

青藏高原地形起伏度及其地理意义

封志明^{1,2,3}, 李文君^{1,2}, 李鹏^{1,2,3}, 肖池伟^{1,2}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101; 2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049;
3.自然资源部资源环境承载力评价重点实验室,北京 101149)

摘要: 地形起伏度是区域人居环境适宜性与资源环境承载力的关键评价指标之一。当前有关其最佳评价窗口、及其与海拔—相对高差的相互关系仍缺乏深入研究,进而影响该指标对区域地形起伏的有效表征。客观认识青藏高原地形起伏度有助于促进其国家生态安全屏障建设与区域绿色发展。以先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM, 30 m)地形数据(V2)为基础,本文利用均值变点分析法确定了青藏高原地形起伏度评价的最佳分析窗口,基于地形起伏度模型(RDLS)研制了青藏高原首套30 m地形起伏度专题图,据此分析了地形起伏度与海拔、相对高差的相互关系,并界定了地形起伏度对区域地形起伏状况的有效表征。主要结果/结论包括:①基于GDEM的青藏高原地形起伏度评价最佳窗口为41×41个像元的矩形邻域,对应面积约为1.51 km²,均值变点分析表明区域地形起伏度评价最佳窗口有其唯一性。②青藏高原地形起伏度均值约为5.06,超3/5区域地形起伏度介于4.5~5.7之间;整体上,青藏高原地形起伏程度由其东北部向西南部、西部递增,仅在柴达木盆地、藏南谷地以及河湟谷地出现低起伏地貌特征。且地表起伏在不同纬度剖面变化较为一致(沿山脉走向),但不同经度剖面起伏层次错落(横切山脉走向)。③相关性分析表明不同地形起伏度分别对应不同平均海拔、不同相对高差的地貌单元。青藏高原地形起伏度经纬向剖面分析表明,该区由东部的低山稳步爬升,山体经历骤然爬升(即地表起伏特征剧烈)后形成以极高山为主的有序错落起伏(喜马拉雅山脉)。

关键词: 窗口分析;地形起伏度;地理意义;剖面特征;青藏高原;人居环境适宜性评价
DOI: 10.11821/dlxb202007003

1 引言

地形起伏度(Relief Degree of Land Surface, RDLS)^[1]是以一定区域内海拔变化与平地比例表征的地形起伏情况^[2]。它既是地貌类型划分的重要依据^[3],又是区域人居环境适宜性与资源环境承载力(Resources and Environmental Carrying Capacity, RECC)的关键评价指标之一^[4-5],在生态环境评价^[6]、自然灾害评价^[7]、自然要素对区域发展影响评价^[8]、城市土地分等定级等领域得到广泛应用^[9]。基于数字高程模型(DEM)计算的地形起伏度在精度与客观表达上依赖于分析窗口大小,受DEM空间分辨率与区域地形地貌特征影

收稿日期: 2019-08-22; 修订日期: 2020-05-13

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1006); 中国科学院青年创新促进会(CAS2020055); 中国博士后科学基金项目(2019M660777) [Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK1006; Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, No.CAS2020055; China Postdoctoral Science Foundation, No.2019M660777]

作者简介: 封志明(1963-), 男, 河北平山人, 博士, 研究员, 主要从事资源开发与区域发展。E-mail: fengzm@igsnr.ac.cn

通讯作者: 李鹏(1984-), 男, 江西永新人, 博士, 副研究员, 主要从事资源遥感与边境地理研究。

E-mail: lip@igsnr.ac.cn

响较大^[9-13]。过去区域地形起伏度在其最佳评价窗口选择上主观性较强,如在省域层面选择 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$ ^[14],在市域层面选择 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ^[15]等,进而影响地形起伏度计算的规范性与结果的可对比性。最佳分析窗口常见界定方法有最大高差法、最大高差一面积比法、人工工作图法、均值变点法等^[16-17],其中以均值变点法更为客观^[18-19]。其次,当前有关地形起伏度与海拔、相对高差的相互关系仍缺乏深入研究,进而影响该指标对区域地形起伏的有效表征,如对不同大小地形起伏度所表征的地理意义尚不明确,相关研究鲜有涉及。最后,随着美国航空航天局(NASA)和日本经济产业省(METI)2009年联合发布全球首套 30 m DEM 产品共享以来^[20],也迫切需要加强基于新DEM产品的地形起伏度评价分析,并探讨其与不同分辨率(如公里格网)DEM产品计算的地形起伏度在表征区域地形起伏的差异性。

自2017年8月第二次青藏高原综合科学考察研究启动以来,“聚焦水、生态、人类活动,着力解决青藏高原资源环境承载力、灾害风险、绿色发展途径等方面的问题”,渐渐成为中国地理、资源、生态与环境等学科的重要研究方向。中国科学院与国家科学技术部为此纷纷设立了相应的专项研究,如“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”专项等。其中,RECC是其核心科学问题之一,旨在摸清资源环境“上线”。RECC研究的基础评价是人居环境适宜性评价(Suitability Assessment of Human Settlements, SAHS),即掌握资源环境基础“底线”;而地形起伏度计算与地形适宜性评价与分区又是SAHS的关键环节之一。应青藏高原RECC研究(含SAHS)的迫切需求^[21],开展青藏高原地形起伏度评价分析具有重要的现实与科学意义^[22-23]。

本文采用先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM) 30 m 数据,基于ArcGIS 10.5与均值变点分析法界定青藏高原地形起伏度分析的最佳窗口,利用地形起伏度评价模型研制青藏高原首套 30 m 地形起伏度专题图,通过统计分析及相关性分析客观揭示不同地形起伏度对应的海拔与相对高差特征,并实现地形起伏度对区域地形起伏的有效表征。本文研究目标包括:①确定青藏高原地形起伏度分析的最佳窗口并研制其地形起伏度专题图;②揭示青藏高原地形起伏度的空间格局与地理(经纬度)特征;③分析青藏高原地形起伏度与平均海拔、相对高差之间的相关关系,揭示地形起伏度对青藏高原地形起伏的有效表征。

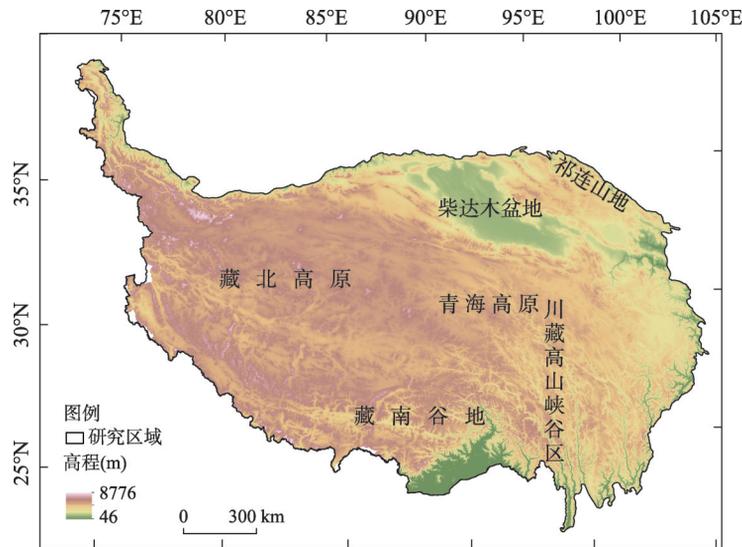
2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

青藏高原南起喜马拉雅山脉,北至昆仑山和祁连山,西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉,东及东北部与秦岭山脉西段和黄土高原相接。横跨31个经度,东西宽约 2700 km ;纵贯13个纬度,南北长达 1400 km ,总面积约 250 万 km^2 。其中中国境内面积为 240 万 km^2 ,占中国陆地总面积的 $1/4$ ^[24],包括西藏自治区(约占中国境内青藏高原面积的 45.72%)与青海省全部(28.03%)以及四川省西部(9.87%)、新疆维吾尔自治区南部(12.17%)、甘肃省西部(2.91%)和云南省西北部(1.30%)^[25]。境外青藏高原包括不丹、尼泊尔、印度、巴基斯坦、阿富汗、塔吉克斯坦以及吉尔吉斯斯坦的部分区域。

青藏高原地势西高东低,边缘起伏不平,内部起伏程度较大。中国境内部分平均海拔为 4385.51 m , 4000 m 以上的高海拔地区占青藏高原面积的 73.11% ,地势高耸。其中, $4000\sim 5000\text{ m}$ 的地区面积占比高达 48.89% ,集中分布在西藏阿里、那区、日喀则及

昌都, 新疆和田地区, 以及青海玉树、果洛藏族自治州等。而4000 m以下面积占比为26.89%, 主要分布在青藏高原北部、东部及东南部的边界地区(最低处门隅46 m^[26])。地形上可分为藏北高原、藏南谷地、柴达木盆地、祁连山地、青海高原和川藏高山峡谷区等6个部分^[27](图1)。



注: 先进星载热发射和反射辐射仪所采集的青藏高原最高点海拔为8776 m, 与2005年中国国家测绘局所测量的珠穆朗玛峰岩面高8844.43 m不一致, 即为系统误差, 对后续分析影响可忽略。

图1 青藏高原ASTER GDEM分布图

Fig. 1 Map showing the topography of the Qinghai-Tibet Plateau with ASTER GDEM

参考中国1:100万地貌制图规范, 相对高差包括平地(0~30 m)、小起伏(30~200 m)、中起伏(200~400 m)、大起伏(400~600 m)和极大起伏(>600 m)5级^[13, 28]。其中, 青藏高原平地占1.28%, 零星分布在那曲地区及青海湖等。小起伏地区占到37.53%, 主要分布在昆仑山脉—可可西里山脉—巴颜喀拉山脉以南至冈底斯山脉—念青唐古拉山脉以北地区。中起伏地区占到36.31%, 主要分布在金沙江、雅砻江及其支流河谷地带、以及秦岭(广义)以北—松潘高原以西地区。大起伏地区约占22.84%, 主要分布在小起伏地区周围, 即冈底斯山脉—念青唐古拉山脉、巴颜喀拉山脉—秦岭以北地区。极大起伏地区仅占2.04%, 零星分布在念青唐古拉山脉以南—喜马拉雅山脉山东麓以北地区、以及四川中部大雪山以东地区。

2.2 数据来源

本文所使用的高程数据为先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM)第2版数据, 为首套全球覆盖(83°N~83°S)的30 m DEM数据, 根据对地观测卫星Terra的观测结果制作而成, 其水平精度与垂直精度分别为30 m与20 m^[29]。数据来源为日本航天局网站(JAXA, <http://gdem.ersdac.jspacsystems.or.jp/>)与美国国家航空航天局(NASA, <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>)。本文下载了青藏高原全覆盖的ASTER GDEM产品, 每个下载压缩数据包含两个文件, 即数字高程模型(DEM, dem.tiff)数据和质量控制(QA, num.tiff), 坐标系统为WGS84/EGM96。GDEM V2已得到很大改进并在众多领域得到广泛使用, 其中土地利用领域尤甚。本文基于30 m GDEM数据, 运用ArcGIS 10.5软件统计青藏高原等不同区域平均海拔、相对高差与地形起伏度等。

2.3 研究方法

2.3.1 地形起伏度计算模型 本文借鉴封志明等提出的地形起伏度 (RDLS) 计算方法^[30], 即根据平均海拔、特定窗口大小内的相对高差及平地占比构建模型, 利用 ASTER GDEM 30 m 地形产品开展青藏高原地形起伏度评价分析, 并阐释其所表征的地理意义。其计算公式为:

$$RDLS = ALT/1000 + \{[\text{Max}(H) - \text{Min}(H)] \times [1 - P(A)/A]\} / 500 \quad (1)$$

式中: $RDLS$ 为地形起伏度; ALT 为以某一栅格单元为中心一定区域内的平均海拔 (m); $\text{Max}(H)$ 和 $\text{Min}(H)$ 分别为该区域内最高海拔和最低海拔 (m); $P(A)$ 为该区域内平地面积 (km^2), 即为最佳窗口下相对高差 < 30 m 的区域面积; A 为区域总面积 (km^2)。

2.3.2 最佳分析窗口确定——均值变点法 随着分析窗口增大, 窗口内山体相对高差也逐渐增大, 即包含更为完整的山体。当窗口增大到一定程度后, 相对高差的增速明显下降, 即包含了除完整山体之外其他更为高耸山峰的海拔特征, 而窗口增大的同时也弱化和掩盖了小范围内完整山体的起伏特征。因此, 地形起伏度计算的关键是确定其最佳分析窗口^[30]。为保证山体完整性和区域适应性, 本文采用均值变点法确定地形起伏度的最佳分析窗口^[31], 其原理如下:

第一, 基于高差计算式 ($\text{Range}(H) = \text{Max}(H) - \text{Min}(H)$), 通过 Python 批量计算 N 个递增分析窗口 ($2 \times 2, 3 \times 3, \dots, 120 \times 120$) 下的平均高差, 再依次计算单位地势度 T (地形起伏程度)。计算公式为:

$$T_i = t_i / s_i, \quad (i = 2, 3, \dots, 120) \quad (2)$$

式中: T_i 为第 i 个分析窗口下单位地势度; t_i 为平均高差; s_i 为分析窗口面积。

第二, 将上述计算所得的单位地势度 T 数列取对数 ($\ln T$), 得到非线性数列 $X_k (k = 2, 3, \dots, 120)$ 。

第三, 将上述非线性数列 X_k 分为前后两段, 即 X_2, X_3, \dots, X_k 和 $X_{k+1}, X_{60}, \dots, X_{120}$, 分别计算前后两段数列的算术平均值 \bar{X}_{k1} 和 \bar{X}_{k2} , 以及总样本的算术平均值 \bar{X} 。

第四, 利用公式 (3)、公式 (4) 计算相应统计量。随着分析窗口增大, 高差的离差平方和先增后减。以 $S - S_k$ 表征不同分析窗口下的高差变化复杂程度, 平均变点的存在使得 S 和 S_k 的差距增大^[16]。 $S - S_k$ 最大值对应的分析窗口可表征山体完整下的地表起伏特征, 即为地形起伏度的最佳分析窗口。

$$S = \sum_{i=2}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

$$S_k = \sum_{i=2}^{i-1} (X_i - \bar{X}_{k1})^2 + \sum_i^{120} (X_i - \bar{X}_{k2})^2 \quad (4)$$

式中: S 为总样本的离差平方和; S_k 为前后两段样本的离差平方和之差。

3 结果与分析

3.1 基于最佳窗口计算青藏高原地形起伏度

3.1.1 基于均值变点确定青藏高原最佳分析窗口 基于 ArcGIS 10.5 平台, 利用 Python 编程批量计算不同窗口大小下 ($2 \times 2, 3 \times 3, \dots, 120 \times 120$) 青藏高原的相对高差。随着分析窗口的递增, 平均高差增幅逐渐减小。当分析窗口面积大于 3.03 km^2 后, 平均高差变化减缓并趋于平稳。虽然平均高差持续递增, 但是较大窗口则会掩盖更多地形起伏信息。以

1.04 km²、2.82 km²、6.05 km²、9.00 km² 4个主观分析窗口为例，平均高差和平均地形起伏度随着分析窗口的增大而增加，而平地比例则持续减少。于空间分布上，随着分析窗口增大，地形起伏度小于3的区域基本不变，地形起伏度介于3~6的区域持续减小，而地形起伏度 > 6的大起伏区域则持续扩张（图2）。此外，分析窗口增大使青藏高原地形起伏度最大值由 18.55 扩大到 19.75。可见，分析窗口过大会将更多完整山体“囊括”进同一窗口内，导致对极大起伏地区的提取过于敏感，却隐藏了区域的小起伏特征。因此，有必要客观界定一个适用于地形起伏度计算的合理分析窗口。

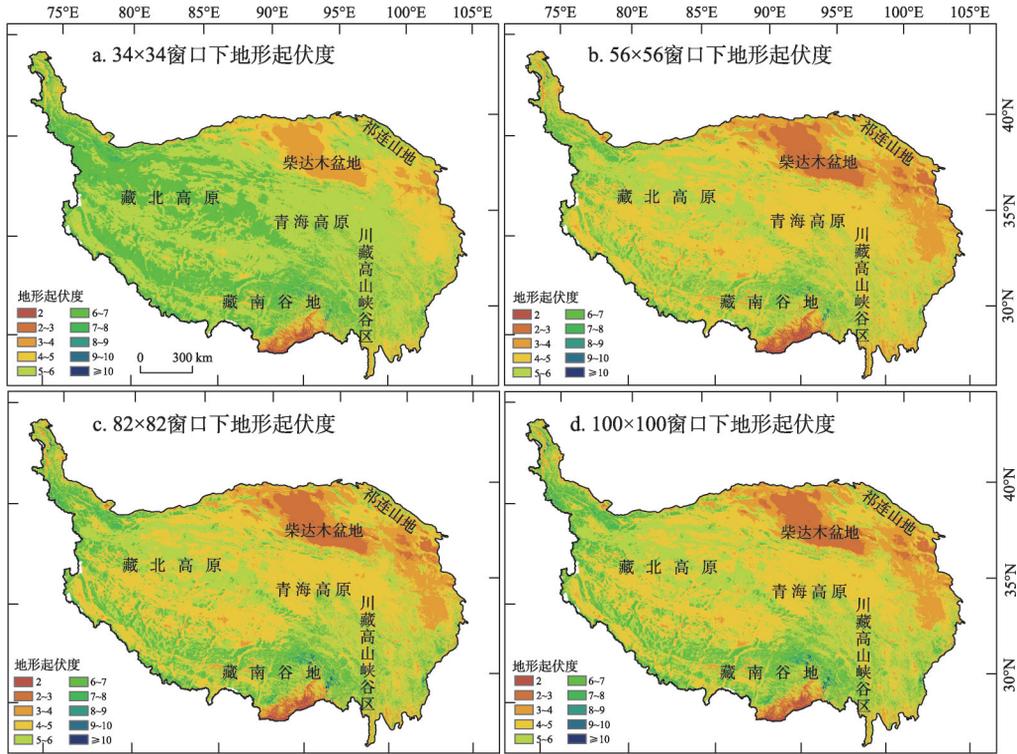


图2 青藏高原不同窗口面积下地形起伏度的空间格局

Fig. 2 Spatial patterns of the relief degree of land surface (RDLS) with different window areas in the Qinghai-Tibet Plateau, China

接下来，分别以不同窗口下的平均高差与窗口面积作因变量与自变量绘制散点图，确定对数函数为其最佳拟合趋势函数（ R^2 为0.998，图3a）。由 $S-S_k$ 值可确定在分析窗口持续增大的过程中，局地高差增速由骤增到平缓减小，并出现有且仅有一个的“拐点”（图3b），此点对应的分析窗口即为最佳分析窗口，即基于30 m GDEM数据的青藏高原地形起伏度最佳分析窗口约为1.51 km²（41×41，矩形邻域）。

3.1.2 基于最佳窗口的青藏高原地形起伏度计算 青藏高原最佳窗口下的地形起伏度（图4）绝对数值介于0.11~19.40，理论均值为5.06。需说明，ASTER GDEM数据源本身存在系统误差，基于此计算的地形起伏度理论最大值为19.40，对应海拔与相对高差分别为7681.5 m和5935 m（于察隅县内南迦巴瓦峰（7782 m）与帕隆藏布（河口<2000 m）错落处），而计算结果与实际情况是否符合有待考察。为此进一步计算最大海拔处（8776 m，定日县内珠穆朗玛峰）和最大高差处（6300 m，墨脱县内雅鲁藏布峡谷出口）的地形起伏度分别为10.62、14.41。相应地，西藏、青海、新疆、云南、四川和甘肃6省区地

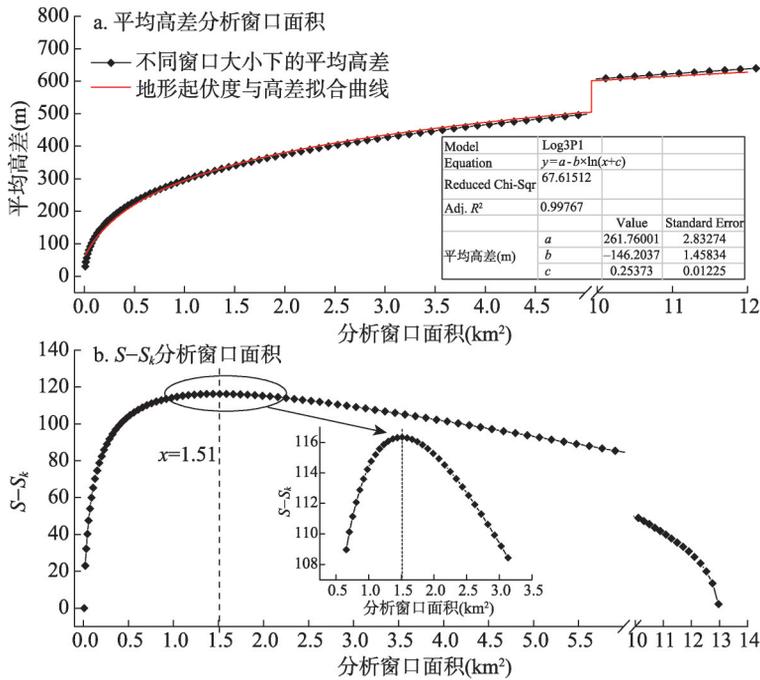


图3 不同窗口面积下平均高差与S-S_k变化范围散点图

Fig. 3 Scatter diagram of the mean elevation range and S-S_k with different window areas

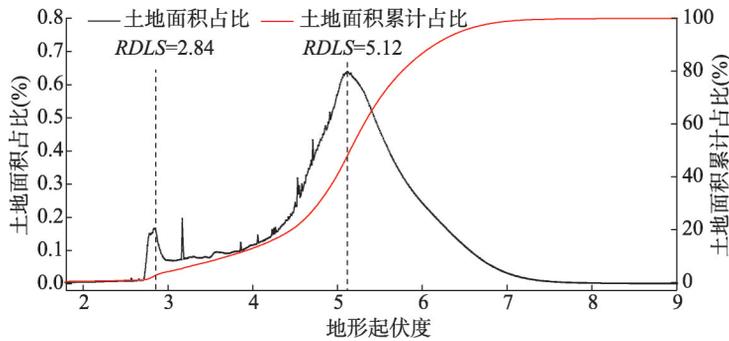


图4 青藏高原不同等级地形起伏度对应的土地面积占比曲线

Fig. 4 The proportion curves of corresponding land area of different-level relief degree of land surface (RDLS) in the Qinghai-Tibet Plateau, China

形起伏度均值分别为5.42、4.50、5.26、4.65、4.99和4.29，可见青藏高原西藏部分平均地形起伏程度最明显。

青藏高原地形起伏度集中于3.0~7.0，相应土地面积占到89.74%。青藏高原地形起伏程度由其东北部向西南部、西部递增，仅在柴达木盆地、藏南谷地以及河湟谷地出现低起伏地貌特征（图5）。随着地形起伏度增大，相应土地面积占比总体呈倒“U”变化，且地形起伏度阶段性变化明显，其分界点尤为如此。具体而言，当地形起伏度< 2.75时，土地面积占比为1.19%，集中分布在藏南谷地、河湟谷地、柴达木盆地局部等。当地形起伏度介于2.75~2.84，相应土地面积比例骤增至1.01%以上，新增区域集中分布于柴达木盆地中央，而盆地周围（尤其是西北部）地形起伏度则介于2.84~3.0之间，相应

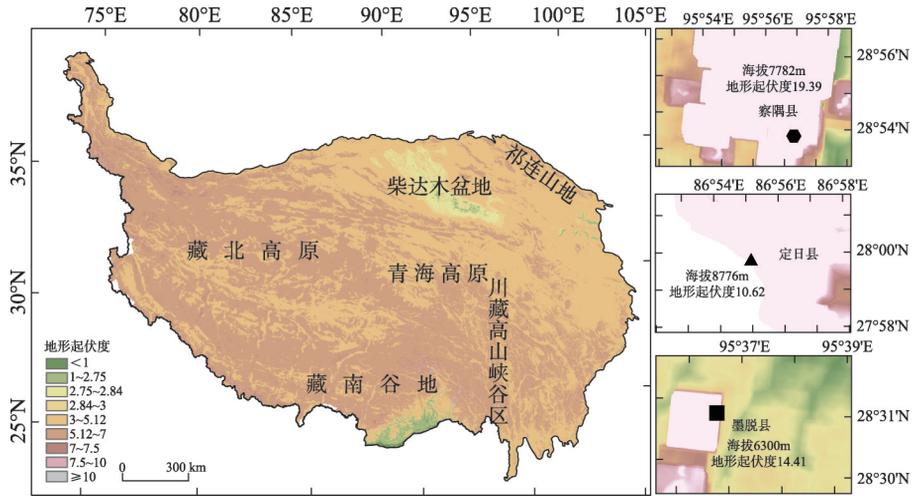


图5 基于最佳分析窗口的青藏高原不同等级地形起伏度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the relief degree of land surface (RDLS) derived from the optimal analysis window method in the Qinghai-Tibet Plateau, China

土地面积占比减小到0.07%。可见，青藏高原地形起伏度在3.0以下时，主要集中在青海与西藏两省区，而新、甘、川与滇四省区分布很少。相比之下，当地形起伏度 > 3.0时，则呈现出广泛且集中的分布特征，其中超3/5的区域地形起伏度介于4.5~5.7之间。当地形起伏度取值介于3.0~5.12之间，相应土地面积占比先缓慢后快速增大（图4），土地面积累计占比高达44.51%，成片分布在青海省大部、青甘川交界区、青甘新交界区、以及藏北高原腹地等。当地形起伏度取值介于5.12~7.0时，相应土地面积比到44.96%，这是青藏高原地形起伏度的主体部分。在空间上，集中连片地分布在西藏大部、新疆昆仑山西段、青海西南部与四川西部等。当地形起伏度超过7.0后，相应土地面积仅占到青藏高原0.02%以下，零星分布在西藏与新疆的极高山地区。

3.2 青藏高原地形起伏度经纬向分布特征

选取不同纬度（30°N、32°N、34°N和36°N）与经度（85°E、90°E、95°E和100°E），进一步讨论青藏高原地形起伏度纬向与经向剖面特征（图6a~图6h）。

3.2.1 纬度分析 30°N自西向东先后穿越冈底斯山脉—念青唐古拉山—横断山脉以北地区，地形起伏度主要介于3.0~8.0（平均值为5.62），东西向地形起伏变化剧烈，分别于95.5°E（波密县）、94.1°E（工布江达县）处出现最小值和最大值。该区域为藏南谷地向念青唐古拉山脉爬升处，是30°N地表起伏最为剧烈的区域。32°N从西到东主要横穿藏北高原—四川北部高原等，地表起伏度主要介于3.0~7.5（平均值为5.2），东西向地形起伏相对和缓，总体呈近“U”型变化，于75°E~82°E之间起伏剧烈（冈底斯山脉向高原降落处），至四川境内地形起伏度降至5.0以下。34°N和36°N同时横跨藏北高原—青海高原地区，地形起伏度分别介于3.0~7.5与2.0~9.0，平均值约为5.16。但是，36°N一线自西向东地形起伏较34°N沿线地形起伏较大，如在76°E~84°E（喀喇昆仑山脉）与96°E~104°E（青海高原），前者两个横剖面地形起伏非常剧烈。可见，在纬向（30°N~36°N）上，青藏高原南北部地形起伏相对剧烈、中间起伏略为和缓，且东西向地形起伏度有下降趋势。

3.2.2 经度分析 与纬向南北起伏程度大于中部情形不同，青藏高原地形起伏度经向特征正好相反（图6e~图6h）。85°E自北向南纵贯昆仑山脉—藏北高原—冈底斯山脉—喜马拉雅

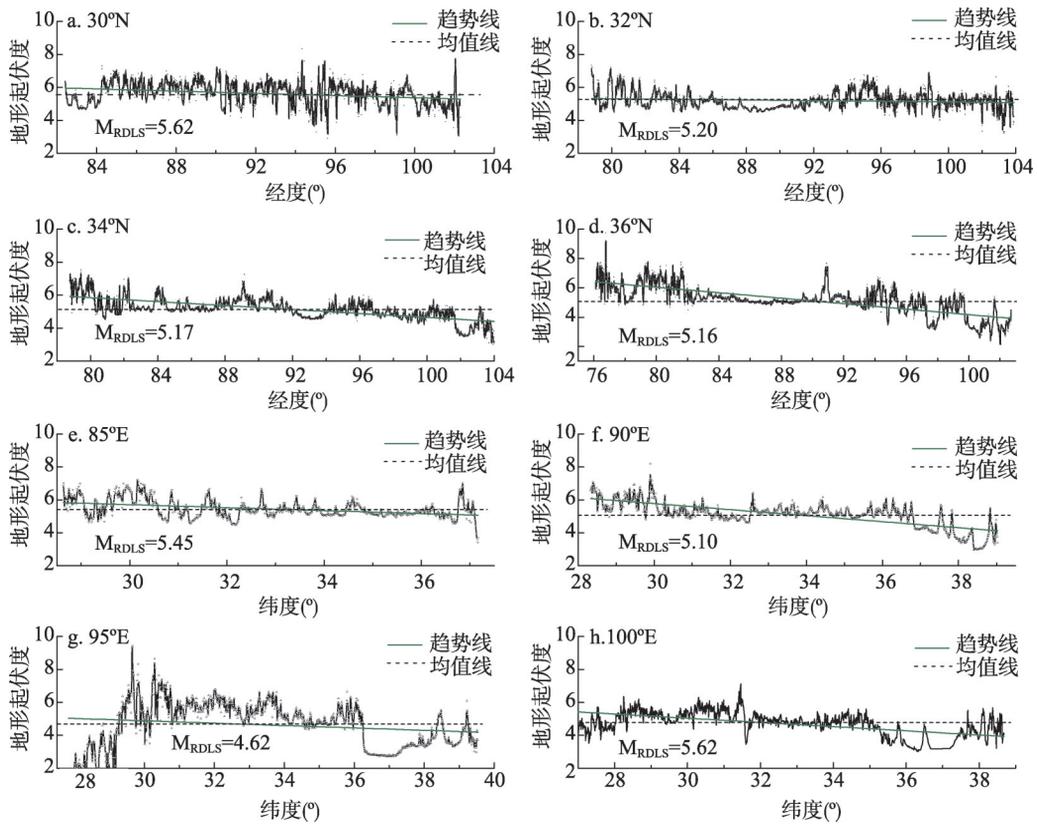


图6 青藏高原地形起伏度纬度、经度分布规律

Fig. 6 The latitudinal and longitudinal distribution features of the relief degree of land surface (RDLS) in the Qinghai-Tibet Plateau, China

雅山脉，地形起伏度介于3.0~7.2（平均值为5.45），纵向地形起伏变化和缓，仅在29°~32°N（冈底斯山脉中部）地形起伏较大，最大与最小值分别出现在30.2°N（冈底斯山脉）与37.1°N（安迪尔河谷处）。90°E自北向南纵跨库木库勒盆地—可可西里山脉—唐古拉山脉—念青唐古拉山脉等，地形起伏度介于3.0~8.0（平均值为5.10），纵向地形起伏程度有所增大，山脉—高原面—山脉阶梯式错落变化明显。95°E有别于其他纵剖面，自北向南依次贯穿柴达木盆地—可可西里山脉—青海高原—念青唐古拉山脉—藏南谷地，地形起伏度介于1.0~9.0（平均值为4.62），南北向地形起伏最为剧烈，总体呈倒“U”型变化，于盆地和谷地处地形起伏度取值为2以下，于29.8°N（念青唐古拉山脉）地形起伏度达最大值9。100°E纵穿祁连山脉—青海高原—巴颜喀拉山脉—川藏高山峡谷区，地形起伏度介于3.0~6.0（平均值为5.62），南北向地形起伏比较小，仅于35°~38°N处（青海湖及其南部峡谷）出现低起伏平缓区域。可见，在经向（85°~100°E）上，青藏高原东西部地形起伏相对和缓、中间起伏较为剧烈，且地形起伏度从南到北呈减少趋势。

3.3 青藏高原地形起伏度地理意义表征探索

3.3.1 地形起伏度与平均海拔、相对高差相关性分析 在栅格层面对青藏高原地形起伏度与相对高差及平均海拔进行统计分析，图7表明地形起伏度与相对高差、平均海拔呈正相关，但存在明显的阶段性变化特征。具体而言，地形起伏度 < 1.0时，相对高差和平均海拔均较小，且二者随地形起伏度增大均表现为线性增加，在地貌类型上主要为海拔在

260 m以下、相对高差在175 m以下的平原或小起伏丘陵,如雅鲁藏布大峡谷出口(门隅)、察隅河下游谷地。地形起伏度介于1.0~2.8时,平均海拔与相对高差随地形起伏度增大分别呈指数、对数型增加,主要为海拔在1200 m以下、相对高差在450 m以下的较大起伏丘陵和中低山地,如雅鲁藏布江大拐弯处、及其以南各支流。地形起伏度介于2.8~5.0时,平均海拔骤增而相对高差骤减直至平稳变化,且出现断裂点,主要为海拔在2000 m以上、高差在200 m以下的小起伏高原台地或者盆地,如柴达木盆地。地形起伏度介于5.0~8.0时,平均海拔和相对高差随地形起伏度增大则分别呈对数、指数型增加,主要为平均海拔在4000 m以上、相对高差

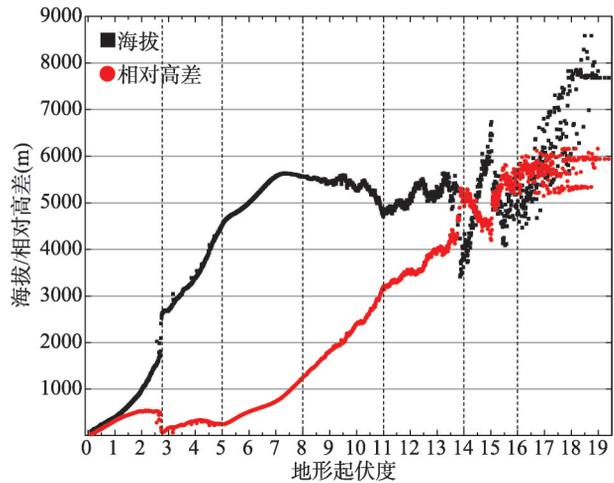


图7 青藏高原地形起伏度与平均海拔、相对高差相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between relief degree of land surface (RDLS) and average elevation as well as relative elevation difference in the Qinghai-Tibet Plateau

在270~600 m的大起伏高原地带,如冈底斯山脉、巴颜喀拉山脉。地形起伏度介于8.0~14.0时,表现为海拔在5000 m上下波动、相对高差由1000 m呈线性增长,如林芝的南迦巴瓦峰。当地形起伏度 ≥ 14.0 时,平均海拔和相对高差以5000 m为“水平线”交互波动变化,随着地形起伏度增大,整体呈增加趋势,表现为海拔在5000 m以上、高差在4000 m以上的极大起伏高原地带,主要有喜马拉雅山脉东麓等地形特征。

3.3.2 青藏高原地形起伏度地理表征意义 为厘清青藏高原地形起伏度表征区内地形起伏的地理意义,进一步在像元层面对最佳窗口内的地形起伏度与海拔最大(小)值、相对高差最大(小)值进行相关性剖面分析,实现地形起伏度对区域地形起伏状况的有效表征,并评价基于海拔与相对高差之和(差)的实际地表起伏特征与地形起伏度(数学层面)之间的差异特征(图8)。由于不同窗口下的山体起伏(高差)介于最大海拔和最小海拔之间,故以最大海拔的“平缓”起伏和最小海拔的“陡峭”起伏,综合模拟不同地形起伏度下的地形(海拔)与落差(相对高差)交互变化特征。具体而言,以窗口内最小与最大海拔,分别表征该地形起伏度下实际山体的“山麓”和“山峰”;以窗口内最小海拔与最大高差之和,表征该地形起伏度下低海拔山体的极限(上限)起伏特征;以窗口内最大海拔与最小高差之差,表征该地形起伏度下高海拔山体的最平缓起伏特征。其中起伏特征线^①越逼近海拔线,则表示该地形起伏由海拔引起,且起伏较为平缓;若起伏特征线远离海拔线,则表示该地形起伏由高差引起,且起伏较为剧烈。

结果表明,当地形起伏度 < 7.5 时,高山的起伏特征较为平缓,其地形起伏度增大主要由海拔升高引起;低山和中山的起伏特征较为显著,地形起伏度表征的地表起伏情况主要由山体的落差引起。当地形起伏度为7.5时出现断裂点,即最低海拔突变至1000 m以下,例如柴达木盆地北部骤然爬升的山脉、以及雅鲁藏布大峡谷出口的门隅地区;当地形起伏度介于7.5~11.0时,低海拔山体参差错落分布,高海拔山体山峰断裂阶梯式抬升(降落),具体为河谷地向极高山爬升处,例如易贡藏布沿岸向念青唐古拉山脉东缘

① 起伏特征线:最小海拔+最大高差或最大海拔-最小高差;海拔线:最小海拔或最大海拔。

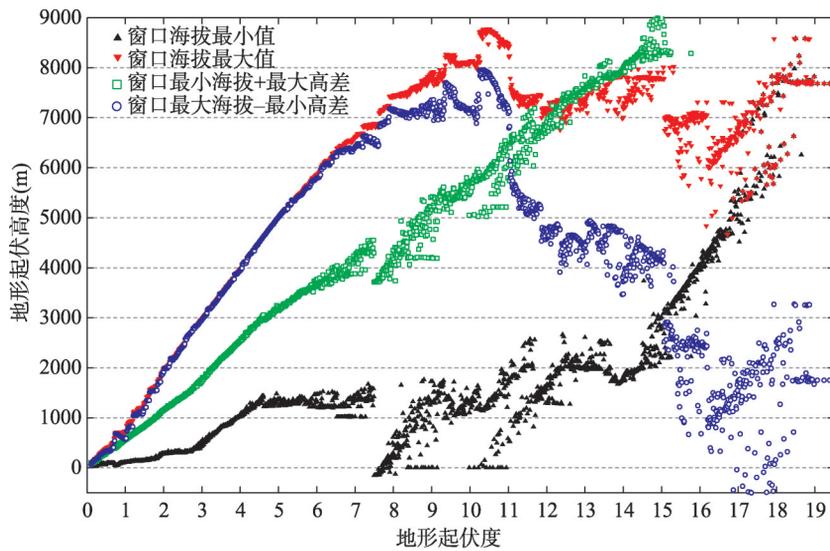


图8 青藏高原地形剖面与地形起伏度对应关系图

Fig. 8 The relationship between terrain section and relief degree of land surface (RDLS) in the Qinghai-Tibet Plateau

爬升处。当地形起伏度为11.0时，窗口内最小海拔+最大高差与最大海拔-最小高差出现交点，表征当地形起伏度大于11.0后，分析窗口内最大高差与最小高差趋于统一值，即大起伏特征的地表主要为海拔在5000 m以上、高差在3000 m以上的极高山，具体为喜马拉雅山脉地表起伏情况。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文利用ASTER GDEM 30 m数据，通过均值变点分析方法确定了青藏高原地区地形起伏度的最佳分析窗口，并运用地形起伏度模型对青藏高原地区地形起伏度的空间差异性进行评价，在此基础上，将（平均、最大、最小）海拔、（平均、最大、最小）相对高差与地形起伏度进行相关性分析，并揭示了地形起伏度的地理学意义，即对区域地形起伏的有效表征。主要结论如下：

(1) 基于GDEM的青藏高原地形起伏度评价最佳窗口为 41×41 个像元的矩形邻域，对应面积约为 1.51 km^2 ，均值变点分析表明区域地形起伏度评价最佳窗口有其唯一性。

(2) 青藏高原地形起伏度取值在0.11~19.40之间，均值为5.06，超3/5的地区地形起伏度介于4.5~5.7。整体上，青藏高原地形起伏程度由其东北部向西南部、西部递增，仅在柴达木盆地、藏南谷地以及河湟谷地出现低起伏地貌特征。且经度剖面地形起伏特征较纬度剖面更为复杂和剧烈。

(3) 同一地形起伏度数值由不同的海拔和相对高差多种组合而得。就高原特征的地形起伏度而言，随着地形起伏度的增加，海拔呈对数型增加后波动变化、相对高差呈指数型增加后波动变化。具体而言：地形起伏度与相对高差、平均海拔呈正相关。当地形起伏度小于1.0时，表现为海拔在260 m以下、相对高差在175 m以下的平原或小起伏丘陵；当地形起伏度介于1.0~2.2时，表现为海拔在1200 m以下、相对高差在450 m以下的较大起伏丘陵和山地；当地形起伏度介于2.2~5.0时，表现为海拔在2000 m以上、相对

高差在 200 m 以下的小起伏高原台地;当地形起伏度介于 5.0~8.0 时,表现为海拔在 4000 m 以上、相对高差在 270~600 m 的大起伏高原地带;当地形起伏度大于 10.0 时,表现为海拔在 5000 m 以上、相对高差在 1500 m 以上的极大起伏高原地带。

(4) 通过海拔、相对高差与地形起伏度的综合分析,揭示了不同地形起伏度下青藏高原地区山体的剖面特征,界定了地形起伏度数值度量对区域地形起伏表征的地理学意义,即青藏高原地区低山稳步爬升后形成高原台地,经历山脉骤然爬升、地表起伏特征剧烈,后形成极高山的有序错落起伏(喜马拉雅山脉)。

4.2 讨论

地形起伏度已成为区域人居环境适宜性与资源环境承载力的基础性评价指标之一。当前,DEM 栅格产品是获取区域地形起伏度的重要数据来源,而确定其最佳分析窗口大小是开展地形起伏度计算的前提与关键。均值变点分析方法可有效界定区域地形起伏度计算的最佳分析窗口,其原理是通过计算结果值体现不同窗口下对应高差最大山体完整性的保障程度。ASTER GDEM 作为分辨率最高(30 m)全球覆盖 DEM 产品,将为开展不同尺度内的地形起伏度、人居环境适宜性与资源环境承载力评价提供数据支撑。鉴于均值变点法对最佳窗口界定的唯一性,有必要深入开展不同空间尺度下地形起伏度评价的最佳窗口大小特征与变化趋势,结合区域土地面积、地形特征等参数构建最佳窗口界定的经验模型,并在不同行政尺度、流域尺度与生态尺度上开展广泛验证其合理性与可预测性。

本文在借鉴地形起伏度现有评价模型计算青藏高原地形起伏度的基础上,从其与平均海拔、最佳窗口内相对高差的相关性及其变化特征等视角,首次用地形起伏度对青藏高原的地形起伏特征进行了有效表征,即刻画了无量纲地形起伏度的取值及其范围的地理学意义。青藏高原作为全球地形地貌最复杂的地理单元,特别是境内集中分布了全球极高海拔山体(> 7000 m),基于地形起伏度的地理学意义表征有很好的代表性,在全球层面也具有其普遍性规律。除与平均海拔和相对高差相关外,区域(最佳分析窗口)平地比例也是反映地形起伏的重要参数。目前,平地的界定一般采用高差小于 30 m。对于山地、丘陵和平原等地形而言,平地的界定方法标准值得后续研究。近年来,地形起伏度应用范围日趋广泛,对该指标的后向分等定级同样值得关注。以第二次青藏高原综合科学考察研究为契机,近期要进一步引入人口、社会经济、以及生态要素等变量栅格产品,补充分析与增进认识青藏高原地形起伏度对人口、经济、社会、生态的有效表征,促进其国家生态安全屏障建设与区域绿色发展。

参考文献(References)

- [1] Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Zhang Dan, et al. Natural environment suitability for human settlements in China based on GIS. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(4): 437-446.
- [2] Li Juzhang. Classification of fundamental types of geomorphological form in China. *Geographical Research*, 1987, 6(2): 32-39. [李钜章. 中国地貌基本形态划分的探讨. *地理研究*, 1987, 6(2): 32-39.]
- [3] Tu Hanming, Liu Zhendong. Demonstrating on optimum statistic unit of relief amplitude in China. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 1990, 12(3): 266-271. [涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证. *湖北大学学报(自然科学版)*, 1990, 12(3): 266-271.]
- [4] Feng Zhiming, Tang Yan, Yang Yanzhao, et al. The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(10): 1073-1082. [封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性. *地理学报*, 2007, 62(10): 1073-1082.]
- [5] Hao Qing, Feng Zhiming, Yang Yanzhao, et al. Evaluation on land carrying capacity of Tibet based on dietary nutrients:

- Present and prospects. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 911-920. [郝庆, 封志明, 杨艳昭, 等. 西藏土地资源承载力的现实与未来: 基于膳食营养当量分析. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 911-920.]
- [6] Wu Jiang, Gao Yu. Feature extraction and stability evaluation of windy sand beach area based on high-resolution DEM with low altitude aerial photography. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 1-7. [吴江, 高宇. 基于低空高精度数字高程模型(DEM)的风沙草滩特征及稳定性评价. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 1-7.]
- [7] Liu Xinhua, Yang Qiuke, Tang Guoan. Extraction and application of relief of China based on DEM and GIS method. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(1): 57-59. [刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用. *水土保持通报*, 2001, 21(1): 57-59.]
- [8] Tang Qian, Li Xiaokun, Zhong Boxing, et al. GIS-based research on the evaluation of spatial distribution of villages and human settlements environment suitability in Chengkou county of Chongqing. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 305-311. [唐倩, 李孝坤, 钟博星, 等. 基于GIS的重庆城口县村落空间分布特征及人居环境适宜性评价研究. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 305-311.]
- [9] Zhang Jinming, You Xiong. A prediction model of optimum statistical unit of relief. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 728-741. [张锦明, 游雄. 地形起伏度最佳分析区域预测模型. *遥感学报*, 2013, 17(4): 728-741.]
- [10] Zhang Wei, Li Ainong. Study on the optimal scale for calculating the relief amplitude in China based on DEM. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(4): 8-12. [张伟, 李爱农. 基于DEM的中国地形起伏度适宜计算尺度研究. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(4): 8-12.]
- [11] Tang Fei, Chen Xi, Cheng Weiming, et al. Relief amplitude in Junggar Basin and peripheral northwest mountains. *Arid Land Geography*, 2006, 29(3): 388-392. [唐飞, 陈曦, 程维明, 等. 基于DEM的准噶尔盆地及其西北山区地势起伏度研究. *干旱区地理*, 2006, 29(3): 388-392.]
- [12] Wang Ling, Lv Xin. Analysis of the relief amplitude in Xinjiang based on digital elevation model. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(1): 113-116. [王玲, 吕新. 基于DEM的新疆地势起伏度分析. *测绘科学*, 2009, 34(1): 113-116.]
- [13] Han Haihui, Wang Yilin, Li Jianqiang, et al. Classification of Tibetan Plateau landform using SRTM-DEM. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(4): 43-48. [韩海辉, 王艺霖, 李健强, 等. 雷达地形测绘DEM用于青藏高原地貌分类. *遥感信息*, 2015, 30(4): 43-48.]
- [14] Yang Yanzhao, Guo Guangmeng. Natural environment suitability for human settlements in Inner Mongolia based on GIS. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 9-16. [杨艳昭, 郭广猛. 基于GIS的内蒙占人居环境适宜性评价. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 9-16.]
- [15] Li Wei, Zhao Weiquan, Su Weici. Nature suitability evaluation of human settlement environment based on GIS technique in central Guizhou province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(5): 1082-1091. [李威, 赵卫权, 苏维词. 基于GIS技术的黔中地区人居环境自然适宜性评价. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(5): 1082-1091.]
- [16] Wang Ling, Tong Xiaojuan. Analysis on relief amplitude based on change point method. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(6): 65-67. [王玲, 同小娟. 基于变点分析的地形起伏度研究. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(6): 65-67.]
- [17] Wang Ranghu, Zhang Shuwen, Pu Luoman, et al. Analysis on the relief amplitude in northeast China based on ASTER GDEM and mean change point method. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(6): 49-54. [王让虎, 张树文, 蒲罗曼, 等. 基于ASTER GDEM和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 49-54.]
- [18] Liu Yucheng, Zhao Tingning. Method for extraction relief amplitude of abandoned quarry based on change point method. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 269-273. [刘育成, 赵廷宁. 基于变点分析法提取废弃采石场地形起伏度的方法. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 269-273.]
- [19] Tu Hanming, Liu Zhendong. Demonstrating on optimum statistic unit of relief amplitude in China. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 1990, 12(3): 266-271. [涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证. *湖北大学学报(自然科学版)*, 1990, 12(3): 266-271.]
- [20] Tachikaw T, Hata M, Kaku M, et al. Characteristics of ASTER GDEM version 2. *Geoscience & Remote Sensing Symposium IEEE*, 2011.
- [21] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographical Sinica*, 2012, 67(1): 3-12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障

- 保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.]
- [22] Feng Zhiming, Tang Yan, Yang Yanzhao, et al. Establishment and application of human settlements environment index model (HEI) based on GIS. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(12): 1327-1336. [封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 基于GIS的中国人居住环境指数模型的建立与应用. 地理学报, 2008, 63(12): 1327-1336.]
- [23] Zhou Zixiang, Li Jing, Ren Zhiyuan. The relief degree of land surface and population distribution in Guanzhong-Tianshui economic region using GIS. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 951-957. [周自翔, 李晶, 任志远. 基于GIS的关中—天水经济区地形起伏度与人口分布研究. 地理科学, 2012, 32(8): 951-957.]
- [24] Yan Songbao, Wang Liyun, Zou Lu, et al. Relationship between soil organic carbon and total nitrogen and soil properties under different use patterns of grassland in the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Science*, 2019, 38(2): 105-111. [颜送宝, 王丽云, 邹璐, 等. 青藏高原草地不同利用方式下土壤碳氮与土壤性状的关系. 生态科学, 2019, 38(2): 105-111.]
- [25] Gao Zhiyuan, Xie Yuanli, Wang Ninglian, et al. Response of three global DEM data's accuracy to different terrain factors in Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 1-8. [高志远, 谢元礼, 王宁练, 等. 青藏高原地区3种全球DEM精度对不同地形因子的响应. 水土保持通报, 2019, 39(2): 1-8.]
- [26] Zheng Du, Zhao Dongsheng. Characteristics of natural environment of the Tibetan Plateau. *Science & Technology Review*, 2017, 35(6): 13-22. [郑度, 赵东升. 青藏高原的自然环境特征. 科技导报, 2017, 35(6): 13-22.]
- [27] Jiang Zhigang, Li Lili, Hu Yiming, et al. Diversity and endemism of ungulates on the Qinghai-Tibetan Plateau: Evolution and conservation. *Biodiversity Science*, 2018, 26(2): 158-170. [蒋志刚, 李立立, 胡一鸣, 等. 青藏高原有蹄类动物多样性和特有性: 演化与保护. 生物多样性, 2018, 26(2): 158-170.]
- [28] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai. *Digital Geomorphic Remote Sensing Interpretation and Charting*. Beijing: Science Press, 2009. [周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌遥感解译与制图. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [29] Slaymaker O. The role of remote sensing in geomorphology and terrain analysis in the Canadian Cordillera. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001, 3(1): 11-17.
- [30] Su Xing, Wei Wanhong, Guo Wanqin, et al. Analyzing the impact of relief amplitude to loess landslides based on SRTM DEM in Tianshui prefecture. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(3): 616-622. [宿星, 魏万鸿, 郭万钦, 等. 基于SRTM DEM的地形起伏度对天水市黄土滑坡的影响分析. 冰川冻土, 2017, 39(3): 616-622.]
- [31] Ding Xianfa. Research on the basic morphological types of land geomorphology in Funing County, Yunnan Province based on the SRTM DEM and the change point method. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(11): 98-100. [丁贤法. 基于SRTM DEM与变点分析法的云南省富宁县地貌形态研究. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(11): 98-100.]

Relief degree of land surface and its geographical meanings in the Qinghai-Tibet Plateau, China

FENG Zhiming^{1,2,3}, LI Wenjun^{1,2}, LI Peng^{1,2,3}, XIAO Chiwei^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, MNR, Beijing 101149, China)

Abstract: Relief degree of land surface (RDLS) is one of the key indicators in the fields of suitability assessment of human settlements (SAHS) as well as resources and environmental carrying capacity (RECC) evaluation at the regional scale. Currently, there is still a lack of in-depth research on the determination of the optimal window size for the RDLS calculation and evaluation and its correlation analysis with two topographical parameters, e.g., elevation and relative height difference. These issues further affect the effective representation of the RDLS in the delineation of local to regional topographic relief. Therefore, an objective understanding of the RDLS in the Qinghai-Tibet Plateau of China greatly contributes to promoting the construction of national ecological security barrier and regional green development. In this study, based on the 30 m Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM Version 2), the optimal window size for calculating and evaluating the RDLS in the Qinghai-Tibet Plateau was accurately determined using the average change-point method, and the first 30 m RDLS thematic map for the Qinghai-Tibet Plateau was generated accordingly. Next, the interrelation between the RDLS and elevation and relative height difference was quantitatively examined. Based on that, the effective representation or geographical meanings of the RDLS in the plateau were defined. The results/conclusions include: (1) The optimum window size for the RDLS calculation and evaluation in the study area based on the 30 m GDEM is a rectangular neighborhood of 41×41 pixels, equaling to an area of about 1.51 km². The average change-point analysis approach shows that the optimum window size for regional RDLS analysis is unique. (2) The average RDLS of the study area is approximately 5.06, along with over 60% of the plateau ranging between 4.5 and 5.7. On the whole, the topographic relief increases from the northeast to the southwest and west parts. Gentle to small-relief landforms are mostly seen in the Qaidam Basin, the Southern Tibet Valley, and the Hehuang Valley (Yellow and Huangshui river valleys). Also, the differences in the local surface relief in varied latitudinal sections (along the mountain range) are small, while those at longitudinal level are big, showing hierarchical and regular fluctuations (crossing the mountain trending). (3) Correlation analyses showed that different values of the RDLS in the plateau correspond to geomorphic units with different elevations and relative height differences. The profile characteristics of the mountains in the Qinghai-Tibet Plateau based on different terrain reliefs indicate that the height above sea level of low mountains steadily increases first, then experiences sudden rise and severe fluctuation in surface relief, and finally forms the orderly ups and downs of the extreme mountains, e.g., the Himalayas.

Keywords: window analysis; relief degree of land surface (RDLS); geographical meaning; profile characteristics; Qinghai-Tibet Plateau; suitability assessment of human settlements