

DEM 分辨率对集约化蔗区小流域水文连通性指数的影响

康振威, 明雪, 黄智刚

(广西大学农学院, 广西南宁 530004)

摘要: [目的] 探究集约化蔗区小流域地表微地形特征参数与水文连通性指数随 DEM 不同分辨率的变化以及水文连通性指数的最佳 DEM 分辨率, 为后续水文连通性相关研究、农业面源污染及土壤侵蚀等研究提供理论依据与参考。[方法] 基于 ArcGIS 与无人机高分辨率影像, 利用分区统计等方法, 以中国南方集约化蔗区小流域为例, 研究了 DEM 不同分辨率(分别为 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 m)对地表微地形特征参数(坡度、坡长、表面粗糙度和地表粗糙度)以及水文连通性指数 IC(index of hydrological connectivity)的影响。[结果] ①随着像元尺寸(5~0.05 m)的减小, 平均坡度(S)、平均表面粗糙度(S_R)分别增加了 29.13%与 1.62%, 平均地表粗糙度 SDE 与平均坡长因子 L 分别减少了 98.72%与 72.09%。新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树的平均坡度(S)呈增加趋势, 坡长因子(L)呈减小趋势、表面粗糙度(S_R)先减小(5~1 m)后增大(1~0.05 m), 地表粗糙度 SDE 均呈减小趋势, 道路的坡度(S)与表面粗糙度(S_R)均先减小(5~1 m)后增大(1~0.05 m), 河道的坡长因子先增加(5~2 m)后减小(2~0.05 m)。②水文连通性指数 IC 均值表现为先增加(5~0.2 m)后减小(0.2~0.05 m), 不同土地利用类型的 IC 均值差异在 0.5 m 时达到最大(34.72%), 0.1 m 分辨率下 IC 均值排序为: 河道>新植甘蔗>甘蔗西瓜间作>宿根甘蔗>道路>桉树。③桉树、道路、河道最佳 DEM 分辨率为 0.5 m, 新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作最佳 DEM 分辨率为 0.1 m, 集约化蔗区小流域最佳 DEM 分辨率为 0.1 m。[结论] DEM 分辨率显著影响 IC 值大小与地表微地形特征参数, 且不同土地利用类型所受影响不同。0.1 m 是集约化蔗区小流域水文连通性及地表微地形表征的最佳 DEM 分辨率。

关键词: DEM 分辨率; 水文连通性指数; 地表微地形特征; 集约化; 蔗区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0198-10

中图分类号: P333, S126

文献参数: 康振威, 明雪, 黄智刚. DEM 分辨率对集约化蔗区小流域水文连通性指数的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 198-207. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.027; Kang Zhenwei, Ming Xue, Huang Zhigang. Effects of DEM resolution on hydrological connectivity index of small watershed in intensive sugarcane area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 198-207.

Effects of DEM Resolution on Hydrological Connectivity Index of Small Watershed in Intensive Sugarcane Area

Kang Zhenwei, Ming Xue, Huang Zhigang

(College of Agronomy, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The response of surface microtopography characteristic index, and hydrological connectivity (IC) index to different resolutions of digital elevation model (DEM) was studied, and the best DEM resolution of IC was determined in a small watershed of an intensive sugarcane production area in order to provide a theoretical basis and reference for subsequent research on hydrological connectivity, agricultural non-point source pollution, and soil erosion. [Methods] The effects of different resolutions of DEM (0.05,

收稿日期: 2021-08-23

修回日期: 2021-10-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“酸性富硒土壤硒素赋存特征及其有效化过程中微生物作用及机制”(41967006); 广西科技重大专项“集约化农区面源污染综合防控体系与示范”(AA17204078); 广西科技重大专项(桂科 AA17202005-1)

第一作者: 康振威(1997—), 男(汉族), 山西省朔州市人, 硕士研究生, 研究方向为水文连通性、农业面源污染以及地理信息系统技术。Email: 1917392015@st.gxu.edu.cn.

通信作者: 黄智刚(1971—), 男(壮族), 广西壮族自治区南宁市人, 博士, 副教授, 主要从事面源污染防治、土壤质量调查与评价、遥感技术与地理信息系统技术研究。Email: hzg@gxu.edu.cn.

0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, and 5 m) on surface microtopography characteristics [slope (S), slope length (L), surface roughness (S_R), standard deviation of elevation (SDE), and IC] were studied in an intensive sugarcane planting area in Southern China using ArcGIS and high-resolution images from an unmanned aerial vehicle (UAV). [Results] ① A decrease in pixel size (5—0.05 m) increased mean S and S_R by 29.13% and 1.62%, respectively, but decreased mean SDE and L by 98.72% and 72.09%, respectively. The decreased resolution increased the mean S of newly planted sugarcane, perennial sugarcane, newly planted sugarcane+watermelon, and *Eucalyptus*, but decreased their L . In contrast, their S_R first decreased at 5—1 m and then increased at 1—0.05 m, while SDE decreased generally. However, the S and S_R of the road decreased first at 5—1 m and then increased at 1—0.05 m, while L of the river increased first at 5—2 m, and thereafter decreased at 2—0.05 m. ② Mean IC increased first at 5—0.2 m, and then decreased at 0.2—0.05 m. The difference in mean IC of different land use types reached its maximum value (34.72%) at 0.5 m. At 0.1 m resolution, IC followed the order of river>newly planted sugarcane>newly planted sugarcane+watermelon>perennial sugarcane>road>*Eucalyptus*. The best DEM resolution for *Eucalyptus*, roads, and rivers was 0.5 m, while 0.1 m resolution was best suited for newly planted sugarcane, perennial sugarcane, and newly planted sugarcane+watermelon. ③ The best DEM resolution for a small watershed in an intensive sugarcane area was 0.1 m. [Conclusion] DEM resolution had a significant effect on IC and index of surface microtopography characteristics, with varied effects for different land use types. The optimal DEM resolution of 0.1 m was best suitable for the characterization of a small watershed in an intensive sugarcane area.

Keywords: DEM resolution; index of hydrological connectivity; index of surface microtopography characteristics; intensification; sugarcane area

真实地表的精细绘制对于地表参数获取以及水文分析至关重要,DEM (digital elevation model, 数字高程模型)的分辨率或者是像元大小会对流域边界划分、径流路径模拟、流量计算、地表特征提取等造成影响^[1-3]。低分辨率的 DEM 数据集会消除重要的地形特征因此无法完整的表现自然地形的空间异质性^[4],形成更加连续与界限不明确的景观,在计算分析时可能会产生与实际不符的结果^[5];而过高分辨率的 DEM 数据集可能会包含错误或不必要的的数据,给分析带来许多误差或偏差^[6]。因此根据研究目标选择合适的分辨率至关重要。

已有许多学者在 DEM 分辨率对水文分析包括连通性方面的影响做了大量研究。例如, Habtezion 等^[4]在不同尺度分别设置了 9 种(2~80 cm)与 4 种(2~90 cm)DEM 分辨率,探究其对水文连通性量化、水文模拟以及地表微地形特征的影响。他们发现,越大的 DEM 网格越倾向于消除重要的地表特征。例如,去除低洼地带,会增加水文连通性;Yang 等^[7]分析不同 DEM 分辨率下地表洼地特征的变化,并结合 P2P 模型(puddle-to-puddle modelling, 洼地到洼地陆上流量模型)得到较低 DEM 分辨率会高估水文连通性并且简化水文路径的结论,证明了 DEM 分辨率对水文连通性的显著影响;但 Cantreul 等^[8]在对比 8 个不同像元大小(0.25~10 m)DEM 下的泥沙连通性发现像素越小,泥沙连通性强;同样的,

López-Vicente 等^[9]在一个农业子流域基于 6 个不同分辨率 DEM,对水文连通性和地表微地形特征分析后发现,分辨率越高,水文连通性越差。以上关于 DEM 分辨率对连通性影响的研究结论各不相同,甚至出现相反的观点,很难达成一致的结果。但大部分研究均认为,连通性的变化主要由物理因素控制,而各研究之间的不确定性通常与流域或研究区的独特异质性有关。同时,上面的研究都没有提及 DEM 分辨率如何影响集约化蔗区小流域的水文连通性。

甘蔗是全球重要的糖料作物,具有重要的经济意义,其高效、清洁生产至关重要^[10]。近年全球甘蔗种植面积与产量大幅扩增,但是其生产过程中的环境问题没有得到重视^[11]。甘蔗可宿根栽培,但长期宿根栽培会带来甘蔗产量与质量下降以及土壤板结等环境问题^[12],因此翻地新植是普遍的种植方式,这会在不同程度上加重甘蔗养分流失^[13]。同时新植甘蔗整地开沟还会影响地表水文路径。因此在甘蔗种植区的水文分析中需要较高分辨率的 DEM,来正确模拟地表径流,为水土流失治理提供正确导向。鉴于此,本文就集约化蔗区小流域探究 DEM 分辨率对地表微地形特征参数及水文连通性指数的影响,并提出蔗区水文连通性研究的最佳分辨率。本研究旨在改善水文连通性指标,并为水文连通性、农业面源污染及土壤侵蚀等研究提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国广西壮族自治区珠江流域左江那辣小流域(东经 107°39'29"—107°40'17", 北纬 22°20'50"—22°20'36")进行。流域面积为 1.29 km², 主要土壤类型为赤红壤, 土壤容重为 1.4~1.8 g/cm³。整个流域地形起伏较大, 海拔为 111.8~195.7 m, 坡度为 0°~55.6°, 平均坡度为 8.2°。该地区属于湿润的亚热带气候, 年均气温 13.8~28.1 °C, 年均降水量 1 400 mm, 年降雨量的 80% 以上集中在 3—9 月。流域为集约化种植区, 主要作物为甘蔗, 面积占比 80% 左右, 桉树约占 15%, 道路、河道、裸地等比例约 5%。

1.2 数字高程模型采集与处理

本试验原始 DEM 基于无人机“大疆精灵 4 RTK (DJo Phantom 4 RTK)”采集的航拍照片建立。飞行在 2021 年 4 月进行, 以确保土地尽可能裸露。飞行参数(覆盖区域、飞行高度、起飞和降落方向、图像比例等)均设定为固定值, 并全部自动化飞行以保证成像结果。飞行任务共拍摄了 2 905 张图片, 航向重叠度设置为 80%, 旁向重叠度设置为 85%, 详细信息见表 1。影像采集后使用 Pix4Dmapper 4.4.9 进行图像拼接并附加生成 DEM, 所得 DEM 误差详见表 2。随后使用研究区矢量图层对 DEM 进行裁剪得到研究区 DEM 栅格图。研究中使用的 7 个 DEM 是通过 ArcGIS 根据每个 DEM 的预期分辨率调整得到的。

表 1 DEM 基本信息

项目	参数值
面积覆盖/hm ²	168.93
飞行高度/m	80
图像数量/n	2 905
已校准的图像数量/n	2 844
点云连接点数量/n	3.38E+08
地面分辨率/(m · pixel ⁻¹)	0.02
重新投影误差/pixel	0.09

表 2 DEM 误差值

项目	方位	参数值
绝对地理误差/m	x	0.09
	y	0.01
	z	0.11
相对地理误差/m	x	0.02
	y	0.02
	z	0.05
平均投影误差/pixel		0.09

1.3 水文连通性指数计算

IC(index of connectivity, 连通性指数)指数法是

一种被广泛使用的量化水文连通性的方法, 它能够表示流域中不同部位之间的连接程度。对于栅格图中每一个像元, IC 值由以下计算公式得出^[14]。

$$IC_k = \lg \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \lg \left(\frac{\bar{w}_k \bar{S}_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=k, nk} \frac{d_i}{w_i S_i}} \right) \quad (1)$$

式中: D_{up} 为连通性的上坡组成成分, 反映了上坡集流区贡献水源的潜力; D_{dn} 为连通性的下坡组分, 它表示水到达最近目标或汇水区必须走过路径的长度; IC 取值范围为 $[-\infty, +\infty]$, IC 越大, 水文连通性越大; \bar{S} 为上坡集流区的平均斜率梯度(m/m); A 为上坡贡献面积(m²); d_i 为第 i 个像元沿着水流路径到汇点像元的距离(m); W_i 为第 i 个像元的权重; S_i 为第 i 个像元的斜率梯度, 下标 k 表示流域中的每个单元有一个 IC 值。S 取值范围为 $[0, 1]$, 为了避免过大及过小坡度对结果的影响, 将低于 0.005 的 S 取值为 0.005, 大于 1 的 S 取值为 1。

\bar{W} 为上坡集流区的平均权重(无量纲), 指土地利用和土壤表面特性对径流和泥沙产生的阻抗。在本试验中使用通用土壤流失方程中的 C 因子(无量纲)为 W 赋值。蔡崇法等^[15]基于径流小区试验提出 C 因子计算公式。但林杰等^[16]研究发现植被覆盖度 c 在接近 0 的情况下会出现负值, 并改进了模型。因此在本文中 C 值由以下公式得出^[17]:

$$\begin{cases} C=1 & (c \leq 9.6\%) \\ C=0.6508-0.3436 \lg c & (9.6\% < c \leq 78.3\%) \\ C=0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (2)$$

式中: C 最大值为 1, 表示土壤完全流失; 最小值为 0, 表示不产生土壤流失。 c (vegetation coverage) 为植被覆盖度(%), 指植被(包括叶、茎、枝)在地面上的垂直投影面积占统计区总面积的百分比。随着无人机影像采集技术的推广与应用, 基于 RGB 彩色影像来表征地表植被覆盖度的彩色植被指数也得到迅速发展。例如 ExG, ExR, GLI, Hue, CIVE, MEGI, NGRDI 等。本文选取 ExGR (excess green minus red index, 过量绿减去过量红) 指数来对植被覆盖度进行计算。

ExGR 值由以下公式给出^[18]:

$$ExGR = (2g - r - b) - (1.4r - g) \quad (3)$$

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad (4)$$

$$g = \frac{R}{R+G+B} \quad (5)$$

$$b = \frac{R}{R+G+B} \quad (6)$$

式中:ExGR 为指数值(无量纲); R, G, B 分别为彩色影像红、绿、蓝(Red, Green, Blue)三波段的像元值(无量纲); r, g, b 为归一化后的像元值(无量纲)。

因此,在本试验中,植被覆盖度 c 的值由以下公式给出:

$$c = \frac{\text{ExGR} - \text{ExGR}_{\text{soil}}}{\text{ExGR}_{\text{veg}} - \text{ExGR}_{\text{soil}}} \quad (7)$$

式中: $\text{ExGR}_{\text{soil}}$ 为完全是裸土或无植被覆盖区域的 ExGR 值, ExGR_{veg} 则代表纯植被区域的 ExGR 值。在本试验中,将 ExGR 值从小到大排序,把 5% 处的 ExGR 值认定为完全是裸土或无植被覆盖,95% 处的 ExGR 值认定为完全被植被所覆盖。不同土地利用 W 权重详见表 3。

表 3 不同土地利用权重 W

土地利用类型	平均权重 \bar{W}
道路	0.33
河道	0.19
宿根甘蔗	0.24
新植甘蔗	0.65
甘蔗—西瓜间作	0.29
桉树	0.08

1.4 地表微地形特征计算

本文中涉及到的地表微地形特征主要为坡度、坡长、表面粗糙度以及地表粗糙度。

(1) 坡度 S (slope) 使用 ArcGIS 10.3 中的表面分析工具—坡度进行计算,结果用百分数表示,对于栅格中的每一个像元,其表达式如下:

$$S_i = \tan\theta_i \times 100 \quad (8)$$

式中: S 为百分比坡度(%); θ 为坡度($^\circ$); i 表示每个像元都有一个单独的值。

(2) 坡长 L (slope length) 采用通用土壤流失方程中的坡长因子量化,其计算方法采用符素华等^[19]提出的分段坡长因子公式来计算;对于栅格图内的每一个像元,其坡长因子由下列公式给出:

$$L_i = \frac{(\lambda_{\text{out}}^{m+1} - \lambda_{\text{in}}^{m+1})}{(\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}}) 22.13^m} \quad (9)$$

式中: L_i 为第 i 个像元的坡长因子,表示每个像元都有一个单独的值(无量纲); $\lambda_{\text{out}}, \lambda_{\text{in}}$ 分别为像元出口及入口的坡长(m); m 为坡长指数因子。坡长指数因子 m 的取值如下

$$\begin{aligned} m &= 0.2 & (\theta < 0.5^\circ) \\ m &= 0.3 & (0.5^\circ < \theta < 1.5^\circ) \\ m &= 0.4 & (1.5^\circ < \theta < 3^\circ) \\ m &= 0.5 & (\theta > 3^\circ) \end{aligned}$$

(3) 表面粗糙度 S_R (surface roughness) 的计算采用地表 3D 表面积与 2D 表面积之比,其表达式如下:

$$S_{Ri} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\theta_i \pi}{180}\right)} \quad (10)$$

式中: S_R 为表面粗糙度(m^2/m^2),取值范围为 $[1, +\infty]$; θ 为坡度($^\circ$); i 表示每个像元都有一个单独的值。

(4) 地表粗糙度的 SDE (standard deviation of elevation, 高程标准差) 使用高程值的标准差来表示^[20],计算窗口大小为 3×3 个像元,其表达式如下:

$$\text{SDE}_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (11)$$

式中: SDE_i 为第 i 个像元的地表粗糙度(m); n 指参与计算的像元个数,在本试验中为 9 个; x_j 表示第 j 个像元的高程值(m); \bar{x} 表示所有参与计算像元的平均值(m)。

1.5 数据处理与分析

本文数据整理在 Excel 2019 中完成;分布图使用 ArcGIS 10.3 绘制;点线图在 Origin 2019 b 中完成。

2 结果与分析

2.1 DEM 不同分辨率对地表微地形特征的影响

如表 4 所示,DEM 分辨率的降低,会显著影响平均坡度 S ,平均坡长因子 L ,平均表面粗糙度 S_R 和平均地表粗糙度 SDE。随着分辨率从 5 m 增加到 0.05 m,平均 S 从 16.14% 增加为 20.84%,增加了 29.13%;同时标准差由 11.36 增加为 18.48,表明随着分辨率的增加,更多地表细节被展现,低分辨率下归一化的地形在高分辨率下被分化。平均坡度在 0.2 m 分辨率以上变化较大,在 0.2 m 及更高分辨率时变化较小,其中变化率最大为 0.2 m 分辨率。

平均 L 随着分辨率的增加由 1.54 降低为 0.43,减少了 72.09%,标准差由 4.25 增加为 6.25,总体差异加大(表 4)。从 5 m 到 0.2 m 分辨率平均 L 斜率逐渐增加,并在 0.2 m 处达到最大。

平均 S_R 和平均 SDE 在 DEM 分辨率的影响下均发生了变化。随着分辨率由 5 m 到 0.05 m, S_R 由 1.02 增加为 1.04,增加了 1.62%,标准差增加了 124.93%, S_R 变化率随分辨率的增加呈先增大后减小的趋势,并在 0.2 m 处达到最大。SDE 随分辨率的增加由 0.693 3 减小为 0.008 8,减小了 98.72%,最大变化率出现在 0.5~0.2 m (57.93%) 之间。

图 1 展示了不同土地利用下 S, L, S_R 与 SDE 随 DEM 分辨率的变化, 不同土地利用类型的地表微地形特征随 DEM 分辨率变化的差异较为明显。随着 DEM 分辨率的增加, 新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树、河道的 S 均表现为增加趋势, 分别增加了 39.24%, 22.74%, 59.03%, 24.40%, 773.32%, 道路的 S 表现为先减小(5~1 m)后增大(1~0.05 m); 新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作和道路的 S 在 5~0.5 m 变化较为平缓, 0.5 m 以后急剧上升, 其中新植甘蔗的 S 在 0.2 m 分辨率前小于宿根甘蔗, 0.2 m 分辨率及以上时大与宿根甘蔗; 5 m 分辨率时不同土地利用类型 S 排序为: 桉树>道路>宿根甘蔗>新植甘蔗>甘蔗西瓜间作>河道, 0.2 m 分辨率时排序

为: 河道>桉树>新植甘蔗>宿根甘蔗>甘蔗西瓜间作>道路。

随着 DEM 分辨率的增加, 新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树和道路的 L 均表现为减小趋势, 分别减少了 74.98%, 74.82%, 82.49%, 39.93%, 58.60%, 73.36%; 河道 L 表现为先增大(5~2 m)后减小(2~0.05 m), 其中道路与桉树的 L 在 0.5 m 分辨率前变化平缓, 0.5 m 后急剧减小; 新植、宿根甘蔗的 L 在 5~0.5 m 间无太大差异, 但在 0.2 m 及更高分辨率下表现为宿根甘蔗大于新植甘蔗; 5 m 分辨率时不同土地利用类型 L 排序为: 河道>甘蔗西瓜间作>宿根甘蔗>新植甘蔗>道路>桉树, 0.1 m 分辨率时变化为: 河道>道路>桉树>宿根甘蔗>新植甘蔗>甘蔗西瓜间作。

表 4 不同 DEM 分辨率下的地表微地形特征均值及标准差

像元尺寸/m	坡度 $S/\%$		坡长 L		表面粗糙度 $S_R/(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2})$		地表粗糙度 SDE/m	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
5	16.14	11.36	1.54	4.25	1.02	0.03	0.69	0.48
2	17.06	13.95	1.33	5.62	1.02	0.05	0.29	0.23
1	17.70	15.29	1.10	5.95	1.03	0.06	0.15	0.13
0.5	18.52	16.57	0.89	6.08	1.03	0.07	0.08	0.07
0.2	20.04	17.46	0.67	6.19	1.03	0.07	0.03	0.03
0.1	20.68	18.15	0.55	6.17	1.03	0.08	0.02	0.01
0.05	20.84	18.48	0.43	6.23	1.04	0.08	0.01	0.01

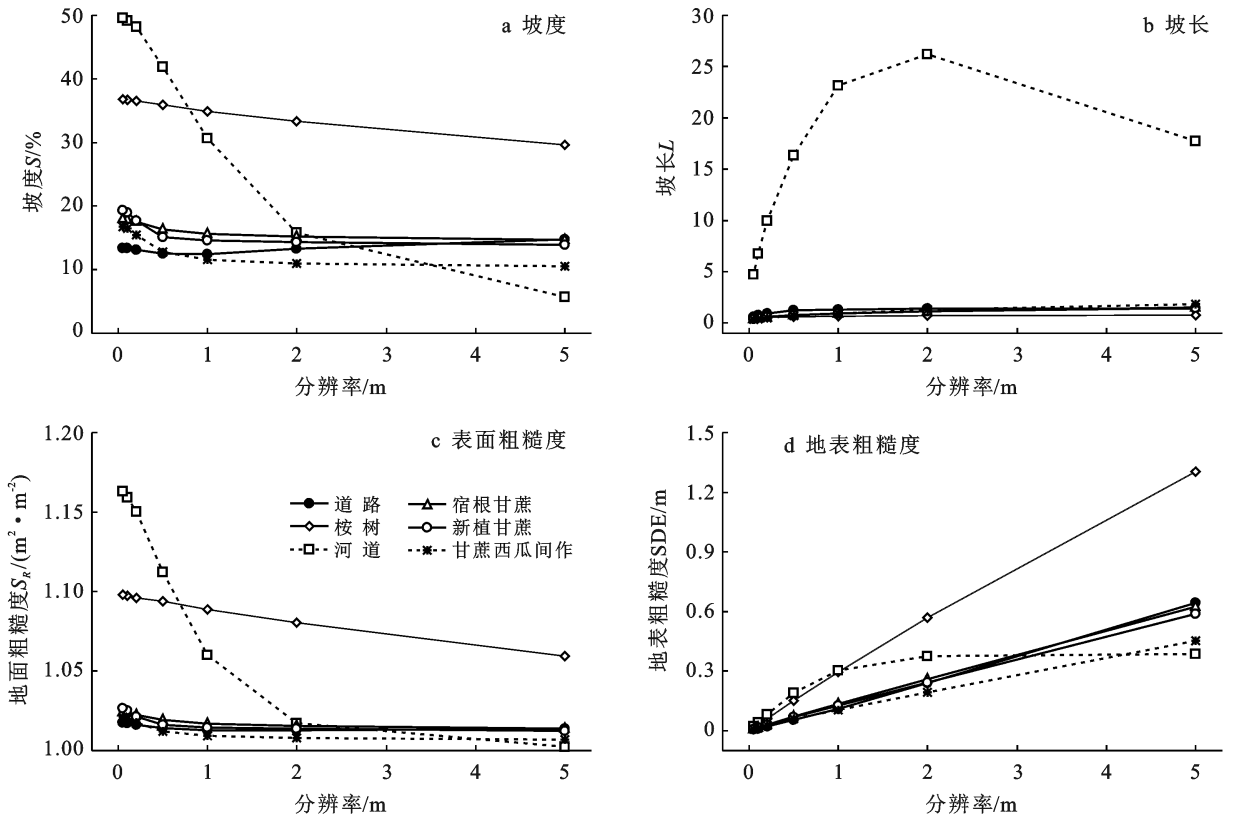


图 1 随 DEM 分辨率变化的不同土地利用下地表微地形特征参数

随着 DEM 分辨率的增加,新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树、河道的 S_R 呈增加趋势,分别增加了 1.41%,1.03%,1.42%,3.66%,16.02%,0.38%,道路的 S_R 表现为先减小(5~1 m)后增大(1~0.05 m);新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树、河道、道路的 SDE 均呈减小趋势,分别减少了 98.61%,98.75%,98.39%,98.84%,94.70%,99.11%,其中河道在 1 m 分辨率出现转折点。新植甘蔗 S_R 与 SDE 均在 0.2 m 以上分辨率时小于宿根甘蔗,0.2 m 以下分辨率大于宿根甘蔗;5 m 分辨率时不同土地利用类型 S_R 排序为:桉树>宿根甘蔗>道路>新植甘蔗>甘蔗西瓜间作>河道,SDE 排序为:桉树>道路>宿根甘蔗>新植甘蔗>甘蔗西瓜间作>河道;0.1 m 分辨率时 S_R 排序为:河道>桉树>新植甘蔗>宿根甘蔗>甘蔗西瓜间作>道路,SDE 排序为:桉树>河道>新植甘蔗>宿根甘蔗>甘蔗西瓜间作>道路。

2.2 DEM 不同分辨率对水文连通性指数的影响

DEM 分辨率显著影响流域水文连通性的分布以及特征值。图 2—3 显示了不同分辨率(5,2,1,0.5,0.2,0.1,0.05 m)下水文连通性指数 IC 值的分布及平均值、最大值和最小值的变化特征。随着分辨率从 5 m 提高到 0.05 m,IC 均值分别为 -4.96,-4.93,-4.86,-4.80,-4.71,-4.76,-4.85,标准差分别为 0.73,0.90,1.00,1.08,1.16,1.23,1.27。IC 均值变化表现为先增加,后减少,且分辨率越高平均变化越大;从 5 m 分辨率的 -4.96 增加为 0.2 m 分辨率的 -4.71,增加了 4.87%,之后又减少为 0.05 m 分辨率

的 -4.85,减少了 2.94%。同时 IC 最大值与最小值呈外扩趋势,且均值标准差增加,表明流域内 IC 值随分辨率增加差异逐渐明显。最大值与最小值的外扩趋势均在 0.1~0.2 m 处出现转折点,但在 0.2 m 到 0.05 m 分辨率出现剧烈变化。从 5~0.05 m 分辨率,IC 的分布从完全由地形控制变化为受到地表特征影响的线性分布。IC 的空间分布表明不同土地利用的 IC 分布模式有很大不同,平均来说,新植甘蔗与河道的连通性较强,甘蔗西瓜间作与桉树的连通性较低;靠近河流且坡度较小区域表现出较为复杂的水文连通性,但总体的 IC 均值很低。新植甘蔗的水文连通性表现为线性,而宿根甘蔗、桉树的水文连通性特征主要由地形控制。横穿新植甘蔗的人工沟渠表现出的高连通性将不同的农业景观有效的连接在了一起。

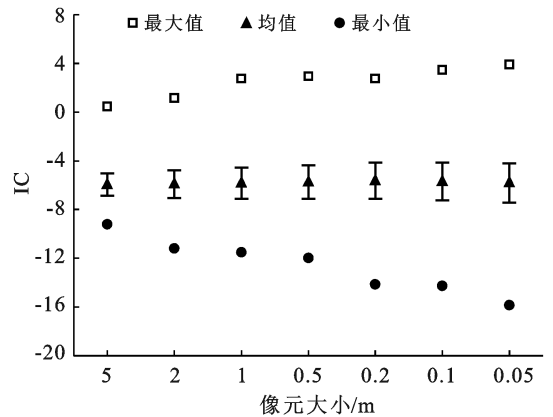


图 2 随 DEM 分辨率变化的水文连通性指数 IC 平均值、最大值和最小值

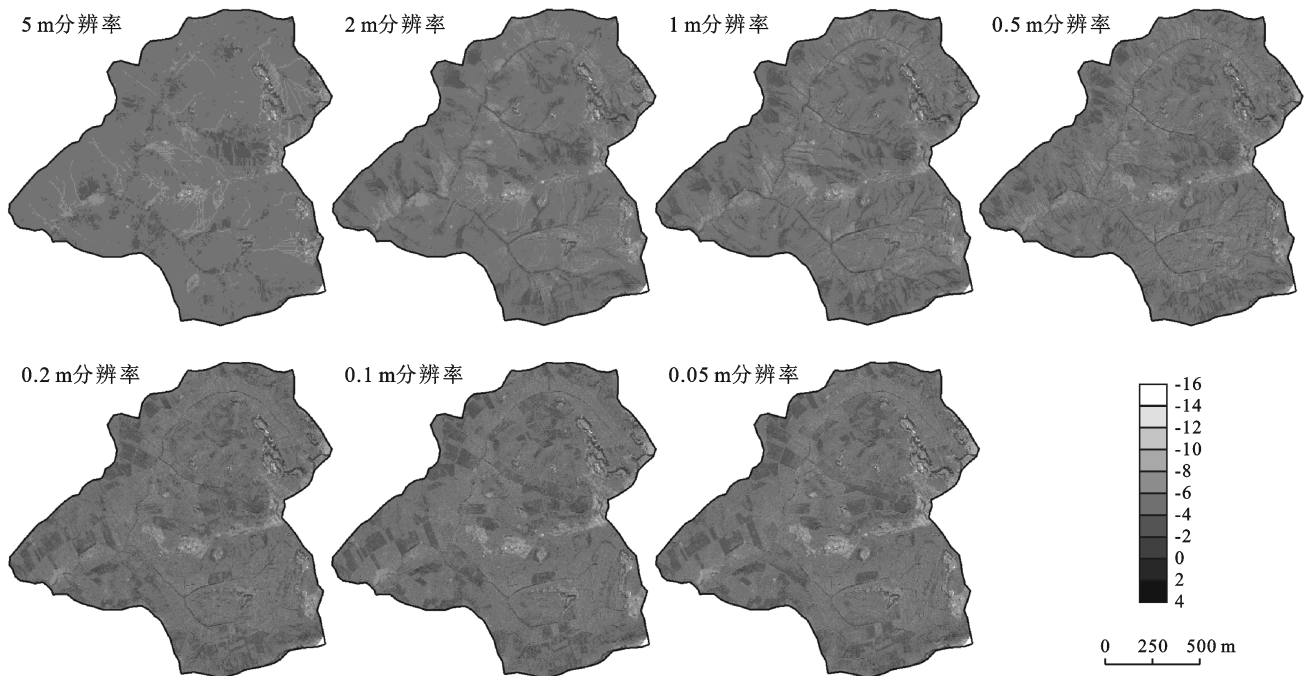


图 3 不同 DEM 分辨率下的水文连通性指数 IC 值分布特征

图 4 展示了不同土地利用下水文连通性指数 IC 随 DEM 分辨率的不同变化。随 DEM 分辨率从 5 m 到 0.05 m, 河道、新植甘蔗、宿根甘蔗的 IC 均值表现为先增加后减小, 桉树、道路、甘蔗西瓜间作的 IC 表现为先减小后增大再减小; 各土地利用类型在 5~0.5 m 分辨率间变化平缓, 0.5~0.05 m 分辨率间变化较为明显。不同土地利用类型之间 IC 的差异在 0.5 m 时达到最大(34.72%), 在 5 m 时最小(12.97%), 在 0.2 m 到 0.05 m 间趋于平稳。新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树、河道、道路的 IC 转折点分别为 0.1, 0.2, 0.2, 0.5, 0.5, 0.5 m。5 m 分辨率时不同土地利用类型 IC 排序依次为: 河道>新植甘蔗>道路>宿根甘蔗>甘蔗西瓜间作>桉树, 0.1 m 分辨率时不同土地利用类型 IC 排序依次为: 河道>新植甘蔗>甘蔗西瓜间作>宿根甘蔗>道路>桉树。

2.3 基于水文连通性指数的最佳 DEM 分辨率确定

图 5 展示了不同 DEM 分辨率对于小尺寸地表特征的分辨性能。5 m 分辨率下的 IC 分布图完全由地形控制, 无法分辨不同土地利用类型; 2 m 分辨率下的 IC 值分布图能够分辨土地利用如桉树与甘蔗以及道路之间的差异, 但无法分辨新植宿根、横坡顺坡

等种植模式, 对人工排水沟的识别有局限性; 新植宿根甘蔗种植模式轮廓、排水沟路径等在 1 m 处较为清晰, 但在此分辨率下无法分辨甘蔗横坡顺坡的种植模式; 在 0.2 m 分辨率下 IC 值分布图能够分辨出明显的横坡顺坡种植方式, 但出现不符合实际的结果; 0.2 m 分辨率下的不合理结果在 0.1 m 分辨率的 IC 分布图中得到修正, 并表现出更清晰的细节如正确划分了甘蔗茎顶与茎底。0.05 m 分辨率下的 IC 分布图与 0.1 m 相比并没有表现出更多的细节。

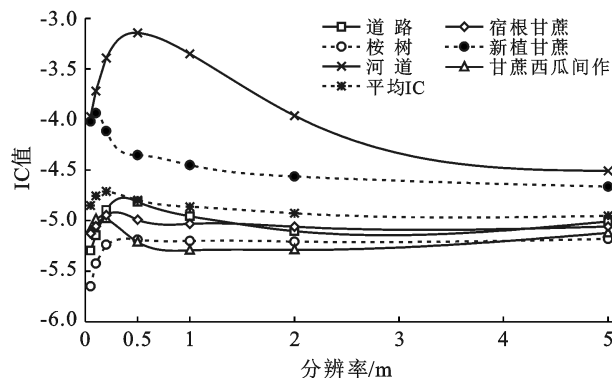


图 4 随 DEM 分辨率变化的不同利用类型土地水文连通性指数 IC 均值

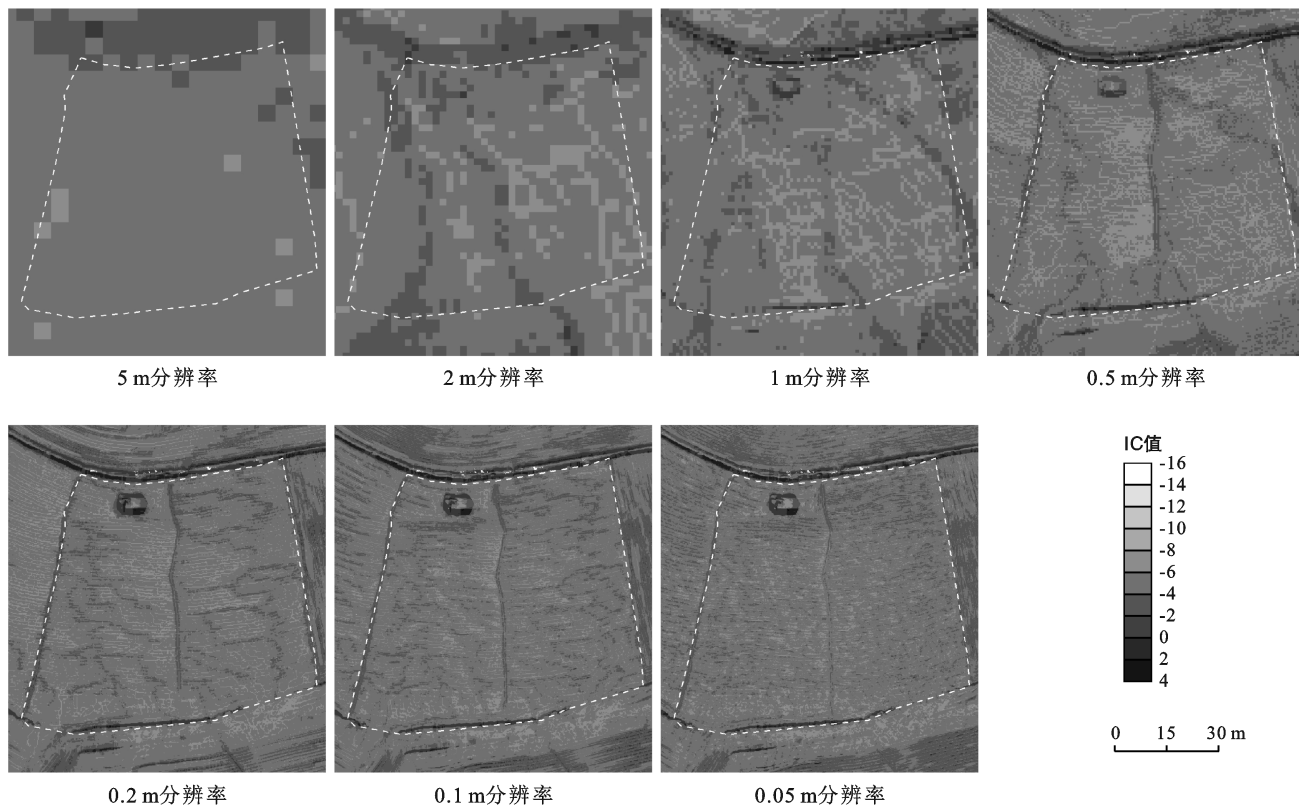


图 5 不同 DEM 分辨率下小尺寸地表水文连通性指数 IC 值分布

DEM 分辨率对 IC 有显著影响, 但是一味的追求更高的分辨率, 不仅给数据获取带来难度, 还导致了计算时间过长的问题^[8]。图 6 展示了 7 个分辨率下

IC 的计算时间, 不同分辨率下计算时间具有极大差异, 且随分辨率的增加呈指数上升。从 5 m 到 0.05 m 分辨率, 计算时间从 93 s 增加为 28 168 s, 增加了 302

倍。分辨率在 0.2 m 以下时,计算时间涨幅在 30% 到 128% 之间,但在 0.2 m 分辨率及以上时,计算时间涨幅均大于 200%。

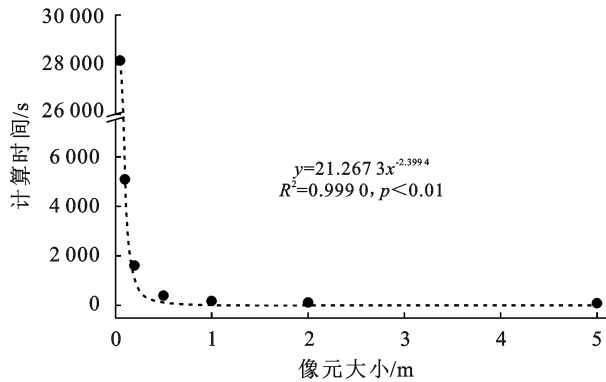


图 6 不同像元大小 DEM 的水文连通性指数 IC 计算时间

3 讨论

3.1 DEM 分辨率影响地表微地形特征

坡度(S)、坡长因子(L)以及表面粗糙度(S_R)、地表粗糙度(SDE)均受到 DEM 分辨率的显著影响。随 DEM 分辨率的增加,平均坡度 S 也增加,这可以由高分辨率下锯齿状的甘蔗田表面特征在低分辨率下平均为平面解释,同时低分辨率下河道沟壁的坡度被忽略,河道坡度被低估;坡度是通过高程的变化除以像元之间的距离来计算的,高分辨率 DEM 的像元距离非常小,且局部地表变化在高分辨率 DEM 下非常明显,形成了高分辨率下较大的坡度;而道路坡度先减小后增加,是因为在 1 m 分辨率之前,较大的像元将道路坡度平均为左右田块坡度的延伸,其坡度被放大;随着分辨率的提高,道路与田块区分,坡度减小;在 1 m 分辨率以上时,道路与田块交界处短暂但剧烈的斜坡被区分开来,此时坡度随 DEM 分辨率增大。低分辨率下坡长因子 L 值较大,这是由于忽略了甘蔗种植引起的表面特征变化,如新植甘蔗横坡种植的垄将整个长坡截断为多段小坡,坡长因子 L 被高估,而且低分辨率难以识别道路特征,将道路左右的田识别为一块,形成了不符合实际的坡长。表面粗糙度 S_R 可以表示像元内部的起伏程度, SDE 可以表示像元与周围像元的差异,参数的结合能更好的解释结果。低分辨率下 S_R 较低但 SDE 较高,表明低分辨率 DEM 趋向于简化像元内部差异,但由于像元较大,不同像元所展示的土地利用类型有所差异,各像元间连通受阻,表现为较低的连通性。相反高分辨率下 S_R 较高但 SDE 较小,表明小像元能够反映较小尺寸的地表特征,同时由于像元较小,不同像元可能表

示同一土地利用类型,有利于不同像元之间连通。道路、河道地表微地形特征的异常结果表明 5 m, 2 m 甚至 1 m 的 DEM 分辨率在集约化蔗区是不可取的。

3.2 DEM 分辨率影响水文连通性指数

随着分辨率的增加,流域平均 IC 先增加后减小,这与 Cantreul 等^[8]以及 López-Vicente 等^[9]的研究结果不同,他们发现像元大小变大时 IC 也增加,并用坡度的缓慢变化以及水流路径的恒定减小来解释。研究区微地形的不同可以解释研究结果的差异,那辣小流域因甘蔗种植引起的复杂地表特征是上述研究区域所没有的。而平均 IC 的变化可以通过简化的水流路径和坡度来解释^[21],在 5~0.2 m 分辨率,坡度增加幅度较大,而水文路径长度增加是恒定的,随之 IC 值也增加;在 0.2~0.05 m 分辨率时,坡度没有太大变化,但在新植、宿根甘蔗以及甘蔗西瓜间作的复杂地表特征影响下,水文路径破碎化,导致了 IC 值的减小。

水文连通性的分布能够表示流域内基于地形的径流路径,但是低分辨率 DEM 下的水文连通性分布图对一些径流路径的表达并不准确,例如甘蔗行间区域、人工排水沟以及高海拔区域的沉积区。野外所能观察到的人工排水沟以及甘蔗行间区域在 0.1 m 与 0.2 m 分辨率的 DEM 下清晰可见,这也就解释了此分辨率下的高连通性。Bracken 等^[22]认为,水文连通性从某种角度来说可以表示为某点到河流或是流域出口的距离,本研究中不同分辨率下流域出口及沟渠附近区域的 IC 均表现为较低值,这可能与其离出口较近,所需路径较短有关。不同土地利用类型 IC 间的差异是权重与坡度共同作用的结果,河道是天然的水文路径;新植甘蔗具有一定的坡度,且地表裸露,利于水流通过,同时顺坡种植甘蔗的沟壑为水流提供了路径;新植甘蔗间作西瓜较新植甘蔗有更高的覆盖度,但对水流的阻碍作用有限;宿根甘蔗地表覆盖有厚密的甘蔗枯叶,不利于水流通过;道路的地表裸露,但坡度较其他土地利用类型较小,水流动力不足;桉树虽然坡度较大,但茂密的植被冠层对降雨有缓冲作用,其地表覆盖的枯落物以及干燥的土壤不利于水流的形成。0.1 m 分辨率下的宿根甘蔗的水文连通性大于道路,这可能与宿根甘蔗更高的坡度有关^[23]。

3.3 水文连通性研究的最佳 DEM 分辨率

不同土地利用类型 IC 以及地表微地形特征随 DEM 分辨率变化的差异表明,不同土地利用类型的最佳分辨率有所不同,大尺寸地物如桉树、道路、河道的 IC 变化转折点为 0.5 m,小尺寸地表特征的新植、宿根甘蔗以及甘蔗西瓜间作 IC 变化转折点在

0.2 或 0.1 m, 这表明对于桉树, 河道和道路, 其最佳分辨率是 0.5 m, 而对于新植、宿根甘蔗以及甘蔗西瓜间作, 其最佳分辨率为 0.2 m 或更高的分辨率, 这与 Habtezion 等^[4]提出的有效表征地形的 DEM 分辨率阈值(0.1 m)类似。因此选择一个正确的 DEM 分辨率来使水文连通性结果在有效和高效之间的平衡非常重要。而这个分辨率应该是根据研究区的特征, 也就是所需识别最小地物的尺寸来选取^[5]。但从结果来看, 使用 0.2 m 分辨率 DEM 所得到的地表微地形特征与实际有所偏差。例如 0.2 m 下宿根甘蔗的坡度与地表粗糙度均大于新植甘蔗, 这与实际并不相符, 新植甘蔗翻地后形成的行间垄使得地表坡度更大, 地表粗糙度更高。因此, 在保证水文连通性结果有效的前提下, 考虑到计算时间问题, 研究认为新植、宿根甘蔗以及甘蔗西瓜间作的最佳 DEM 分辨率为 0.1 m, 桉树、河道和道路的最佳 DEM 分辨率为 0.5 m。而对于整个研究区域, 其 DEM 分辨率的选择应该要满足最小尺寸地物的需求, 因此在集约化蔗区小流域, 水文连通性指数的最佳分辨率为 0.1 m。

4 结论

本文基于 ArcGIS 与无人机高分辨率影像, 探究了 DEM 不同分辨率对地表微地形特征及水文连通性指数的影响。

(1) DEM 不同分辨率对地表微地形特征参数有显著影响。随着 DEM 分辨率的增加, 平均坡度 S 、平均表面粗糙度 S_R 表现为增加趋势, 平均地表粗糙度 SDE 与平均坡长因子 L 表现为减少趋势; 不同土地利用类型的地表微地形特征有不同变化, 随着 DEM 分辨率的增加, 新植甘蔗、宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作、桉树的坡度 S 呈增加趋势, 坡长因子 L 呈减小趋势, 表面粗糙度 S_R 先减小(5~1 m)后增大(1~0.05 m), 地表粗糙度 SDE 均呈减小趋势。道路的坡度 S 与表面粗糙度 S_R 均先减小(5~1 m)后增大(1~0.05 m), 河道的坡长因子先增加(5~2 m)后减小(2~0.05 m)。

(2) 随着 DEM 分辨率的增加, 平均水文连通性指数 IC 表现为先增加(5~0.2 m)后减小(0.2~0.05 m), 且均值标准差增大。不同分辨率下的 IC 值在分布上大体相同, 例如对于集水区的识别、沉积区的划分以及主要的径流路径的分辨, 但在许多细节之间有显著差异, 如对于道路、人工排水沟以及种植模式的识别。低分辨率的 DEM 会损失许多信息, 但过高分辨率也会产生不符合实际的结果, 0.2 m 以上分辨率的 IC 分布均与实际有偏差, 0.2 m 表现出了较为完整的地表径流路径, 但对于横坡顺坡耕作方式表达有缺失;

0.1 m 相比 0.2 m 能够观察到更多的支流与更少的平坡, 且对于横坡顺坡耕作方式对水文连通性的影响的结果较为合理, 但 0.05 m 分辨率下 IC 分布图所表现出的径流路径过于破碎。不同土地利用类型的 IC 随 DEM 分辨率变化不同, 从 5 m 到 0.05 m 分辨率, 河道、新植甘蔗、宿根甘蔗的 IC 均值表现为先增加后减小, 桉树、道路、甘蔗西瓜间作的 IC 表现为先减小后增大再减小。

(3) 不同土地利用类型的最佳分辨率不同, 道路、桉树和河道的最佳 DEM 分辨率为 0.5 m, 宿根甘蔗、甘蔗西瓜间作的最佳分辨率为 0.2 m, 新植甘蔗的最佳分辨率为 0.1 m。而对于集约化蔗区小流域, 水文连通性指数研究的最佳 DEM 分辨率为 0.1 m。这是在保证计算结果真实有效的基础上减小计算时间成本的结果。使用过高分辨率的 DEM 计算在导致结果偏离实际的同时还会多消耗高达 302 倍的时间。不同研究区域地表特征的异质性(如耕作模式等)的不同可能会产生不同的最佳分辨率结论。

[参 考 文 献]

- [1] Garcia Moreno R, Diaz Alvarez M C, Saa Requejo A, et al. Multiscaling analysis of soil roughness variability [J]. *Geoderma*, 2010, 160(1): 22-30.
- [2] Ariza-Villaverde A B, Jiménez-Hornero F J, Gutiérrez de Ravé E. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis [J]. *Geomorphology*, 2015, 241: 243-254.
- [3] Poulter B, Halpin P N. Raster modelling of coastal flooding from sea-level rise [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(2): 167-182.
- [4] Habtezion N, Tahmasebi Nasab M, Chu Xuefeng. How does DEM resolution affect microtopographic characteristics, hydrologic connectivity, and modelling of hydrologic processes? [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(25): 4870-4892.
- [5] Cavazzi S, Corstanje R, Mayr T, et al. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? [J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 111-121.
- [6] Passalacqua P, Belmont P, Staley D M, et al. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 148: 174-193.
- [7] Yang Jun, Chu Xuefeng. Effects of DEM resolution on surface depression properties and hydrologic connectivity [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(9): 1157-1169.
- [8] Cantreul V, Bielders C, Calsamiglia A, et al. How pixel

- size affects a sediment connectivity index in central Belgium [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018,43(4):884-893.
- [9] López-Vicente M, Álvarez S. Influence of DEM resolution on modelling hydrological connectivity in a complex agricultural catchment with woody crops [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018,43(7):1403-1415.
- [10] Li Yangrui, Yang Litao. Sugarcane agriculture and sugar industry in China [J]. *Sugar Tech*, 2015,17(1):1-8.
- [11] Bordonal R D O, Carvalho J L N, Lal R, et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil: A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018,38(2):1-23.
- [12] 孙丽娅, 上野正实, 永田雅辉. 不同栽培法和收割期对甘蔗单产及含糖量影响的分析[J]. *中国生态农业学报*, 2009,17(5):992-996.
- [13] Li Yong, Mo Yaqi, Are K S, et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: Evidence from hillslope observation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309:107289.
- [14] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment [J]. *Catena*, 2008,75(3):268-277.
- [15] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000,14(2):19-24.
- [16] 林杰, 张金池, 顾哲衍, 等. 基于叶面积指数的植被覆盖管理措施因子 C 的遥感定量估算[J]. *林业科学*, 2013, 49(2):86-92.
- [17] 刘时城. 延河流域不同尺度水文连通性研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [18] Meyer G E, Neto J C. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 63(2):282-293.
- [19] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015,13(5):105-110.
- [20] Kamphorst E C, Jetten V, Guérif J, et al. Predicting depression storage from soil surface roughness [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1749-1758.
- [21] Brandt S A. Modeling and visualizing uncertainties of flood boundary delineation: Algorithm for slope and DEM resolution dependencies of 1D hydraulic models [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016,30(6):1677-1690.
- [22] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems [J]. *Hydrological Processes*, 2007,21(13):1749-1763.
- [23] 王盛萍, 姚安坤, 赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. *水科学进展*, 2014,25(4):526-533.

《水土保持通报》2020 年论文被引频次 TOP15

- [1] 姚文艺, 刘国彬. 新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J]. *水土保持通报*, 2020,40(5):333-340.
- [2] 刘孟竹, 王彦芳, 裴宏伟. 基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4):303-311,345.
- [3] 张兴义, 刘晓冰. 中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J]. *水土保持通报*, 2020,40(4):340-344.
- [4] 谢慧君, 张廷斌, 易桂花, 等. 川西高原植被 NDVI 动态变化特征及对气候因子的响应[J]. *水土保持通报*, 2020,40(4):286-294,328.
- [5] 谭华清, 张金亭, 周希胜. 基于最小累计阻力模型的南京市生态安全格局构建[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3):282-288,296.
- [6] 周宇洋, 周国富, 黄启芬, 等. 基于洛伦兹曲线和土地利用转型的喀斯特山区“三生”空间分布研究[J]. *水土保持通报*, 2020,40(3):297-304.
- [7] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜, 等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水土沙变化的关系[J]. *水土保持通报*, 2020,40(3):1-7,13.
- [8] 陆荫, 张强, 李晓红, 等. 黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2):232-238.
- [9] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 等. 基于土地利用变化的祁连山地区生境质量时空演变分析[J]. *水土保持通报*, 2020,40(2):278-284.
- [10] 马国璇, 周忠发, 朱昌丽, 等. 石漠化地区农户生计资本与生计策略的关系: 以贵州省关岭贞丰花江石漠化综合示范区为例[J]. *水土保持通报*, 2020,40(2):299-307.
- [11] 师玉锋, 梁思琦, 彭守璋. 1901—2017 年黄土高原地区气候干旱的时空变化[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1):283-289.
- [12] 董会忠, 姚孟超. 成渝经济区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1): 213-220.
- [13] 李静, 马亚亚, 王杰, 等. 固原市原州区生态环境与经济系统的耦合协调发展[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1):229-235,282.
- [14] 陈小运, 胡友彪, 郑永红, 等. 6 种水生植物及其组合对模拟污水中磷的净化效果[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1):99-107.
- [15] 敖成欢, 钟九生, 赵梦, 等. 基于模糊综合法和灰色关联法的百花湖水水质评价[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(1):116-122,129.