引文格式：薛凯凯,袁鹏博,位宏,等. 面向戈壁和山区的开放DEM精度评价与分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 102-106. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.020

面向戈壁和山区的开放DEM精度评价与分析

薛凯凯[1]，袁鹏博[1]，位　宏[2,3]，弓　婷[1]，张　群[1]，尚海兴[1,4]
（1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；2. 滁州学院 地理信息与旅游学院，安徽 滁州 239000；
3. 实景地理环境安徽省重点实验室，安徽 滁州 239000；4. 西安市清洁能源数字化技术重点实验室，陕西 西安 710065）

摘　要：对较为流行的开放数字高程模型（DEM）进行多维度的精度分析与评价，解决了在缺乏实测资料的前期规划中，开放DEM数据集在戈壁和山区的适宜性问题。利用GNSS控制测量获取戈壁和山区高精度的实测数据，从高程误差分布、概率曲线图等方面对比了SRTM1、ASTER和ALOS DEM的数据精度，分析了各类数据的地形适应特性。实验表明，ALOS 30 m DEM在相关地形区域的高程精度最高，SRTM1 DEM在平坦地区的表现优于地形起伏较大地区，ASTER DEM能表示更多地形细节但数据噪声严重。

关键词：开放DEM数据集；精度评价；误差统计；测绘数据
中图分类号：P224　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0102-05

Accuracy Evaluation and Analysis of Free Available DEM for Gobi and Mountain Areas

XUE Kaikai[1], YUAN Pengbo[1], WEI Hong[2,3], GONG Ting[1], ZHANG Qun[1], SHANG Haixing[1,4]
(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;
2. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China;
3. Anhui Province Key Laboratory of Physical Geographic Environment, Chuzhou 239000, China;
4. Xi'an Key Laboratory of Clean Energy Digital Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In this article, we conducted multi-dimensional accuracy analysis and evaluation on several popular free available digital elevation models (DEM), solving the suitability problem of free available DEM datasets in the gobi and mountainous areas without actual measurement data. We used GNSS measurement to obtain high-accuracy measured data in the gobi and mountainous areas, compared the accuracy of SRTM1, ASTER, and ALOS DEM through elevation error distribution, probability curve diagrams, and other aspects, and analyzed the terrain adaptation characteristics of various types data. The results show that the ALOS 30 m DEM has the highest elevation accuracy, SRTM1 DEM performs better in flat areas than in large terrain undulations areas, and ASTER DEM can represent more terrain details but with severe data noise.

Key words: free available DEM dataset, accuracy evaluation, error statistics, surveying and mapping data

数字高程模型（DEM）能通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟[1]，既是科学研究、经济建设和国防建设的基础数据和有力工具，又是地学分析、生物学等区域性科学研究成果的表达形式。基于多波段影像数据或探测雷达数据可获取宏观大区域的DEM，其中向公众免费开放的全球DEM主要包括SRTM DEM[2]、ASTER GDEM[3]、ALOS DEM[4]等。针对DEM不确定性及其对应用的影响研究[5-9]是目前DEM领域亟待解决的课题。DEM精度评价主要集中在高程精度方面，分为DEM数据与GPS控制点、国家已知控制点等高精度实测数据的直接对比评价和与高分辨率DEM或精细化DEM等高精度DEM数据的间接内部对比评价。目前全球开放DEM的精度研究主要集中在内部对比评价，如开放DEM之间的比较[10-12]、开放DEM与国家基本比例尺地形图的比较[13-14]。以测绘类实测数据为参考基准，针对风电、抽蓄等电力行业依托的戈壁沙丘、高边坡的山地类地形的开放DEM精度评价较少，多集中于测绘实测生产的高精度DEM地形适宜度评价和准确度分析[15-16]。开放DEM是电站规划选址的重要基础资料，故如何选取合适的开放DEM数据集对该类工程应用具有较大意义。本文基于不同地貌类别，以实测控制点为参考数据，从高程误差分布和概率曲线图等方面对比了几类开放DEM数据集的高程精度，并给出相应的适用范围。

项目来源：中国电建西北勘测设计研究院有限公司科技资助项目（XBY-PTKJ-2022-10、XBY-ZDKJ-2020-08）；安徽省实景地理环境重点实验室开放基金资助项目（2023PGE007）。
第一作者简介：薛凯凯（1993—），硕士研究生，工程师，从事新能源项目的市场开发、勘测设计等技术决策工作，E-mail：kai_soul@outlook.com。

1　研究区与实验数据

本文选取我国境内戈壁、山区两类地形特征较明显且水利水电工程较典型的区域作为研究区。其中，选取新疆和甘肃酒泉境内多片戈壁滩作为戈壁地貌，全区植被覆盖率低，仅有不足0.5 m的骆驼刺零星分布，地形起伏不明显，少有山包地貌陡然显现，冲沟窄且浅，整体地势连成一片，地貌特征统一；选取甘肃境内祁连山段和新疆天山部分余脉作为山区地貌，沟壑纵横，地形起伏度高，地表割裂度大，全区有低草覆盖，部分区段有零星孤木。本文选取的全球开放DEM数据集及其关键参数见表1。

表1　各类DEM数据集的基本参数表

参数	ALOS 30 m DEM	SRTM1 DEM	ASTER GDEM	ALOS 12.5 m DEM
水平基准	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
高程基准	EGM96	EGM96	EGM96	WGS84
空间分辨率/m	30	30	30	12.5
高程精度/m	5	10	13	12
平面精度/m	5	20	30	12
覆盖范围	60°~60°S	60°N~56°S	83°N~83°S	60°~60°S
数据采集技术	立体像对	SAR C波段	立体像对	SAR L波段
数据发布时间	2016年	2003年	2009年	2014年
生产单位	日本JAXA	美国NASA	日本METI和美国NASA	日本JAXA

2　研究方法

DEM的精度比较首先需选择合理的基准参考数据，通过比较发现，基于卫星定位解算并联测国家点得到的点位坐标信息结果更准确，因此以其作为高程的参考数据。本文采用基于GNSS的控制网解算获取精准的参考数据，再对DEM和参考数据进行多维度的定量分析，并对不同开放DEM进行纵向比较与定性分析。

2.1　基于GNSS的静态高程拟合法

采用区域网布点的方式布设像控点，采用GNSS静态测量进行控制点联测[17-18]。以接收机天线位置为固定参量，通过卫星信号与位置数据的变化参量来解算控制点坐标。对GNSS定位产生的控制点位信息网形图中的各基线进行解算，对于不合格的基线采用减小高度截止角、增大采样间隔或调整基线残差序列等方式进行修正。基于已知的国家控制点进行联测，实现约束平差，最终获取可作为参考基准的控制点平面和高程坐标，其中高程坐标包括椭球高和大地高，分别作为对应开放DEM数据集高程比较的基准参考。

2.2　统计分析法

DEM的高程信息是数据的本体位信息，因此DEM质量分析主要集中在高程精度方面。地理空间数据的复杂性使误差与精度模型很难用一种公式表达，不同精度指标常用于描述误差大小，可视化常用于描述和分析误差的空间结构和分布特征。将已知参考基准数据与不同开放DEM进行叠加可视化，对各数据的高程差值进行均方根误差计算、正态分布误差曲线分析，通过量化开放数据间差值来定量评价DEM质量结果，通过DEM差值频率图反映其不同的空间分布特征。由于不同开放DEM数据采用的高程基准不同，因此以其实际采用的基准与对应的参考基准进行一对一的统计分析，以消除椭球高和大地高的变量因素。

本文采用平均误差、中误差和标准差来评价DEM质量，其中中误差是从整体上描述地形参数与其真值的离散程度，提供了真值可能存在的范围。误差统计模型需要合理的误差频率分布假设，而中误差假定误差服从均值为0的正态分布，无法揭示误差中的系统成分，因此常用标准差来代替中误差。此外，莫兰指数可表征误差的空间自相关程度，反映误差平均值和方差的变化。误差的自相关性对戈壁、山区等地形分析结果的影响是系统性的，将引起中误差对分析结果评价的偏差。

3　研究结果分析

3.1　描述性统计

对研究区各区块进行GNSS高程拟合解算，得到140个控制点；再根据布尔莎七参数模型获取3 000余个检查点，将控制点与检查点作为高程误差模型中的参考高程值。基于栅格提取至点的原理，提取参考点所在的不同开放DEM数据的点位像素值，对于ALOS 30 m DEM、SRTM1 DEM、ASTER GDEM数据，高程基准为EGM96，将源数据的大地高与控制点位解算求得的大地高作差值，并统计其精度，以衡量大地高的高程精度；对于ALOS 12.5 m DEM，高程基准为

WGS84，将源数据的椭球高与控制点自由网平差后的椭球高作差，并统计其精度，以衡量椭球高的高程精度。误差统计结果见表2、3，可以看出，在山地区域，ALOS 30 m和ASTER的误差较稳定，均值不足1 m，其中ALOS 30 m的极差、标准差和中误差均显著小于其他数据，误差的离散程度较低，误差自身相对于误差整体的浮动较小，整体数据更稳定。ALOS 12.5 m、SRTM1和ASTER的标准差和中误差较接近，SRTM1略小于另外两类数据。在戈壁区域，误差统计整体与山地区域类似，但仍有不同：ALOS 30 m和ASTER的平均值仍为最小，但ALOS 12.5 m和SRTM1也较小，最大仅为2.697，4类DEM数据的平均值差异不明显；ALOS 30 m和SRTM1的极差明显小于ALOS 12.5 m和ASTER，其中SRTM1在山地区域的极差小于戈壁区域，与其他数据相异。在戈壁区域，要警惕ALOS 12.5 m、ASTER的噪声风险，局部数据不可信。4类DEM的标准差和中误差均呈现戈壁区域小于山地区域的趋势，DEM之间的比较也一致，即ALOS 30 m < SRTM1 < ALOS 12.5 m < ASTER。山地区域中ALOS 12.5 m、SRTM1、ASTER的标准差和中误差较接近；而戈壁区域中ALOS 30 m和SRTM1的标准差和中误差较接近，说明SRTM1在戈壁区域的误差整体稳定性明显强于山地区域。

表2 山地区域高程误差精度统计

数据类型	平均值	极差	标准差	中误差
ALOS 30 m	0.213	9.965	2.803	2.766
ALOS 12.5 m	5.471	37.495	9.463	10.798
SRTM1	6.147	30.054	7.304	9.456
ASTER	0.125	44.293	10.984	12.587

表3 戈壁区域高程误差精度统计

数据类型	平均值	极差	标准差	中误差
ALOS 30 m	−0.887	10.422	1.674	1.889
ALOS 12.5 m	2.697	45.728	5.976	6.537
SRTM1	1.852	12.305	2.304	2.949
ASTER	−0.074	55.293	9.027	8.994

3.2 莫兰指数

本文采用莫兰指数[19]验证各数据源的空间自相关程度，即高程在位置属性上是否具有一定的相关特征。莫兰指数可判定一定范围内空间实体相互之间是否存在相关关系，取值范围为−1.0~1.0。Moran's I >0表示空间正相关，值越大相关性越大；Moran's I <0表示空间负相关，值越小空间差异越大；Moran's I =0则空间呈随机性。通过全局莫兰指数的P值和Z得分可判断各数据源空间是否出现了集聚或异常值。各DEM数据源的莫兰指数见图1、2，可以看出，戈壁区域中SRTM1、ALOS 12.5 m、ASTER的误差在空间上呈集聚性，空间自相关性明显，其中ALOS 12.5 m的集聚效应最强，说明误差分布具有一定规律性，数据在该类地形的代表性较强；山区区域中ALOS 30 m和ASTER的误差在空间上呈集聚性，空间自相关性明显，其中ALOS 30 m的集聚效应较强，说明数据在该类地形的代表性较强。综上可知，ASTER的数据质量在全局地形代表性中的表现较可靠，不同分辨率的ALOS数据在不同地形中表现不同。

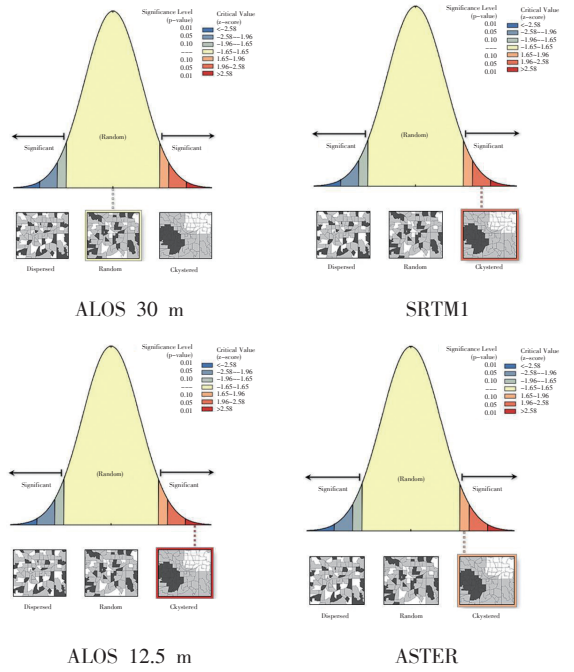


图1 戈壁区域DEM空间自相关的比较

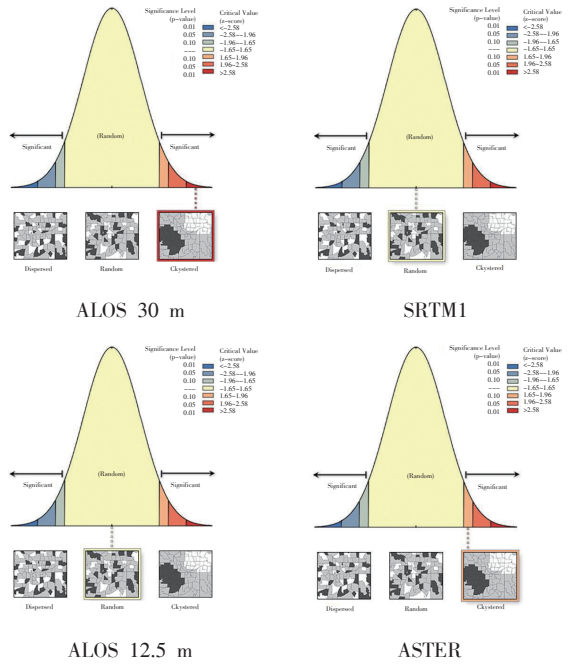
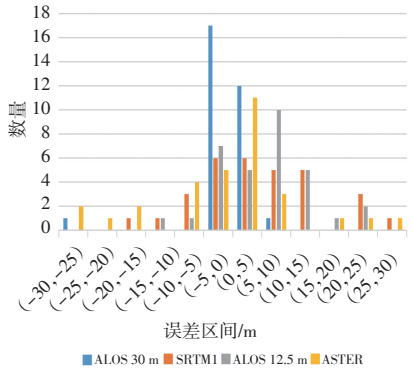


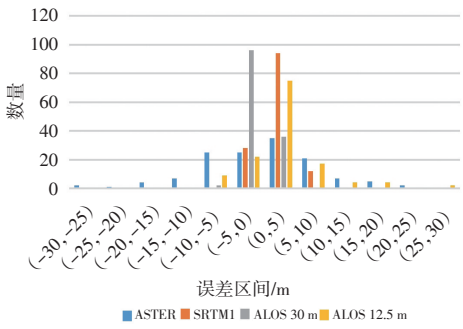
图2 山地区域DEM空间自相关的比较

3.3　高程误差分析

对山地和戈壁区域的高程点精度误差进行统计，结果见图3，可以看出，无论是山地还是戈壁，各类DEM数据均呈正态分布，结果较为可信，山地区域ALOS 30 m误差大部分集中在−5~5 m，精度最高，SRTM1和ALOS 12.5 m误差多趋于正数，即DEM低于控制点实测高程值；戈壁区域SRTM1误差多集中在−5~0 m，即DEM高于控制点实测高程值；ALOS 30 m误差多集中在0 ~5 m，即DEM低于控制点实测高程值；ASTER数据在各区段均有分布，整体呈均衡正态分布，数据质量不佳。



a 山地区域

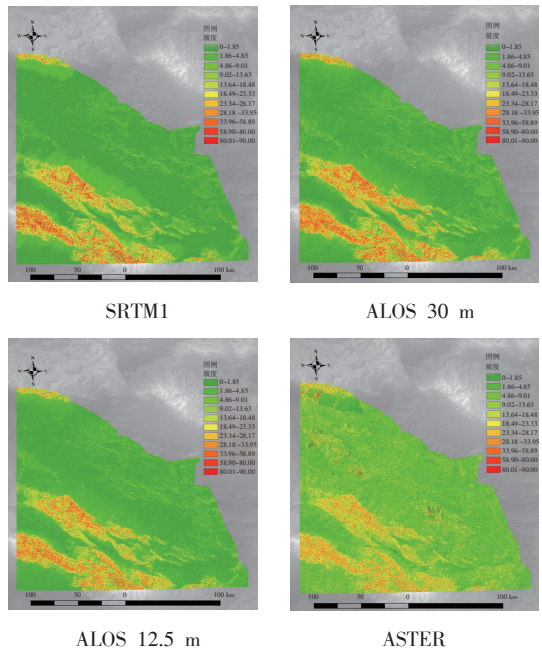


b 戈壁区域

图3　山地、戈壁区域DEM高程精度误差比较

3.4　坡度分析

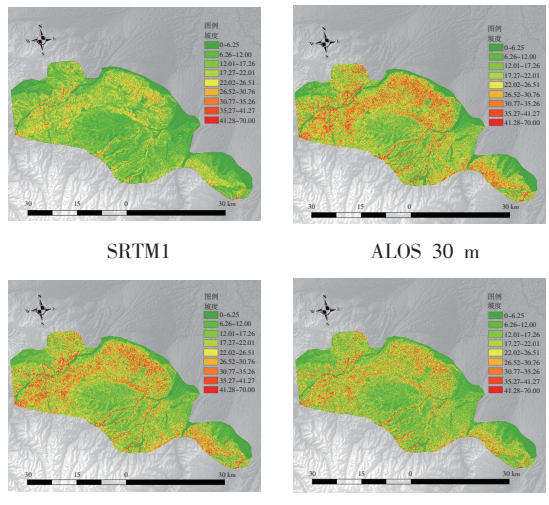
本文选取典型的戈壁样区与山地样区的坡度进行比较[20]，结果见图4~6。在典型戈壁样区坡度比较中，SRTM1数据中没有大于58.89°的坡度，ASTER数据独有大于80°的坡度，整体数据坡度噪声很多；在低坡度区域，SRTM1数据最连续，坡度质量最好。在坡度统计比较图中，ASTER在4.85~9.01°区间的比值最大，而另外3类数据随着坡度的升高，面积均呈下降趋势；ALOS 30 m和ALOS 12.5 m数据的表现高度一致，其空间分辨率未对DEM表达造成大的波动；SRTM1数据在0~4.85°区间的比值最高，说明其DEM较平缓。各类数据的坡度统计符合戈壁区的地形地貌特征，即地形平缓、沟道宽阔、沙丘林立。在典型山地样区的坡度比较中，SRTM1数据的整体坡度偏小，能显示更平整的沟道信息，对连绵起伏的山地有平滑作用，对复杂地形细小山谷线的表达能力较弱；ASTER数据的噪声最大，数据质量不佳；相较于ALOS 12.5 m，ALOS 30 m数据的整体坡度偏小，体现了随着DEM分辨率变低，斜率趋于减小的客观特征。在坡度统计比较图中，4类数据的坡度区间比例均呈先升后降的趋势，在6.25~12°区间的比例均达到最大值，说明山地区域沟道较短较窄，大部分呈现6.25~12°的起伏程度；其中SRTM1数据的表现最明显，6.25~12°区间的比例达到28%左右，大坡度区域的面积最小。坡度是DEM响应地形表面局部变化的有效方法，整体上4类数据集的斜率存在良好的一致性。



SRTM1　　ALOS 30 m

ALOS 12.5 m　　ASTER

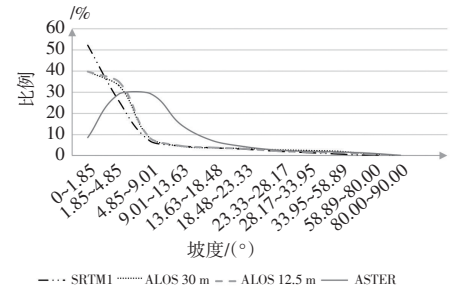
图4　典型戈壁区域各DEM坡度图



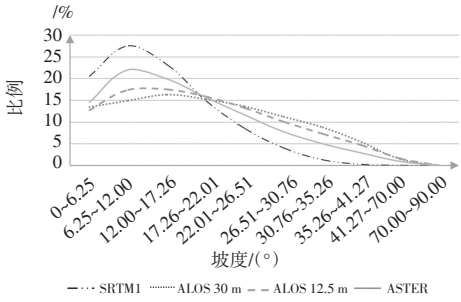
SRTM1　　ALOS 30 m

ALOS 12.5 m　　ASTER

图5　典型山地区域各DEM坡度图



a 戈壁区域



b 山地区域

图6 典型戈壁、山地区域坡度统计比较图

4 结 论

本文介绍了ALOS 30 m、SRTM1、ASTER和ALOS 12.5 m四类DEM数据集的情况，选取多个戈壁和山地样区进行静态控制网测量，并联测国家点，基于七参数转换获取平面坐标和水准高。以高精度水准高和椭球高为参考数据，从基于统计分析、高程误差分布、空间自相关性和坡度等方面对比分析了4类开放DEM的高程精度。结果表明，戈壁区域中ALOS 12.5 m的集聚效应较强，SRTM1和ALOS 30 m的精度较高，前者高程值多高于参考数据，后者高程值多低于参考数据；山地区域中ALOS 30 m的空间自相关性明显，SRTM1和ALOS 12.5 m的高程值均高于参考数据。整体而言，ALOS 30 m的精度最高，SRTM1在平坦地区的表现优于地形起伏较大地区，ASTER可表示更多的地形细节但数据噪声严重。因此，在规划生产中优先采用ALOS 30 m DEM提供准确的高程信息，若要求数据源不能低于真实值，在戈壁区域推荐采用SRTM1 DEM数据。

参考文献

[1] 汤国安,李发源,刘学军. 数字高程模型教程[M]. 北京:科学出版社,2022

[2] 郭华东,王长林. 全天候全天时三维航天遥感技术:介绍航天飞机雷达地形测图计划[J]. 遥感信息,2000,15(1):47-48

[3] 惠凤鸣,田庆久,李应成. Aster数据的DEM生产及精度评价[J]. 遥感信息,2004,19(1):14-18

[4] 袁小棋,李国元,高小明,等. AW3D 30 m DSM数据质量分析及部分典型区域精度验证[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(4):98-101

[5] Hohle J,Hohle M. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Means of Robust Statistical Methods[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2009,64(4):398-406

[6] 王光霞. DEM精度评估方法的研究与实践[J]. 测绘科学,2006,31(3):73-75

[7] 朱鸿清. 数字化等高线数据得出的数字高程模型的精度[J]. 测绘标准化,1995,11(2):25-30

[8] 祝志明. DEM数据精度检查方法探讨[J]. 测绘科学与工程,1997,8(2):48-49

[9] 李国忠. 关于DEM的高程、坡度、坡向精度评估[J]. 黑龙江测绘,1996,19(2):40-43

[10] 张朝忙. 中国地区SRTM3 DEM与ASTER GDEM高程精度质量评价[D]. 武汉:华中农业大学,2013

[11] 武文娇,章诗芳,赵尚民. SRTM1 DEM与ASTER GDEM V2数据的对比分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(8):1 108-1 115

[12] 何维灿,苏梓璇,武文娇,等. 境外区域资源三号DEM与SRTM1 DEM质量对比分析[J]. 遥感信息,2021,36(6):94-102

[13] 孙亮,刘平芝,张卫柱,等. Aster DEM数据与1∶50 000地面高程库数据的精度比较分析[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(9):1-6

[14] 侯溯源,孙亮,谭美景,等. 利用1∶50 000高程数据进行ASTER DEM异常修复研究[J]. 海洋测绘,2013,33(5):53-56

[15] 张磊,袁鹏博,李小林. 基于GIS空间分析的风机微观选址研究[J]. 陕西水利,2021(10):9-10

[16] 贺春林,何领军,薛凯凯,等. 大落差稀疏像控点倾斜摄影建模及精度评价[J]. 西北水电,2022(4):41-45

[17] 李存文. GPS控制网的两种观测模式的对比试验[J]. 地理空间信息,2014,12(4):107-108

[18] 何兵,符训,罗刚. 浅谈GNSS静态测量数据处理方法[J]. 计量与测试技术,2015,42(7):36-38

[19] 陆娟. 基于莫兰指数的盗窃犯罪率全局分布模式分析[J]. 警察技术,2014(1):45-46

[20] 陈楠,汤国安,朱红春. 不同空间分辨率DEM提取坡度不确定性研究[J]. 水土保持研究,2006,13(3):153-156