

# Elevation Analysis of Qinghai-Xizang Plateau Surface Based on DEM Data

Zhiyang Chang<sup>1</sup>, Jian Wang<sup>1,2\*</sup>, Shibiao Bai<sup>1,2</sup>, Zhong Liang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing

<sup>2</sup>Key Laboratory of Virtual Geographical Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, Nanjing  
Email: changzhiyang1@126.com, jwang169@vip.sina.com

Received: May 4th, 2012; revised: May 18th, 2012; accepted: May 28th, 2012

**Abstract:** The Qinghai-Xizang plateau have been attracting more and more interest from different parts of the world, because of the particular geographic location, huge horizontal scale, vertical elevation and its great effects on the global climate change. However, up to now, there have not been an accurately calculation and systematic analysis of the elevation of the Qinghai-Xizang Plateau Surface and its distribution. Based on the SRTM3-DEM data and the technique of spatial analysis in GIS, the elevation of the Qinghai-Xizang Plateau Surface and its distribution are calculated and analyzed. It suggests that the main part of the Plateau Surface distributes in the range of 4400 - 5300 m.a.s.l and with a center elevation of 4950 m.a.s.l. And it is concluded that the grid unit of  $13 \times 13$  ( $1.37 \text{ km}^2$ ) is the optimum statistical unit for calculating the relief amplitude in Tibet Plateau by using SRTM3-DEM.

**Keywords:** Digital Elevation Model (DEM); Local Relief; Qinghai-Xizang Plateau; Plateau Surface; Elevation

## 基于 DEM 的青藏高原主体高原面的高程分析

常直杨<sup>1</sup>, 王建<sup>1,2\*</sup>, 白世彪<sup>1,2</sup>, 梁中<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京师范大学地理科学学院, 南京

<sup>2</sup>南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京  
Email: changzhiyang1@126.com, jwang169@vip.sina.com

收稿日期: 2012 年 5 月 4 日; 修回日期: 2012 年 5 月 18 日; 录用日期: 2012 年 5 月 28 日

**摘要:** 作为世界上最高的高原、地球的第三极, 青藏高原的形成、演化及其对世界气候变化和区域环境分异的影响, 受到人们越来越多的关注。可是关于青藏高原平均海拔及高原面的分布范围还没有一个确切的令人信服的答案。本文利用 SRTM3-DEM 数据, 运用 GIS 相关空间分析技术及均值变点法求取青藏高原(国内部分)高程大于 3000 m 区域的最佳统计分析窗口, 并将该区域以 100 m 为间隔划分为不同的高程区间, 对不同高程区间的面积, 平均地势起伏度、平均地表切割度及平均坡度等地貌参数进行了统计分析。结果表明, 青藏高原主体高原面的中心分布范围在 4400~5300 m 之间; 青藏高原上, 平均地势起伏度、平均地表切割度和平均坡度最小, 而 100 m 高程间隔内地面面积最大的地方, 出现在海拔 4900~5000 m 之间, 青藏高原主体高原面的中心高程为 4950 m; 利用 SRTM3-DEM 数据, 提取研究区地势起伏度的最佳统计窗口面积为  $1.37 \text{ km}^2$ 。

**关键词:** 数字高程模型(DEM); 地势起伏度; 青藏高原; 高原面; 高程

### 1. 引言

作为世界上平均海拔最高的高原、作为地球的第三极, 青藏高原的形成、演化及其对世界气候变化和区域环境分异的影响<sup>[1,2]</sup>, 受到地学家和环境学家的广泛关注<sup>[3,4]</sup>。可是最近发现, 关于青藏高原的平均高程究竟是多少, 还没有一个确切的令人信服的答案(表 1)。

作为世界上平均海拔最高的高原、作为地球的第三极, 青藏高原的形成、演化及其对世界气候变化和区域环境分异的影响<sup>[1,2]</sup>, 受到地学家和环境学家的广泛关注<sup>[3,4]</sup>。可是最近发现, 关于青藏高原的平均高程究竟是多少, 还没有一个确切的令人信服的答案(表 1)。

\*通讯作者。

**Table 1. The different conclusions of Tibet plateau's mean height**  
**表 1. 关于青藏高原平均海拔高程的不同认识**

平均海拔(m)	文献来源	平均海拔(m)	文献来源
>4000	叶竺正、高由禧, 青藏高原气象学, 1979	4000~5000	赵济主编, 中国自然地理, 1995 王炳庭, 世界区域气候, 1996 陆健健, 中国湿地, 1990
	刘德生等, 亚洲自然地理, 1995		
	郑度等, 中国的青藏高原, 1985		
	孙鸿烈, 李文华等, 1986		
	方如康, 中国的地形, 1996		
>4500	黄秉维, 中国综合自然区划的初步方案, 1958	4500~5000	李吉均、文世宣、张青松等, 1979 Scot & Rose, 1989 赵济、陈传康, 中国地理, 1999
	曾昭璇主编, 中国的地形, 1985		
4850	伍永秋等, 1999	4950	吴锡浩、王富葆、安芷生等, 1992
	吴锡浩, 1996		
4500	刘东生等, 1996	4000 左右	牛亚菲, 1999 杨青山、韩杰、丁四宝, 世界地理, 2004
	刘伉、毛汉英、王守春, 世界自然地理手册, 1984		
	刘德生主编, 世界自然地理, 1986		
	周尚哲、徐祥德, 2005		

总结起来主要有几种认识, 有的认为青藏高原的平均海拔高程在 4000 m 左右<sup>[5,6]</sup>, 有的认为超过 4000 m<sup>[7-12]</sup>, 有的认为在 4500 m 左右<sup>[13-15]</sup>, 有的认为大于 4500 m<sup>[16-17]</sup>, 有的认为在 4850 m<sup>[18-19]</sup>或者 4950 m<sup>[20]</sup>, 还有的认为在 4500~5000 m<sup>[21-23]</sup>或者 4000~5000 m<sup>[24-26]</sup>, 有时同一人的认识也不一致<sup>[18,20,23,24]</sup>。另外, 在青藏高原高原面的高程认识上也存在分歧, Fielding 等<sup>[27]</sup>分析得出青藏高原的腹地以其平缓和高海拔著称, 李吉均等<sup>[21]</sup>指出青藏高原广大高原面分布范围为 4500~5000 m, 曾昭璇等<sup>[16]</sup>指出高原面分布范围为 4500~5200 m, 中国科学院编委《中国自然地理》编辑委员会<sup>[28]</sup>指出高原面分布范围为 4000~5000 m。追踪查阅已有文献, 发现还没有人对青藏高原的高程和高原面的高程分布进行过专门系统的分析与估算, 只是进行了定量的描述。因此, 有必要对这些问题进行分析和探讨。

要探讨青藏高原(均指国内部分)平均海拔及高原面高程分布范围, 首先要确定高原的空间范围。目前对青藏高原大致范围的认识基本趋于一致, 即南部以喜马拉雅山为界, 北部以西昆仑山、阿尔金山和祁连山高山带北侧为界, 西端以昆仑山与喜马拉雅山交汇的帕米尔山结为界, 东边以横断山中段和北段的东缘为界, 即岷山-锦屏山-玉龙山的东侧, 东北界大致在交县-武都-岷县-康乐-民和一线以西<sup>[29]</sup>。

但是在边界具体划定的过程中, 究竟划在什么海拔高度和什么具体位置, 还存在着一定的不确定性,

有人以青藏高原 4000 m 等高线为依据确定青藏高原范围<sup>[29]</sup>, 有人以 3500 m 和 4000 m 等高线共同为依据来确定青藏高原范围<sup>[30]</sup>。划分范围的不确定性必然会对整个高原范围内的平均海拔产生影响, 因此, 这里不打算讨论整个高原范围内的平均高度, 而是试图分析与估算青藏高原主体高原面的高程分布范围。本文以 3000 m 等高线作为青藏高原的边界, 因为青藏高原的主体高原面必定分布在大于 3000 m 的区域。

数字高程模型的发展为这一问题的探讨提供了新的思路, 本文利用 SRTM3-DEM 数据, 提取了青藏高原研究区的地貌参数, 并对研究区不同高程区间地貌参数进行了统计分析, 对获取的高程曲线特征综合分析, 揭示了青藏高原主体高原面的分布范围。

## 2. 数据来源与方法

### 2.1. 数据来源

所使用的数字高程模型数据(SRTM3-DEM)下载自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn>), 经过投影转换、拼接、裁切而成, 格网大小为 90 m, 数据格式为 ArcGIS 的 grid 格式。该 DEM 高程基准为 EGM96, 水平基准为 WGS-1984, 在探讨青藏高原高原面高程分布时, 我国通常采用的高程基准是 1985 国家高程基准, 该高程基准与 EGM96 之间的垂直偏差约 35.7 cm, 从东向西逐渐增大, 青藏高原区最大海拔差异可达 3 m<sup>[31]</sup>。

由于我们探讨的高原高程或者高原面高程分布范围通常是在海拔 4000 m 以上，因此高程基准的差异不需要进行专门校正。

## 2.2. 分析方法

### 2.2.1. 主体高原面的界定

顾名思义，主体高原面就是高原上起伏比较和缓、高程相对一致、代表了高原主体的地面。因此，确定主体高原面应该从两个方面进行考虑：一是可以借助于地势起伏度、平均坡度、地表切割度等地貌参数来判别地面起伏最和缓的区域；二是可以通过统计不同高程区间的面积，来判断面积分布最广的高程范围。

地势起伏度，是指在某一确定面积内所有栅格中最大高程与最小高程之差，是描述一个区域地面高差的一个有效指标，可以利用 Neighborhood Statistics(邻域统计)中 Range(范围)命令提取；地表切割度，是指地面某点的邻域范围内平均高程与该邻域范围内的最小高程的差值，能够直观地、量化地反映地表被侵蚀切割的深度情况，可以利用邻域统计在一定窗口大小内求取格网的平均值和最小值，再通过 Raster Calculator(格网计算)将平均值与最小值做差值求取；地势起伏度和地表切割度准确获取的关键是求算最佳统计窗口<sup>[32-34]</sup>。坡度是局部地表高度变化的比率指标，可量化表达地表面在各点的倾斜程度<sup>[35]</sup>，可直接利用 ArcGIS 软件空间分析中的坡度计算获取。对于地势起伏度、地表切割度及坡度的平均值可以通过 ArcGIS 空间分析中的 Reclassify 命令统计。

### 2.2.2. 最佳统计窗口求取

根据地貌发育的基本理论，存在一个使最大高差达到相对稳定的最佳统计窗口<sup>[32]</sup>，在提取青藏高原起伏度、切割度的时候，要确定出最佳统计窗口。常用的方法有人工作图法、最大高差法、模糊数学法和均值变点法<sup>[33]</sup>，本文所采用的方法是均值变点法，该方法对恰有一个变点的检验最为有效<sup>[36]</sup>。其数学表达式为：有序数列  $\{x_i\}$ ，其中  $i=1,2,\dots,N$ ， $N$  为样本数，样本以  $x_i$  点为界分为两段，分别计算每段样本的算术平均值  $\bar{x}_{i1}$ 、 $\bar{x}_{i2}$  及样本均值  $\bar{x}$ 。并计算统计量：

$$S_i = \sum_{t_1=1}^{i-1} (x_{t_1} - \bar{x}_{i1})^2 + \sum_{t_2=i}^N (x_{t_2} - \bar{x}_{i2})^2 \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

对于(1)式和(2)式中，下脚标  $t_1=1,2,\dots,i-1$ ； $t_2=i, i+1,\dots,N$ 。变点的存在会使  $S$  和  $S_i$  的差距增大。两者最大差值对应的窗口大小即为最佳统计窗口<sup>[34,36]</sup>。

### 2.2.3. 面积 - 高程分布图

面积 - 高程分布图(不同高程区间与对应区间面积分布的曲线图)能够被用来分析层状地貌<sup>[37]</sup>，在前人的研究基础上，统计不同高程区间的平均地势起伏度、平均地表切割度及平均坡度等地貌参数，作为辅助参照。本文以 3000 m 高程作为起算点、100 m 间隔作为增量，另外，由于大于 6000 m 的区域面积极少，可以归为一类，最后可以划分得到 31 个高程区间。

## 3. 结果与讨论

利用 3000 m 以上的青藏高原 SRTM3-DEM 数据，在 ArcMap9.3 的空间分析模块中，使用窗口递增算法，以  $n \times n$  ( $n=3,5,\dots,41$ ) 象元的矩形作为模板算子，计算各邻域内平均地势起伏度，作为对应窗口地势起伏度结果值，结果见表 2。

在 SPSS 中对表 2 所获得的数据进行统计分析，拟合不同统计单元面积  $s$  与平均地势起伏度  $t$  的关系，得到统计单元与地势起伏度的关系曲线(图 1 所示)。拟合方程为  $y = 111.58\ln(x) + 333.45$ ，拟合系数  $R^2 = 0.9876$ ，拟合度满意。

对表 2 数据进行处理，首先求得单位面积上的地势度大小序列  $T$ ，单位地势度  $T = \text{起伏度}(t)/\text{面积}(s)$ ，

Table 2. Relation between grid units and relief amplitude  
表 2. 平均起伏度与统计单元大小对应关系

格网大小	面积 $s(\text{km}^2)$	平均起伏度 $t(\text{m})$
3 × 3	0.0729	91.31
5 × 5	0.2025	162.6
7 × 7	0.3969	220.28
...	...	...
19 × 19	2.9241	438.82
21 × 21	3.5721	464.19
...	...	...
37 × 37	11.0889	617.76
39 × 39	12.3201	632.83
41 × 41	13.6161	647.37

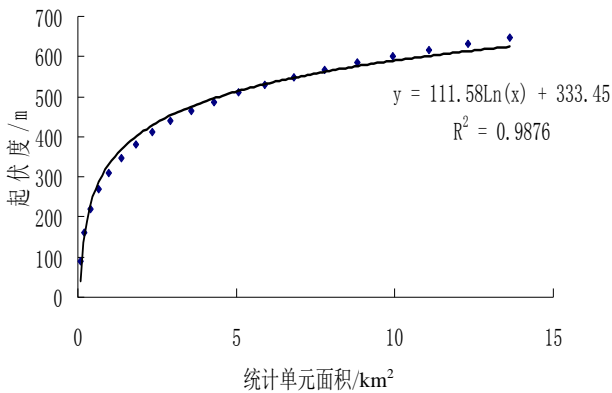


Figure 1. Relationship between statistics units and relief amplitude  
图 1. 统计单元与地势起伏度的关系

再对单位地势度序列取对数  $\ln T$ ，即得到数据序列  $\{x_i\}$ 。根据均值变点分析法式(1)和式(2)计算得图 2 曲线，S 和  $S_i$  之差在第五个差值，即在第六个序列点的时候最大，达到 6.56 左右，该序列点所对应的统计单元大小即为最佳统计单元。由表 1 可知，第 6 个序列点对应的是  $13 \times 13$  像元，即面积为  $1.37 \text{ km}^2$  的格网大小为最佳统计单元。

地表切割度的求取跟地势起伏度的求取原理一样，在 Arcgis 中以  $13 \times 13$  象元大小作为计算地表切割度的最佳分析窗口。求得研究区间内地势起伏度、

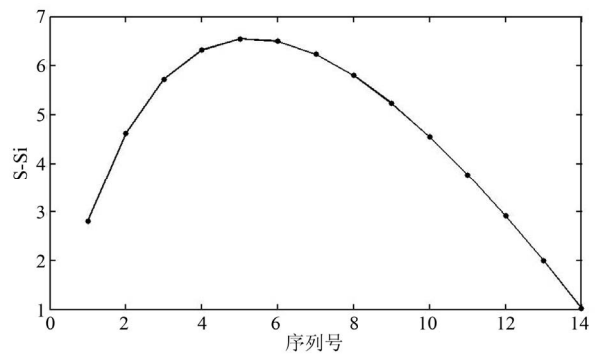
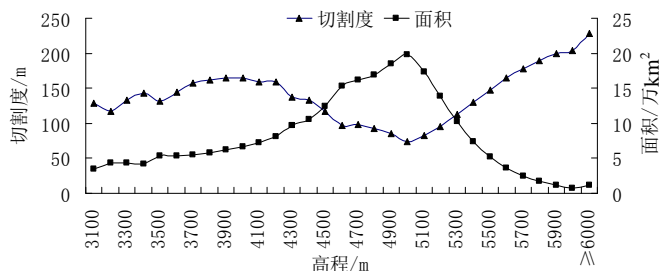
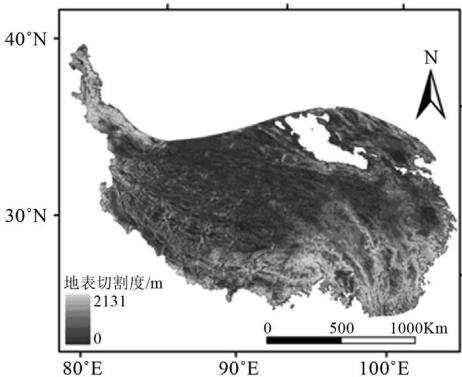
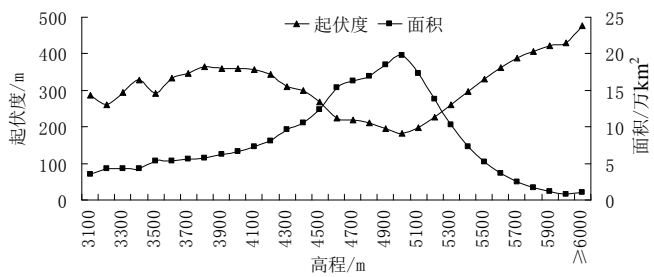
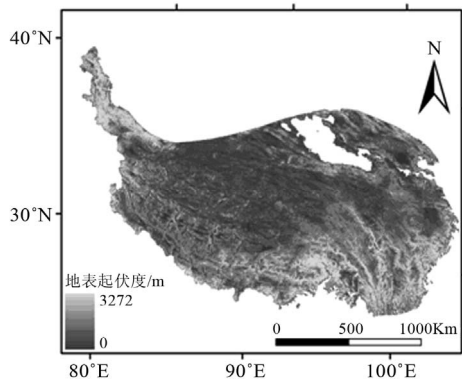


Figure 2. S and  $S_i$  differential value change curve  
图 2. S 和  $S_i$  的差值变化曲线

地表切割度及坡度，并对已划分好的 31 个高程区间的平均地势起伏度、平均切割度、平均坡度及面积进行了统计，如图 3 所示。

由图 3 对比分析可知，平均地势起伏大的地方，平均坡度、切割度也大，而面积却相对较少。其中，在  $3000 \sim 3800 \text{ m}$  之间，随着高程的增大，平均地势起伏度、平均坡度和地表切割度均逐渐增大，各单位高程的面积也缓慢增加；在  $3800 \sim 4900 \text{ m}$  之间，随着高程的增大，平均地势起伏度、平均坡度和地表切割度逐渐减小，单位高程的面积反而逐步增大，达到峰顶值；其后，在  $4900 \sim 6500 \text{ m}$  之间三个地貌指标又逐渐



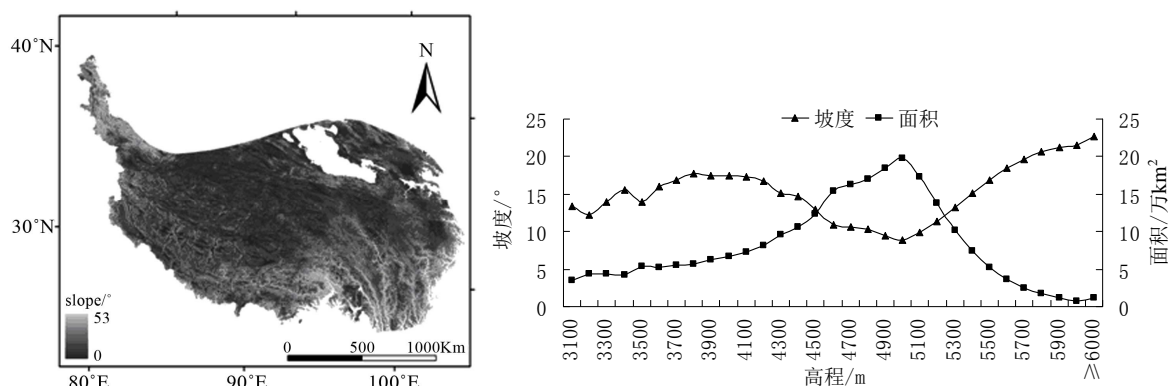


Figure 3. The statistical results of surface slope, roughness and relief distribution of Tibet Plateau  
图 3. 青藏高原地势起伏度、切割度及坡度分布与统计结果

随着高程的增大而增大，单位高程的面积却逐渐减小。可以明显看出，平均地势起伏度、平均坡度和平均地表切割度最小，而单位高程间隔内的面积却最大的地方，出现在海拔高程 4900~5000 m 之间。也就是说，青藏高原主体高原面是围绕着海拔 4950 m 高程分布，这是青藏高原主体高原面的中心高程。还可以看出，4400~5300 m 是高原上最平坦(地貌参数都比较小)、最开阔(面积最大)的中心地带。根据计算，分布在 4400~5300 m 的面积达到 140.59 万 km<sup>2</sup>，占到青藏高原总体面积的一半以上。

#### 4. 结论

本文利用 SRTM3-DEM 数据对 3000 m 以上青藏高原的不同高程区间进行地貌参数分析，得出如下结论：

1) 青藏高原主体高原面的中心高程为 4950 m 左右，青藏高原主体高原面的中心分布范围在 4400~5300 m 之间。

2) 利用 90 m 分辨率的 SRTM3-DEM 数据，对于高程大于 3000 m 的青藏高原地区，地势起伏度计算的最佳统计单元面积为 1.37 km<sup>2</sup>。

#### 参考文献 (References)

[1] J. Wang, Y. J. Wang, Z. C. Liu, et al. Cenozoic environmental evolution of the Qaidam Basin and its implications for the uplift of the Tibetan Plateau and the drying of the central Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 152(1-2): 37-47.  
[2] W. F. Ruddiman, J. E. Kutzbach. Forcing of late Cenozoic Northern Hemisphere climate by plateau uplift in Southern Asia and the American West. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(D15): 18409-18427.

[3] A. J. Broccoli, S. Manabe. The effects of orography on midlatitude Northern Hemisphere dry climate. *Journal of Climate*, 1992, 5: 1181-1201.  
[4] J. E. Kutzbach, W. L. Prell and W. F. Ruddiman. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 177-190.  
[5] 杨青山, 韩杰, 丁四宝. 世界地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 162-166.  
[6] 牛亚菲. 青藏高原生态环境问题研究[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 163-171.  
[7] 叶竺正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 前言.  
[8] 刘德生, 李志国, 江树芳等. 亚洲自然地理[M]. 北京: 商务印书馆, 1995: 37-42.  
[9] 郑度, 杨勤业, 刘燕华. 中国的青藏高原[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-4.  
[10] 孙鸿烈, 李文华, 张铭陶等. 青藏高原综合科学考察[M]. 资源科学, 1986: 21-30.  
[11] 方如康. 中国的地形[M]. 北京: 商务印书馆, 1996: 70-73.  
[12] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案[J]. 地理学报, 1958, 24(4): 348-365.  
[13] 刘伉, 毛汉英, 王守春. 世界自然地理手册[M]. 北京: 知识出版社, 1984: 9-10.  
[14] 刘德生. 世界自然地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 50-51.  
[15] 周尚哲, 徐祥德. 青藏高原对中国气候和环境演变的作用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-986.  
[16] 曾昭璇. 中国的地形[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 1985: 13-14.  
[17] 伍永秋, 崔之久, 葛道凯等. 青藏高原何时升降到现代的高度——以昆仑山垭口地区为例[J]. 地理科学, 1999, 19(6): 481-484.  
[18] 吴锡浩, 安芷生. 黄土高原黄土 - 古土壤序列与青藏高原隆升[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(2): 103-110.  
[19] 刘东生, 安芷生, 吴锡浩. 黄土第四纪地质全球变化(第四集)[A]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-17.  
[20] 吴锡浩, 王富葆, 安芷生等. 晚新生代青藏高原隆升的阶段和高度[A]. 刘东生, 安芷生主编. 黄土、第四纪地质、全球变化(第三集). 北京: 科学出版社, 1992: 1-13.  
[21] 李吉均. 青藏高原隆升与亚洲环境演变[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-246.  
[22] D. A. Scott, P. M. Rose. Asian waterflowl cencus. Slimbridge: IWRB, 1989.  
[23] 赵济, 陈传康. 中国地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 598-605.  
[24] 赵济主编. 中国自然地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995:

## 基于 DEM 的青藏高原主体高原面的高程分析

- 4.
- [25] 王炳庭. 世界区域气候[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 4-5.
- [26] 陆健健. 中国湿地[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1990: 前言.
- [27] E. Fielding, B. Isacks, M. Barazangl, et al. How flat is Tibet? *Geology*, 1994, 22(2): 163-167.
- [28] 中国科学院编委. 中国自然地理: 地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-4.
- [29] 张镱铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [30] 朱利东. 青藏高原北部隆升与盆地和地貌记录[D]. 成都理工大学, 2004.
- [31] 詹蕾, 汤国安, 杨昕. SRTM DEM 高程精度评价[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(1): 34-36.
- [32] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 1990, 12(3): 266-271.
- [33] 王玲, 吕新. 基于 DEM 新疆地势起伏度分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(1): 113-116.
- [34] 曹伟超, 陶和平, 孔博等. 基于 DEM 数据分割的西南地区地貌形态自动识别研究[J]. 中国水土保持 SWCC, 2011(3): 38-40.
- [35] A. Kuhni, O. A. Pfiffner. The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure topographic analysis from a 250-m DEM. *Geomorphology*, 2001, 41(4): 285-307.
- [36] 项静恬, 史久恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 4-6.
- [37] K. Ebert, C. Hattestrand, A. M. Hall, et al. DEM identification of macroscale stepped relief in arctic northern Sweden. *Geomorphology*, 2011, 132(3-4): 339-350.