

汉长城烽燧选址的地理因子探究:以玉门市为例*

孙瑞祺^{1,2}, 骆磊^{1,3†}, 王心源^{1,3}, 姚娅^{1,3}, 黄文江¹, 董莹莹¹, 连懿⁴

(1 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 联合国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心, 北京 100094; 4 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387)

(2021年1月13日收稿; 2021年3月26日收修改稿)

Sun R Q, Luo L, Wang X Y, et al. Research on geographical factors of location of beacon towers of the Great Wall of Han Dynasty: a case study of Yumen City[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(1): 50-58. DOI:10.7523/j.ucas.2021.0030.

摘要 汉长城是中国西北荒漠地区最重要的古代防御系统,其显著特点之一即烽燧林立。在经济水平有限的汉代和自然条件恶劣的干旱地区,烽燧的空间选址如何承载并发挥其屯戍功能,对理解过去人地关系具有重要意义。但目前国内相关研究多为历史地理视角的定性分析,难以揭示其中的量化规律,更无法还原古代地理环境下的空间认知和技术利用水平。以甘肃省玉门市段汉长城为例,引入点模式分析、空间相关性检验、蒙特卡洛模拟等方法,定量地对烽燧空间设置的多种假设因子进行敏感性检验,试图揭示烽燧选址的规律。研究结果显示,地形、水文、聚落位置等自然与人文环境要素均显著影响了汉长城烽燧的空间布局,且在高程1 250~1 500 m、坡度2.5°~8°、坡向南偏东70°~南偏西60°、距最邻近水系0~1 535 m及以城障遗址为中心的2~20 km的区间内具有统计显著性。定量结果分析表明,汉长城沿线烽燧建址在确保前线通视性的同时,保障了与后方城障间军事情报车马传递的成本控制和效用优化;此外考虑了选址处人居环境,多选地势平坦、水源充足的绿洲,印证了其屯垦、交通等附属功能,综合体现了汉代地理空间认知和技术利用的较高水平。

关键词 烽燧; 选址; 因子敏感性; 空间相关性; 点模式分析

中图分类号: K901.9; K909 **文献标志码:** A **DOI:**10.7523/j.ucas.2021.0030

Research on geographical factors of location of beacon towers of the Great Wall of Han Dynasty: a case study of Yumen City

SUN Ruiqi^{1,2}, LUO Lei^{1,3}, WANG Xinyuan^{1,3}, YAO Ya^{1,3}, HUANG Wenjiang¹,
DONG Yingying¹, LIAN Yi⁴

(1 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 International Centre on Space Technologies for National and Cultural Heritage under the Auspices of UNESCO, Beijing 100094, China; 4 School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract The Great Wall of Han Dynasty is the most important ancient defense system in the desert region of Northwest China with beacon towers standing in great numbers. In the Han dynasty with

* 国家自然科学基金青年科学基金(41801345)资助

† 通信作者, E-mail: luolei@aircas.ac.cn

limited economic conditions and arid areas with adverse natural conditions, how spatial location of beacon towers played a role in agriculture and military is of great significance for understanding the past human-land relationship. However, current domestic researches are mostly qualitative from the perspective of history and archaeology which is difficult to restore the spatial cognition and technology in the ancient environment without quantitative results. Taking Yumen City, Gansu Province as an example, this paper introduced spatial analysis and statistical methods including point pattern analysis, spatial correlation test, Monte Carlo simulation to quantitatively test the sensitivity of factors that probably affect the spatial distribution of beacon sites. Two types of factors, natural environmental and human settlement, were tested, which further summarized the law of spatial layout of beacon towers. Results indicated that the elevation showed sensitivity in the range of 1 250-1 500 m, while the nearest distance to water showed sensitivity in the range of 0-1 535 m. The slope factor was sensitive between 2.5° - 8° , and the aspect was sensitive in the range of 70° southeast to 60° southwest. The city sites were also sensitive predictors within a radius of about 2-20 km centered on themselves. Analysis of the results indicated that the beacon towers along the Great Wall optimized the cost and utility of the military intelligence transmission between the front and the rear city barrier while guaranteeing the visibility of the front line. Additionally, the environment for human settlements at the site was considered by choosing oases with flat terrain and sufficient water sources, confirming its auxiliary functions such as farming and transportation, which comprehensively reflected the advanced geospatial cognition and technology in the Han Dynasty.

Keywords beacon towers; spatial installation; sensitivity of factors; spatial correlation; point pattern analysis

考古遗址空间分布的成因分析对研究过去人地关系与人类活动的时空演化具有重要意义,一方面能够丰富人地关系研究的时间尺度,提高对地系统相互作用机制的认识;另一方面也为研究人类社会变迁与文化发展过程提供了新的思路和方法。

汉长城,又称汉塞,是西汉时期为抵御西北匈奴侵扰、保障丝绸之路商贸文化交流畅通而修筑的防御工程,也是当今“一带一路”沿线最重要的考古遗址之一。汉长城以墙体和烽燧为主体,通过联结各等级城障及其他工事,构成了一个规模庞大、运行有序的防御系统。在古代,汉长城具有作战、指挥、预警、通信、屯兵等多种功能^[1];在当代,作为宝贵的文化遗产资源,汉长城具有其独特的历史文化意义和社会经济价值。烽燧林立是汉长城的显著特点^[2],在多地段落存在以烽燧排布组成烽线,而不修筑墙体的情况。烽燧又称烽火台、亭燧,是利用声、光等信号传递军情的高台建筑^[2]。烽燧所采用的声光系统的烽火信号,包括“烽”(薪草点燃后的火光)、“表”(将红白二色的缯布悬挂在高处)、“烟”(薪草点燃后的狼烟)、“苣火”(将火把悬挂在高处)、“积薪”(点燃后既

有光又有烟)5类^[3-4]。在测绘和工程建设条件局限的汉代,烽燧的空间设置应当充分利用了区域自然人文环境要素,从而完成其戍守、通信、屯兵、屯田等多种历史功能,其背后的地理因子和量化规律是还原汉代地理空间的认知及测绘工程技术水平的基础。

考古遗址信息的空间性和复杂性使得地理信息系统(geographic information system, GIS)技术与方法被广泛应用于考古遗址空间数据挖掘^[5-8],其中对考古遗址空间分布及其与赋存环境关系的研究起源于20世纪80年代,欧美学者首先将目光聚焦于地形与考古遗址的空间关联性问题,后扩展到其他地表构成要素对遗址空间分布模式的影响,并逐渐形成景观考古学(landscape archaeology),关注人类生活与生产活动对复杂的地表空间形态的依存关系,探讨人类对复杂人地关系和文化结构的认知^[8-9]。其主要研究内容有3个方面:基于空间统计的人类活动与地理要素或特征的相关性研究^[10-14]、基于时空过程模拟的人类活动过程模拟预测^[15-18]和视域分析^[19]。

由于遗址资源的丰富性和语言文字的延续性,当前国内的空间信息技术考古应用研究多采

用简单统计模型或空间分析方法开展。高超等^[20]、Yan 等^[21]和李政委^[22]综合运用密度分析、距离分析、缓冲区分析方法,对巢湖西岸史前遗址、河南史前聚落和陕西石窟寺的空间分布规律及成因进行了研究。姜梦迪等^[23]运用二元逻辑斯蒂回归模型分析兰州新石器遗址与地形等环境要素的关系。而针对汉长城或其他防御工事的研究仍多是基于简帛学和文献法的定性描述,无法肯定回答其空间分布背后的地理要素及量化规律。周杨^[24]综合运用表面分析、水文分析、视域分析、成本面与最佳路径分析方法研究北魏六镇防御体系。刘建军^[25]、曹迎春等^[26]通过剖面分析研究明长城及地形的关系,运用缓冲区分析研究明长城和水系的分布关系,基于视域分析评估防御工事之间的分布关系。贾翔等^[27]运用基于 GIS 的距离分析和可视性分析的方法研究鄯善县烽燧系统,分析地表最短路径和烽燧间通视性,还原了烽燧可能传播方向和路线。

本文以甘肃省玉门市段汉长城作为案例,根据历史文献中对烽燧性质和功能的描述,以及野外调查获得的经验性规律,提取自然环境和人类活动两类可能影响烽燧空间选址的 6 种假设因子,引入空间点模式分析和假设检验的定量方法,试图以地学视角探明:1) 汉长城烽燧的空间选址综合考虑的地理因子及其量化规律;2) 汉长城烽燧的空间选址的量化规律如何承载其历史功能。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区域为甘肃省酒泉市下属的玉门市(如

图 1 所示),位于河西走廊西端的疏勒河流域,地处西北干旱半干旱地区和青藏高寒地区的交界处,介于祁连山、阿尔金山东段与马鬃山的地带之间,东部为黑山、宽滩山残丘,西部为库木塔格沙漠。汉武帝时始建玉门县,隶属酒泉郡西部都尉辖区^[28]。气候条件上,玉门市大风沙尘天气多、降水量少、蒸发量大、日照时间长、植被稀疏,多为戈壁荒漠,生态环境较为脆弱,气候特征为典型的大陆性荒漠气候。

研究对象为河西汉塞的玉门市段(图 1),包括今玉门市饮马农场、青山农场、花海乡以北,汉代干齐县花海绿洲以北一线的汉塞烽燧遗址^[28-29]。汉武帝元鼎六年(公元前 111 年)至元封元年(公元前 110 年),击败胡人,俘虏楼兰王,遣人修筑酒泉至玉门关段的疏勒河长城^[28]。部分汉塞属于外有植物枝干框架、内填沙砾的结构,是河西汉塞遗址遗迹保存较好的一段^[30]。其次,除东晋时期西凉割据政权曾短期利用和维修,各代均未重加利用,或可将年代区分开;故研究对象的年代较为统一,文化内涵较为单纯,有利于统一时间尺度针对汉代研究^[31]。

1.2 数据来源与处理

研究数据为课题组于 2018 年 4 月在玉门市汉长城沿线实地考察采用 GPS 测得的烽燧遗址矢量数据集,包括玉门市境内汉长城墙体的线状要素数据和烽燧、城障、墓葬、碑刻等 12 种不同类型遗址的点要素数据。由于玉门市境内的长城考古遗址年代久远,主要受风蚀作用和人为取土、取薪破坏,遗址数量有限,实测烽燧 41 座、城址 16 座,其余遗址类型(包括墓葬、碑刻、寺庙遗址)26 座。数据同时与吴祁骧《河西汉塞调查与研究》

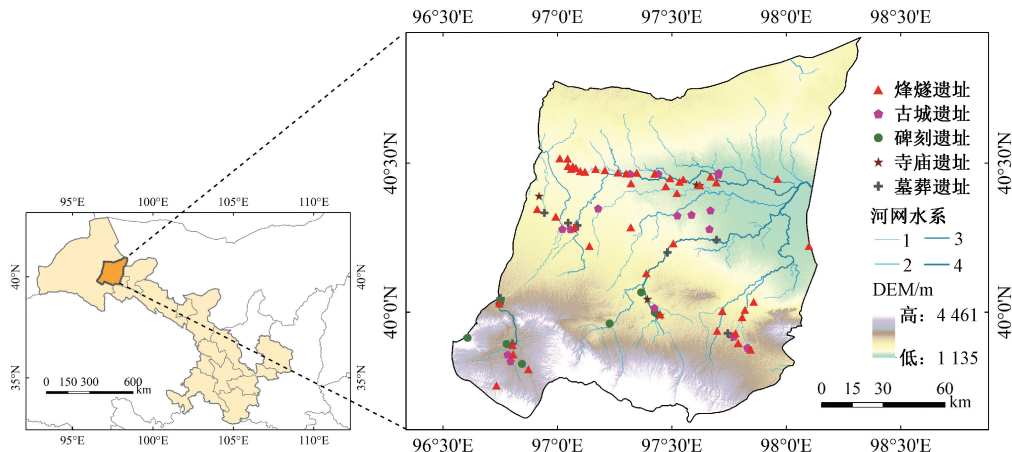


图 1 研究区与考古遗址分布

Fig. 1 Study area and spatial distribution of archaeological sites

中实地调查并绘制的汉长城遗址地图中的烽燧名称、编号等信息进行对比、筛选和校验。

此外,本文使用的基础地理数据主要包括玉门市县级行政区矢量数据及美国地质调查局的空间分辨率 30 m 的 ASTER-GDEM V2 数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据(<http://earthexplorer.usgs.gov>)。数据预处理主要是基于 ArcGIS 10.6 对 DEM 分幅数据进行镶嵌,并按照玉门市行政区矢量数据进行裁剪,然后通过重分类和山体阴影分析进行彩色渲染。

本文研究对象的赋存环境,并非现今甘肃省玉门市境内的自然环境,而是两汉时期(公元前 202 年—公元 220 年)酒泉郡下属玉门县区域内的古环境。相关研究^[32-35]表明,因地处内陆的空间位置、第四纪沉积物质广泛分布的地质条件、气候干冷化趋势及过去军事和农业活动影响,自秦汉以来疏勒河下游地区沙漠化持续加剧,使绿洲退化、湖泊干涸、河道退缩。故汉代玉门县区域的自然环境同当代相比,地形地貌相对稳定,但地表植被和河流水系有较大差异。因此,河网水系的提取主要以 DEM 数据的水文分析为基础,同时结合高分辨率遥感影像目视解译及汉代河西地区水系地图等资料进行辅助验证,调整水道的提取阈值,使其不局限于今疏勒河中下游支系的昌马河、石油河、白杨河等河流,同时包含了古水道和暴发季节性洪水时作为潜在水道的沟谷,能够基本反映汉代该地区河网水系的分布情况。此外,通过对 DEM 数据的表面分析,计算并提取其他地表构成特征要素,如坡度、坡向。

1.3 研究方法

本文试图探究的烽燧空间选址的影响因子,实际上是通过研究烽燧遗址的空间分布实现的。经过统计假设检验的影响因子(数值或空间位置)和烽燧遗址点空间分布的相关性,即可表明烽燧选址对该影响因子存在敏感性。依据前期汉长城历史文献调研归纳所得的烽燧在防御体系中的性质与功能,将基于玉门市 DEM 数据提取的 7 种可能影响烽燧选址的影响因子,分为自然环境(高程、坡度、坡向以及与最近水系距离)和人类活动(城障遗址位置、其他类型例如墓葬和碑刻遗址的位置)2 大类。基于自然环境和人类活动 2 类因子不同的数据类型及其对烽燧遗址点空间分布的不同影响机制,运用 R 语言,分别采用核密度估计法(kernel density estimation, KDE)和基

于距离的点模式分析(point pattern analysis, PPA)方法,量化烽燧遗址点的空间分布与自然环境因子的数值分布和人类活动因子的空间位置之间的相关性,并结合假设检验的思想和蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation)的方法对相关性进行统计显著性检验,从而判断各因子对烽燧空间选址的敏感性。最后结合文献资料,分析烽燧遗址空间分布的定量规律,以及烽燧空间选址对地理空间构成要素的利用如何达成其多种历史功能,同时试图探讨烽燧建造选址反映出的汉代地理空间认知与技术水平。研究技术路线如图 2 所示。

针对自然环境因子,通过核密度估计法分别模拟烽燧遗址处的高程、坡度、坡向以及最近邻水系距离 4 种因子数值的分布,作为观测分布。同时借鉴蒙特卡洛模拟的思想,在玉门市内取 500 个空间随机分布点,采用相同方法分别统计随机点处的高程、坡度、坡向和最近邻水系的距离的数值,模拟随机分布模式下各自然环境因子的数值分布。最后将遗址点的随机分布模式和观测分布模式下各自然环境因子的数值分布进行比较,判断各因子对烽燧空间选址的敏感性并确定敏感区间。

针对人类活动因子,采用空间点模式分析量化烽燧遗址点与包括城障等其他类型遗址点的空间分布关系。由于遗址点样本容量较小,基于空间密度的点模式分析的统计学意义有限,故采用基于空间距离的分析模型。首先采用 K 函数(Ripley's K function)分别对烽燧和城障遗址的空间聚集分布模式进行分析,再运用 K -Cross 函数(K -Cross function, K fold cross validation)和对相关 g 函数(g function, pair correlation function, PCF)定量刻画烽燧和城障及其他遗址点空间分布之间的相关性。最后运用蒙特卡洛模拟的方法,通过对玉门市内 99 组随机分布点分布的模拟,得到随机分布模式下的置信区间(confidence interval, CI),判断烽燧与城障的空间相关性是否具有统计显著性,从而确定人类活动遗址对烽燧选址的敏感性及其敏感区间。

其中,核密度估计是根据数据本身的特点和性质来拟合分布的方法,由指定的某一带宽将密度分布直方图拟合为核密度曲线。设 n 个遗址点空间位置分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 代表空间权重的核函数为 C , 带宽或窗口为 h , 则空间位置 x 处

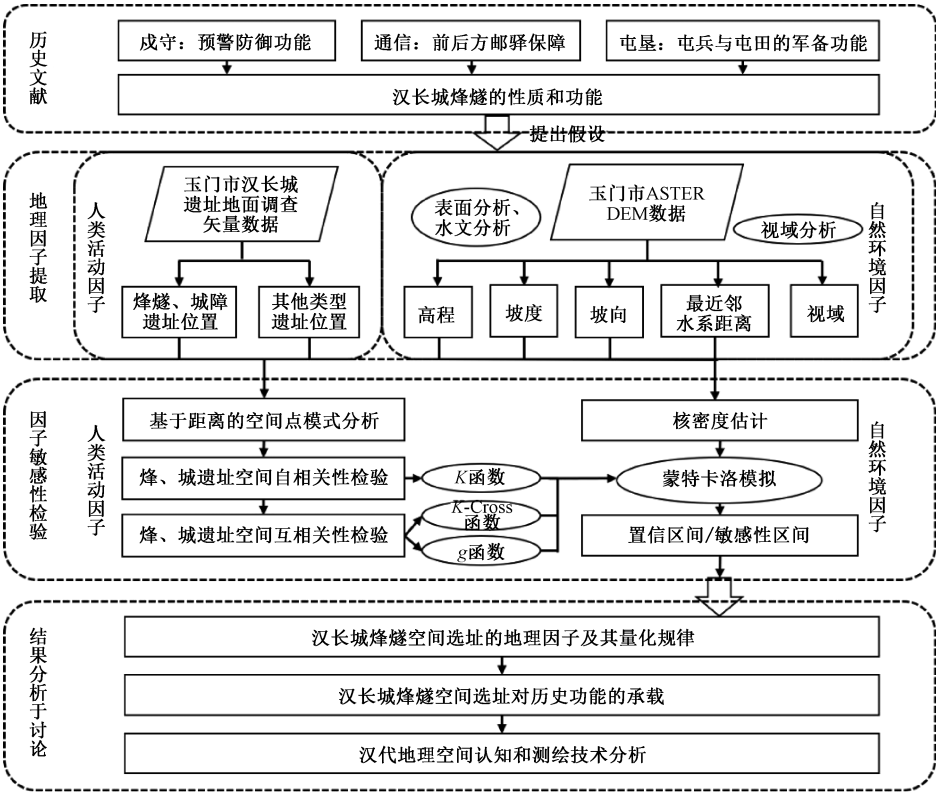


图 2 本文技术路线与工作流程

Fig. 2 The technical route and workflow of this study

概率密度函数估计值 $\hat{f}_h(x)$ 的计算如下所示：

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n C\left(\frac{x - x_i}{h}\right). \tag{1}$$

K 函数在平均最近邻法的基础上统计所有距离半径内点与点之间的距离,从而评估点的空间离散和聚集程度。设 A 为研究区总面积; n 为烽燧遗址点数量; d_{ij} 是第 i 个烽燧点与第 j 个烽燧点之间的距离; I_h 为指标函数,指带宽 h 内烽燧点个数; w_{ij} 是权重函数,用于边缘效应校正;则单位半径 h 处的函数值如下所示：

$$K(h) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}^{-1} I_h(d_{ij}). \tag{2}$$

K 函数的期望函数由单位半径 h 独立决定。设以 λ 表示单位面积内事件点的平均密度,可以通过计算单位圆面积的方式计算在随机分布模式下数学期望 $E(h)$,如下所示：

$$E(h) = \frac{\pi \lambda h^2}{\lambda} = \pi h^2. \tag{3}$$

K -Cross 函数,在 K 函数基础上,可判断不同类别点之间的空间互相关性。将烽燧和城障遗址点分别分解为 i 个大小相似的子集,并以城障遗址点的各子集作为验证集,与烽燧遗址点的 (i -

1) 个子集合并后估计模型参数,计算预测误差平方和并取其均值最小作为最优模型。设 $\hat{y}_i^{(-i)}$ 表示排除第 ($i-1$) 个观察值后用其他所有观察值建模求得的对第 i 个观察值的拟合值, n 为最终训练模型数量,则交叉验证得分 (cross validation score, CV) 即函数值如下所示：

$$CV(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i^{(-i)})^2. \tag{4}$$

对相关 g 函数则在 K 函数的基础上,统计单位距离半径不断增加的圆环内的点的空间关联,以消除累积效应。设 A 为研究区总面积; n_1 和 x_i 是烽燧遗址点数量和位置; n_2 和 y_j 是其他类型 (如城障) 遗址点数量和位置; w_{ij} 是权重函数,用于边缘效应校正;而 k_h 为核函数,对距离越近的点赋予越大的权重,其中 h 为带宽,则指定半径 r 处的函数值如下所示：

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} w_{ij}^{-1} k_h(r - |x_i - y_j|). \tag{5}$$

2 结果与讨论

根据多次野外考察工作经验和大量文献调

研,玉门市境内汉烽燧遗址空间分布的定性规律较为明确。一部分烽燧是位于玉门市中北部走廊平原,沿长城墙体呈东西向线性分布的塞烽,通视性是确定烽燧间距离的充要条件;另一部分烽燧则是长城以南的分布于玉门市南部的丘陵、山地区域的警烽,兼有线性和非线性分布模式^[36]。但烽燧建址选择的自然环境条件及其与其他类型的建筑工事分布的定量规律尚不明确,以下将分别讨论。

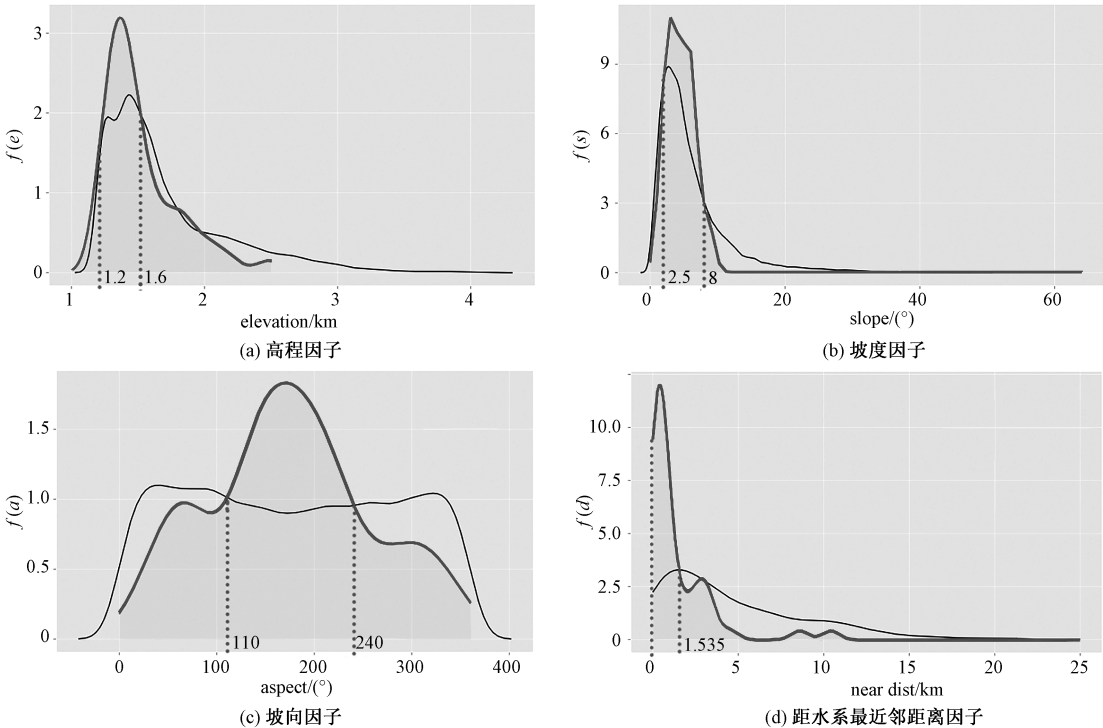
2.1 自然环境影响因子敏感性分析

结果显示,烽燧遗址的空间分布均在 4 种自然环境因子的不同数值范围内表现出显著的空间聚集,即 4 种自然环境因子均在不同数值范围内对烽燧的空间选址具有敏感性(如图 3 所示)。烽燧遗址的高程分布与汉以后朝代的长城略有差异,少建于高山、丘陵等崎岖地形,多分布于中低海拔地区,同时在约 1 200~1 600 m 范围内的山麓平原区表现出了集中性。其背后原因主要是该区域地势低平,处疏勒河干流及其支流昌马河、石油河、白杨河等流域,多绿洲分布,相比于周围流动性沙丘更易于修筑较稳固的汉长城防御工事^[28],同时降低了建造难度和成本。

烽燧遗址在坡度上的分布显示了与模拟随机分布模式基本相同的趋势。研究区整体地势平缓,坡度在约 0°~16°,但仍可见烽燧点集中分布于坡度值为 2.5°~8° 的区域内,主要是由于昌马河以东广阔的岗状平原,地形有凹凸起伏但坡度不大,同时风力剥蚀作用强烈,野外考察工作中多见汉烽燧遗址分布于戈壁区域的风蚀台地,充分利用了微地形条件。

烽燧遗址在坡向上的分布与随机分布模式差异较大,观测分布聚集在坡向值在约 110°~240°,即南偏东 70°~南偏西 60°的半阳坡。悬泉汉简解译研究表明汉代敦煌酒泉地区气候干冷,自然条件较差,灾害常发,如西北方向风暴(沙尘暴)^[31];而阳坡光照条件好,较温暖、避风沙,植被类型较多。对玉门市北部祁连山前山及山麓地带的警烽,烽燧选址尽可能保证了燧卒拥有相对良好的生活条件。但对玉门市北部塞烽,由于地处平原地区,且 DEM 数据存在一定误差,坡向结果不具备参考意义。

烽燧选址与水系分布具有显著的相关性,且烽燧选址集中分布于距最近邻水系 0~1 535 m 范围内的区域,说明距最近邻水系距离在该范围内



横坐标表示 4 种因子的值,纵坐标表示核密度估计值;粗线代表烽燧遗址点处各因子的核密度估计曲线;细线代表空间随机点处各因子的核密度估计曲线

图 3 4 种自然环境因子核密度估计曲线图

Fig. 3 Kernel density diagrams of four kinds of natural environmental factors

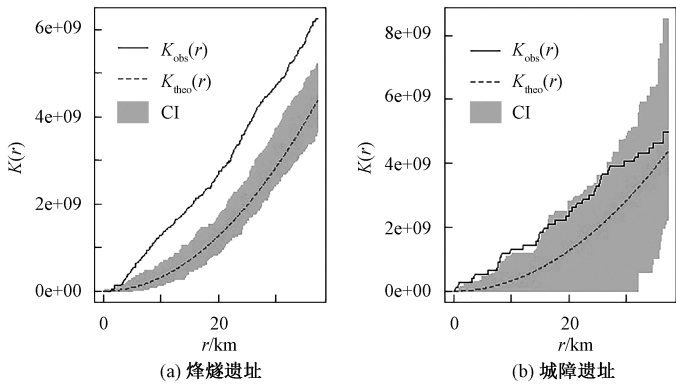
是烽燧空间选址的敏感因子。主要原因包括:其一,烽燧沿水系分布能够控制塞外水源,利用玉门境内干旱气候特征对塞外势力形成牵制,同时以水代兵达到防御目的;其二,驻扎烽燧的固定性和流动性人口数量较大^[31],仅居延、肩水二都尉所辖的常驻燧卒的数量就有 1 044~2 610 人^[1],相对汉代人口数量已相当可观,需要在选址时靠近水源以便补充;其三,汉代在河西地区加强军事防御的同时,利用水系和沙漠绿洲发展灌溉农业,实行“寓兵于农”的屯戍政策,开垦荒地、兴修水利、大规模屯田,以保障军队和其他边塞戍卒食物补给^[31-37],而烽燧设置在边塞屯田周围,以起防御警戒作用,故距离水系较近。

2.2 人类活动影响因子敏感性分析

由烽燧和城障遗址各自的空间分布聚集性检验结果(图 4)可知,烽燧遗址的观测曲线远高于期望曲线及置信区间,说明烽燧遗址的聚集分布具有统计显著性,而城障遗址则趋于随机分布。

该结果印证了烽燧以塞烽和警烽 2 种方式在结构与功能上的空间聚集性共同构成了汉长城防御系统的烽传子系统。长城沿线的塞烽以较短间距沿东西向线性聚集排布,以起到监控和防御作用;警烽则或以郡城为中心向四周辐射状延伸,或沿古道分布,负责塞内通讯、警备职能,将情报传回内地,再将内地指令传递给长城沿线^[36-38]。

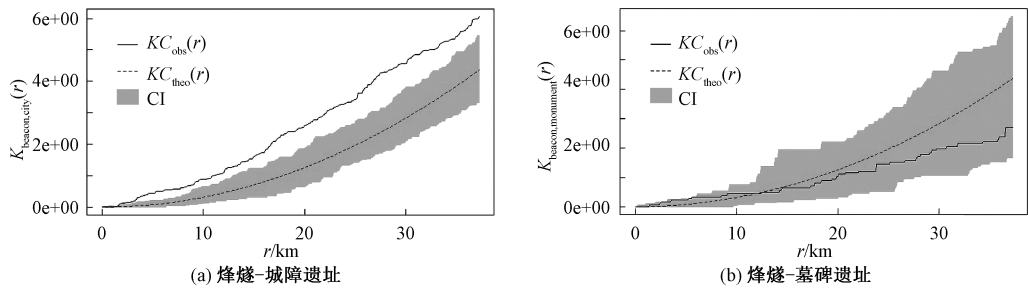
由烽燧和城障遗址空间分布的互相关检验结果的分析可知,烽燧和城障遗址点的 K -Cross 函数观测值曲线远远高于期望值曲线及置信区间(图 5),说明 2 种遗址点的空间分布呈显著的正相关,即烽燧选址对城障位置敏感。同时 g 函数结果(图 6)显示,两者互相关显著的范围在大约 2~20 km 的距离内,说明汉代长城防御系统中形成了由不同级别城市(一般自上而下包括边郡郡城、都尉县城、一般县城、障城、塞城等)构成的城障子系统,且单个子系统的结构和功能辐射范围在以最高级别的郡城为中心的 2~20 km 以内。



纵坐标 $K(r)$ 为 K 函数值,横坐标 r 为以每个烽燧遗址点为圆心的圆的半径,单位为 km;实线 $K_{\text{obs}}(r)$ 指 K 函数观测曲线,虚线 $K_{\text{theo}}(r)$ 指空间随机模式下 K 函数的期望曲线,灰色条带 CI 指空间随机模式下 99 组蒙特卡洛模拟的置信区间

图 4 烽燧遗址和城障遗址的 K 函数曲线图

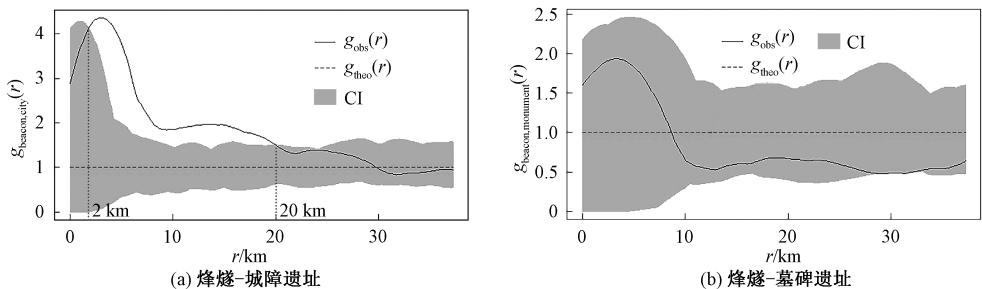
Fig. 4 The result of K function on beacon sites and on city sites



纵坐标为 K -Cross 函数值,横坐标 r 为以每个烽燧遗址点为圆心的圆的不同半径,单位为 km;实线 $K_{\text{obs}}(r)$ 指 K -Cross 函数观测曲线,虚线 $K_{\text{theo}}(r)$ 指 K -Cross 函数的期望曲线,灰色条带 CI 指空间随机模式下 99 组蒙特卡洛模拟的置信区间

图 5 烽燧-城障遗址和烽燧-墓碑遗址的 K -Cross 函数曲线图

Fig. 5 The result of K -Cross function on beacon-city sites and on beacon-gravestone sites



纵坐标为 g 函数值,横坐标 r 为以每个烽燧遗址点为圆心的圆的不同半径,单位为 km ; $g_{\text{obs}}(r)$ 指 g 函数观测曲线, $g_{\text{theo}}(r)$ 指 g 函数的期望曲线,灰色条带 CI 指空间随机模式下 99 组蒙特卡洛模拟的置信区间

图 6 烽燧-城障遗址和烽燧-墓碑遗址的 g 函数曲线图

Fig. 6 The result of g function on beacon-city sites and on beacon-gravestone sites

结合历史文献进行估算发现,在交通工具和驿道路网非常有限的汉代,行书速度约为 $2.2 \text{ km/h}^{[30]}$;一方面当城障和烽燧相距过小(小于 2 km)时,烽燧设置没有充分发挥视听信号可到达的最大距离,使信息传递效率下降,防御辐射范围缩小,代替人工车马进行长距离、低成本情报传递的目的就失去了意义。另一方面,当城障和烽燧相距过大(大于 20 km)时,由于人的视线虽然在理论上是无限延伸的,但人眼的分辨能力却是有限的,因而容易与周围自然景观元素混淆,从而无法保证顺利传递军事消息。

烽燧与城障间的配置距离是古人通过目视原则并结合实际测绘、建造和规划的经验,所得出的清晰辨认烽燧预警信号和成本最小化和效用最大化的平衡。与之相对照不难发现,烽燧遗址与墓葬和碑刻遗址的空间分布就完全不具有相关性,说明烽燧与城障的空间关联性并非出于人类活动的偶然性,而是通过二者的空间配置共同实现汉长城防御系统中前后方军情通信和战略指挥功能。

3 结论

本文基于 GIS 空间分析方法对汉长城(玉门市段)烽燧的空间选址影响因子的敏感性程度及其显著范围进行定量刻画,解读影响烽燧选址的自然环境和人类活动 2 类因子的关系,从而探究过去人类对空间的理解和利用。

1)从自然环境角度出发,汉长城烽燧的空间选址充分利用了高程、坡度、坡向、距水系最近邻距离以及基于景观的通视和视域等自然环境构成要素,各单一要素不仅满足防御和预警要求,而且兼顾了戍卒的生存居住环境,尽可能保障军备的

当地补充。其建址综合考虑了其防御、屯垦和通信 3 大功能所需的地理环境,在公元前 202 年—公元 220 年的汉代,建造方案充分运用了古人的实践经验,侧面体现了汉代对地理环境空间认知和技术利用已具有较高水平。

2)从人类活动角度出发,汉长城烽燧的空间选址在围绕城址 $2 \sim 20 \text{ km}$ 的范围内表现出强相关性,而与其他人类活动遗址类型无关。研究从空间配置的角度论证了烽燧和城障在汉长城防御系统中的联防机制,以及长城防御系统和邮驿系统间的相互配合,即从视觉与听觉间接传递前线的敌情到采用单匹马或马车的形式达成成本和效用的平衡和优化,其空间配置在古代具有很高的创新性。

参考文献

[1] 刘庆,陈海燕,董耀会. 中国长城志:军事卷[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社,2016.

[2] 黄永美,徐卫民. 汉长城研究综述[J]. 中国史研究动态,2012(5):40-47.

[3] 任洁,李严,张玉坤. 阴山—河套平原地区西汉长城防御体系分布结构研究[J]. 中国文化遗产,2017(3):100-106.

[4] 任洁. 西汉长城防御体系研究:以阴山—河套地区为例[D]. 天津:天津大学,2017.

[5] Church T, Brandon J R, Burgett G R. GIS applications in archaeology: method in search of theory[M]//Wescott K L, Brandon R J. Practical applications of GIS for archaeologists: a predictive modeling toolkit. London: Taylor & Francis, 2000.

[6] Conolly J, Lake M. Geographical information systems in archaeology [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2006.

[7] 骆磊. 丝绸之路(南道)屯戍遗址空间考古研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016.

- [8] 李凡. GIS 在历史、文化地理学研究中的应用及展望[J]. 地理与地理信息科学, 2008, 24(1): 21-26, 48.
- [9] 张海. 景观考古学: 理论、方法与实践[J]. 南方文物, 2010(4): 8-17. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6275. 2010. 04. 002.
- [10] Kvamme K L. A predictive site location model on the High Plains: an example with an independent test [J]. Plains Anthropologist, 1992, 37 (138): 19-40. DOI: 10. 1080/ 2052546. 1992. 1190. 9662.
- [11] Llobera M. Building past landscape perception with GIS: understanding topographic prominence [J]. Journal of Archaeological Science, 2001, 28(9): 1005-1014. DOI: 10. 1006/jasc. 2001. 0720.
- [12] Kowalewski S A. Regional settlement pattern studies [J]. Journal of Archaeological Research, 2008, 16(3): 225-285. DOI: 10. 1007/s10814-008-9020-8.
- [13] Bocinsky R K. Extrinsic site defensibility and landscape-based archaeological inference: an example from the Northwest Coast[J]. Journal of Anthropological Archaeology, 2014, 35: 164-176. DOI: 10. 1016/j. jaa. 2014. 05. 003.
- [14] Earley-Spadoni T. Landscapes of warfare: intervisibility analysis of Early Iron and Urartian fire beacon stations (Armenia) [J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2015, 3: 22-30. DOI: 10. 1016/j. jasrep. 2015. 05. 008.
- [15] Griffin A, Stanish C. An agent-based model of prehistoric settlement patterns and political consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia [J]. Structure and Dynamics, 2007, 2(2): 1-49.
- [16] Schachner G. Emergence and collapse of early villages: models of Central Mesa Verde archaeology [J]. American Anthropologist, 2014, 116(1): 215.
- [17] Lake M W, Woodman P E. Visibility studies in archaeology: a review and case study [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2003, 30(5): 689-707.
- [18] Murphy K M, Gittings B, Crow J. Visibility analysis of the Roman communication network in southern Scotland [J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2018, 17: 111-124. DOI: 10. 1016/j. jasrep. 2017. 10. 047.
- [19] Rua H, Gonçalves A B, Figueiredo R. Assessment of the Lines of Torres Vedras defensive system with visibility analysis [J]. Journal of Archaeological Science, 2013, 40(4): 2113-2123. DOI: 10. 1016/j. jas. 2012. 12. 012.
- [20] 高超, 王心源, 金高洁, 等. 巢湖西湖南岸新石器: 商周遗址空间分布规律及其成因[J]. 地理研究, 2009, 28(4): 979-989.
- [21] Yan L J, Shi Y S, Yang R X, et al. The analysis of the spatial pattern of prehistoric settlement sites based on GIS and spatial data mining [C] // 2011 19th International Conference on Geoinformatics. June 24-26, 2011, Shanghai, China. IEEE, 2011: 1-4. DOI: 10. 1109/GeoInformatics. 2011. 5980858.
- [22] 李政委. 陕西省石窟寺时空分布及其影响因素研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [23] 姜梦迪, 张鹏丽, 梁博毅, 等. 兰州盆地新石器时期遗址分布与地形的关系研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 27-37. DOI: 10. 12118/j. issn. 1000-6060. 2020. 01. 04.
- [24] 周杨. 北魏六镇防线的空间分析[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2017(12): 25-36.
- [25] 刘建军. 明长城甘肃镇防御体系及其空间分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [26] 曹迎春, 张玉坤, 张吴雁. 基于 GIS 的明代长城边防图集地图道路复原: 以大同镇为例[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(2): 138-144. DOI: 10. 13320/j. cnki. jauh. 2014. 0053.
- [27] 贾翔, 李莉, 李琪, 等. 基于 GIS 和可视性分析的鄯善县烽燧系统研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 13-22. DOI: 10. 14100/j. cnki. 1008-9659. 2017. 02. 003.
- [28] 黄永美, 徐卫民. 汉长城的修建、功能及现代意义[J]. 科学经济社会, 2012, 30(3): 16-19.
- [29] 黄永美. 西汉长城若干问题研究[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- [30] 吴弼襄. 河西汉塞调查与研究[M]. 北京: 文物出版社, 2005.
- [31] 王子今. 汉简河西社会史料研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2017.
- [32] 程弘毅. 河西地区历史时期沙漠化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [33] 郑炳林, 曹红. 汉唐间疏勒河下游地区环境演变[J]. 敦煌学辑刊, 2012(3): 1-20. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-6252. 2012. 03. 001.
- [34] 齐敬辉. 疏勒河流域绿洲生态演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [35] 孟艳霞. 汉简所及敦煌地区水利建设与管理[J]. 敦煌研究, 2016(2): 73-78. DOI: 10. 13584/j. cnki. issn1000-4106. 2016. 02. 010.
- [36] 李正宇. 敦煌郡的边塞长城及烽警系统[J]. 敦煌研究, 1995(2): 120-126.
- [37] 何双全. 敦煌悬泉汉简内容概述[J]. 文物, 2000(5): 21-26. DOI: 10. 13619/j. cnki. cn11-1532/k. 2000. 05. 002.
- [38] 李岩云. 论敦煌西湖南岸长城沿线烽燧的设置原则[J]. 敦煌学辑刊, 2013(2): 98-113.