

# 全球地表坡度频率分布数据集

唐 铃<sup>1</sup>, 马经纬<sup>1</sup>, 邵志焱<sup>1</sup>, 彭秋志<sup>1,2\*</sup>

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 昆明 650093

**摘 要:** 坡度频率分布能够清晰定量地描述地形特征, 但全球性高分辨率地表坡度频率分布研究仍有空缺, 不利于在全球范围内开展跨区域对比。我们基于目前覆盖地表范围最广的 30 m 分辨率 ASTER GDEM v3.0 数字高程模型数据集, 首先利用 ArcGIS 的“Slope”工具计算获得浮点型坡度, 然后利用“Int”工具获得整型坡度, 最后分别从 1°×1°经纬网格、七大洲和全球 3 个角度统计获得地球陆地表面坡度频率分布数据集。统计结果表明 (1) 分网格统计所得陆地坡度频率特征曲线和全球以及各大洲统计所得陆地坡度频率曲线均在 5°前达到最高, 且陡于 5°的部分均呈现随坡度增大而迅速减小的趋势。(2) 全球 50% 的陆地缓于 5.5°, 大洋洲陆地坡度表现最平缓 ( $\mu = 5.23^\circ$ ) 分布最集中 ( $\sigma = 5.31^\circ$ ), 南极洲冰面坡度表现最陡峭 ( $\mu = 13.53^\circ$ ) 分布最分散 ( $\sigma = 15.86^\circ$ )。该数据集覆盖范围为 83°N–83°S, 包括 (1) 1°×1°经纬网格为单元、1 度坡度为步长的地表坡度频率统计数据, 总计 22,205 条数据记录, 采用.xlsx 表格存储; (2) 1°×1°经纬网格坡度频率空间分布网格数据, 采用.shp 格式存储; (3) 各大洲及全球地表坡度频率统计数据, 采用.xlsx 表格存储。数据集由 631 个数据文件组成, 数据量为 232 MB (压缩为 1 个文件, 数据量 54.5 MB)。

**关键词:** 全球; 陆地; 坡度频率分布; ASTER GDEM 经纬网格

**DOI:** 10.3974/geodp.2020.01.04

## 1 前言

坡度频率分布是指在特定统计范围内由各个坡度分段内土地面积占总体面积的比值构成的数值序列, 能够简明且定量地描述地形<sup>[1]</sup>, 在行星表面地形<sup>[2–5]</sup>、地质灾害<sup>[6–7]</sup>、区域景观地貌<sup>[8–9]</sup>等研究领域发挥着重要作用。解读坡度频率曲线须以某种先验的频率分布基准作为参照, 因此寻找合适的参照基准是关键<sup>[10–11]</sup>。早期的研究多将正态分布作为参照<sup>[1,10]</sup>, 后来的研究逐渐以特定区域内不同类型之间的自我相对参照为主流<sup>[12–14]</sup>。然而, 针对特定区域的坡度频率分布研究难以实现跨区域对比, 因此需要一个全局性的坡度频率分布作为参照。显然, 对陆地地貌分析而言, 全球陆地坡度频率分布曲线可以成为一个较为合适的全局性参照基准。

坡度参数具有尺度依赖性, 基于不同分辨率 DEM 计算得到的坡度不能简单地相

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-02-26; 出版日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41961039)

\*通讯作者: 彭秋志 AAG-3629-2019, 昆明理工大学, pqz20002@163.com

数据引用方式: [1] 唐铃, 马经纬, 邵志焱等. 全球地表坡度频率分布数据集[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(1): 24–30. DOI: 10.3974/geodp.2020.01.04.

[2] 唐铃, 马经纬, 邵志焱等. 全球地表坡度频率分布数据集[DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.02.02.V1.

互对比<sup>[15]</sup>。1985 年首次出现了 1°分辨率的地球表面坡度地图，并利用坡度频率分布曲线图对比了金星与地球间的地形特征<sup>[2]</sup>。虽然 DEM 数据集分辨率愈发精细，全球性地表坡度频率分布研究却停滞在了 1°分辨率。鉴于当前易获得的免费全球性 DEM 数据主流分辨率已细化到了 1"（约为 30 m），十分有必要匹配细化全球性坡度频率分布曲线，以满足该分辨率下地形坡度跨区域对比的参照需求。因此我们选用目前空间覆盖面最广的 30 m 分辨率 ASTER GDEM v3.0 数字高程模型<sup>[16]</sup>，借助 ArcGIS 平台获得全球陆地地表整型坡度数据，进而通过统计获得全球陆地坡度频率分布数据集。该成果将有助于推动 30 m 分辨率下坡度频率分析技术的相关研究逐步实现全球性横向对比。

2 数据集元数据简介

《全球地表坡度频率分布数据集》<sup>[17]</sup>的名称、作者、地理区域、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《全球地表坡度频率分布数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	全球地表坡度频率分布数据集
数据集短名	LSF_Globe
作者信息	唐铃 D-4700-2019, 昆明理工大学国土资源工程学院, 799643248@qq.com 马经纬 AAG-3726-2019, 昆明理工大学国土资源工程学院, 359424547@qq.com 邵志臻 AAG-3633-2019, 昆明理工大学国土资源工程学院, 785383110@qq.com 彭秋志 AAG-3629-2019, 昆明理工大学国土资源工程学院, pqz20002@163.com
地理区域	地球南北纬 83°范围内的陆地表面
数据格式	.xlsx、.shp
数据量	54.5 MB
数据集组成	1°×1°经纬网格、七大洲以及全球的陆地坡度频率分布数据
基金项目	国家自然科学基金（41961039）
数据计算环境	ArcGIS 10.2（院系研究组内共享版）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[18]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

3 数据研发方法

坡度频率数据的来源为 30 m 空间分辨率的 ASTER GDEM v3.0<sup>[19]</sup>，该数字高程模型

(DEM)数据集覆盖地表范围为 83°N-83°S，因此本文中全球陆地是指南北纬 83°范围内的所有陆地。ASTER GDEM v3.0 数据集海洋部分的高程值为 0，若不将其排除会影响陆地表面坡度频率分布统计数据的精确度，故借助源自国家测绘地理信息局的 1:100 万全球基础地理数据获得全球各大洲的陆地掩模。全球陆地坡度频率分布数据集按统计单元大小分为 1°×1°经纬网格陆地坡度频率分布、七大洲陆地坡度频率分布以及全球陆地坡度频率分布 3 类。

坡度频率分布数据的获得主要涉及坡度数据计算和坡度频率数据计算两部分，因 DEM 数据集共 22,912 景，逐景计算耗时较长且易出错，所以借助 Python (v2.7.0) 编写了一套自动化并行计算流程，其计算步骤如图 1。



图 1 数据处理流程

本数据集所用投影坐标系为 World Vertical Perspective (以下简称 WVP)，该坐标系是一种垂直近侧透视投影，视角高度为 35,800 km (如同从地球同步卫星所在高度进行观察)，该坐标系靠近影像中心变形最小，靠近影像边缘变形最大。因此，以每个 DEM 瓦片的中心经、纬度为观察中心进行投影，以确保每个瓦片的投影变形最小，将投影变形量控制在 1°范围内 (最大变形小于 1 个像元)。将地理坐标为 WGS 1984 的 DEM 数据转投影至 WVP 后，利用 ArcGIS 的“Slope”工具计算得浮点型坡度数据，然后结合陆地掩模生成不含海洋的浮点型陆地坡度，并统计各 1°×1°经纬网格中陆地占比。随后利用“Int”工具生成以 1°坡度为步长的整型陆地坡度信息，最后通过统计获得各 1°×1°经纬网格、七大洲以及全球的陆地坡度频率分布信息。

4 数据结果

4.1 地表坡度频率分布

全球数据集在一台个人电脑上处理约 120 小时，该电脑配备有单核 2.66 GHz 的四核八线程 CPU 和 16 GB 内存，5 个独立硬盘并行读写。数据集覆盖范围为 83°N-83°S，包括 (1) 1°×1°经纬网格为单元、1 度坡度为步长的地表坡度频率统计数据，总计 22,205 条数据记录，采用.xlsx 表格存储；(2) 1°×1°经纬网格坡度频率空间分布网格数据，采用.shp 格式存储；(3) 各大洲及全球地表坡度频率统计数据，采用.xlsx 表格存储。根据 DEM 数据瓦片数量，1°×1°经纬网格地表坡度频率数据本应含 22,912 条记录，但因其中 707 个数据瓦片与陆地掩模匹配裁剪时陆地占比过小被排除在统计样本外，继而只有 22,205 条坡度频率数据。本文选用的坡度分级方式为 1°等差分级，所以取值范围为[0°,90°)的坡度被等分成了 90 段，即

每条坡度频率数据均包含 90 个频率值。在表格文件中以各个坡度区段的中值坡度表示该坡度段，即以 $(i+0.5)^{\circ}$ 表示第  $i$  个坡度区段，该区段坡度范围为 $[i^{\circ}; (i+1)^{\circ})$ ， $i=0, 1, 2, \dots, 89$ 。

4.2 数据结果

计算所得坡度的空间分布以及不同统计视角下的坡度频率分布如图 2 所示，其中典型地貌区数据瓦片主要采样于青藏高原、哈萨克丘陵、阿尔卑斯山脉、落基山脉、亚马逊平原、撒哈拉沙漠、大洋洲中部平原和南极洲冰川覆盖区，其分别对应于图中编号 N33E086、N47E066、N47E012、N53W118、S03W066、N13E003、S30E141 和 S77E014。除阿尔卑斯山脉和南极洲冰川覆盖区外，各地貌区单个数据瓦片坡度频率分布曲线均与所处大洲坡度频率分布曲线形状相似，且变化趋势皆为先增后减。表明从统计学视角来看不同地貌区陆地坡度频率分布可能存在相似性，且频率曲线形状多为长尾右偏单峰。

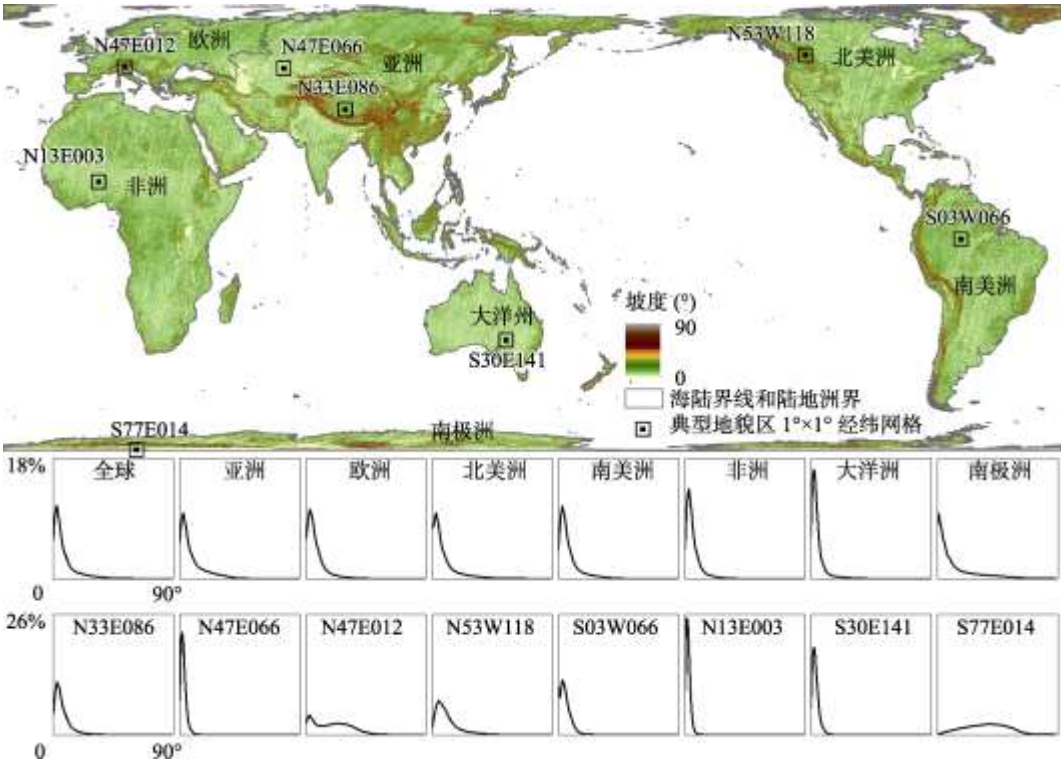


图 2 全球坡度分布地图与分大洲、全球以及典型地貌区  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  经纬网格坡度频率分布曲线图

经过统计 90 个坡度段内所有数据瓦片中陆地坡度频率的特征值，生成如图 3 所示的陆地坡度频率箱线图。为避免极端值的影响，以第 1 百分位对应的频率值代替最小频率，以第 99 百分位对应的频率值代替最大频率，其中  $0.5^{\circ}$  坡度第 99 百分位对应的频率值为 74.26%。结合箱线图及分别以各个大洲和全球整体为统计单元得到的陆地坡度频率分布图（图 2），发现分网格统计所得陆地坡度频率特征曲线和全球以及各大洲统计所得陆地坡度频率曲线均在  $5^{\circ}$  前达到最高，且频率值均呈现出随着坡度增加先快速增大后迅速减小的趋势。根据陆地坡度频率曲线和频率累加曲线（图 4），结合平均坡度与标准差（表 2）可知

全球 50%的陆地缓于  $5.5^{\circ}$ ；大洋洲陆地坡度表现最平坦 ( $\mu = 5.23^{\circ}$ ) 且分布最集中 ( $\sigma = 5.31^{\circ}$ )，其 50%的陆地缓于  $4^{\circ}$ ；南极洲冰面坡度表现最陡峭 ( $\mu = 13.53^{\circ}$ ) 且分布最分散 ( $\sigma = 15.86^{\circ}$ )，其 50%的陆地缓于  $7^{\circ}$ 。

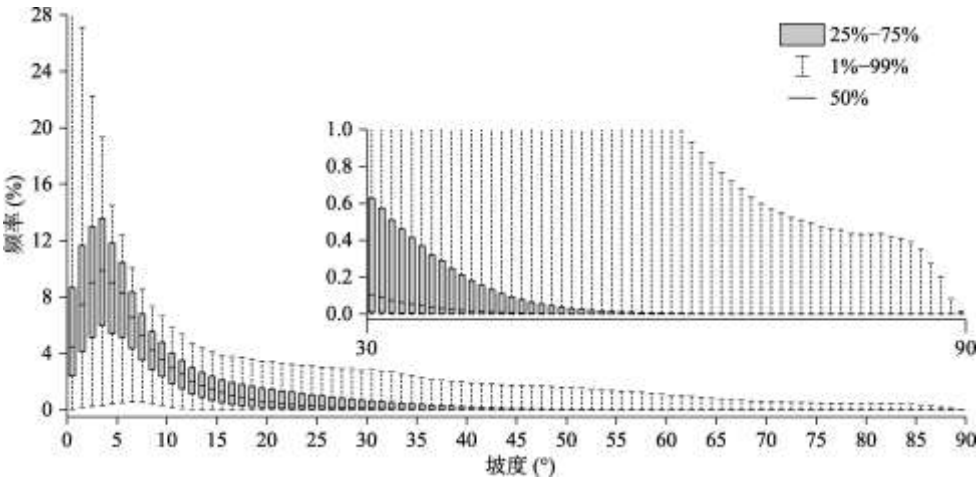


图 3 各瓦片坡度频率特征值箱线图

表 2 不同统计单元陆地坡度频率曲线

统计单元	平均值 $\mu (^{\circ})$	标准差 $\sigma (^{\circ})$	统计单元	平均值 $\mu (^{\circ})$	标准差 $\sigma (^{\circ})$
非洲	6.25	5.38	南美洲	8.25	7.77
亚洲	9.63	9.34	大洋洲	5.23	5.31
欧洲	7.70	6.98	南极洲	13.53	15.86
北美洲	9.43	10.74	全球	8.63	9.28

4.3 数据结果评价

坡度频率分布是坡度数据的统计表现，而坡度数值精度依赖于 DEM 数据精度，本文所用 ASTER GDEM v3.0 数据产品是通过自动处理 2000 年 3 月 1 日至 2013 年 11 月 30 日间获得的所有 ASTER Level 1A 数据生成的，其日本区域验证精度  $SD$  为 12.1 m，相对 v2 版本在有效覆盖范围、高程精度方面有显著提升<sup>[20]</sup>。虽该数据产品使用的原始数据时间跨度较大，期间发生过一些地形变化，但从全球尺度来看，局部地形变化造成的影响可忽略。图 2 中显示南极洲与格陵兰岛区域内数据瓦片陆地坡度较高，这与 ASTER GDEM 数据产品以光学立体像对方式成像而冰雪覆盖区光学反射率高有关，所以该区域内的 DEM 数据质量较低，进而坡度频率分布数据质量亦较低，建议后续研究尽

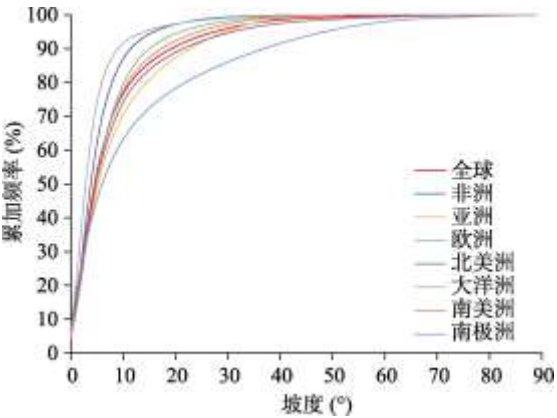


图 4 累加坡度频率曲线图

量避免使用本数据集中南极洲与格陵兰岛区域的坡度频率数据。

## 5 讨论和结论

以往坡度相关研究表明,坡度频率分布会随着研究区大小及其所处区域地貌变化而变化<sup>[1,8,12,21]</sup>。图 5 展示了形态各异的以往基于某个特定区域研究所得的坡度频率分布(黑色虚线),发现既无法以某一既定分布模型为参照描述该研究区地形坡度的分布特点,也无法以某一研究区坡度频率曲线为参考描述另一研究区地形坡度特征。若以全球陆地坡度频率分布(图 5 中黑色实线)为参照基准,便能在统一的标准下快速定位研究区地形坡度分布对于全球陆地而言更加平缓或是陡峭。例如,图 5 中曲线 6 的峰值坡度与全球陆地峰值坡度最接近,表明该研究区地形坡度相对最平缓,同理推之,曲线 5 所代表研究区地形坡度最崎岖。

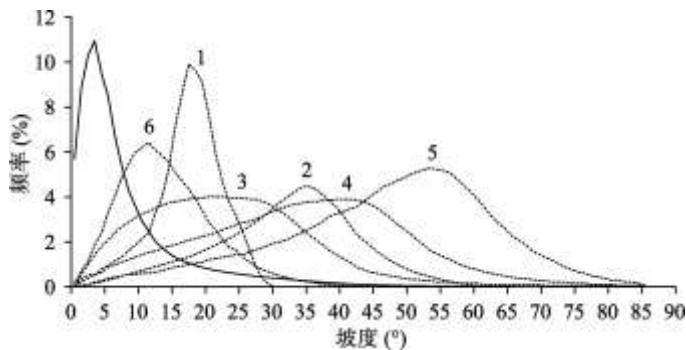


图 5 全球陆地坡度频率曲线与以往研究坡度频率曲线对比

(注:黑色实线代表全球陆地坡度频率,曲线 1 为卢科尔山谷<sup>[1]</sup>,曲线 2 为喜马拉雅山西北部分<sup>[12]</sup>,曲线 3 为美国境内年冲刷量为 4 mm 的景观<sup>[8]</sup>,曲线 4 为美国境内年冲刷量为 8 mm 的景观<sup>[8]</sup>,曲线 5 为美国境内年冲刷量为 16 mm 的景观<sup>[8]</sup>,曲线 6 为意大利上提贝尔河流域<sup>[21]</sup>。)

基于全球地表的坡度频率分布曲线不仅能为了解地球陆地表面坡度分布提供数量化信息,还能基于坡度频率的研究提供一个全局性的参考基准。本文利用 ASTER GDEM v3.0 数据集生成了全球性地表坡度频率分布数据,填补了 30 m 分辨率全球地表坡度频率分布数据的空白;并从 1°×1°经纬网格、七大洲和全球 3 个角度描述地球陆地表面坡度,进一步丰富了区域性和全局性的参考基准,使得基于坡度频率分析技术的相关研究跨区域横向对比成为可能。值得强调的是,基于不同数据源 DEM 所生成的坡度频率分布可能不同,因此本数据集仅可供基于 ASTER GDEM v3.0 的相关研究参考。

**作者分工:** 彭秋志对数据集的开发做了总体设计;唐铃和马经纬设计了模型和算法;马经纬和邵志焱采集和处理了 DEM 数据;唐铃撰写了数据论文。

## 参考文献

- [1] Strahler, A. N. Quantitative slope analysis [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1956, 67(5): 571–596.
- [2] Sharpton, V. L., Head, J. W. Analysis of regional slope characteristics on Venus and Earth [J]. *Journal of*

- Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, 90(B5): 3733–3740.
- [3] Aharonson, O., Zuber, M. T., Neumann, G. A., *et al.* Mars: northern hemisphere slopes and slope distributions [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(24): 4413–4416.
- [4] Thomson, B. J., Head III, J. W. Utopia Basin, Mars: Characterization of topography and morphology and assessment of the origin and evolution of basin internal structure [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23209–23230.
- [5] 严艳梓. 基于 DEM 的月表坡谱及空间差异性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [6] Montgomery, D. R. Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography [J]. *American Journal of Science*, 2001, 301(4/5): 432–454.
- [7] DiBiase, R. A., Heimsath, A. M., Whipple, K. X. Hillslope response to tectonic forcing in threshold landscapes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(8): 855–865.
- [8] Wolinsky, M. A., Pratson, L. F. Constraints on landscape evolution from slope histograms [J]. *Geology*, 2005, 33(6): 477–480.
- [9] 彭秋志, 唐铃, 陈杰等. 2000–2015 年深圳市建设用地坡谱演变研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2200–2212.
- [10] O'Neill, M. P., Mark, D. M. On the frequency distribution of land slope [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12(2): 127–136.
- [11] Tang, G., Song, X., Li, F., *et al.* Slope spectrum critical area and its spatial variation in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(12): 1452–1466.
- [12] Burbank, D. W., Leland, J., Fielding, E., *et al.* Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas [J]. *Nature*, 1996, 379(6565): 505.
- [13] Iwahashi, J., Watanabe, S., Furuya, T. Mean slope-angle frequency distribution and size frequency distribution of landslide masses in Higashikubiki area, Japan [J]. *Geomorphology*, 2003, 50(4): 349–364.
- [14] Zhao, S., Cheng, W. Transitional relation exploration for typical loess geomorphologic types based on slope spectrum characteristics [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2014, 2(2): 433–441.
- [15] Zhou, Q., Liu, X. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(4): 369–378.
- [16] Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., *et al.* Characteristics of ASTER GDEM version 2[C]. 2011 IEEE international geoscience and remote sensing symposium. IEEE, 2011: 3657–3660.
- [17] 唐铃, 马经纬, 邵志焱等. 全球 30 m 分辨率地表坡度频率分布数据集[DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.02.02.V1.
- [18] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [19] NASA, METI. ASTER GDEM v3.0 [Z]. <https://lpdaac.usgs.gov/>.
- [20] Tachikawa, T., Manabu, K., Akira, I. ASTER GDEM Version 3 Validation Report [Z]. NASA, 2015.
- [21] Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., *et al.* Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy [J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1): 105–122.