

DEM 分辨率对微地形形态的影响

魏 舟¹, 李光录¹, 任 磊¹, 杨晨辉¹, 杨 娟¹, 李柏桥¹, 刘 馨²

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 勉县水土保持工作站, 陕西 勉县 724200)

摘 要:不同的 DEM 采样间隔能够使地表微地形的概括发生变化, 导致微地形观测结果出现差异, 该文主要研究不同观测尺度条件下微地形的变化。在深耕、浅耕、裸坡和细沟 4 种地形条件下, 采用三维激光扫描仪获得 5, 10, 20 mm 的点云数据。通过地理信息相关软件对点云数据加以处理分析, 提取不同尺度条件下各类微地形的坡度、坡向、坡度变化率和坡向变化率; 通过坡度、坡向定性研究微地形变化与观测尺度之间的相关性, 通过对坡度变化率、坡向变化率的研究得出坡度、坡向的变化值域。不同地形条件的微地形在不同观测尺度下变化有明显差异。坡度在 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$, $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$, $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 变化均一; 坡向受观测尺度影响主要集中在阳坡和半阳坡; 坡度变化率和坡向变化率表明观测尺度越细微地形坡度坡向变化情况越显著, 从 10, 20 mm 观测尺度下的 $0 \sim \sqrt{3}/3$, $\sqrt{3} \sim \infty$ 两个取值区间逐渐迁移到在 5 mm 尺度条件下的 $\sqrt{3} \sim \infty$ 。

关键词:微地形; 坡度; 坡向; 坡度变化率; 坡向变化率

中图分类号:P951

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0105-06

Effect of DEM Resolution on the Micro Relief

WEI Zhou¹, LI Guanglu¹, REN Lei¹, YANG Chenhui¹, YANG Juan¹, LI Baiqiao¹, LIU Xin²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Water and Soil Conservation Station of Mianxian, Mianxian, Shaanxi 724200, China)

Abstract: Different sampling intervals of DEM can change space surface of micro relief, and lead that the observation of micro relief shows the divergence. This paper examined the change of microtopography based on different scale of observation. In four kinds of topography, i. e. deep ploughing, zero tillage, bare slope, and rill, point cloud data at 5, 10, 20 mm were acquired using 3D laser scanning. Gradient, slope direction, slope variability and slope aspect variability on different scales were obtained through the analysis on the point cloud data with Geographic Information System software. The interdependency between micro relief change and observation scale was studied with slope gradient and slope aspect. And the scopes of slope gradient and slope aspect change were acquired by studying slope variability and slope aspect variability. The micro topography of different topographic condition under different scales of observation has visible difference. When the slope gradients are $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$, $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$, $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ and $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$, it changes relatively equally; the slope aspect effect of observation scale concentrates on sunny slope and semi-sunny slope; slope variability and slope aspect variability show that the smaller the observation scale is, the more apparently the slope gradient and slope aspect change, and value with range from $0 \sim \sqrt{3}/3$ to $\sqrt{3} \sim \infty$ in the observation scale of 10 mm and 20 mm gradually shifts to $\sqrt{3} \sim \infty$ on the scale of 5 mm.

Keywords: micro relief; slope gradient; slope aspect; slope variability; slope aspect variability

三维激光扫描技术始于 20 世纪 70 年代, 具有大
量程、大视场、高精度、光条图像信息易提取、实时
性强及主动受控等特点, 近年来得到广泛应用^[1]。
激光扫描可以快速准确获取实体表面的三维坐标
并以“点云”数据形式存储到计算机中, 避免了传统观

测技术在观测过程中对地表微地形变化所造成的人
为影响^[2]。

地表微地形是在一定尺度的地表上, 用以描述地
表微地貌的随机性或不规则性^[3]。坡度与坡向是两
个相互联系参数, 前者反映斜坡倾斜程度, 后者反

映斜坡面对方向^[4-5]。坡度、坡向的计算方法有很多:(1) 基于格网 DEM 的坡度坡向计算,如最大坡降算法^[6]、局部曲面拟合法^[7]、空间矢量法^[8]、快速傅里叶变换^[9]、当 DEM 坐标系为经纬度时的坡度坡向计算;(2) 基于 TIN 的坡度坡向计算,如拟合平面法、矢量法;(3) 基于等高线模型的坡度坡向计算,坡度变化率、坡向变化率是对坡度、坡向变化情况度量的指标。实际上坡度变化率、坡向变化率与解析几何中的直线方程的斜率有着相同的几何意义,这两个因子在地貌形态、结构研究中具有重要意义^[5]。一般认为分辨率粗略化会造成 DEM 在表达地形时舍去小的地形起伏,表现出大的地形起伏,坡度、坡向的平均值减小^[10-13],坡度变化率和坡向变化率也会发生相应的变化,周启鸣^[5]、李志林^[14-16]等在 DEM 自身精度的评定对其坡度等地形因子精度的影响上做了大量的研究,并将该研究归为尺度问题^[15]。一般研究地形观测尺度多集中在较大的地域范围内^[10,17-19],对于微地形与观测尺度之间的相关性研究却不多见,基于此本文对微地形与观测尺度的相关性做了一定的研究。

研究采用 5, 10, 20 mm 的点云数据生成的 DEM,提取坡度、坡向、坡度变化率和坡向变化率 4 个因子,探讨在不同地形和观测尺度条件下,几种因子与观测尺度之间的相互关系,观察地形因子变化受观测尺度的影响情况。基于坡度、坡向两种基本地形因子的研究,判断地形因子受观测尺度影响的变化趋势,利用坡度变化率和坡向变化率量化各种观测尺度条件下不同地形坡度、坡向的变化。

1 研究方法

1.1 数据来源

研究区位于陕西杨凌北部的一处裸露坡面,平均坡度 15°,地理位置为 108°04'25"E, 34°18'40"N。该地地处黄土高原南缘,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量约 637.6 mm,土壤为壤土,灰棕色,土体较疏松,有粒状或团块状结构,土壤颗粒以粉沙为主。沿坡面构建了 8 组观测小区,面积为 1 m×2 m;设立 20 cm 深层耕作、10 cm 浅层耕作、耙平裸坡、15 cm 细沟 4 种地形条件,每种地形条件采用一组对照。数据采集使用拓普康三维激光扫描仪 (GLS-1500),采用 5, 10, 20 mm 三种尺度获取坡面点云数据;对于起伏较大的地形采用多站扫描的方式避免地形起伏对观测结果产生影响。为了避免小区边缘挡板对观测结果造成影响,在数据处理过程中选取观测区域内部 0.8 m×1.5 m 的范围作为最终数据来源区。

1.2 数据处理

三维激光扫描仪获得的数据为点云数据,无法直接使用,必须通过仪器所带的数据处理和转换软件 Scan master 将数据转换为第三方软件可识别的数据格式;多测站数据需要通过拼接才能更完整地描述地表起伏变化。研究过程中采用 ArcGIS 10.1 作为数据处理软件,选用数据格式为 .TXT 格式数据。

坡度和坡向是表达地形曲面结构和形态的基本参数之一,也是土壤侵蚀模型、土地利用分类等环境模型的基本变量,在地貌、地理、土壤、资源与环境等领域有着广泛应用;数据处理过程中将坡度分为 9 个坡度段:0°~3°, 3°~5°, 5°~8°, 8°~15°, 15°~25°, 25°~35°, 35°~45°, 45°~60°, 60°~90°。坡向反映斜坡面对的方向,定义为某点的法线正方向在平面的投影与正北方向的夹角^[5],按顺时针方向计算坡向范围为 0°~360°,坡向分类采用四分法:阳坡 (157.5°~247.5°)、半阳坡 (112.5°~157.5°, 247.5°~292.5°)、半阴坡 (67.5°~112.5°, 292.5°~337.5°)、阴坡 (337.5°~22.5°, 22.5°~67.5°) 和平面。

坡度变化率和坡向变化率是对地形基本因子坡度、坡向变化情况进行度量的指标,是地形单元中坡度变化的描述或者说坡度和坡向的坡度^[5]。数据处理过程中将坡度变化率、坡向变化率分为:0°, 0°~30°, 30°~45°, 45°~60°, 60°~90°五个等级。

坡度、坡向投影面积和坡度变化率、坡向变化率的计算:通过 ArcGIS 软件的空间分析模块能够快速获取坡度、坡向等地形信息,将不同图层叠加分析,统计不同地形类型的栅格数,用栅格数乘以栅格面积可以得出相同坡度、坡向的投影面积,研究中坡度坡向的提取主要使用最大坡降法。坡度变化率和坡向变化率则是根据坡度变化率、坡向变化率的计算公式在 ArcGIS 中完成,并统计各个等级的坡度、坡向变化率所占栅格数,栅格数乘以栅格面积就能得出对应的坡度变化率、坡向变化率面积。

基于格网 DEM 的坡度坡向的计算方法很多:(1) 最大坡降法。利用中心格网点与周围八个格网点的高程差计算坡度坡向;(2) 局部曲面拟合法。在 3×3 的窗口中用以拟合的曲面主要有线型平面、二次曲面、不完全四次曲面;(3) 空间矢量法。基于空间矢量运算得出坡度坡向的计算公式;(4) 快速傅里叶变换。在空间频率域中以功率谱形式表示,可以通过离散的正反傅里叶变化进行坡度坡向计算;(5) 当 DEM 坐标系为经纬度时的坡度坡向计算。综合以上几种计算坡度、坡向以及坡度变化率、坡向变化率的方法最终选择最大坡降法作为本文采用的算法。

在 DEM 上进行坡度变化率与坡向变化率的计算,与坡度、坡向的计算方法、DEM 的结构以及计算单元有关^[20],数据处理过程中采用最大坡降法来计算坡度变化率、坡向变化率。

1.3 统计分析

将从 ArcGIS 中提取出的坡度、坡向、坡度变化率和坡向变化率数据录入 Excel 中进行初步的计算,得出相应的投影面积百分比,将对应的投影面积百分比数据导入 Origin 9.1 中进行最后的统计分析,得出相应的结论。

2 结果与分析

2.1 坡度分析

坡度一般用来计算任一单元和领域单元间变化的最大比率。输出数据中的每个单元都有一个坡度值,坡度值较低则表明地势较平坦,坡度值较高则地势较为陡峭。坡度是衡量地形起伏变化的重要指标之一,观测尺度的变化对于坡度变化的影响也很明显。在整个试验过程中采用了起伏变化不同的地形特征并应用不同的观测尺度对地表形态进行观测。

不同尺度由于采样点的不同导致对地表起伏状态描述不同会使得观测结果产生相应的差异。

图 1 反映了不同尺度和地形条件下,坡度与坡度投影面积百分比的变化。在坡度最小的 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$,深耕、裸坡坡度投影面积百分比与尺度变化无规律,浅耕、细沟随着尺度减小呈现出投影面积百分比增长; $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$,深耕、浅耕随着观测尺度减小坡度投影面积比例增加,裸坡、细沟,投影面积比例则随着尺度减小而减小; $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$,深耕地形坡度随着尺度变化没有规律性,浅耕随着观测尺度减小坡度投影面积百分比减小,裸坡、细沟投影面积百分比则在此坡段随尺度减小增加; $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$,4 种地形坡度投影面积百分比均随着观测尺度的减小而减小; $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$,深耕和浅耕随着观测尺度变化坡段投影面积百分比减小,裸坡和细沟则在此坡段随着观测尺度的减小坡度投影面积增加; $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,深耕随着尺度减小呈现出不规则变化,浅耕、裸坡和细沟则在此坡段随着观测尺度的减小投影面积增大; $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$, $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$,4 种地形条件的坡段投影面积百分比均随着观测尺度的减小而增加。

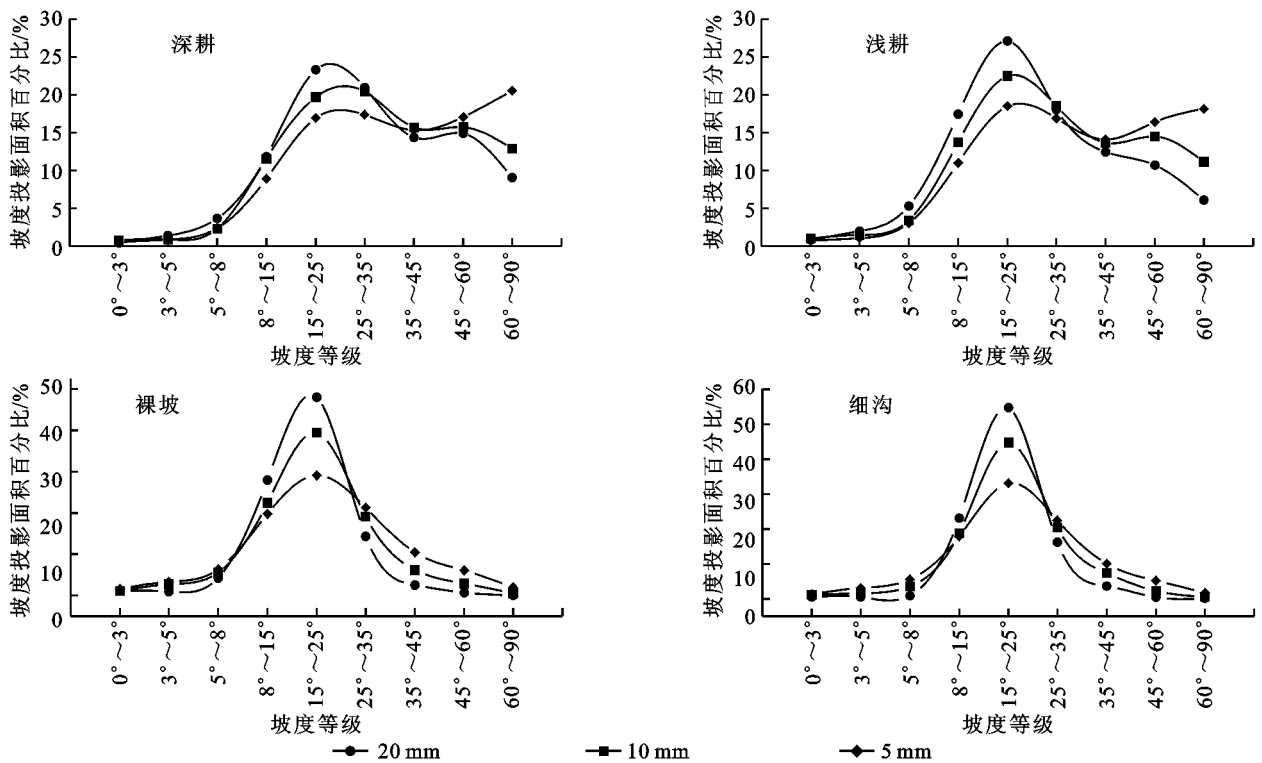


图 1 不同观测尺度下坡度与坡度投影面积百分比变化

在不同尺度条件下,不同地形观测尺度不同坡度投影面积出现明显的变化,这是由于采样点密度不同使得生成的栅格 DEM 分辨率不同,一般认为分辨率粗略化会造成在表达地形时舍去小的地形起伏,表现出大的地形起伏特征,坡度的平均值减小^[21-22]。

4 种地形条件下坡度投影面积的均值、标准差

(表 1),呈现出随着观测尺度的减小而增大的趋势;变异系数在深耕和浅耕条件下,随尺度减小而减小,裸坡和细沟条件下,随观测尺度减小而增大;最大坡度在 4 种耕作条件下均随着观测尺度的减小而增大,且地形起伏越小增大的情况越显著。

坡度的最小值在 20 mm 观测尺度条件下深耕、

裸坡和细沟 3 种地形观测得到最小值为非零数,说明观测尺度对得到的坡度投影面积影响较大,且随着观

测尺度的粗略化,观测坡度与真实坡度之间的差异性越显著。

表 1 不同地形和观测尺度下坡度变化

坡度等级	深耕			浅耕			裸坡			细沟		
	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm
均值	32.53	35.14	39.65	27.87	32.64	37.36	18.6	20.76	23.46	19.98	21.69	23.47
标准差	17.92	19.31	21.31	16.83	19.2	21.16	7.87	10.96	13.94	7.53	10.28	13.18
变异系数	0.551	0.550	0.537	0.604	0.588	0.566	0.423	0.528	0.594	0.377	0.474	0.562
最大坡度	88.48	88.89	89.02	88.29	88.28	88.56	78.12	83.26	84.25	83.55	85.78	85.4

2.2 坡向分析

提取 4 种地形,3 种观测尺度条件下的坡向,采用投影面积的百分比作为度量,研究坡向与观测尺度之间的关系。

由图 2 可以看出,深耕在 3 种观测条件下,坡向投影面积百分比在 4 个坡向均匀分布,在阳坡和阴坡方向上虽然有明显的变化,但变化无规律,这可能是由于观测过程中地面起伏较大影响了扫描仪对于坡面真实形态的观测;在半阳坡和半阴坡坡向,呈现出随着尺度减小而减小,说明观测时所设置的测站更有利于观测半阳坡和半阴坡。

浅耕地形在 20 mm 观测尺度条件下,坡向投影面积百分比在各个坡向分段中均匀分布;10,5 mm 观测尺度下,阳坡、半阳坡坡向投影面积占据比例较大,阳

坡随着尺度减小坡向投影面积比例增长,说明在该坡向上与观测尺度呈负相关,半阳坡 20—10 mm 呈现大幅度增长,10—5 mm 尺度又出现投影面积减小的趋势,半阴坡和阴坡 20—10 mm 尺度呈减小趋势,10—5 mm 尺度呈现增加趋势,说明在浅耕地形条件下半阳坡、阴坡、半阴坡几个坡向随着观测尺度变化坡向投影面积变化比较复杂。

裸坡的坡向投影面积百分比在各个观测尺度条件下,均集中在阳坡、半阳坡两个坡向方位上,在阳坡方位上坡向投影面积百分比与观测尺度负相关,其余 4 个坡向尺度条件下均呈现出不明显的变化;浅沟地形中坡向在阳坡和半阳坡坡向分布比例较大,在阳坡、阴坡、半阴坡 3 个坡向方位上呈现出与观测尺度负相关,在半阴坡呈正相关性。

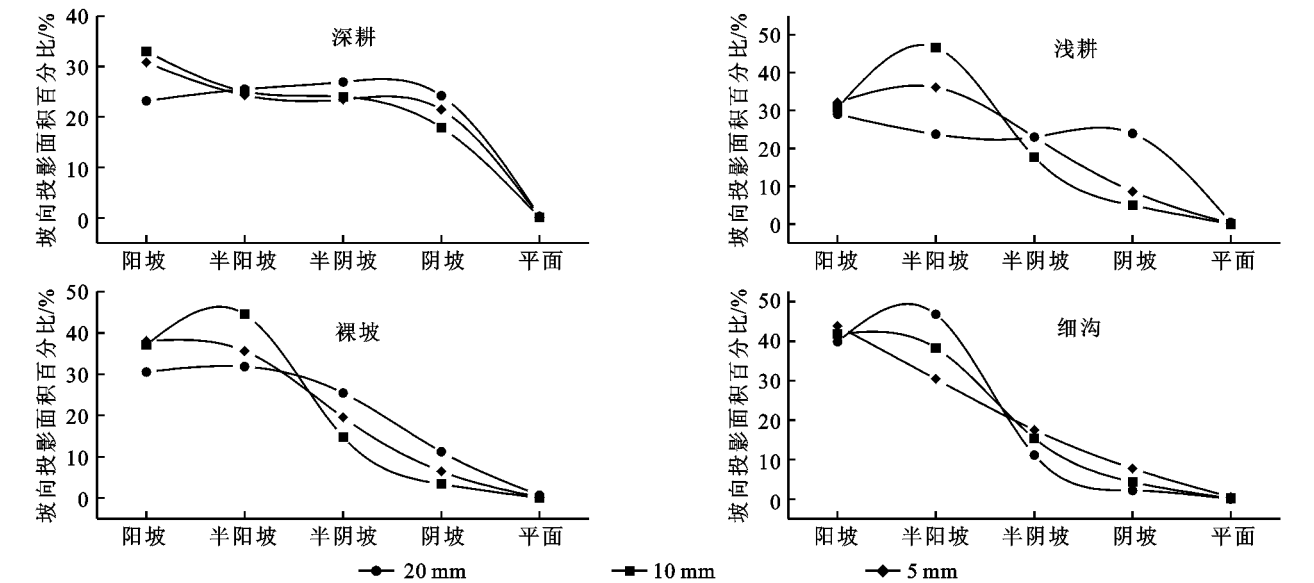


图 2 不同观测尺度下坡向与坡向投影面积变化

不同观测尺度条件下坡向的最大值、最小值、平均值等变化参数见表 2,在 20 mm 尺度下裸坡、细沟、深耕都无法观测到平面,最大值无法达到 360°,这是由于观测尺度对地表概括能力较低,忽略了较小的地形起伏;均值和标准差的变化能够很好地显示较小的观测尺度,对地表真实情况的描述能力较强。

2.3 坡度和坡向变化率分析

坡度和坡向变化率也可以称之为坡度的坡度和

坡向的坡度。地表粗糙度不同侵蚀过程中侵蚀的速率就不同,研究坡度和坡向变化率能够反映出不同地形条件下地表粗糙度的差异,同时也能反映出由于观测分辨率的差异对各地形地表粗糙度的观测结果差异,具有重要的意义。表 3 可以看出,4 种地形在 20 mm 观测尺度条件下,坡度变化率多数分布在 0~ $\sqrt{3}/3$, $\sqrt{3}\sim\infty$ 两个区间段内;在 10 mm 观测尺度条件下,深耕小区在 0, $\sqrt{3}\sim\infty$ 两个区间段分布较多,浅

耕、裸坡和细沟小区在 $0\sim\sqrt{3}/3, \sqrt{3}\sim\infty$ 两个区间较分布在 $\sqrt{3}\sim\infty$ 区间段内部。说明观测尺度对于坡度多;5 mm 观测尺度条件下,4 种地形坡度变化率多数变化率的影响非常显著。

表 2 不同地形和观测尺度下坡向变化

坡向 分级	深耕			浅耕			裸坡			细沟		
	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm
最小值	0.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.00	-1.00	-1.00	0.00	-1.00	-1.00
最大值	359.90	360.00	360.00	360.00	360.00	360.00	359.99	360.00	360.00	359.89	359.97	360.00
平均值	170.20	165.40	166.82	168.26	167.60	168.19	149.63	150.64	152.05	153.32	155.14	152.79
标准差	97.24	98.88	100.39	88.34	93.62	97.93	54.77	65.47	73.56	40.96	51.03	58.78

表 3 坡度变化率分级与投影面积百分率

值域	深耕			浅耕			裸坡			细沟		
	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm
0	8.31	65.14	2.15	7.94	4.16	1.10	10.63	5.91	2.04	9.68	6.71	2.49
$0\sim\sqrt{3}/3$	43.26	0.00	9.75	38.53	19.48	5.11	44.66	27.46	8.23	47.98	30.84	10.45
$\sqrt{3}/3\sim 1$	5.10	0.00	0.82	4.74	2.04	0.52	6.67	3.96	1.28	7.27	4.19	1.51
$1\sim\sqrt{3}$	1.31	0.00	0.26	0.92	0.38	0.11	1.91	1.05	0.29	1.21	0.87	0.31
$\sqrt{3}\sim\infty$	42.02	34.86	87.01	47.87	73.94	93.16	36.14	61.62	88.16	33.85	57.39	85.25

由表 4 可以看出,在 20 mm 观测尺度条件下,4 种地形的坡向变化率一致性较高,主要分布在 $0\sim\sqrt{3}/3, \sqrt{3}\sim\infty$ 两个区间内,其他区间内都分布较为均匀;10 mm 观测尺度条件下,主要分布在 $0\sim\sqrt{3}/3, \sqrt{3}\sim\infty$ 两个区间内,其中 $0\sim\sqrt{3}/3$ 区间内比例减小, $\sqrt{3}\sim\infty$ 区间内比例增加情况较为明显,增长规律为:细沟>浅耕>裸坡>深耕;5 mm 观测尺度条件下,观测得到的坡向变化率多数集中在 $\sqrt{3}\sim\infty$ 区间段内,且此时浅耕小区所占的比例最高,深耕小区所占的比例最小。

表 4 坡向变化率分级与投影面积百分率

值域	深耕			浅耕			裸坡			细沟		
	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm	20 mm	10 mm	5 mm
0	8.37	5.27	2.23	8.03	4.26	1.25	10.68	6.20	2.29	9.69	7.05	2.86
$0\sim\sqrt{3}/3$	23.78	14.82	6.11	18.41	9.80	2.67	15.38	9.93	2.86	18.26	12.60	3.64
$\sqrt{3}/3\sim 1$	9.82	6.19	1.83	8.89	4.61	1.20	11.99	7.11	1.88	13.82	8.14	2.50
$1\sim\sqrt{3}$	7.86	4.14	1.51	7.67	3.35	0.92	11.60	6.73	1.95	13.36	7.41	2.54
$\sqrt{3}\sim\infty$	50.17	69.57	88.32	57.01	77.98	93.96	50.35	70.02	91.02	44.87	64.80	88.46

3 结 论

(1) 在 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}, 15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 两个坡段,4 种地形坡度投影面积变化趋势比较均一,且均与观测尺度呈正相关;在 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}, 60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 两个坡度段,4 种地形坡度投影面积变化与观测尺度呈负相关性,坡度随观测尺度的粗略化发生了较大变化,说明在较高的坡度段随着观测分辨率的减小对地表微起伏的概括变得粗略。

(2) 在阳坡方位上浅耕、裸坡、切沟 3 种地形坡向投影面积比例与观测尺度呈现正相关,在半阳坡、半阴坡与深耕呈负相关,其余 3 种地形无相关性,在阴坡面和平面则 4 种地形均无相关性。

(3) 坡度变化率在 10 mm 浅耕条件下发生复杂变化,其余 3 种地形均属于规则变化;在 20 mm 观测尺度下,坡度变化率主要分布在 $0\sim\sqrt{3}/3, \sqrt{3}\sim\infty$ 两

个区间段内;5 mm 观测尺度条件下,坡度变化率主要分布在 $\sqrt{3}\sim\infty$ 区间段内部;坡向变化率在 10, 20 mm 尺度条件下均集中在 $0\sim\sqrt{3}/3, \sqrt{3}\sim\infty$ 两个区间内,在 5 mm 尺度条件下则集中在 $\sqrt{3}\sim\infty$ 。

参考文献:

[1] 朱良君,张光辉. 地表微地形测量及量化方法研究综述[J]. 中国水土保持科学,2013,11(5):114-122.

[2] 张国辉. 基于三维激光扫描仪的地形变化监测[J]. 仪器仪表学报,2006,27(S1):96-97.

[3] 郑子成,吴发启,何淑勤,等. 片蚀与细沟间侵蚀过程中地表微地形的变化[J]. 土壤学报,2011,48(5):931-937.

[4] 常存,朱清科,张岩,等. 黄土高原沟壑区地形分异特征[J]. 东北林业大学学报,2013,41(2):102-106.

[5] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[J]. 测绘与空间地理信息,2007,30(3):146-146.

- [6] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28(3): 323-344.
- [7] Wood J. The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models [D]. Leicester: University of Leicester, 1996.
- [8] Ritter P. A vector-based slope and aspect generation algorithm [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987, 53(8): 1109-1111.
- [9] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications [J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1): 3-30.
- [10] 刘学军, 张平. DEM 坡度、坡向有效尺度范围 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(12): 1254-1258.
- [11] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性 [J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 824-830.
- [12] 邓仕虎, 杨勤科. DEM 采样间隔对地形描述精度的影响研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(2): 23-26.
- [13] Vaze J, Teng J, Spencer G. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(10): 1086-1098.
- [14] 陈楠. 基于地形因子信息量的数字高程模型分辨率的选择: 以黄土高原的研究为例 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(6): 692-695.
- [15] 胡鹏. 新数字高程模型: 理论、方法、标准和应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 2007: 46-64.
- [16] 李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 60-72.
- [17] 汤国安, 刘学军, 房亮, 等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(12): 1059-1066.
- [18] Famiglietti J S, Rudnick J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hill slope transects: Rattlesnake Hill, Texas [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1): 259-281.
- [19] Western A W, Grayson R B, Bloch G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 797-810.
- [20] 牟乃夏, 刘文宝, 王海银. ArcGIS 10 地理信息系统教程 [M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [21] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度制图图中坡度分级方法的比较研究 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 157-160, 192.
- [22] 陈楠. DEM 分辨率变化对坡度误差的影响 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2013, 38(5): 594-598.

(上接第 104 页)

- [10] 龚斌, 王凤玉, 张继平, 等. 中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1275-1281.
- [11] 张劲松, 孟平, 王鹤松, 等. 华北石质山区刺槐人工林的土壤呼吸 [J]. *林业科学*, 2008, 44(2): 8-14.
- [12] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带 3 种主要人工林的土壤呼吸动态 [J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2006, 35(3): 272-277.
- [13] 吴仲民. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 416-423.
- [14] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23-27.
- [15] Dörr H, Münnich K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone [J]. *Tellus B*, 1987, 39(1-2): 114-121.
- [16] 彭家中, 常宗强, 冯起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 165-169.
- [17] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [18] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [19] 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸 [J]. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 45-51.
- [20] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851-866.
- [21] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains [J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(1): 15-23.
- [22] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.