

康熙《皇舆全览图》对长城的绘制及其空间精度量化分析

朝格苏鲁德¹, 那顺达来^{1*}, 李嵩林², 慕喜勒¹

¹内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

²中国人民解放军河北省张北县人民武装部, 河北 张家口

收稿日期: 2025年6月30日; 录用日期: 2025年8月14日; 发布日期: 2025年8月22日

摘要

康熙年间绘制的《皇舆全览图》是中国首部以经纬度标注的大比例尺全国地图, 体现了18世纪初实测制图技术的高峰。本文以山海关至嘉峪关段明长城为研究对象, 利用GIS技术比对168个历史—现代对应堡口点, 采用空间误差、RMSE、自然分段与线形态分析方法, 系统评估地图空间精度。结果表明, 地图总体线形与现代长城高度吻合, 但区域误差差异显著: 京畿地区误差最小(平均4.65 km), 晋陕宁段与河西走廊误差偏大(最高达59.24 km)。RMSE分析表明, 经度方向误差显著高于纬度, 是主要误差来源。经度98°E~100°E与103°E~104°E两段出现误差突增, 推测与三角测量链断裂或基线误差累积有关; 中央经线116.38°E附近误差显著降低, 反映以北京中心的测量控制系统具有更高几何精度。同时, 测量人员更替显著影响测图精度, 测区变动后出现误差上升与“跳点”现象, 疑因实测能力下降或依赖旧图所致。地方协作程度差异也导致测绘方法与数据精度呈现区域分异。

关键词

历史地图, 《皇舆全览图》, 长城, GIS空间分析, 地图精度

The Depiction of the Great Wall in Kangxi's *Atlas of the Chinese Empire* and Its Quantitative Analysis of Spatial Accuracy

Chaoge Sulude¹, Nashun Dalai^{1*}, Songlin Li², Xile Mu¹

¹College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

²People's Armed Forces Department of Zhangbei County, Hebei Province, People's Liberation Army of China, Zhangjiakou Hebei

Received: Jun. 30th, 2025; accepted: Aug. 14th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 朝格苏鲁德, 那顺达来, 李嵩林, 慕喜勒. 康熙《皇舆全览图》对长城的绘制及其空间精度量化分析[J]. 地理科学研究, 2025, 14(4): 783-796. DOI: 10.12677/gser.2025.144076

Abstract

The *Atlas of the Chinese Empire*, compiled during the Kangxi reign, represents China's first large-scale national map annotated with longitude and latitude, marking the pinnacle of early 18th-century empirical cartography. This study focuses on the Ming Great Wall section from Shanhaiguan to Jiayuguan, employing GIS technology to systematically evaluate its spatial accuracy through comparative analysis of 168 historical-modern corresponding fort points. Analytical methods include spatial error distribution, RMSE (Root Mean Square Error), natural breaks classification, and linear morphology analysis. The results demonstrate that the map's overall linear morphology aligns closely with the modern Great Wall, yet regional accuracy varies significantly: the capital region exhibits minimal displacement (mean error: 4.65 km), while Shanxi-Shaanxi-Ningxia segments and the Hexi Corridor show larger deviations (maximum: 59.24 km). RMSE analysis reveals that longitudinal errors substantially exceed latitudinal errors, constituting the primary error source. Two abrupt error surges occur at 98°E~100°E and 103°E~104°E, likely attributable to disrupted triangulation chains or accumulated baseline errors. Notably, precision improves markedly near the central meridian (116.38°E), reflecting higher geometric accuracy in the Beijing-centered control network. Personnel changes during surveys significantly impacted outcomes, as evidenced by post-rotation error increases and "jump point" anomalies, suggesting compromised field measurement capabilities or reliance on outdated data. Furthermore, regional disparities in local cooperation led to methodological variations and corresponding accuracy differentiation.

Keywords

Historical Map, *Atlas of the Chinese Empire*, Great Wall, GIS-Based Spatial Analysis, Map Accuracy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

清代康熙年间,在引入西方测绘技术的背景下,全国性的实地测绘工程正式启动。1705年,康熙帝命耶稣会士试绘天津地区地图,以检验欧洲制图方法的准确性与可行性。1707至1708年间,又先后命其测绘河北省内长城及全部长城地区,耗时九个月,绘成一幅[1]。康熙帝遂下令在全国范围内开展勘测,最终绘制出中国历史上第一幅标注精确经纬度的大比例尺地图——《皇舆全览图》[2]。此后,雍正、乾隆两朝对新疆、西藏等地进行增测,并结合亚洲其他地区地图,分别绘制出《雍正十排图》和乾隆《内府舆图》。李约瑟评价乾隆《内府舆图》“不仅是当时亚洲最优秀的地图,而且精度超越了同期的所有欧洲地图[3]”。B. A. Elman认为《皇舆全览图》在1725年抵达法国后决定性地改变了欧洲地图的绘制[4]。翁文灏在《清初测绘地图考》中说:“故迄今中国地图十之七八,实尚源自清初。”所以研究清朝实测地图并数字化,对历史地图研究意义重大。汪前进研究发现,康熙《皇舆全览图》中的经纬度记录与法国人杜赫德的记载存在差异[5]。韩昭庆指出,纬度测量依赖于太阳高度角和北极星高度,误差来源于天气、方法和工具等因素[6]。郭美兰认为,乾隆《内府舆图》不仅基于实地测量,还参考了宫廷藏图及地方地图[7]。靳煜的研究表明,乾隆时期实测经纬点仅占总数的49.53%,实测面积约占总面积的三分之一[8]。陆峻巍等通过SPSS分析确定《皇舆全览图》采用了桑逊投影[9],而汪前进比较康乾两图的58个地名点,得出《乾图》精准度高于《康图》的结论[10]。韩昭庆等通过ArcGIS分析发现,《皇舆全览图》与《内

府輿图》的两广地区坐标系存在偏移，可能与地理配准方式相关[11][12]。

杨丽婷的研究表明，乾隆《内府輿图》参考了雍正《皇輿全图》，但图面内容并不完全相同[13]。国外学者将卡西尼地图和丹麦历史地图配准后利用 Google Earth 对比地图中海岸线等地理要素的精度[14][15]，还有学者利用 Map Analyst 软件分析 16 至 19 世纪欧洲历史地图平面精度[16]。估算历史地图定位精度的问题通常使用空间分析工具来解决[17]，所以本文采用了历史地图结合 ArcGIS 的空间定量分析，旨在解决以历史地图中提取的长城点，线数据来评估地图准确性问题。此研究不仅对前人研究进行了补充，还通过改进分析手段修正了一些结论，推动历史地图研究领域的发展。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

原图数据来源于《清廷三大实测全图集》(汪前进、刘若芳整理出版，北京：外文出版社，2007 年)。现代长城各线段，堡口点矢量数据来源于长城论坛网站提供的 KML 数据(<http://www.thegreatwall.com.cn>)。天地图全球地形晕渲图来源于 Geo Scene Online。

2.2. 研究方法

ArcGIS 空间分析法：对康熙《皇輿全览图》不规则矫正，统一为 Albers 投影坐标系、再进行地理配准、创建长城点与线地理要素并矢量化等操作，提取长城各堡口点的经纬度坐标，古今对应点之间的空间直线距离，长城线段等信息，再进行对比分析。

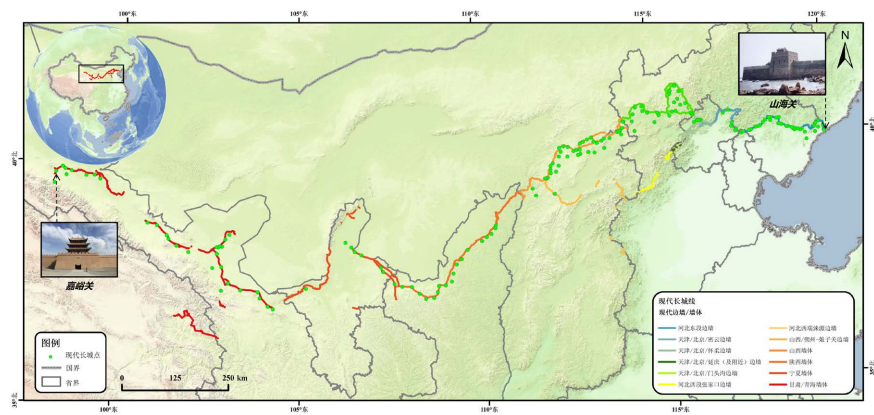
均方根误差(RMSE)：采用均方根误差(RMSE)作为模型性能评估的指标。RMSE 能够有效衡量地图中矢量数据的预测值与真实值之间的偏差，具体计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

其中， n 为样本数量， y_i 为第 i 个样本的真实值， $\hat{y}_i$ 为第 i 个样本的预测值。

RMSE 敏感于较大的误差。指标的值越小，表示历史地图的误差越小。在实际应用中，计算所有空间误差数据 RMSE，以定量评估地图的准确性。

3. 结果与分析



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为 GS (2019) 1822 号，对底图边界无修改。下同。

Figure 1. Study area overview
图 1. 研究区概况

图 1 为选取山海关至嘉峪关段明长城沿线堡口点及边墙线分布区域作为研究区，根据研究区对康熙《皇舆全览图》对应图块进行裁剪拼接，不规则矫正等图像处理。

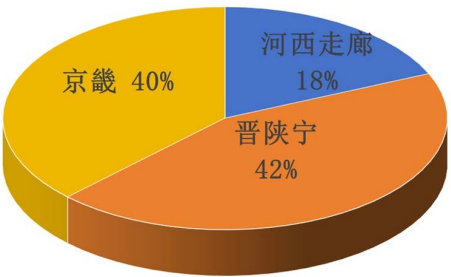


Figure 2. Percentage of corresponding place names between the historical map and the modern great wall
图 2. 历史地图与现代长城地名对应点数量百分比

为深入探究《皇舆全览图》中长城沿线不同区域在空间精度上的差异性，本文对历史地图中所标注的堡口地名进行整理与筛选，结合现代地理信息数据进行一一对应，最终确认并选取了 168 个具有空间匹配关系的点位作为研究样本。在此基础上，依据长城走向的地理分布特征及行政区划范围，对这 168 个点位进行区域划分与分区分析。具体而言，本文将研究区域划分为三大地理区段：京畿地区(东部)：约位于东经 119.75°至 114.42°之间，涵盖今北京、河北一带，属长城东段重点分布区，亦为测绘起始核心区域，点数占比 40%；陕宁地区(中部)：大致分布于东经 114.18°至 105.19°之间，主要包括山西、陕西北部及宁夏中东部区域，地形复杂，长城走势曲折，点数占比 42%；河西走廊地区(西部)：位于东经 104.29°至 98.20°之间，覆盖甘肃西部及河西走廊沿线，是长城最西端的延伸段，地广人稀，测点稀疏，点数占比 18%(见图 2)。该分区标准既参考了长城自然地理走向与历史功能区划，又考虑了误差变化的空间分布趋势，有助于从横向维度上揭示地图精度在不同区域的差异表现，并为后续的空间误差成因分析提供分区依据。

3.1. 长城点要素空间误差分析

3.1.1. 点位误差分析

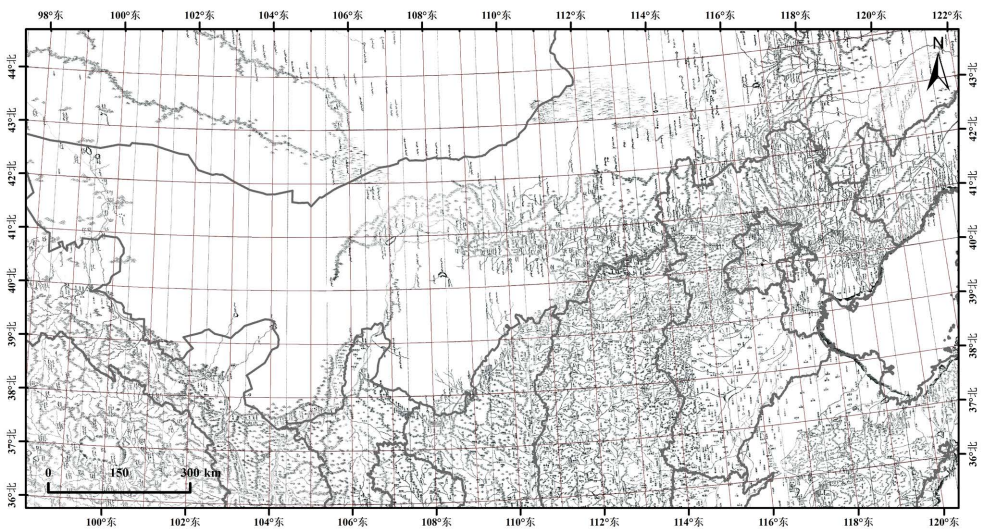


Figure 3. Digitized great wall section from *Atlas of the Chinese Empire* (Kangxi edition)
图 3. 康熙《皇舆全览图》长城段数字化图

对康熙《皇舆全览图》长城段地区涉及的图块进行裁剪拼接，不规则矫正和 ArcGIS 软件对地图地理配准得到图 3，通过筛选提取与现代地理信息数据相对应的点与线，再经矢量化堡口点，边墙线赋予历史地图详细的地理信息数据，便于比对，分析历史地图精度。

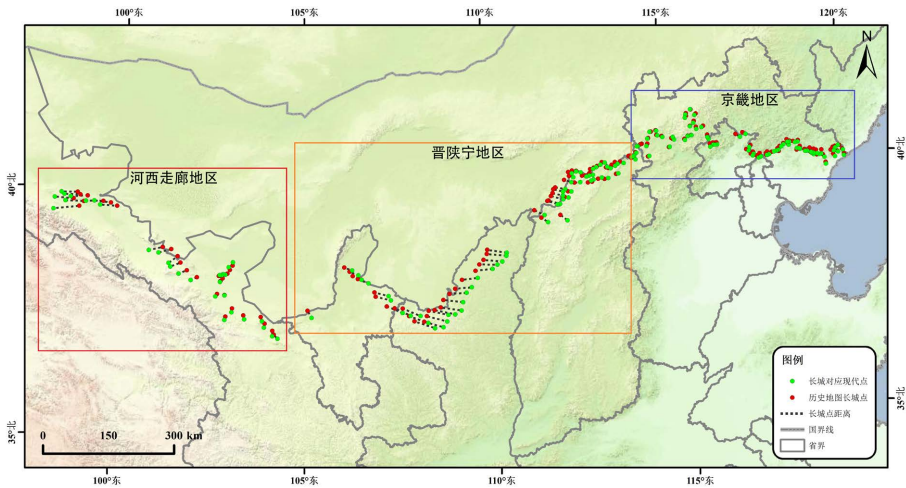


Figure 4. Straight-line distance errors between Great Wall points on the historical map and their modern counterparts
图 4. 历史地图长城点与现代长城点直线距离误差

图 4 展示了历史地图中长城点位与现代长城点位之间的空间位置误差。绿色点表示现代长城的位置，红色点表示历史地图中所标注的长城点。两点之间的连线代表它们之间的直线距离误差。地图将长城沿线划分为三个区域：京畿地区、晋陕宁地区和河西走廊地区，以便对不同区域的误差特征进行分析。

3.1.2. 区域误差对比分析

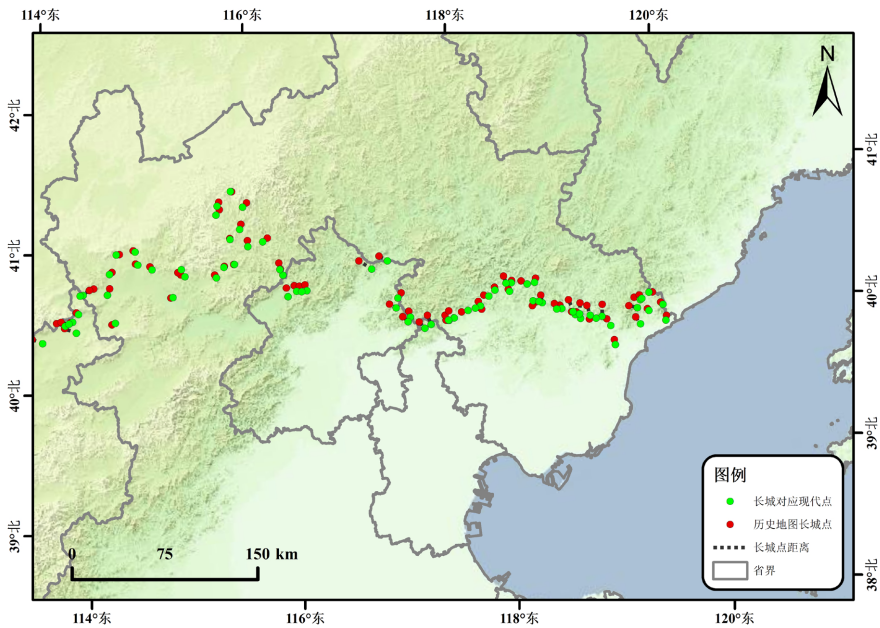


Figure 5. Straight-line distance errors of Great Wall points in the Jingji region
图 5. 京畿地区长城点距离直线误差

为更直观地对比区域误差, 图 5~7 采用统一的比例尺来可视化距离误差, 分析从东部的京畿地区开始, 图 5 所示, 京畿地区(山海关至柴沟堡段)具有最高的测绘精度, 经度 RMSE 为 0.2864, 纬度 RMSE 为 0.0594, 空间直线距离 RMSE 为 5.194 km, 空间误差平均值为 4.652 km, 最小误差 0.614 km, 最大误差 12.186 km。该区域作为清代中央政府所在地, 地理调查与测绘工作投入较多, 地形复杂程度适中, 有助于天文观测和三角测量的准确实施, 因此整体误差水平控制在较低范围内。

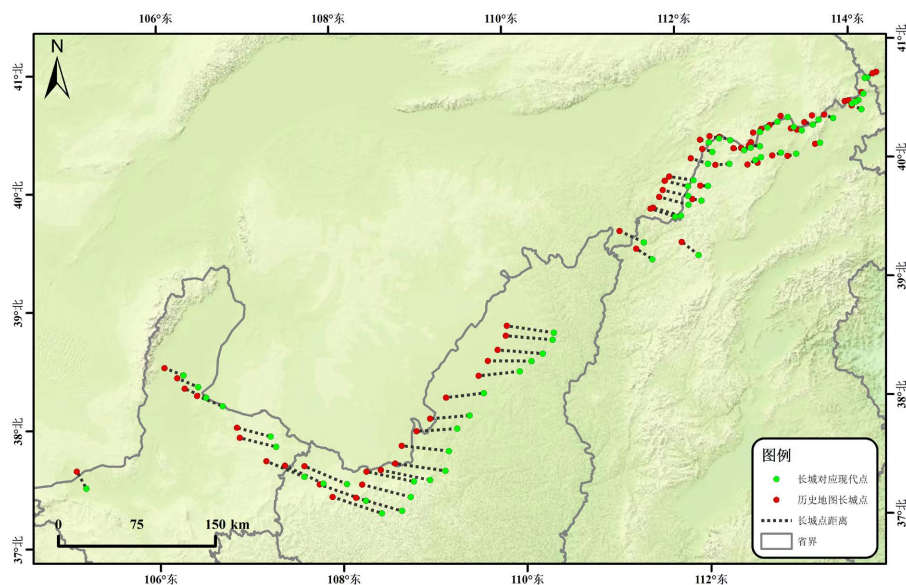


Figure 6. Straight-line distance errors of Great Wall points in Jin-Shaanxi-Ningxia region

图 6. 晋陕宁地区长城点距离直线误差

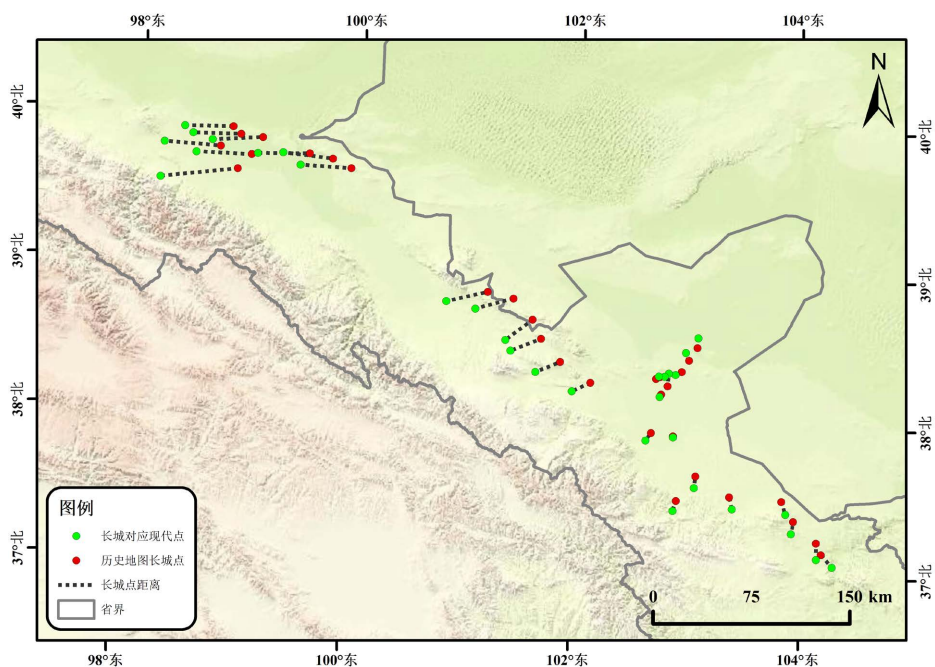


Figure 7. Straight-line distance errors of Great Wall points in the Hexi Corridor region

图 7. 河西走廊地区长城点距离直线误差

图6 中晋陕宁地区(西洋河堡至宁夏中卫段)测绘误差有所增大, 经度 RMSE 为 0.3000°, 纬度 RMSE 为 0.0708°, 空间直线距离 RMSE 为 27.071 公里, 空间误差平均值为 22.181 公里, 最小误差 1.713 公里, 最大误差 49.710 公里。区域地形起伏较大, 且地理环境复杂, 测绘交通条件受限, 导致实测过程中误差逐步累积。此外, 从空间分布上观察, 自晋陕交界处起, 误差呈向西北方向扩散, 反映出三角测量体系在部分节点存在误差积累现象。

观察图7 西部河西走廊地区(索桥堡至卯来泉堡段)整体测绘精度略优于中部但仍存在较大偏差, 经度 RMSE 为 0.2950°, 纬度 RMSE 为 0.0639°, 空间直线距离 RMSE 为 25.702 公里, 空间误差平均值为 20.449 公里, 最小误差 0.897 公里, 最大误差 59.244 公里。部分区域出现明显的整体平移。这说明在长距离、遥远地形环境下, 基线误差累积效应加剧, 同时也可能存在经度方向测量误差主导的空间变形。误差范围在 0.90~59.24 公里之间, 平均值为 20.45 公里, 与中部区域相近但局部偏差更为极端。

整体来看, 长城段空间误差分布呈现出“东精西粗”的显著地理趋势, 即从东向西误差逐步增大, 空间偏移量和偏移方向性更加明显。这一趋势体现了康熙时期地图测绘在天文控制、测量精度、地形影响和测绘策略上的系统性特征, 同时也揭示了在传统测绘条件下, 大范围制图不可避免的精度衰减问题。

3.1.3. 误差方向性成因与测量“跳点”分布特征分析

在完成整体空间误差水平的统计评估后, 本文进一步从误差方向性成因与局部空间异常特征两个维度展开分析。一方面, 通过构建历史与现代点位的经纬度差与空间距离误差之间的回归模型, 以探讨误差积累的主导方向; 另一方面, 结合误差等级划分结果, 识别长城沿线在空间分布上呈现“突跳”特征的控制点位置, 揭示清代地图测量在地理结构或链式控制中的弱点与变异点。该节旨在深化对误差空间结构性与形成机制的理解, 为后续机制解释与成图精度评价提供依据。

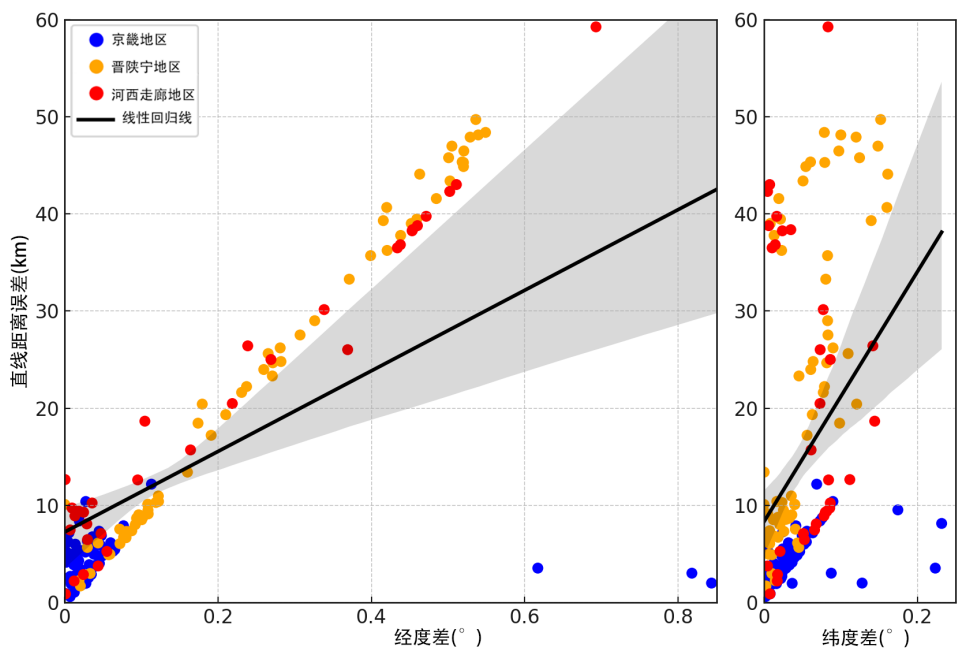


Figure 8. Relationship between spatial distance errors and (a) longitudinal differences, (b) latitudinal differences
图8. 空间距离误差与(a) 经度差、(b) 纬度差的关系图

为探究误差来源的主导方向, 将历史与现代地理点位的经纬度差分别与空间距离误差进行了回归分

析(图 8)。结果表明, 纬度差与空间误差的相关性相对较弱($R^2 = 0.18, p < 0.001$), 而经度差与空间误差之间具有更强的相关性($R^2 = 0.63, p < 0.001$)。这说明清代地图在纬度的几何测量控制相对准确, 而主要误差来源集中在经度的测量及计算中。其成因可能在于测绘以北京为中心展开, 测量链向两翼延伸过程中, 受限于仪器精度、点稀疏及三角测量累计误差, 导致经度方向误差不断累积。

值得注意的是, 尽管整体回归结果表明纬度差对空间误差影响较弱, 但图像分析显示, 在部分区域, 特别是河西走廊与京畿地区, 仍存在较明显的局部线性相关趋势。河西走廊地形狭长、控制链条延展显著, 若起始控制点存在系统性的纬度观测偏差, 极易沿测量链条向西积累并放大误差, 形成“纬度差递增 - 空间误差上升”的线性分布特征。而在京畿地区, 尽管整体误差水平较低, 但由于制图精度要求较高, 微小的纬度误差仍可能显著影响其空间定位精度。因此, 在链式测量区与高精度控制区域, 纬度误差虽非主导因素, 但在局部地段仍不可忽视。

Table 1. Error classification ranges
表 1. 误差等级分级范围

等级	误差范围(km)	误差描述
0 级	0.00~8.56	精度极高, 空间误差最小, 接近现代控制点
1 级	8.57~18.21	精度较好, 存在一定偏移, 但控制点定位仍较为准确
2 级	18.22~31.46	精度一般, 空间偏差较为明显, 可能存在地图连接误差
3 级	31.47~59.24	精度较差, 出现大幅位置偏移, 多见于边远或地形复杂区域

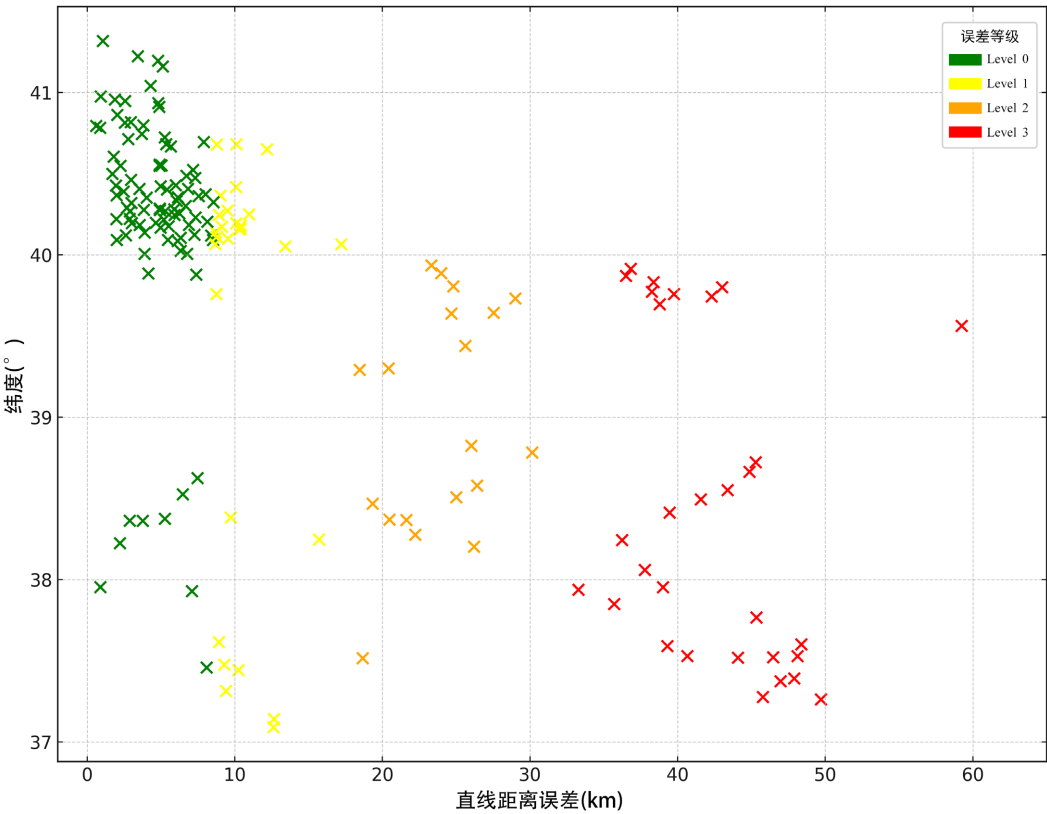


Figure 9. Distribution of classified spatial distance errors of Great Wall points with respect to latitude
图 9. 长城点空间距离分级误差随纬度变化的分布特征

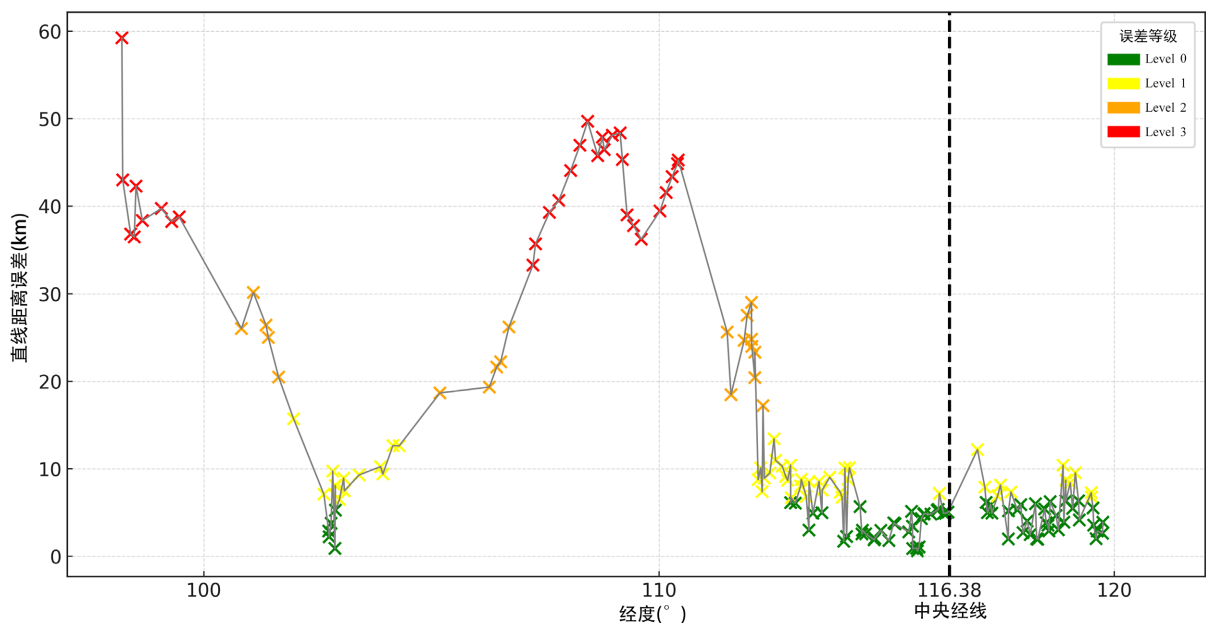


Figure 10. Distribution of classified spatial distance errors of Great Wall points with respect to longitude
图 10. 长城点空间距离分级误差随经度变化的分布特征

图 9 与图 10 分别展示了《皇舆全览图》中控制点的空间距离误差在纬度与经度两个维度上的分布特征，揭示了地图精度在地理空间中的系统性差异。按自然断点法(KMeans 聚类近似)让数据分为四个误差等级(表 1)，以不同颜色标注，黑色虚线标注了清代地图所采用的中央经线 116.38°，为分析中心精度提供基准。

从纬度维度来看，误差等级在不同纬度区间呈现出明显分化。高误差点主要集中在北纬 39°~42°之间，部分控制点误差高达 59.24 km (如卯来泉堡)，显示出该纬度带地图精度控制较弱。此区域大致对应于河西走廊与蒙古高原南缘，地势起伏大、测量难度高，可能造成测绘链条误差累积。而纬度低于 38°或高于 43°的点多分布于误差等级 0~1，空间偏差较小，反映出地图在南北边缘区域的几何控制相对稳定，或所处区域地形开阔、点位集中。

经度方向上，空间误差整体呈“东精确，西粗略”趋势，误差值在经度 97°~105°区间波动剧烈，形成多个等级 3 的高误差点，尤其是 98°~100°之间(卯来泉堡、嘉峪关一线)与 103°~104°附近，误差突增，形成显著的“跳点”分布。这些跳点很可能与清代三角测量系统在西部控制链条较长、地形复杂条件下精度控制失效有关。

相比之下，经度 106°以东段落的误差显著下降，尤其在 112°~120°之间，多数点位误差等级为 0 或 1，地图精度控制较强。特别是在中央经线 116.38°附近，误差值长期保持在低水平，表现出明显的精度优势。这一特征体现出清代地图制图以北京经线为测绘起点的制度特征，中央区域的控制点往往配备天文观测、经纬仪测角与高频交会网，有利于实现更高几何精度。

综上所述，地图空间误差在纬度与经度方向上均存在不均衡分布与聚集趋势，表现为“中纬高误差段”与“西部高误差带”的叠加效应。误差等级突变的“跳点”多集中于地形复杂、控制链薄弱区域，是误差空间结构的关键节点。中央经线附近的高精度稳定带则展现出清代地图控制网络的几何核心地带。上述发现为进一步研究清代地图的成图机制、控制点布设逻辑与误差传播路径提供了实证基础。

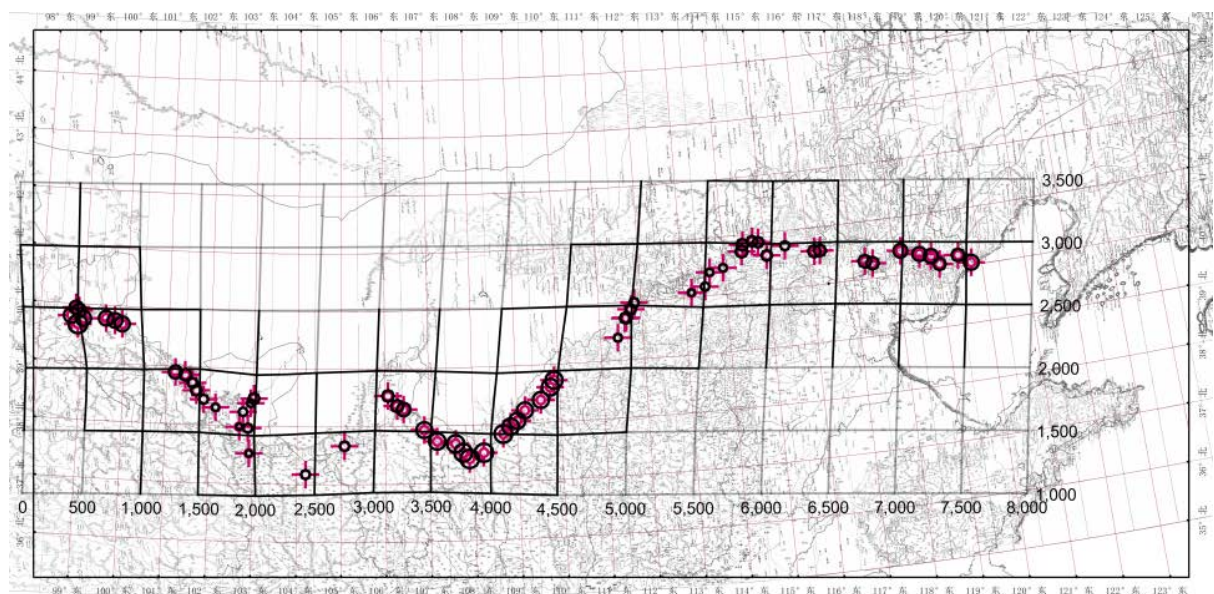


Figure 11. Visualization of distortion grid in historical map
图 11. 历史地图失真网格的可视化

图 11 展示了通过 Map Analyst 软件生成的康熙《皇舆全览图》长城地区的失真网格图，直观反映了历史地图中长城沿线及其周边区域的空间变形特征。可以看出，东部地区网格较为均匀，形变较小，表明该区域绘制精度较高；而中西部部分区域则出现明显的网格扭曲和拉伸，显示出较为显著的地图变形现象，进一步验证误差“东精西粗”趋势。

3.2. 长城线精度对比分析

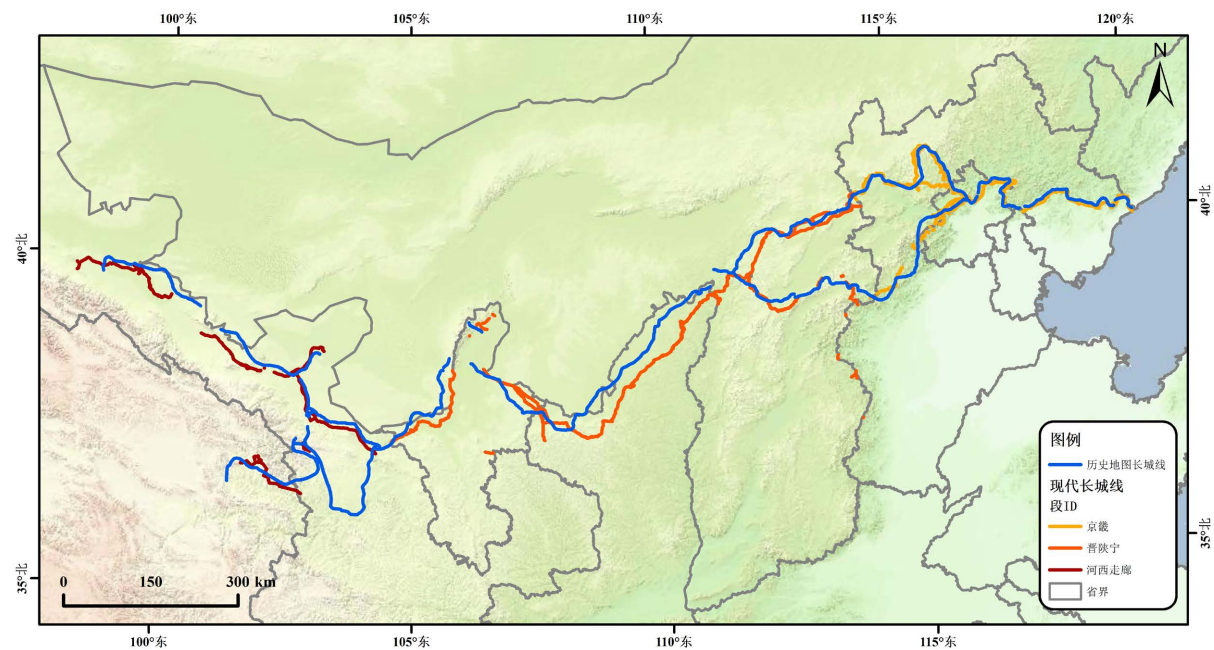


Figure 12. Comparative analysis of modern vs. historical Great Wall Alignments by zone
图 12. 分区后的现代 - 历史长城边墙的对比

为更直观评估《皇舆全览图》长城段的成图精度,本文采用线状轮廓比对的方法,将现代长城边墙12段按上述分区,与历史地图中长城走向线进行空间叠加与形态对照得到图12。历史长城线由经条件筛选的长城线生成,现代长城线则参考现势地理数据构建。图像叠加结果显示,两条线在整体地理架构上高度一致,走向吻合度较高,特别是在东部京畿地区,历史线几乎与现代线重合,反映出该区域测量控制的精确性与地图制图起点的技术优势。

然而在中部晋陕宁段与西部河西走廊区域,两者走向一致性有所下降,尤其在部分地段出现线条偏移、形态弯折不一等现象。具体表现为:晋陕段的历史线在多个堡口点附近发生北偏或南偏,可能反映了地形干扰下三角控制的不稳定;而河西走廊段由于地形狭长、观测条件有限,历史长城线呈现出局部折线拉直、节点偏移的趋势。这类走向差异揭示出清代测绘在边远复杂区域的精度控制难度与误差传导现象。

总体而言,通过线状轮廓对比,《皇舆全览图》在长城段的绘图表现出较强的几何一致性,尤其是在中心经线附近表现优异。该对比方式为后续地图精度的图解与机制分析提供了形态学基础支撑。

4. 地图误差成因探讨

4.1. 测量技术限制

通过对长城沿线堡口点的经纬差与空间距离误差进行分析,可见《皇舆全览图》中的空间误差与清代测绘技术条件密切相关,特别体现在天文观测与三角测量的局限性上。

在纬度测定方面,清代主要采用太阳正午高度法或北极星高度法,测量相对直观,误差相对较小。而经度需依赖跨地域的时间差观测,如月食、木星掩星或木卫一等天象事件,推算过程复杂,易受天气与仪器精度影响,误差远大于纬度[18]。在多数情况下,仅少量控制点使用天文实测,其余位置则通过三角测量推算获得。

三角测量法以基线与角度为基础,构建测量网络,并逐级计算地物经纬度。由于当时缺乏现代计算与误差控制手段,误差在多级联测中不断积累。Konvitz(1982)指出,18世纪法国卡西尼测量中需依赖大量冗余观测与人工校验来控制误差[19],清代测绘面临相似挑战。

三角测量体系本身具有误差传递性,即便单次观测误差很小,长期延伸仍可能导致整体位置漂移与局部扭曲,影响地图的几何一致性。因此,在地形复杂、距离较长的长城区域,误差更为显著。

总体来看,康熙时期测图在精度控制上受限于观测条件与测量技术,构成了《皇舆全览图》空间误差的技术根源。

4.2. 地理环境对大地测量的难度

长城沿线地形复杂,自东部的山海关沿海平原、燕山山地,过渡至中部黄土高原与西部河西走廊,整体地势起伏显著,地貌类型多样。复杂地形不仅增加了测量路径的长度与绕行频率,也使测点选取受限,难以精准定位,进而影响测绘结果的空间准确性。

气候条件亦是影响测量精度的重要因素。长城沿线地区常出现大雾、沙尘暴等极端天气,易干扰天文观测与仪器操作,尤其在干旱半干旱地带,气候波动频繁,观测条件更为不稳定。

此外,交通条件与地理可达性直接制约测绘范围与精度。在地势平缓、人烟稠密、交通便利的地区,测绘工作推进顺利,数据较为详实;而在高山、荒漠等偏远地带,往往因难以实地布点而依赖间接估算,导致地图精度显著下降。有研究指出,乾隆《内府舆图》中测绘路线附近的地理要素精度显著高于远离路线的区域[20]。

Konias也指出,历史地图在开阔地区与建筑区的预测准确性普遍优于森林和山地[21]。这表明,自然地理条件显著影响地图测量精度与空间误差分布。总体而言,长城沿线地貌起伏、气候扰动与地理可达

性的差异,构成了《皇舆全览图》中空间误差产生的重要环境因素。

4.3. 制图与复制过程影响

《皇舆全览图》在成图过程中经历了实地测绘、大地控制点布设、总图绘制、誊抄复制与雕版印刷等多个环节,各阶段均可能引入误差,进而影响地图的整体空间精度。

在制图阶段,由于当时尚无统一的投影体系,测绘人员多凭经验将观测数据平面展开,易造成比例尺不统一,尤其在大范围地图中表现为尺度变形与局部几何失真。

地图的复制与传播过程也是误差的重要来源。人工誊抄、木刻或铜版印刷在图面细节、边界线条等方面存在一定变形风险,尤其在描绘密度较低或边远地区,图形模糊与简化现象更加明显,进一步削弱地图的几何准确性。

此外,作为具有政治与军事功能的地图,《皇舆全览图》在关隘、城池等要素的表现上可能存在有意的强化或简化,形成主观性图形处理。这种意图性表达可能影响部分区域的客观还原度,从而对地图的一致性和空间精度造成干扰。

从测量与印刷角度来看,实测本身所带来的误差,加之雕版印刷的线条变形,也为地图误差的形成提供了条件[22]。更重要的是,地图拼接与投影处理的不规范,尤其是在高纬度地区,极易引发经纬度坐标的系统性偏移。

4.4. 耶稣会士测绘团队对地图精度影响的实证探讨

康熙四十七年(1708 年),康熙帝下令组织对全国进行实地测图工作,命耶稣会传教士白晋(Jean-Baptiste Régis)、雷孝思(Pierre Jartoux)、杜德美(Joseph de Mailla)等人负责西部边疆地区的测绘任务,尤其包括长城沿线的实地测量。三人中,白晋出生于法国利曼,早年加入耶稣会(1678 年),1684 年受法国国王路易十四之命前往中国传教,出发前被授予“国王数学家”称号,并成为法国科学院院士,具备扎实的天文、数学和测绘背景,是团队中资历最深、测量经验最为丰富者。

雷孝思与杜德美为康熙帝决定派白晋回欧时,由其招募并带回中国的传教士,二人均具备一定的数学与地图绘制知识,但从出生年份与实际履历来看,其测绘经验不及白晋。在地图实测过程中,白晋原计划率队自北京出发,沿长城西行展开测绘。但据阎宗临先生在《白晋测绘〈皇舆全览图〉之资料》[23]中记载,白晋在出京门不久即因坐骑受惊跌落马下,导致伤病,虽带伤坚持测量,但伤势于陕西神木复发,不得不就地休养,并最终返回北京静养。

据本研究数据分析,在白晋进入神木前地图误差就已逐步增大:长城沿线的空间误差自此出现明显跳跃,误差等级上升,甚至在河西走廊段出现多处超过 35 km 的误差点,为全图最密集的高误差点。这一趋势与白晋因伤中途退出测绘任务的时间线高度吻合,提示从神木以西的测绘工作由雷孝思与杜德美主导。由于二人测绘经验有限,在高原地形复杂、测量链条较长的西部区域,精度控制可能受到较大影响。

另一方面,据阎宗临所述,雷、杜二人“测至西宁”,并非完成整个西段长城的实测任务。而嘉峪关段的地图精度则显著下降,最大误差达 59.24 km,推测该部分可能引用了前代地图或非实测资料。地图线形分析亦表明,西段河西走廊长城轮廓线在形态精度上较东段显著退化,间接印证了成图来源存在替代性、拼接性问题。

综合上述材料可推断,测绘长城团队在长城测绘过程中由于主测人员的更替与测绘任务的转交,对地图误差的空间分布造成直接影响。白晋主导测区(北京至神木)地图精度整体较高,而雷、杜测区(神木以西)误差普遍增大,空间跳点频发。这不仅揭示了实测路线的“断裂”对地图几何质量的直接影响,也为理解清代地图误差成因中“人员因素”的作用提供了重要佐证。

4.5. 地方社会对传教士的态度及地图测量工作的影响

《皇舆全览图》的测绘精度受到地方合作程度的显著影响。现存文献记载显示[24], 测绘团队在中国东北地区获得了较充分的地方协作, 包括行政支持与民众配合, 这为该区域测绘数据的准确性提供了保障。而朝鲜半岛的测绘工作则面临不同的实施环境, 现存史料表明[25], 受当时当地政策限制, 测绘团队在该地区的活动范围和数据采集方式受到特定约束, 这可能与该区域最终成图呈现的几何变形存在关联。

这一现象表明, 地方政府和民众的配合程度直接影响了测绘数据的完整性与准确性。在支持度高的地区, 测量点可以合理布设, 天文观测与基线测量能够按规范实施, 误差得以控制; 而在限制重重的地区, 则常常只能依靠间接推测和外缘测量, 缺乏实地验证, 精度大幅下降。对于长城沿线的测绘工作而言, 沿途各省地方社会和地方政策的不同, 亦在一定程度上决定了实测数据的获取难易程度, 从而影响到最终地图成图的精度分布格局。

5. 结论

本研究基于 GIS 技术对康熙《皇舆全览图》长城段(山海关至嘉峪关)的空间精度进行了系统评估, 揭示了其误差分布特征及影响因素。主要结论如下:

误差呈现显著地域差异, 整体表现为“东精确、西粗略”的趋势。京畿地区误差最小(平均 4.65 公里), 晋陕宁(平均 22.18 公里)和河西走廊(平均 20.45 公里)误差显著增大, 其中经度 $97^{\circ}\sim 105^{\circ}$ 区间存在明显的高误差波动带, 并识别出 $98^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 和 $103^{\circ}\sim 104^{\circ}$ 两个关键“误差跳点”区, 反映出三角测量控制失准或测量链断裂问题。精度控制机制具有空间依赖性, 中央经线 116.38° 附近误差最稳定, 表明以北京为核心的大地测量系统在东部地区($112^{\circ}\sim 120^{\circ}$)具备更强的精度控制能力, 而西部则因投影变形、控制点稀疏及测量链延伸导致误差累积。

测绘团队变动及地方协作差异对精度影响显著。白晋(1708 年主导高精度测绘)因伤退出后, 西段误差突增, 反映后续团队(雷孝思等)在复杂地形下的测量能力不足; 同时, 地方行政支持的强弱直接影响测点布设质量, 进一步加剧区域精度差异。

误差形成是多重因素叠加的结果, 包括三角测量累积误差、早期仪器限制、地形干扰及成图处理差异。本研究通过“误差跳点”和“中央经线优势区”的发现, 为理解清代测绘系统的空间组织逻辑提供了新的解释框架, 同时强调了人员因素在历史地图精度研究中的关键作用。

6. 讨论

本研究通过 GIS 技术系统评估了《皇舆全览图》长城段的空间精度, 在取得重要发现的同时, 也揭示了若干需要深入探讨的问题, 这些发现对相关领域具有重要的实践价值。

在数据层面, 受限于历史文献的完整性和准确性, 部分地名的古今对应仍存在不确定性, 特别是长城西部地区因史料匮乏导致数据覆盖不足。建议未来整合考古报告、遥感影像等多源数据, 完善地名匹配工作。在方法学方面, 当前采用的二维误差评估未能充分考虑地形因素, 建议引入数字高程模型(DEM)构建三维评估体系, 并运用空间统计方法深入分析误差分布规律。同时, 需要进一步考察清代测绘技术的实际局限及其对“长城”概念的特定理解, 这有助于更准确地解读历史地图信息。

研究成果在实践应用方面具有多重价值: 可为长城遗址的精确定位和保护规划提供科学依据, 建议建立历史地理信息系统辅助管理工作; 可开发数字导览系统促进公众教育, 同时为测绘学科提供历史案例参考; 更重要的是, 建议推动历史学、考古学与地理信息科学的深度合作, 建立历史地图研究的标准框架。未来通过多学科协作和技术创新, 将进一步完善研究方法, 为文化遗产保护提供更有力的支持。这些探索既深化了对传统测绘技术的认识, 也为当代相关领域发展提供了宝贵的历史借鉴。

基金项目

国家社科基金冷门绝学研究专项学者个人项目(项目编号: 22VJXG018), 中央高校基本科研业务费专项资金(项目编号: 2023JBZH004)。教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目招标课题《清时期中国区域地理研究(1644-1911)》(项目编号: 241ZD022)。

参考文献

- [1] 卢良志. 中国地图学史[M]. 北京: 测绘出版社, 1984: 179.
- [2] 曹增友. 传教士与中国科学[M]. 北京: 宗教文化出版社, 1999: 223.
- [3] 李约瑟. 中国科学技术史[M]. 北京: 科学技术出版社, 1978.
- [4] Elman, B.A. (2003) The Jesuit Role as “Experts” in High Qing Cartography and Technology. *NTU History Bulletin*, **31**, 223-250.
- [5] 汪前进. 康熙铜版《皇舆全览图》投影种类新探[J]. 自然科学史研究, 1991(2): 186-194.
- [6] 韩昭庆, 杨霄, 刘敏, 何国璠. 康熙《皇舆全览图》长城以南地区绘制精度的空间分异[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2021, 36(3): 25-33+205-206.
- [7] 郭美兰. 乾隆年间西北地区三次绘图始末[J]. 满语研究, 2013(1): 139-144.
- [8] 靳煜. 清乾隆年间西域测绘再考察[J]. 历史地理, 2014(2): 249-266.
- [9] 陆俊巍, 韩昭庆, 诸玄麟, 等. 康熙《皇舆全览图》投影种类的统计分析[J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 16-18+27.
- [10] 汪前进. 乾隆十三排图定量分析[M]//曹婉如, 郑锡煌, 黄盛璋, 等. 中国古代地图集(清代). 北京: 文物出版社, 1997: 113-119.
- [11] 韩昭庆, 李乐乐. 康熙《皇舆全览图》与《乾隆十三排图》中广西地区测绘内容的比较研究[J]. 复旦学报(社会科学版), 2019, 61(4): 1-12.
- [12] 李莉婷, 韩昭庆. 康熙《皇舆全览图》和《乾隆十三排图》中广东地区图面内容的比较研究——兼与广西地区对比[J]. 历史地理研究, 2021, 41(1): 141-151+160.
- [13] 杨丽婷. 清廷三大实测全图东北地区比较研究[J]. 历史地理研究, 2022, 42(2): 103-116+158.
- [14] Timár, G., Mészáros, J. and Molnár, G. (2014) A Simple Solution for Georeferencing the Cassini Map Series of France. *Proceedings of the 9th International Workshop on Digital Approaches to Cartographic Heritage*, Budapest, 4-5 September 2014, 4-5.
- [15] Timár, G. (2021) Georeference of Map of Denmark by Bugge and Wessel (1762-1777). *e-Perimetron*, **16**, 184-189.
- [16] Jongepier, I., Soens, T., Temmerman, S. and Missiaen, T. (2016) Assessing the Planimetric Accuracy of Historical Maps (Sixteenth to Nineteenth Centuries): New Methods and Potential for Coastal Landscape Reconstruction. *The Cartographic Journal*, **53**, 114-132. <https://doi.org/10.1179/1743277414y.0000000095>
- [17] Hessler, J.W. (2006) Warping Waldseemüller: A Phenomenological and Computational Study of the 1507 World Map. *Cartographica*, **41**, 101-114. <https://doi.org/10.3138/n328-6721-3282-122n>
- [18] 冯立升. 乾隆时期西北地区的天文大地测量及其意义[J]. 中国边疆史地研究, 1999(3): 61-69.
- [19] Konvitz, J.V. (1982) Redating and Rethinking the Cassini Geodetic Surveys of France, 1730-750. *Cartographica*, **19**, 1-15. <https://doi.org/10.3138/w62k-3152-7062-5267>
- [20] 李嵩林, 那顺达来, 金泉, 等. 清朝乾隆《内府舆图》地理要素绘制特征研究——以新疆地区为例[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学版), 2024, 53(4): 400-406.
- [21] Konias, A. (2000) Kartografia topograficzna Śląska Cieszyńskiego i zaboru austriackiego: Od II połowy XVIII wieku do początku XX wieku. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego.
- [22] 韩昭庆. 康熙《皇舆全览图》的数字化及意义[J]. 清史研究, 2016(4): 53-60.
- [23] 阎宗临. 阎宗临史学论著三种[M]. 太原: 三晋出版社, 2015: 146-147.
- [24] 余定国. 中国地图学史[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 214-215.
- [25] [法] J.B.杜赫德. 测绘中国地图纪事[M]//《历史地理》第2辑. 上海: 上海人民出版社, 1982: 209.