,3*], 刘祥宇[1], 陈发虎[2,3,4]

1. 华侨大学建筑学院, 厦门 361021
2. 中国科学院青藏高原研究所古生态与人类适应团队, 北京 100101
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000
* 联系人, E-mail: pengpm23@itpcas.ac.cn

2025-02-10 收稿, 2025-03-31 修回, 2025-07-17 接受, 2025-08-06 网络版发表
福建省科学技术厅引导性项目(2021H0018)资助

摘要 古代人群迁徙路径作为古代文化传播与交流的关键脉络, 深刻影响了人类文明的多元化发展进程. 传统迁徙路径的调查方式存在效率低下、获取信息碎片化等问题, 难以系统勾勒古代交通体系全貌. 鉴于此, 学者们着手采用以LCP(最小成本路径)模型为代表的各类空间分析方法, 对古人迁徙路径展开定量模拟、还原以及预测, 为深入剖析路径布局特征与古人迁徙规律提供了定量化空间视角. 本文系统回顾了古人迁徙路径的定量模拟研究, 详细阐述了交通节点选取、成本表面构建、路径及路网生成算法等关键环节, 讨论了各类定量模拟方法的适用性和局限性. 进而提出, 后续定量模拟工作可借助丰富的已知案例进行验证与优化, 围绕提升路径发现机率与揭示路径分布机制两大目标推进, 探索不同地理环境下建模方法的适用性, 为理解古代人群迁徙路径的时空演化、古人空间探索行为以及文明间的交流互动模式提供有力支撑.

关键词 路径定量模拟, 古人迁徙扩散, LCP(最小成本路径), 空间考古学

迁徙路径是指生物(包括人类和动物)个体在时空维度对环境的响应状态, 具体是指从一个地点到另一个地点的运动轨迹[1]. 古代人群迁徙路径记录了古人在不同时期从原聚居地出发, 在地理空间上的移动轨迹. 古代人群迁徙路径和空间分布特征, 作为考古学、地理学、人类学和生态学等多学科研究的关键交集范畴, 深刻揭示了古人在推进区域文明多元演进中所发挥的关键效能[2~8], 对深入理解地域社会结构互动机制[9]、经济贸易流通格局[10], 以及古代先民针对特定地理环境所展开的空间探索行为[11~14]等具有极为重要的学术价值. 在人类迁徙活动以及社会发展进程的驱动下, 路径逐步塑造出可供人或车马通行的实体通道, 即道路(road). 古代道路(ancient road)本质上可视为路径在特定历史时期与地理环境相结合, 衍生出的一种具象化表征形式.

国内外学者对于古代人群迁徙路径的研究, 最早可追溯到20世纪60年代欧洲地区对“文化线路”理念的探索[15]. 1960年, 欧洲委员会召集专家提出“文化旅程(cultural journey)”措施, 用于提高欧洲人对最重要文化遗址及其相结合休闲文化的集体意识, 这一措施被视为“文化线路”的发端[16]. 1987年, 欧洲委员会正式发起“文化线路计划”, 并认定西班牙圣地亚哥–德孔波斯特拉线路(Routes of Santiago de Compostela)为欧洲第一条文化线路[17]. 1998年, 国际古迹遗址理事会专门成立文化线路科技委员会, 开始对文化线路进行深入研究[18]. 文化线路反映了跨越不同地区, 联系不同文化社会的交互式动态过程, 是文化交流与传播的重要途径[19]. 古人迁徙路径作为文化线路的一种基本形式, 通

引用格式: 王琳, 彭培洺, 刘祥宇, 等. 古代人群迁徙路径定量模拟研究进展和展望. 科学通报, 2025, 70: 6204–6218
Wang L, Peng P, Liu X, et al. Progress and prospects of quantitative simulation research on ancient human migration paths (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 6204–6218, doi: 10.1360/TB-2025-0148

© 2025《中国科学》杂志社

过串联沿途各类点状文化遗产单元，构成连接不同区域的物理通道. 古人迁徙路径不仅是现实意义上的连接, 更是文化传承和交流的重要载体. 随着史料搜集和考古调查工作的推进，各类点状遗存信息不断积累完善，学者们的研究视野开始转向古人迁徙路径的模拟和复原.

从方法论的角度来说，古人迁徙路径模拟复原工作可分为四类(图1): 第一类工作是基于各类史料、典籍来判断交通节点，并将其定性连线[20~22]. 这类通过传统交通史学工作确定的古人迁徙路径精度较低，一般用于定性绘图和观察路径的大致走向. 第二类研究借助了高分辨率遥感卫星影像, 识别历史古道[23]. 近年来火热的人工智能(AI)技术, 也被用来判断图像中的路径特征, 进而模拟古人迁徙路径走向[24~26]. 但这类工作仅适用于迁徙路径遗存丰富且特征显著的区域. 在第三类研究中，学者基于高分辨率古DNA和古基因组数据，定量解析史前人群扩散的迁徙波次与基因融合过程，为理解史前人群扩散机制提供新视角[27~29]. 然而, 上述各类方法高度依赖于特定区域考古遗存的保存完整度和空间分布特征的可辨识度，在古人大跨度扩散行为研究中，仅能推断宏观(或局地)人群迁徙趋势，难以恢复其线性路网时空分布全貌. 因此, 使用空间分析方法定量模拟成为古人迁徙路径复原的第四类重要手段.

空间分析方法是指基于最优(或最小)移动成本原则, 将环境要素量化为人类出行所需成本, 并使用各类模型、算法来定量模拟路径、廊道或路网[30]. 这类方法能合理模拟、还原甚至预测古代人群迁徙路径，并与已有的考古和史学资料互相印证. 其中, 最小成本分析(least-cost analysis, LCA)模型研究基础最为扎实, 应用最为广泛[31]. 学者们常用LCA方法来模拟特定自然及社会环境下的古人迁徙行为. 国外学者已使用空间分析方法开展过诸多古人迁徙路径模拟工作. 专注于考古学中的计算机应用与定量方法大会(Computer Ap-

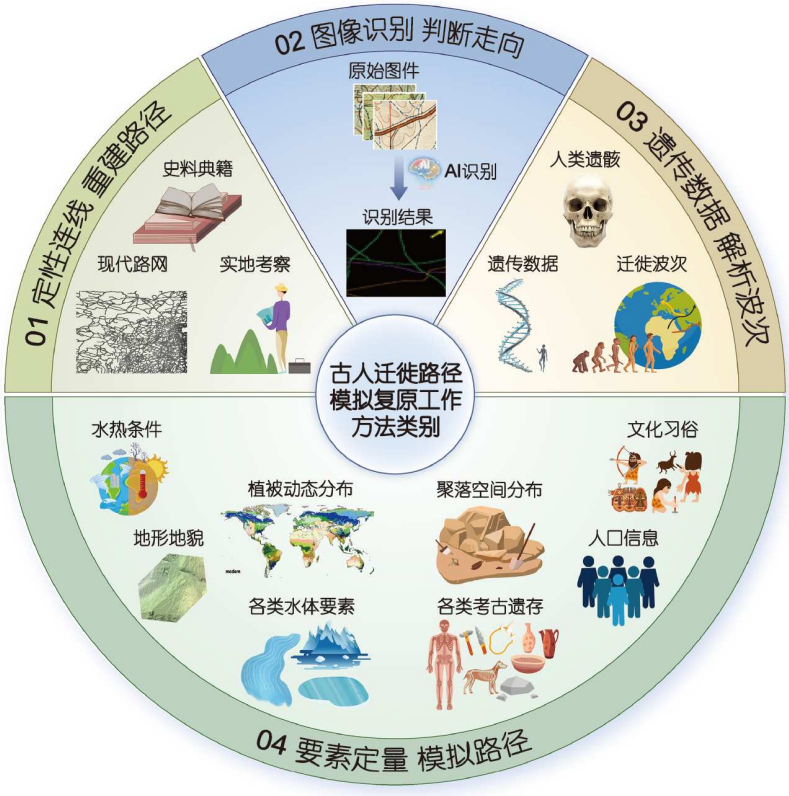


图 1 (网络版彩色)古人迁徙路径模拟复原工作方法类别(现代路网数据依据Natural Earth Data(https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/roads), 原始图件和识别结果依据Avci等人[26], 植被要素依据Kaplan等人[32])

Figure 1 (Color online) Classes of methods for simulating the recovery of ancient migration paths (Modern road network data are based on Natural Earth Data(https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/roads), source materials and identification results are based on Avci et al.[26], vegetation elements are based on Kaplan et al.[32])

plications & Quantitative Methods in Archaeology, CAA)于1973年首次在英国伯明翰大学召开并一直延续至今. 期间积累了大量与古代交通定量模拟相关的成果. 中国拥有可供追溯的3600年信史和大量考古资料, 但古人迁徙路径的科学重建和定量模拟却缺少深入研究. 鉴于此, 系统综述国内外已有古代交通路线定量模拟(或数字化复原)研究, 指出其中问题显得尤其必要. 本文聚焦基于成本表面的迁徙路径定量模拟工作, 按照路径定量模拟的实施流程, 重点对交通节点的选取、成本表面的构建、路径(廊道)结果的生成以及从路径到路网的拓展等四个方面进行综述(图2), 提出技术与方法层面存在的问题, 并展望未来研究方向, 以期能够为相关领域的研究人员提供有益参考, 推动古人迁徙路径定量模拟研究的持续进步与深入发展.

1 交通节点的选取

交通节点是古人迁徙路径模拟首要采用的基础信息. 一般来说, 古人迁徙路径的起点和终点反映了人类迁徙的动机和目的, 是确定古人迁徙路径走向的重要依据. 古人的行进过程会受视觉感官影响, 远处的景象会影响行进方向, 进而改变运动轨迹[33]. 考虑到这一运动规律, 古人迁徙路径的途经点也可作为判断道路具体走向的重要标志, 与古人迁徙路径起点和终点一并构成迁徙路径模拟的重要原始信息. 途经点在路径模拟中主要对道路走向起到纠正和把控作用. Güimil-Fariña和Parcero-Oubiña[34]借助最小成本路径模型, 分别通过起、终点和后加入的途经点进行古人迁徙路径模拟, 结果显示途经点的加入极大程度改善了路径模拟轨迹, 与历史记载更加吻合. Bell等人[35]定量模拟了意大利河谷遗址的迁徙路径, 并对河谷定居模式分析后发现, 定居区内的山顶防御中心经常被作为重要的道路途经点融入周边的古人迁徙路径网络. Efkleidou[36]的研究探讨了青铜时代晚期希腊墓葬位置选择与道路空间位置的关联性, 诠释了殡葬活动对古人迁徙路径布局的影响. 这些研究说明迁徙路径途经点不仅可以对路径模拟结果进行空间修正, 还能揭示迁徙路径周边的社会

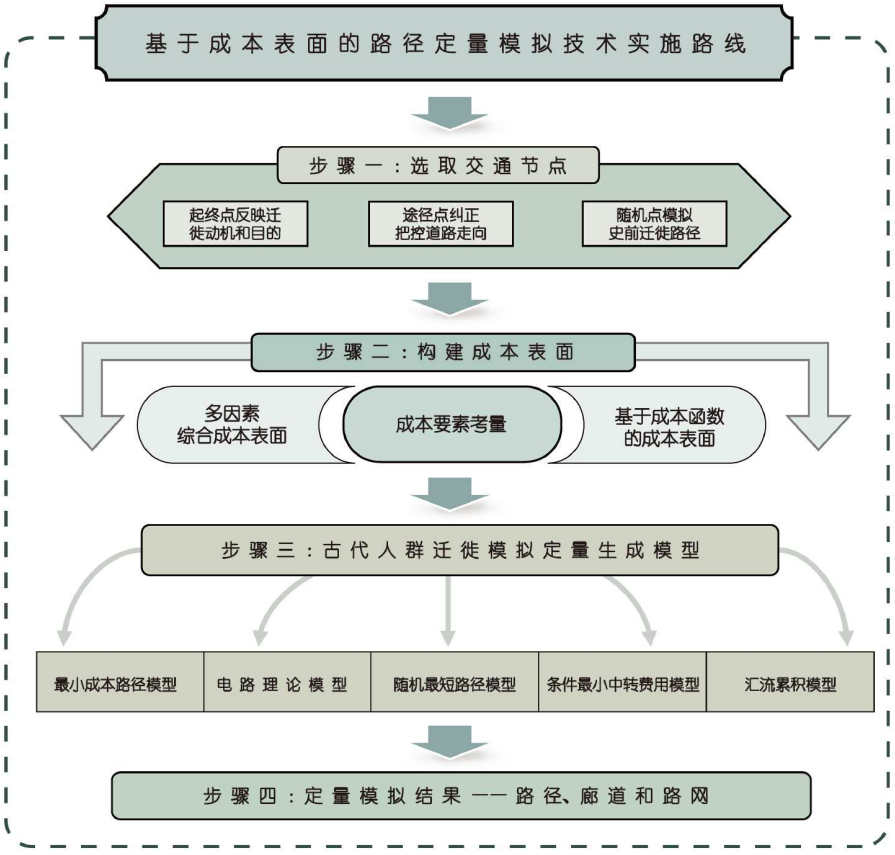


图 2 (网络版彩色)基于成本表面的路径定量模拟技术实施路线
Figure 2 (Color online) Route of implementation of quantitative simulation techniques for paths based on cost surfaces

背景和文化价值，为古代聚落与周边环境的互动提供了更深刻的空间诠释.

在缺乏史料记载的史前时期，考古遗址数量稀少，难以提供足够的途经点信息. 有学者基于特定生计活动的迁徙特性，将研究区内随机点作为路径的起终点模拟古人迁徙路网，并使用考古遗址点来验证路网的合理性[10,37]. 历史时期的古人迁徙路径遗迹(如店铺、路碑、古桥等)类型丰富，且更容易被发现和记录. 这些可作为迁徙路径交通节点的考古遗迹，不仅反映了当时的历史文化信息，也暗含着古人迁徙的空间秩序. 然而, 随着历史变迁, 大多数古人迁徙遗迹在现实中已不复存在, 只通过文字形式记录于志书古籍中. 如何通过地名解译、实地调研、地图校对等途径，精准提取志书古籍中提及的各类交通节点坐标，是历史时期古代人群迁徙路径定量模拟研究至关重要的基础性工作.

2 成本表面的构建

除了决定古人迁徙路径走向的各类交通文化遗迹外，古人迁徙路径分布还受到周边生态、地理环境(包括地形、气候、水文、植被及聚落分布等)的影响. 将这些环境因素量化处理，形成反映行进阻力的成本表面，从而定量模拟古代交通格局. 在地理信息系统(GIS)中, 成本表面(cost surface)是一个栅格图层, 每个像元(cell)包含一个值，该值表示从起点到该像元的移动成本[38]. 而对于古人迁徙路径定量模拟方法来说, 如何构建尽可能反映古人真实行走阻力的成本表面，是后续迁徙路径模拟工作的重点. 前人主要通过两种方式构建成本表面：多因素综合加权方法和成本函数方法.

2.1 多因素综合加权方法

多因素综合加权方法是指通过赋予多种成本要素(如坡度、水文、气候以及到聚落中心的距离等)不同权重，并对各成本要素数值进行相加、相除或相乘等数理运算得到成本表面栅格，可反映自然和社会要素对古人迁徙路径分布的贡献程度. Verhagen等人[39]最早在1995年提出了一个多尺度研究框架，将气候、地质、土壤、植被、历史文献和考古资料等成本要素按照权重相加, 形成综合成本表面. Howey[40]曾使用植被覆盖度、水文和坡度等要素加权相加构建综合成本表面, 模拟美国密歇根州史前农业传播路线, 并论证了多标准成本面分析在路径模拟中的作用. Lancuo等人[41]选取坡度、水文、海拔、地形起伏度、积温等作为地理环境因子，植被生产力、人口密度作为社会经济因子, 并赋予这些成本要素不同的权重, 叠加形成综合成本面, 以进一步模拟生成青藏高原唐蕃古道. 侯光良等人[42]利用海拔、坡度、河流、起伏度和植被等因子对人类活动的影响赋值，借助AHP层次分析法确定各因子权重, 相加计算得到各个节点间的最低成本路径, 最终构建青藏高原史前交流路线.

此外，学者们还采用其他方式进行综合成本表面的构建. Van Leusen[43]将土壤可用性、地形坡度、地形起伏程度和到永久溪流的距离作为地形特征成本. 通过地形特征成本除以遗址权重成本，得到累积成本面. 该方法在考虑遗址的相对重要性的基础上, 能够反映穿越不同地形到达各个遗址的成本. Zakšek等人[44]将坡度和能见度成本相乘构建反映地形与视野要素的综合成本表面. Gowen和De Smet[45]通过相乘加权的方式得到成本表面, 进而计算旅行时间成本. 这种方法能够在考虑多个要素的同时，更准确地捕捉它们之间的相互作用，从而更精准地模拟古人迁徙路径. 事实上, 无论采取哪种方式创建综合加权成本表面，均取决于研究对象特征和路径模拟目的，需要在具体情境中斟酌验证. 多因素综合加权方法的优势在于能够全面考量各类成本要素, 但如何赋予成本要素合适的权重, 尚未形成统一标准. 不同的地理环境和社会背景下, 各类成本要素对古人迁徙路径的影响程度也不尽相同[46]. 实际工作中, 应结合具体情境引入差异化权重, 才能更有效地反映不同环境因素对迁徙路径形态的影响，使模拟结果更为真实可靠.

2.2 基于成本函数的成本表面

多因素综合加权方法虽能涵盖各类成本要素，但其权重的选择仍具有较大不确定性. 因此, 学者们考虑通过数学函数关系，将各类成本要素转换为反映真实情况的能量或时间消耗成本[47,48]. 人类的迁徙活动受限于个体能量储备, 随着徒步距离的增加, 能量消耗也会增加. 因此, 能量成本函数通常被认为是构建成本表面的首选方法. Pandolf等人[49]于1977年提出了基于坡度、行人重量、货物重量和地形系数的经典能量成本函数, 并一直沿用至今. 地形系数一般由地表植被决定, 不同植被类型对于个体行走产生的阻力不同，其对应的地形系数也不相同[50]. 后人则在此基础上, 分别从不同坡度[51]、不同地形[52]、不同行走方向[53]、不同行

走方式[54]等方面对能量成本函数进行优化和完善. Llobera和Sluckin[55]曾充分考虑古人在山间行走的“之字形”线路, 提出了基于坡度的四项式能量成本函数. Herzog[56]则在该四项式函数基础上作出改进, 提出六项式能量成本函数, 能有效解决四项式函数在坡度平缓地区的拟合不足问题.

而在以速度为主要衡量标准的情景中, 时间成本函数通常被赋予优先选择权来评估人群移动状况. 例如古代信息传递过程中, 传递信息速度比个体能量消耗更为重要. 这种情况下, 时间成本函数则被认为是更合适的选择. Tobler[57]曾率先提出将坡度转换为行走速度的徒步旅行函数, 是迄今为止应用最广泛的徒步旅行函数, 但其计算的上坡和下坡时间相同. 但就能量消耗而言, 上坡与下坡明显具有不同的成本数值[58]. 因此, White[31]针对Tobler函数做出改进, 将行走速度转换为时间消耗成本, 使结果更符合真实行走情况. 近年来, 时间成本函数根据不同地形条件进行了调整优化. Gowen和De Smet[45]基于Tobler徒步旅行函数, 提出了一个基于地形数据的最小成本路径(LCP)模型, 用于分析和估算在不同地形条件下的旅行时间消耗. Irmischer和Clarke[59]通过收集军人在丘陵、林地等不同地形的行走速度数据, 构建了另一套适用于不同地形环境的徒步旅行函数.

各类时间和能量成本函数的提出和改进, 为迁徙路径模拟工作提供了更具解释性的数理分析基础(表S1和S2). 然而, 不同成本函数应用于古人迁徙路径模拟的工作效果存在明显差异, 学者需要针对研究对象, 工作目的和数据可获取性等因素进行综合考量, 来确保研究结果的准确可靠性. 例如, Field等人[60]基于旅行者疲劳状态的思考, 创新性提出了一种时间成本和能量成本在单一古人迁徙路径上分段使用的模拟策略, 来区分时间和能量对行进阻力的影响, 更精准地模拟了旅行者的行进决策. Rosenswig和Martínez Tuñó[61]分别基于Tobler徒步成本函数和Anaya能量成本函数构建成本表面, 并判断两种成本函数在路径模拟中的结果差异. 除了上述内容中提及的时间和能量成本函数, 近年来, 还有学者从旅行利益最大化的角度来定量模拟景观内部情境. Shim等人[62]以“利益最大化”原则为基础, 首次提出一种新型地形成本估算方法, 克服了原有成本表面仅考虑旅行成本的局限性, 并将其应用于朝鲜王朝古道模拟. 这种方法关注到了行人利益和体验, 丰富了古人迁徙路径模拟成本函数类型和构建思路.

2.3 有关成本要素的考量

在成本表面的构建过程中, 除了前述构建方法的思考, 一些学者还对各类成本要素进行了探讨. 不同地区的人居环境和地形特征, 通常与特定的成本要素相关联. 例如, 坡度往往是山区通行成本的决定因素, 而水文条件往往是平原地区主要的限制因素. 此外, 除了地貌因素, 植被覆盖、日照强度, 甚至文化习俗、环境心理等因素均可能对古人的出行模式产生影响. 怎样选择塑造古人移动行为的成本要素是一个复杂且多维的问题. 从空间特性的角度来说, 成本要素可被分为各向同性和各向异性两类[63,64]. 各向同性成本要素对行走个体的影响取决于其位置而非方向. 植被、水体、土壤类型等都是各向同性成本要素, 其成本表面通常借助现代地表数据构建. 而各向异性成本要素同时依赖于个体运动的方向和位置. 典型的各向异性成本要素包括坡度和水流. 在同一成本表面内, 各向异性要素在不同方向表现出对行走个体不同的运动阻力, 需要借助更复杂的建模方法来反映其对个体移动的影响[65].

在各类成本要素中, 坡度是古人迁徙路径模拟(尤其是山地区域迁徙路径模拟)中最为常见的各向异性成本要素. 同一坡度位置上, 行人上、下坡的能量消耗和时间消耗都不同[66]. 基于此, Bell等人[35]首次界定了基本坡度和有效坡度的概念, 并主张只有在运动方向上的坡度才能称之为有效坡度, 在构建成本表面时应采用有效坡度. 然而, 大多数地理信息系统(GIS)软件主要实现了基本坡度的测算, 并已被应用于古人迁徙路径模拟的研究中[67]. 现阶段, ESRI公司最新版的ArcGIS Pro软件已经搭载了能够处理各向异性指标的距离累积工具, 能够解决有效坡度的计算问题. 但由于绝大部分研究者缺乏必要的专业知识来评估空间分析工具性能, 致使这些工具的使用很难达到原本设计意图[30,56]. 除了各向异性的算法差异, 坡度要素的成本量化分析还受数字高程模型(DEM)分辨率影响. 不同分辨率的DEM所构建的成本表面具备不同的栅格像元, 进而导致模拟路径结果存在差异[68~70]. Lock和Pouncett[71]基于运动过程中局部感知与全局感知的差异性, 采用不同大小的搜索窗口评估不同分辨率的DEM数据对路径分析结果的影响. 此外, 尽管高分辨率DEM能够提供更细致的地形信息, 但它们同时包含了大量现代人工建成环境, 这些特征并不适用于古人

迁徙路径模拟[72]. 因此, 研究者需要在数据分辨率高低和模拟准确程度之间寻找平衡, 确保模拟结果能够有效反映古代地形和人类活动实际状况.

3 路径(或廊道)结果的生成

古人迁徙路径定量模拟结果通常以两种形式表达呈现: 一是路径, 它揭示了最优成本路线的空间走向; 二是廊道, 它展现了古人的迁徙活动范围. 尽管二者均依据成本表面模型生成模拟结果, 但路径模拟倾向于提供单一最优路径, 廊道模拟则强调多条潜在迁徙路径. 因此, 在古人迁徙路径模拟研究中, 应根据需要选择合适的路径或廊道生成模型.

3.1 最小成本路径(LCP)模型

最小成本路径(LCP)模型具备广泛的适用性和研究基础, 是古人迁徙路径定量模拟工作的常用模型(图3(a)). 该方法利用成本表面计算两点间的最低成本路径, 能够合理量化地形因素. 地理信息系统(GIS)软件的功能改进和推广普及, 也进一步促进了LCP模型分析方法在考古学领域的应用. 以ArcGIS Pro软件中的“最佳路径为线”(optimal path as line)工具为例, 研究者首先通过计算摩擦成本表面栅格, 模拟环境因素对个体移动的阻力值, 随后利用累积成本表面和回溯链接栅格, 来确定从源点出发的成本累积模式, 并生成最小成本路径[31,43]. 受益于GIS软件的易用和普及, LCP模型产生了相较于其他分析模型更丰富的学术成果. 其中包括迁徙路径途经点科学选取研究[33,34]、评估不同环境要素生成的成本表面对路径结果的影响研究[61,73,74]、各类成本要素的量化方式研究[65,68]、为提高路径分析精确度和效率的算法改进研究[75]等内容. 这些研究均体现了LCP模型模拟和优化复杂迁徙行为的效能.

LCP模型最早应用于景观生态学中对动物迁徙路径的模拟, 近年来也广泛应用于古人迁徙路径的模拟和恢复. 在史前人群迁徙路径研究中有较多应用, 如Field和Lahr[76]借助LCP模型, 通过重点关注海岸线地形和资源分布, 并评估能量成本和生存效益, 确定了从东非到澳大利亚的现代人潜在扩散路线. 进而, Field等人[77]研究了现代人类在深海氧同位素阶段4(MIS 4)时从西亚西部出发, 向南亚扩散的最优路线. 路线模拟结果表明, 现代人类可能沿着自然走廊深入南亚内陆, 构建了当地人口分布格局. Kondo等人[78]结合生态位分析和最小成本路径分析, 估算了旧石器时代中晚期人口向欧亚大陆迁徙的最佳路线. Li等人[79]通过GIS最小成本路径分析, 研究了在冰期和间冰期条件下, 中亚和东亚之间人类扩散的可能路径, 表明人类可能通过西伯利亚阿尔泰地区、蒙古北部和外贝加尔地区进入东亚. Zhang等人[80]以地形坡度为依据, 运用LCP模拟了从水洞沟遗址、西伯利亚阿尔泰地区和蒙古北部这三个可能的地区抵达西藏尼阿底遗址的最优路线. 此外, LCP模拟方法也能够有效助力学者们古代交通路线与各类人类活动之间的相互作用关系提供了有效手段, 使古代社会的经济、贸易等图景得以更清晰地展现. Rosenswig和Martínez Tuñón[61]利用最小成本路径(LCP)分析来研究墨西哥湾海岸与索昆斯科地区之间的古代贸易路线, 强调了LCP分析在模拟古代路线和寻找遗物遗迹的有效性. Khamsiri等人[81]利用LCP模拟了东南亚吴哥王道路线, 并探讨了当地古代制造工业与LCP模拟路线的关系, 研究结果发现工业遗址也沿着LCP生成的结果路线分布, 表明这些路线不仅是交通要道, 也是资源供应和产品运输的重要通道.

近年来, LCP迁徙路径模拟研究也呈现出多样化应用趋势. Field等人[82]针对不同空间尺度采用多种能量分配算法来组合起终点, 模拟研究区古代木材运输路径, 并评估了其与历史记载的一致性. 还有学者将LCP模型应用于航海线路模拟, 研究人类海路航行运动规律[83]. 黑曜石作为古人类常用的工具原料, 其采集模式和原料交换网络, 也可通过LCP模型分析[84]. 研究者发现, 研究区居民倾向于选择较远产地的黑曜石, 这表明社会交换和产地偏好可能在采集决策中起到了重要作用.

LCP模型能在多数情况下有效模拟古人迁徙模式, 但不能够解决路径模拟中的所有问题. 首先, LCP模型假设个体能够全面预知所有景观要素, 并据此选择一条成本最低的路径. 然而, 这种全知视角在现实世界中是不切实际的. 在行走过程中, 个体与环境往往呈现局部片段性互动. 行人穿行于不同景观之间时, 经常难以准确评估成本面的潜在异质性, 去选择单一最佳路径[85]. 其次, LCP模型着重寻找两点间的最小成本路径, 未能充分考虑行人移动的随机多样性, 从而忽视了其他潜在路线[86]. 事实上, 古人在迁徙过程中会受到多种成本和非成本因素影响, 非成本因素可能导致他们选择的路径并非成本最优. 尽管前人已对LCP模型的

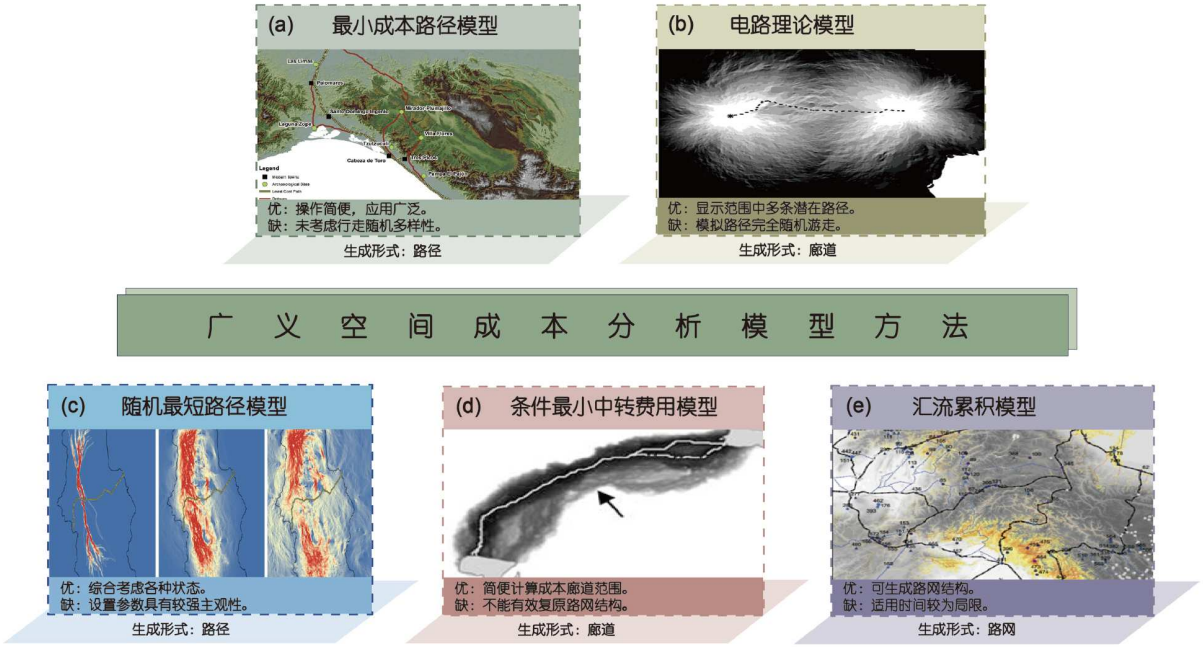


图 3 (网络版彩色)五种广义空间成本分析方法的优劣性及生成形式对比. (a) 最小成本路径模型结果样例依据Rosenswig和Martínez Tuñón[61]; (b) 电路理论模型结果样例依据Howey[85]; (c) 随机最短路径模型结果样例依据Panzacchi等人[112]; (d) 条件最小中转费用模型结果样例依据Pinto和Keitt[98]; (e) 汇流累积模型结果样例依据Frachetti等人[10]

Figure 3 (Color online) Comparison of advantages, disadvantages, and formulation approaches for five generalized spatial cost analysis methods. (a) Sample results of the Least-Cost Path model based on Rosenswig and Martínez Tuñón[61]; (b) Circuit Theory model sample results adapted from Howey[85]; (c) Randomized Shortest Path model sample results following Panzacchi et al.[112]; (d) Conditional Minimum Transit Cost model sample results from Pinto and Keitt[98]; (e) Flow Accumulation model sample results according to Frachetti et al.[10]

局限性进行了改进, 但并未从根本上解决LCP模型的固有缺陷.

3.2 电路理论(CT)模型

LCP模型模拟古代人类迁徙路径的缺陷, 促使学者们寻求新的古人迁徙路径生成模型. 除了LCP模型, 还可用电路理论(current transformer, CT)模型来模拟动物迁徙行为(图3(b)). CT模型基于欧姆定律, 以电流(I)、电阻(R)和电压(U)之间的关系来模拟古代交通流动性. 该模型以电流表示道路等级, 具有较高潜在流动性的道路区域在电路图中以较高电流值呈现(通常以亮白色显示), 表示较高的交通活跃程度[87].

CT模型一般使用Circuitscape工具来预测不同景观环境中动植物种群的活动模式、基因流动性以及遗传分化效应[88~90]. 将CT模型应用于古人迁徙路径模拟研究时, 首先必须将各类电气术语转译为考古学术语. Howey在其研究中详细阐述了CT模型中六个核心电气术语: 电阻、电导、有效电阻、有效电导、电流、电压, 并解释了这些术语在利用Circuitscape工具进行古人迁徙路径模拟时的具体含义[85]. 学者采用CT模型可将地形坡度转换为电阻值, 来模拟穿越地形的难易程度, 从而预测探险家穿越地形的多条可能路径[91]. 此外, 还有学者利用CT型模拟海上航线, 以深入理解海陆环境间的环境流动性组合和文化景观中的连通性及城市化模式[86]. 这些研究成果为古人迁徙路径模拟研究提供了新视角, 使研究者能够更准确地模拟和理解古人在复杂环境中的动态交互过程.

将LCP模型和CT模型对比分析, 可以看出这两种模型在模拟古人路径选择行为上具有互补性. LCP模型侧重于识别特定环境中的最小成本路径, 有助于理解古人在资源有限的情况下, 如何权衡不同路线的成本效益; CT模型则展现了古代路网中的多条潜在路径, 不仅考虑成本因素, 还涵盖了其他可能影响路径选择的因素, 从而更全面模拟古人迁徙路径[85]. 此外, LCP模型结果很难做到与古人迁徙路径完全吻合, 而CT模型形成的线路廊道则可以圈定古人迁徙路径可能存在的范围, 更有利于对研究区域进行倾向性考古调查[91]. 综合运用LCP和CT模型, 能够更准确地模拟和理解古

人在复杂环境中的迁徙模式和影响因素.

3.3 随机最短路径(RSP)模型

LCP模型专注于模拟确定性最优路径, CT模型则擅长模拟不确定性多重游走路径. 然而, 现实中的个体运动往往采取两者间的策略, 综合考虑多种因素后再做出决策[93]. 为更加真实地模拟个体迁徙路线, 随机最短路径(random shortest path, RSP)模型被正式提出[94,95](图3(c)). 该方法综合考虑了确定性运动、完全随机运动以及两者间的中间状态, 并引入随机性水平参数θ来适应不同的运动策略. 当θ设为0时, 模型表现为完全随机游走, 与电路理论(CT)模型相似; 随着θ值的增加, 模型逐渐倾向于模拟确定性运动, 与最小成本路径(LCP)模型兼容. 这种参数化的模型结构, 可供研究者灵活探索和解读种群迁徙行为的复杂多维特征[96,97]. 将RSP模型应用于古人迁徙路径模拟的研究, 可以更充分理解古人在复杂环境中如何进行长距离迁徙, 丰富学界对古代交通行为的认知.

3.4 条件最小中转费用(CMTC)模型

适合确定性游走的LCP模型、适合随机性游走的CT模型以及介于两者之间的RSP模型共同搭建了一个相对完整的方法体系. 但目前还没有商用GIS软件将其集成运用. 为了便于研究者对比路径和廊道的模拟结果, Pinto和Keitt[98]基于LCP模型, 提出可以生成古代交通廊道范围的CMTC (conditional minimum transit cost)模型(图3(d)). CMTC模型借助GIS软件, 计算起终点之间的累积成本表面, 并将其相加得到新的累积成本栅格, 然后通过设定成本阈值, 选取最小成本与该阈值之间的区域, 生成反映特定成本范围(如成本最低的前10%)的交通廊道. CMTC模型的优势在于, 它能够利用LCP模型的中间结果计算成本廊道, 方便对比不同模型结果. 此外, CMTC模型与RSP模型具有相似的灵活性, 研究者可通过调整成本阈值来控制廊道覆盖范围.

4 从路径到路网的拓展

在特定区域范围内, 诸多相互连接、交错纵横的路径共同构建形成了路网(road network)[99]. 路径或廊道的模拟研究通常集中在两点(或区域)间的直接连通性上, 并不能有效复原研究区内的路网结构, 更不足以揭示不同生业人群的流动模式. 在区域尺度路网重建研究中, 传统最小成本路径(LCP)模型存在单一路径解译偏差和网络连接度表征不足的局限. 近年来, 学者通过多维度改进提升了模型效能. Carroll和Carroll[92]通过权衡建设和旅行成本, 避免了LCP标准算法中的正向偏差, 重建了古代地中海地区的最小成本路网. Verhagen等人[100]通过创建多点出发的LCP网络, 识别到网络关键节点和路径, 揭示了地形对古人的迁徙行为和定居模式的影响. 这些进展虽提升了路径网络的空间解析度, 但仍难以量化生业群体迁徙行为的随机性过程. 因此, 需要更先进的模型方法全面模拟古代路网系统, 理解特定人群的空间探索行为.

在各种构建路网的方法中, 水文分析中的汇流累积模型(flow accumulation, FA)应用较广泛, 可被视为基于成本表面的扩展应用[33,101](图3(e)). 该类研究工作依赖于成本距离算法生成流向栅格, 而后采用水文分析方法模拟古人迁徙网络. 例如, Frachetti等人[10]使用流量累积模型对随机生成的游牧民族冬季宿营地进行迭代运算, 模拟了中亚高山地区游牧民族的季节性迁徙路网. 朱燕等人[102]通过构建“自然因子模拟—遗址分布校正”方法, 利用GIS水文模型得到青藏高原史前交通路线模拟结果. Chen等人[37]开发了一个高分辨率地理空间模型和交流网络分析方法, 模拟了青藏高原基于生计活动的流动性网络和基于陶瓷交流的物质连通性网络. Yong等人[103]也使用汇流累积工具, 生成了海岱地区青铜和早期铁器时代的古代路网, 并使用聚落间的辐射模型(the radiation model, TRM)对古人迁徙路径进行了分级. Lancuo[104]使用流量累积模型模拟了青藏高原旧石器人类交流路径, 结果呈现出人类迁移轨迹从边缘向腹地扩张的趋势, 反映了人类在高原上活动分布特征和迁移模式.

汇流累积模型(FA)虽能有效模拟地形主导的迁徙网络, 但其机械化地形决定论难以量化人类行为的随机探索. 因此, 新近研究逐渐转向模拟人群运动过程, 通过探讨人群随机性移动模式与地理环境的交互作用, 从而揭示古人扩散规律. Salles等人[105]首次将Lévy行走觅食模式与动态地貌演化模型结合, 设置感知阈值和步长限制, 模拟生成辐射状水系迁徙廊道, 揭示了短距随机探索与长距定向迁徙的随机转换机制. Bradshaw等[106]构建一个综合考虑生态承载力、迁徙规则和水资源可用性等要素的随机生态模型, 通过对不同情景下古人类进入撒胡尔大陆的可能路径和定居模式进行模拟, 证实南部路线优先假说, 并量化干旱内陆的迁徙屏障效应. White和Barber[107]介绍了一种创新的

“从任何地方到任何地方”(from everywhere to everywhere, FETE)模型. 该方法不依赖特定起、终点, 而是通过GIS软件中的累积成本表面和路径寻找算法, 生成自然真实道路网络, 从而揭示特定路段上古人交通活动的频繁程度. Crabtree等人[108]则进一步发展了“FETE”算法, 通过超算生成1250亿条潜在路径, 成功识别出基于视觉显著性地标引导的“超级高速公路”, 量化揭示了古人类对水文网络的最小能耗响应规律, 证实景观可见度与水源分布是路径选择的核心决策因子.

总体来看, 古代路网模拟研究历经方法论的数理优化, 逐步发展到整合随机性过程的路径生成算法, 实现环境约束与随机探索的动态耦合, 构建起“环境感知-半随机探索-路径优化”的理论框架, 为解析古人对空间认知的演化机制提供量化研究范式. 然而, 史前时段受限于文字记载缺失和材料分布碎片化, 全域性覆盖与全时段连续性路网重建尚存基础资料欠缺的困境. 旧石器时代受制于遗址密度不足, 仅能勾勒古人离散式移动轨迹[76~80]. 新石器时代中晚期至夏商时期已能通过器物类型学传播、聚落层级网络、遗物测年数据以及道路遗迹推测等方式, 在中原地区、长江流域等地构建区域路网雏形[37,103,105,109,110]. 进入历史时期以后, 古代交通史料和遗存信息不断累积完善, 古人出行路径也更加明确, 研究方法转变至“文献-实证”相结合的双重驱动范式, 基于模型工具的路网重建方法很难再适用. 研究者无需依赖复杂定量分析算法, 仅根据史书记载和地形特征, 即可勾勒出历史时期主要交通路线[111].

上述提及的最小成本路径模型、电路理论模型、随机最短路径模型、条件最小中转费用模型, 以及汇流累积模型, 均依赖成本表面或阻力栅格来实现路径模拟, 其核心在于量化模拟人类或其他物种在特定地理环境的迁徙策略和活动规律, 可被统一归纳为广义空间成本分析(generalized-spatial cost analysis, G-SCA)方法(图3). 最小成本路径模型操作简便, 应用最为广泛, 但缺乏对个体移动随机性的量化表征. 电路理论模型可生成多条潜在路径, 而其路径模拟机制建立在理想化随机游走理论框架之上, 与生物实体移动行为存在机理偏差. 随机最短路径模型虽能实现确定性路径与随机游走的概率平衡, 但模型中关键参数的赋权机制存在较强的主观判断因素. 条件最小中转费用模型能够简便计算成本廊道范围, 却在路径网络拓扑重建方面存在显著局限性. 汇流累积模型虽能有效重建路径网络, 但其算法原理对现代地表人类活动干扰因素缺乏兼容性, 且缺少路网分级和结构优化的理论支撑. G-SCA方法的核心假设在于, 古人出行行为主要受特定环境成本因素影响, 而社会文化因素的作用相对较小. 与基于史料的定性描述或基于人工智能的机器识别方法相比, G-SCA方法不仅能揭示古人迁徙路径的分布倾向(“哪里有”), 还能探究其背后的环境驱动机制(“为何有”), 为理解古代人类迁徙活动提供了更为全面和科学的视角.

5 展望

本文首次系统梳理了古代人群迁徙路径的空间定量模拟方法, 实现了从单一地理信息技术向人地系统协同演化理论模型的重要跨越, 为解码古代文明进程、预测气候触发的人类迁移模式、评估跨文化交流效应等全球性重大科学问题提供全新认知手段. 尽管现有研究已取得显著进展, 但仍面临诸多瓶颈亟待突破. 在数据基础方面, 现有路径模拟普遍依赖现代地表数据, 忽视了第四纪以来地貌演化及古植被更替的时空效应. 未来研究可通过构建高分辨率古地貌与古植被栅格数据集, 并将其作为关键参数耦合到空间分析模型中, 系统解析地表过程演变对迁徙路径形成的影响机制, 更精准地实现古代人群迁徙路径模拟. 在模型适用性方面, 环境成本权重的微小差异可能导致路径生成结果显著偏移. 因此, 研究不同地理环境下古人迁徙路径生成模型的适用性, 并构建多维度的精度评估体系, 也是当前亟需开展的工作[36,64,72,113]. 在研究范畴方面, 现有史前路径模拟研究成果高度集中于文化核心区, 而边疆地带、文化交互薄弱区及特殊地貌单元仍存在认知空白. 早期高山游牧族群迁徙路网、海岸带史前交流路网、史前渔猎-农耕交互通道及功能性路网分析识别等方向也有待进一步突破. 未来可按文化区系绘制区域性路网(如龙山文化路网、石家河文化路网), 再通过关键通道(如中原-江汉隘道、辽西走廊)进行网络链接, 最终构建中国史前路网全景图, 呈现早期中国“多元一体”文明格局的物质网络流动基础. 而历史时期人群迁徙路径研究长期聚焦于热度区域、热点时段和热门主题等同质化研究内容[114], 亟待构建整合全时空要素矩阵的全国性历史交通地理信息系统, 实现路网动态演化过程的可视化解析.

随着空间信息技术和商用GIS软件的发展和普及, 研究者可以使用直观图形用户界面(GUI)进行复杂空

间分析操作. 但部分学者未能充分理解空间分析工具的算法原理, 仅满足于软件自动生成的路径结果, 忽视了对分析结果的检验和批判[40,115]. 鉴于此, 未来研究应着重于古人迁徙路径模拟算法的逻辑优化, 加强逆向推理和样本检验. 具体可分为以下两种研究思路来开展: 一是以提升发现古人迁徙路径调查发现机率为目标的空间预测工作, 这种思路侧重于空间分析技术的实际应用, 适合用类比和反推的逻辑来重建古代交通格局; 二是以理解古人迁徙路径分布及驱动机制为目标的定量模拟工作, 利用空间分析技术来解释科学问题, 更适合与考古、史学资料等进行对比分析, 探索古人的空间探索与交互行为动机. 两种思路结合将促进空间考古学和历史地理学的发展, 为揭示遗址外的文化交流模式和环境驱动因素提供全新的空间视角.

此外, 在人工智能与大数据技术驱动下, 考古学方法研究正经历从经验推断向数据智能的范式转换[116]. AI技术(特别是机器学习算法)能够同时处理和分析大量历史和考古数据, 可以有效模拟古人迁徙模式和路网演变[117]. 大数据的应用可以帮助研究者更好地理解古代人类活动的空间分布, 以及这些活动如何受到环境和社会因素的影响[118]. 基于此, 未来研究方法应聚焦构建具有时空连续性的多情景“环境-社会”耦合路径生成模型, 构建古人迁徙路径时空信息集成数据图集, 重点突破古地貌动态重建与多源异构数据融合, 同时开发具有物理约束的可解释性AI算法, 深入探究人地系统协同演化的内在机制与运行规律, 进一步挖掘古人迁徙路径存续价值, 强化对古代人群出行模式的理解.

致谢 感谢中国科学院青藏高原研究所李浩研究员在论文写作过程中给予的宝贵意见和建议, 感谢审稿人的悉心审阅.

参考文献

1 Dingle H, Drake V A. What is migration? BioScience, 2007, 57: 113–121
2 Griffin J B. Some prehistoric connections between Siberia and America. Science, 1960, 131: 801–812
3 Goebel T, Waters M R, O'rourke D H. The Late Pleistocene dispersal of modern humans in the Americas. Science, 2008, 319: 1497–1502
4 Mellars P. Why did modern human populations disperse from Africa ca. 60,000 years ago? A new model. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103: 9381–9386
5 deMenocal P B, Stringer C. Climate and the peopling of the world. Nature, 2016, 538: 49–50
6 Timmermann A, Friedrich T. Late Pleistocene climate drivers of early human migration. Nature, 2016, 538: 92–95
7 Bae C J, Douka K, Petraglia M D. On the origin of modern humans: Asian perspectives. Science, 2017, 358: eaai9067
8 Saltré F, Chadœuf J, Higham T, et al. Environmental conditions associated with initial northern expansion of anatomically modern humans. Nat Commun, 2024, 15: 4364
9 Zhang D, Zhang N, Wang J, et al. Comment on “Permanent human occupation of the central Tibetan Plateau in the early Holocene”. Science, 2017, 357: eaam8273
10 Frachetti M D, Smith C E, Traub C M, et al. Nomadic ecology shaped the highland geography of Asia's Silk Roads. Nature, 2017, 543: 193–198
11 Ruan J, Timmermann A, Raia P, et al. Climate shifts orchestrated hominin interbreeding events across Eurasia. Science, 2023, 381: 699–704
12 Zeller E, Timmermann A, Yun K S, et al. Human adaptation to diverse biomes over the past 3 million years. Science, 2023, 380: 604–608
13 Shao Y, Wegener C, Klein K, et al. Reconstruction of human dispersal during Aurignacian on pan-European scale. Nat Commun, 2024, 15: 7406
14 Zan J, Louys J, Dennell R, et al. Mid-Pleistocene aridity and landscape shifts promoted Palearctic hominin dispersals. Nat Commun, 2024, 15: 10279
15 Dai X Y, Yao H. The evolution of the concept of international cultural routes and China's practice (in Chinese). J Cap Norm Univ (Soc Sci Ed), 2017, (1): 78–87 [戴湘毅, 姚辉. 国际文化线路理念演进及中国的实践. 首都师范大学学报(社会科学版), 2017, (1): 78–87]
16 Khovanova-Rubicondo K. Impact of European Cultural Routes on SMEs' Innovation and Competitivenes. Technical Report, Council of Europe, 2012
17 Denu P, Berti E, Mariotti A, et al. Cultural Routes Management: From Theory To Practice. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2015
18 Sun J. The concept of cultural routes and their dynamism and intangibility (in Chinese). Study Nat Cultur Heritage, 2023, 8: 71–80 [孙静. 文化线路的概念及其动态性、非物质性. 自然与文化遗产研究, 2023, 8: 71–80]
19 Ding Y. The ICOMOS Charter on cultural routes (in Chinese). China Ancient City, 2009, (5): 51–56 [丁援. 国际古迹遗址理事会(ICOMOS)文化线路宪章. 中国名城, 2009, (5): 51–56]

20 Le L, Zhang P. A Study on the recovery of Lingzhou Road, a key Silk Road in the Early Northern Song Dynasty, supported by GIS technology (in Chinese). J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 2017, (5): 55–62 [乐玲, 张萍. GIS技术支持下的北宋初期丝路要道灵州道复原研究. 云南大学学报(社会科学版), 2017, (5): 55–62]

21 Liu L. A Study on road recovery of the overland Silk Road from the 14th to the 17th Century under GIS (in Chinese). Doctor Dissertation. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017 [刘露. GIS下的14~17世纪陆上丝绸之路道路复原研究. 博士学位论文. 西安: 陕西师范大学, 2017]

22 Huo R L, Ren L. GIS-based reconstruction of traffic route network in the domestic section of the southern Silk Road (in Chinese). Geograph Res, 2022, 41: 1122–1135 [霍仁龙, 任柳. 基于GIS的南方丝绸之路国内段交通路线网络重建研究. 地理研究, 2022, 41: 1122–1135]

23 Marciak M, Sobczyński D, Abadi O, et al. In Search of ancient pre-roman imperial roads: a case study of the application of remote sensing in road archaeology in the southern Levant. Remote Sens, 2023, 15: 4545

24 Chiang Y Y, Duan W, Leyk S, et al. Using Historical Maps in Scientific Studies: Applications, Challenges, and Best Practices. Cham: Springer Press, 2019

25 Can Y S, Gerrits P J, Kabadayi M E. Automatic detection of road types from the third military mapping survey of Austria-Hungary historical map series with deep convolutional neural networks. IEEE Access, 2021, 9: 62847–62856

26 Avci C, Sertel E, Kabadayi M E. Deep learning-based road extraction from historical maps. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2022, 19: 1–5

27 Speidel L, Silva M, Booth T, et al. High-resolution genomic history of early medieval Europe. Nature, 2025, 637: 118–126

28 Yang M A, Fan X, Sun B, et al. Ancient DNA indicates human population shifts and admixture in northern and southern China. Science, 2020, 369: 282–288

29 Kumar V, Wang W, Zhang J, et al. Bronze and Iron Age population movements underlie Xinjiang population history. Science, 2022, 376: 62–69

30 Verhagen P, Nuninger L, Groenhuijzen M R. Modelling of pathways and movement networks in archaeology: an overview of current approaches. In: Verhagen P, Joyce J, M R, eds. Groenhuijzen, Finding the Limits of the Limes. Computational Social Sciences. Cham: Springer Press, 2019. 217–249

31 White D A. The basics of least cost analysis for archaeological applications. Adv Archaeol Pract, 2015, 3: 407–414

32 Kaplan J O, Bigelow N H, Prentice I C, et al. Climate change and arctic ecosystems: 2. modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. J Geophys Res, 2003, 108: 8171

33 Llobera M, Fábrega-Álvarez P, Parcero-Oubiña C. Order in movement: a GIS approach to accessibility. J Archaeol Sci, 2011, 38: 843–851

34 Güimil-Fariña A, Parcero-Oubiña C. "Dotting the joins": a non-reconstructive use of Least Cost Paths to approach ancient roads. The case of the Roman roads in the NW Iberian Peninsula. J Archaeol Sci, 2015, 54: 31–44

35 Bell T, Wilson A, Wickham A. Tracking the samnites: landscape and communications routes in the Sangro Valley, Italy. Am J Archaeol, 2002, 106: 169–186

36 Efkleidou K. Walking your way to death. Exploring the relation between the location of mycenaean chamber tombs and roads in the Argolid. Open Archaeol, 2019, 5: 484–504

37 Chen X, Lü H, Liu X, et al. Geospatial modelling of farmer–herder interactions maps cultural geography of Bronze and Iron Age Xizang, 3600–2200 BP. Sci Rep, 2024, 14: 2010

38 Longley P A, Goodchild M F, Maguire D J, et al. Geographic Information Science and Systems. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015

39 Verhagen P, McGlade J, Gili S, et al. Some criteria for modelling socio-economic activities in the Bronze Age of South-East Spain. In: Lock C, Stancic Z, eds. Archaeology and Geographical Information Systems: A European Perspective. London/Bristol: Taylor & Francis Ltd. Press, 1995. 187–209

40 Howey M C L. Using multi-criteria cost surface analysis to explore past regional landscapes: a case study of ritual activity and social interaction in Michigan, AD 1200–1600. J Archaeol Sci, 2007, 34: 1830–1846

41 Lancuo Z, Hou G, Xu C, et al. Simulating the route of the Tang-Xizang Ancient Road for one branch of the Silk Road across the Qinghai-Xizang Plateau. PLoS One, 2019, 14: e0226970

42 Hou G L, LanCuo Z M, Zhu Y, et al. Communication routes and their evolution in the prehistoric period on the Tibetan Plateau (in Chinese). Acta Geograph Sin, 2021, 76: 1294–1313 [侯光良, 兰措卓玛, 朱燕, 等. 青藏高原史前时期交流路线及其演变. 地理学报, 2021, 76: 1294–1313]

43 Van Leusen P M. Cartographic modelling in a cell-based GIS. In: Andresen J, Madsen T, Scollar I, eds. Computing the Past: Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Aarhus: Aarhus University Press, 1993. 105–124

44 Zakšek K, Fovet E, Nuninger L, et al. Path modelling and settlement pattern. In: Posluschny A, Lambers K, Herzog I, eds. Layers of Perception: Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Bonn: Dr. Rudolf Habelt GmbH Press, 2007. 309–315

45 Gowen K M, de Smet T S, Gao S. Testing least cost path (LCP) models for travel time and kilocalorie expenditure: implications for landscape genomics. PLoS One, 2020, 15: e0239387

46 Whitley TG, Burns G. Conditional GIS surfaces and their potential for archaeological predictive modelling. In: Posluschny A, Lambers K, Herzog I, eds. Layers of Perception: Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Bonn: Dr. Rudolf Habelt GmbH Press, 2007. 292–298

47 Llobera M. Understanding movement: a pilot model towards the sociology of movement. In: Lock G, ed. Beyond the Map: Archaeology and Spatial Technologies. Amsterdam: IOS Press, 2000. 65–84

48 Herzog I. Spatial analysis based on cost functions. In: Gillings M, Hacigüzeller P, Lock G, eds. Archaeological Spatial Analysis: A Methodological Guide to GIS. London and New York: Routledge, Taylor & Francis Group Press, 2020. 333–358

49 Pandolf K B, Givoni B, Goldman R F. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. J Appl Physiol, 1977, 43: 577–581

50 de Gruchy M, Caswell E, Edwards J. Velocity-based terrain coefficients for time-based models of human movement. Internet Archaeol, 2017, doi: 10.11141/ia.45.4

51 Santee W R, Allison W, Blanchard L A, et al. A proposed model for load carriage on sloped terrain. Aviat Space Environ Med, 2001, 72: 562–566

52 Looney D P, Santee W R, Hansen E O, et al. Estimating energy expenditure during level, uphill, and downhill walking. Med Sci Sports Exercise, 2019, 51: 1954–1960

53 Laursen B, Ekner D, Simonsen E B, et al. Kinetics and energetics during uphill and downhill carrying of different weights. Appl Ergonomics, 2000, 31: 159–166

54 Minetti A E, Moia C, Roi G S, et al. Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. J Appl Physiol, 2002, 93: 1039–1046

55 Llobera M, Sluckin T J. Zigzagging: theoretical insights on climbing strategies. J Theor Biol, 2007, 249: 206–217

56 Herzog I. The potential and limits of optimal path analysis. In: Bevan A, Lake M, eds. Computational Approaches to Archaeological Spaces. Walnut Creek: Left Coast Press, 2013. 179–211

57 Tobler W. Non-Isotropic Modeling. Technical Report. Three Presentations on Geographical Analysis and Modeling. University of California Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis, 1993

58 Jobe R T, White P S. A new cost-distance model for human accessibility and an evaluation of accessibility bias in permanent vegetation plots in Great Smoky Mountains National Park, USA. J Veget Sci, 2009, 20: 1099–1109

59 Irmischer I J, Clarke K C. Measuring and modeling the speed of human navigation. Cartography Geograph Inf Sci, 2018, 45: 177–186

60 Field S, Glowacki D M, Gettler L T. The importance of energetics in archaeological Least Cost analysis. J Archaeol Method Theor, 2023, 30: 363–396

61 Rosenswig R M, Martínez Tuñón A. Changing Olmec trade routes understood through Least Cost Path analysis. J Archaeol Sci, 2020, 118: 105146

62 Shim W J, Ko I, Park S J. 'Benefit Maximizing Routes': development and evaluation using the historical roads of Korea's Joseon Dynasty (1392–1910). J Comput Appl Archaeol, 2022, 5: 96–111

63 Gietl R, Doneus M, Fera M. Cost distance analysis in an alpine environment: comparison of different cost surface modules. In: Posluschny A, Lambers K, Herzog I, eds. Layers of Perception: Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Bonn: Dr. Rudolf Habelt GmbH Press, 2008. 1–9

64 Saltré F, Chadœuf J, Higham T, et al. Environmental conditions associated with initial northern expansion of anatomically modern humans. Nat Commun, 2024, 15: 4364

65 Herzog I, Posluschny A. Tilt–slope-dependent least cost path calculations revisited. In: Jerem E, Redő F, Szeverényi V, eds. On the Road to Reconstructing the Past: Proceedings of the 36th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Budapest: Archaeolingua Foundation Press, 2011. 236–242

66 De Silva M, Pizziolo G. Setting up a "human calibrated" anisotropic cost surface for archaeological landscape investigation. In: Stančič Z, Veljanovski T, eds. Computing Archaeology for Understanding the Past: Proceedings of the 28th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Oxford: Archaeopress, 2001. 279–288

67 Verhagen J W H P, Jeneson C F. A Roman puzzle: trying to find the via Belgica with GIS. In: Chrysanthi A, Murrieta Flores P, Papadopoulos C, eds. Thinking Beyond The Tool: Archaeological Computing and The Interpretive Process. Oxford: Archaeopress, 2012. 123–130

68 Warren S D, Hohmann M G, Auerswald K, et al. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. Catena, 2004, 58: 215–233

69 Herzog I, Yépez A. The impact of the DEM on archaeological GIS studies: a case study in Ecuador. In: Borner W, Uhlitz S, eds. Proceedings of the 19th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies. Vienna: Museen der Stadt Wien-Stadarchäologie Wien Press, 2015

70 Becker D, De Andrés-Herrero M, Willmes C, et al. Investigating the influence of different DEMs on GIS-based cost distance modeling for site catchment analysis of prehistoric sites in Andalusia. Int J Geo-Inf, 2017, 6: 36

71 Lock G, Pouncett J. Walking the ridgeway revisited: the methodological and theoretical implications of scale dependency for the derivation of slope and the calculation of least-cost pathways. In: Frischer B, Webb Crawford J, Koller D, eds. Making History Interactive: Proceedings of the 37th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Oxford: Archaeopress, 2010. 192–203

72 Herzog I. Issues in replication and stability of least-cost path calculations. Stud Digit Herit, 2021, 5: 131–155

73 Nolan K C, Cook R A. A method for multiple cost-surface evaluation of a model of fort ancient interaction. In: White Devin A, Surface-Evans S, eds. Least Cost Analysis of Social Landscapes: Archaeological Case Studies. Salt Lake City, UT: University of Utah Press, 2012. 67–93

74 Herzog I. Theory and practice of cost functions. In: Contreras F, Farjas M, Melero F J, eds. Fusion of Cultures: Proceedings of the 38th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Oxford: Archaeopress, 2013. 375–382

75 Yu C, Lee J, Munro-stasiuk M J. Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. Int J Geograph Inf Sci, 2003, 17: 361–376

76 Field J S, Lahr M M. Assessment of the southern dispersal: GIS-based analyses of potential routes at oxygen isotopic stage 4. J World Prehist, 2006, 19: 1–45

77 Field J S, Petraglia M D, Lahr M M. The southern dispersal hypothesis and the South Asian archaeological record: examination of dispersal routes through GIS analysis. J Anthropol Archaeol, 2007, 26: 88–108

78 Kondo Y, Sano K, Omori T, et al. Ecological niche and least-cost path analyses to estimate optimal migration routes of initial upper Palaeolithic populations to Eurasia. In: Nishiaki Y, Akazawa T, eds. The Middle and Upper Paleolithic Archeology of the Levant and Beyond. Singapore: Springer, 2018. 199–212

79 Li F, Vanwezer N, Boivin N, et al. Heading north: late Pleistocene environments and human dispersals in central and eastern Asia. PLoS One, 2019, 14: e0216433

80 Zhang P, Zhang X, Li L, et al. The peopling of the hinterland of the Tibetan Plateau during the late MIS 3. Sci Bull, 2022, 67: 2411–2415

81 Khamsiri S, Venunan P, Khaokheiw C, et al. Reconstructing the ancient route network in the Thailand–Cambodia borders: a case study of the Angkorian Royal Road. Archaeol Prosp, 2023, 30: 357–368

82 Field S, Heitman C, Richards-Rissetto H. A least cost analysis: correlative modeling of the Chaco regional road system. J Comput Appl Archaeol, 2019, 2: 136–150

83 Gustas R, Supernant K. Least cost path analysis of early maritime movement on the Pacific Northwest Coast. J Archaeol Sci, 2017, 78: 40–56

84 Taliaferro M S, Schriever B A, Shackley M S. Obsidian procurement, least cost path analysis, and social interaction in the Mimbres area of southwestern New Mexico. J Archaeol Sci, 2010, 37: 536–548

85 Howey M C L. Multiple pathways across past landscapes: circuit theory as a complementary geospatial method to least cost path for modeling past movement. J Archaeol Sci, 2011, 38: 2523–2535

86 McLean A, Rubio-Campillo X. Beyond Least Cost Paths: circuit theory, maritime mobility and patterns of urbanism in the Roman Adriatic. J Archaeol Sci, 2022, 138: 105534

87 McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 19885–19890

88 McRae B H, Shah V, Edelman A. Circuitscape: Modeling Landscape Connectivity to Promote Conservation and Human Health. Technical Report, The Nature Conservancy, 2016

89 Anantharaman R, Hall K, Shah V B, Edelman A. Circuitscape in Julia: high performance connectivity modelling to support conservation decision. In: Besançon M, Churavy V, Anantharaman R, eds. Proceedings of the JuliaCon Conferences. Lisbon: JuliaCon, 2000. 58–63

90 Van Etten J. R Package Gdistance: distances and routes on geographical grids. J Stat Softw, 2017, 76: 1–21

91 Thayn J B, Sampeck K, Spaccapaniccia M. Refining Hernando de Soto's route using electric circuit theory and CircuitScape. Professional Geographer, 2016, 68: 595–602

92 Carroll F, Carroll E. Budget travel in the mediterranean: a methodology for reconstructing ancient journeys through least cost networks. J Comput Appl Archaeol, 2022, 5: 35–56

93 Goicolea T, Gastón A, Cisneros-Araujo P, et al. Deterministic, random, or in between? Inferring the randomness level of wildlife movements. Mov Ecol, 2021, 9: 33

94 Saerens M, Achbany Y, Fouss F, et al. Randomized shortest-path problems: two related models. Neur Comput, 2009, 21: 2363–2404

95 Delgado M M, Penteriani V, Revilla E, et al. The effect of phenotypic traits and external cues on natal dispersal movements. J Anim Ecol, 2010, 79: 620–632

96 Kivimäki I, Shimbo M, Saerens M. Developments in the theory of randomized shortest paths with a comparison of graph node distances. Phys A-Stat Mech its Appl, 2014, 393: 600–616

97 Kivimäki I, Lebichot B, Saramäki J, et al. Two betweenness centrality measures based on Randomized Shortest Paths. Sci Rep, 2016, 6: 19668

98 Pinto N, Keitt T H. Beyond the least-cost path: evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. Landscape Ecol, 2009, 24: 253–266

99 Shao C F. Principles of Traffic Planning (in Chinese). 3rd ed. Beijing: China Railway Press, 2022 [邵春福. 交通规划原理(第3版). 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2022]

100 Verhagen P, Brughmans T, Nuninger L, et al. The long and winding road: combining least cost paths and network analysis techniques for settlement location analysis and predictive modelling. In: Graeme E, Sly T, Chrysanthi A, et al., eds. Archaeology in the Digital Era: Proceedings of the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Amsterdam: Amsterdam University Press, 2012. 357–366

101 De Smith M J, Goodchild M F, Longley P A. Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools. 7th ed. Leicestershire: Troubador Publishing Limited, 2007

102 Zhu Y, Hou G L, LanCuo Z M, et al. GIS-based analysis of prehistoric traffic routes and zoning on the Tibetan Plateau (in Chinese). Progr Geography, 2018, 37: 438–449 [朱燕, 侯光良, 兰措卓玛. 基于GIS的青藏高原史前交通路线与分区分析. 地理科学进展, 2018, 37: 438–449]

103 Yong H, Jia X, Li S, et al. Reconstructing and tracing the evolution of the road networks in the Haidai region of China during the Bronze and Early Iron Ages. Herit Sci, 2024, 12: 145

104 LanCuo Z M. Reconstruction and evolution of paleolithic-historical communication routes on the Tibetan Plateau (in Chinese). Doctor Dissertation. Xining: Qinghai Normal University, 2021 [兰措卓玛. 青藏高原旧石器-历史时期交流路线的重建及演变研究. 博士学位论文. 西宁: 青海师范大学, 2021]

105 Salles T, Joannes-Boyau R, Moffat I, et al. Physiography, foraging mobility, and the first peopling of Sahul. Nat Commun, 2024, 15: 3430

106 Bradshaw C J A, Norman K, Ulm S, et al. Stochastic models support rapid peopling of Late Pleistocene Sahul. Nat Commun, 2021, 12: 2440

107 White D A, Barber S B. Geospatial modeling of pedestrian transportation networks: a case study from precolumbian Oaxaca, Mexico. J Archaeol Sci, 2012, 39: 2684–2696

108 Crabtree S A, White D A, Bradshaw C J A, et al. Landscape rules predict optimal superhighways for the first peopling of Sahul. Nat Hum Behav, 2021, 5: 1303–1313

109 Ma M, Lu Y, Dong G, et al. Understanding the transport networks complex between South Asia, Southeast Asia and China during the late Neolithic and Bronze Age. Holocene, 2023, 33: 147–158

110 Song Z H. A History of the Social Life of the Xia and Shang Dynasties (in Chinese). Beijing: China Social Sciences Press, 1994 [宋镇豪. 夏商社会生活史. 北京: 中国社会科学出版社, 1994]

111 Wang J E. Concise Historical Atlas of China's Transport Network (in Chinese). Beijing: Star Map Press, 2018 [王娇娥. 简明中国交通历史地图集. 北京: 星球地图出版社, 2018]

112 Panzacchi M, Van Moorter B, Strand O, et al. Predicting the *continuum* between corridors and barriers to animal movements using Step Selection Functions and Randomized Shortest Paths. J Anim Ecol, 2016, 85: 32–42

113 Brouwer Burg M. It must be right, GIS told me so! Questioning the infallibility of GIS as a methodological tool. J Archaeol Sci, 2017, 84: 115–120

114 Lan Y. Low key in compatibility and abandonment for self-improvement: review and reflection of the research on historical transport geography over the past 70 years (in Chinese). J Chin Histor Geogr, 2019, 34: 5–17 [蓝勇. 近70年来中国历史交通地理研究的回顾与思考. 中国历史地理论丛, 2019, 34: 5–17]

115 Lock G, Pouncett J. Spatial thinking in archaeology: is GIS the answer? J Archaeol Sci, 2017, 84: 129–135

116 Luo L, Wang X, Guo H. Transitioning from remote sensing archaeology to space archaeology: towards a paradigm shift. Remote Sens Environ, 2024, 308: 114200

117 Bickler S H. Machine learning arrives in archaeology. Adv Archaeol Pract, 2021, 9: 186–191

118 Resler A, Yeshurun R, Natalio F, et al. A deep-learning model for predictive archaeology and archaeological community detection. Humit Soc Sci Commun, 2021, 8: 295

补充材料

表S1 能量成本函数基础和改进公式

表S2 时间成本函数基础和改进公式

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “古代人群迁徙路径定量模拟研究进展和展望”

Progress and prospects of quantitative simulation research on ancient human migration paths

Lin Wang[1], Peiming Peng[2,3*], Xiangyu Liu[1] & Fahu Chen[2,3,4]

[1] *School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China*
[2] *Alpine Paleoecology and Human Adaptation Group (ALPHA), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[3] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
[4] *Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
* Corresponding author, E-mail: pengpm23@itpcas.ac.cn

Ancient human migration routes constitute critical pathways for cultural transmission and exchange, profoundly shaping the diversification of civilizations. Scholarly investigations into these routes traces back to the 1960s, with European explorations of the “cultural route” concept. Cultural routes represent interactive, dynamic processes that connect geographically disparate societies, serving as vital conduits for intercultural exchange. As fundamental manifestations of cultural routes, ancient migration paths form physical conduits between regions by linking point-based cultural heritage assets along their trajectories. These routes function as not only geographical connections but also essential vectors for cultural inheritance. Traditional investigative approaches are still constrained by regional variations in archaeological preservation and spatial legibility, permitting only macroscale inferences about population movements during large-scale dispersal while failing to reconstruct comprehensive ancient transportation networks systematically. To address these limitations, scholars have adopted spatial analytical techniques, such as the Least Cost Path (LCP) model. By quantifying environmental factors to construct cost surfaces and integrating spatial node data, these methods enable quantitative reconstruction and mechanistic analysis of ancient migration corridors.

Building upon established scholarship, this study presents a systematic synthesis of quantitative approaches to reconstructing ancient migration routes. Our analytical framework examines three core methodological components that collectively advance path modeling techniques. The first component focuses on transportation node selection, in which strategically positioned waypoints enhance spatial trajectory accuracy through empirical validation. The second involves cost surface construction, employing either multifactor weighted integration to comprehensively assess environmental parameters or cost function methodologies that mathematically transform landscape variables into quantifiable energy and time expenditure metrics. The third component encompasses advanced route and network generation algorithms, including Circuit Theory, Randomized Shortest Path Analysis, and Flow Accumulation Modeling, all operating within the unified theoretical framework of Generalized-Spatial Cost Analysis.

This Generalized-Spatial Cost Analysis framework represents a significant methodological advancement by enabling sophisticated simulations of species-specific movement patterns across diverse landscapes. It provides a dual analytical capacity that both maps the spatial distribution of routes and explains their environmental determinants, thereby establishing an empirically robust foundation for understanding ancient human mobility systems. The reliance of this framework on precisely calculated cost surfaces and resistance grids allows for unprecedented accuracy in reconstructing historical movement patterns.

This study makes a seminal contribution to the field by integrating previously disparate spatial analytical methods, marking an important transition from isolated geospatial techniques to comprehensive human–environment coevolution modeling. The developed framework offers innovative analytical capabilities across three critical research domains: reconstructing civilizational processes, predicting climate-influenced migration patterns, and assessing cross-cultural interactions. These advancements enable researchers to address fundamental questions about human mobility and cultural transmission with greater precision than was previously possible.

We identify four key research trajectories that promise to transform the field in the future. The first involves developing high-resolution spatiotemporal models that effectively incorporate environment–society interactions across multiple scenarios. The second focuses on creating comprehensive geospatial atlases that synthesize migration route chronologies from diverse historical periods. The third trajectory pursues technical breakthroughs in paleolandscape reconstruction through innovative multiproxy data fusion techniques. The fourth focuses on advancing artificial intelligence architectures by incorporating physical constraints and developing robust explainability protocols.

These interdisciplinary initiatives will elucidate the complex feedback mechanisms between human systems and their environmental contexts. They will reveal the enduring socioecological significance of ancient mobility networks while fundamentally transforming our understanding of prehistoric transportation systems. The methodological innovations presented in this work not only advance academic research but also provide valuable insights for contemporary challenges related to human migration and environmental adaptation. By bridging the gap between past and present mobility patterns, this work establishes a new paradigm for studying human movement across temporal and spatial scales.

quantitative simulation of ancient routes, the diffusion and migration of ancient peoples, LCP (Least Cost Path), spatial archaeology

doi: 10.1360/TB-2025-0148