

基于 DEM 的辽宁省兴城市耕地地形条件评价

吴松泽, 闫卓冉, 马剑, 徐铭崇, 范语思, 王建国

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130000)

摘要: [目的] 评价辽宁省兴城市耕地地形条件, 为指导兴城市的农作物耕作, 耕地质量评价, 水土流失及泥石流灾害防治, 耕地生态环境保护等提供依据。[方法] 利用遥感和地理信息空间分析技术, 以数字高程模型为基础, 选取坡度、坡向、地表起伏度、平面曲率、地形粗糙度为评价因子, 对研究区的耕地地形条件进行多因子综合加权评价。[结果] 兴城市耕地地形条件为: I 和 II 级的良好耕地占总耕地面积的 85.57%, 地形条件为 III 和 IV 级的一般耕地比例为 14.17%, 只有 0.26% 的耕地地形条件为 V 级, 需要适当调整。[结论] 兴城市耕地地形条件整体较为良好, 极少数耕地地形条件差, 不宜开垦耕地, 需退耕。

关键词: DEM; 兴城市; 耕地; 地形因子; 地形条件评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0195-05

中图分类号: P931

文献参数: 吴松泽, 闫卓冉, 马剑, 等. 基于 DEM 的辽宁省兴城市耕地地形条件评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 195-199. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.031. Wu Songze, Yan Zhuoran, Ma Jian, et al. Assessment on terrain conditions of cultivated land based on DEM in Xingcheng City, Liaoning Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 195-199.

Assessment on Terrain Conditions of Cultivated Land Based on DEM in Xingcheng City, Liaoning Province

WU Songze, YAN Zhuoran, MA Jian, XU Mingchong, FAN Yusi, WANG Jianguo

(School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130000, China)

Abstract: [Objective] Taking Xingcheng City, Liaoning Province as the research area, this study evaluates and analyzes the topographic conditions of arable land in order to provide the basis for guiding crop cultivation, arable land quality evaluation, soil erosion and debris flow disaster prevention, and ecological environmental protection of the arable land. [Methods] Based on the digital elevation model (DEM), the slope, aspect, surface undulation, plane curvature and terrain roughness were selected as the evaluation factors, to evaluate the cultivated land topographic conditions by the multi-factor weighted comprehensive evaluation. [Results] The terrain condition of the arable land of Xingcheng City was as follows: 85.57% of the total arable land was good arable land of grade I and II, 14.17% was general arable land of grade III and IV, and only 0.26% was grade V. [Conclusion] The topographic conditions of arable land in Xingcheng City are relatively good as a whole. However, few arable land is in poor topographic conditions, which is not suitable to reclaim and needs to be returned to farmland.

Keywords: DEM, Xingcheng City; arable land; terrain factor; evaluation of terrain conditions.

地形因子是对地形几何特征的刻画, 不同的地形因子从不同角度反映了地表变化程度。数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 是地表形态的数字化表达^[1], 蕴含了丰富的地学应用分析所必需的地形地貌信息^[1]。数字地形分析 (digital terrain analysis, DTA) 是在 DEM 上进行地形属性计算与地形信息提

取的数字信息处理技术^[2-4]。利用 GIS 空间分析的手段可以提出 DEM 数据中隐含的地形因子特征属性值。这一技术在土地利用、环境保护及其他相关地学研究等方面的应用越来越广泛。目前, 基于 DEM 的各种地形因子分析算法已较为成熟^[5-8]。除了坡度、坡向、平面曲率、地形起伏度等传统的坡面地形因

子外^[9-11],中国学者根据不同地域特点及实际研究工作的需要,还提出了地形信息容量、地形复杂度指数^[9,12]、流水侵蚀潜能因子^[13-16]等新型地形因子。这些成果丰富了地形因子的内涵。

本文以辽宁省兴城市为研究区域,从 DEM 数据的可操作性、因子的独立性等因素出发,最终选取了坡度、坡向、地表起伏度、平面曲率、地表粗糙度 5 个因子为评价因子,从而建立完整的多因子综合加权评价体系。

研究中利用地理信息系统(geographic information system, GIS)的空间分析技术对各地形因子进行提取,并对其特征属性值进行重分类量化评价。然后对评价单元求取各地形因子的加权求和分值,即为地形条件总分。据总分将其地形得分划分不同等级可直观地评价耕地地形条件。

目前的地形条件评价方面的研究仍主要采用单一地形因子^[15]。采用多因子评价模型对耕地地形进行综合评价的研究并不十分丰富。因此,本文基于 DEM,以兴城市为例,采用了多因子综合加权评价的方法对研究区耕地地形进行了量化评价。其地形评价结果将有望为兴城市土地整治^[14],水土流失^[9]及泥石流灾害防治^[17],耕地生态环境保护等工作提供技术依据。

1 研究区资料准备

1.1 兴城市地形条件整体概况

兴城市位于辽宁省西南部,居辽西走廊东段,地理坐标为东经 120°06′—120°50′,北纬 40°16′—40°50′,东南沿海为平原,中部多为丘陵,西北部为松岭山脉低山丘陵区,整体地势呈西北高、东南低,由西北向东南倾斜的特征。耕地多分布在兴城东部。

1.2 数据准备

本文的 DEM 数据下载于空间地理数据云网(geospatial data cloud),该数据主要以高分辨率高程影像 ASTER GDEM 2 数据为基础^[17],空间分辨率为 30 m。ASTER GDEM 2 较之前一版本数据采用了更为先进的算法,提高了局部地区数据的空间分辨率精度,能够满足本次项目的数据需求。此外,本项目依托于吉林大学土地资源管理兴城教学实习,实习基地为本研究提供了矢量格式的兴城耕地土地利用现状数据。

2 研究方法

2.1 多因子综合加权评价模型的构建

综合考量兴城市耕地地形情况以及因子的可操

作性,最终选取坡度、坡向、地形起伏度、地表粗糙度、平面曲率 5 个因子作为评价因子。坡度作为基本的地形因子,直接影响水土流失程度,很大程度上决定着土地利用方式。在 GIS 中可对 DEM 采取平均坡度、最大值坡度、最小值坡度等方法计算地形坡度^[3,18]。坡向从光照、热量和水分等方面影响着耕地质量,一定程度上决定了土地利用分布格局。坡向因子在实际生产中较多使用拟合曲面法对其进行特征值的提取。地形起伏度是地表起伏变化和地表切割程度的综合表征,决定着农地机械化规模经营能否实现。局地高差法、局地标准差、表面积与投影面积比、RUGN 法、矢量法、RDLS(地表起伏度)6 种算法^[9]是地形起伏度提取的常用方法。平面曲率反映了地形结构与形态,影响着土壤有机物含量的分布。在 GIS 空间分析软件中主要通过提取 DEM 数据中的等高线并计算其弯曲程度来评价耕地质量的水文及土壤因素^[12]。地表粗糙度反映了地表的侵蚀程度,影响着风化壳的发育和保存。粗糙度的提取研究大都是基于传感器灰度图像而进行的^[13]。

本次采用了专家打分法来确定各地形因子的权重,共询问了 5 位专家老师的意见,经过两轮打分及反馈最终确定各因子权重。即建立了完整的多因子加权评价指标体系。各因子权重见表 1。

表 1 兴城市各地形因子权重

项目	坡度	坡向	地表起伏度	地表粗糙度	平面曲率
权重	0.23	0.17	0.25	0.14	0.21

2.2 建立地形因子模型

2.2.1 坡度 坡度是地表单元陡缓的程度,通常把坡面的垂直高度和水平距离的比值称为坡度。坡度通过影响物质与能量的分配决定着土地利用的方向和方式。在 ArcMap 软件(ArcGIS 10.2 for Desktop, ESRI, USA)中,通过高程变化率来计算坡度,用 Spatial Analysttools/Surface/Slope 工具对研究区 DEM 文件进行坡度提取,输出栅格大小与 DEM 相同,得到坡度文件。其公式为:

$$S = \arctan \sqrt{f(x)^2 + f(y)^2} \quad (1)$$

式中:S——坡度; $f(x)$ ——X 方向上的高程变化率; $f(y)$ ——Y 方向上的高程变化率。

2.2.2 坡向 坡向是坡面法线在水平面上的投影的方向。地形坡向对光照、热量和水分有重要影响。如北半球南坡比北坡能接收更多的太阳辐射能因而南坡土壤水分迅速蒸发,小气候较为温热干燥,

地形坡向一定程度上影响土地利用分布格局。ArcGIS 中的空间分析 spatial analyst tools/surface/slope 工具对研究区 DEM 文件进行坡度提取,输出栅格大小与 DEM 相同,得到坡度文件。其计算公式为:

$$A = \arctan(f_x/f_y) \quad (2)$$

式中: A ——坡向; $f(x)$ —— X 方向上的高程变化率; $f(y)$ —— Y 方向上的高程变化率。

2.2.3 地形起伏度 地形起伏度是指某一确定面积内最大高程点和最低高程点的的差值,反映了区域海拔高度的起伏特征。地形起伏度对农业的规模化经营有着至关重要的影响。利用 ArcGIS 中的空间分析模块中的焦点统计功能设置分析窗口后,分别设置统计类型为 max 和 min,计算分析窗口的高程最大值和高程最小值,本次选择 9×9 个栅格 ($270 \text{ m} \times 270 \text{ m}$) 为分析窗口,再使用栅格计算器相减即得到地形起伏度。其公式为:

$$U_T = H_{\max} - H_{\min} \quad (3)$$

式中: U_T ——地形起伏度; H_{\max} ——分析窗口内的高程最大值; H_{\min} ——分析窗口内的高程最小值。

2.2.4 平面曲率 平面曲率描述的是地表曲面沿水平方向的弯曲、变化情况,也就是该点所在的地面等高线的弯曲程度。平面曲率对土壤有机物含量的分布、水文特征都有重要的应用价值。因农用地中“以

水定地”,其对水的富集情况的影响,使平面曲率成为耕地地形条件评价中的重要因子。在 ArcMap 软件中其计算公式为:

$$S_C = \frac{q^2 r - 2 p q s + p^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (4)$$

式中: S_C ——平面曲率; p —— X 方向上的高程变化率; q —— Y 方向上的高程变化率; r ——对高程值在 X 方向上的变化率进行同方向求算变化率; s ——对高程值在 X 方向上的变化率在 Y 方向上进行变化率求算。

2.2.5 地表粗糙度 地表粗糙度是一种地形学意义上的粗糙度,是反映地表侵蚀程度的指标。一般定义为地表面单元的曲面面积与其在水平面上的投影面积之比^[17]在实际操作中地表粗糙度的提取基于坡向的辅助特征值,将得到的 aspect 文件带入数学公式,在栅格计算器中计算,得到地表粗糙度数据。其公式为:

$$T_R = \frac{S_{\text{曲面}}}{S_{\text{水平}}} = \frac{1}{\cos(\text{Slope})} \quad (5)$$

式中: T_R ——地表粗糙度;Slope——地形坡度(以弧度计算)。地表粗糙度的值 > 1 。

2.3 明确各地形因子定量化评价依据

参考《农用地质量分等规程》^[19]并对部分因子采取自然间断法,将兴城市各地形因子根据其特征属性值进行等级划分并规定相应得分值(见表 2)。

表 2 兴城市各地形因子等级划分及其分值

分值	坡度	坡向	地形起伏度	地表粗糙度	平面曲率
100	$0 \sim 2^\circ$	$112.5^\circ \sim 157.5^\circ, 157.5^\circ \sim 202.5^\circ$, 无坡向	$0 \sim 3$	$1 \sim 1.0053$	$-0.11 \sim 0.11$
90	$2^\circ \sim 5^\circ$				$-0.44 \sim -0.11, 0.11 \sim 0.44$
80			$3 \sim 7$	$1.0053 \sim 1.0217$	
70	$5^\circ \sim 8^\circ$	$67.5^\circ \sim 112.5^\circ, 202.5^\circ \sim 247.5^\circ, 247.5^\circ \sim 292.5^\circ$			$-0.89 \sim -0.44, 0.44 \sim 0.89$
60					
50	$8^\circ \sim 15^\circ$	$22.5^\circ \sim 67.5^\circ, 292.5^\circ \sim 337.5^\circ$	$7 \sim 14$		
40				$1.0217 \sim 1.0896$	$-2.11 \sim -0.89, 0.89 \sim 2.11$
30	$15^\circ \sim 25^\circ$	$0^\circ \sim 22.5^\circ, 337.5^\circ \sim 360^\circ$	$14 \sim 52$	$1.0896 \sim 1.4045$	
20				$1.4045 \sim 2.0212$	$-9.1 \sim -2.11, 2.11 \sim 9.11$
10	$> 25^\circ$		$52 \sim 120$		

2.4 各地形因子的提取及重分类

对 DEM 进行各地形因子的提取,生成了各地形因子的数字化分布图层。将各地形因子的特征属性值按得分标准做重分类处理,得到各地形因子的统计数据及其分级图。

2.5 确定兴城市耕地地形条件总分

2.5.1 确定评价单元 在确定兴城耕地评价单元的过程中,首先对网格法和叠置法进行了单元划分方法

优劣的评价。格网法较容易实现,但机械地将耕地划分成大小相等的评价单元不具参考价值。采用叠置法在将栅格数据转成矢量时产生很大误差,同时将各个因子进行叠加时又会产生大量碎斑。最终采用以土地利用现状图斑为评价单元的方法,将每一块耕地单元作为评价单元,本次研究区共有 18 120 个评价单元。
2.5.2 对评价单元进行综合打分 据各地形因子的权重计算各像元的地形条件总分。公式为:

$$Q = \sum W_i \times F_i \quad (6)$$

式中: Q ——该评价单元的地形条件总分; W ——地形因子的权重; F ——该地形因子的因子得分值。其具体操作为: 利用 ArcMap 软件中的“spatial analyst tools. tbx——地图代数——栅格计算器”工具, 对各地形因子进行加权求和, 输出新的栅格数据, 其像元(30 m×30 m)值即为每一像元的地形条件总分。

根据确定好的评价单元对兴城耕地地形按地块进行打分。利用“spatial analyst 工具——区域分析——以表格显示分区统计”工具, 以耕地土地利用现状图斑为地块边界, 统计其边界内像元得分均值作为各评价单元的地形条件得分。将得分表按字段连接至土地利用现状数据, 即完成了评价单元的综合打分。将通过计算得到的地形综合得分值按等级划分标准(见表 3)划分等级。

表 4 兴城市耕地各级坡度面积及比例

项目	坡度等级					
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
坡度范围	0°~2°	2°~5°	5°~8°	8°~15°	15°~25°	>25°
面积/km ²	286.61	263.73	77.30	27.54	2.12	0.25
占比/%	43.59	40.11	11.76	4.19	0.32	0.04

3.1.2 坡向 本次将研究区坡向分为 10 个方向, 4 个等级。各等级面积及比例见表 5。由表 5 可知: 兴城耕地区各坡向耕地均有分布, 其中 2 级坡向(东、西、西南坡)面积最大, 占 37.41%。但总体而言, 耕地的各等级坡向面积相差并不悬殊, 这表明在兴城市, 坡向因子不是影响耕地分布的最重要因子。

表 5 兴城市耕地各等级坡向面积及比例

项目	坡向等级			
	1 级	2 级	3 级	4 级
方向	南、东南坡、平坡	东、西、西南坡	东北坡、西北坡	北坡
面积/km ²	191.85	245.99	148.96	70.74
比例/%	29.18	37.41	22.65	10.76

3.1.3 地形起伏度 兴城市耕地地形起伏度分为 5 级, 各地形起伏度等级占比见表 6。由表 6 可知: 兴城耕地区起伏度特征值大多分布在 0~7, 其面积比为 85.14%, 可见多数的耕地地形起伏度适宜性较好; 起伏度特征值在 52~120 的耕地仅有 0.03 km², 基本可以忽略不计。此外, 仍有 14.87% 的耕地存在着不

表 3 兴城市耕地地形条件综合得分等级划分标准

等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
综合得分	90~100	80~90	70~80	60~70	0~60

3 结果与分析

3.1 各地形因子分析

将各因子按其等级划分标准对耕地进行面积的统计, 其统计结果可从各个独立因子的角度对地形进行分析。

3.1.1 坡度 将兴城市耕地坡度分为 6 级, 各坡度等级占比见表 4。结合表 4 分析, 兴城耕地区的坡度范围主要分布在从 0°~8°。其中: 2°~8°的面积最大, 为 341.03 km², 占比 51.87%。从整体上看, 兴城市属低山丘陵区。从坡度角度来讲, 兴城市的耕地坡度条件良好, 其耕地分布整体与坡度适宜性一致。

同程度的地表起伏。部分耕地的起伏度特征值较大, 这与外业调查中考察到的存在一些地区耕地呈“阶梯状”分布情况基本一致。地表起伏度地形特征对农用地规模经营具有指导性意见, 其中兴城耕地区大部分地形起伏度较小, 容易实现农用地机械经营。

表 6 兴城市耕地各级地形起伏度面积及比例

项目	地形起伏度等级				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
特征值	0~3	3~7	7~14	14~52	52~120
面积/km ²	332.70	227.10	85.22	12.53	0.03
比例/%	50.60	34.54	12.96	1.91	0.00

3.1.4 平面曲率 兴城市耕地平面曲率分为 5 级, 各曲率等级占比见表 7。由表 7 可知, 兴城耕地区平面曲率特征值大多分布在 -0.44~0.44, 其面积比例达 93.91%, 此范围内等高线弯曲程度较小, 表示范围内耕地具有及较好的土壤、水文适宜性。从总体上看, 兴城市耕地大多分布在平面曲率条件适宜的范围内, 这一结果大致与“以水定地”的规律相一致。

表 7 兴城市耕地各级平面曲率面积及比例

项目	平面曲率等级				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
特征值	-0.11~0.11	-0.44~-0.11,0.11~0.44	-0.89~-0.44,0.44~0.89	-2.11~-0.89,0.89~2.11	-9.1~-2.11,2.11~9.11
面积/km ²	359.17	258.37	34.66	5.16	0.18
比例/%	54.62	39.29	5.27	0.78	0.03

3.1.5 地表粗糙度 兴城市地表粗糙度分为 5 级(见表 8)。据表 8 可知,随着地表粗糙度特征值增大,辽宁省兴城市的耕地面积在逐级递减。特征值在 1~1.021 7 的耕地面积占到了绝大多数(98.94%),而特征值在 1.021 7~2.021 2 的耕地面积很小,基本可以

忽略不计。从地表粗糙度因子角度来看,兴城市的地表侵蚀程度较小,这些因素对土壤有机物富集有着积极的影响,良好的土壤有机物条件适宜于农作物的耕种,兴城市耕地的分布情况与地表粗糙度适宜性一致。

表 8 兴城市耕地各级地表粗糙度面积及比例

项目	地表粗糙度等级				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
特征值	1~1.005 3	1.005 3~1.021 7	1.021 7~1.089 6	1.089 6~1.404 5	1.404 5~2.021 2
面积/km ²	586.94	63.68	6.60	0.31	0.02
比例/%	89.26	9.68	1.00	0.05	0.00

3.2 地形条件总体分析

各地形因子从水文、光照、土壤有机物富集等多角度对兴城耕地地形做出了全方面的评价。而各地形因子加权求和得出地形条件总分能够较为全面且合理地反映耕地的地形条件。将地形总分按其耕地面积统计,得出量化评价结果(见表 9)。由表 9 可见,兴城市耕地地形条件分值分布为:地形条件较好(I 和 II 级)的耕地占 85.57%。只有 0.26%的耕地从地形条件上来讲不适宜(V 级)开发耕地。整体来看,兴城市耕地地形条件较为良好,其较好的地形条件为耕地质量提供了有效的保障。

表 9 兴城市耕地地形条件面积统计

地形条件	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
耕地面积/km ²	255.88	301.42	76.77	15.50	1.72
比例/%	39.29	46.28	11.79	2.38	0.26

4 结论与讨论

本文以兴城市为例,基于 DEM 对其耕地地形条件进行了逐个因子分析与综合量化评价。

(1) 各地形因子从不同角度描述了地表的变化特征。兴城市的耕地分布与坡度、地形起伏度、平面曲率、地表粗糙度 4 个因子的适宜性呈较强的一致性。而耕地的分布与坡向因子适宜性的一致性稍差。各地形因子条件可为兴城市农用地经营与管理提供

参考,如地形起伏度适宜性好的耕地可推行农用地机械化规模经营,减少劳动投入;平面曲率适宜性较差的耕地可兴建水利设施,以保证农地灌溉。

(2) 由最终地形量化综合评价的结果显示,兴城市耕地地形条件整体较为良好,其较好的地形条件为耕地质量提供了有效的保障。但兴城市仍存在 0.26%的耕地地形条件差,不适宜开垦耕地。可将这部分耕地退耕还林,同时将地形条件良好的耕地中的零星用地加以整合、开垦。既可增加绿植覆盖,从根本上改善水土流失,又保证了耕地面积退补平衡。

采用多因子综合评价的方法更加全面科学地评价耕地地形条件,从而为耕地整治、水土流失及泥石流灾害防治、耕地生态环境保护等多方面提供参考依据。

[参 考 文 献]

[1] 汤国安,李发源,刘学军. 数字高程模型教程[M]. 北京:科学出版社,2010.
 [2] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京:科学出版社,2006.
 [3] 周奎,陈楚,倪冬兰. 基于 DEM 量算耕地坡度的方法研究[J]. 城市勘测,2007(2):95-96.
 [4] 张磊. 基于核心地形因子分析的黄土地貌形态空间格局研究[D]. 南京:南京师范大学,2013.
 [5] 李天文,刘学军,陈正江,等. 规则格网 DEM 坡度坡向算法的比较分析[J]. 干旱区地理,2004,27(3):398-404.

- 的碳储量与碳通量[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 164-170.
- [15] 张云倩, 张晓祥, 陈振杰, 等. 基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 100-105, 111.
- [16] 周自翔, 李晶, 冯雪铭. 基于 GIS 的关中一天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2907-2918.
- [17] 荣月静, 张慧, 赵显富. 基于 InVEST 模型近 10 年太湖流域土地利用变化下碳储量功能[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 447-451.
- [18] 陈翼翔. 基于 GIS 的巢湖流域碳储量时空变化研究[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(5): 176-178, 204.
- [19] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593.
- [20] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(4): 58-62.
- [21] 张德全, 马玉珍, 王风臻, 等. 山东省森林碳储量计量方法的研究[J]. 山东林业科技, 2016, 46(4): 80-82, 76.
- [22] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
- [23] 代杰瑞, 喻超, 张杰, 等. 山东半岛蓝色经济区土壤有机碳储量及固碳潜力分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(5): 1659-1668.
- [24] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [25] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [26] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学: D 辑(地球科学), 2007, 37(6): 804-812.

(上接第 199 页)

- [6] 陈婷, 周汝良, 朱大运, 等. 基于 DEM 的 2 种提取地形特征线算法对比研究[J]. 林业调查规划, 2011, 36(6): 1-4, 28.
- [7] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 258-263.
- [8] 蒋好忱, 杨勤科. 基于 DEM 的地形起伏度算法的比较研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 162-166.
- [9] 杨昕, 汤国安, 刘学军, 等. 数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1058-1070.
- [10] 赵博. DEM 在耕地坡度分析统计方面的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(9): 51-52.
- [11] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.
- [12] 刘春, 孙伟伟, 吴杭彬. DEM 地形复杂因子的确定及与地形描述精度的关系[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(9): 1014-1020.
- [13] 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 203-206, 211.
- [14] 周佳宁, 秦富仓, 刘佳, 等. 敖特根其木格. 基于 GIS 的坡度、坡向提取: 以多伦多县为例[J]. 内蒙古林业科技, 2016, 42(1): 55-58.
- [15] 刘仁杰, 朱红春, 汤国安, 等. 基于 DEM 的黄土坡面流水侵蚀潜能因子初步研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 161-165.
- [16] 王雷, 汤国安, 刘学军, 等. DEM 地形复杂度指数及提取方法研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 55-58.
- [17] 刘新星, 陈毓川, 王登红, 等. 基于 DEM 的南岭东段离子吸附性稀土矿成矿地貌条件分析[J]. 地球学报, 2016, 37(2): 174-184.
- [18] 宋效东. 基于 DEM 的可视性分析综合模型及其并行算法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. GB/T28407-2012 农用地质量分等规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.