

doi: 10.6046/zrzyg.2022005

引用格式: 江娜, 陈超, 韩海丰. 海岸带地类统计模型中 DEM 空间尺度优选方法[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 34–42.
(Jiang N, Chen C, Han H F. An optimization method of DEM resolution for land type statistical model of coastal zones[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 34–42.)

海岸带地类统计模型中 DEM 空间尺度优选方法

江娜¹, 陈超², 韩海丰¹

(1. 山东省国土测绘院, 济南 250013; 2. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022)

摘要: 精确翔实、三维立体、尺度适宜的地类统计数据对于海岸带自然资源监测监管和生态保护具有重要意义, 地类统计模型需要数字高程模型(digital elevation model, DEM)的支撑, 然而当前鲜有 DEM 空间尺度与统计模型的适配性方面的研究。针对于此, 该文提出了一种海岸带地类统计模型中 DEM 空间尺度优选方法, 系统探讨了 DEM 空间尺度对地类统计模型的影响, 从统计准确性、概括性、信息量和计算效率 4 个角度选取指标并构建评价模型, 基于熵权法确定指标权重并加权计算得到 DEM 最优空间尺度。研究结果表明: ①DEM 采样间隔越大, 对统计准确性和信息量的负向影响越明显, 对信息概括性正向影响越显著; ②准确性因子对 DEM 精细度要求高, 为满足统计精度 DEM 分辨率不应超过 30 m, 而地貌概括则要求空间分辨率不能低于 10 m; ③空间操作计算时间与 DEM 格网数量呈线性正相关; ④基于熵权法计算权重后综合评价, 最优 DEM 空间尺度为 10 m。该文形成的 DEM 空间尺度优选方法在海岸带自然资源及其他调查监测地类统计中具有通用性和可扩展性。

关键词: 海岸带; 地类统计; DEM 空间尺度; 信息熵; 熵权法

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)01-0034-09

0 引言

海岸带是陆地和海洋之间相互作用的交汇地带, 受人类活动影响大, 其自然和生态环境极其脆弱和敏感^[1-4]。随着自然资源及各项调查监测工作的开展, 依据不同的分类体系, 管理部门形成了多源、海量的地理数据, 能够客观反映海岸带土地、森林、草原、湿地等要素空间分布情况。为准确评估海岸带“山水林田湖草”等自然资源情况以支撑海岸带保护开发与科学利用, 需要以数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据为三维空间基底, 通过地类统计模型摸清地类表面面积底数, 以揭示该特殊区域地类分布的空间特性、相互关系及其分布规律^[5]。

DEM 是地表形态的数字化表达, 蕴含了三维分析所必需的地形地貌信息。多尺度是 DEM 的重要特征, 数字地形应用分析面临各种尺度问题^[6]。DEM 空间尺度对自身信息量、数据精度^[7-9], 以及坡度、坡向、曲率等地形因子具有直接的影响。此

外, DEM 尺度对地貌类型划分^[10]、生态价值评估^[11]、土壤有机碳制图^[12]、土壤侵蚀预报^[13]、水文模型构建^[14-15]和岩性识别与分类^[16]等均具有重要影响。随着 DEM 采样间隔增大, 地形描述精度呈降低趋势^[8], 地形信息被综合, 地形概括能力增强, 整体趋于平坦化^[17]。在开展具体的应用与分析时, 需综合考虑统计模型与 DEM 数据尺度匹配的问题^[9], 选取适宜的研究区间。在海岸带地类统计模型构建过程中, DEM 空间分辨率越高, 越能真实、精准地表达区域地形地类空间分布, 但数据体量和计算密度急速增加, 影响计算和存储的效率^[5], 还会导致局部区域出现微地貌, 影响地类整体统计结果。因此, 开展海岸带自然资源地类三维统计时, 需综合考虑地类的空间结构、分布特点、采集指标、统计精度和计算效率等因素的影响选取最优尺度的 DEM 数据。

当前, 鲜有针对于 DEM 尺度与自然资源地类统计适配性问题的专门研究, 各调查监测成果统计中采用的 DEM 尺度也不一。在基于无缝场模型开展的大型自然资源调查监测中, 地理国情监测数据基

收稿日期: 2022-01-04; 修订日期: 2022-01-21

基金项目: 山东省重点研发计划项目“省级自然资源监测监管大数据云平台建设项目”(编号: 2019JZZY020103)和国家自然科学基金项目“人类活动影响下的群岛区域海岸线时空演变机制分析”(编号: 42171311)共同资助。

第一作者: 江娜(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事自然资源调查监测与数据挖掘。Email: jiangna123321@163.com。

通信作者: 陈超(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事海岸带环境遥感研究。Email: chenchao@zjou.edu.cn。

本统计主要基于 10 m 格网 DEM 开展;第三次国土调查成果以各省最精细 DEM 生成的坡度数据(如山东省基于 2 m 格网 DEM 数据),分级统计耕地等地类面积。针对于此,本文研究海岸带统计模型与 DEM 空间尺度的关系,讨论影响统计结果的主要因素,构建评价模型,提出了一种针对海岸带地类统计的 DEM 空间尺度优选方法。本文提出的方法为海岸带地理国情监测、第三次国土调查、森林资源调查以及其他调查监测的地类统计 DEM 尺度选取提供了理论和实践依据并可推广至其他区域。

$$S = \sum_{i=1}^n p_{xi} f(x_i) + \sum_{j=1}^m p_{yj} y(y_j) + \sum_{k=1}^q p_{zk} z(z_k) + \sum_{g=1}^p p_{og} o(o_g) \quad (1)$$

式中: S 为总体影响评价; $f(x_i)$ 为 DEM 空间尺度对准确性的影响; p_{xi} 为各准确性因子权重; $y(y_j)$ 为 DEM 空间尺度对概括性的影响; p_{yj} 为各概括性因子权重; $z(z_k)$ 为 DEM 空间尺度对信息量的影响; p_{zk} 为各信息量因子权重; $o(o_g)$ 为 DEM 空间尺度对计算效率的影响; p_{og} 为各计算效率因子权重。各 DEM 尺度影响因子层次结构如图 1 所示,其中 * 为限制性因子。

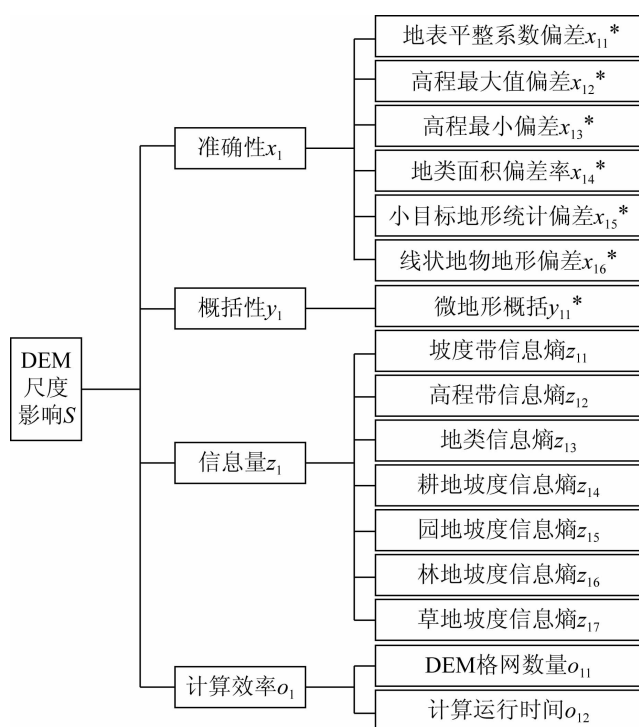


图 1 DEM 空间尺度评价模型

Fig. 1 DEM resolution evaluation model

评价指标分为限制性指标和一般性指标,限制性指标对 DEM 空间尺度具有决定性:当 DEM 空间尺度不满足限制性指标要求时,需剔除该尺度;当满足需求时,与一般性指标共同参与影响力计算。基于客观赋权法-熵权法计算各影响因子权重,加权计算 DEM 各尺度综合得分,得分最高的尺度即为最优 DEM 空间尺度。具体技术流程如图 2 所示。

1 研究方法

海岸带地类统计模型中 DEM 空间尺度影响结果的准确性、概括性、信息量和计算效率。在本方法中,以现有最高精度 DEM 为数据源派生出多尺度 DEM 数据,以精准的地类图斑数据为待统计数据源,从 DEM 空间尺度对统计结果的准确性、概括性、信息量和计算效率等 4 个方面选取影响因子构建评价模型,数学表达式为:

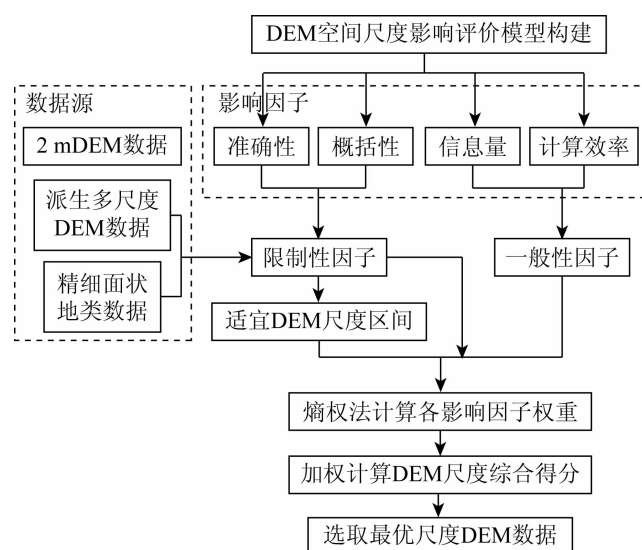


图 2 技术流程

Fig. 2 Technical flow chart

1.1 准确性评价因子

全国第三次国土调查、地理国情监测等自然资源调查监测成果属于“统一比例尺、统一分辨率、统一内容指标、统一采集标准的无缝隙、高分辨率、覆盖全域”的高精度地理要素数据^[5],对其开展统计分析需优先保证统计精度,即准确性。DEM 空间尺度既要满足地类统计的精度要求,也需满足区域基本地形因子描述的精度要求,此处选取代表性地形统计因子:高程最大值、最小值、地表平整系数^[18],统计各因子偏差率;对于地类统计精度的测定,选取地类面积偏差率作为限制性指标。特别注意海岸带特殊地物(如独立房屋、固化池等面积占比小于 0.1% 的细小目标)的统计精度,以及铁路与道路等线状目标地类的统计偏差,将其作为限制性因子,当 DEM 尺度对特殊地物影响偏差超过设定阈值时,直接剔除该尺度。

准确性评价采用的指标为:偏差率、偏差均方根。根据“DEM 采样间隔增大,地形描述精度呈降低趋势^[8]”这一基本规律,可将最高尺度 DEM 的地

形统计和地类统计结果近似为真值。高程最大值偏差率 m_i 计算公式为:

$$m_i = \frac{|\max(h_i) - \max(h_o)|}{\max(h_o)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\max(h_i)$ 表示区域 DEM 尺度为 i m 时 DEM 高程最大值; $\max(h_o)$ 为最高分辨率时的高程最大值, 作为近似真值。地表平整系数是区域平面面积与地表表面面积的比值, 反映地表的粗糙程度^[18]; 最小值偏差率和地表平整系数偏差率计算公式与式 (2) 一致。

地类偏差率 $m_{i,j}$ 和偏差率均方根 $RMSE_j$ 计算公式分别为:

$$m_{i,j} = \frac{|S_{i,j} - \hat{S}|}{\hat{S}} \times 100\% \quad (3)$$

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_{i,j}^2} \quad (4)$$

式中: $S_{i,j}$ 为 i m 的 DEM 格网、第 j 个地类统计面积; N 为地类数量; $\hat{S}$ 为地类近似真实面积。准确性影响因子均为限制性指标, 根据 DEM 数据高程精度要求^[19]、统计偏差相关研究^[20] 等确定阈值, 偏差率、偏差均方根越小, 代表统计结果就越接近于近似真值。

1.2 概括性评价因子

统计分析是从离散数据向信息、知识乃至智慧转化和提升的过程^[21], 因此, 统计结果要体现概括性和规律性。精细的 DEM 数据可能会保留局部微地貌, 在地类统计过程中具体表现为坡度带破碎、数据量大, 村台、路基等平坦地物存在较大坡度起伏。针对于此, 选取微地貌概括因子来衡量 DEM 尺度的影响。

微地貌概括为限制性因子, 反映 DEM 对于微地貌的综合情况。其计算方式为: 选取道路、平坦房屋建筑区等作为样本区 (坡度带在 $0^\circ \sim 2^\circ$ 范围), 统计该范围 $0^\circ \sim 2^\circ$ 坡度带的面积占比 S_p , 公式为:

$$S_p = S_{0-2} / S_\Sigma \times 100\% \quad (5)$$

式中: S_{0-2} 为样本区 $0^\circ \sim 2^\circ$ 坡度带面积; S_Σ 为样本区总面积。借鉴中误差理论, 统计值落入 ± 2 倍标准差范围内的概率为 95.5%, 因此以 95.5% 作为微地貌概括因子的阈值。

1.3 信息量评价因子

DEM 地形信息量是判定 DEM 应用适宜性与限制性的关键^[22], 在地类统计过程中, 需保留尽可能多的信息量。针对不同尺度、不同分级方式度量

DEM 地形信息量大小经常采用信息熵的方法, 将 DEM 不同尺度的栅格视为离散的平稳信号源, 以不同信号出现的概率大小为依据, 从统计特征来考虑 DEM 地形信息熵^[7, 22-24]。假设 C 是随机事件 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 的一个系统, 其中 $P(E_k) = P_k, P_k$ 在 $[0, 1]$ 之间, $\sum_{k=1}^n P_k = 1$, 那么事件 E_k 的自信息量定义为 $I(E_k) = -\lg P_k$ (以 2 为底, 信息量的单位为比特)^[7], 信息熵 $H(C)$ 计算公式为:

$$H(C) = - \sum_{k=1}^n P_k \lg P_k \quad (6)$$

信息熵反映了数据不确定性的多少, 数据信息熵越接近最大熵值, 其分布也越规则^[23]。在地类统计过程中, 首先计算地形因子坡度带和高程带的信息熵; 其次以地类为单元, 统计不同 DEM 尺度下地类信息熵; 最后, 选取耕地、园地、林地、草地等空间分布与地形关联较大的地类计算坡度带信息熵。信息量评价因子为一般性因子。

1.4 计算效率评价因子

计算效率是评价统计模型经济性的重要因素, 选取 DEM 格网数量以及相同处理环境下不同空间尺度 DEM 重要处理环节运行的时间等 2 个因素来开展计算效率评价, 2 个因子均为一般性因子。

1.5 熵权计算

通过限制性因子筛选适宜的 DEM 尺度, 基于熵权法确定各因子权重。熵权法适用于定量指标的客观赋权和无量纲化^[24], 其基本思想是认为评价指标的差异程度越大越重要, 则权重相应也越大^[25]。熵权法计算权重可分为以下步骤^[25-27]:

1) 构造原始指标数据矩阵 $R_{u \times v}$, 即

$$R = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1v} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{u1} & \cdots & x_{uv} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: u 为评价指标数量; v 为评价对象数量。

2) 对原始指标数据进行归一化处理, 得到标准化矩阵 I , 即

$$I = (r_{ij})_{u \times v} \quad (8)$$

式中 r_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的标准值, $r_{ij} \in [0, 1]$ 。对于正向指标为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min R_i}{\max R_i - \min R_i} \quad (9)$$

式中: $\min R_i$ 和 $\max R_i$ 分别为第 i 个评价指标的最大和最小值。对于负向指标为:

$$r_{ij} = \frac{\max R_i - x_{ij}}{\max R_i - \min R_i} \circ \tag{10}$$

3)定义熵。在式(6)的基础上,第*i*个指标的熵*H_i*定义为:

$$H_i = H(C_i)/\text{lb } v \circ \tag{11}$$

4)定义熵权。第*i*个指标的熵权*w_i*定义为:

$$w_i = (1 - H_i)/(u - \sum_{i=1}^u H_i) \circ \tag{12}$$

2 实验与分析

2.1 研究区概况

本次研究以山东省海岸带区域为研究区(图 3),包括山东省沿海 34 个县级行政区划,涉及 7 个地市,位于 N35°04′~38°24′,E117°30′~122°42′之间,陆域面积为 4.14 万 km²。山东省滨州、东营、潍坊等沿海区域濒临渤海,为黄河三角洲冲积平原地区,地势平坦;东部烟台、青岛、威海、日照沿海为胶东丘陵地貌。海岸带地表覆盖和土地利用方式丰富,以耕地、草地、园林地为主,建设用地占区域面积的 21.4%;同时,海岸带是水陆交接、人类活动频繁的区域,其生态保护和开发具有重要的意义,以此为研究区具有典型性和代表性。

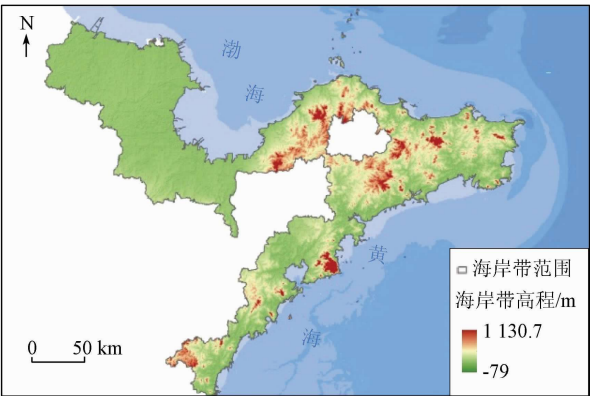


图 3 研究区地形
Fig.3 Topography of the study area

2.2 数据来源

以 2020 年地理国情监测地表覆盖面数据为地类数据源,分为耕地、园地、林地、草地、房屋建筑(区)、铁路与道路、构筑物、人工堆掘地、荒漠与裸露地表、水域等 10 个一级类,分类标准参见《GDPI 01—2013 地理国情普查内容与指标》。DEM 数据基于 LiDAR 点云数据生产,空间尺度为 2 m,数据现势性为 2014—2019 年,是迄今为止山东省精度最高的 DEM 数据。以 2 m 格网 DEM 数据为基础,在 ArcGIS 软件中采用空间重采样方式,派生 5 m,10 m,15 m,

20 m,30 m,40 m,50 m,60 m,70 m,80 m,90 m,100 m 等 12 个不同尺度的 DEM 数据,参与计算的 DEM 共计 13 个尺度。部分尺度 DEM 数据如图 4 所示。

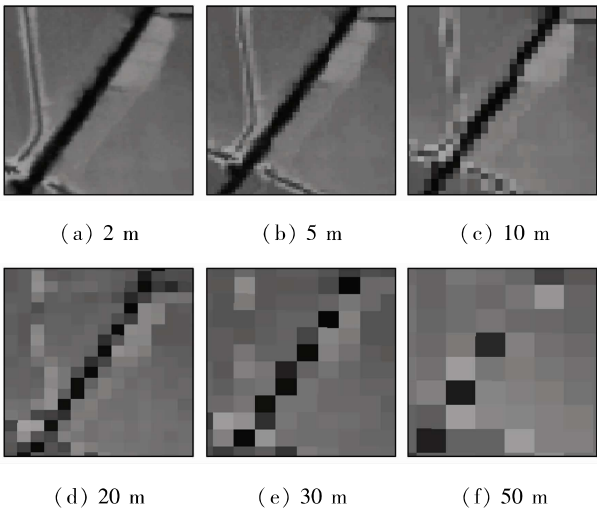


图 4 2 m, 5 m, 10 m,20 m,30 m 和 50 m 空间尺度下 DEM 地形表现能力
Fig.4 Topographic performance of 2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m and 50 m DEM

2.3 结果与分析

2.3.1 准确性分析

基于 2 m 格网 DEM 统计区域地形特征,山东省海岸带高程值在[-79.0,1 130.7]m 之间,均值为 49.6 m,地表平整系数为 0.977 6。随着 DEM 空间尺度增大,区域地表平整系数不断增加,越来越趋近于 1;最大值被综合,呈逐渐减少的趋势,最小值和均值局部存在较大波动,见表 1;偏离率呈现增加的趋势,如图 5 所示。

表 1 地形统计特征与 DEM 空间尺度的关系
Tab.1 Relationship between topographic statistical features and DEM resolution

DEM 空间 尺度/m	地表平 整系数	最小值/m	最大值/m	均值/m
2	0.977 6	-79.0	1 130.7	49.563 6
5	0.981 5	-79.0	1 129.6	49.563 6
10	0.985 1	-78.9	1 129.9	49.563 6
15	0.986 7	-79.0	1 127.7	49.563 6
20	0.987 9	-79.0	1 127.5	49.563 7
30	0.989 4	-78.8	1 126.2	49.563 6
40	0.990 5	-78.8	1 111.1	49.564 1
50	0.991 3	-78.8	1 123.3	49.563 5
60	0.992 0	-78.8	1 103.8	49.563 8
70	0.992 6	-78.7	1 109.2	49.561 1
80	0.993 1	-78.7	1 092.1	49.564 5
90	0.993 5	-78.7	1 111.1	49.562 3
100	0.993 9	-78.7	1 098.6	49.566 4

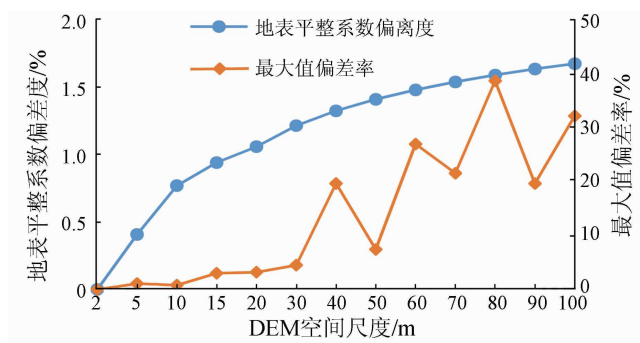


图5 地表平整系数和最大值偏差率随 DEM 空间尺度变化

Fig. 5 Variation of surface flatness coefficient and maximum deviation rate with DEM resolution

极值点的限差依据 CH/T 9009.2—2010 相关规定确定,2 m 格网 DEM 近似于 1:5 000 比例尺 DEM 精度要求,高程最大值位于崂山山区,按山地推定高程中误差为 2.5 m,最小值均位于莱州市平原地区,推定高程中误差为 0.5 m^[19]。以 2 m DEM 作为真值,区域高程极值应在 2 倍中误差范围内,即最小值、最大值分别需在 (-79.0 ± 1.0) m、 $(1\ 130.7 \pm 5.0)$ m 范围内。对比重采样后高程极值,按最大值推定合适的尺度区间为 $[2, 30]$ m,按最小值推定为

$[2, 100]$ m,根据地形精度要求 DEM 空间尺度需在 $[2, 30]$ m 之间。

除地形特征外,还需保持地类统计结果的准确性,特别是对线状以及小目标地物的统计精度。计算结果发现,随着 DEM 尺度的增加,地类统计精度整体呈现降低的趋势,如表 2 所示。文献[20]中提及统计精度在万分之几的量级上可满足需求,因此选取地类偏差率阈值为 10/10 000,得到 DEM 空间分辨率需小于等于 30 m。面积较小、细长地物的地类统计对于 DEM 尺度要求更高,试验区内线状地物以铁路与道路为例(图 6),小目标地物以区域面积最小的 2 个子类草本果园(19 596.4 m²)和露天稀土矿采掘场(24 752.6 m²)为例开展分析。对特殊地物放宽限差要求,按照主体在 2 倍中误差、置信水平 95.5% 内,发现铁路与道路因基数较大各尺度均可满足精度需求;但小目标地物适宜 DEM 尺度分别限定在 $[2, 50]$ m 和 $[2, 30]$ m 之间(图 7)。由此可见,地类统计和地形精度限制性因子对 DEM 尺度要求是一致的,即不可超过 30 m。

表 2 DEM 空间尺度与地类统计精度关系

Tab. 2 Relationship between DEM resolution and statistical accuracy of land types

(10^{-4})

DEM 空间尺度/m	耕地	园地	林地	草地	房屋建筑区	铁路与道路	构筑物	人工堆掘地	荒漠与裸露地表	水域	整体偏差	偏差率均方根
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.34	0.23	0.28	0.43	0.05	0.84	1.01	0.47	1.77	1.58	0.20	0.89
10	0.54	0.19	0.28	0.03	0.38	3.61	0.69	0.33	8.56	0.34	0.15	2.96
15	0.64	0.64	0.39	0.07	0.94	3.33	0.75	2.50	4.34	0.56	0.18	1.97
20	0.44	1.10	1.21	0.17	3.06	7.58	1.93	0.93	5.37	0.68	0.02	3.22
30	0.66	0.42	1.62	0.06	3.43	8.34	3.43	2.73	8.35	2.54	0.12	4.24
40	1.50	2.83	3.27	3.51	0.99	8.35	10.99	4.46	2.19	2.00	0.08	5.03
50	4.30	7.01	2.81	2.68	4.25	7.52	14.10	3.99	16.26	6.39	0.07	8.23
60	6.17	3.79	1.76	3.58	6.13	3.30	1.36	2.17	6.58	2.52	0.04	4.16
70	7.21	6.98	3.64	0.15	17.34	14.98	2.16	9.98	14.13	5.00	0.03	9.84
80	1.53	9.25	2.71	14.39	11.08	39.75	4.29	2.99	52.30	0.85	0.11	21.84
90	1.64	10.47	2.96	1.75	0.98	22.68	7.02	10.30	31.67	15.14	0.24	14.24
100	4.66	16.06	5.37	14.51	1.09	73.81	14.25	2.34	1.37	16.89	0.08	25.42

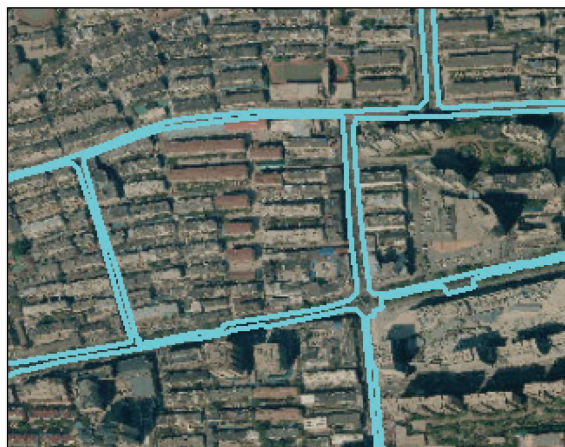


图6 线状地物示例

Fig. 6 Example of linear figure

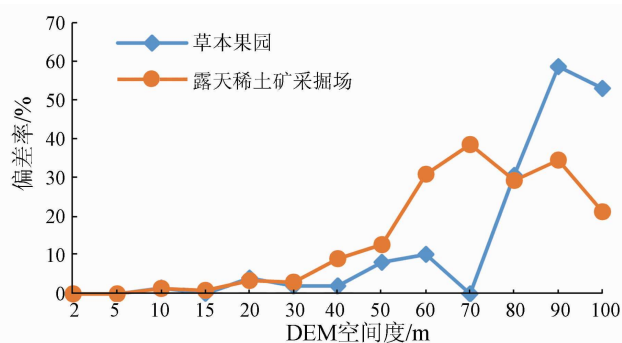


图7 小目标地物统计偏差率与 DEM 尺度的关系

Fig. 7 Relationship between statistical deviation rate of small target features and DEM resolution

2.3.2 概括性分析

结合遥感影像和 DEM 数据选取海岸带平坦地

区(坡度 $\leq 2^{\circ}$)面积大于 150 000 m^2 的低矮房屋建筑区为样本区,为避免房屋边界出现坡度突变,将边缘向内收缩 5 m、去除多部件并再次筛选面积大于 150 000 m^2 的 376 个样本区作为研究区。开展不同 DEM 空间尺度下房屋建筑区各坡度带分布统计,结果如表 3 所示。当空间尺度为 2 m 时,目标区 2° 以

下坡度带面积仅占 77.15%,5 m 时占比为 87.42%;存在大量微地貌不利于地形统计,10 m 及更大尺度时 2° 以下坡度带占比超过 95.5%,满足地类统计的概括性限制要求。从概括性的角度来看,适当的 DEM 尺度综合对于去除微地形非常重要,在本试验中 DEM 格网尺寸不能小于 10 m。

表 3 房屋建筑区在不同 DEM 尺度下各坡度带分布情况统计
Tab.3 Statistics of distribution in slope zones in residential area at different DEM resolutions (%)

DEM 空间尺度/m	0°	$(0,2]^{\circ}$	$(2,3]^{\circ}$	$(3,5]^{\circ}$	$(5,6]^{\circ}$	$(6,8]^{\circ}$	$(8,10]^{\circ}$	$(10,15]^{\circ}$
2	5.29	71.85	13.19	8.02	0.96	0.52	0.11	0.05
5	0.59	86.83	8.65	3.62	0.25	0.06	0	0
10	0.17	95.73	3.89	0.21	0	0	0	0
15	0	99.63	0.37	0	0	0	0	0
20	0	99.72	0.28	0	0	0	0	0
30	0	100.00	0	0	0	0	0	0

2.3.3 信息量分析

对不同尺度 DEM 数据开展高程带、坡度带分级,参照地理国情基本统计规程^[18]及其操作实践,将研究区高程分为 $(-50,50)\text{m}$, $[50,100)\text{m}$, $[100,200)\text{m}$, $[200,500)\text{m}$, $[500,800)\text{m}$, $[800,1\,000)\text{m}$, $[1\,000,1\,200)\text{m}$ 等 7 个高程带,依据水土保持通用分类分级标准,将坡度分为 $(0,3]^{\circ}$, $(3,5]^{\circ}$, $(5,10]^{\circ}$, $(10,15]^{\circ}$, $(15,20]^{\circ}$, $(20,25]^{\circ}$, $(25,30]^{\circ}$, $(30,35]^{\circ}$, $(35,40]^{\circ}$, $(40,45]^{\circ}$, $(45,50]^{\circ}$, $(50,55]^{\circ}$, $(55,90]^{\circ}$ 等 13 个坡度带。计算结果发现,DEM 空间尺度与坡度带信息熵呈负线性相关关系,即

$$y = -0.088\,5x + 2.376\,1。$$
 (13)

判定系数 R^2 为 0.933 1,坡度带信息熵随 DEM 空间尺度增加逐渐递减,从 2 m 到 100 m,熵值丢失率(熵值减少值与初始值的比值百分比)为

45.77%;而高程带信息熵对 DEM 尺度不敏感,信息熵在 $[1.379\,8,1.379\,9]$ 之间,变化量微小,与 DEM 尺度无明显相关性,如图 8 所示。

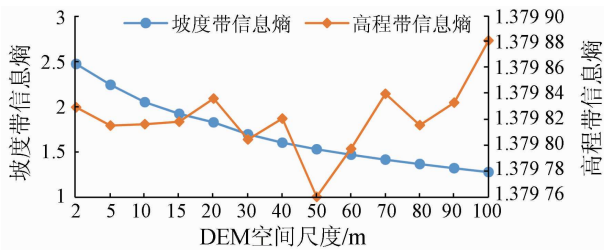


图 8 坡度带和高程带信息熵随 DEM 尺度变化
Fig.8 Variation of information entropy of slope zone and elevation zone with DEM resolution

统计耕地、园地、林地和草地等植被的地类坡度信息熵,发现随着 DEM 格网增大,各地类信息熵均呈现降低的趋势,信息熵丢失率逐渐增大,变化情况如图 9 所示。

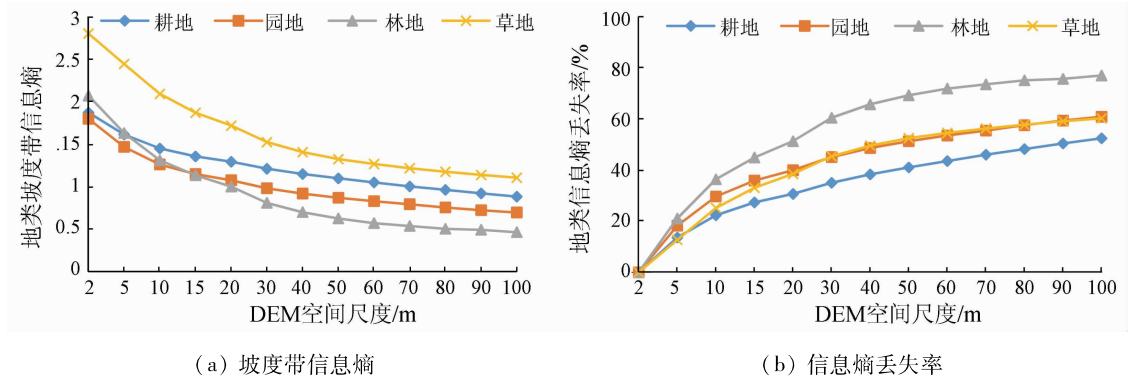


图 9 植被坡度带信息熵与信息熵丢失率随 DEM 尺度变化

Fig.9 Variation of information entropy and information entropy loss rate of vegetation slope zone with DEM resolution

当 DEM 空间尺度相同时,草地信息熵最大,2 m 时值为 2.80,而园地最小仅为 1.80,表明草地在各坡度带的分布较其他地类相对均匀,而园地在坡度带上分布相对集中。同时,随着 DEM 格网增大,各地类在特定坡度带上的分布趋于聚集。100 m 格网

相对 2 m 格网地类的信息熵丢失率在 $[52.45\%,77.07\%]$ 之间,林地的信息熵丢失率最大,表明林地坡度带信息熵对于尺度变化最为敏感。因耕地、园地、林地和草地等植被的地类坡度信息熵具有高相关性,在构建评价指标体系时,仅选取对尺度敏感

度最高的林地坡度信息熵参与权值计算。

2.3.4 计算效率分析

考虑计算效率,山东省海岸带 2 m 空间尺度 DEM 共有 103.4 亿个格网,而 100 m 有 413.7 万个格网,格网数量与 DEM 尺度呈二次幂函数关系,即

$$y = 4 \times 10^{10} x^2。 \quad (14)$$

从计算效率来看,以 DEM 坡度计算为例,2 ~ 100 m 坡度带计算耗时分别为 2 648.0,413.0,103.0,47.15,25.86,10.97,7.0,4.15,3.31,2.4,2.01,1.73 和 1.52 s,坡度计算时间与 DEM 格网数量线性相关,即

$$y = 3 \times 10^{-7} x。 \quad (15)$$

判定系数 $R^2 = 1$,如图 10 所示。由于要素数据量和计算时间高度线性相关,构建评价模型时,仅选取 DEM 格网数量作为一般性指标。

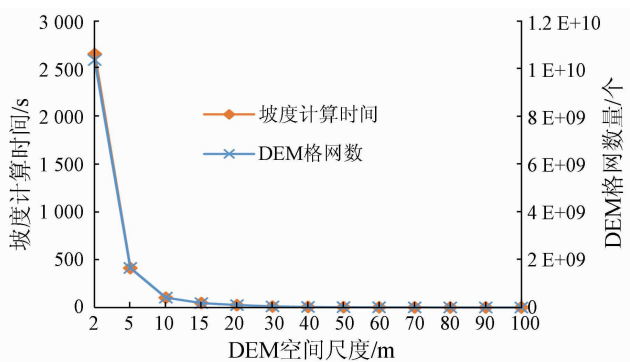


图 10 格网数量、计算时间与 DEM 尺度关系

Fig. 10 Variation of number of spots in slope zone and calculation time with DEM resolution

2.3.5 最优 DEM 尺度选取

通过限制性因子筛选,适宜海岸带地类统计的 DEM 尺度在 [10,30] m 之间,具体为 10 m,15 m,20 m 和 30 m 等 4 个尺度。按图 1 所示构建指标评价模型,对于高相关性的指标仅选取其中具有代表性的因子,构建 DEM 空间尺度对地类统计影响 12×4 阶指标矩阵 R ; 根据指标对统计结果影响的指向,区分为正向指标和负向指标,分别开展归一化,得到标准化矩阵 I ,计算熵值和熵权值,结果如表 4 所示。从一级指标来看,准确性指标熵权最大,为 0.376 5; 计算效率熵权最小,为 0.157 1; 信息量熵权为 0.267 6,概括性熵权为 0.198 8。从单项指标来看,微地形概括熵权值最高,为 0.198 8,最小值偏差权重最小,为 0.043 0,说明不同空间尺度 DEM 的微地形概括熵值差异最大,而最小值偏差统计熵值差异最小。将熵权值带入标准化后的指标矩阵 I ,按式(1)计算,10 m,15 m,20 m 和 30 m DEM 综合得分分别为 0.764 8,0.572 0,0.383 0 和 0.141 6,可以看出,随 DEM 采样间隔的增加得分呈降低趋势,准确性和信

息量在海岸带地类统计过程中占主导因素。10 m 格网是地理国情监测、第三次国土调查等海岸带地类统计分析的最优 DEM 空间尺度。

表 4 熵权法确定指标权重
Tab. 4 Determination of index weight by entropy weight method

一级指标	二级指标	指标性质/ 尺度影响	熵权
准确性	地表平整系数偏离度	负向/负向	0.070 6
	最小值偏差	负向/负向	0.043 0
	最大值偏差	负向/负向	0.050 1
	地类面积偏差	负向/负向	0.058 6
	小目标地形统计偏差	负向/负向	0.072 2
	线状地物地形统计偏差	负向/负向	0.081 9
信息量	坡度信息熵	正向/负向	0.069 0
	高度带信息熵	正向/负向	0.074 4
	地类信息熵	正向/负向	0.055 8
	林地坡度信息熵	正向/负向	0.068 4
概括性	微地形概括	负向/正向	0.198 8
计算效率	DEM 格网数据量	负向/正向	0.157 1

3 结论

本文首次系统探讨了海岸带 DEM 空间尺度对地类统计模型的影响,在准确性、信息量、计算效率等影响因子外,兼顾统计特性加入概括性影响因子共同构建评价模型; 将影响因子分为限制性因子和一般性因子,通过限制性因素筛选适宜的 DEM 空间尺度区间,在此基础上以熵权法客观赋权后加权统计各尺度 DEM 综合得分从而得到最优 DEM 空间尺度。主要研究结论如下:

1) 不同影响因子对 DEM 精细度要求不一致,DEM 格网越大,对统计准确性和信息量的负向影响越明显,对概括性和计算效率的正向影响越显著。

2) 准确性因子对 DEM 精细度要求高,为满足统计准确性要求,空间尺度不应超过 30 m,而地貌概括则要求空间尺度不能低于 10 m。

3) 空间操作计算时间与 DEM 格网数量线性正相关,而格网数量是空间尺度的二次幂函数。

4) 基于熵权法计算权重后综合评价最优 DEM 空间尺度为 10 m,综合来看,DEM 准确度和信息量对尺度选取结果起到决定性作用。

本文形成的 DEM 空间尺度优选方法在海岸带自然资源及其他调查监测地类统计中具有通用性,也可扩展至其他区域,但需针对不同数据源、不同调查监测方式、不同使用目的等对指标和阈值进行适当调整。本文使用的 DEM 数据是以 LiDAR 点云为原始数据生成,对于细节表达较为精细,而采用其他方式生成的 DEM 数据在具体的计算结果上可能存

在差异;此外,本文以地理国情监测成果为地类统计数据源,其空间精度基本等同于 1:10 000 比例尺基础地理信息数据精度,若考虑其他精度地类统计,同样可以采用本文提及的方法,针对具体的要求开展 DEM 尺度选取。

参考文献(References):

- [1] 李清泉,卢艺,胡水波,等.海岸带地理环境遥感监测综述[J].遥感学报,2016,20(5):1216-1229.
Li Q Q, Lu Y, Hu S B, et al. Review of remotely sensed geo-environmental monitoring of coastal zones[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1216-1229.
- [2] 陈超,陈慧欣,陈东,等.舟山群岛海岸线遥感信息提取及时空演变分析[J].国土资源遥感,2021,33(2):141-152. doi:10.6046/gtzyyg.2020248.
Chen C, Chen H X, Chen D, et al. Coastline extraction and spatial-temporal variations using remote sensing technology in Zhoushan islands[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(2): 141-152. doi:10.6046/gtzyyg.2020248.
- [3] 杨长坤,刘召芹,王崇倡,等.2001—2013年辽东湾海岸带空间变化分析[J].国土资源遥感,2015,27(4):150-157. doi:10.6046/gtzyyg.2015.04.23.
Yang C K, Liu Z Q, Wang C C, et al. Spatial change analysis of the coastal zone of Liaodong Bay from 2001 to 2013[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 150-157. doi:10.6046/gtzyyg.2015.04.23.
- [4] 李秀梅,袁承志,李月洋.渤海湾海岸带遥感监测及时空变化[J].国土资源遥感,2013,25(2):156-163. doi:10.6046/gtzyyg.2013.02.26.
Li X M, Yuan C Z, Li Y Y. Remote sensing monitoring and spatial-temporal variation of Bohai Bay coastal zone[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(2): 156-163. doi:10.6046/gtzyyg.2013.02.26.
- [5] 董春,张继贤,刘纪平,等.高精度地理数据空间统计分析模型与方法[J].遥感信息,2016,31(1):13-19.
Dong C, Zhang J X, Liu J P, et al. Models and methods of spatial statistics and analysis based on high-precision data[J]. Remote Sensing Information, 2016, 31(1): 13-19.
- [6] 秦承志,呼雪梅.栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J].地理研究,2014,33(2):270-283.
Qin C Z, Hu X M. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis[J]. Geographical Research, 2014, 33(2): 270-283.
- [7] 陈楠,林宗坚,李成名,等.1:10 000及1:50 000比例尺DEM信息容量的比较——以陕北韭园沟流域为例[J].测绘科学,2004,29(3):39-41.
Chen N, Lin Z J, Li C M, et al. A comparison on DEM of different scale in loess hill and gully area[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3): 39-41.
- [8] 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.
Deng S H, Yang Q K. Study on the influence of sampling interval on DEM representation accuracy[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(2): 23-26.
- [9] 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.
Tang G A, Liu X J, Fang L, et al. A review on the scale issue in DEMs and digital terrain analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(12): 1059-1066.
- [10] 李发源,汤国安,贾旖旎,等.坡谱信息熵尺度效应及空间分异[J].地球信息科学,2007,9(4):13-18.
Li F Y, Tang G A, Jia Y N, et al. Scale effect and spatial distribution of slope spectrum's information entropy[J]. Geo-Information Science, 2007, 9(4): 13-18.
- [11] 潘焕换,吴树荣,姬倩倩,等.山西煤田生态系统服务时空格局及驱动力[J].应用生态学报,2021,32(11):3923-3932.
Pan H H, Wu S R, Ji Q Q, et al. Spatio-temporal pattern and driving forces of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3923-3932.
- [12] 毋亭,吴启航,曹文琦,等. DEM 分辨率对苏北地区耕地土壤有机碳制图精度的影响研究[J/OL]. 中国农业资源与区划, (2021-09-01) [2021-11-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210831.1715.016.html>.
Wu T, Wu Q H, Cao W Q, et al. Research about what effect DEM resolution has on the digital soil organic carbon mapping for cultivated area in the north of Jiangsu Province[J/OL]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, (2021-09-01) [2021-11-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20210831.1715.016.html>.
- [13] 郭春香,梁音,曹龙熹.基于四种分辨率DEM的侵蚀模型地形因子差异分析[J].土壤学报,2014,51(3):482-489.
Guo C X, Liang Y, Cao L X. Geomorphic factors in DEM-based soil erosion models as affected by resolution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 482-489.
- [14] 高玉芳,陈耀登,蒋义芳,等. DEM 数据源及分辨率对 HEC-HMS 水文模拟的影响[J].水科学进展,2015,26(5):624-630.
Gao Y F, Chen Y D, Jiang Y F, et al. Effects of DEM source and resolution on the HEC-HMS hydrological simulation[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 624-630.
- [15] 沈定涛,王结臣,张煜,等.一种面向海量数字高程模型数据的洪水淹没区快速生成算法[J].测绘学报,2014,43(6):645-652.
Shen D T, Wang J C, Zhang Y, et al. A quick flood inundation algorithm based on massive DEM data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(6): 645-652.
- [16] 王婷,潘军,蒋立军,等.基于DEM的地形因子分析与岩性分类[J].国土资源遥感,2018,30(2):231-237. doi:10.6046/gtzyyg.2018.02.31.
Wang T, Pan J, Jiang L J, et al. Topographic variable analysis and lithologic classification based on DEM[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(2): 231-237. doi:10.6046/gtzyyg.2018.02.31.
- [17] 杨荣凤,杨昆,洪亮,等.基于不同空间分辨率DEM的地形因子分析比较[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(5):75-78.
Yang R F, Yang K, Hong L, et al. Comparison of terrain factor analysis based on DEM with different spatial resolution[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 38(5): 75-78.
- [18] 国务院第一次全国地理国情普查领导小组办公室编著.地理国情普查基本统计[M].北京:测绘出版社,2013:3-8.
Office of the Leading Group for the First National Geographic Survey of China. Basic statistics of the National Geographic Survey

- [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013: 3–8.
- [19] 国家测绘局测绘标准化研究所. CH/T 9009.2—2010 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[S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- Institute of Surveying and Mapping Standardization of the State Bureau of Surveying and Mapping. CH/T 9009.2—2010 Digital products of fundamental geographic information 1:5 000, 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000 digital elevation models[S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2010.
- [20] 袁卫平. 地理统计空间计算效率优化模型研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- Yuan W P. Research on the optimization model of the spatial computation of geographical statistics[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2015.
- [21] 江娜. 山东省地理国情信息综合统计分析技术与实现[J]. 山东国土资源, 2018, 34(6): 65–69.
- Jiang N. Technology and realization of comprehensive statistical analysis of China geography information in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(6): 65–69.
- [22] 朱伟, 王东华, 周晓光. 基于信息熵的 DEM 最佳分辨率确定方法研究[J]. 遥感信息, 2008(5): 79–82.
- Zhu W, Wang D H, Zhou X G. The research of optimizing DEM resolution based on information entropy[J]. Remote Sensing Information, 2008(5): 79–82.
- [23] 陶咏, 汤国安, 王春, 等. DEM 地形信息量计算的不确定性研究[J]. 地理科学, 2010, 30(3): 398–402.
- Tao Y, Tang G A, Wang C, et al. Uncertainty of terrain information content based on grid DEM[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(3): 398–402.
- [24] 陈楠, 林宗坚, 汤国安, 等. 数字高程模型的空间信息不确定性分析[J]. 测绘通报, 2005(11): 14–17.
- Chen N, Lin Z J, Tang G A, et al. Analysis of spatial information uncertainty from DEM[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005(11): 14–17.
- [25] 周程明. 基于熵权 TOPSIS 法的城市旅游高质量发展评价研究——以广东省 21 个城市为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(7): 58–66.
- Zhou C M. Evaluation of high quality development of urban tourism based on entropy weight and TOPSIS method: A case study of 21 cities in Guangdong Province[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2021, 46(7): 58–66.
- [26] 倪九派, 李萍, 魏朝富, 等. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 202–209.
- Ni J P, Li P, Wei C F, et al. Potentialities evaluation of regional land consolidation based on AHP and entropy weight method[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 202–209.
- [27] 祁于娜, 王磊. 层次分析-熵值定权法应用于山区城镇地质灾害易发性评价[J]. 测绘通报, 2021(6): 112–116.
- Qi Y N, Wang L. Application of AHP-entropy weight method in hazards susceptibility assessment in mountain town[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(6): 112–116.

An optimization method of DEM resolution for land type statistical model of coastal zones

JIANG Na¹, CHEN Chao², HAN Haifeng¹

(1. Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Ji'nan 250013, China; 2. Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Accurate, detailed, and three-dimensional land type statistical data with an appropriate resolution is greatly significant for the natural resources monitoring, supervision, and ecological protection in coastal zones. A land type statistical model needs the support of DEM. However, there is little studies on the adaptability between the DEM resolution and the statistical model. Given this, this study proposed an optimization method of DEM resolution for land type statistical model of coastal zones. Specifically, this study systematically explored the impacts of DEM resolution on land type statistical model, selected indices and constructed an assessment model from four aspects, namely statistical accuracy, generality, information amount, and calculation efficiency. Then, this study determined the index weight using the entropy weight method and obtained the optimal DEM resolution through weighted calculation. The results are as follows. ① An increase in the DEM resolution led to the increasingly apparent negative impacts on the statistical accuracy and information amount and the increasingly significant positive effects on the generalization of the model. ② To meet the requirements of statistical accuracy, the DEM resolution should not exceed 30 m. Meanwhile, as required by the landform generalization, the DEM resolution should not be less than 10 m. ③ There is a linear positive correlation between the calculation time of spatial operations and the number of DEM grids. ④ Based on the comprehensive assessment using the weights calculated by the entropy weight method, the optimal DEM resolution was 10 m. The method of DEM resolution developed in this paper is universal and can be expanded in the natural resource statistics of coastal zones and in the land type statistics of other surveys and monitoring.

Keywords: coastal zone; land type statistics; DEM resolution; information entropy; entropy weight method

(责任编辑: 陈理)