

基于 DEM 的甘肃省地貌形态特征分类

王丽娜, 丁文广, 许丹阳

(兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 分析微观尺度上的地貌分类指标, 为甘肃省的水土流失、地质灾害防治以及农业规划决策提供数据支持。[方法] 利用甘肃省 DEM 数据, 通过窗口递增分析、均值变点分析、叠加分析、水系盒维数检验等方法, 得到甘肃省地貌形态特征分类试验的最佳分析窗口以及甘肃省地貌形态特征分类结果。[结果] ①利用均值变点分析得到甘肃省 DEM 分类试验的最佳分析窗口为 29×29 。②根据分类指标体系, 结合地表起伏度、地表切割度、地形位置指数(TPI)因子将甘肃省地貌形态分为 13 类。[结论] 提取研究区内 5 个小流域对得到的甘肃省地貌形态特征分类结果进行了检验, 分类结果符合实际情况。构建的甘肃省地貌形态特征的分类指标体系实现了甘肃省地貌形态特征分类试验。

关键词: DEM; 甘肃省; 地貌形态分类; 水系盒维数检验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)01-0258-06

中图分类号: K903, TP75

文献参数: 王丽娜, 丁文广, 许丹阳. 基于 DEM 的甘肃省地貌形态特征分类[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 258-263. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 01. 041; Wang Lina, Ding Wenguang, Xu Danyang. DEM-based geomorphological features of Gansu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 258-263.

DEM-Based Geomorphological Features of Gansu Province

Wang Lina, Ding Wenguang, Xu Danyang

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] To analyze the geomorphological classification indicators at the micro scale, in order to provide data support for soil erosion, prevention and control of geological disasters and agricultural planning decisions in Gansu Province. [Methods] Based on the digital elevation model (DEM) data, the optimal analysis window of the geomorphological feature classification and the geomorphological characteristics of Gansu Province were obtained by the window increment analysis, mean-variation analysis, overlay analysis and water box dimension test. [Results] ① According to the mean-variation analysis, the optimal analysis window for DEM classification experiment in Gansu Province was 29×29 . ② Based on the classification index system, the geomorphological of Gansu Province could be divided into 13 categories, according to the surface fluctuations, surface cutting degree and topographic position index (TPI) index factor. [Conclusion] Five small watersheds in the study area were selected to test the classification results of the geomorphological features of Gansu Province, and the classification results were in accordance with the actual situation. This paper constructs a classification index system of geomorphological characteristics in Gansu Province, and realizes the classification test of geomorphological characteristics in Gansu Province.

Keywords: digital elevation model (DEM); Gansu Province; geomorphological classification; water box dimension test

地貌指地球硬表面由地貌内外动力共同作用塑造而成的多种多样的外貌或形态, 是地球表面各种形

态的总称。地貌是地球表面各个圈层系统间相互作用的重要界面, 一个地区的地貌深刻的影响着该地区

的气候变化、土地利用、经济发展、交通水利、城市建设和人类活动等^[1]。DEM 是数字高程模型的简称,是一种重要的空间信息资料,并且是进行地貌形态分类的核心数据。DEM 作为一种实地模型,包含丰富的地貌信息,是定量描述地貌形态和空间分布的基础数据^[2]。伴随着航天遥感和航空摄影测量技术的快速发展,DEM 在数据获取、存储、分析、应用等方面取得了一系列突破,因此以 DEM 为主要数据源的数字地形地貌特征分析技术逐渐成熟并发展为主导趋势^[3]。近年来,国内学者对于如何利用 DEM 对地貌的数字分类进行了大量的研究^[4-9],对大区域地貌分类方法和指标体系的研究比较完善,对宏观地理区划具有重要意义。譬如,通过定义地貌分类的刚性和柔性指标^[10],对中国土地的宏观地貌特征进行了划分,实现了遥感地貌的自动分类^[11-12]。目前,中国针对西南地区、秦岭和青海—西藏高原的地貌特征分类研究较多^[13-15],本文通过将宏观地貌特征与微地貌特征信息相结合的办法研究省级尺度上地貌特征分类。

甘肃省位于黄土高原、蒙古高原、青藏高原三大高原的交汇处,分属于黄河流域、长江流域及内流河流域^[16]。甘肃省内地貌类型复杂多样,有陡峭的高山;狭长的盆地;深厚的黄土高原;蜿蜒的河流;辽阔的戈壁、沙漠及零星分布的湖沼盐碱地^[17]。现有的甘肃省地貌形态分类研究工作中,对微地貌信息作用关注较少,这不利于对甘肃地貌类型特征的深入把握。本文拟根据甘肃省 DEM 数据,提取宏观地貌特征地形起伏度、地表切割度以及微地貌特征地形位置指数(TPI),结合宏观地貌特征与微地貌特征信息,对甘肃省地貌特征进行分类试验,并对分类结果进行检验。通过分析微观尺度上的地貌分类指标,以期为甘肃省的水土流失、防治地质灾害以及农业规划决策提供数据支持。

1 研究区概况

甘肃省位于中国的西北部,黄河上游。它的地理位置位于北纬 $32^{\circ}11'$ — $42^{\circ}57'$,东经 $92^{\circ}13'$ — $108^{\circ}46'$ 之间,地理范围属于狭长型,东西蜿蜒 1 600 多 km,面积 39 万余 km^2 。气候类型多样,从南向北包括了亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候和高山高原气候等四大气候类型^[18]。甘肃省地形地貌类型复杂,主要以山地和高原为主,海拔起伏度较大^[19]。将甘肃省地貌正确的分类,合理的规划,对于今后甘肃经济发展、水利交通、农业区划、城市建设具有重要意义。

2 数据与方法

2.1 数据来源

雷达地形测绘 SRTM 为本文提供了数字高程数据(DEM)。由于 SRTM 数据具有实时性强、容易获取等优点,目前关于地形地貌研究大多采用 SRTM 数据作为基础分析数据。它是由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)以及德国与意大利航天机构共同合作完成联合测量^[20],空间分辨率为 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$,覆盖面积为 60°N 至 56°S 。在 ArcGIS 10.3 软件中用甘肃省矢量图对得到的 DEM 数据进行掩膜提取、空间校正、定义坐标系等处理,得到具有正确地理信息的甘肃省 DEM。

2.2 研究方法

2.2.1 地形起伏度 地形起伏度(R_f)是指特定区域内最高点与最低点的高程差^[21-22],能够直观反映地表形态,是地貌类型划分的定量指标。该地区的地形起伏度需要通过邻域统计计算,计算过程中可以设置邻域形状,ArcGIS 提供的分析窗口有矩形、圆形、环形和扇形 4 种,本文选择了窗口大小为 $N \times N$ 像素的矩形分析窗口,使用 $N=3, 5, 7, \dots, 31, \dots, 69$ 不同大小的移动窗口计算研究区域的起伏度。其表达式如下:

$$R_f = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中: R_f ——地形起伏度; H_{\max} ——单位面积内最大高程值; H_{\min} ——单位面积内最小高程值。

本文从 3×3 大小的窗口开始,逐步递增至 69×69 大小的窗口,将不同窗口大小获得的起伏度进行双对数拟合(图 1),以此来确定提取地形起伏度的最佳分析窗口。

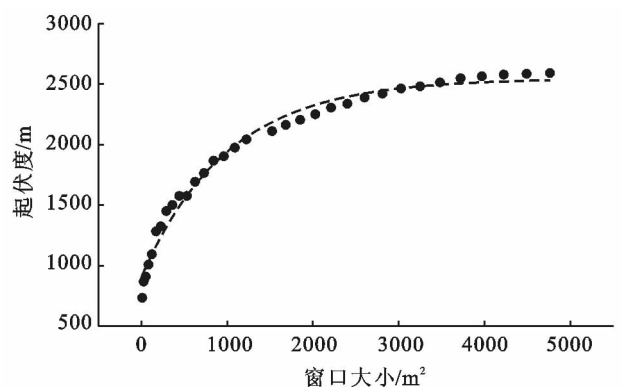


图 1 地形起伏度与窗口的拟合特征

由图 1 可得,甘肃省的地形起伏度随着窗口的增大而逐渐增大,相关系数为 0.984 5。这说明窗口的大小变化与地形起伏度的变化拟合程度较好。当窗

口达到一定阈值后,其增速开始减缓,最后趋于稳定,说明该阈值就是最佳邻域分析窗口。

2.2.2 均值变点分析法 地形起伏度随窗口面积的变化最后趋于稳定,以此来确定最佳邻域分析窗口^[23],但结果易受自主判别的主观性影响,会影响数据的准确性,故本文采用均值变点分析方法^[24]来计算最佳统计单元的窗口大小,其数学表达推算如下。

数据序列为 $\{X_i\}$, $i=1,2,3,\dots,36$,以 X_i 为界,将序列分为两段,分别计算两段数据的算术平均值 X_{i1} 和 X_{i2} ,样本均值 \bar{x} 以及统计量:

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

$$S = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

式中: S_i ——两段样本的离差平方和之和; S ——离差平方和。计算得到如图 2 所示关系。

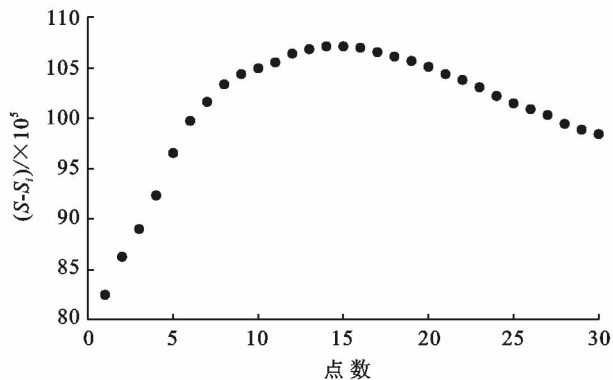


图 2 $S-S_i$ 的变化特征

通过图 2 可以看出,点数为 15 时, $S-S_i$ 的值达到最大,则 29×29 的窗口大小即为由陡变缓的点, 29×29 为最佳统计单元。

2.2.3 地表切割度 地表切割度(D)指特定区域内的平均高程与最小高程的差值^[25],是研究地表侵蚀发育状况的重要参考指标,公式如下:

$$D = H_{\text{mean}} - H_{\text{min}} \quad (4)$$

利用地表切割度划分地貌形态特征的关键在于确定其最佳统计单元^[26]。根据本文上述分析,这里沿用地表起伏度的最佳分析窗口 29×29 计算甘肃省的地表切割度。根据甘肃省的实际地貌特征,本文采用的地表切割度的分类标准为:平原($0 \sim 30$ m)、丘陵($30 \sim 100$ m)、浅切割山地($100 \sim 500$ m)、中等切割山地($500 \sim 1\,000$ m)。

2.2.4 TPI 指数 TPI^[27-28] 指数通过某点的高程与其周围分析窗口内的平均高程的差值和地形坡度信息综合确定坡位的类型特征。参考 Reu^[27] 对坡位的分类方法,本文确定甘肃省 TPI 指数的分类标准为:

山谷($TPI < -1$ SD)、山坡($-1 \text{ SD} \leq TPI \leq 1 \text{ SD}$)、山脊($TPI > 1 \text{ SD}$)。由于甘肃省大部分地区海拔高度在 $1\,000$ m 以上,根据结果可知山谷和山脊在甘肃省地貌类型中占据绝对优势,山坡所占比例较小。

2.2.5 分类指标体系 地貌分类特征研究的前提是地貌形态分类指标体系的构建,根据中国 $1:100$ 万地貌图制图规范将中国山地起伏度划分为 5 级,划分标准分别是 200 m, 500 m, $1\,000$ m 和 $2\,500$ m。沈玉昌^[29] 按 100 m, 500 m 和 $1\,000$ m 标准确立了中国的丘陵、浅切割山地、中等切割山地和深切割山地,根据本文得到的甘肃省地形起伏度范围为 $0 \sim 1\,944$ m,地表切割度范围为 $0 \sim 1\,045$ m 的实际情况,构建适合甘肃省的地貌形态分类指标体系(表 1)。其中主要指标地形起伏度可以反映宏观的地貌形态特征,辅助指标地表切割度和 TPI 指数主要用于区分微观的地貌形态特征信息。

表 1 甘肃省地貌形态分类指标体系

地貌形态	起伏度/m	切割度/m	TPI(SD)
平原	$0 \sim 30$	$0 \sim 30$	—
台地	$30 \sim 50$	$30 \sim 100$	—
缓起伏山谷	$50 \sim 200$	$30 \sim 100$	< -1
缓起伏山坡	$50 \sim 200$	$30 \sim 100$	$-1 \sim 1$
缓起伏山脊	$50 \sim 200$	$30 \sim 100$	> 1
浅切割小起伏山谷	$200 \sim 500$	$100 \sim 500$	< -1
浅切割小起伏山坡	$200 \sim 500$	$100 \sim 500$	$-1 \sim 1$
浅切割小起伏山脊	$200 \sim 500$	$100 \sim 500$	> 1
浅切割中起伏山谷	$500 \sim 1\,000$	$100 \sim 500$	< -1
浅切割中起伏山坡	$500 \sim 1\,000$	$100 \sim 500$	$-1 \sim 1$
浅切割中起伏山脊	$500 \sim 1\,000$	$100 \sim 500$	> 1
中等切割中起伏山谷	$500 \sim 1\,000$	$500 \sim 1\,000$	< -1
中等切割中起伏山坡	$500 \sim 1\,000$	$500 \sim 1\,000$	$-1 \sim 1$
中等切割中起伏山脊	$500 \sim 1\,000$	$500 \sim 1\,000$	> 1
中等切割大起伏山谷	$1\,000 \sim 2\,000$	$500 \sim 1\,000$	< -1
中等切割大起伏山坡	$1\,000 \sim 2\,000$	$500 \sim 1\,000$	$-1 \sim 1$
中等切割大起伏山脊	$1\,000 \sim 2\,000$	$500 \sim 1\,000$	> 1

注:SD 代表 TPI 的标准偏差;“—”代表无参数设置。

3 结果与分析

3.1 结果分析

首先,将地形起伏度、地表切割度和 TPI 指数按照表 1 的分类体系利用栅格计算器在 ArcGIS 中分类,然后通过镶嵌至新栅格得到初步的地貌分类图。考虑到中等切割中起伏山谷、山坡、山脊及中等切割大起伏山谷、山坡、山脊 3 类地貌单元面积过少,难以在地貌形态类型图上进行标识,所以将其合并为中等切割中起伏山地及中等切割大起伏山地,最终得到甘肃省的地貌类型结果(表 2)。

表 2 甘肃省各地貌形态类型面积及比例

地貌形态	面积/km ²	面积比例/%
平原	52 525.75	12.1
台地	47 820.94	11.0
缓起伏山谷	56 352.06	13.0
缓起伏山坡	4 182.55	0.97
缓起伏山脊	52 053.03	12.0
浅切割小起伏山谷	72 721.18	16.8
浅切割小起伏山坡	1 489.14	0.34
浅切割小起伏山脊	68 205.05	15.8
浅切割中起伏山谷	31 649.73	7.4
浅切割中起伏山坡	290.42	0.07
浅切割中起伏山脊	29 776.54	6.9
中等切割中起伏山地	2 288.87	0.52
中等切割大起伏山地	12 752.25	3.0

从整体性的特征来看,平原面积 52 525.75 km², 占总面积的 12.1%, 主要分布在武威市的北部、张掖市与酒泉市。台地面积与平原面积相似, 占总面积的 11.0%, 除甘南藏族自治州西南部存在少部分零星分布外, 其余均围绕在平原周围分布。缓起伏山地以缓起伏山谷和缓起伏山脊为主, 缓起伏山谷面积为 56 352.06 km², 缓起伏山脊面积为 52 053.03 km², 缓起伏山地总面积为 112 587.64 km², 共占比 25.97%, 紧紧围绕在平原和台地的四周分布。浅切割小起伏山地面积为 142 415.37 km², 占总面积的 32.94%, 以浅切割小起伏山谷和浅切割小起伏山脊为主, 浅切割小起伏山谷面积为 72 721.18 km², 占总面积的 16.8%, 浅切割小起伏山脊面积为 68 205.05 km², 占总面积的 15.8%, 浅切割小起伏山地是所有地貌形态类型中占比最大的一种, 主要分布在甘肃省

的南部各市, 张掖市与酒泉市的南部也有少许呈现条带状分布。浅切割中起伏山谷面积为 31 649.73 km², 占总面积 7.4%, 浅切割中起伏山脊面积为 29 776.54 km², 占总面积 6.9%, 在甘肃省分布广泛, 其中在甘南藏族自治州、临夏市、定西市、陇南市、天水市、酒泉市的南部以及祁连山地均有分布, 中等切割中起伏山地和中等切割大起伏山地在甘肃省地貌类型中所占面积比例较小, 共有 3.52%, 两者分布紧紧相依, 主要分布在祁连山地、甘南藏族自治州与陇南市的交界处。

从区域性的特征来看, 甘肃省地形地貌类型复杂, 主要以山地为主。甘肃省的主要山脉包括祁连山、陇南山地、六盘山, 多数山脉属西北—东南走向。祁连山位于甘肃省西部边境, 主要以中等切割大起伏山地、中等切割中起伏山地、浅切割中起伏山地和浅切割小起伏山脊为主。陇南山地位于甘肃省南部, 主要以浅切割小起伏山地为主, 浅切割中起伏山地和中等切割大起伏山地在陇南山地的南部分布。六盘山位于陕西、甘肃、宁夏三省区的交界处, 以浅切割小起伏山地分布为主。

3.2 结果检验

分形^[30]是刻画地貌形态特征的重要检验指标^[31], 根据何隆华给出的流域地貌侵蚀发育阶段的划分方法: 当 $1.6 < D \leq 1.89$ 时, 流域地貌处于侵蚀发育阶段的活跃期^[32]。分维值越大, 地表形态就越复杂^[33]。本文通过甘肃省 DEM 进行水文分析, 提取甘肃省河网。其中通过设置流量大于等于 500 以去除较小流量的水系, 利用河网分级得到具有 4 种不同流量大小的甘肃省河网。从西北往东南依次选取 5 个大小相等的样区, 覆盖了研究区的 13 种地貌形态(表 3)。

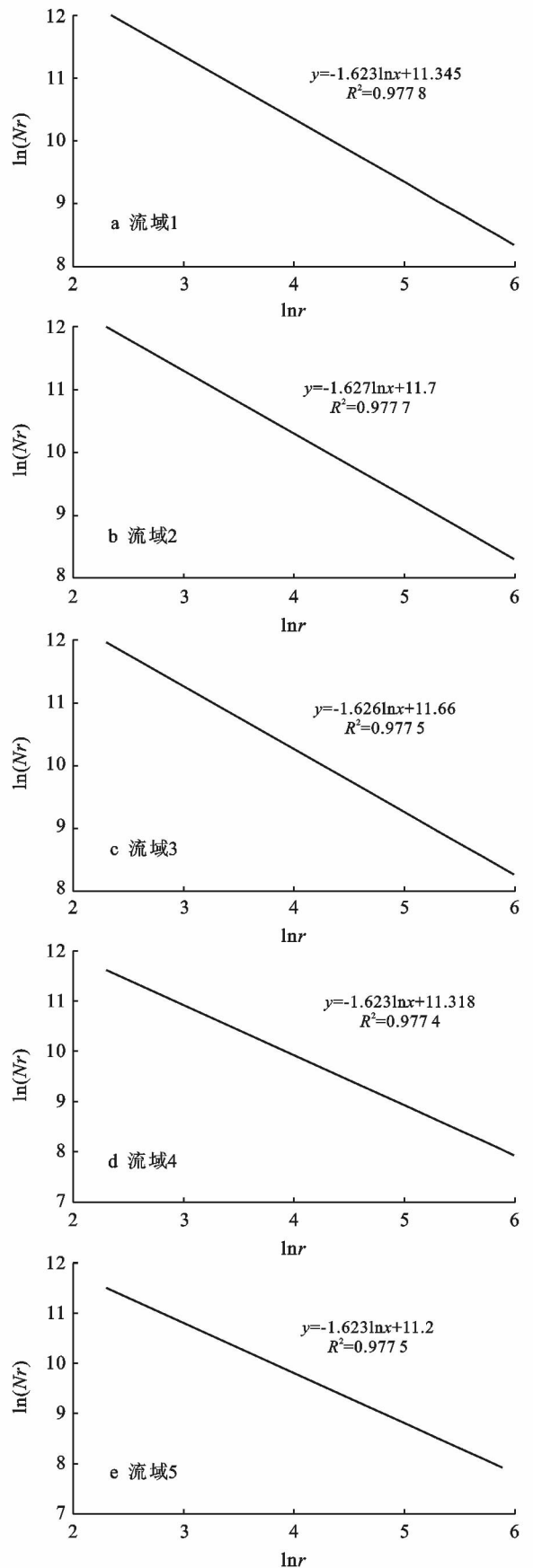
表 3 各流域的地貌类型面积统计

地貌形态	流域 1		流域 2		流域 3		流域 4		流域 5	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
平原	5 350.77	45.61	6 200.34	52.86	4 021.40	34.28	34.09	0.29	0	0
台地	1 892.96	16.14	2 373.22	20.23	2 767.66	23.59	76.93	0.66	0	0
缓起伏山谷	1 895.15	16.16	1 317.91	11.23	1 469.70	12.53	2 788.97	23.77	172.37	1.47
缓起伏山坡	129.96	1.11	110.17	0.94	144.87	1.23	172.28	1.47	6.03	0.05
缓起伏山脊	1 765.59	15.05	1 162.24	9.91	1 329.35	11.33	2 610.83	22.26	153.37	1.31
浅切割小起伏山谷	249.22	2.12	242.81	2.07	659.05	5.62	2 902.79	24.74	2 588.06	22.06
浅切割小起伏山坡	5.08	0.04	4.75	0.04	13.33	0.11	63.55	0.54	47.39	0.40
浅切割小起伏山脊	218.03	1.86	205.82	1.75	579.40	4.94	2 773.42	23.64	2 545.36	21.70
浅切割中起伏山谷	119.70	1.02	57.72	0.49	386.69	3.30	159.49	1.36	2 583.69	22.02
浅切割中起伏山坡	1.09	0.01	0.47	0.00	3.77	0.03	1.66	0.01	24.53	0.21
浅切割中起伏山脊	103.29	0.88	47.88	0.41	351.23	2.99	146.84	1.25	2 586.81	22.05
中等切割中起伏山地	0	0	0	0	0	0	0	0	223.89	1.91
中等切割大起伏山地	0	0	7.50	0.06	4.38	0.04	0	0	799.34	6.81

这 5 个流域的基本情况为(表 3):流域 1 主要以平原为主,面积为 5 350.77 km²,占总面积 45.61%,台地、缓起伏山谷和缓起伏山脊面积相差不大,分别占比 16.14%,16.16%,15.05%,其他地貌类型占比均小于 3%,流域地表起伏度相对较小。流域 2 中平原面积超过一半,面积为 6 200.34 km²,占总面积 52.86%,台地面积为 2 373.22 km²,缓起伏山地面积为 2 590.32 km²,浅切割小起伏山地面积为 453.38 km²,浅切割中起伏山地总面积 106.07 km²,存在 7.50 km² 的中等切割大起伏山地,流域 2 的地形复杂度和地表起伏变化相比于流域 1 较大。流域 3 以平原、台地、缓起伏山谷、缓起伏山脊为主,面积分别为 4 021.40,2 767.66,1 469.70,1 329.35 km²,其次浅切割小起伏山谷、浅切割小起伏山脊、浅切割小起伏山谷、浅切割中起伏山谷、浅切割中起伏山脊、中等切割大起伏山地各种地貌类型分布广泛,流域 3 的地表复杂度以及地表起伏度较高。流域 4 以缓起伏山谷、缓起伏山脊、浅切割小起伏山谷、浅切割小起伏山脊为主,在流域中面积为 2 788.97,2 610.83,2 902.79,2 773.42 km²,总占比 94.41%,平原和台地总占比不足 1%。流域 5 中浅切割小起伏山谷、浅切割小起伏山脊的面积共 5 133.42 km²,占总面积 43.76%。浅切割中起伏山谷、浅切割中起伏山脊的面积为 5 170.50 km²,面积占比 44.07%。中等切割中起伏山地的面积为 223.89 km²,中等切割大起伏山地的面积为 799.34 km²,两者占共 8.72%,无平原和台地分布。

在 ArcGIS 10.3 中,将 5 个流域的水系矢量图转换为栅格类型图,进行网络分析,在要素转栅格对话框中不断改变栅格单元的大小,依据甘肃省的实际情况,分别选取 10×10,50×50,100×100,150×150,200×200,250×250,300×300,350×350,400×400,9 种大小类型的栅格单元,得到不同栅格单元边长所对应的水系栅格图。

通过图形的属性表查询不同栅格单元边长 r 相对应覆盖研究水系的网格总数 N_r ,并分别取对数。根据数据在 OriginPro 8.0 中绘制关系曲线(图 3)。通过水系盒维数法^[34]计算,5 个流域的水系盒维数分别为 1.623,1.627,1.626,1.623,1.623。流域 2 和流域 3 的分维值比另 3 个流域大,这表明流域 2 和流域 3 的地表复杂度高于其他流域。因此,分维值的计算结果符合前述 5 个小流域的实际地貌形态特征,证明本文试验取得了较好的分类结果。



注: $\ln(N_r)$ 为不同大小栅格下对应的水系的网格总数的对数; $\ln r$ 为不同大小栅格的边长对数。

图 3 栅格个数与栅格大小的对数关系

4 结论

本文确定了利用 DEM 数据分析甘肃省地貌形态的最佳分析窗口为 29×29 ; 根据地形起伏度、地表切割度和地形位置指数 TPI 构建了甘肃省地貌形态特征的分类指标体系, 并将甘肃省按照地貌形态特征划分为 13 种基本类型, 实现了甘肃省地貌形态特征分类试验。根据水系盒维数方法对甘肃省地貌形态特征分类结果进行检验, 表明分类结果较好地符合实际情况。但是, 本文所选的地形因子有限, 对地貌信息的概括能力有所欠缺。其次分类过程中当 TPI 的值接近于 0 时, TPI 指数对于地形坡度的概括能力有限, 会在一定程度上影响地貌形态特征分类, 有待在今后的研究工作中更加深入的解决该问题。

[参 考 文 献]

- [1] 丁贤法. 基于 SRTMDEM 与变点分析法的云南省富宁县地貌形态研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(11):98-100.
- [2] 韩海辉. 基于 SRTM-DEM 的青藏高原地貌特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [3] 程三友, 李英杰, 刘少峰. 基于 DEM 的大别山地区地貌特征研究[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2010, 33(3):270-275.
- [4] 程维明, 周成虎. 多尺度数字地貌等级分类方法[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1):23-33.
- [5] 莫申国. 基于 DEM 的秦岭数字地貌格局研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2008(2):8-14.
- [6] 姜玲. 基于遥感和 DEM 数据的柬埔寨洞里萨湖地区数字地貌制图研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [7] 龙恩, 程维明, 周成虎, 等. 基于 Srtm-DEM 与遥感的长白山基本地貌类型提取方法[J]. 山地学报, 2007, 25(5):557-565.
- [8] Fielding E, Isacks B, Barazangi M, et al. How flat is Tibet? [J]. Geology, 1994, 22(2):163-167.
- [9] Chris D, Jeff M. How steep are the Himalaya? Characteristics and implications of along strike topographic variations[J]. Geology, 2003, 31(1):75-78.
- [10] 高玄彧, 王青. 地貌分类指标的钢柔性探索[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(2):79-85.
- [11] 肖飞, 张百平, 凌峰, 等. 基于 DEM 的地貌实体单元自动提取方法[J]. 地理研究, 2008, 27(2):459-466.
- [12] 龙恩, 程维明, 肖飞, 等. 利用 SRTM-DEM 和 TM 数据提取平原山地信息的研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(2):53-56.
- [13] 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, 2011(3):38-41.
- [14] 常直杨, 王建, 白世彪, 等. 基于 DEM 数据的地貌分类研究: 以西秦岭为例[J]. 中国水土保持, 2014(4):56-59.
- [15] 曹伟超, 陶和平, 孔博, 等. 青藏高原地貌形态总体特征的 GIS 识别分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4):163-167.
- [16] 李志强, 刘学录. 甘肃地貌区划与地貌条件的农业评价[J]. 甘肃农业大学学报, 1994, 30(4):444-449.
- [17] 陈春元. 甘肃省中东部黄土地貌类型与特征[J]. 宁德师范学院学报: 自然科学版, 2004, 16(4):380-382.
- [18] 石淑珍. 气候类型的特殊分布情况探析[J]. 甘肃教育, 2009(20):21-21.
- [19] 赵松乔. 西北干旱区的自然条件和农业生产[J]. 干旱区资源与环境, 1987(2):5-16.
- [20] 薛正华, 黎建辉, 马俊才, 等. 中国科学院科学数据网格建设的进展[J]. 科研信息化技术与应用, 2011(2):63-73.
- [21] 杨晓, 黎武, 冉红, 等. 基于 DEM 数据的祁县地形起伏度分析[J]. 南方农业, 2016, 10(22):28-31.
- [22] 赵斌滨, 程永锋, 丁士君, 等. 基于 SRTM-DEM 的我国地势起伏度统计单元研究[C]//第十二届中国土木工程学会全国土力学及岩土工程学术大会论文集. 上海交通大学, 2015.
- [23] 毕华兴, 谭秀英, 李笑吟. 基于 DEM 的数字地形分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(2):49-53.
- [24] 丁贤法. 基于 SRTMDEM 与变点分析法的云南省富宁县地貌形态研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(11):98-100.
- [25] 张晖, 王晓峰, 余正军. 基于 ArcGIS 的坡面复杂度因子提取与分析: 以黄土高原为例[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2009, 43(2):323-326.
- [26] 胡最, 聂阳意. 基于 DEM 的湖南省地貌形态特征分类[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(6):67-71, 129.
- [27] Reu J D, Bourgeois J, Bats M, et al. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes[J]. Geomorphology, 2013, 186(15):39-49.
- [28] 田瑞云, 王玉宽, 傅斌, 等. 基于 DEM 的地形单元多样性指数及其算法[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1):121-129.
- [29] 沈玉昌. 沈玉昌与中国现代地貌学[J]. 地理研究, 1997(1):77-84.
- [30] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain[J]. Science, 1967, 156:636-638.
- [31] 朱绍攀, 张书毕. 分形地形复杂度研究[J]. 地理空间信息, 2011, 9(3):116-119.
- [32] 蒋甜, 陈端吕. 基于 DEM 的河网水系分形特征研究: 以常德市桃源县为例[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2):166-171.
- [33] 吴国平. 分形在 GIS 中的应用及其研究意义[J]. 科技广场, 2011(9):136-138.
- [34] 欧阳晓, 赵牡丹, 秦慧杰. 基于 ArcGIS 的 DEM 水系盒维数的计算[J]. 地下水, 2010, 32(6):184-185.