

一种公开DEM数据的境外高程精度评估方法

戴泽源¹, 张立华^{1*}, 刘翔², 陈秋³

¹海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系, 辽宁 大连

²海图信息中心, 天津

³91001部队, 北京

收稿日期: 2023年6月8日; 录用日期: 2023年7月13日; 发布日期: 2023年7月20日

摘要

针对当前公开DEM数据缺乏境外精度评估手段的不足, 本文提出一种基于机场跑道数据的境外DEM数据精度评估方法。利用机场跑道的平直特性, 通过航行资料获取跑道坐标及高程信息, 并以欧亚地区78座机场为实验区域, 平均误差、平均绝对误差、中误差为统计指标, 对SRTM、ASTER GDEM、AW3D30、TanDEM-X DEM等多种公开DEM数据的精度展开定量评估。实验结果表明: 在现有的公开DEM数据中, TanDEM-X与AW3D30的高程精度最高, SRTM次之, 而ASTER的高程精度则相对较低, 本文方法为公开DEM数据的境外精度评估与优选提供了一种新的手段。

关键词

公开DEM, AIP, 高程, 精度评估

An Elevation Accuracy Assessment Method for Open DEM Data

Zeyuan Dai¹, Lihua Zhang^{1*}, Xiang Liu², Qiu Chen³

¹Department of Military Oceanography and Hydrography, Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning

²Chart Information Center, Tianjin

³Troops 91001, Beijing

Received: Jun. 8th, 2023; accepted: Jul. 13th, 2023; published: Jul. 20th, 2023

Abstract

Due to the lack of an accuracy evaluation method for the public DEM data in overseas areas, this

*通讯作者。

文章引用: 戴泽源, 张立华, 刘翔, 陈秋. 一种公开DEM数据的境外高程精度评估方法[J]. 测绘科学技术, 2023, 11(3): 271-278. DOI: 10.12677/gst.2023.113031

paper proposes a DEM data accuracy evaluation method based on airport runway data. Making use of the straightness of the airport runway, the runway coordinates and elevation information are obtained from the AIP data. 78 airports in Eurasia are taken as the experimental area, and the average error, average absolute error, and root mean square error are used as statistical indexes to quantitatively evaluate the overseas elevation accuracy of SRTM, ASTERGDEM, AW3D30, and TanDEM-X DEM. The experimental results show that among the existing public DEM data, the elevation accuracy of TanDEM-X DEM is the highest, followed by AW3D30, SRTM, and ASTER. It provides a new method for overseas accuracy evaluation and optimum selection of elevation data.

Keywords

Open DEM, AIP, Elevation, Accuracy Assessment

Copyright © 2023 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

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是区域地面高程的数字表示[1], 被广泛运用于生态环境、水文地质、灾害评估等领域[2], 并具有辅助卫星影像无控定位的应用潜力[3] [4], 是战时快速获取境外信息, 实现由海对陆打击的重要保障。近年来, 各种高分辨率、高精度的全球公开 DEM 数据陆续公开发布, 开展不同 DEM 数据的高程精度评估成为一项重要的基础性工作[5]。现有的 DEM 数据评估方法通常采用单点高差法, 即通过野外测量[6]、地形图量测[7]、机载/星载 Lidar [8] [9]等多种手段获取检查点, 并将检查点的高程同 DEM 数据中的高程进行比较。但是, 精度可控的境外测量数据获取困难, 且野外实测数据成本较高, 难以实现多区域、大范围 DEM 数据的有效评估。针对以上不足, 本文提出一种利用机场跑道数据的公开 DEM 数据境外精度评估方法, 通过收集公开民用航行资料汇编(Aeronautical Information Publication, AIP)获取精度可控的境外高程控制数据, 用以定量评估公开 DEM 数据的精度, 为高程数据的后续应用提供坚实基础。

2. 研究数据

2.1. 公开 DEM 数据

目前, 已有 SRTM、ASTER GDEM、AWD30、TanDEM-X DEM 等多种公开 DEM 数据, 其均具有开放获取、近全球覆盖的特点[5], 为便于后续对比分析, 有必要分别对其数据收集方式与处理特点进行简要介绍。

SRTM 数据基于奋进号航天飞机上的 C 波段合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)结果制作, 覆盖了全球 80%以上的陆地表面, 是全球使用最广泛的公开 DEM 数据之一。自发布以来, SRTM 数据历经多次修订, 去除了绝大部分奇异值, 并采用多种插值方法填补了数据空洞, 最近一次为国际热带农业中心于 2008 年发布的 SRTMV4.1, 空间分辨率为 3'' (约 90 m)。

ASTER GDEM 数据由日本经济产业省生产, 借助部署于美国 Terra 卫星上的先进星载热发射和反辐射计, 通过近红外波段的垂直向下成像传感器和后视成像传感器获取了约 120 万景立体像对, 并采用立体像对生成空间分辨率 1'' (约 30 m)的 DEM 数据。ASTER GDEM 数据进行过两次较大的修订, 通过改进处理算法, 在一定程度上提升了高程精度。

AW3D 是日本宇宙航空研究开发机构利用 ALOS 卫星拍摄的 300 万景立体像对生产的 DEM 数据。原始产品空间分辨率约为 5 m，主要用于商业用途，AW3D30 为经过降采样得到的公开发布产品，空间分辨率为 1''，其标称平面与高程精度均为 5 m，是目前标称精度最高的公开 DEM 数据。

TanDEM-X DEM 是德国航空航天中心主导发射的 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 卫星编队对地 InSAR 任务的 DEM 数据产品。自 2010 年以来，该任务利用 X 波段单通道合成孔径雷达对全球地表进行了至少 2 次扫描，通过干涉测量生成全球数字高程模型。2016 年对外发布的 TanDEM-X DEM 空间分辨率为 3''，是目前数据现势性最强的公开 DEM 数据。

综上所述，本文所用的公开 DEM 数据的基本信息可如表 1 所示。

Table 1. The basic information of the analyzed DEM data

表 1. 本文所评估的 DEM 数据的基本信息

DEM 数据	采集手段	发布时间	分辨率
SRTMv4.1	InSAR	2008	3''
ASTER GDEMv3	光学立体像对	2019	1''
AW3D30v2.2	光学立体像对	2019	1''
TanDEM-X DEM	InSAR	2016	3''

2.2. AIP 数据

AIP 和航海书表的性质类似，是为保障航空器在该国安全运行的所必需的持久性航行资料。依据国际民航公约，AIP 由国家或国家授权机构发行，是重要航行信息的基本来源，并依据实际情况进行修订与更新，保证数据的现势性。AIP 一般分为总则(GEN)、航路(ENR)、机场(AD)三大部分，而在 AD 部分中，AD2.10 机场障碍物与 AD2.12 跑道物理特性两节详细地描述了机场跑道首末点与跑道中部分特征点的经纬度、高程及大地水准面高差，同时记录了跑道分段情况与各段坡度。按照《国际民用航空公约》附件十四卷 I《国际标准与建议措施——机场》中有关规定，AIP 中的航空区数据必须加以精确测量，其中，跑道出入口水平测量精度应优于 1 米，大地水准面高差测量精度应优于 0.5 m、高程测量精度应优于 0.25 米[10]。这一精度远优于 1.1 节中所述的公开 DEM 的标称精度，因此，从数据精度的角度上来看，用 AIP 数据对 DEM 数据开展高程评估是完全可行的。

3. 基于跑道数据的公开 DEM 数据精度评估

3.1. 公开 DEM 数据高程误差分析

现有研究表明，公开 DEM 数据的误差可主要表示为如下三个不相关分量的总和[11]：

$$\sigma_{\text{DEM}}^2 = \sigma_T^2 + \sigma_I^2 + \sigma_E^2 \quad (1)$$

式中： σ_T^2 、 σ_I^2 、 σ_E^2 分别表示由目标、仪器及环境带来的测量误差。

目标测量误差主要由地形表面的离散化造成，取决于地形坡度和数据的空间分辨率，Becek 等人对其进行了分析，认为目标测量误差是一种系统性的误差，可表示为如下形式[12]：

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{12} d^2 \tan^2(\alpha) \quad (2)$$

式中： d 是公开 DEM 数据的空间分辨率， α 是地形坡度。

仪器测量误差主要与观测平台和数据测量、处理方式有关，包括观测平台的轨道震颤、成像误差，InSAR 数据处理过程中的干涉相位误差、基线误差，立体像对处理过程中的内外参数误差、匹配误差等。而环境测量误差则同大气折射、地物性质等多种因素密切相关。经过多次修订，公开 DEM 数据中的部分系统性误差已经得到平抑，但部分误差无法求取误差函数并进行补偿，因此在应用前，必须对其精度进行定量评估。

3.2. 公开 DEM 数据精度评估流程

机场跑道作为一种特殊类型的规则人造设施，依据国际民航公约关于跑道修建的相关规则，具有平直特性，修筑后基本不会发生较大改变，几何形态规则、坡度较小、剖面平缓，且跑道内没有障碍物，表面材料也相对固定、均质。依据上文对公开 DEM 数据的误差分析，可以看出利用机场跑道对公开 DEM 数据进行精度评估可以消除部分误差源，能够更多地表现未被补偿的高程误差，具有一定优势。在此基础上，本文设计了如图 1 所示的数据评估流程，其具体流程可分为三个阶段。

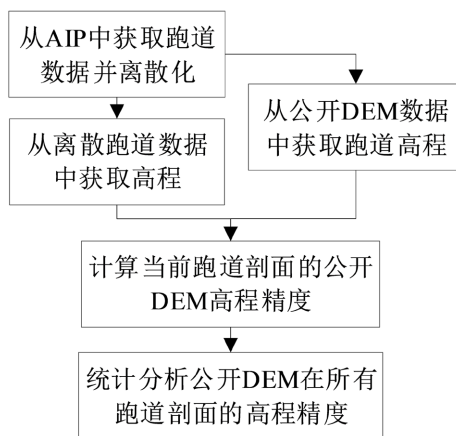


Figure 1. The flowchart of the DEM data evaluation
图 1. 公开 DEM 数据高程精度评估流程

- 1) 从 AIP 数据中获取境外部分地区的机场跑道数据，通过跑道出入口经纬度及高程获取跑道剖面，并对其进行离散，获取跑道剖面中的检测点。
- 2) 基于跑道线要素及离散检测点，利用双线性插值法，从公开 DEM 数据中获取对应点的高程值。
- 3) 分别计算单一跑道剖面的公开 DEM 高程精度，并对所有跑道剖面的公开 DEM 高程精度进行统计分析。

在本文研究中，所有跑道均被离散为 500 个检测点，因此对于单条跑道 j 而言，公开 DEM 数据与跑道检测点之间的高程差可表示为如下形式：

$$D_j = \{d_i = h_{\text{DEM}}^i - h_R^i, i = 1, \dots, 500\} \quad (3)$$

式中： h_{DEM}^i 、 h_R^i 分别代表公开 DEM 数据与跑道数据在第 i 个离散检测点处的高程值。

以此为基础，本文分别选用平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和中误差(RMSE)三个指标度量公开 DEM 的高程精度。平均误差可以反映公开 DEM 数据的系统误差，平均绝对误差能更好地反映误差的实际情况，中误差则是测量作业中常用的衡量数据精度的主要指标，可以反映误差的总体大小。

为更为清晰地表达高程误差在所有跑道截面中的分布特性，除常用的正态分布概率密度函数外，本文引入误差的拉普拉斯分布概率密度函数对所有检测点的误差分布进行表达，其形式可如下所示：

$$f(d; m, a) = \frac{1}{2a} e^{-\frac{|d-m|}{a}} \quad (4)$$

式中： d 为式(3)中的高程差， m 为高程差的中位数， a 为尺度参数。 a 的形式可表示为：

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - m|, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

4. 实验与分析

为评估境外公开 DEM 精度，本文搜集了由欧洲航空安全组织管理的欧亚地区 78 座机场的跑道数据展开实验，具体分布情况可如图 2 所示。

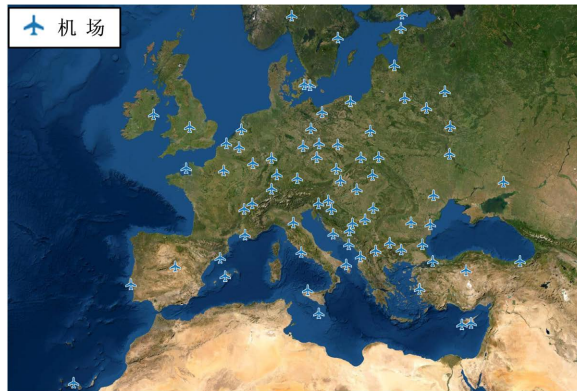


Figure 2. The airport position used to evaluate the DEM data
图 2. 用于评估公开 DEM 数据高程精度的机场位

因篇幅限制，本文以研究区域中有代表性的葡萄牙里斯本波尔特拉国际机场 03 号跑道和瑞士苏黎世克洛滕国际机场 14 号跑道为例，展示本文方法对高程的评估流程。前者位于里斯本市区东部，整体被城市建筑包围，周围地形平坦，距海岸较近。后者则位于深入欧洲大陆的苏黎世北郊，距离城镇有一定距离，周围丘陵环绕。图 3、图 4 分别展示了公开 DEM 数据在此两座机场跑道剖面的高程误差对比情况。图中，横坐标为检测点序号，纵坐标为公开 DEM 高程同跑道高程的差异值。

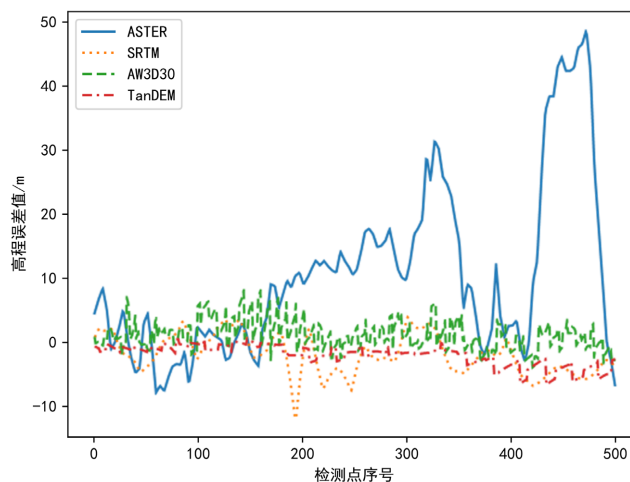


Figure 3. The elevation comparison in Lisbon Airport 03 Runway
图 3. 里斯本机场 03 号跑道高程对比结果

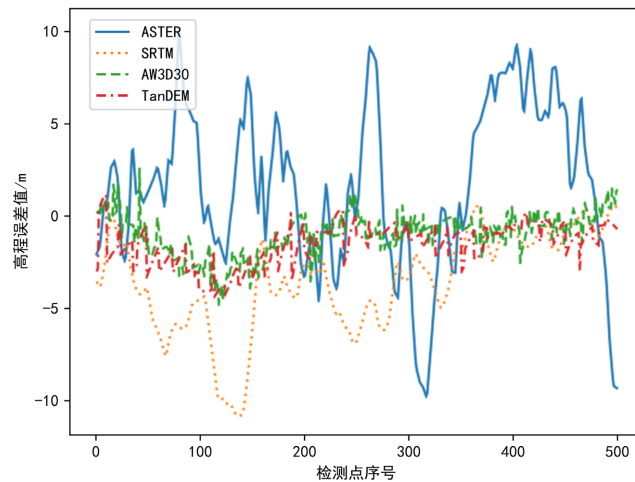


Figure 4. The elevation comparison in Zurich Airport 14 Runway
图 4. 苏黎世机场 14 号跑道高程对比结果

进一步地，分别对本文所述的 78 座机场中所有机场跑道剖面内的公开 DEM 数据展开评估，并对所有检测点进行误差统计，其误差指标可如表 2 所示。

Table 2. The evaluation results of DEMs elevation accuracy

表 2. 基于跑道数据的公开 DEM 高程精度评价结果

DEM 数据	ME/米	MAE/米	RMSE/米
SRTM v4.1	-1.566	2.833	3.591
ASTER GDEM v3	-3.590	6.978	9.602
AW3D30 v2.2	-0.306	2.025	2.781
TanDEM-X DEM	-0.897	1.487	2.129

对图 3、图 4 和表 2 中所示的公开 DEM 数据高程精度展开分析，不难看出：TanDEM-X DEM 与 AW3D30 的整体高程精度相近，但 TanDEM-X DEM 数据的 MAE 指标较小，高程精度更稳定，同跑道的实际高程及变化趋势最为相似；AW3D30 数据 ME 指标较小，但 MAE 较大，表明数据存在部分“跳跃点”，影响了数据精度；SRTM 数据整体高程精度尚可，但相较于 TanDEM-X DEM 和 AW3D30 数据，SRTM 数据的精度较不稳定，在局部区域有较大的差异，但总体表现为在实际高程附近的波动；ASTER GDEM 数据的精度最低，在跑道剖面实际高程两侧波动剧烈，数据质量远低于其他三种数据，这可能是由于用以生产该数据的 Terra 卫星制造、发射时间较早，精密定姿定轨能力有限，虽历经多次优化，但受到数据采集时的客观技术条件限制，数据质量很难得到进一步提升。

进一步绘制密度直方图，拟合正态分布与拉普拉斯分布概率密度函数，表达不同数据高程误差的分布特征。如图 5 所示，4 种公开 DEM 数据的误差分布均呈现较小的偏度和较大的峰度，高程误差分布规则，且在密度峰值处更符合拉普拉斯分布，在密度峰值两侧近似服从正态分布，同时具有拉普拉斯分布均值区域分布密集、正态分布极端值出现概率较小的优点。具体而言：TanDEM-X DEM 与 AW3D30 数据偏离误差均值的误差值较少，呈现良好的数据聚集特性，但在 5~10 m 与 -10~-5 m 的误差区间内，因存在高程“跳跃点”，AW3D30 较 TanDEM-X DEM 分布密度更高，降低了其数据精度；SRTM 的误差分布趋势接近 AW3D30，但相比之下较大误差占比明显高于 AW3D30，对整体误差产生

直接影响；ASTER GDEM 数据误差分布较广，其误差上下界显著大于剩余三类数据，对其精度造成严重影响。

结合 1.1 节中所述的公开 DEM 数据采集与处理方式，不难发现高程精度较高的 TanDEM-X DEM 与 AW3D30 数据均由高分辨率数据产品降采样而来，整体精度控制较好，且数据采集时间均晚于 SRTM 和 ASTER 数据，观测平台及观测手段更为先进。而由于机场跑道的弱纹理特性，光学影像的匹配精度受限，进而产生了上述分析中 AW3D30 数据的“跳跃点”，对后续 DEM 数据的精度造成了一定影响，因此在实验区域内，基于 InSAR 手段生产的 TanDEM-X DEM 精度高于基于光学影像数据生产的 AW3D30。

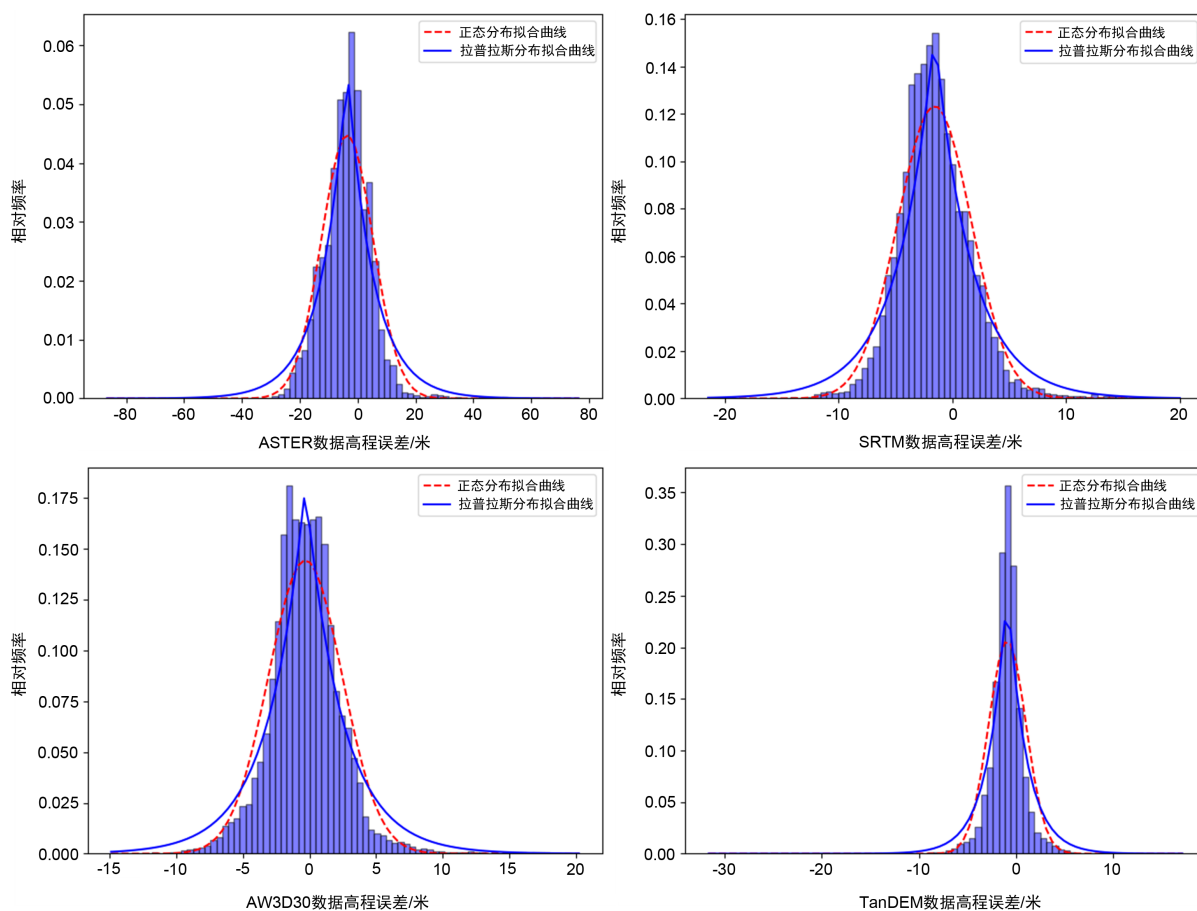


Figure 5. The histogram of the elevation difference between DEMs and runway data

图 5. 以跑道数据为基准的公开 DEM 数据高程误差直方图

5. 结束语

针对当前境外地区公开 DEM 缺乏数据评估手段的不足，本文利用欧亚地区 78 个机场跑道高程为参考数据，选择平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)和中误差(RMSE)等度量指标对公开 DEM 数据的高程精度进行了定量评估，实验结果表明：公开 DEM 数据之间存在明显的高程精度差异，在实验区域内，TanDEM-X、AW3D30 的高程精度相对较高，SRTM 次之，ASTER 数据精度相对较低，且基于 InSAR 方式生产的公开 DEM 数据在实验区域中具有较高的一致性。利用本文方法可以实现对境外多区域公开 DEM 数据精度的有效评估，是公开地理信息整编的一种新尝试，下一步拟以此方法为基础，对公开 DEM 数据优选及其辅助下的遥感影像无控平差展开深入研究。

基金项目

国家自然科学基金(42071439): 滚动球变换的高保真 TIN_DDM 构建及多尺度表达。

参考文献

- [1] 游雄, 等. 战场环境仿真[M]. 北京: 解放军出版社, 2012: 36-45.
- [2] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.
- [3] 陈小卫. 公开 DEM 辅助的国产卫星影像无地面控制点定位技术研究[J]. 测绘学报, 2019, 48(8): 1067.
- [4] 贺宏. DEM 辅助无地面控制点卫星影像定位技术研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013: 2-4.
- [5] 唐新明, 李世金, 李涛, 等. 全球数字高程产品概述[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 167-181.
- [6] 王一泽, 王利, 何飞. NASADEM 和 ASTER GDEM V3 数据精度比较——以大连市市内区域为例[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(14): 1-7.
- [7] Zhao, S., Cheng, W., Zhou, C., *et al.* (2011) Accuracy Assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An Example in the Loess Plateau and North China Plain of China. *International Journal of Remote Sensing*, **32**, 8081-8093. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.532176>
- [8] 杨帅, 杨娜, 陈传法, 等. 顾及数据配准的江西省 SRTM DEM 精度评价和修正[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(5): 869-881.
- [9] 陈柏行. 基于 GLAS 激光测高数据的全球 DEM 精度评估方法[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020: 12-14.
- [10] 中国民用航空局. MH 5001-2013, 民用机场飞行区技术标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2013: 156-158.
- [11] Becek, K. (2014) Assessing Global Digital Elevation Models Using the Runway Method: The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer versus the Shuttle Radar Topography Mission Case. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **52**, 4823-4831. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2285187>
- [12] Becek, K., Koppe, W. and Kutoğlu, Ş. (2016) Evaluation of Vertical Accuracy of the WorldDEM™ Using the Runway Method. *Remote Sensing*, **8**, Article No. 934. <https://doi.org/10.3390/rs8110934>