

文章编号: 1000-0585(1999)04-0391-09

# 夷平面的三维显示与定量分析方法初探\*

刘 勇, 王义祥, 潘保田

(兰州大学地理科学系, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 夷平面是当代地貌学研究的一个重要课题之一, 对于重建一个地区的地貌演化的历史具有重要的意义。文中利用遥感与地理信息系统技术, 建立了位于兰州以南、青藏高原东北部边缘的美武高原数字高程模型, 并与陆地卫星影像结合起来进行集成分析, 论述了美武高原三维地貌影像图的信息特点, 提取了若干区段的地形剖面, 进而在分析了高原夷平面地貌参数体系的基础上运用遥感图像监督分类技术自动提取出高原夷平面的具体分布区域, 揭示了此项技术对于夷平面分析的巨大潜力。

关键词: 夷平面; 数字高程模型; 青藏高原; 三维地貌影像图; 监督分类  
中图分类号: P931.2; TP75 文献标识码: A

## 1 前言

夷平面的问题无疑是当代地貌学中最重要的基本理论问题之一<sup>[1]</sup>。自从 W. M. Davis 提出准平原的概念以来, 人们在除南极以外的大陆上都找到了关于夷平面存在的证据。并且, 夷平面普遍被认为是一个地区长期构造稳定的产物, 而夷平面的解体则指示着强烈的构造隆升。深入研究夷平面的分级、分布高度、范围及其形态特征, 对于重建地貌演化过程具有十分重要的意义。关于夷平面形成的时代及成因机制都进行了广泛的探讨<sup>[2~4]</sup>。但是如何准确地描述夷平面的形态特征和分布区域, 则是目前尚未解决好的一个问题。用传统的地质学方法, 如素描法或在地图上勾绘夷平面轮廓的方法, 往往显得主观任意性较大, 难以做到客观、准确和定量分析。

夷平面通常分布在山地的顶部, 其形态特征与周围地形条件有着密切的关系, 只有在三维的地理空间中方能准确地描述、展示和分析夷平面及其相关特征。最近几年来, 随着计算机图形学与图像处理技术的迅猛发展, 特别是地理信息系统和数字地形模型研究方法的日趋成熟, 为夷平面的三维显示和定量分析提供了强有力的支持。D. R. Butler 等运用陆地卫星 TM 数据和数字地形模型生成的三维地貌影像图对美国蒙大拿州国家冰川公园的冰雪灾害进行了分析<sup>[5]</sup>。

\* 参加此项工作的人员还有: 邬光剑、张炳智, 在此致以诚挚的谢意。

收稿日期: 1998-11-07; 修订日期: 1999-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49771015 和 49301004)

作者简介: 刘勇 (1964-), 男, 甘肃清水县人, 副教授。1989 年于兰州大学地理系获学士学位, 现在中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室在职攻读博士学位, 主要从事资源与环境信息系统、寒区地貌研究。

基于地理信息系统与遥感技术进行地貌定量化的分析和水文-地貌过程建模,在近几年也已取得长足的进展。P. T. Giles 等利用数字地形模型与遥感数据研究了坡地单元自动分类的方法<sup>[6]</sup>, I. V. Florinsky 通过对数字地形模型中曲率的计算,研究了线性地质构造的自动提取和识别方法<sup>[7]</sup>, Y. Tachikawa 等利用 TIN-DEM 数据结构建立了流域地貌信息系统,在此基础上研究了分布式降水-径流水文模型<sup>[8]</sup>, J. A. Milne 等探讨了河床形态建模问题,提出了在数字地形模型基础上研究河流蚀积过程和河床动态变化的方法<sup>[9]</sup>, I. V. Florinsky 系统地研究了利用数字地形模型和遥感影像数据进行地貌分析的方法<sup>[10]</sup>。本文拟借鉴上述研究成果,对位于甘肃南部的美武高原夷平面进行定量分析和综合研究。

## 2 研究区概况

美武高原位于甘肃南部,南距兰州约 120 km,具体地理坐标约为 103°00' E 34°50' N ~ 103°20' E 35°20' N 之间,北侧以太子山与临夏黄土高原相隔,行政上隶属甘肃省夏河县管辖(图 1)。

美武高原在地质构造上属秦岭山脉的西延部分,岩性组成十分复杂。从其北部边缘向南依次排列着第四系黄土和上新统临夏组砂岩、砾岩和泥岩,主体部分为二迭系和石炭系灰岩、砂岩、页岩,穿插着燕山运动早期和海西运动晚期的侵入岩体,并在局部覆盖着第三系红色砂岩、砾岩。美武高原南北两侧分别有三组以上的逆掩断层排布,呈北西西走向。高原主体位于一长达 50 km 以上的背斜的轴部,其走向与该地区断层带走向一致。

美武高原在地貌上又属于青藏高原的一部分,海拔高度一般在 3 500 m 以上,北部分别以太子山、猪咀山、平顶山、黄花岭为屏,与陇西黄土高原为邻。无论从地质、地貌、植被、土壤、水文各方面看都呈现显著的差异。母太子山是最高的边缘山峰,达到 4 368 m。美武高原同时也是黄河的两个一级支流——洮河和大夏河的分水岭。从美武高原上发育的河流分别向东、向西汇入这两条河流。

高原上的植被主要是以紫花针茅为建群种的高寒草原,沟谷中分布着以山柳、杜鹃、锦鸡儿为主的亚高山灌丛、灌丛草甸植被,是周围地区比较理想的天然牧场。

## 3 三维地貌影像图

三维地貌影像图是地理信息系统与遥感图像处理技术综合集成的产物。研究三维地貌影像图是通过对数字地形模型(DTM)和遥感图像数据进行处理和综合分析,生成具有三维视觉的地貌影像,并在此基础上进行地貌特征、分布规律以及地貌发育的研究。

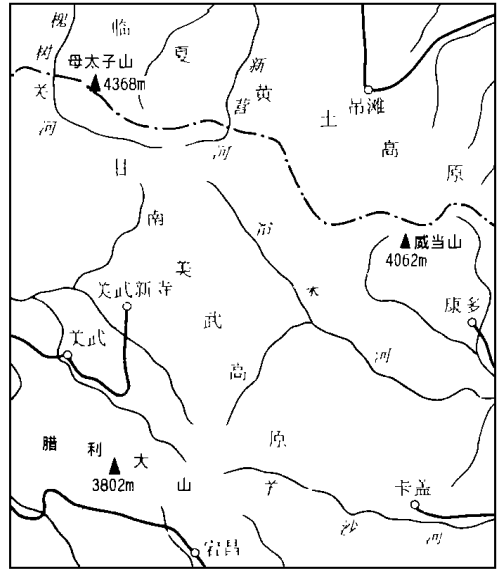


图 1 美武高原区域概图

Fig. 1 Sketch map of the Meiwu Plateau area

### 3.1 工作条件

制作三维地貌影像图, 对计算机系统的性能要求较高, 在 90 年代中期以前主要是在 RISC 图形工作站上进行的。随着 Intel Pentium 系列 CPU 的广泛应用、计算机硬件性能/价格比的大幅度提高, 以及 MS Windows 95 及其后继产品的推出, 这一工作已经可以在微机工作站上完成了。本研究采用的地理信息系统软件是 PC ARC/INFO 3.4.2, 遥感图像处理软件是 PCI EASI/PACE 6.2 for Windows 95/NT<sup>①</sup>。PC ARC/INFO 是一套便于地形数据采集和编辑的软件系统, 易于学用, 具有良好的数据接口和数据转换能力。由加拿大 PCI 公司研制的 PCI EASI/PACE 6.2 for Windows 95/NT 软件不仅具有强大的遥感图像处理功能, 而且在矢量数据的管理和数字地形模型分析方面也有十分卓越的性能。其独特的数据库结构可以方便地读入 ARC/INFO GENERATE 格式的矢量数据, 通过多种空间插值算法生成与遥感图像相匹配的栅格地理信息系统, 进而通过空间建模工具完成诸如流域水文学等各种类型的空间分析任务<sup>[11]</sup>。

### 3.2 数据准备

研究中使用了美武高原地区 1:100 000 地形图和美国陆地卫星 TM 数据。其基本工作流程如图 2 所示。

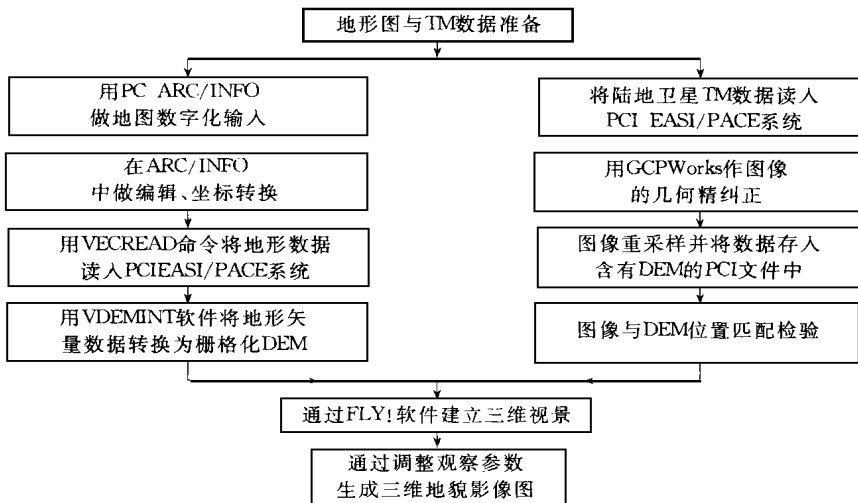


图 2 微机平台三维地貌影像图制作流程图

Fig. 2 Flow chart of making 3D geomorphological imagery on PC platform

由 ARC/INFO 读入的矢量数据生成 DEM, 可以包含如下地形特征要素: ① 高程点, 包含单点的高程值; ② 等高线, 建立 DEM 的最主要的要素; ③ 沟谷线, 亦即水系网络, 不含高程值; ④ 山脊线, 亦即分水岭, 不含高程值; ⑤ 陡崖, 诸如冲沟等造成的强烈地形转折, 不含高程值。

在生成 DEM 时, 依次使用线性插值法、距离转换插值法和有限差分算法等三个步骤时结果最大程度上拟合实际的地形特征。

① PC ARC/INFO 为美国环境信息研究所(ESRI)公司注册商标, PCI EASI/PACE 为加拿大 PCI 公司注册商标。

在生成三维地貌影像图时,首先利用 DEM 构造一个代表真实地形起伏的三维曲面,然后利用 TM 影像对三维曲面进行颜色赋值。在生成三维场景时,需要设定一系列参数,包括观察点和目标点的位置、观察点的高度、视角、高程放大比等。为了实现地貌分析的目的,必须不断调整这些参数,以生成多方位的视景。

### 3.3 结果分析

使用 PCI 的 FLY! 模块生成了美武高原的一系列三维地貌影像图。很明显,这些影像图一般都很难从野外工作中获取,对地貌学野外考察起到了重要的参考和指导作用。考虑到版面的限制,以下仅就从数字高程模型的基础上提取的剖面作一分析。

首先选择区域东南角作为观察点,对美武高原进行观察分析(位置见图 7 线段 A1—A2)。从中可以看出,高原表面十分平坦,虽然有许多侵蚀沟发育,但仍然维持了夷平面主体的完整性。这一点亦可从图 3 所示地形剖面图得到证实。

图 4 表现的是从高原中南部向东北方向划出的地形剖面(位置见图 7 线段 B1—B2)。从图中可以看出,美武高原上的夷平面可以划分成 2 级,最主要的一级海拔高度约为 3 500 m,面积宽广,洮河的一级支流——冶木河在其上穿行,地形起伏平缓;最高一级以威当山及其向西延伸的高原边缘山脉为代表,海拔高度在 3 900 m 以上。两级夷平面的高度上呈逐渐过渡的关系(图 4)。

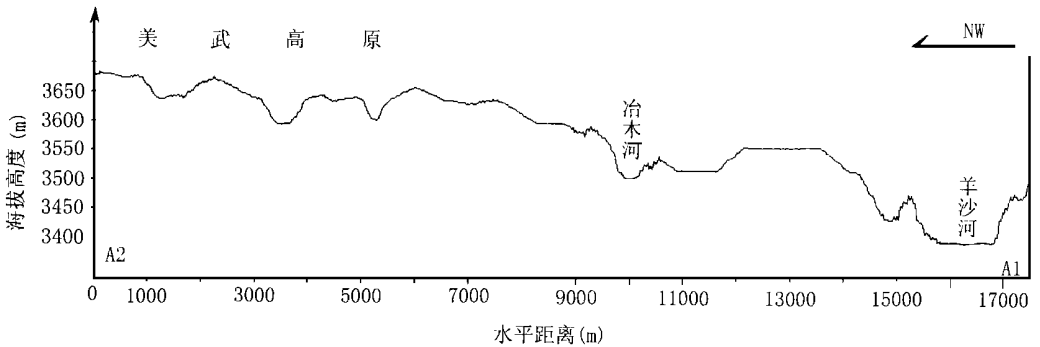


图 3 美武高原南部地形剖面图

Fig. 3 Topographic profile at the south side of the Meiwu Plateau

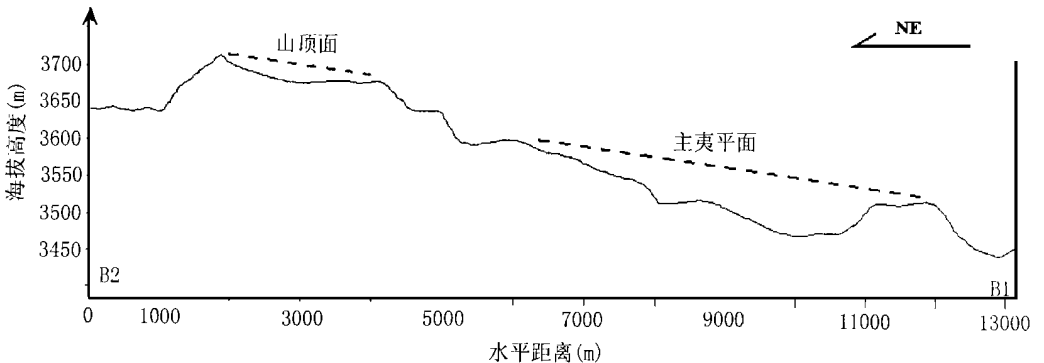


图 4 美武高原北部地形剖面图

Fig. 4 Topographic profile at the north side of the Meiwu Plateau

图 5 表现了高原北侧边缘的地貌特征 (位置见图 7 线段 C1—C2)。美武高原作为青藏高原东北部边缘的一个组成部分, 与其北侧的陇西黄土高原的地形高差巨大, 超过 2 000 m, 因此, 由黄土高原向美武高原方向发育的河流具有强烈的溯源侵蚀力, 使高原边缘的深切峡谷陡深, 地形变化十分明显。高原边缘的沟谷顶端, 有明显的低洼地形, 可能为雪蚀或冰蚀洼地。高原主体部分平坦的形态更加突兀。

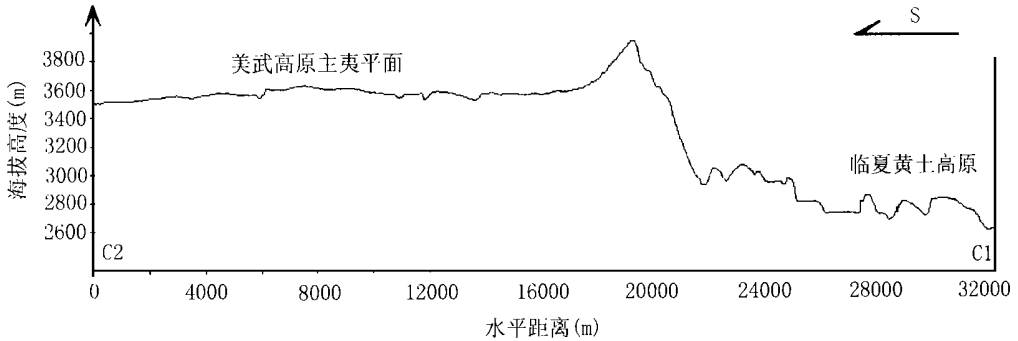


图 5 青藏高原向临夏黄土高原方向的地形反差

Fig. 5 Topographic contrast between the Qinghai- Xizang Plateau and the Loess Plateau

## 4 定量分析

### 4.1 地貌特征参数的选择与计算

从 DEM 中可以提取十分丰富的地貌信息, I. V. Florinsky 区分出多达 16 种地形特征参数<sup>[10]</sup>。本文中主要用到如下参数, 并进行了分析:

- (1) 相对高程, 可以反映地形起伏和地貌单元的高度变化情况;
- (2) 地表粗糙度<sup>[12]</sup>, 反映了地表起伏变化与可蚀性, 其公式如下:

$$R_{i,j} = \left| \frac{Z_{i+1,j+1} + Z_{i,j}}{2} - \frac{Z_{ij+1} + Z_{i+1,j}}{2} \right|$$

式中  $Z_{i,j}$  为点  $(i, j)$  的高程。

- (3) 高程变异<sup>[12]</sup>, 反映地表单元与其相邻地域之间接高差变异情况, 其计算公式如下

$$V = S/Z$$

式中  $S = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (Z_i - Z)^2$ , 其中  $Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) 为栅格单元的 8 邻域的高程值 (图 5),  $Z$  为平均高程。

- (4) 坡度<sup>[13]</sup>, 反映坡面发育程度和物质搬运状况, 其计算公式为:

$$G = \arctan \frac{p^2 + q^2}{p^2 + q^2}$$

- (5) 垂向曲率<sup>[13]</sup>, 反映地表坡度的变动状况, 其计算公式为:

$$K_v = - \frac{p^2 r + 2pqr + q^2 t}{(p^2 + q^2)^3 (1 + p^2 + q^2)^3}$$

(6) 水平曲率<sup>[13]</sup>, 反映平面向上地形的曲率, 对地层的水平错动有很好的指示作用, 其计算公式为:

$$K_h = - \frac{p^2 r - 2pqs + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}}$$

(7) 累计曲率<sup>[13]</sup>，系垂向曲率与水平曲率的乘积，对识别滑坡体等垂力地貌具有一定的作用，其计算公式为：

$$K_a = K_h \cdot K_v$$

Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>
Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>
Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>

图 6 栅格点 8 邻域编号

Fig. 6 Numbering of 8-neighborhood of a raster unit

在以上公式中， $r$ 、 $t$ 、 $s$ 、 $p$  和  $q$  分别是如下函数的偏导数： $z = f(x, y)$ ： $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ ， $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ ， $s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ ， $p = \frac{\partial z}{\partial x}$  和  $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ ，为了便于对 DEM 进行处理，采用拉格朗日展

开式拟合区域高程变化<sup>[7]</sup>，用栅格单元的 8-邻域进行计算（图 6），得到  $r$ 、 $t$ 、 $s$ 、 $p$  和  $q$  的离散化表达式如下：

$$r = \frac{z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9 - 2(z_2 + z_5 + z_8)}{3w^2}$$

$$t = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9 - 2(z_4 + z_5 + z_6)}{3w^2}$$

$$s = \frac{z_3 + z_7 - z_1 - z_9}{4w^2}$$

$$p = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6w}$$

$$q = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{6w}$$

式中  $z_i$  分别为 8-邻域格岗点的高程值， $i = 1 \sim 9$ ； $w$  表示一个格网所代表的实际距离大小，本分析中  $w = 30 \text{ m}$ 。

#### 4.2 地貌类型的自动分类

根据上述公式对美武高原的 DEM 进行计算，得到相应的 7 个栅格图层，分别存入 7 个通道中，进而可以进行地貌的自动分类。为避免个别因子在自动分类中权值过大的问题，首先将这 7 个通道的数据进行归一化处理。若某通道的最大、最小取值分别为  $G_{\max}$  和  $G_{\min}$ ，在该通道中各个栅格点处的参数由下式计算处理：

$$G = \frac{G_0 - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \times 255$$

式中  $G_0$  为栅格点上的原始值。如此，使参加图像分类的各个通道的取值均规范在 0~255 之间。

这里将高原地区的地貌特征分为三类：夷平面、陡坡、谷底和低缓平地，选择典型区进行训练。从所选训练区得到各分类通道中不同类型地貌单元的特征空间均值和标准差（见表 1）；并分别根据 Battacharrya 距离/变换散度<sup>[11]</sup> 计算各个地貌类型的可分性（见表 2），表明分类方案是可靠的，最后采用贝叶斯最大似然法进行监督分类。

监督分类的结果在经过  $7 \times 7$  的中值滤波器清除噪声，得到图 7 的结果。对研究区的图像用机械布点采样、成数抽样的方法进行结果验证，生成混淆矩阵（表 3），统计分析表明，本分类在  $\pm 0.01987$  显著水平上分类精度达到 99%，在  $\pm 0.01510$  显著水平上分类精度达

到 95%，在  $\pm 0.01267$  显著水平上分类精度达到 90%，平均精度为 96.37%，总精度为 96.21%，标准偏差为 0.0077。结果令人满意。

表 1 地貌类型监督分类特征统计表

Tab. 1 Statistical tables of supervised classification on the geomorphic types

地貌类型	夷平面	陡坡	谷底和低缓平地
参与地貌分类的特征参数 (均值/标准差)			
相对高程	181.1/21.1	133.9/23.1	83.9/33.8
坡度	16.3/25.8	86.1/38.1	16.0/22.9
垂直曲率	150.4/8.7	149.3/25.1	147.5/11.7
水平曲率	138.0/5.4	138.7/18.3	136.6/7.3
高程变率	130.4/7.1	130.5/23.2	128.2/9.8
累计曲率	175.3/1.5	178.1/4.8	175.5/2.5
粗糙度	2.7/5.3	9.2/11.4	3.5/6.7

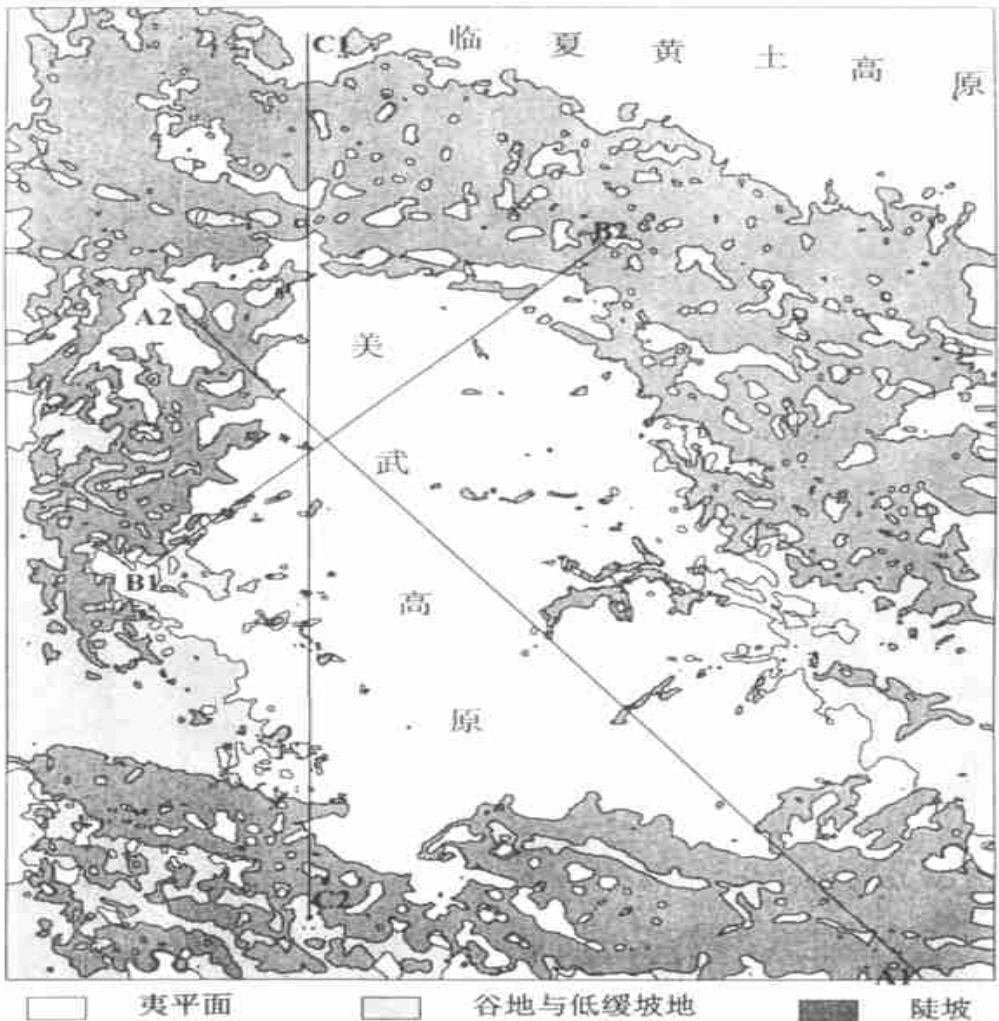


图 7 美武高原地貌分类图

Fig. 7 Geomorphological Classification of the Mei wu Plateau

表 2 地貌类型监督分类特征可分性表 (Battacharrya 距离/变换散度)

Tab. 2 Separability tables of supervised classification on the geomorphic types  
(Battacharrya distance/ Transform divergence)

	夷平面	谷底和低缓平地
谷底和低缓平地	1. 756/ 1. 907	
陡坡	1. 847/ 1. 980	1. 662/ 1. 867

表 3 地貌分类结果混淆矩阵

Tab. 3 Resulting confusion matrix of the geomorphic classification

地貌类型	夷平面	陡坡	谷底与低缓平地
夷平面	95. 76	0. 53	3. 71
陡坡	2. 60	96. 27	1. 13
谷底与低缓平地	2. 09	0. 84	97. 07

## 5 结论

综上所述, 基于现代计算机的夷平面等地貌形态的三维显示和定量分析, 具有强大的应用潜力和广阔的应用前景, 具体体现在如下几个方面:

(1) 集成数字地形模型和卫星遥感影像生成的三维地貌影图具有很强的表现能力, 使高原夷平面得到充分的展示, 弥补了传统的地理野外考察工作的局限性。

(2) 绘制地形剖面是表现区域地形地貌变化的传统方法, 但往往比较困难、费时, 动用计算机技术在 DEM 提取地形剖面非常容易, 为地貌形态研究提供了客观、准确的量化资料, 大大增强了其地貌应用的前景。

(3) 基于数字地形模型进行地貌形态特征的定量分析, 是最近几年发展起来的一个重要的研究方向; 如何建立地貌形态特征的指标体系与地貌成因之间的联系, 仍然是一个有待探索的难题。

(4) 利用遥感图像监督分类方法进行地貌类型的自动分类, 可以很好地提取高原夷平面的分布信息, 克服了人的主观认识的局限性。

### 参考文献:

- [1] 崔之久等. 关于夷平面[J]. 科学通报, 1998, 43(17): 1794~1805.
- [2] Davis W M. The Peneplain: Geographic Eassays[M]. Boston: Ginn and Co., 1898. 350~380.
- [3] Gilbert G K. The convexity of hillsploes[J]. *J. Geol.*, 1909, 17: 344~350.
- [4] 马尔科夫 K K. 地貌学基本问题[M]. 陈恩泽等译. 北京: 地质出版社, 1957.
- [5] Butler D R et al. Three - dimensional displays for natural harzards analysis, using classified landsat thematic mapper digital data and large- scale digital elevation models[J]. *Geocarto Int.*, 1991, 6(4): 65~69.
- [6] Gales P T. An automated approach to the classification of the slope units using digital data[J]. *Geomorphology*, 1998, 21: 251~264.
- [7] Florinsky IV. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models[J]. *Int. J. Geographic Information Science*, 1998, 12(1): 47~61.
- [8] Tachikawa Y et al. Development of a basin geomorphic information system using a TIN- DEM data structure[J].

*Water Resources Bulletin*, 1994, **30**(1): 9~17.

- [9] Milne J A, Sear D A. Modelling river channel topography using GIS[J]. *Int. J. Geographic Information Science*, 1997, **11**(5): 499~519.
- [10] Florinsky I V. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations [J]. *Progress in Physical Geography*, 1998, **22**(1): 33~60.
- [11] PCI. Using PCI Software[J], 1997, **1**, **2**(6.1): 273~290, 299~316, 405~416.
- [12] 黄杏元, 汤勒. 地理信息系统概论. 北京: 高等教育出版社. 113~113.
- [13] Shary P A. The second derivative topographic method[A]. In: *The Geometry of Earth Surface Structures*[C]. Stepanov I N ed.. Pushchino: Pushchino Research Centre Press, 1991. 30~60.

## A preliminary approach on the 3D presentation and quantitative analysis of planation surface

LIU Yong, WANG Yi-xiang, PAN Bao-tain

(Department of Geography, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Planation Surface is one of the very important issues in the field of current geomorphology, and plays a major role for reconstructing the evolutionary history of land from in a region. By using remote sensing and geographical information systems, this article discussed the creation of the Digital Elevation Model (DEM) of the Meiwu Plateau, at the south of Lanzhou and the northeastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau, and the integration of both DEM and Landsat TM images. Then the characteristics of 3D Geomorphological Imagery of the Meiwu Plateau were discussed, and the topographic profiles at several parts of the DEM were got. On the basis of analyzing the system of geomorphological parameters on the planation surface, the exact extent of the planation surface on the Meiwu Plateau was got by using the supervised classification technique in the field of image processing. The great potential of this technique was discovered on the analysis of planation.

**Key words:** planation surface; Digital Elevation Model (DEM); The Qinghai-Xizang Plateau; 3D Geomorphological Imagery; supervised classification