

李金洋, 张建兴, 王冰, 等. 南海陆坡海底峡谷地形复杂度分析方法[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(3): 84-92.

LI Jinyang, ZHANG Jianxing, WANG Bing, et al. Quantitative analysis on the seabed terrain complexity of submarine canyons of the South China Sea continental slope[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(3): 84-92.

## 南海陆坡海底峡谷地形复杂度分析方法

李金洋<sup>1</sup>, 张建兴<sup>2,3</sup>, 王冰<sup>4</sup>, 杜梦迪<sup>2,5</sup>, 张毅涵<sup>6</sup>, 阳凡林<sup>1</sup>, 栾振东<sup>1,2,3,5\*</sup>

(1 山东科技大学测绘与空间信息学院, 青岛 266509; 2 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

3 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071; 4 山东石油工程学院油气工程学院资源科学与工程系, 东营 257061;

5 中国科学院大学, 北京 100049; 6 青岛海洋地质工程勘察院有限公司, 青岛 266071)

**摘要:**地形复杂度指数是描述地形变化程度的综合指标, 本文基于南海陆坡北港隆起区的水深网格数据, 采用均值变点分析法确定地形起伏度的最佳统计单元, 建立计算海底地形复杂度的模型, 融合研究区坡度、地形起伏度、地表切割深度和高程变异系数 4 种地形因子, 分析研究区的地形特征和地形复杂度。结果表明, 研究区地形起伏度最佳分析窗口大小为 19×19 网格, 最佳统计窗口面积为 1.768 9 km<sup>2</sup>; 研究区北部及南部区域地形平坦, 地形复杂程度较低, 复杂度指数 < 2.35; 中部区域存在规模不同的峡谷, 地形复杂程度较高, 复杂度指数平均 > 3.37, 其中, 中部偏东区域因海底峡谷最为发育, 地形复杂度指数可达 7.77。研究区地形复杂度的定量分析结果与海蚀作用的强弱程度呈现出较好的正相关性, 这对系统开展南海海底峡谷形态特征及演化过程研究、维护海洋工程设施安全等具有重要借鉴意义。

**关键词:**地形复杂度; 均值变点分析; 多因子分析; 南海海底峡谷

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.279

## 0 引言

地形复杂度主要基于地形复杂度因子来描述和评价地表的形态特征, 是描述地表崎岖程度的重要参数, 被广泛应用于地形地貌分类<sup>[1-3]</sup>、地质灾害评价<sup>[4-6]</sup>、土地利用规划<sup>[7]</sup>等领域。根据主要参量, 地形复杂度因子分为微观地形因子和宏观地形因子。微观地形因子主要从不同微观角度对地表进行描述, 包括坡度、坡向、坡度变率、坡向变率、平面曲率和剖面曲率等, 但该类因子对地表形态的整体变化缺少客观性指示; 宏观地形因子主要包括地形起伏度、地表粗糙度、高程变异系数、地表切割

深度和等高线密度等, 宏观地形因子可以对地表形态的宏观整体变化进行描述, 但单一地形因子不能全面地评价地表形态<sup>[8]</sup>。综合利用多种因子进行地形复杂度分析在一定程度上可以避免单一因子分析的局限性。赖志坤等<sup>[9]</sup>选取了地形起伏度、地形切割度、地形变异系数和地形熵 4 种地形因子, 基于数字地形模型数据提出了海底热液区地形复杂度的计算方法; 何文秀等<sup>[10]</sup>提取坡度、地势起伏度、地表切割深度和沟壑密度 4 种地形因子综合研究了黄土丘陵峡壑区的地形复杂度; 翟京生等<sup>[11]</sup>通过引入信息熵的概念, 提取坡度因子研究了海底地貌复杂度; 张坤等<sup>[12]</sup>提取高程、地形起伏度、地形坡度、地表粗糙度和地表切割度 5 种地形因子分析了祁连山自然保护区地形特征; 黄法明等<sup>[13]</sup>提取 10 种地形因子, 利用主成分分析法对地形复杂度进行评估。综合前人研究成果, 根据地形因子所描述的空间范围即空间尺度的不同, 将地形因子分为坡面尺度、流域尺度、区域尺度 3 个空间尺度。坡度反映坡面形态及其演化过程; 地表切割深度反映流域及流域内各种特征线的形态和发育特征; 地形起

收稿日期: 2022-10-14

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“西太平洋典型深海热液和冷泉流固界面的长期原位拉曼定量探测”(92058206), 中国科学院战略性先导科技专项(XDA22050502, XDA19060402)

第一作者: 李金洋(1999—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋测绘海底地形地貌方面的研究工作。E-mail: 1340005968@qq.com

\* 通讯作者: 栾振东(1976—), 正高级工程师, 主要从事深海探测技术及海底地形地貌方面的研究工作。E-mail: luan@qdio.ac.cn

伏度、高程变异系数反映区域各种地形信息的统计特征。为全面客观地分析地表形态, 选择多种地形因子, 使用不同分析方法对地形复杂度进行评估。

因此, 本文选取提取坡度、地形起伏度、地表切割深度和高程变异系数 4 种地形因子, 基于水深网格数据和 MATLAB 软件, 对南海陆坡北港隆起区海底峡谷的综合地形复杂度指数、峡谷谷壁受侵蚀作用强弱进行分析。研究区海底峡谷地形崎岖、侵蚀沟槽极其发育, 系统开展地形复杂度分析, 对于研究区海底峡谷地质演化过程分析、海洋工程设施维护等问题具有重要科学意义和工程意义。

## 1 研究区域概况

中国南海北部陆坡区构造上属于被动大陆边缘和台湾岛西南变形带前缘<sup>[14]</sup>, 区内地貌特征主要受控于古新世—渐新世断陷期形成的凹凸格局, 陆架坡折突兀。受附近地震活动的影响, 易发生滑坡、重力流等现象, 从而发育深大峡谷和滑坡体两大地貌<sup>[15]</sup>。南海北部陆坡东起台湾岛西南端, 西至西沙海槽东口, 呈 NE 向展布, 且发育多条巨型海底峡谷, 南海东北部峡谷群以高屏海底峡谷、澎湖海底峡谷、台湾浅滩海底峡谷和东沙海底峡谷为主(图 1)。东北部峡谷群北侧为台湾浅滩陆架, 南侧为海底扩张形成的南海洋壳, 东侧为欧亚板块和吕宋岛弧碰撞形成的台湾弧陆碰撞造山带<sup>[16]</sup>。研究区(21.88°—

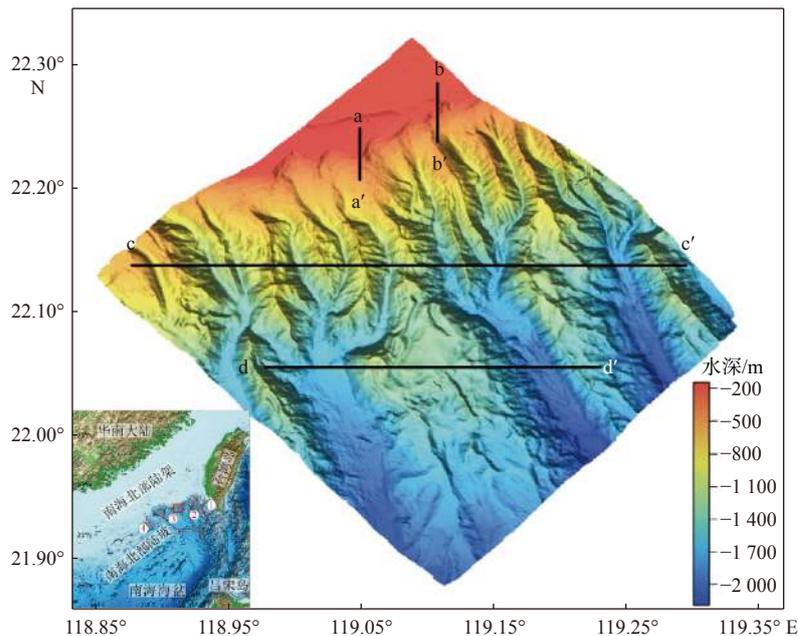
22.32°N、118.85°—119.35°E)属于澎湖峡谷群<sup>[17]</sup>, 东邻澎湖海底峡谷, 西邻台湾浅滩南海底峡谷。其中, 北部为平坦大陆架, 中部发育多个规模较小的峡谷, 平面上近 NW—SE 向展布, 水深范围为 1 000~1 500 m; 区域南部的峡谷上游谷壁遭受侵蚀, 部分沉积物被搬运至小峡谷水道底部; 中部的多条小型峡谷在此汇聚, 表现为近 NW—SE 向的海脊峡谷相间排列, 水深约 1 500~2 000 m。最东侧海脊为福尔摩沙海脊, 发育有流体活动依然非常活跃的福尔摩沙冷泉系统。

## 2 研究方法与数据

为了解南海海底峡谷形态学特征及其地质演化过程, 本文利用东方红三号综合科学考察船装载的 EM122 深水多波束探测系统, 采集了研究区域高精度原始水深数据。EM122 多波束测深系统工作频率为 10.5~13 kHz, 波束角宽度为 1°×1°, 最大覆盖角度 150°, 测深范围 20~11 000 m。利用 CARIS HIPS 软件对其进行精细处理, 获得了研究区 70 m×70 m 的栅格化数据。利用 SURFER 软件对水深数据进行网格化、三维成图, 并提取地形剖面图。

### 2.1 地形复杂度因子选取

各地形因子从不同角度反映地表形态变化程度, 选取的因子之间不能存在极大的相关性, 应尽



①-高屏海底峡谷; ②-澎湖海底峡谷; ③-台湾浅滩南海底峡谷; ④-东沙海底峡谷

图 1 研究区海底地形

Fig.1 Seafloor topography of the study area

量保持相对独立,例如河网密度与等高线密度之间存在较大相关性,不宜同时选取<sup>[18]</sup>。同时,选取的因子要便于计算,选取计算复杂的因子会降低模型的计算效率。再者,选取的因子需具有全面性,例如剖面曲率从纵向反映曲率大小,平面曲率反映等高线的曲率,而全曲率考虑了纵向、平面、和对角线方向,相较于剖面曲率和平面曲率,全曲率更适合作为地形因子。考虑以上因素,本文选取以下4个地形因子:

#### (1) 坡度

坡度描述了地表形态局部的倾斜程度,是影响坡面表层沉积物侵蚀程度的最重要因素<sup>[19]</sup>。本文采用三阶反距离平方差分算法计算坡度,计算公式如下:

$$\text{Slop} = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \quad (1)$$

上式中,  $\frac{dz}{dx}$  与  $\frac{dz}{dy}$  分别表示从中心单元出发,表面在水平和垂直方向上的变化率。

#### (2) 地形起伏度

地形起伏度能够反映地面相对高差,一般用某点邻域内所有点高程最大值与最小值之差表示<sup>[20]</sup>。计算公式如下:

$$\text{RF} = H_{\max} - H_{\min} \quad (2)$$

式中: RF 为窗口内中心栅格的地形起伏度;

$H_{\max}$  为分析窗口内高程的最大值;

$H_{\min}$  为分析窗口内高程的最小值。

#### (3) 高程变异系数

变异系数是反映数据离散程度的绝对值,由标准差与平均值的比值定义。通常用这个区域内高程的标准差与平均值的比值来表示<sup>[21]</sup>:

$$V = \frac{S}{Z} \quad (3)$$

式中:  $V$  为窗口内中心栅格的高程变异系数;

$Z$  为分析窗口平均高程;

$S$  为分析窗口高程的标准差。

#### (4) 地表切割深度

地表切割深度能直观反映地表被侵蚀切割状况,一般用地面某点邻域范围内的平均高程与该邻域内的最小高程之差来表示<sup>[21]</sup>。地表切割深度的计算方法如下:

$$D = H_{\text{mean}} - H_{\min} \quad (4)$$

式中:  $D$  为窗口内中心栅格的地表切割深度;

$H_{\text{mean}}$  为分析窗内高程平均值;

$H_{\min}$  为分析窗口内高程最小值。

## 2.2 最佳分析窗口确定

本文采用均值变点法寻找最适合的窗口大小即最佳分析窗口,计算步骤大致如下:

(1) 计算  $N$  个分析窗口内单位面积上的平均起伏度  $T$ 。

$$T_i = \frac{t_i}{s_i} (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (5)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  个分析窗口下的单位地形起伏度;

$t_i$  为窗口下平均地形起伏度;

$s_i$  为分析窗口对应面积。

(2) 对  $T_i$  取对数得到非线性数列样本  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ 。

(3) 计算整个数列样本的平均值  $\bar{X}$  和样本的离差平方和  $S$ 。

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (6)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

(4) 令  $k=2, 3, \dots, N$ , 对每个  $k$  将样本分成 2 段,  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{k-1}$  和  $X_k, X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_N$ 。分别计算前后 2 段数列的算数平均值  $\bar{X}_{k1}, \bar{X}_{k2}$  及统计量  $S_k$ 。

$$\bar{X}_{k1} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} X_i (i = 1, 2, 3, \dots, k-1) \quad (8)$$

$$\bar{X}_{k2} = \frac{1}{N-k+1} \sum_{i=k}^N X_i (i = k, k+1, k+2, \dots, N) \quad (9)$$

$$S_k = \sum_{i=1}^{k-1} (X_i - \bar{X}_{k1})^2 + \sum_{i=k}^N (X_i - \bar{X}_{k2})^2 \quad (10)$$

式中: 统计量  $S_k$  为前后两段样本的离差平方和之和。

(5) 绘制  $S - S_k$  的拟合变化曲线,  $S - S_k$  最大值对应点为突变点。

确定拐点方法主要以人工工作图判断为主,同时辅助最大高差法<sup>[22]</sup>。目前主要采用统计学上的均值变点分析法寻找突变点<sup>[23-24]</sup>。均值变点分析法是对非线性数据进行处理的方法,能有效地检测出具有非一组非线性数据中的唯一变点<sup>[25]</sup>。

## 2.3 多因子融合

由于地形因子计算后的取值范围不同,需要对

各因子进行归一化处理, 将各因子值归算到 0~1 范围, 计算因子归一化权重, 便于计算综合复杂度。

变异系数法<sup>[26-27]</sup>是衡量观测值变异程度的统计量, 根据指标的变异系数大小来分配权重, 变异系数越大的指标其内部差异越大, 应该被赋予较大的权重<sup>[28]</sup>, 一般用标准差与平均值的比值表示, 各评价因子的权重用各因子变异系数占因子变异系数和的比重来表示, 计算公式如下:

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} = \frac{\frac{S_i}{\bar{x}_i}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{\bar{x}_i}\right)} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

式中:  $w_i$  为评价因子的权重;  
 $v_i$  为评价因子标准差;  
 $x_i$  为评价因子均值;  
 $i$  为评价因子。

因不同地形因子对地表形态的表现程度不同, 通过变异系数法赋予各因子不同的权重, 对因子值进行加权求和, 综合表现地形复杂度。

$$F = \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

式中:  $F$  为综合地形复杂度指数;  
 $w$  为评价因子权重;  
 $p$  为评价因子分级指数;  
 $i$  为评价因子,  $n=4$ 。

### 3 结果

#### 3.1 单因子复杂度分级

坡度因子主要反映地表形态微观上的变化, 一般选用 3×3 网格大小的分析窗口计算研究区域坡度。对于宏观地形因子, 分析窗口的大小直接影响地形特征的提取。本文依次选择 3×3、5×5、……31×31、35×35 网格的分析窗口, 通过均值变点法选取最佳分析窗口。以分析窗口对应面积作为横坐标, 窗口对应平均地形起伏度为纵坐标, 绘制二者关系曲线(图 2), 发现符合对数曲线  $y=0.20+0.07\ln(x)$ , 决定系数  $R^2=0.9446$ , 做拟合优度检验, 检验效果良好, 通过统计学检验。

根据上述步骤,  $S - S_k$  的拟合曲线图(图 3)中可以明显看出, 第 8 个点的  $S - S_k$  值最大, 该点对应的最佳分析窗口大小为 19×19 的网格, 最佳分析单元

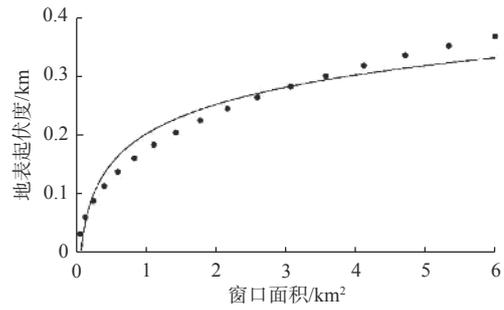


图 2 窗口面积与平均地形起伏度关系拟合曲线

Fig.2 Relative fitting curve of the window area and average relief amplitude

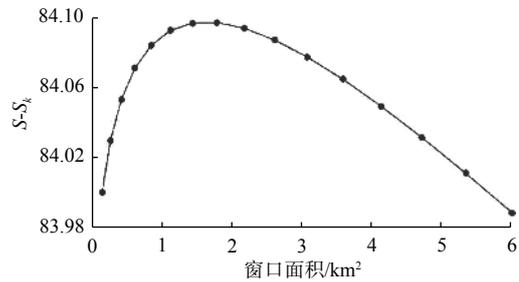


图 3 S 和  $S_k$  差值的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of the differences between  $S$  and  $S_k$

面积为 1.768 9 km<sup>2</sup>。

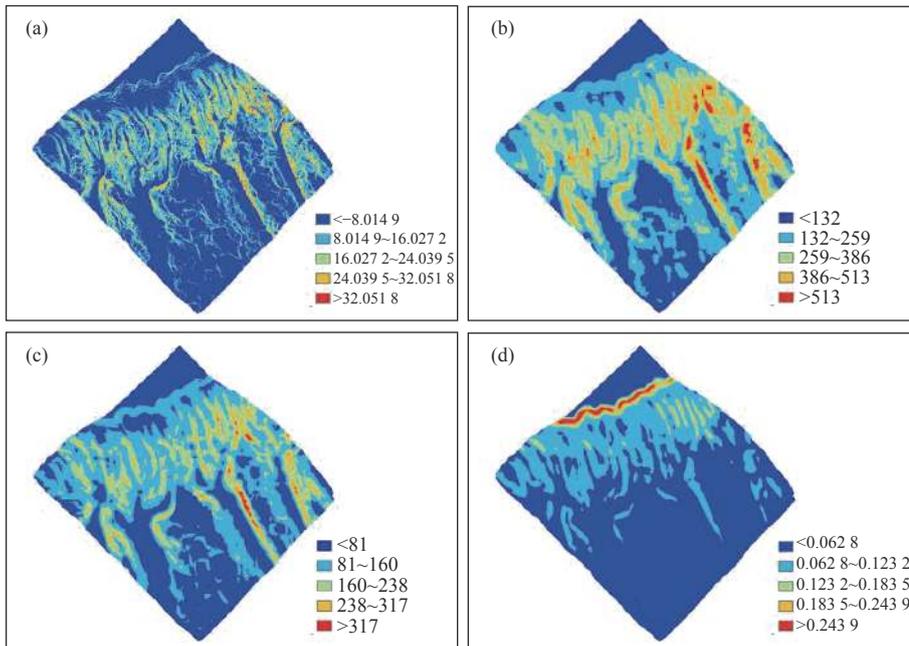
将 4 个单一地形因子复杂度按照自然间断点分级法分为低复杂度、中复杂度、高复杂度、较高复杂度和极高复杂度 5 类, 并赋予相应分级指数 1、3、5、7、9。各因子分级结果如图 4, 统计结果如表 1 所示。

从分级结果中可以看出:

坡度因子方面, 低复杂区坡度 < 8.014 9°, 主要分布在北部和南部的平缓地区, 约占研究区域面积的 50.28%; 中复杂区坡度为 8.014 9°~16.027 2°, 高复杂区坡度为 16.027 2°~24.039 5°, 二者约占研究区域面积的 45.9%, 集中分布在中部峡谷密集区, 南部平缓区少有分布; 较高复杂区坡度为 24.039 5°~32.051 8°, 极高复杂区坡度 > 32.051 8°, 较高和极高复杂区也在峡谷密集地区零星出现, 仅占研究区域面积的 3.82% 左右。

地形起伏度因子方面, 中复杂区坡度为 132~259 m, 高复杂区地形起伏度为 259~386 m, 中、高复杂区约占研究区域面积的 65.78%, 集中在中部和南部; 较高复杂区地形起伏度为 386~513 m, 极高复杂区地形起伏度 > 513 m, 二者在中部峡谷密集区较明显, 约占研究区域面积的 10.21%。

地表切割系数因子方面, 与地表起伏度因子的区域分布相似, 主要以低、中复杂度为主, 约占研究



(a)坡度分级/(°); (b)地形起伏度分级/m; (c)地表切割系数分级; (d)高程变异系数分级

图4 研究区评价因子分级结果

Fig.4 Results of grading based on the evaluation factors of the study area

表1 评价因子按自然间断点分级统计表

Table 1 The statistics of the evaluation factors based on the natural discontinuity points

等级分类	低复杂度	中复杂度	高复杂度	较高复杂度	极高复杂度
分级指数	1	3	5	7	9
坡度/(°)	<8.014 9	8.014 9~6.027 2	16.027 2~24.039 5	24.039 5~32.051 8	>32.051 8
面积占比/%	50.28	32.09	13.81	3.65	0.17
地形起伏度/m	<132	132~259	259~386	386~513	>513
面积占比/%	24.01	37.52	28.26	9.28	0.93
地表切割系数	<81	81~160	160~238	238~317	>317
面积占比/%	37.28	41.96	17.04	3.42	0.30
高程变异系数	<0.062 8	0.062 8~0.123 2	0.123 2~0.183 5	0.183 5~0.243 9	>0.243 9
面积占比/%	66.39	28.77	3.10	1.02	0.72

区域面积的 79.24%，低复杂区地表切割系数一般 <81，中复杂区地表切割系数为 81~160，北部和南部平缓区以低复杂度为主；较高复杂区地表切割系数为 238~317，极高复杂区地表切割系数 >317，二者约占研究区域面积的 3.72%。

高程变异系数因子方面，低复杂区高程变异系数 <0.0628，中复杂区高程变异系数为 0.062 8~0.123 2，北部和南部以低复杂区为主，中部以中复杂区为主；高、较高、极高复杂区所占面积极少，占研究区域面积的 4.84%。

评价因子分级结果图中明显看出，4 个单因子的中、高复杂区分布都集中在中部地区，多数以 SN 向长条状分布，与研究区域的地形特征关系密切。

### 3.2 各因子权重

4 个因子值归一化后，按照公式(11)计算各因子的归一化权重，得到的结果如表 2。

表2 评价因子权重结果

Table 2 The weight table of the evaluation factors

	坡度	地形起伏度	地表切割深度	高程变异系数
平均值	0.234 7	0.348 5	0.273 1	0.166 2
标准差	0.172 2	0.186 6	0.161 8	0.138 3
变异系数	0.733 9	0.535 5	0.592 7	0.832 4
归一化权重	0.272 4	0.198 7	0.220 0	0.308 9

4 种因子所占权重比例相差不多：其中地形起伏度因子的权重为 0.1987，占比最少；高程变异系

数因子权重 0.308 9, 占比最大, 其次为坡度因子权重 0.272 4, 表明两种因子对研究区域的影响较其他因子大。

### 3.3 多因子融合

利用公式(12)对 4 项因子加权融合, 得到研究区域综合地形复杂度指数, 按照自然分级法将地形复杂度分为 5 级, 分级统计结果见表 3, 图 5 表示了研究区域的综合地形复杂度指数分布。

根据表 3, 研究区以低、中复杂区为主, 共占研究区面积的 77.84% 左右, 其中, 低复杂区面积约

表 3 综合地形复杂度结果统计

Table 3 Statistics of the comprehensive terrain complexity

等级分类	范围	面积占比/%
低复杂度	<2.35	46.69
中复杂度	2.35~3.71	31.15
高复杂度	3.71~5.06	16.52
较高复杂度	5.06~6.41	5.08
极高复杂度	>6.41	0.56

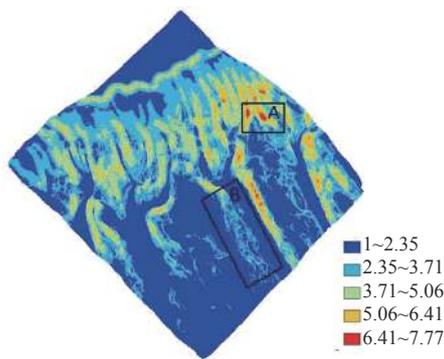


图 5 研究区综合地形复杂度指数分布

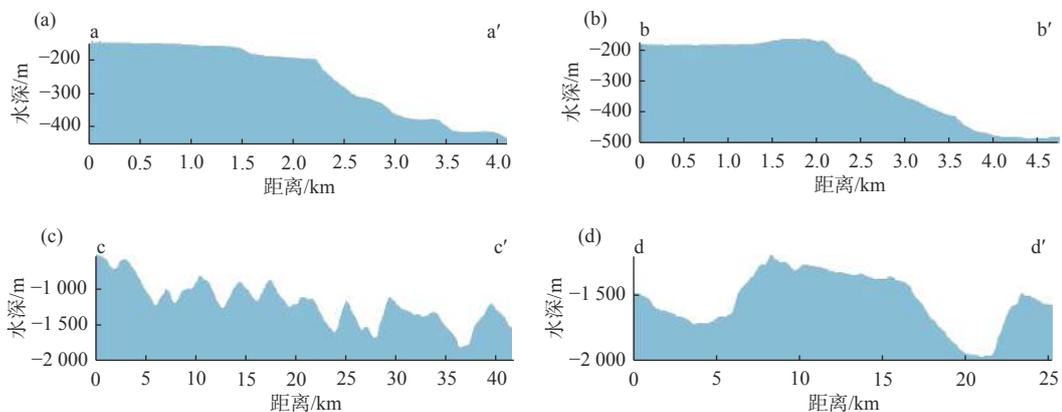
Fig.5 Classification of seabed terrain complexity of the study area

46.69%, 中复杂区面积约 31.15%。其次是高复杂区, 该类区域面积相对较少, 占研究区总面积的 16.52%。较高和极高复杂区面积仅占研究区域面积的 5.64%。可以看出, 研究区主要以低、中复杂区为主, 复杂度较低。由图 5 看出, 大部分地区为低复杂度区, 主要分布在北部和南部平缓地区。中部峡谷密集地区是整个研究区域中复杂度最高的区域, 体现为中、高复杂区, 较高复杂区和极高复杂区零星出现在中部偏东区域峡谷。因子分级图中(图 4), 极高复杂区的地形起伏度、地表切割深度和坡度都分布在较高或极高等级区, 地形起伏度与地表切割深度最为明显。

## 4 讨论

综合地形复杂度指数分布图(图 5)中, 研究区北部可识别出一明显 NE—SW 走向线状区域。由该区域的 a-a'和 b-b'剖面(图 6a、b)可以看出, 地形坡度发生突然变化, 由平坦大陆架向陆坡转折, 该地带为陆架坡折带。由图 4d 可以看出, 该区域高程变异系数因子的影响起到决定作用, 即明显的高程变化导致了该区域地形复杂度高。

研究区中部为高、较高地形复杂区, 海底峡谷密集且相间排列, 海底峡谷横截面呈“V”形, 脊顶从西至东越来越低, 峡谷谷底自西向东逐渐加深, 形成西高东低、西浅东深的分布情况(图 6c)。研究区南部为低至中地形复杂区, 一般坡度越大, 地表被侵蚀的越严重, 地表越崎岖。沉积物从上至下的搬运过程中, 对峡谷底部侵蚀作用减弱, 沉积作用逐渐增强。沉积物堆积至坡度减缓处, 峡谷的侵蚀能力降低, 由于沉积物在峡谷底部沉积, 形成了较



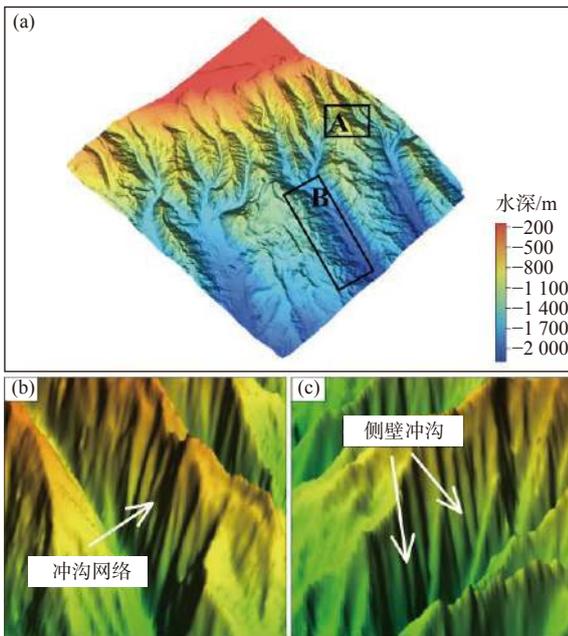
剖面位置见图 1

图 6 研究区剖面图

Fig.6 Topographic profiles of the study area

为平坦的“U”型峡谷(图 6d)。从综合地形复杂度指数分布图整体来看,地形复杂度分级符合实际地形。

以 A 区和 B 区为例,复杂程度高的地区实际地形的地表起伏度、坡度等变化较大,地表形态更加崎岖(图 7b、c),复杂程度低的区域实际地形的崎岖程度较低。



(a) A、B 区位置; (b) A 区海脊左侧冲沟; (c) A 区海脊右侧冲沟

图 7 区域 A、B 典型冲沟形态

Fig.7 Typical gully morphology in area A and B

### (1) 单因子评价

坡度因子在地表倾斜程度上对地形进行描述,研究区域的坡度图(图 4a)在一定程度上描述了地形复杂度,坡度大且变化明显的区域地形更崎岖。波浪型的冲沟发育在陡峭的峡谷侧壁上,某一点邻域内水平和垂直方向上的变化率更大,从图 7b、c 中看出, A 区地表坡度更陡,坡度变化的更快。单一坡度因子评价地形复杂度分区不明显,在宏观上不形成连续范围。

地形起伏度因子从一点邻域范围内的相对高差反映地形复杂度,某点的邻域范围越小且相对高差越大,这一点处的地形复杂度越高, A 区多冲沟,相同距离下,地形起伏度变化更明显。

高程变异系数因子通过一定范围内高程变化情况来反映地形复杂度,范围越小且高程变化越大代表地形复杂度越高。A 区较 B 区地表形态更崎岖, B 区某一点邻域内高程变化小,所以 B 区的高程变异系数等级在低复杂度区。使用该因子对地形复杂度进行判断只能从高程变化上进行判断,分

区范围太大,微观上不细致。

地表切割深度因子能直观反映地表被侵蚀切割状况,相对于地表起伏度,地表切割深度是针对局部小范围内,地表垂直方向上割裂程度的示量<sup>[29]</sup>。A 区地表切割深度较大,沟壑纵横,坡陡谷深,侵蚀切割严重。这将导致重力流、浊流等水动力对该地区的地形地貌产生很大的影响,容易发育侧壁冲沟以及支流冲沟等地貌。

使用单一因子评价地形复杂度时,仅从某一个角度来描述地表形态,选取微观因子评价地形复杂度缺少宏观描述,使分级结果区域缺少连续性,若选取单一宏观因子进行评价,分级结果区域范围太大,缺少准确性。所以采用加权融合的方法综合 4 种地形因子,根据本文提出的模型计算综合地形复杂度指数能客观评价研究区域的地表形态。

### (2) 4 因子加权融合评价

较高、极高复杂区(图 7-A 区)在重力流和海底沉积物相互作用影响下发育出海底冲沟<sup>[30-31]</sup>,在峡谷侧壁形成近乎平行的冲沟排列或者冲沟网络,冲沟网络一般在平面上呈树枝状或者羽毛状,冲沟末端汇入海底峡谷中泓线<sup>[32]</sup>。低、中复杂区(图 7-B 区)在研究区的南部陆坡,表明该区侵蚀能力较弱。地形复杂度高的上陆坡区,地表起伏呈波浪形,地形起伏变化大,切割严重,导致海底峡谷谷壁受重力流影响较大,流体中的沉积物浓度低,流速快,将大块沉积物运输到峡谷下端,造成该地区复杂程度高的地形特征,重力流等水动力的影响又加剧了谷壁侵蚀地貌的形成演化。水动力系统对海底峡谷地貌的影响导致切割在上陆坡区的海底峡谷有许多侧壁冲沟、支流冲沟(图 7b、c),在运动过程中,水动力对谷壁的侵蚀切割作用逐渐减弱,携带的沉积物颗粒逐渐变小,较缓的坡度使得沉积物流速较慢,进而堆积至坡脚或谷底,在峡谷中部堆积,形成“U”型谷(图 6d)。在“U”型谷阶段,海底峡谷谷底变宽,坡度变缓,浊流流速减缓,加速沉积物沉积,在海峡末端甚至可能形成深海沉积扇<sup>[33]</sup>。

## 5 结论

海底地形复杂度指数能够精细刻画海底地形地貌的复杂程度。本文利用南海北部北港隆起海底峡谷区的实测多波束海底地形数据,基于 MATLAB 软件平台,开发了分析窗口序列的地形复杂度计算方法。计算分析结果表明,研究区坡度、地形

起伏度、地表切割深度和高程变异系数4种地形因子的最佳统计窗口面积为 $1.7689\text{ km}^2$ 。研究区北部陆坡复杂度指数 $<2.35$ ;南部平均地形复杂度指数为2.64;中部峡谷区地形复杂,平均地形复杂度指数为3.37,其中,中部偏东区域海底峡谷最为发育,地形复杂度指数可达 $5.06\sim 7.77$ 。研究区地形复杂度指数与海底侵蚀作用强弱程度呈现出较好的正相关性,复杂度高的区域受侵蚀作用较强,复杂度低的区域受侵蚀作用较弱。该方法为实现南海陆坡海底峡谷区地形复杂度的计算分析提供了新的思路,对推动和促进南海海底峡谷区的有关地质科学和工程问题研究具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈义兰. 基于多波束数据的东海陆坡区地形分类[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007.
- [2] 饶喆, 张静远, 熊宏锦. 基于二维模式复杂度的海底地形分类方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(1): 77-79.
- [3] 纪雪, 周兴华, 陈义兰, 等. 基于BP神经网络的海底地形复杂度自动分类方法研究[J]. 海岸工程, 2016, 35(4): 32-41.
- [4] LOHANI P, MUKHERJEE S. Impact of terrain complexity on the turbulence drag coefficient: a case study from the Indian Himalayan region[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2021, 93(4): 101201.
- [5] WALTER T R, ZORN E U, HARNETT C E, et al. Influence of conduit and topography complexity on spine extrusion at Shiveluch volcano, Kamchatka[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3(1): 169.
- [6] 胡雪峰, 杨燕燕, 任宏磊. 基于DEM的地形地质特征对地质灾害影响研究: 以沙河市为例[J]. 地下水, 2022, 44(2): 144-145, 177.
- [7] 李伶俐, 李江文, 钟守琴, 等. 基于地形复杂度的重庆市耕地“宜机化”改造适宜性评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(2): 302-313.
- [8] 李志林, 朱庆, 谢潇著. 数字高程模型(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [9] 赖志坤, 陈坚. 基于GEBCO的海底热液区地形复杂度分析方法研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(4): 58-61.
- [10] 何文秀, 石云. 黄土丘陵沟壑区地形复杂度分析[J]. 测绘科学, 2015, 40(10): 146-152.
- [11] 翟京生, 张冲, 李兆兴, 等. 海底地貌复杂度的表示与计算[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 49(S1): 143-147.
- [12] 张坤, 肖燕, 何振芳, 等. 基于SRTM DEM的祁连山自然保护区地形特征研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1559-1566.
- [13] HUANG F M, YANG J B, ZHANG B, et al. Regional terrain complexity assessment based on principal component analysis and geographic information system: a case of Jiangxi Province, China[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(9): 539.
- [14] 王冰, 栾振东, 张鑫, 等. 台湾岛西南海域福尔摩沙海脊冷泉区地形地貌特征分析[J]. 海洋科学, 2019, 43(2): 51-59.
- [15] 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部陆坡的地貌形态及其控制因素[J]. 海洋学报(中文版), 2008, 30(2): 70-79.
- [16] 王玉宾, 吴自银, 尚继宏, 等. 南海东北部峡谷体系的地貌特征与发育控制因素[J]. 海洋学报(中文版), 2020, 42(11): 62-74.
- [17] 聂鑫, 罗伟东, 周娇. 南海东北部澎湖峡谷群沉积特征[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(8): 18-23.
- [18] 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.
- [19] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用[J]. 地理研究, 1996, 15(3): 57-63.
- [20] 隋刚, 郝兵元, 彭林. 利用高程标准差表达地形起伏程度的数据分析[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(4): 381-384.
- [21] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [22] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991(4): 311-319.
- [23] 宁婷, 崔伟, 马晓勇. 基于均值变点法提取地形起伏度的影响因素分析: 以黄河流域(山西段)为例[J]. 测绘通报, 2022(2): 159-163.
- [24] 朱明, 张静静, 马贺, 等. 基于DEM和均值变点法的伏牛山区地形起伏度分析[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 36-43.
- [25] 项静恬, 史久恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [26] 官厚健, 李哲, 刘守强. 基于AHP-变异系数法综合赋权的底板突水评价研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 2.
- [27] ZHOU Z Y, KIZIL M, CHEN Z W, et al. A new approach for selecting best development face ventilation mode based on G1-coefficient of variation method[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(10): 2462-2471.
- [28] 李兴奇, 高晓红. 综合评价结果的区分度与稳定性研究[J]. 统计与决策, 2022, 38(16): 16-21.
- [29] MARINS J, AIDA M. A GIS-based modelling of vehicles rational routes: geographical information system[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2006, 12(4): 303-309.
- [30] GENG M H, SONG H B, GUAN Y X, et al. Characteristics and generation mechanism of gullies and mega-pockmarks in the Zhongjiannan Basin, western South China Sea[J]. Interpretation, 2017, 5(3): 49-59.
- [31] MICALLEF A, MOUNTJOY J J. A topographic signature of a hydrodynamic origin for submarine gullies[J]. Geology, 2011, 39(2): 115-118.
- [32] TUBAU X, LASTRAS G, CANALS M, et al. Significance of the fine drainage pattern for submarine canyon evolution: the Foix Canyon System, Northwestern Mediterranean Sea[J]. Geomorphology, 2013, 184: 20-37.
- [33] 孟静娟, 韩喜彬, 阳凡林, 等. 海底峡谷水动力系统研究[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(9): 18-25.

## Quantitative analysis on the seabed terrain complexity of submarine canyons of the South China Sea continental slope

LI Jinyang<sup>1</sup>, ZHANG Jianxing<sup>2,3</sup>, WANG Bing<sup>4</sup>, DU Mengdi<sup>2,5</sup>,  
ZHANG Yihan<sup>6</sup>, YANG Fanlin<sup>1</sup>, LUAN Zhendong<sup>1,2,3,5\*</sup>

(1 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266509, China; 2 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3 Ocean Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4 Department of Resource Science and Engineering, College of Petroleum Engineering, Shandong University of Petrochemical Technology, Dongying 257061, China; 5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6 Qingdao Ocean Geological Engineering Survey Institute Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Terrain complexity index is a comprehensive index to the degree of terrain change. The bathymetric data of the Beigang Uplift area on the South China Sea Continental Slope were analyzed, from which terrain relief of the study area was extracted with the increasing grid window method using Matlab software. The optimal window area was determined by the mean change-point method. Four terrain factors, including slope, terrain relief, surface cutting depth, and the coefficient of elevation variation were combined to analyze the topographic characteristics of the study area. The method of calculating integrated terrain complexity based on the bathymetric data was introduced, and a computational complexity model to analyze the terrain complexity of the study area was established. Results show that the optimal analysis window size of the terrain relief of the study area was  $19 \times 19$  grids and the optimal unit area was  $1.7689 \text{ km}^2$ . The northern and southern areas of the study area feature flat terrain and low terrain complexity whose complexity index is less than 2.35. Canyons of different sizes were developed in the central area with a higher level of terrain complexity whose average complexity index is more than 3.37. Among them, the central eastern region has the most developed submarine canyons, with a terrain complexity index of 7.77. The quantitative analysis results of the topographic complexity of the study area show a good positive correlation with the intensity of sea erosion, providing an important reference for the systematic study on the morphology and evolution of submarine canyons in the South China Sea and for the maintenance of the safety of marine engineering facilities.

**Key words:** terrain complexity; mean change point analysis; multivariate analysis; submarine canyon of the South China Sea