

# 青藏高原东北缘马衔山夷平面特征指标的提取与分析

马振华<sup>1</sup>, 李小苗<sup>1</sup>, 郭本泓<sup>1</sup>, 于 昊<sup>1</sup>, 叶喜艳<sup>1</sup>, 宋春晖<sup>1</sup>, 李吉均<sup>1,2</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

**摘要:** 夷平面研究在地貌演化和新构造运动, 特别是青藏高原隆升过程研究中占有极其重要的地位, 准确界定夷平面分布范围是开展夷平面定量—半定量研究的重要基础。截至目前, 前人利用计算机图像处理技术和目视解译等方法开展了相关工作, 并取得重要研究进展。然而, 以往利用坡度高程指标提取夷平面时存在一定的随意性和主观性。青藏高原内部及其周边地区发育系列夷平面, 其中高原东北缘马衔山地区较好的保存了两级夷平面。被夷平的地层为前寒武系马衔山群混合岩, 山顶面上发育冰缘地貌, 主夷平面波状起伏, 上有岛山和晚新生代沉积, 局部覆盖有40 m左右红粘土和30 m以上更新世黄土, 并在局地残留3 m以上风化壳, 是开展夷平面研究的理想地区。为探讨如何确定提取夷平面的最佳坡度高程指标, 本文基于夷平面的特殊地貌几何形态, 利用均值变点分析法和最小误差法确定了提取夷平面的最佳高程和坡度指标, 并据此对马衔山地区的两级夷平面的分布范围进行提取和统计分析。最后结合剖面线、坡向分布图和区域地质资料探讨了夷平面的构造变形特征。研究发现马衔山地区两级夷平面最佳坡度指标均为12°, 山顶面和主夷平面高程主要分布在3470~3640 m和2670~2870 m; 统计分析表明山顶面面积约为6.4 km<sup>2</sup>, 平均高程为3559 m, 主夷平面面积约为15.5 km<sup>2</sup>, 平均高程为2771 m; 而夷平面的变形特征主要受控于区域断层。

**关键词:** 夷平面; ASTER-GDEM; 均值变点; 马衔山

DOI: 10.11821/dlxb201603004

## 1 引言

夷平面是指由剥蚀和夷平作用所产生的, 以截面形式横切过一切年龄上先于它的地层和构造的一种平缓地形<sup>[1]</sup>, 是地貌长期发展的终极产物经抬升破坏或埋藏的结果<sup>[2]</sup>。夷平面在地貌演化和新构造运动研究中有着极其重要的作用<sup>[2-3]</sup>, 特别是青藏高原隆起过程研究中占有非常重要的地位<sup>[4-6]</sup>。数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM)的出现使夷平面研究由定性进入了定量—半定量化阶段<sup>[7-14]</sup>。准确界定夷平面分布范围是开展夷平面定量—半定量研究的重要基础。

学者们从不同角度, 利用不同方法对夷平面分布范围界定开展了大量研究, 并取得了许多重要研究进展。目前主要有3种夷平面分布范围的提取方法: 一是目视解译法, 基于遥感影像或DEM数据, 通过目视解译手动绘制夷平面的分布范围<sup>[15-17]</sup>; 二是地貌类型自动分类法, 基于计算机图像处理技术, 采取监督分类或者非监督分类的方法, 自动

收稿日期: 2015-11-08; 修订日期: 2015-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330745, 41272128); 国家重点基础研究发展计划项目(973)(2013CB956403)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330745, No.41272128; Major State Basic Research Development Program, No.2013CB956403]

作者简介: 马振华(1990-), 男, 山东沂源人, 硕士, 主要研究方向为地貌演化及GIS在地貌学中的应用。

E-mail: mazhh2013@lzu.edu.cn

划分地貌类型并提取夷平面分布范围<sup>[18]</sup>；三是基于一定地貌因子指标，如高程、坡度、地势起伏度等，自动提取夷平面分布范围，其中高程和坡度组合应用最广<sup>[10-13, 19-25]</sup>。对以上3种方法比较发现，基于高分辨率遥感影像的目视解译法具有最高的准确性，但是对于分布广泛的夷平面来说工作量大，效率最低；地貌类型自动分类法准确性最低，效率居中；地貌因子指标法效率最高，准确性略低于目视解译法。因此对于青藏高原地区广泛分布的夷平面最佳提取方法就是采用地貌因子指标法。但是，目前学者在利用高程坡度指标提取夷平面的研究中，指标确定过程存在一定的随意性和主观性。为继续探讨如何准确提取夷平面，本文以青藏高原东北缘马衔山夷平面为研究对象，针对夷平面特殊的地貌几何形态，利用数理统计学上的均值变点分析法，首先确定山脊线和沟谷线的高程变点，进而确定高程指标，然后利用最小误差法确定坡度指标，最后提取了马衔山地区两级夷平面的分布范围并对其进行了分析研究。

## 2 区域概况

马衔山位于青藏高原东北缘，属祁连山东延陇中盆地中部的余脉（图1a），由两条北西西—南东东走向的山脉组成，北面为兴隆山（主峰海拔3276 m），南面为马衔山（主峰海拔3670 m）。马衔山由四条与山脉走向一致的断裂所控制<sup>[26]</sup>，山体由一套前寒武系马衔山群混合岩所组成，山麓为新生代红层和第四纪沉积物<sup>[27-28]</sup>。

马衔山较好的保存有两级夷平面（图1b）。两级夷平面之间有明显的地形转折且之间没有断层和岩性差异，因此两级夷平面为不同时代的产物，分别对应于青藏高原内部的山顶面和主夷平面<sup>[28]</sup>。山顶面上基岩裸露，第四系松散层不发育，发育有冻胀草丘、融冻泥流、雪蚀洼地等典型现代冰缘地貌，并曾在末次冰盛期发育有小型冰川。主夷平

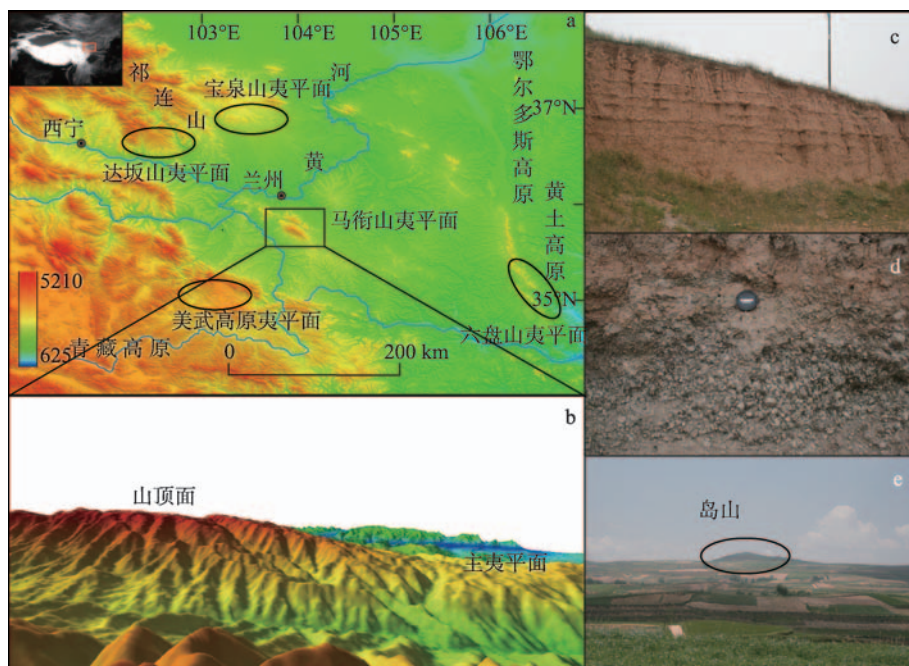


图1 青藏高原东北缘地貌图与马衔山夷平面

Fig. 1 Topographic map of the northeastern Tibetan Plateau and the Maxianshan planation surfaces

面以小水子一带保存最为完好,马衔山群混合岩组成的基岩面有明显的波状起伏,夷平面上普遍分布有厚度不等的风化壳,局部厚达3 m以上(图1d)。基岩或风化壳上覆有红粘土层,其产状基本水平或随基岩呈波状起伏,最厚可达40 m左右。红粘土中有大量成层完好的钙质结核层,并保存有小哺乳动物化石,其岩性与黄土高原广泛分布的红粘土较为类似,推测其年代应为晚中新世—上新世(图1c)。红粘土之上为更新世黄土地层,二者呈不整合接触,黄土层厚度可达30 m以上,黄土层底部呈青灰色和锈黄色,说明早期黄土堆积受到了潜育化作用,可能反应黄土堆积初期夷平面上的潮湿环境。此外,小水子夷平面西北部还保存有通常在湿热条件下形成的岛山,高出周围地形30 m左右,周围有风化碎屑(图1e)。

马衔山夷平面南有以美武高原夷平面为代表的青藏高原夷平面<sup>[14, 18, 29]</sup>,西有以达坂山为代表的祁连山夷平面<sup>[30-32]</sup>,北有宝泉山夷平面,东有六盘山夷平面<sup>[33-35]</sup>以及其东北部保存完好的鄂尔多斯高原夷平面<sup>[32, 36]</sup>(图1a)。由小水子夷平面上红粘土的年代推断,小水子夷平面与青藏高原内部主夷平面和鄂尔多斯高原的唐县期夷平面为同时代产物。因此,马衔山夷平面的存在为证明这些夷平面曾为统一夷平面提供了重要证据。

马衔山夷平面与周围地形多以陡坡相接,在顺山体走向方向上表现为陡坡—主夷平面—陡坡—山顶面的地貌单元组合,在垂直于山体走向方向上表现为陡坡—主夷平面或山顶面的地貌单元组合。夷平面与周围地形反差大,有利于夷平面的识别与提取,是开展夷平面定量—半定量研究的理想地区。

### 3 数据及分析方法

#### 3.1 数据资料

DEM数据是由美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)共同推出的全球数字高程数据,其全称为先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model, ASTER-GDEM)。该数据是根据NASA新一代对地观测卫星Terra的结果制作而成,数据水平误差30 m左右,垂直误差20 m左右。对原始数据投影转换、拼接、裁剪获得研究区数据,经检查区内无数据孔洞,质量良好,完全能满足研究要求。

#### 3.2 研究方法

**3.2.1 高程变点确定高程指标** 马衔山夷平面保存较好,周围地形多以陡坡方式与夷平面相接(图2a),陡坡与夷平面相接处即为夷平面边界,其高程即所求高程指标。进一步观察发现一条典型的山脊或沟谷线纵剖面(以1号山脊线纵剖面为例)是一条“S”型曲线(图2b),并且可以分为由缓变陡(AB段)和由陡变缓(BC段)的两部分,两部分的交点B为曲线斜率最大点即坡度最陡点。可以看出两段曲线都类似指数曲线,对其与夷平面相接的部分拟合发现拟合效果非常好: $Y = -1609.85 \times \exp(-x/221.16) + 2796.50$ ,拟合优度 $R^2$ 达到0.988。陈希孺指出指数模型均可转化为均值变点模型<sup>[37]</sup>。

一般地说,变点就是模型中的某个或某些量起突然变化之点<sup>[38]</sup>。变点理论由Page于1954年提出,20世纪60年代以后由数理统计学家发展起来。变点理论已经广泛应用于各个学科,其中均值变点分析法在地学中已有较多的成功应用,如在水文学中用来进行径流量分期的研究<sup>[39-41]</sup>,在地貌学中主要用来确定最佳统计单元<sup>[42-45]</sup>。

本文中的变点就是地形坡度由陡变缓或者由缓变陡的地形转折点。观察发现,可以确定S型曲线中的两段曲线分别有且只有一个变点。对于有且只有一个变点的均值变点

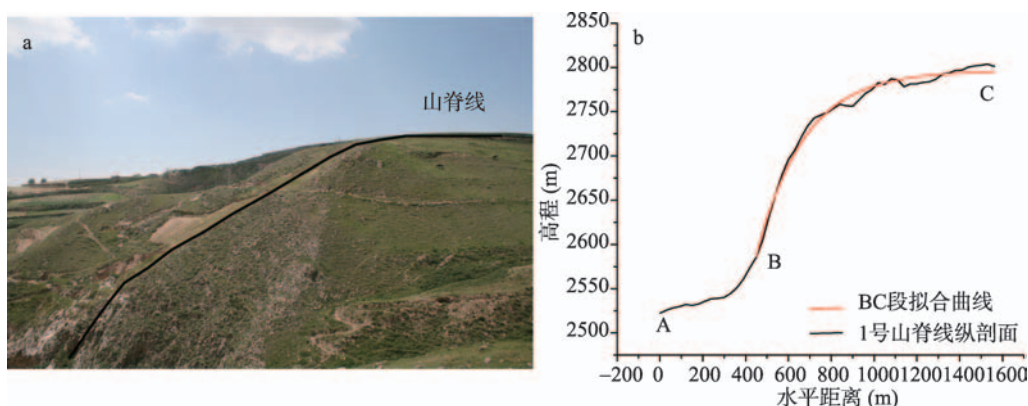


图2 马衔山山脊线纵剖面及其拟合曲线

Fig. 2 Profile of a ridge of Maxianshan and its fitted curve

模型, 最小方差法是确定变点位置最简单有效的方法, 具体过程如下<sup>[46]</sup>:

(1) 记剖面线高程数据为序列  $R_i$ 。  $R_i$  为剖面线各点所对应的高程值;  $i$  为高程点序列号, 由 1 到  $n$ , 水平距离上每 30 m 取一个高程点。

(2) 对序列  $R_i$  取对数, 得到序列  $X_i$ 。

(3) 序列  $X_i$  以  $x_i$  点为界分为两段, 分别计算每段样本的算术平均值  $\bar{x}_{i1}$  和  $\bar{x}_{i2}$ , 以及样本均值  $\bar{x}$ , 有统计量:

$$S_i = \sum_{t1=1}^{i-1} (x_{t1} - \bar{x}_{i1})^2 + \sum_{t2=1}^{i-1} (x_{t2} - \bar{x}_{i2})^2 \quad (1)$$

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

式中:  $S_i$  和  $S$  为均值变点分析法中间计算值;  $t1 = 1, 2, \dots, i-1$ ;  $t2 = i, i+1, \dots, n$ 。

(4) 计算  $S$  与  $S_i$  的差值, 并确定最大值, 最大值所在的点即为变点。由于夷平面本身地形的起伏和后来的构造运动, 使夷平面不可能绝对水平, 因此, 残留夷平面边界在不同位置高程是不一样的, 即仅仅通过一个高程值来确定高程指标是不准确的。提取多条山脊线和沟谷线, 通过计算每条线的变点确定夷平面不同位置的高程指标。由于沟谷为现代侵蚀地形, 相比于山脊与夷平面原始地形的误差更大, 因此, 本文中沟谷线剖面变点仅作为确定夷平面范围的辅助参考点。

**3.2.2 最小误差法确定坡度指标** 变点位置即为夷平面分布的边界, 但是由于适合求取变点的位置有限, 变点是非连续的, 因此需要用其他指标来表示夷平面的范围。夷平面最典型的特征就是地形平缓, 所以小于某个坡度值的坡度分布范围就能够很好的反应夷平面的分布范围, 关键是该坡度值的确定。如前文所述, 该坡度值学者一般根据主观判断来确定, 具有一定的随意性和主观性, 本文利用最小误差法为最佳坡度指标的确定提供了一个定量方法。

以变点位置为夷平面边界的真实位置, 测量各变点到不同坡度边界的最小距离, 该距离即为对应坡度边界与夷平面边界的误差。利用此误差的中数和均值来确定各坡度边界与夷平面边界的整体误差, 最小整体误差所对应的坡度就是最佳坡度。

需要指出的是为了减少夷平面内微地形对提取结果完整性的影响, 在求坡度面之前对 DEM 数据进行了平滑处理。研究中使用  $3 \times 3$  空间均值滤波器对 DEM 数据平滑了 5 次, 试验发现 5 次平滑以后结果基本稳定, 达到了平滑目的。

## 4 结果与分析

### 4.1 高程指标的确定与分析

根据上述高程指标的确定方法,选取了69条典型山脊线剖面 and 59条典型沟谷线剖面共128条剖面线(图3),其拟合效果非常好, $R^2$ 均值为0.957,每组数据均达到统计学要求。求得其变点高程和位置,具体结果见图3和表1及表2。

由计算结果发现,从高程上来看山顶面的高程下限主要分布在3500~3600 m之间,共有39个变点,占总变点数的68.4%;主夷平面的高程下限主要分布在2680~2780 m之间,共有40个变点,占总变点数的56.3%。从空间分布上来看山顶面的高程下限由马衔山主峰3600 m以上沿山脊方向向两侧逐渐降低到3500 m;主夷平面的高程下限分布可分为两个区域,位于夷平面西南部的鸽子岭和黄花岭部分主要在2600~2680 m,其他部分主要分布在2680~2780 m。

### 4.2 坡度指标的确定与分析

根据上述最佳坡度指标确定方法,测量不同坡度( $7^{\circ}$ ~ $18^{\circ}$ )分布图边界与各变点(两级夷平面标准点均为34个)的最小距离,即与夷平面边界的误差。统计不同坡度情况下误差的均值和中位数(表3)。由于误差存在个别极端值,因此,中数值更能代表数据的整体情况,以中数为主、均值为辅判断整体数据的最小误差。

对于山顶面而言最小中数所对应的坡度为 $12^{\circ}$ 和 $13^{\circ}$ ,而两者中 $12^{\circ}$ 的误差均值更小(表3),因此 $12^{\circ}$ 边界与山顶面边界的误差最小,即 $12^{\circ}$ 为提取山顶面的最佳坡度指标。对于主夷平面而言最小中数和均值所对应的坡度均为 $12^{\circ}$ ,因此 $12^{\circ}$ 边界与主夷平面边界的误差最小,即 $12^{\circ}$ 为提取主夷平面的最佳坡度指标。所以,马衔山地区提取山顶面和主夷平面两级夷平面的最佳坡度指标均为 $12^{\circ}$ 。前人在利用高程和坡度指标提取夷平面过程中,所利用的坡度指标最小为 $4^{\circ}$ ,最大为 $17^{\circ}$ ,大多在 $10^{\circ}$ 左右<sup>[10-13, 19-25]</sup>,以前人所用坡度指标来看, $12^{\circ}$ 也是一个比较适中的结果,侧面印证了该方法的有效性。

### 4.3 夷平面的提取与分析

根据马衔山夷平面的地形特点和上述坡度、高程指标的确定,本文最终确定了马衔山地区夷平面提取的4个指标:

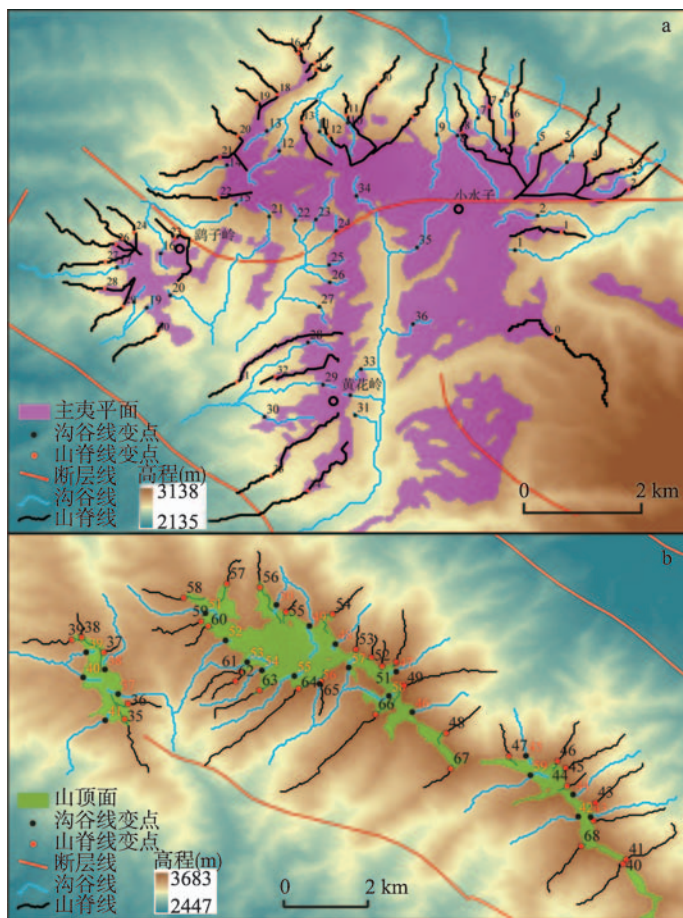


图3 马衔山剖面线和变点位置

Fig. 3 The location of profiles and change points of Maxianshan

表1 马衔山山脊线剖面变点  
Tab. 1 Change points of ridges of Maxianshan

| 编号 | 变点高程(m) | 编号 | 变点高程(m) | 编号 | 变点高程(m) | 编号 | 变点高程(m) |
|----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|
| 0  | 2830    | 18 | 2771    | 36 | 3493    | 54 | 3534    |
| 1  | 2747    | 19 | 2778    | 37 | 3487    | 55 | 3567    |
| 2  | 2703    | 20 | 2804    | 38 | 3478    | 56 | 3501    |
| 3  | 2677    | 21 | 2840    | 39 | 3478    | 57 | 3511    |
| 4  | 2715    | 22 | 2825    | 40 | 3539    | 58 | 3513    |
| 5  | 2699    | 23 | 2648    | 41 | 3547    | 59 | 3548    |
| 6  | 2690    | 24 | 2648    | 42 | 3594    | 60 | 3549    |
| 7  | 2666    | 25 | 2651    | 43 | 3595    | 61 | 3543    |
| 8  | 2727    | 26 | 2664    | 44 | 3594    | 62 | 3508    |
| 9  | 2731    | 27 | 2621    | 45 | 3584    | 63 | 3547    |
| 10 | 2697    | 28 | 2635    | 46 | 3576    | 64 | 3601    |
| 11 | 2755    | 29 | 2651    | 47 | 3491    | 65 | 3601    |
| 12 | 2773    | 30 | 2618    | 48 | 3557    | 66 | 3622    |
| 13 | 2748    | 31 | 2596    | 49 | 3665    | 67 | 3585    |
| 14 | 2715    | 32 | 2647    | 50 | 3612    | 68 | 3587    |
| 15 | 2703    | 33 | 2601    | 51 | 3628    |    |         |
| 16 | 2691    | 34 | 2651    | 52 | 3593    |    |         |
| 17 | 2701    | 35 | 3482    | 53 | 3587    |    |         |

表2 马衔山沟谷线剖面变点  
Tab. 2 Change points of valleys of Maxianshan

| 编号 | 变点高程(m) | 编号 | 变点高程(m) | 编号 | 变点高程(m) | 编号 | 变点高程(m) |
|----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|
| 1  | 2745    | 16 | 2640    | 31 | 2694    | 46 | 3588    |
| 2  | 2732    | 17 | 2629    | 32 | 2735    | 47 | 3599    |
| 3  | 2633    | 18 | 2638    | 33 | 2686    | 48 | 3564    |
| 4  | 2727    | 19 | 2624    | 34 | 2811    | 49 | 3530    |
| 5  | 2709    | 20 | 2637    | 35 | 2752    | 50 | 3531    |
| 6  | 2610    | 21 | 2783    | 36 | 2721    | 51 | 3512    |
| 7  | 2661    | 22 | 2775    | 37 | 3495    | 52 | 3539    |
| 8  | 2725    | 23 | 2758    | 38 | 3509    | 53 | 3545    |
| 9  | 2699    | 24 | 2765    | 39 | 3453    | 54 | 3560    |
| 10 | 2770    | 25 | 2748    | 40 | 3464    | 55 | 3595    |
| 11 | 2749    | 26 | 2723    | 41 | 3443    | 56 | 3588    |
| 12 | 2765    | 27 | 2688    | 42 | 3570    | 57 | 3559    |
| 13 | 2759    | 28 | 2694    | 43 | 3580    | 58 | 3634    |
| 14 | 2825    | 29 | 2701    | 44 | 3572    | 59 | 3537    |
| 15 | 2819    | 30 | 2581    | 45 | 3482    |    |         |

表3 马衔山各坡度边界与夷平面边界误差  
Tab. 3 Errors between slope borders and planation surfaces of Maxianshan

| 位置   | 坡度(°) | 7   | 8   | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14  | 15  | 16   | 17  | 18  |
|------|-------|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|------|-----|-----|
| 山顶面  | 中数(m) | 59  | 53  | 47 | 48 | 38 | 30 | 30 | 51  | 50  | 73   | 75  | 106 |
|      | 均值(m) | 63  | 56  | 55 | 61 | 81 | 83 | 86 | 111 | 114 | 122  | 125 | 135 |
| 主夷平面 | 中数(m) | 91  | 68  | 65 | 58 | 52 | 40 | 47 | 51  | 45  | 49   | 49  | 86  |
|      | 均值(m) | 121 | 101 | 87 | 72 | 70 | 62 | 67 | 75  | 73  | 78.0 | 81  | 102 |

(1) 区位指标: 夷平面位于现代水系的上部, 主要位于山顶面或现代水系的分水岭, 利用该指标首先确定夷平面分布的大概位置;

(2) 高程指标: 夷平面边界在不同位置的高程是不一样的, 不能确定单一指标, 不同位置的变点高程就是该位置夷平面边界的高程指标。其中0号变点为主夷平面与其上一级地貌单元的界线位置, 其他变点均为山顶面和主夷平面与其下一级地貌单元的界线位置;

(3) 坡度指标: 根据不同坡度边界与夷平面边界最小误差确定了两级夷平面的最佳统计坡度均为 $12^{\circ}$ ;

(4) 面积指标: 由于研究区范围较小, 本文将 $0.1 \text{ km}^2$ 作为夷平面的下限面积指标, 并且当两夷平面斑块之间最小距离小于 $200 \text{ m}$ 时, 视其为同一个斑块;

根据以上4个指标, 利用ArcGIS10.0软件提取了马衔山地区的夷平面分布情况(图4)。

为检验本文提取夷平面分布范围的可靠性, 对提取结果与基于高分辨率遥感影像的目视解译结果进行比较。随着遥感技术的不断发展, 米级、亚米级遥感影像的广泛应用, 基于高分辨率遥感影像的目视解译结果经常被用来检验地貌线或地貌面提取结果精度<sup>[47-49]</sup>。利用谷歌地球高分辨率影像资料(分辨率 $1.5 \text{ m}$ ), 采用目视解译的方法手工绘制夷平面分布范围, 并将其作为相对真值。指标法提取夷平面总面积为 $21.936 \text{ km}^2$ , 目视解译夷平面总面积为 $21.317 \text{ km}^2$ , 两者绝对面积偏差 $0.619 \text{ km}^2$ , 相对误差为 $2.82\%$ 。并且通过对比两者分布界线可以看出结果基本一致, 但在局部细节上存在微小差异(图4)。考虑到本文所用DEM数据分辨率仅为 $30 \text{ m}$ , 以上误差是在可信范围内的。再结合野外实际考察验证结果, 可以确定本文的提取结果是可靠的。

对夷平面提取结果统计分析发现, 山顶面全部分布在马衔山中部和东部的山脊地带, 其中以主峰附近保存最为完整, 主峰两侧呈带状分布, 总面积 $6.41 \text{ km}^2$ , 其高程主要分布在 $3470\sim 3640 \text{ m}$ , 平均高程为 $3559 \text{ m}$ ; 主夷平面在马衔山西段的小水子一带保存最为完整, 在兴隆山东段有零星分布, 总面积 $15.52 \text{ km}^2$ , 其高程主要分布在 $2670\sim 2870 \text{ m}$ , 平均高程为 $2771 \text{ m}$ 。两级夷平面的平均高差为 $788 \text{ m}$ , 可见在二级夷平面形成之前, 马衔山就是高出周围地形至少 $788 \text{ m}$ 的山地。

#### 4.4 夷平面的变形

马衔山在大地构造上属于祁连山褶皱系的秦祁中间隆起带东南端部分, 加里东构造运动形成了马衔山复式向斜和与其平行展布的断裂构造, 奠定了马衔山山体的构造轮廓<sup>[27]</sup>。中新世早期, 在喜马拉雅运动作用下山顶面停止发育并解体, 马衔山隆起<sup>[29, 50]</sup>; 喜马拉雅运动之后为一长期构造稳定时期, 夷平作用持续进行, 至中

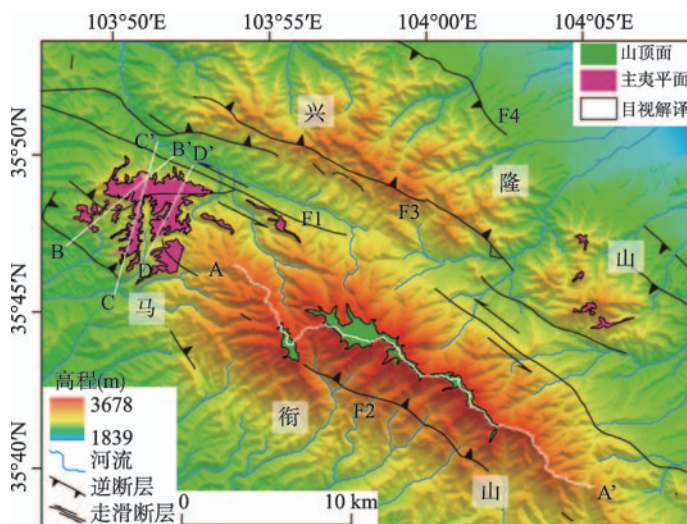


图4 马衔山夷平面分布及剖面线位置

(F1=马衔山北缘断裂, F2=马衔山南缘断裂, F3=兴隆山南缘断裂, F4=兴隆山北缘断裂)

Fig.4 The distribution of Maxianshan planation surfaces and the location of profiles (F1 = Northern marginal fault of Maxianshan, F2 = Southern marginal fault of Maxianshan, F3 = Southern marginal fault of Xinglongshan, F4 = Northern marginal fault of Xinglongshan)

新世晚期, 马衔山主夷平面与南北两侧的临夏盆地和兰州盆地已趋于平坦的统一的广阔地面, 山顶面成为相对海拔大于788 m的山地, 8 Ma BP左右在青藏运动序幕的作用下主夷平面解体, 马衔山轻微隆升, 并在3.6 Ma BP以后大幅度隆升, 形成现代地貌格局<sup>[27, 50]</sup>。马衔山晚新生代以来活跃的新构造运动, 使马衔山和兴隆山南北缘分别发育了4条断裂: 马衔山北缘断裂(F1)、马衔山南缘断裂(F2), 兴隆山南缘断裂(F3)和兴隆山北缘断裂(F4)(图4)。其中, 马衔山北缘断裂是规模最大、活动性最强的一条区域性活动断裂, 另外3条是其伴生断裂, 断裂早期具有挤压逆冲特性, 马衔山和兴隆山以断块形式大幅度抬升, 大约中更新世以来断裂活动以左旋走滑为主兼具倾滑运动分量<sup>[26, 51]</sup>。

晚新生代以来马衔山地区活跃的构造运动使两级夷平面均发生了变形。沿马衔山山脊做一条贯穿山顶面的剖面AA', 从东至西做3条横切主夷平面的剖面BB'、CC'和DD'(图4, 图5)。分析发现山顶面略呈弧形, 中间达3600 m以上, 两端降低至3500 m左右, 这可能与后期的构造挤压作用和山体的不均匀抬升有关; 由于主夷平面内部存在一条逆断层, 夷平面被错断成南北两部分, 且北高南低, 垂直断距由西向东逐渐减小, 西端可达100 m以上, 东段不明显。

通过对夷平面坡向的分析, 可以获得其总体倾斜趋势。提取两级夷平面坡向数据, 并作坡向分布图(图6)。可见两级夷平面坡向均集中于西南方向, 夷平面具有总体向西南倾斜的趋势。该方向基本垂直于山体走向和控制断层走向, 夷平面北侧的马衔山北缘断裂为区域内主断裂, 而南侧的马衔山南缘断裂为次级断裂<sup>[51]</sup>, 所以, 夷平面的总体倾斜趋势可能受夷平面南北两侧断裂控制。

## 5 结论

青藏高原东北缘马衔山地区保存有主夷平面和山顶面两级夷平面, 是晚新生代青藏

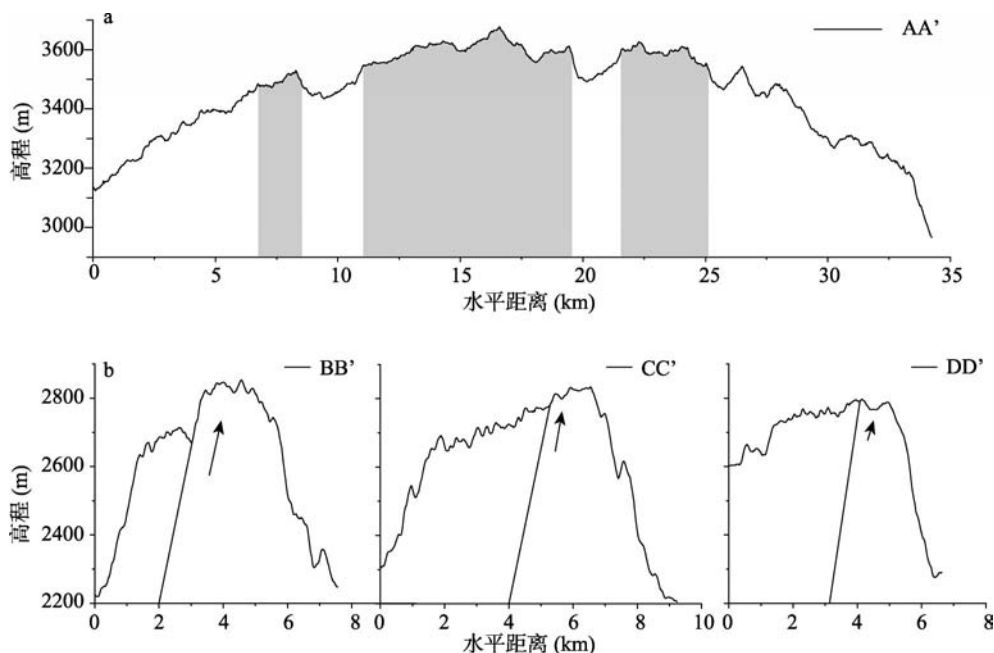


图5 马衔山夷平面剖面图(a. 阴影部分为山顶面位置; b. 主夷平面剖面)

Fig. 5 Profiles of Maxianshan planation surfaces (a. Profile of the summit surface; b. Profiles of the main surface)

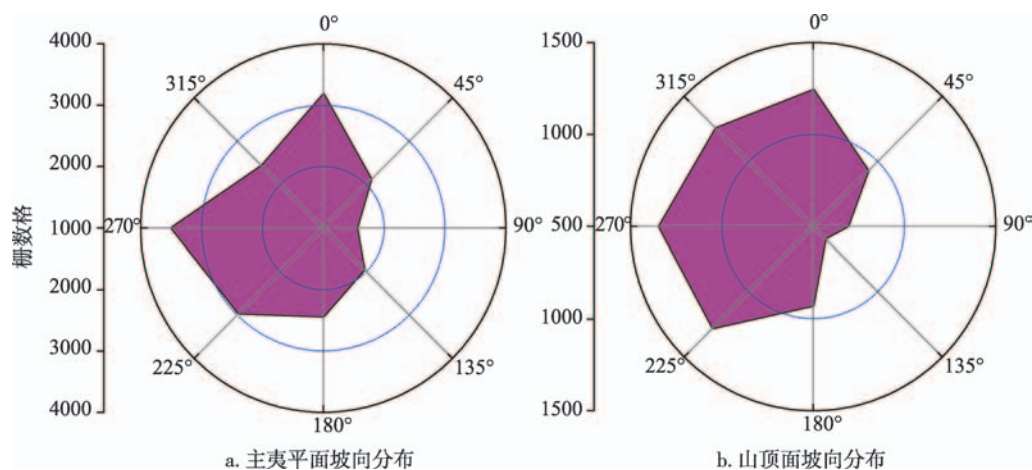


图6 马衔山夷平面坡向分布

Fig. 6 Aspect distribution of Maxianshan planation surfaces

高原大幅度隆升的重要证据。主夷平面上普遍分布风化壳、红粘土和黄土,并保存有小哺乳动物化石,这为夷平面年代测定和古环境恢复等研究提供了不可多得的材料。

基于马衔山地区特殊的“S”型地貌几何形态,以均值变点法和最小误差法确定了最佳高程和坡度指标,然后提取了马衔山地区夷平面分布范围。研究表明,马衔山地区两级夷平面最佳坡度指标均为 $12^{\circ}$ 。 $12^{\circ}$ 是否可以成为所有地区夷平面的最佳坡度指标还需要在更多的地区展开试验。

两级夷平面在隆升抬起过程中的变形,主要受控于区内断裂。小水子主夷平面内部存在一条东西向逆断裂,使其南北两侧夷平面出现高差变形;两级夷平面整体向西南方向倾斜变形趋势,是由于山体南北两侧断裂差异活动造成。

## 参考文献(References)

- [1] Xu Shuying. The cause of formation, age and deformation of planation. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1963(2): 96-106. [徐叔鹰. 论夷平面的成因、年龄与变形. 兰州大学学报(自然科学版), 1963(2): 96-106.]
- [2] Pan Baotian, Gao Hongshan, Li Jijun. On problems of planation surface—a discussion on the planation surface in Qinghai-Xizang Plateau. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(5): 520-526. [潘保田, 高红山, 李吉均. 关于夷平面的科学问题: 兼论青藏高原夷平面. 地理科学, 2002, 22(5): 520-526.]
- [3] Ollier C, Pain C. The Origin of Mountains. Landon and New York: Routledge, 2000: 227-241.
- [4] Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, et al. A discussion on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau. Scientia Sinica, 1979(6): 608-616. [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. 中国科学, 1979(6): 608-616.]
- [5] Pan Baotian, Li Jijun, Li Bingyuan. Discussion on evidences for surface uplift of the Tibetan Plateau. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2000, 36(3): 100-111. [潘保田, 李吉均, 李炳元. 青藏高原地面抬升证据讨论. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, 36(3): 100-111.]
- [6] Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area. Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 381-391. [李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381-391.]
- [7] Abbott L D, Sliver E A, Anderson R S, et al. Measurement of tectonic surface uplift rate in a young collisional mountain belt. Nature, 1997, 385: 501-507.
- [8] Johansson M. Analysis of digital elevation data for palaeosurfaces in south-western Sweden. Geomorphology, 1999, 26: 279-295.
- [9] McMillan M E. Basin fill, erosion surfaces and tilted markers: Evidence of late Cenozoic tectonic uplift of the Rocky Mountain orogenic plateau [D]. University of Wyoming, 2003.

- [10] Steer P, Huismans R S, Valla P G, et al. Bimodal Plio-Quaternary glacial erosion of fjords and low-relief surfaces in Scandinavia. *Nature Geoscience*, 2012, 5(9): 635-639.
- [11] Babault J, Driessche J V, Bonnet S. Origin of the highly elevated Pyrenean peneplain. *Tectonics*, 2005, 24(2): 1-19.
- [12] Bonow J M, Japson P, Bergstrom K L, et al. Cenozoic uplift of Nuussuaq and Disko, West Greenland-elevated erosion surfaces as uplift markers of a passive margin. *Geomorphology*, 2006, 80: 325-337.
- [13] Small E E, Anderson R S. Pleistocene relief production in Laramide mountain ranges, western United States. *Geology*, 1998, 26(2): 123-126.
- [14] Wang Yixiang, Liu Yong, Pan Baotian. A preliminary approach on the generation, display and analysis of digital terrain model of planation surface: Taking Meiwu Plateau as an example. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14(1): 59-64. [王义祥, 刘勇, 潘保田. 夷平面数字地形模型的生成、显示与分析初探: 以美武高原为例. 遥感技术与应用, 1999, 14(1): 59-64.]
- [15] Lease R O, Ehlers T A. Incision into the Eastern Andean Plateau during Pliocene cooling. *Science*, 2013, 341: 774-776.
- [16] Strobl M, Hetzel R, Niedermann S, et al. Landscape evolution of a bedrock peneplain on the southern Tibetan Plateau revealed by in situ-produced cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$ . *Geomorphology*, 2012, 134: 192-204.
- [17] Li Hui, Huang Xuya, Deng Qinglu, et al. Mapping of planation surfaces in the southwest region of Hubei Province, China: Using the DEM-derived painted relief model. *Journal of Earth Science*, 2012, 23(5): 719-730.
- [18] Liu Yong, Wang Yixiang, Pan Baotian. A preliminary approach on the 3D presentation and quantitative analysis of planation surface. *Geographical Research*, 1999, 18(4): 59-64. [刘勇, 王义祥, 潘保田. 夷平面的三维显示与定量分析方法初探. 地理研究, 1999, 18(4): 59-64.]
- [19] Wang Yixiang. The digital terrain analysis and uplift mechanism of Qilian Mountains based on GIS [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. [王义祥. 基于地理信息系统的祁连山地区数字地形分析和隆升机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.]
- [20] Beek P V, Melle J V, Guillot S, et al. Eocene Tibetan plateau remnants preserved in the northwest Himalaya. *Nature Geoscience*, 2009, 2(5): 364-368.
- [21] Malik S. Preparation of geomorphological map and their characterization with the help of remote sensing and GIS: A case study of Sankha Nadi drainage basin. *Journal of Environment and Earth Science*, 2014, 4(5): 35-44.
- [22] Clark M K, Royden L H, Whipple K X, et al. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(3): 1-23.
- [23] Calvet M, Yanni Gunnell, Bernard Farines. Flat-topped mountain ranges: Their global distribution and value for understanding the evolution of mountain topography. *Geomorphology*, 2015, 241: 255-291.
- [24] Munroe J S. Investigating the spatial distribution of summit flats in the Uinta Mountains of northeastern Utah, USA. *Geomorphology*, 2006, 75: 437-449.
- [25] Yang R, Willett S D, Goren L. In situ low-relief landscape formation as a result of river network disruption. *Nature*, 2015, 520: 526-529.
- [26] Yuan Daoyang. The active tectonic framework and deformation features in Lanzhou Basin [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2007. [袁道阳. 兰州盆地活动构造格架与变形特征[D]. 中国地震局地球物理研究所, 2007.]
- [27] Li Zhiqiang, Liu Qianhe, Song Baojian, et al. Geomorphic features and types of Xinglong Mountains. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1990, 25(3): 303-312. [李志强, 刘谦和, 宋宝健, 等. 兴隆山地貌特征及地貌类型划分. 甘肃农业大学学报, 1990, 25(3): 303-312.]
- [28] Liu Yong. Late Quaternary glaciers and environment of Maxianshan and its contiguous mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1989. [刘勇. 马衔山及毗邻山地晚第四纪冰川与环境[D]. 兰州: 兰州大学, 1989.]
- [29] Li Jijun. Uplift of the Tibetan Plateau and Asia Environmental Evolution. Beijing: Science Press, 2006: 65-70. [李吉均. 青藏高原隆升与亚洲环境演变. 北京: 科学出版社, 2006: 65-70.]
- [30] CAS Earth Science Division. The Records of the First Symposium about Neotectonism in CAS. Beijing: Science Press, 1957: 14. [中国科学院地学部. 中国科学院第一次新构造运动座谈会发言记录. 北京: 科学出版社, 1957: 14.]
- [31] Wang Deji. Pediment in the eastern part of the Qilian Mountains. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1983, 19(3): 108-114. [王德基. 祁连山东段的古剥蚀面. 兰州大学学报(自然科学版), 1983, 19(3): 108-114.]
- [32] Li Jijun. In memory of Davisian theory of erosion cycle and peneplain a centurial study in China. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1999, 35(3): 157-163. [李吉均. 纪念戴维斯侵蚀循环、准平原学说诞生一百周年. 兰州大学学报(自然科学版), 1999, 35(3): 157-163.]
- [33] Li Yulong, Hou Zhenqing, Kang Zhemmin. Seismic zoning of Shaanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai Province in Northwest China. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1986: 86. [李玉龙, 侯珍清, 康哲民. 中国西北陕甘宁青

- 地震区划. 兰州: 甘肃人民出版社, 1986: 86.]
- [34] Song Yougui, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Discussion on the uplifting process of Liupanshan in Late Cenozoic time. *Science in China (Series D)*, 2001, 31: 142-148. [宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 晚新生代六盘山隆升过程初探. *中国科学(D辑)*, 2001, 31: 142-148.]
- [35] Song Yougui, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Age of red clay at Chaona section near eastern Liupan Mountain and its tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(5): 457-463. [宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 六盘山东麓朝那剖面红粘土年代及其构造意义. *第四纪研究*, 2000, 20(5): 457-463.]
- [36] Pan Baotian, Hu Zhenbo, Wang Junping, et al. The approximate age of the planation surface and the incision of the Yellow River. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 356-357: 54-61.
- [37] Chen Xiru. Brief introduction for the change point statistic analysis (III). *Journal of Applied Statistics and Management*, 1991, 20(3): 52-59. [陈希孺. 变点统计分析简介(III): 极大似然法、累计次数法、Bayes法. *数理统计与管理*, 1991, 20(3): 52-59.]
- [38] Chen Xiru. Brief introduction for the change point statistic analysis (I). *Journal of Applied Statistics and management*, 1991, 20(2): 55-58. [陈希孺. 变点统计分析简介(I). *数理统计与管理*, 1991, 20(2): 55-58.]
- [39] Liu Pan, Guo Shenglian, Wang Caijun, et al. Flood season staged for Three Gorges Reservoir based on the change-point approach. *Hydrology*, 2005, 25(1): 27-31. [刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库汛期分期的变点分析方法研究. *水文*, 2005, 25(1): 27-31.]
- [40] Tu Xinjun, Chen Xiaohong, Zhang Qiang. Spatial-temporal variability patterns of regional runoffs series and their root cause analysis, Guangdong Province. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1): 104-111. [涂新军, 陈晓宏, 张强. 区域河川径流量时空变异特征及成因分析: 以广东省为例. *湖泊科学*, 2011, 23(1): 104-111.]
- [41] Tu Xinjun, Chen Xiaohong. Characteristics variability study of regional river runoff time series based on change point recognition. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1930-1937. [涂新军, 陈晓宏. 基于变点识别的区域河川径流量特征变异研究. *自然资源学报*, 2010, 25(11): 1930-1937.]
- [42] Zhang Jun, Li Xiaodong, Chen Chunyan, et al. Analysis of the relief amplitude in Xinjiang. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2008, 44: 10-19. [张军, 李晓东, 陈春艳, 等. 新疆地势起伏度的分析研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2008, 44: 10-19.]
- [43] Han Haihui, Gao Ting, Yi Huan, et al. Extraction of relief amplitude based on change point method: A case study on the Tibetan Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(1): 101-104. [韩海辉, 高婷, 易欢, 等. 基于变点分析法提取地势起伏度: 以青藏高原为例. *地理科学*, 2012, 32(1): 101-104.]
- [44] Chang Zhiyang, Wang Jian, Bai Shibiao, et al. Determination of accumulation area based on the method of applying mean of change point analysis. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 37(1): 147-150. [常直杨, 王建, 白世彪, 等. 均值变点分析法在最佳集水面积阈值确定中的应用. *南京师大学报(自然科学版)*, 2014, 37(1): 147-150.]
- [45] Fan Jianrong, Zhang Ziyu, Li Lihua. Mountain demarcation and mountainous area divisions of Sichuan Province. *Geographical Research*, 2015, 34(1): 65-73. [范建容, 张子瑜, 李立华. 四川省山地类型界定与山区类型划分. *地理研究*, 2015, 34(1): 65-73.]
- [46] Xiang Jingtian, Shi Jiuen. *The Statistical Method of Data Processing in Nonlinear System*. Beijing: Science Press, 1997: 1-14. [项静恬, 史久恩. *非线性系统中数据处理的统计方法*. 北京: 科学出版社, 1997: 1-14.]
- [47] Xiao Chenchao. DEM based investigation of loess shoulder-line [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007. [肖晨超. 基于DEM的黄土沟沿线特征研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2007.]
- [48] Yan Shijiang, Tang Guoan, Li Fayuan, et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from Grid DEM. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 363-367. [晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用DEM边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(3): 363-367.]
- [49] Zhou Yi, Tang Guoan, Xi Yu, et al. A shoulder-lines connection algorithm using improved Snake Model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(1): 82-85. [周毅, 汤国安, 习羽, 等. 引入改进Snake模型的黄土地形沟沿线连接算法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(1): 82-85.]
- [50] Li Jijun, Zhou Shangzhe, Zhao Zhijun, et al. The Qingzang Movement: The major uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(10): 1597-1608. [李吉均, 周尚哲, 赵志军, 等. 论青藏运动主幕. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(10): 1597-1608.]
- [51] Yuan Daoyang, Liu Xiaofeng, Zheng Wenjun, et al. Tectonic deformation feature and mechanism of the Maxianshan-Xinglongshan active fault system in the Lanzhou area. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(2): 125-131. [袁道阳, 刘小凤, 郑文俊, 等. 兰州马衔山—兴隆山活动断裂系的构造变性特征和机制. *中国地震*, 2003, 19(2): 125-131.]

## Extraction and analysis of Maxianshan planation surfaces in northeastern margin of the Tibetan Plateau

MA Zhenhua<sup>1</sup>, LI Xiaomiao<sup>1</sup>, GUO Benhong<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1</sup>, YE Xiyan<sup>1</sup>,  
SONG Chunhui<sup>1</sup>, LI Jijun<sup>1,2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems & College of Earth and  
Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Planation surfaces not only play a major role in revealing the geomorphological evolution, but also shed lights on the regional tectonic activities, especially in the fields of Tibetan Plateau uplift. Before we explain their tectonic significance, the critical step is to quantitatively or semi-quantitatively obtain the exact features of planation surfaces, such as their distribution, altitude and area. Till now, much progress has been achieved in extracting the planation surface characters via computer image processing and visual interpretation, but there is still some subjective and random when we choose the index of slope and elevation to extract the information of planation surfaces. Two extensive planation surfaces (the Summit and the Main surface) remain in the inner part of the Tibetan Plateau and its surrounding region. For example, in the Maxianshan mountains of NE Tibetan Plateau, two planation surfaces are identified as the Summit and Main surfaces of Tibet. Some typical periglacial landforms can be observed on the Summit surface, and the Main surface is characterized by the undulating flat topography and several monadnocks and covered by the red clay of 40 m in thickness and loess of 30 m in thickness. In addition, the weathered regolith of granite rocks reaches 3 m thick in some regions. Hence, the Maxianshan mountains are the ideal area for studies on the planation surface. In detail, ridge and valley profiles present the "S"-shaped curve based on our observation, and they are explained by the exponential model which can transform to the mean change point model. In order to obtain the exact altitude and slope parameters of Maxianshan planation surfaces, we chose the mean change point theory and the minimum error method to extract them. Our results show that the best slope parameter of both planation surfaces is 12°. Its reliability is also demonstrated by contrasting the results between our method, visual interpretation and field validation. Subsequently, the distribution and area of planation surfaces were extracted and analyzed. Statistical analyses suggest that the Summit surface covers a total area of about 6.4 km<sup>2</sup>, with an average elevation of 3559 m and the Main surface has a total area of about 15.5 km<sup>2</sup>, with an average elevation of 2771 m. Furthermore, we evaluate the deformation characters of the planation surfaces after integration of the slope profiles, slope aspect distribution and regional geology data. The conclusion supports that the deformation of Maxianshan planation surfaces is controlled by regional faults.

**Keywords:** planation surface; ASTER-GDEM; mean value change point; Maxianshan