

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231206001

文章编号: 1672-9331(2025)01-0040-09

引用格式: 周访滨, 杨自强, 朱衍哲, 等. 基于误差传播定律的地形复杂度误差估计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22(1): 40-48, 61.

Citation: ZHOU Fangbin, YANG Ziqiang, ZHU Yanzhe, et al. Error estimation of terrain complexity based on error propagation law [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 40-48, 61.

## 基于误差传播定律的地形复杂度误差估计

周访滨<sup>1,2</sup>, 杨自强<sup>1</sup>, 朱衍哲<sup>1</sup>, 马国伟<sup>1</sup>, 钟绍平<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通学院, 湖南 长沙 410114;  
2. 长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】解决现有地形复杂度误差评价方法主观性强、缺少误差解析式的问题。【方法】利用误差传播定律推导了局部高差、局部标准差、局部褶皱度和局部全曲率的中误差表达式, 依据复合地形因子误差传递规律构建了复合地形复杂度指标(compound terrain complexity index, CTCI)提取的误差估计模型(error estimation model for CTCI, CEEM)。通过模拟数字高程模型(digital elevation model, DEM)试验验证了该模型的有效性, 并采用三个不同地貌区域的实体DEM进行CEEM泛化试验。【结果】在不同噪声影响下, CEEM平均误差、均方差、残差和平均绝对百分比误差最大值分别为 $-2.1 \times 10^{-3}$ 、 $7.99 \times 10^{-6}$ 、 $8.4 \times 10^{-3}$ 和22.8%, 决定系数均在0.961以上, CEEM整体误差微小; 不同地貌类型的地形复杂度提取误差存在差异, 试验统计结果表明误差由大到小依次为高山、中山、丘陵。【结论】CEEM能量化描述地形复杂度的提取误差, 可为不同复杂地形地貌区域提取复合地形复杂度指标提供参考。

**关键词:** 数字地形分析; 栅格DEM; 误差估计模型; 误差传播定律; 复合地形复杂度指标  
中图分类号: U412; P217 文献标志码: A

### Error estimation of terrain complexity based on error propagation law

ZHOU Fangbin<sup>1,2</sup>, YANG Ziqiang<sup>1</sup>, ZHU Yanzhe<sup>1</sup>, MA Guowei<sup>1</sup>, ZHONG Shaoping<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] This paper aims to address the issue that the existing terrain complexity error evaluation methods are subjective and lack error analytic formulas. [Methods] The mean square error expressions for local relief, local standard deviation, local rugosity, and local total curvature were derived by using error propagation law. The error estimation model for compound terrain complexity index (CTCI), namely CEEM was constructed by error transfer of compound terrain factors. The effectiveness of CEEM was verified by the simulated digital elevation model (DEM), and the generalization experiment of CEEM was carried out by using the entity DEM of three different landform regions. [Findings] Under the influence of different noises, the maximum

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-05-17; 接受日期: 2024-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671446); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30702); 长沙市自然科学基金(kq2402013)

通信作者: 周访滨(1975—)(ORCID: 0000-0003-3494-3210), 男, 正高级实验师, 主要从事数字地形分析方面的研究。  
E-mail: Arthur1975@126.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

values of CEEM's mean error, mean square error, residual error, and mean absolute percentage error are  $-2.1 \times 10^{-3}$ ,  $7.99 \times 10^{-6}$ ,  $8.4 \times 10^{-3}$ , and 22.8%, respectively, with an absolute coefficient of above 0.961. The overall error of CEEM is small. There are differences in the extraction error of terrain complexity of different landform types, and the experimental statistical results show that the error size in descending order is high mountain, middle mountain, and hill. [Conclusions] The extraction error of terrain complexity can be quantitatively described by CEEM, which provides a reference for extracting compound terrain complexity index in different complex landform regions.

**Key words:** digital terrain analysis; grid DEM; error estimation model; error propagation law; compound terrain complexity index

**Foundation items:** Project (41671446) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2021JJ30702) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (kq2402013) supported by Changsha Municipal Natural Science Foundation

**Corresponding author:** ZHOU Fangbin (1975—) (ORCID: 0000-0003-3494-3210), male, full senior experimentalist, research interest: digital terrain analysis. E-mail: Arthur1975@126.com

## 0 引言

地形复杂度指标 (terrain complexity index, TCI) 是度量地面形态粗糙和起伏程度的重要地形因子<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于地形地貌分类、海底地形测量等领域<sup>[2-3]</sup>。基于栅格数字高程模型提取典型地形因子是数字地形分析 (digital terrain analysis, DTA) 的重要内容<sup>[4-6]</sup>。受限于数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据精度及地形分析解译过程<sup>[7]</sup>, 地形复杂度提取结果可靠性存在疑虑, 其提取误差情况在很大程度上制约着应用效果。因此, 对地形复杂度提取误差进行评估显得尤为重要。

关于地形复杂度的提取误差研究, 已有成果从不同角度展开: 王雷等<sup>[8]</sup>从几何角度的空间二面角推导了地形复杂度指数, 并通过分析地形复杂度指数在山脊线、谷底线、崩边线和沟沿线等地形特征线周围的变化规律评价地形复杂度指标的提取精度, 但该研究仅为定性分析; 卢华兴等<sup>[9]</sup>通过将等高线因子和复合地形复杂度指标渲染图叠加来评价地形复杂度提取精度, 但由于可视化对比分析法的局限性, 无法详尽地定量描述地形复杂度提取误差。在此研究基础上, 张倩宁等<sup>[10]</sup>选取平原、丘陵和山区三个试验区域, 通过设立地形复杂度阈值, 从值域分级与地形类型之间的对应关系角度评价地形复杂度指标的提取精度, 但从

值域分级角度评价地形复杂度提取精度会牵扯到复杂的阈值问题, 该评价缺乏客观性, 难以刻画地形复杂度本身所具有的精度和误差大小。在地形复杂度误差评价方面, 已有研究缺乏从误差传播角度推导直接客观的误差函数解析式, 需用何种方法解析地形复杂度提取误差, 亟待进一步研究。

误差传播定律描述了变量的随机特性和其函数随机特性的函数关系, 具有计算量适中、可获取误差解析式的特点。刘学军等<sup>[11]</sup>结合非线性函数误差传播定律和协方差传播律, 得到坡度误差和精度模型。FLORINSKY<sup>[12]</sup>利用泰勒展开法、最小二乘法和误差传播定律, 推导出 DEM 三阶偏导数的误差模型。朱奇峰等<sup>[13]</sup>从不同高程梯度算法的误差来源, 并通过误差传播分析区分了不同坡度误差的来源和性质, 认为三阶不带权差分算法精度最高。SHI 等<sup>[14]</sup>从坡度误差模型、坡度信息熵和坡度衰减入手, 指出 Evans-Young 算法误差最小。以上研究主要针对单一地形因子构建误差模型, 如何利用误差传播分析技术发掘复合地形因子误差传播规律亟待深入研究。

综上所述, 现有研究主要从可视化对比和值域分级角度评价地形复杂度提取精度, 主观性较强, 缺少误差解析式, 鲜有复合地形因子的误差模型构建研究。因此, 本文以复合地形复杂度指标为研究对象, 通过误差传播定律推导了四种局部地形因子的中误差表达式, 依据复合地形因子误差传递构建了复合地形复杂度指标 (compound

terrain complexity index, CTCI)提取的误差估计模型(error estimation model for CTCI, CEEM),采用模拟DEM和实体DEM分别进行模型有效性验证和泛化应用分析,以期深化地形复杂度误差评价研究进程,为复合地形因子误差模型构建提供一种思路。

## 1 地形复杂度误差模型构建与分析

### 1.1 复合地形复杂度指标

王雷等<sup>[8]</sup>提出综合反映地形空间变化特征的地形复杂度指标。随后学者们从几何分析和统计分析的角度描述地形复杂度<sup>[2]</sup>。几何分析存在算法复杂和地形表达残缺等问题,不利于被大范围应用和推广<sup>[15-16]</sup>。统计分析是将多个地形因子看作整体,综合运用数理统计进行多因子组合表达构建的地形复杂度算法,该算法简洁且适用性强<sup>[9-10]</sup>。本研究采用文献<sup>[9]</sup>的复合地形复杂度指标,其表达式如式(1)所示:

$$C_T = (N_{LRE} + N_{LSD} + N_{LRU} + N_{LTC}) / 4 \quad (1)$$

式中: $C_T$ 为复合地形复杂度指标(CTCI); $N_{LRE}$ 、

$$m_F = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_{x_2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 m_{x_n}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_{n+1}}\right)^2 m_{x_{n+1}}^2 + 2\rho_{x_1 x_2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} m_{x_1} m_{x_2} + \cdots + 2\rho_{x_n x_{n+1}} \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_{n+1}} m_{x_n} m_{x_{n+1}}} \quad (3)$$

式中: $m_F$ 为复合地形因子的中误差; $m_{x_1}$ 、 $m_{x_2}$ 、 $\cdots$ 、 $m_{x_n}$ 、 $m_{x_{n+1}}$ 为 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $\cdots$ 、 $x_n$ 、 $x_{n+1}$ 的中误差, $\rho_{x_1 x_2}$ 、 $\rho_{x_2 x_3}$ 、 $\cdots$ 、 $\rho_{x_n x_{n+1}}$ 为不同地形因子提取误差之间的相关性系数。

### 1.3 构建地形复杂度误差估计模型

由式(1)可知,CTCI由4种局部地形因子融合而成,CTCI的误差估计模型CEEM构建步骤如下:1)根据误差传播定律获得四种局部地形因子的中误差表达式;2)通过复合地形因子误差传递将地形因子中误差融合并构建CEEM。传统移动窗口设置<sup>[19]</sup>如图1(a)所示。为简化局部褶皱度的公式表达,将栅格点编号进行优化调整,改进后的移动窗口设置如图1(b)所示。设栅格水平分辨率为 $g$ ,移动窗口内各栅格点的三维坐标分别为 $O(0,0,H_0)$ 、 $W_1(-g,-g,H_1)$ 、 $W_2(0,-g,H_2)$ 、 $W_3(g,-g,H_3)$ 、 $W_4(g,0,H_4)$ 、 $W_5(g,g,H_5)$ 、 $W_6(0,g,H_6)$ 、 $W_7(-g,g,$

$N_{LSD}$ 、 $N_{LRU}$ 和 $N_{LTC}$ 分别为归一化后的局部高差(local relief, LRE)、局部标准差(local standard deviation, LSD)、局部褶皱度(local rugosity, LRU)和局部全曲率(local total curvature, LTC)。

### 1.2 复合地形因子误差传递

依靠单一地形因子难以有效描述地形复杂程度,考虑多因子融合理论的复合地形因子能更好地表达地形信息<sup>[17]</sup>。WILSON<sup>[18]</sup>将地形指标分为简单地形指标和复合地形指标,并指出基于统计分析表达的地形复杂度属于复合地形指标。为分析复合地形因子的提取精度,本研究首先在DEM与地形因子函数表达式基础上,通过误差解析获取地形因子误差表达式,然后利用误差传播定律解析复合地形因子传递误差,最后获取复合地形因子提取的误差模型。

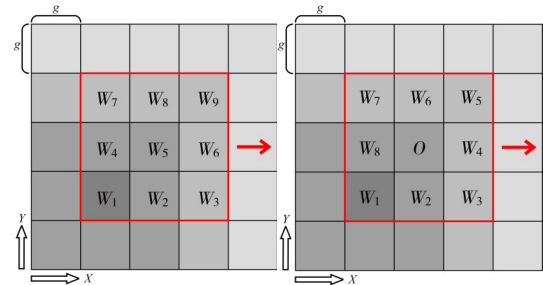
通常情况下,复合地形因子与单一地形因子之间的函数表达如式(2)所示:

$$F = f(x_1, x_2, \cdots, x_n, x_{n+1}) \quad (2)$$

式中: $F$ 为复合地形因子; $x_1$ 、 $x_2$ 、 $\cdots$ 、 $x_n$ 、 $x_{n+1}$ 为不同的单一地形因子。

复合地形因子的中误差表达式如式(3)所示:

$H_7)$ 、 $W_8(-g,0,H_8)$ ,其中 $H_0 \sim H_8$ 为各栅格点的高程值。刘学军等<sup>[11]</sup>指出DEM误差服从二阶平稳高斯随机场,认为各栅格高程中误差呈现各向同性特点。设移动窗口内高程中误差为 $m_H$ ,可知 $m_{H_1} = m_{H_2} = \cdots = m_{H_8} = m_H$ ,其中 $m_{H_1}$ 、 $\cdots$ 、 $m_{H_8}$ 分别为 $H_1 \sim H_8$ 的高程中误差。



(a) 传统移动窗口设置 (b) 本文移动窗口设置

图1 局部移动窗口设置

Fig. 1 Local move window settings

局部高差是移动窗口内的相对高程差值,揭示移动窗口内地形的起伏大小。局部高差表达式如式(4)所示:

$$L_1 = H_{\max} - H_{\min} \quad (4)$$

式中: $L_1$ 为局部高差; $H_{\max}$ 为最大高程值; $H_{\min}$ 为最小高程值。

局部高差的中误差表达式如式(5)所示:

$$m_1 = \sqrt{2} m_H \quad (5)$$

式中: $m_1$ 为局部高差的中误差; $m_H$ 为高程中误差。

局部标准差是移动窗口内的高程标准差,揭示移动窗口内地形的变化程度。局部标准差表达式如式(6)所示:

$$L_2 = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^n (H_v - \bar{H})^2}{n}} \quad (6)$$

式中: $L_2$ 为局部标准差; $H_v$ 为边缘八个栅格的高程值; $\bar{H}$ 为高程平均值。

为简便起见,将式(6)中的  $H_v - \bar{H}$  用  $U_v$  表示,局部标准差的中误差表达式如式(7)所示:

$$m_2 = \sqrt{\frac{8}{81}} m_H \quad (7)$$

式中: $m_2$ 为局部标准差的中误差。

局部褶皱度是地形表面积与投影平面面积的比值,揭示移动窗口内的平均褶皱程度,其中移动窗口中心的栅格  $O$  与周围八个栅格  $W_v$  组成了八个三角形,各三角形的面积相加构成了地形表面积。局部褶皱度表达式如式(8)所示:

$$L_3 = \frac{A_s}{A_p} = \frac{A_s}{4g^2} \quad (8)$$

式中: $L_3$ 为局部褶皱度; $A_s$ 为地形表面积; $A_p$ 为地形水平投影面积; $g$ 为水平分辨率。

局部褶皱度的误差估计模型与地形表面积具有相关性,地形表面积由八个三角形面积组成,每个三角形的误差传播类似,因此只需求解一个三角形面积的中误差表达式,即可通过误差合成求解地形表面积的中误差。以空间三角形  $OW_1W_2$  面积中误差求解为例,如图 2 所示。先对向量  $O_{W_1}$  和  $O_{W_2}$  进行叉乘运算,得到平面  $OW_1W_2$  的正法向量,然后计算正法向量的欧几里得范数,推导过程如

式(9)所示:

$$\begin{cases} Q_v = H_v - H_0 \\ O_{W_1} = (-g, -g, Q_1), O_{W_2} = (0, -g, Q_2) \\ \vec{N} = (Q_1 - Q_2)gi + Q_2gj + g^2k \\ \|\vec{N}\| = \sqrt{(Q_1 - Q_2)^2g^2 + Q_2^2g^2 + g^4} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $H_0$ 为中心栅格的高程值; $H_v$ 为边缘八个栅格的高程值; $Q_v$ 为过程变量; $i, j$ 和  $k$ 为  $X$ 轴、 $Y$ 轴和  $Z$ 轴的单位向量; $\vec{N}$ 为平面  $OW_1W_2$  的正法向量; $\|\vec{N}\|$ 为正法向量的欧几里得范数。

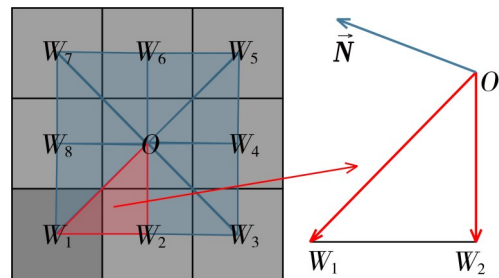


图 2 空间三角形  $OW_1W_2$  面积求解

Fig. 2 Area solution of space triangle  $OW_1W_2$

通过累加八个三角形面积的中误差,可得局部褶皱度的中误差表达式,如式(10)所示:

$$\begin{cases} m_3 = \sum_{v=1}^n \sqrt{\frac{g^2(2Q_v^2 - 6Q_vQ_{v+1} + 5Q_{v+1}^2)}{4g^2 + 4Q_v^2 + 4(Q_v - Q_{v+1})^2}} m_H \\ \varphi = \left[ \frac{(-1)^{v+1} + 1}{2} + v \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m_3$ 为局部褶皱度的中误差。

局部全曲率表征移动窗口内地形的突变程度大小,是在移动窗口内地表沿  $X$ 轴方向、 $Y$ 轴方向、 $X$ 轴和  $Y$ 轴两个方向的总曲率。局部全曲率表达式如式(11)所示:

$$L_4 = \sqrt{r^2 + 2s^2 + t^2} \quad (11)$$

式中: $L_4$ 为局部全曲率; $r$ 为栅格点在  $X$ 轴方向的二阶偏导数; $t$ 为栅格点在  $Y$ 轴方向的二阶偏导数; $s$ 为  $X$ 轴和  $Y$ 轴两个方向的偏导数。

在地形分析领域,为便于移动窗口的数值运算,栅格 DEM 上的偏导数通常使用最小二乘拟合方法近似求解数值差分,  $r, t$  和  $s$  的表达式如式(12)所示:

$$\begin{cases} r = \frac{H_1 + H_3 + H_8 + H_4 + H_5 + H_7 - 2(H_0 + H_2 + H_6)}{3g^2} \\ t = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_5 + H_6 + H_7 - 2(H_0 + H_4 + H_8)}{3g^2} \\ s = \frac{H_1 + H_5 - H_3 - H_7}{4g^2} \end{cases} \quad (12)$$

结合式(11)和式(12)可得局部全曲率的中误差表达式,如式(13)所示:

$$m_4 = \sqrt{\frac{(2r^2 + s^2 + 2t^2)}{(r^2 + 2s^2 + t^2)}} \times \frac{m_H}{g^2} \quad (13)$$

式中: $m_4$ 为局部全曲率的中误差。

依据复合地形因子传递对地形因子中误差进行融合,可得到复合地形复杂度指标的提取误差估计值,如式(14)所示:

$$m_T = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + 2\rho_{12}m_1m_2 + 2\rho_{13}m_1m_3 + 2\rho_{14}m_1m_4 + 2\rho_{23}m_2m_3 + 2\rho_{24}m_2m_4 + 2\rho_{34}m_3m_4}{4}} \quad (14)$$

式中: $m_T$ 为复合地形复杂度指标的提取误差估计值; $\rho_{12}$ 、 $\rho_{13}$ 、 $\dots$ 、 $\rho_{34}$ 分别为 $m_1$ 与 $m_2$ 、 $m_1$ 与 $m_3$ 、 $\dots$ 、 $m_3$ 与 $m_4$ 之间的相关性系数。

### 1.4 模型验证与分析

CEEM有效性验证与分析的试验流程如下:

1)《基础地理信息数字成果 1:5 000 1:10 000 1:25 000 1:50 000 1:100 000 数字高程模型》(CH/T 9009.2—2010)<sup>[20]</sup>规定一级精度的1:10 000比例尺数字高程模型高程中误差不大于5 m。为验证本文模型的有效性,对模拟DEM(详见2.1节)添加1、2、3、4和5 m的噪声。2)将利用模拟DEM

代入式(1)获取的CTCI真值依次减去带噪声模拟DEM获取的CTCI提取值,得到CEEM真值,将带噪声模拟DEM代入式(14)得到CEEM提取值,并通过皮尔逊相关系数<sup>[21]</sup>计算地形因子提取误差之间的相关性。为验证本文模型的稳定性,对CEEM真值和提取值分别进行10次提取,依次序计算逐个像元均值,取均值图作为最终的提取分布图。采用平均误差、决定系数、残差、平均绝对百分比误差、均方差作为CEEM的评价指标。其中:平均误差是将提取值与真值之间的差值取平均;残差反映提取值偏离真值的程度;决定系数反映两种数据的接近程度;平均绝对百分比误差反映提取结果相较真值的平均偏差幅度;均方差是真值与提取值之差的平方期望值。各指标计算公式如式(15)~(19)所示:

$$M_E = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n y_v - \hat{y}_v \quad (15)$$

$$R^2 = \frac{(n \sum_{v=1}^n y_v \hat{y}_v - \sum_{v=1}^n y_v \sum_{v=1}^n \hat{y}_v)^2}{[n \sum_{v=1}^n \hat{y}_v^2 - (\sum_{v=1}^n \hat{y}_v)^2][n \sum_{v=1}^n y_v^2 - (\sum_{v=1}^n y_v)^2]} \quad (16)$$

$$R_{ESE} = y_v - \hat{y}_v \quad (17)$$

$$M_{APE} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n \left| \frac{y_v - \hat{y}_v}{y_v} \right| \times 100\% \quad (18)$$

$$M_{SE} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n (y_v - \hat{y}_v)^2 \quad (19)$$

式中: $M_E$ 为CEEM的平均误差; $R^2$ 为CEEM的决定系数; $R_{ESE}$ 为CEEM的残差; $M_{APE}$ 为CEEM的平均绝对百分比误差; $M_{SE}$ 为CEEM的均方差; $y_v$ 为模拟DEM获取的CEEM真值; $\hat{y}_v$ 为带噪声模拟DEM获取的CEEM提取值; $n$ 为栅格点的数量。

CEEM构建与分析流程如图3所示。

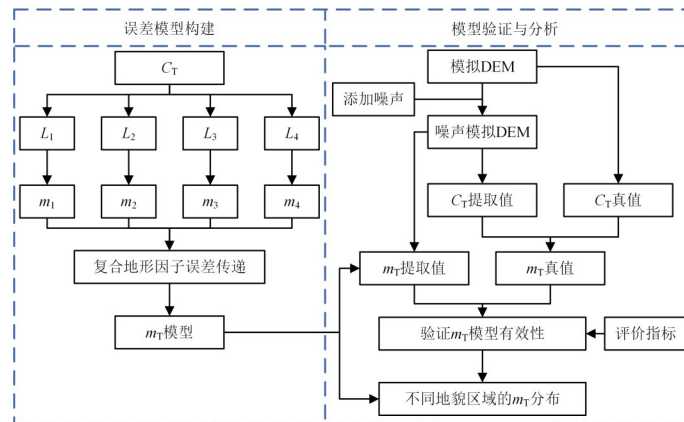


图3 复合地形复杂度指标提取的误差估计模型构建与分析流程图

Fig. 3 Construction and analysis flowchart of CEEM

## 2 结果

### 2.1 试验数据

为了更好地研究 CEEM 的有效性和应用可适性,本文分别采用模拟 DEM 和实体 DEM 进行试验和分析。模拟 DEM 具有光滑、无数据采集误差、可获得地形参数真值的优势<sup>[22]</sup>。本文选取能较好地反映实际地形表面复杂程度的高斯合成曲面来构建模拟 DEM,模拟 DEM 水平分辨率均为 5 m,范围大小为 1 000 m×1 000 m 的正方形区域,栅格像元数量为 40 000 个,模拟 DEM 如图 4(a)所示。选取黄土高原不同地貌特征的丘陵、中山、高山三个试验区进行 CEEM 泛化试验,试验数据为 12.5 m 分辨率 ALOS DEM (<https://search.asf.alaska.edu/>),三个试验区面积均为 18.75 km<sup>2</sup>,共计 120 000 个栅格像元。试验区实体 DEM 如图 4(b)、4(c)、4(d)所示,实体 DEM 基础地形参数统计如表 1 所示。由表 1 可知,丘陵、中山和高山试验区的平均坡度和标准差指标均逐步增大,这表明各试验区的地形复杂程度不同,符合本文对 CEEM 的研究需要。

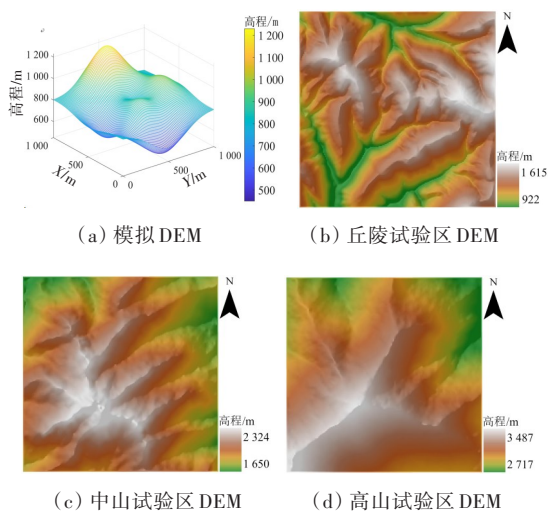


图 4 试验区数据

Fig. 4 Experimental area data

表 1 实体 DEM 基础地形参数统计

Table 1 Statistics of basic terrain parameters of entity DEM

试验区	高程范围/m	平均坡度/(°)	标准差/m
丘陵	922~1 065	28.8	29.8
中山	1 650~2 324	31.1	138.9
高山	2 417~3 487	34.2	229.4

### 2.2 CEEM 验证分析

添加噪声的 CEEM 计算结果统计如表 2 所示。添加 5 m 噪声的 CEEM 计算结果如图 5 所示。在 5 m 噪声的 CEEM 计算结果中随机选取 10 000 个栅格点制作残差图,如图 6 所示。结合表 2 和图 5、图 6 分析可知:平均误差、残差、平均绝对百分比误差和均方差均随噪声增大而逐步增加,决定系数保持在 0.961 以上,回归直线拟合程度较高;残差最大绝对值为  $8.4 \times 10^{-3}$ ,残差阈值大于 0.005 的栅格点数量为 421 个,残差量级微小;平均绝对百分比误差最大值为 22.8%,均方差最大值为  $7.99 \times 10^{-6}$ ,平均误差最大为  $-2.1 \times 10^{-3}$ 。这表明模型稳定性强。添加 5 m 噪声影响的 CEEM 结果显示,不同值域区间边界连续性好,较少出现突变现象。

表 2 添加噪声的  $m_T$  统计结果

Table 2 Statistical results of  $m_T$  of added noises

噪声	$M_E/m$	$R_{ESE}/m$	$M_{APE}/\%$	$M_{SE}/m$	$R^2$
1 m	$-1.5 \times 10^{-3}$	$7.1 \times 10^{-3}$	15.9	$5.61 \times 10^{-6}$	0.961
2 m	$-1.5 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-3}$	16.8	$5.92 \times 10^{-6}$	0.969
3 m	$-1.9 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$	19.9	$6.95 \times 10^{-6}$	0.969
4 m	$-2.0 \times 10^{-3}$	$8.2 \times 10^{-3}$	21.6	$7.32 \times 10^{-6}$	0.971
5 m	$-2.1 \times 10^{-3}$	$8.4 \times 10^{-3}$	22.8	$7.99 \times 10^{-6}$	0.968

注:表中  $R_{ESE}$  为残差最大绝对值。

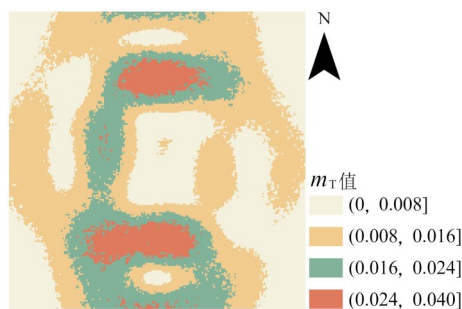


图 5 5 m 噪声影响的  $m_T$  结果

Fig. 5  $m_T$  results affected by 5 m noise

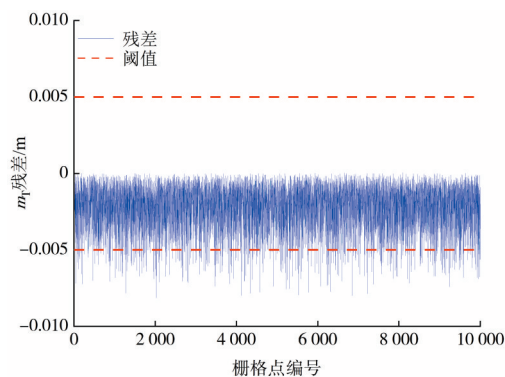


图 6 5 m 噪声影响的  $m_T$  残差

Fig. 6  $m_T$  residual error affected by 5 m noise

### 2.3 CEEM泛化应用分析

试验区实体DEM获取的CEEM如图7所示。由图7可知,CEEM较大值主要聚集在地形起伏区域,山顶范围和地形平坦区域的CEEM值较小,其中丘陵试验区的CEEM最大值和平均值分别为0.054和0.015,中山试验区的CEEM最大值和平均值分别为0.058和0.017,高山试验区的CEEM最大值和平均值分别为0.060和0.019,这表明CEEM最大值和平均值按地形排序由小到大依次为随丘陵、中山、高山试验区。

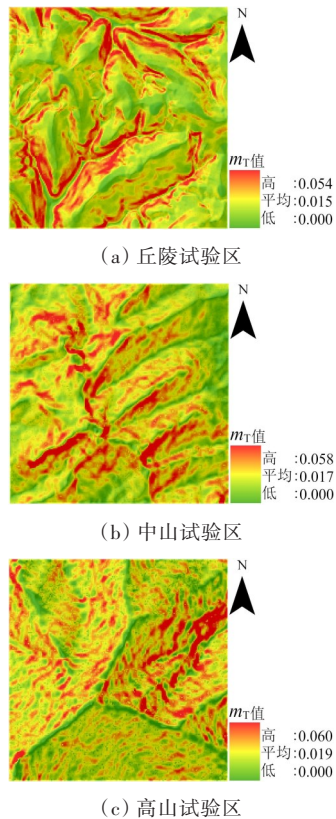


图7 各试验区  $m_T$  分布图

Fig. 7  $m_T$  distribution map in various test regions

## 3 讨论

地形元素在地理空间中具有连续、模糊的特点,除少数简单因子如坡度、坡向外,大部分地形因子难以获取“真值”。因此,对地形复杂度提取结果采取定量化评价较困难,目前评价主要以定性评价为主<sup>[8-10]</sup>。本文采用文献[9]中基于可视化对比分析法评价  $C_T$  提取精度,如图8所示。经过对比分析  $C_T$  与等高线密度变化,判断其提取结果的

可靠性。从图8(a)可观察到,提取的等高线基本与等高线疏密情况相对应,但局部区域也存在不匹配现象,如A、B区域的等高线密度较为稳定,且  $C_T$  取值在0.21上下波动。从图8可以看出,不同等高距生成的等高线存在差异,故  $C_T$  精度评价结果也将不同。可视化对比分析依赖目视对比,主观性较强,且等高距的选取牵扯到阈值问题,缺乏客观性。本文着眼于构建地形复杂度提取的误差解析式,获取的地形复杂度误差分布结果无须目视对比,客观性较好,且避免了等高距阈值选择问题,让大范围评价地形复杂度提取精度成为可能。

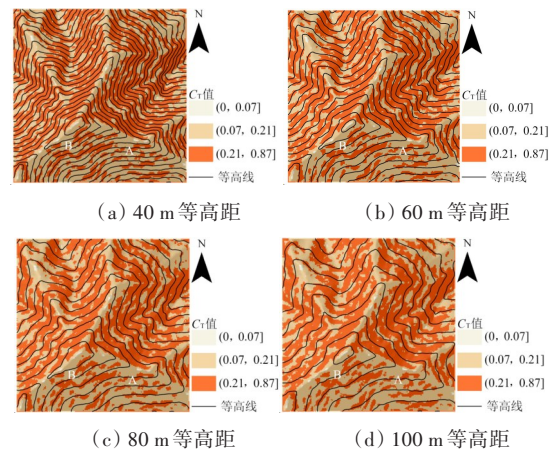


图8 可视化对比分析法评价  $C_T$  提取精度

Fig. 8 Extraction accuracy of  $C_T$  evaluated by visual comparative analysis method

在基于模拟DEM获取的CEEM结果中,平均误差、残差等评价指标结果较好,且在不同噪声影响下,评价指标未出现突变情况。CEEM整体提取结果误差较小,决定系数较高,反映模型稳定性好,抗噪能力强。为进一步探讨地形复杂程度和DEM分辨率对CEEM结果的影响,以0.1为间隔依次将  $C_T$  划分为I至VII级,其中I级  $C_T$  为(0, 0.1], II级  $C_T$  为(0.1, 0.2], 依此类推VII级  $C_T$  为(0.6, 0.7]。不同分辨率模拟DEM下的CEEM均值统计结果如图9所示。由于实体DEM提取的  $C_T$  最大值增至0.8以上,所以增加VIII级和IX级两个  $C_T$  划分区间,两个区间的  $C_T$  分别为(0.7, 0.8]、(0.8, 0.9],并分别统计CEEM均值,如图10所示。由图9可知,  $C_T$  区间I的CEEM均值为0.003 8,  $C_T$  区间VII的CEEM均值为0.036 9,  $C_T$  区间I到VII的CEEM均值近似呈匀速增加,区间平均增加0.005 6。而不同分辨率DEM获取的CEEM均值最大差值为  $C_T$  区间VII,其

差值仅为0.002 6,这表明DEM分辨率对CEEM有一定影响,但不是主要影响因素。地形复杂程度是影响CEEM结果的主要因素。在CEEM泛化试验中, $c_r$ 区间I的CEEM均值为0.005 1, $c_r$ 区间IX的CEEM均值为0.052 5。由图10可知,CEEM均值近似匀速增加,较好地印证了CEEM结果的主要影响因素是地形复杂程度这一观点。

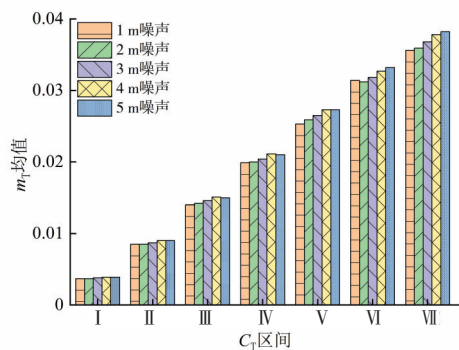


图9 基于模拟DEM的 $m_T$ 区间统计

Fig. 9  $m_T$  interval statistics based on simulated DEM

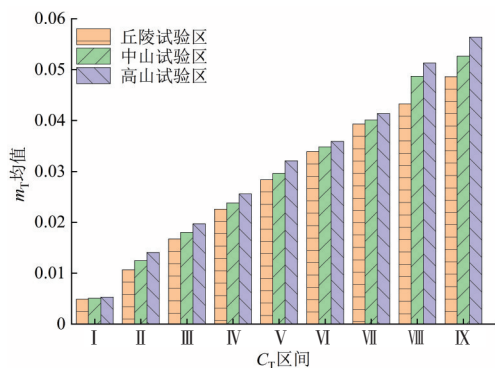


图10 基于实体DEM的 $m_T$ 区间统计

Fig. 10  $m_T$  interval statistics based on entity DEM

丘陵、中山和高山试验区的CEEM结果存在一定规律。从区域地形复杂程度角度考虑,丘陵、中山和高山试验区的最大高差、平均坡度和标准差依次增大,宏观的地形复杂程度由大到小依次为高山、中山、丘陵,导致CEEM最大值和平均值随丘陵、中山和高山试验区依次增加。受限于论文篇幅,本文采用12.5 m分辨率的实体DEM进行CEEM泛化试验。相关研究表明,过高分辨率DEM可能会增加地形因子提取误差,研究高分辨率DEM对地形复杂度提取误差的不确定性影响是下一步工作需要思考和努力的方向。

## 4 结论

本文构建了地形复杂度提取的误差估计模型,并采用模拟DEM和实体DEM分别进行有效性验证和泛化应用,分析了不同噪声下地形复杂度误差模型的变化规律,探讨了不同地貌类型对地形复杂度提取误差的影响,主要结论如下:

1) 较可视化对比分析法,通过误差传播定律构建误差模型获取地形复杂度提取误差,误差解析效率更高,便于大范围评价地形复杂度提取精度。

2) 模拟DEM的模型有效性验证试验表明,在不同噪声影响下,模型整体误差较小,稳定性较好。实体DEM的泛化应用试验表明,不同地貌类型的地形复杂度提取误差存在差异,整体误差由大到小依次为高山、中山、丘陵。

3) CEEM区间统计试验表明,地形复杂程度是影响地形复杂度提取误差的主要因素,结论可为不同地形地貌区域提取地形复杂度提供有益参考。

### [参考文献]

- [1] 周访滨,马国伟,谢财昌,等.基于BP网络的复合地形因子提取研究[J].测绘科学,2023,48(1):227-235.DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2023.01.024. ZHOU Fangbin, MA Guowei, XIE Caichang, et al. Research of compound terrain factors extraction based on BP neural network [J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(1): 227-235. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2023.01.024.
- [2] 张雪莹,张正勇,刘琳,等.新疆地形复杂度的空间格局及地理特征[J].地理研究,2022,41(10):2832-2850. DOI: 10.11821/dlyj020211075. ZHANG Xueying, ZHANG Zhengyong, LIU Lin, et al. Spatial pattern and geographical characteristics of terrain complexity index in Xinjiang [J]. Geographical Research, 2022, 41(10): 2832-2850. DOI: 10.11821/dlyj020211075.
- [3] 季宏超,董箭,李树军,等.顾及形态差异的TIN-DDM地形复杂度度量方法[J].测绘学报,2023,52(6):1010-1021. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2023. 20220074. JI Hongchao, DONG Jian, LI Shujun, et al. TIN-DDM terrain complexity measurement method considering



- topographic forms differences [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(6): 1010-1021. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220074.
- [4] 熊礼阳, 汤国安, 杨昕, 等. 面向地貌学本源的数字地形分析研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 595-611. DOI: 10.11821/dlxb202103008.
- XIONG Liyang, TANG Guoan, YANG Xin, et al. Geomorphology-oriented digital terrain analysis: progress and perspectives [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 595-611. DOI: 10.11821/dlxb202103008.
- [5] 周访滨, 王俊, 谢财昌, 等. 爆燃地形的特征表达与提取方法[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(2): 70-76. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.007.
- ZHOU Fangbin, WANG Jun, XIE Caichang, et al. Feature expression and extraction method of deflagration terrain [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19(2): 70-76. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.007.
- [6] 邓兴升, 王清阳. 基于梯度提升决策树的植被高度模型研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(1): 65-74. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211130008.
- DENG Xingsheng, WANG Qingyang. Study on vegetation height model based on the gradient boosting decision tree [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(1): 65-74. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211130008.
- [7] CARLOS L V. Uncertainty interval estimates for computing slope and aspect from a gridded digital elevation model [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022, 36(8): 1601-1628. DOI: 10.1080/13658816.2022.2063294.
- [8] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-288X.2004.04.015.
- WANG Lei, TANG Guoan, LIU Xuejun, et al. Terrain complexity index and its derivation from DEMs [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(4): 55-58. DOI: 10.3969/j.issn.1000-288X.2004.04.015.
- [9] 卢华兴, 刘学军, 汤国安. 地形复杂度的多因子综合评价方法[J]. *山地学报*, 2012, 30(5): 616-621. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.05.011.
- LU Huaxing, LIU Xuejun, TANG Guoan. Terrain complexity assessment based on multivariate analysis [J]. *Journal of Mountain Research*, 2012, 30(5): 616-621. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.05.011.
- [10] 张倩宁, 黄泽纯, 徐柱, 等. 一种自适应权重地形复杂度模型[J]. *山地学报*, 2017, 35(2): 230-237. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000216.
- ZHANG Qianning, HUANG Zechun, XU Zhu, et al. An adaptive weighting terrain complexity model [J]. *Mountain Research*, 2017, 35(2): 230-237. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000216.
- [11] 刘学军, 卞璐, 卢华兴, 等. 顾及DEM误差自相关的坡度计算模型精度分析[J]. *测绘学报*, 2008, 37(2): 200-206. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.02.013.
- LIU Xuejun, BIAN Lu, LU Huaxing, et al. The accuracy assessment on slope algorithms with DEM error spatial autocorrelation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 200-206. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.02.013.
- [12] FLORINSKY I V. Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(2): 213-231. DOI: 10.1080/13658810802527499.
- [13] 朱奇峰, 杨勤科, 龙永清, 等. 高程梯度性质和算法不确定性的初步分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 19-26. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.04.004.
- ZHU Qifeng, YANG Qinke, LONG Yongqing, et al. Preliminary properties and precision analysis of elevation gradient algorithm [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(4): 19-26. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.04.004.
- [14] SHI D, YANG Q K, ZHU Q F, et al. Uncertainties and errors in algorithms for elevation gradients [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, 35(2): 296-320. DOI: 10.1080/13658816.2020.1766047.
- [15] 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.
- LIU Chun, SUN Weiwei, WU Hangbin. Terrain complexity factor and its relationship with accuracy of DEM terrain representation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(9): 1014-1020.
- [16] JIA G M, WANG X J, WEI H. An effective approach for selection of terrain modeling methods [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 875-879. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2226429.

(下转第61页)

- [20] KENNEDY M, O' HAGAN A. Predicting the output from a complex computer code when fast approximations are available[J]. *Biometrika*, 2000, 87(1): 1-13. DOI: 10.1093/biomet/87.1.1.
- [21] SHI M L, LV L Y, SUN W, et al. A multi-fidelity surrogate model based on support vector regression[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 61(6): 2363-2375. DOI: 10.1007/s00158-020-02522-6.
- [22] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构掘进的数学物理模型及各参数间关系研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(9): 86-90. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.09.014.  
WANG Hongxin, FU Deming. A mathematical model and the related parameters for EPB shield tunneling[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(9): 86-90. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.09.014.
- [23] 亢晨钢, 李守巨, 刘迎曦. EPB盾构机土仓压力分布有限元数值模拟[J]. *工程建设*, 2009, 41(4): 1-6, 14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8993.2009.04.001.  
KANG Chengang, LI Shouju, LIU Yingxi. Numerical simulation of earth pressure distribution in chamber of EPB shield by finite element method[J]. *Engineering Construction*, 2009, 41(4): 1-6, 14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8993.2009.04.001.
- [24] SHI M L, LI H Y, LIU X M. Multidisciplinary design optimization of dental implant based on finite element method and surrogate models[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(10): 5067-5073. DOI: 10.1007/s12206-017-0955-x.
- [25] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69: 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

(责任编辑:刘平;校对:彭三军)

(上接第48页)

- [17] 周访滨, 谢财昌, 王俊, 等. 栅格DEM坡体因子融合方法[J]. *测绘通报*, 2022(8): 104-109. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0240.  
ZHOU Fangbin, XIE Caichang, WANG Jun, et al. Slope body factor fusion of grid DEM[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(8): 104-109. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0240.
- [18] WILSON J P. Digital terrain modeling [J]. *Geomorphology*, 2012, 137(1): 107-121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.03.012.
- [19] 呼雪梅, 秦承志. 数字地形分析中适宜分析窗口选择方法的评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(10): 1365-1372. DOI: 10.13203/j.whugis20140476.  
HU Xuemei, QIN Chengzhi. Analysis on the approach to determine an appropriate window size for grid-based digital terrain [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1365-1372. DOI: 10.13203/j.whugis20140476.
- [20] 国家测绘局. 基础地理信息数字成果 1:5 000 1:10 000 1:25 000 1:50 000 1:100 000 数字高程模型: CH/T 9009.2—2010[S]. 北京: 测绘出版社, 2010.  
State Bureau of Surveying and Mapping of the People's Republic of China. Digital products of fundamental geographic information 1:5 000 1:10 000 1:25 000 1:50 000 1:100 000 digital elevation models: CH/T 9009.2—2010[S]. Beijing: Sino Maps Press, 2010.
- [21] 孙博文, 张广超, 王飞. LYQJ40 t-18 m架桥机抗风稳定性能研究[J]. *交通科学与工程*, 2024, 40(2): 99-107. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022110120240492.  
SUN Bowen, ZHANG Guangchao, WANG Fei. Study on wind-resistance stability of LYQJ40 t-18 m bridge erection machine[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2024, 40(2): 99-107. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022110120240492.
- [22] 周访滨, 肖智文, 刘学军, 等. 栅格DEM山顶点提取的坡向分布特征法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(3): 419-425. DOI: 10.13203/j.whugis20210479.  
ZHOU Fangbin, XIAO Zhiwen, LIU Xuejun, et al. Mountain peak extraction of grid DEM based on aspect distribution feature [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(3): 419-425. DOI: 10.13203/j.whugis20210479.

(责任编辑:毛娜;校对:刘平)