

点分布建模和可视性分析 在长城研究中的应用

——以燕长城赤峰段为例



李泽浩

(伦敦大学学院)

摘要:点分布建模和可视性分析是考古学研究中的前沿方法和重要手段。本文结合了这两种方法,对燕长城赤峰段的军事防御体系的内部运作机制进行了研究。第一部分利用点分布建模法探索了烽燧、障城等附属遗址在地形因素影响下的分布规律,并显示了遗址空间分布的层级性。第二部分证明了烽燧的可视性,具体研究了烽燧之间的烽燧信息传输和控制范围,揭示了战国燕长城赤峰段存在着较复杂的军事防御策略。

关键词:点分布建模;可视性分析;空间分析;长城

Abstract: Point pattern modeling and visibility analysis are the cutting-edge methods in the spatial analysis of archaeological study. This paper combines these two methods to study the internal mechanism of the military defense system of the Great Wall of Yan state in the Warring States period. In this paper, point pattern modeling is largely used to explore the distribution law of the Great Wall's affiliated fortifications, such as Fengsui (watchtowers) and Zhangcheng (forts), under the influence of topographic and environmental factors. On this basis, the hierarchical spatial distribution of the sites is well shown. In terms of visibility, this paper specifically studies the intervisibility among the Fengsui, as well as their controlling areas, which reveals that there were indeed complex military defense strategies within the early Great Wall in the Warring States period.

Key Words: point pattern modeling; visibility analysis; spatial analysis; the Great Wall

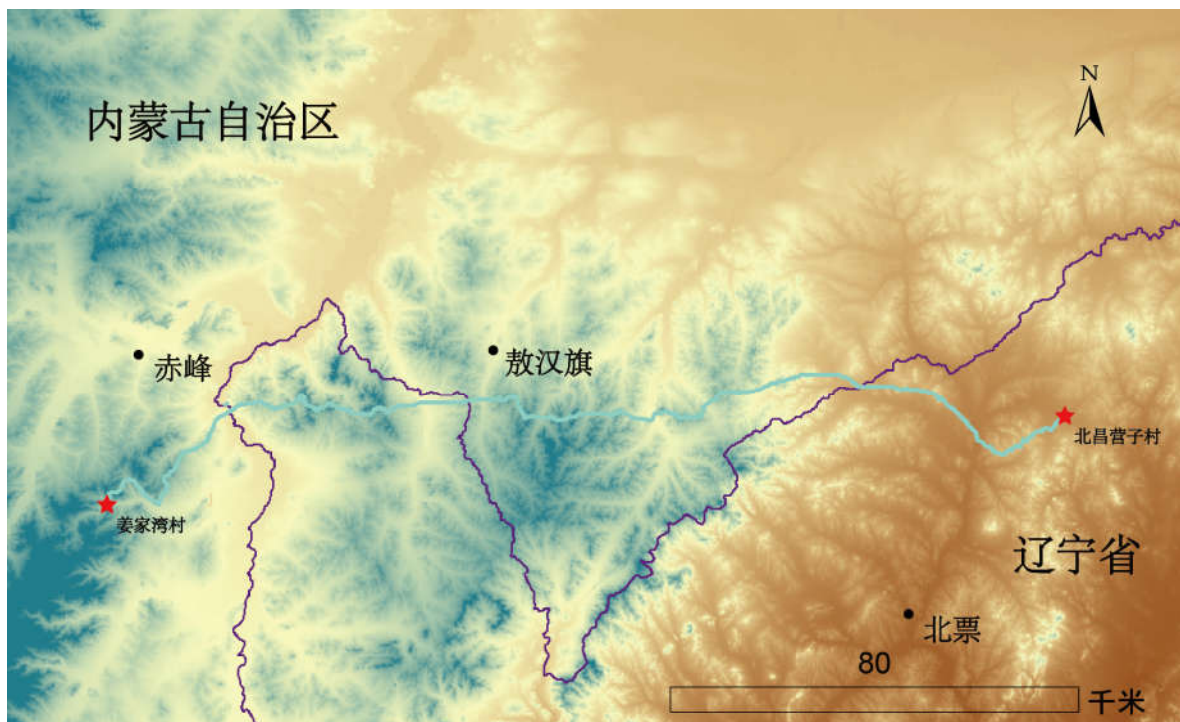
在考古研究中,学者经常会思考:“整个遗址群的位置是否遵循着某种空间分布模式?”或者“这些遗址为何会在某些特定区域内分布?”为了更好地回答这类问题,GIS建模作为空间分析中的重要手段,逐渐被东西方考古学界接受,成为研究遗址分布模式时常用的分析手段。

关于近年来国内GIS建模考古研究的基本情况,王琳和武虹进行过系统性的综述^①,本文不再赘述。整体来看,国内学界对GIS与空间分析的重视程度在近二十年内显著增加,涌现出了诸多中外结合的GIS考古项目,如河南洹河流域考古地理信息系统、河南颍河上游联合调查、赤峰地区的环境考古学研究、鲁东南沿海地区考古调查、多源遥感数据与历史文献集成的半干旱地区古长城分布及其环境响应研究等等。从

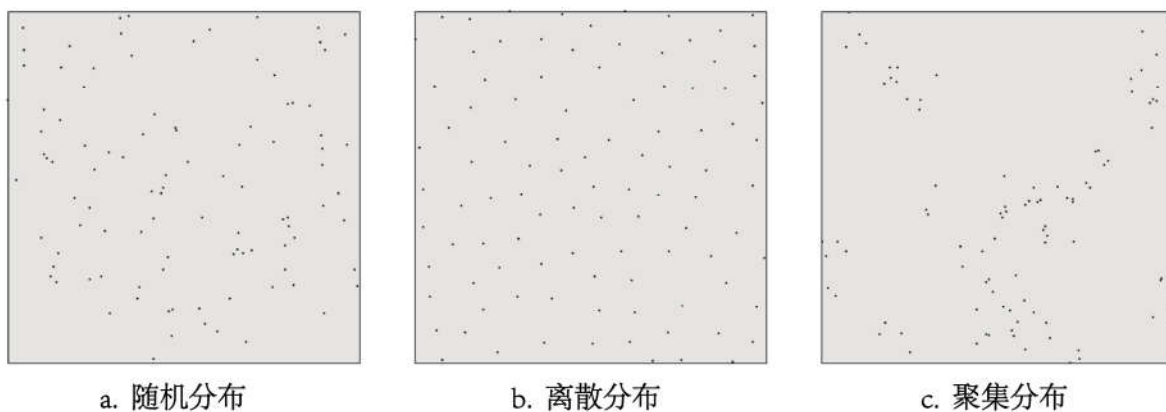
内容来看,这些研究集中于流域调查项目,涉及面广,涵盖了遗址资源域、人地关系变迁等多个热点问题,但是很少涉及到遗址点分布建模的研究。

实际上从上世纪80年代发展至今,已有许多方式可以深入研究遗址空间分布模式。目前,比较前沿的分析方法集中体现在点分布建模(Point Pattern Modeling)和可视性分析(Visibility Analysis)中。前者可以通过对遗址的分布位置进行建模,探索其背后的分布规律,从而对看似无规律可循的遗址点进行更为深入的解释;后者可以为遗址的选址提供更多功能和认知层面的阐释。

作为防御工事,烽燧和障城的建设具有一定的计划性和功能性,其防御策略内化在了对遗址选位之中,因此很适合用空间分析法进行探索。在数十年的



图一 燕北长城赤峰段大致走向图



图二 三种分布模式示意图

长城研究中,尽管“军事防御体系”一直是中心话题,鲜有学者对体系的运作方式进行深究。由于方法和理论缺少突破,研究者多以位置描述和功能推测为主要手段,难以对结论进行有效验证。对比之下,空间分析法可以为研究者提供崭新的景观视角,从而对貌似已经研究透彻的遗址群提供更多、更深入的解释。

本文选取燕北长城赤峰段作为案例,是因为它的分布相对独立、保存相对完整。在以往的考古研究中,由于文献的匮乏,该段长城的复杂性常被简化为一系列点和线的结合。

该段长城西起内蒙古自治区喀喇沁旗姜家湾村,横跨元宝山区、建平县、敖汉旗、北票市,东抵阜新市北昌营子村(图一)。据统计,该段长城总长度大约长240公里左右。最高处为靠近西部起点处的姜家湾段长城和董家窝棚-梁家窝铺段长城,海拔接近1200

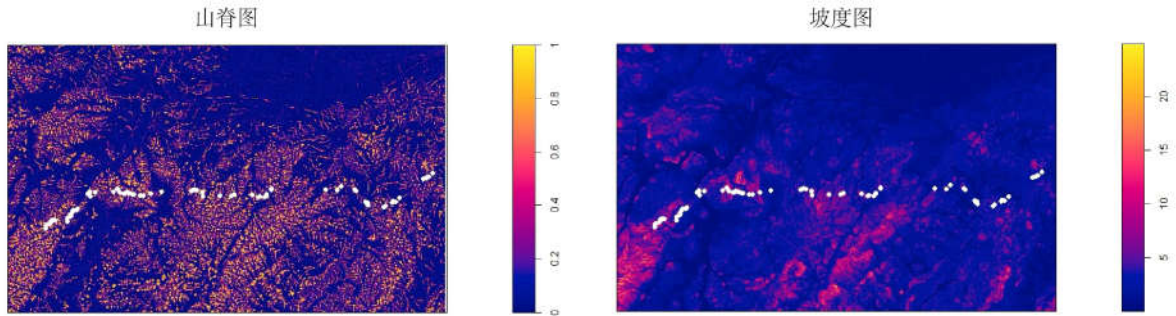
米;最低处位于阜新市内的六合段长城,海拔为200米,全段落差将近1000米。

一、点分布建模

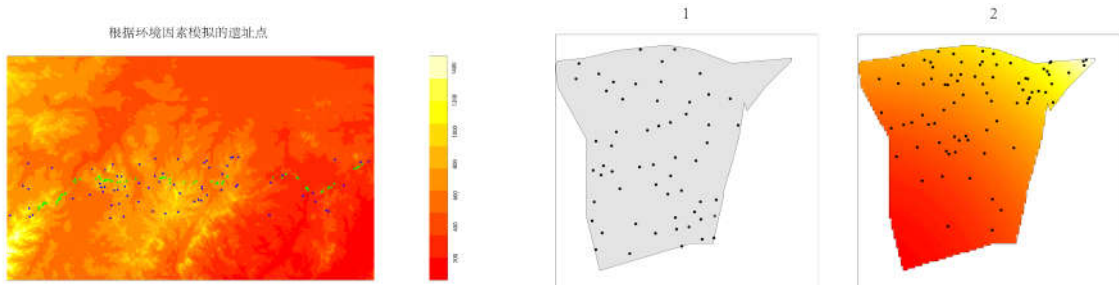
概括来说,点分布建模是将遗址群视为点群,然后用空间统计学方法研究他们的分布规律。如果遗址的分布既不受地表因素的影响,也不受遗址之间关系的影响,那么遗址的分布应该遵循完全空间随机(Complete Spatial Randomness)。

然而,在真实世界中,很少有完全空间随机的分布模式,大部分的遗址会在一定的尺度下遵循着某种分布规律,或离散分布、或聚集分布(图二)。这种现象的原因有两方面:地理背景与相对位置关系。

遗址的地理背景是不同的,有许多自然因素会影响遗址的分布,比如海拔高度、地形坡度、水文条件、



图三 Landserf 提取的坡度与山脊图,黑色圆圈为长城的烽燧、障城等遗址



图四 根据选址模型随机生成的障城烽燧模拟
(绿色为烽燧遗址,蓝色为随机模拟点)

降水条件、土壤肥沃度等。但是这些因素并非同等重要,我们经常需要利用回归分析来筛选影响力最大的关键因素。回归分析用研究区域内的所有环境因素作为权重,来重新模拟遗址密度,从而得到最优的影响因素。这些环境因素被考古学者称为“一阶变量”(first-order effect)^②,探索最优变量的过程即被称为“一阶效应建模”。

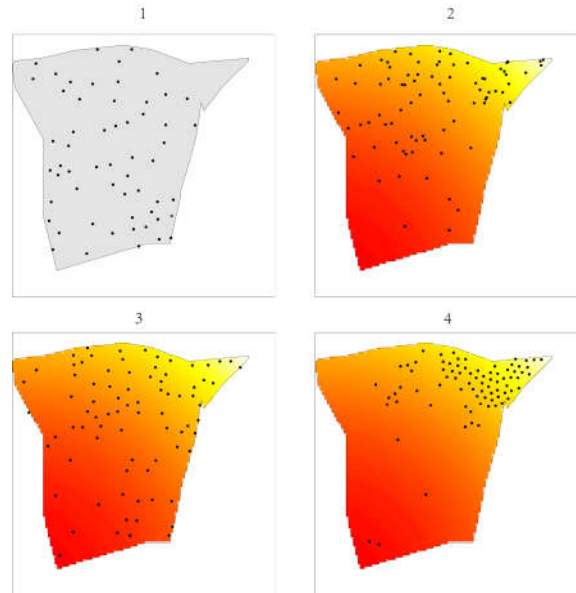
对于遗址群而言,仅考虑环境因素是不够的,因为遗址之间的相对位置关系同等重要。这种相对位置关系被考古学者称为遗址分布的“二阶变量”(Second-order effect),探索遗址之间相对位置关系的过程也被称为“二阶效应建模”^③。

(一)一阶效应建模

1.数据来源

本文所涉及的一阶变量产生于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。目前,在考古学界流行的数字高程模型有两类,一类是来自于美国航空航天局(NASA)和日本产经省(METI)发布的 ASTER Global DEM,其精度为 30 米。另一类是美国航空航天局(NASA)发布的 SRTM 90m Digital Elevation Database,其精度为 30 米。

从 DEM 的生成方式的角度来说,SRTM 的可靠性比 ASTER 更优秀。SRTM 使用雷达观测来直接构建 DEM,它可以透过地表植被,直接到达地表,从而获得较准确的数据。而 ASTER 是通过影像和摄影技术提取,通过算法处理得到 DEM,在研究中容易产生较大的误差。因此,本研究采用的是 SRTM 30m DEM。



图五 遗址分布模式示意图

(1:未考虑降水量,区域内随机分布;2:考虑降水量,区域内随机分布;3:考虑降水量,区域内离散分布,间距为 300 米;4:考虑降水量,小尺度内离散分布,大尺度内聚集分布)

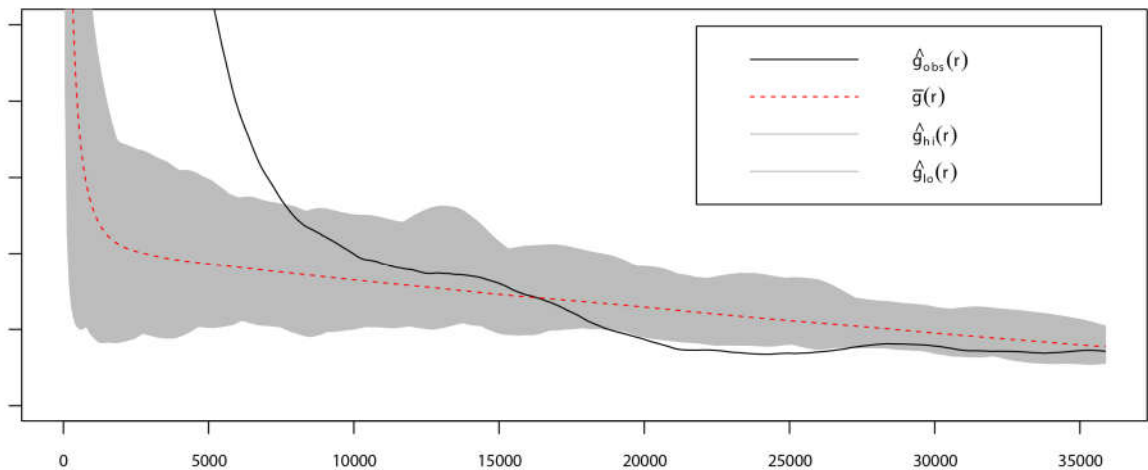
本文涉及的长城沿线的烽燧及障城遗址主要来源于中国长城遗产网站的数据库。我们根据长城资源调查报告^④、考古调查报告、卫星影像图等进行了精校,并对部分明显错误的遗址进行了重新分类。

2.一阶变量

考古学者常在 ArcMap 软件下生成坡度图和坡向图。笼统来说,它们的生成通常依赖于两类算法,即 Zevenbergen & Thorne 算法,和 Horn 算法,二者的区别主要在于他们如何使用相邻的像元^⑤。不论选取哪一种算法,DEM 高程值的微小误差都可能会导致较大的数值差异,因为这两种算法均使用 3x3 的计算窗口,对像元值很敏感。

为了减少误差,我们可以使用 Landserf 软件中^⑥的 Evans 算法,它可以通过增加窗口大小来减少这种误差,因此更适合进行大范围的地形评估^⑦。它还可以根据学者的定义来生成不同规模的山脊、山谷、山顶等。

本研究利用 Landserf 生成了海拔高度、坡度、坡向、山脊等变量,并将结果作为一阶变量(图三),输入 R 软件中进行一阶效应建模。



图六 一阶效应的对关联函数

红色的点状线代表模型的理论值,如果观察值(黑线)在某个半径内分布在包络范围内,则代表它的分布模式很可能是随机的。如果黑线高于或低于包络范围,则可能表明观察的遗址的分布模式在这些半径下具有特殊意义。

3. 选址模型

加载选定的变量后,我们进行了回归分析来确定重要变量。根据模型的拟合结果,我们可以确定海拔高度和山脊是更为重要的变量,坡度和坡向是相对较弱的变量。换句话说,在本研究区域内,防御工事受海拔和山脊影响较大,防御工事更可能分布在海拔较高、距离山脊较近的地区。这与我们对障城和烽燧遗址分布的常识性判断是相符的。

为了验证这一判断,我们根据该模型在长城的分布区域内模拟了一系列随机点。可以看出,随机点的分布与长城烽燧障城遗址的真实分布情况十分接近(图四),侧面证实了模型的可用性。

(二)二阶效应建模

通过一阶效应建模,我们完成了对环境变量的控制,之后的二阶效应建模可以在此基础上对遗址间的聚类关系进行进一步探索。

为了更好地解释二阶效应,我们利用 R 软件模拟了四种分布模式的示意图(图五),环境影响因素为降水量,红色区域降水量低,黄色区域降水量高。可以看出,影响遗址分布模式的因素不仅是环境因素。以左下图为例,尽管模拟点更倾向于分布在高降水量的区域,但是由于遗址之间的互相抑制,还是有较多模拟点分布在低降水量的区域。换句话说,遗址分布的二阶效应对遗址分布有很强的影响。

西方学者对二阶效应的研究由来已久。比较著名的方法是 Clark 和 Evans 在 1954 年提出的最近邻检验法(Nearest Neighbor Test),许多考古学者利用它对遗址点的分布进行研究。但是该方法有严重的缺陷,它在运算时不会考虑研究区域的形状。换句话说,对于一组遗址,如果用该方法进行分析,那么只会考虑一个固定的尺度(最大外接矩形),而遗址的真实分布模式往往存在多个尺度^⑧。如图五中的右下图,遗址点

在小尺度内离散分布,但是在小尺度内是聚集分布的。

分布模式与研究尺度有密切关系。举例来说,一个山谷中若分布着多个村庄,如果将其中的某一个村庄视为一个研究尺度,那么该村庄中分布的房屋可能会呈现出聚集分布的模式,因为不同的家庭可能需要相互合作。而如果将研究尺度扩大到整个山谷,所有的房屋则会呈现出在小尺度内聚集,在大范围内离散分布的模式,这是因为不同村庄之间可能存在资源竞争。

这种多尺度的研究方法与小尺度中的烽燧和障城的层级性有很强的关联,我们可以利用该方法探索长城遗址群在不同尺度下的聚类模型,从而考察其防御的区域性和层级性策略。

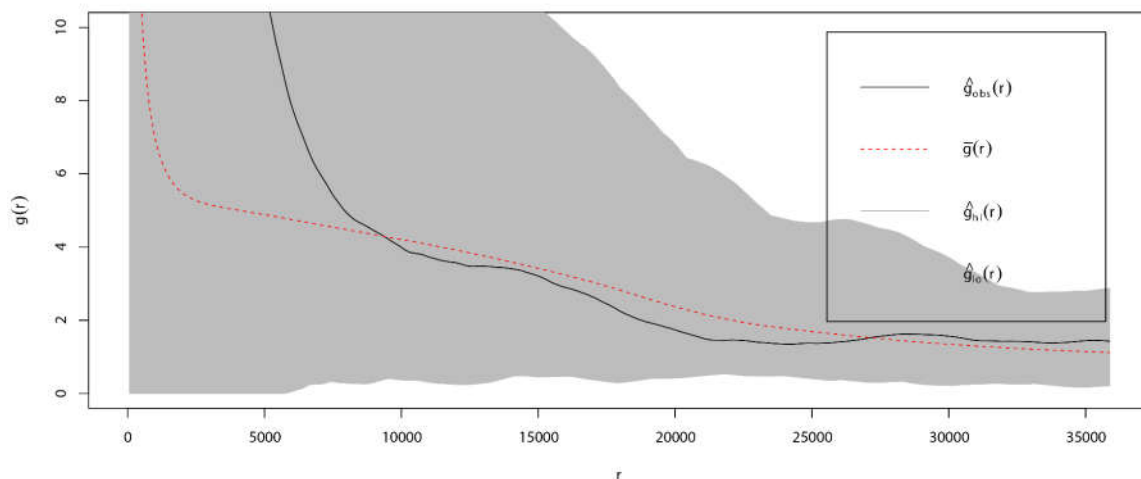
1. 参数扫描

有效方法之一是利用空间分析中的 Geyer 函数模拟^⑨。它需要用户给定两个参数,分别是半径值 r 和饱和值 s 。它们的含义是,在以某点为圆心、 r 为半径的圆型范围内,如果其他点的数量不超过 s ,那么可以判断这些点属于一个聚类,它们是聚集分布的。

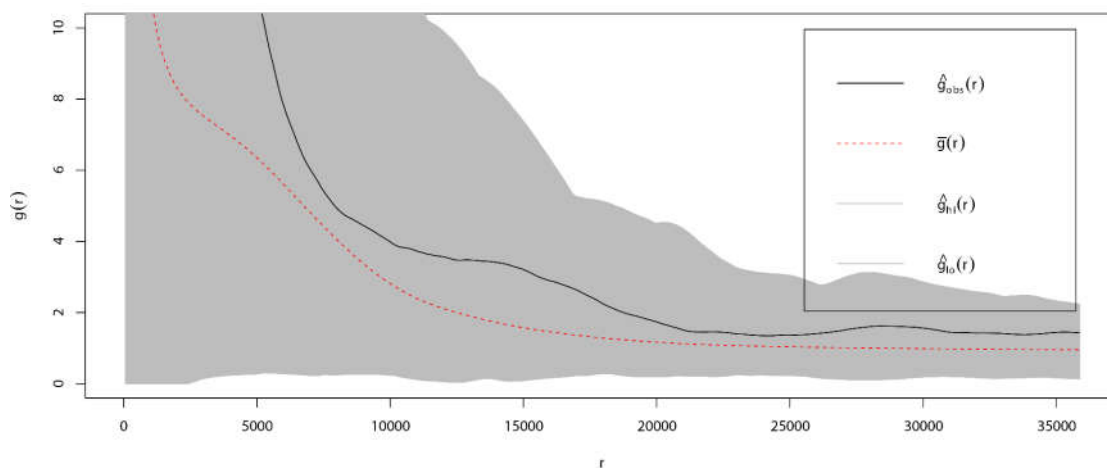
对于一个真实的考古数据集,不同的尺度可能代表不同的实际意义。因此,为了得出一个或多个合适的聚类模型,有必要进行参数扫描,以找到最佳的一个或多个半径值 r 。

我们利用了对关联函数(Pair Correlation Function)并进行了 999 次蒙特卡洛模拟(Monte-Carlo Simulation)。这个方法可以通过逐步增大半径来考察遗址在不同尺度下的分布模式。简单来说,每一次的模拟都在研究区域中按照模型放置一组随机点,并且生成一根分布线,最终由 999 次模拟中的最高值和最低值共同形成一个包络范围(图六)。

通过图六可以看出,在大约 20 千米处左右,黑线



图七 分布模型 A, 半径为 20 公里, 饱和值为 30



图八 分布模型 B, 半径为 8 公里, 饱和值为 10

的分布开始向下超出包络范围。也就是说, 遗址的分布出现了非随机分布的趋势, 这表明 20 千米这一半径可能具有一定的意义。在接下来的参数扫描中, 我们使用了 20 千米作为 r 值, 来寻找最符合聚类模型的饱和值 s 。

我们将饱和值 s 依次从 10 测试至 100, 当 Geyer 饱和值 s 为 30 时, 观测值(黑线)和理论值(红线)较为吻合(图七)。如果仔细观察该图, 可以发现观测值在大约 8 千米以内明显比理论值要高很多, 这表明在该范围内拥有更强的聚集性。因此, 可以对 8 千米进行另一个参数扫描。在这种情况下, 将半径值设置为 8 千米时, 得到的最佳饱和度值为 10(图八)。

简单来说, 通过以上的两次参数扫描, 我们得到了两个显著的聚类模型, 其半径分别是 20 千米和 8 千米。

2. 遗址分布的层级性

通过点分布建模法, 我们可以知道, 这些防御工事在 20 千米和 8 千米的尺度下分别体现了较强的聚集分布。可以据此假设, 20 千米范围可能是高一级的防御尺度, 而较低等级的防御范围可能被限制在 8 千

米内。这也表明在较小范围内, 防御遗址之间拥有更紧密的联系。这种多尺度的防御工事设置可以反映早期长城的防御策略, 即分层设防和层级化管理, 这在后世的长城防御策略中均有所体现。

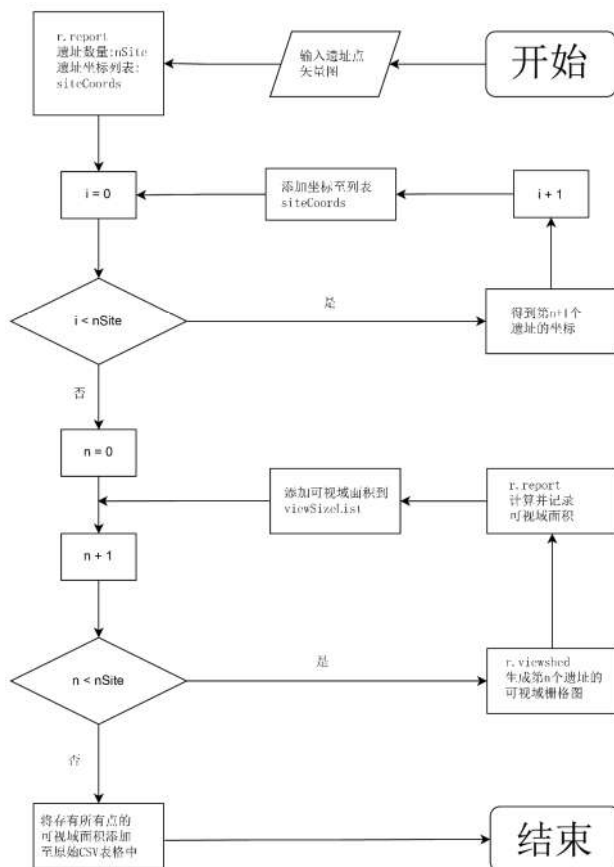
二、可视性分析

瞭望塔或烽燧是为了便于士兵观察敌情、传递信息而建造的。对于长城体系而言, 良好的视野是防御体系的重中之重。

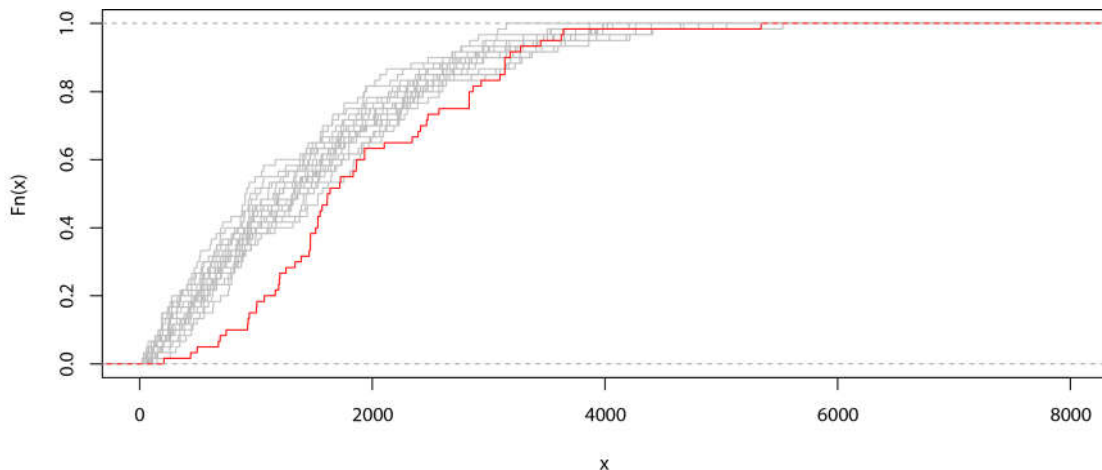
可视性分析 (Visibility Analysis) 是考古研究中的常用方法。一些经典案例包括 Hvar 岛上的信号塔研究^①, 以及日本海湾的信号传输系统研究^②。然而, 这些研究因缺乏统计检验而受到很多学者的批评, 并被认为是基于常识推理的可视性研究^③。对于中国的长城研究而言, 只有极少数的分析采用了更严谨的统计方法来研究防御工事的可视性^④。

(一) 统计推断方法

虽然考古学者通常认为烽燧或瞭望台有更好的视野, 但是仍然需要确定这些地点的位置选择是随意



图九 提取可视域面积的代码流程图



图一〇 遗址可视域面积大小(红色:遗址;灰色:随机点)

安排的还是经过精心设计的。换言之,需要证明烽燧视野的优良性。

20世纪90年代末,Wheatley使用Kolmogorov-Smirnov检验比较了遗址之间的互视性和非遗址之间的互视性,并且提出了累积视域分析(Cumulative Viewshed Analysis)的概念^④。Lake和Woodman采用了分层随机抽样方法和蒙特卡罗模拟方法,比较了Islay岛上遗址和随机点的可视域大小。他们都对研究区域进行了大量的随机采样,并用所有的遗址和随机点的可视域面积进行了统计推断^⑤。本文的统计推断在算

法层面与Lake的方法相似,但在随机抽样方面则略有不同。

在开源GIS软件GRASS 6以及之前的版本中,Lake编写了一个模块r.cva,可以自动生成每个遗址的可视域大小。但是,由于GRASS软件的版本更新,该模块已从当前的GRASS 7中删除,并且无法重新编译。尽管如此,在审视了r.cva的算法之后,本文利用了GRASS 7中的python环境,重新编写了一个程序脚本,实现了与r.cva相同的功能,并且程序运行速度要远高于r.cva(图九)。程序的最终结果是一个由

平均可视域面积 (单位: 像元)	点类型	排序
1921.633	遗址点	1
1594.867	随机采样点	2
1574.500	随机采样点	3
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
1344.483	随机采样点	18
1307.867	随机采样点	19
1279.067	随机采样点	20

图一 样本的平均可视域面积大小排序

多个数字组成的列表,每个数字代表着每个遗址可视域中包含的像元个数,数字越大意味着可视性越好。

本研究共从长城段落上创建了 1140 个随机点,分成了 19 个样本组,每组的随机点的数量与烽燧的总数量相同,均为 60 个。如果将烽燧遗址的数量算在内,则一共有 20 个样本组,每组 60 个点,共有 1200 个点。

首先绘制真实遗址的可视域面积的经验累积分布函数(Empirical Cumulative Distribution Function) (图一〇),即图中红色的折线,然后自动计算剩余的 19 个随机样本的经验累积分布函数。可以看出,真实遗址观察值(红色)面积大于 19 条随机采样的线(灰色)。这意味着这些烽燧遗址比 19 组随机点拥有更好的可视性。

除了图形的直观结果外,我们可以进一步计算样本的概率。对 20 个结果(1 个遗址和 19 个随机样本)进行排序可以看出,遗址的平均可视域面积最大,在 20 个结果中排列第一(图一一)。也就是说,我们对遗

址可视性的推断有 95%(19/20)的概率是正确的。

(二) 视线研究

在确定遗址可视性的显著性后,我们可以进一步研究烽燧的作用。它主要反映在了以下两个方面:信息传输和控制区域。前者可以用视线分析(Line-of-Sight Analysis)进行研究,而累积视域分析可以用来考察后者。

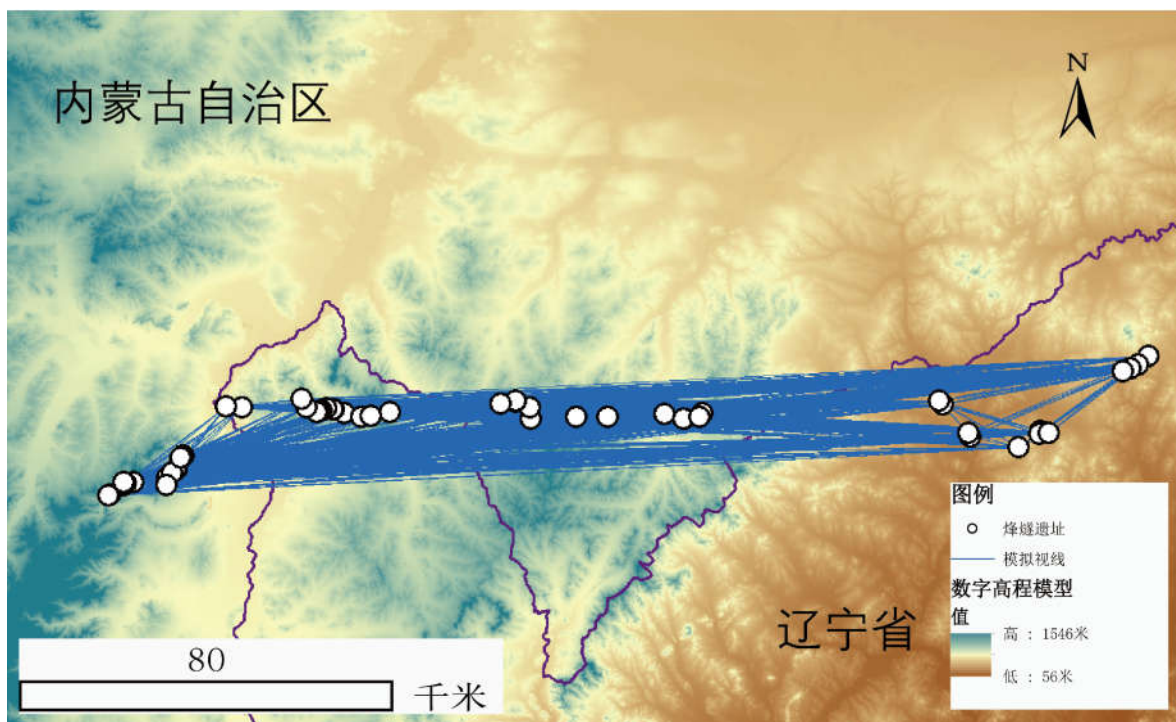
1. 视线分析

最直接的方法是将所有的烽燧遗址直接输入到 ArcMap 中以生成视线网络。这种方法不严谨,因为人类的视野距离是有限的,会受到大气状况、地表植被、地表曲率等多种因素影响。有些模拟出的视线甚至接近 20 千米,这显然是不现实的(图一二)。

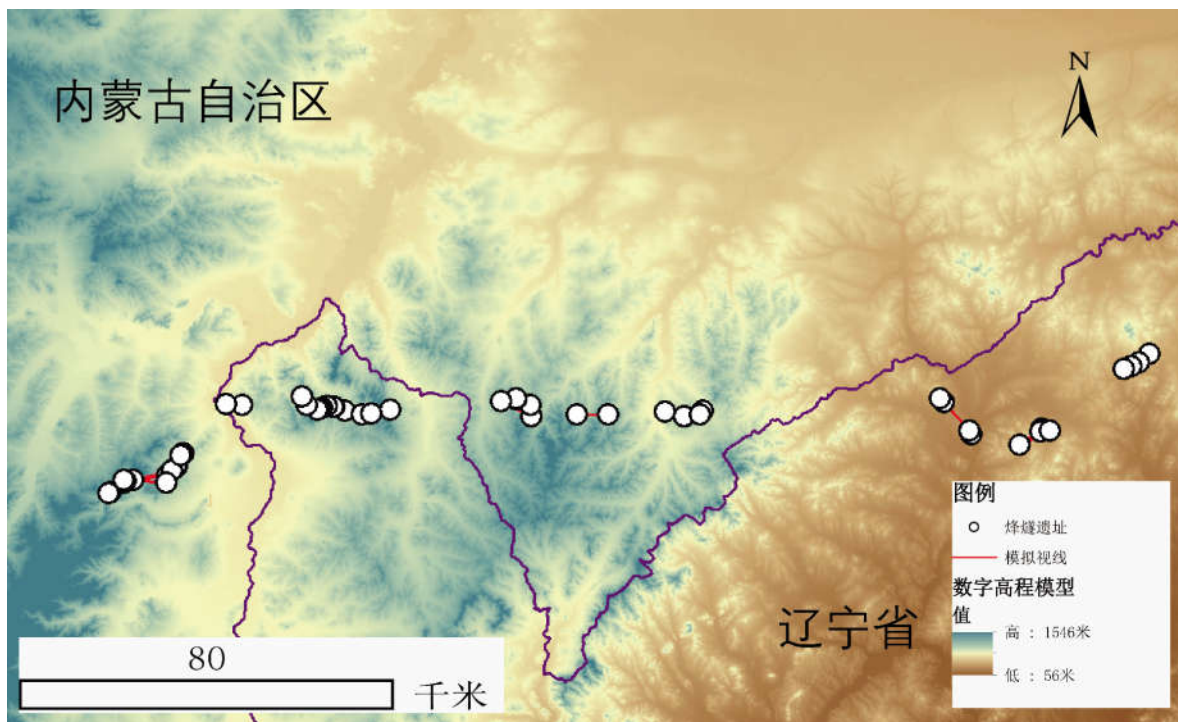
上文的点分布建模告诉我们,8 公里和 20 公里应是最优的防御层级半径。因此,本文用这两个半径作为阈值进行筛选,构建出了两种不同规模的视域网络。一种是 8 千米的视线分布(图一三),一种是 20 公里的视线分布(图一四)。可以看出,20 千米的视线将整个遗址群分成了东、中、西等三个防御区,这也为我们接下来研究累积视域提供了先决条件。

(三) 累积视域分析

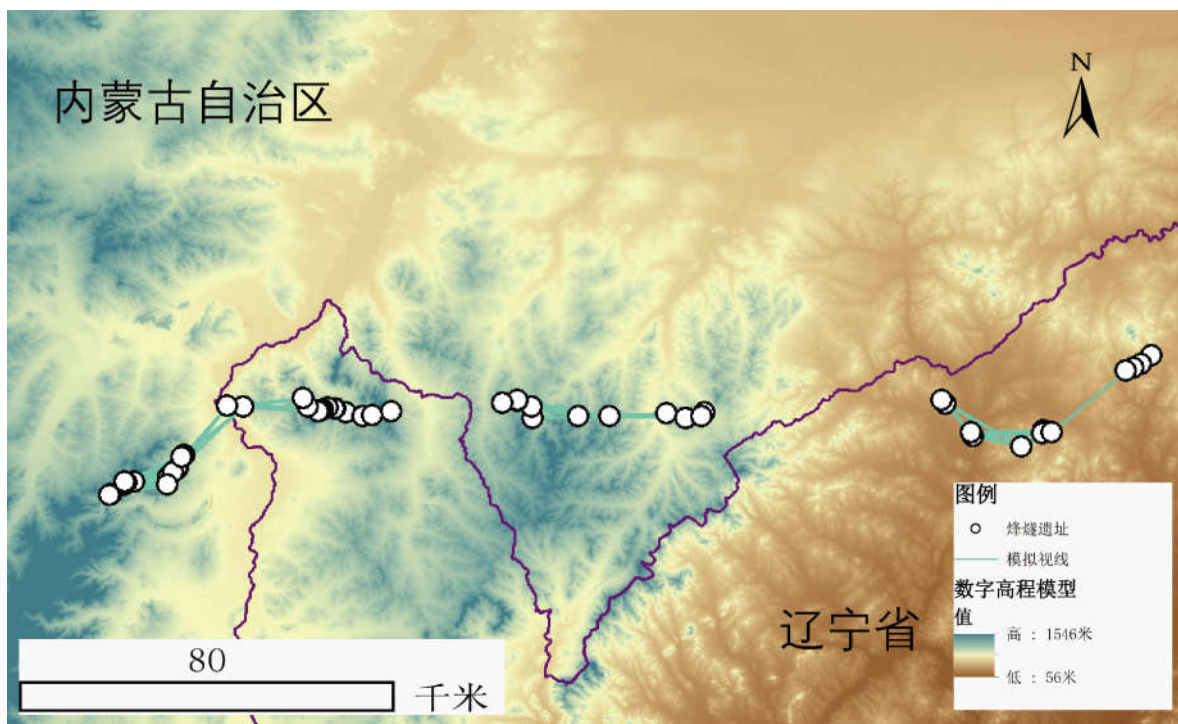
累积视域分析用于研究多个遗址的共同的可视性。它在每个遗址的可视域地图上进行地图代数运算,最终生成一个累积地图。该地图中每个像元的值是从 0 到遗址总数量。因此,一个像元的值越高,代表着可以被更多的遗址看到。在软件 GRASS 7 中提供了 r.viewshed.cva 模块,利用它可以计算每个可视域的面积大小并直接生成累积视域地图(图一五)。在进



图一二 视线网络分析,以全部遗址点为参数,未设置阈值



图一三 视线网络分析,以全部遗址点为参数,阈值为8千米



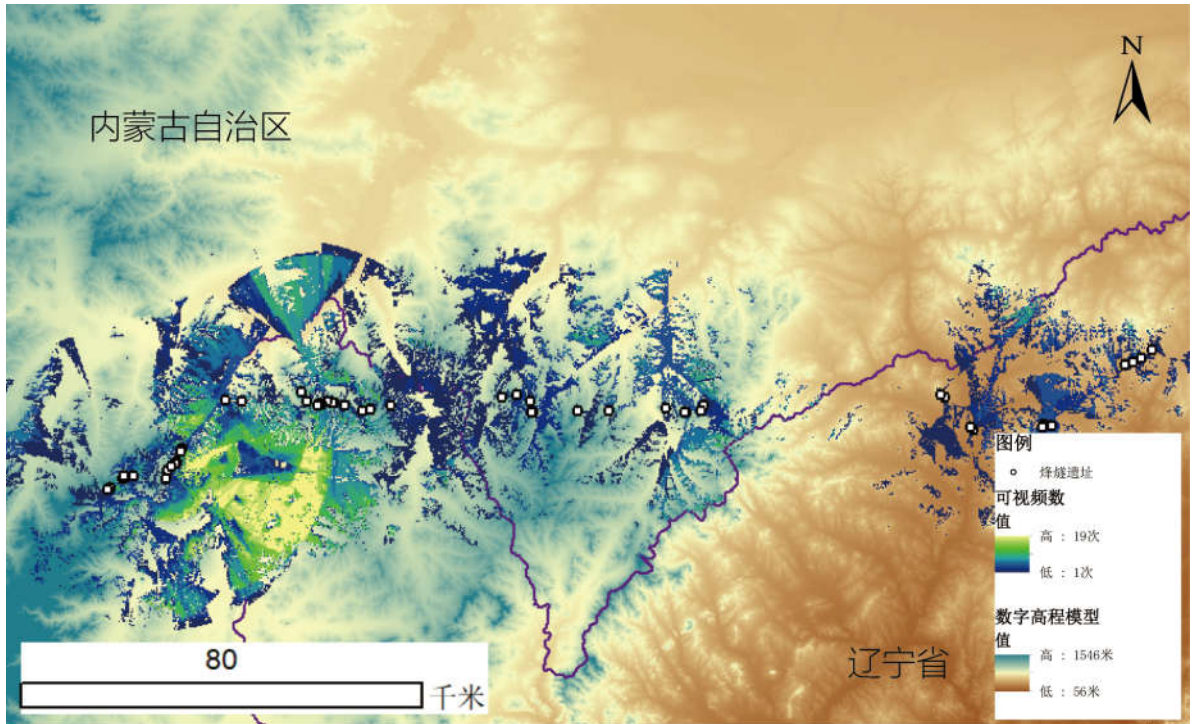
图一四 视线网络分析,以全部遗址点为参数,阈值为20千米

行军事防御的过程中,烽燧等遗址不是单独工作的,而是与整个防区内的其他遗址相连,从而共同控制整个地区。

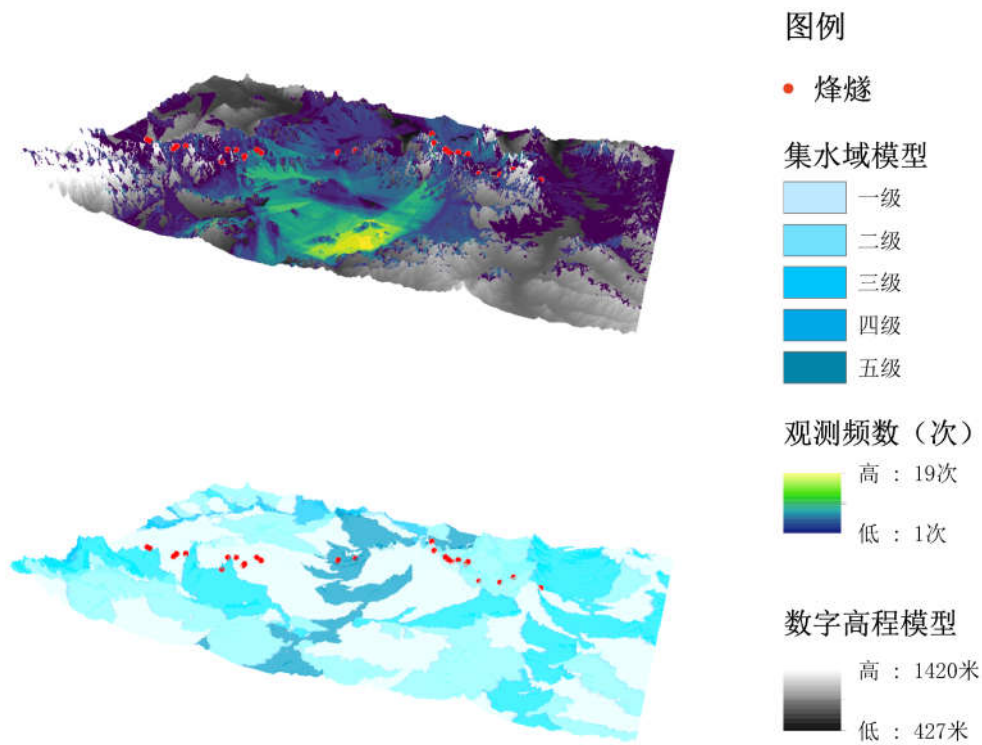
本研究将最大有效可视距离设置为30公里,得到了一张累积视域地图(图一五)。从该图明显看出,西部地区防御工事所控制的范围更集中且明显,而中部和东部地区则相对分散。以西部防区为例,从3D

图像来看,该区域的烽燧相互配合良好,共同控制着该地区中最大的老哈河河谷(集水域)(图一六)。

由于老哈河的阻隔,调查人员在河谷的台地上没有找到燕长城的遗迹。但是在这里恰好发现了城子山障城与冷水塘障城(图一七),它们位于老哈河谷最狭窄的通道,这样的设置应是对防御的补充,既可以增强部队的机动性,也可以更好地控制往来人口。



图一五 累积视域地图



图一六 西部防区 3D 模拟累积视域地图与集水域地图

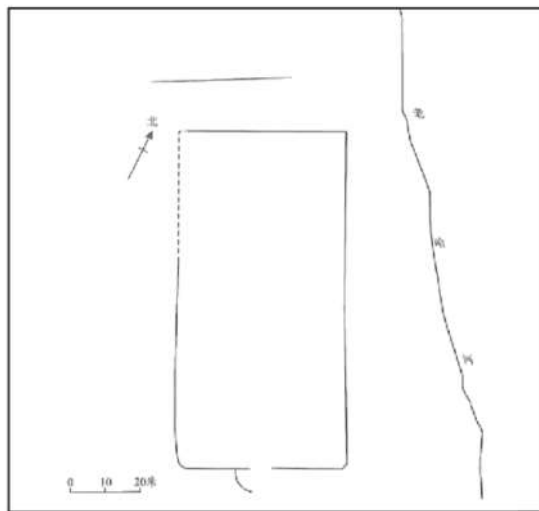
城子山障城是一座面积仅 5000 平方米的小型障城,破坏严重,修筑与老哈河西岸的台地顶部,长城墙体从其东南 1.1 千米处经过。该城城垣用黄土夯筑,东侧为陡坡,坡下为老哈河;城址西侧为沟谷,城南开门、设有瓮城,而北墙外侧则设置一道壕沟,与墙体仅

间隔 20 米,宽约 3 米(图一八)^⑥。

冷水塘障城同样修筑于地势较地平的老哈河西岸,呈长方形,东西长 290 米、南北长 250 米,是燕长城赤峰段沿线上最大的一座障城(图一七)。黄土夯筑,城北墙内侧修筑一望台,其外侧亦有一向外凸出



图一七 冷水塘障城与城子山障城位置示意图(摘自中国长城遗产网)



图一八 城子山障城平面图

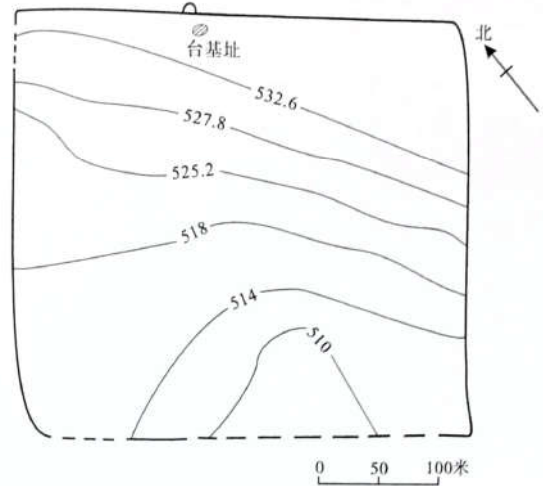
(摘自《内蒙古自治区长城资源调查报告(东南部战国秦汉长城卷)》,文物出版社,2014年)

的弧形台址,应起到了马面的作用。根据1956年的调查,彼时北墙仍保留六处马面,但是由于近年来遭受人为破坏,仅余1处^⑧。

与其他的长城沿线障城边堡相比,这两处城址具有相当的特殊性,可以说明该地的重要性。我们也可以由此推测,在燕长城沿线,老哈河河谷地带应承载着最大的防御压力,这也侧面证实了可视性分析的有效性。一旦敌军沿河谷由北向南进攻,西部防区内的烽燧可以发出燃起烽火和烟雾并传递预警信号,山谷中的主要障城可以由此进行战备。

三、结论与展望

长城防御体系的层级性通常在文献材料较为丰



图一九 冷水塘障城平面图

(摘自《内蒙古自治区长城资源调查报告(东南部战国秦汉长城卷)》,文物出版社,2014年)

富的时代中有较多体现。在后世出土的居延汉简的《塞上烽火品约》中,我们可以清晰了解到边疆地区的军事防御的层级性,如候官、部、燧等^⑨。然而由于早期文献材料的匮乏,学者常常依据直觉把汉长城更早的早期长城描述为一个简单的系统,可实际上并非如此。

通过点分布建模、可视性分析等空间分析手段,本文揭示了一个更为复杂、精巧和动态的防御体系。从这个意义上说,该方法的有用性是显而易见的。在赤峰地区,防御工事遗址基本位于海拔较高,视野开阔的山脊附近。这些遗址在8千米和2千米0等两个尺度上形成了两种明显的聚集方式,而且在这两种尺度下形成了两种不同的烽传半径。8千米内的小防御区用于维护局部区域的稳定,20千米内的大防御区则可以控制更大的范围。整个地区的防御能力参差不

齐,从累积视域分析的角度来看,整段长城的防御重点集中于西部的老哈河河谷中。该河谷内的障城具有典型的防御附属设施,如垣壕、马面、望台等,这些也佐证了我们对于该河谷内的防御机制的判断。

目前,我国学界利用 GIS 建模与空间统计分析来考察遗址和遗物分布的研究实例仍然较少,实际上该方法的潜力是很大的。在宏观尺度上,该方法既可以从宏观角度探索选址分布与聚类特征,也可以从微观尺度上揭示研究遗址内部遗物的分布规律。通过这种方法,考古学者可以进一步挖掘考古资料背后的信息,以重建遗迹分布模式和聚落形态。

附记:本研究得到了伦敦大学学院 Andrew Bevan 教授和中国人民大学魏坚教授的指导,在此深表感谢!

注释:

①③王琳、武虹:《GIS 位置建模在环境考古中的应用现状和前景展望》,《世界研究与科技发展》2017 年第 2 期。

②Bevan, A., “Spatial Point Patterns and Processes”, in Gillings, M., Hac?gu?zeller, P. & Lock, G. eds., *Archaeological Spatial Analysis*, London: Routledge, 2020, pp. 60–76.

④⑩内蒙古自治区文化厅(文物局),内蒙古自治区文物考古研究所:《内蒙古自治区长城资源调查报告(东南部战国秦汉长城卷)》,文物出版社,2014 年。

⑤Lock, 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., J., Crawford, W., and Koller, D. eds., *Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 37th International Conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, March 22–26 (BAR International Series S2079)*. Oxford: Archaeopress, 2009, pp. 192–203.

⑥Lock, 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., J., Crawford, W., and Koller, D. eds., *Making History Interactive. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 37th International Conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, March 22–26 (BAR International Series S2079)*. Oxford: Archaeopress, 2009, pp. 192–203.

⑦Wood, J., *The Lanserf Manual for Landserf 2.3.1*. Retrieved from <http://www.staff.city.ac.uk/~jwo/landserf/>, 2000.

⑧Bell, T. & Lock, G., “Topographic and cultural influences on walking the Ridgeway in later prehistoric times”, in Lock, G. ed., *Beyond the map: Archaeology and spatial technologies*, Amsterdam: IOS Press, 2000, pp. 85–100.

⑨Geyer, C. “Likelihood Inference for Spatial Point Processes: Likelihood and Computation”, in Kendall, W. Barndroff-Nielsen, Q. & van Lieshout, M. eds., *Stochastic Geometry: Likelihood and Computation*. London: Chapman and Hall, 1999, pp. 141–172.

⑩Gaffney, V., & Stancic, Z. (1991). *GIS approaches to regional analysis: a case study of the island of Hvar*. Ljubljana: Research Institute Faculty of Arts and Science University of Ljubljana.

⑪Ozawa, K., Kato T. & Tsude, H., “Detection of Beacon Networks Between Ancient Hill-Forts Using a Digital Terrain Model Based GIS”, in Huggett, J. and Ryan N. eds., *CAA94. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1994 (BAR International Series 600)*. Oxford: Tempus Reparatum, 1995, pp. 157–162.

⑫Lake, M., & Woodman, P., “Visibility studies in archaeology: a review and case study”. *Environment and Planning B*, 30(5): 689–707, 2003.

⑬Shelach-Lavi, G., Wachtel, I., Golan, D., Batzorig, O., Amartuvshin, C., Ellenblum, R. and Honeychurch, W., “Medieval long-wall construction on the Mongolian Steppe during the eleventh to thirteenth centuries AD,” *Antiquity*. Cambridge University Press, 2020, 94(375): 724–741.

⑭Wheatley, D., “Cumulative viewshed analysis: a GIS-based method for investigating intervisibility, and its archaeological application. *Archaeology and Geographical Information*” in Lock, G. and Stancic, Z. eds., *Archaeology and GIS: A European Perspective*. London: Routledge, 1995, pp: 171–185.

⑮Lake, M., Woodman, P., & Mithen, S., “Tailoring GIS software for archaeological applications: an example concerning viewshed analysis”. *Journal of Archaeological Science*, 25: 27–38. Lake, M., Woodman, P. and Mithen, S. “Viewshed analysis of site location on Islay”, in Mithen, S. ed., *Hunter-gatherer landscape archaeology: The Southern Hebrides Mesolithic Project, 1988–98. Volume 2: Archaeological fieldwork on Colonsay, computer modelling, experimental archaeology, and final interpretations*. Cambridge: The McDonald Institute for Archaeological Research, 2000, pp. 497–503.

⑰a. 佟柱臣:《考古学上汉代及汉代以前的东北疆域》,《考古学报》1956 年第 1 期;b. 内蒙古自治区文化厅(文物局)、内蒙古自治区文物考古研究所编:《内蒙古自治区长城资源调查报告(东南部战国秦汉长城卷)》,北京:文物出版社,2014 年。

⑱a. 甘肃省居延考古队简册整理小组:《“塞上烽火品约”释文》,《考古》1979 年第 4 期;b. 徐萍芳:《居延、敦煌发现的〈塞上蓬火品约〉——兼释汉代的蓬火制度》,《考古》1979 年第 5 期;c. 傅振伦:《东汉建武〈塞上烽火品约〉考释》,《考古与文物》1980 年第 2 期;d. 何双全:《〈塞上烽火品约〉诠释》,《考古》1985 年第 9 期。

(责任编辑:周广明)