

# 地形风险识别与分级技术在山地地震采集施工中的应用

陈宇, 黄腾, 雷迎春, 李雪刚, 万平, 耿春, 何艳发

东方地球物理勘探公司西南物探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2021年11月16日; 录用日期: 2021年12月14日; 发布日期: 2021年12月21日

---

## 摘要

随着我国石油勘探程度的不断加深, 地震勘探大规模进入高难山区, 野外采集施工作业风险越来越大, 对安全、高效施工的要求越来越高。如何对地形风险因素进行分析、评价以及如何对其进行最大程度的规避, 是本文写作的主要目的。本文介绍了利用数字高程模型(DEM)数据, 提取地形起伏度和不同方向坡度共同约束形成地形风险分级的技术成果。在四川盆地高难山地形成4级地形风险分级, 西北地区高难山地形成六级分级, 从而指导山地地震野外采集施工, 降低施工作业风险。

## 关键词

山地, 地震勘探, 地形风险, 起伏度, 坡度

---

# Application of Terrain Risk Identification and Classification Technology in Mountain Seismic Acquisition Construction

Yu Chen, Teng Huang, Yingchun Lei, Xuegang Li, Ping Wan, Chun Geng, Yanfa He

Southwest Geophysical Prospecting Company, BGP Inc., Chengdu Sichuan

Received: Nov. 16<sup>th</sup>, 2021; accepted: Dec. 14<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 21<sup>st</sup>, 2021

---

## Abstract

With the continuous deepening of petroleum exploration in my country and large-scale seismic

文章引用: 陈宇, 黄腾, 雷迎春, 李雪刚, 万平, 耿春, 何艳发. 地形风险识别与分级技术在山地地震采集施工中的应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1628-1634. DOI: 10.12677/ag.2021.1112157

exploration has entered high-difficulty mountainous areas, the risks of field acquisition and construction operations are increasing, and the requirements for safe and efficient construction are getting higher and higher. How to analyze and evaluate terrain risk factors and how to avoid them to the greatest extent is the main purpose of this article. This article introduces the technical results of using digital elevation model (DEM) data to extract terrain undulations and slopes in different directions to jointly constrain the formation of terrain risk classification. A four-level terrain risk classification is formed in the high-difficult mountains in the Sichuan Basin, and a six-level classification is formed in the high-difficult mountains in the northwest, so as to guide the mountain seismic field acquisition and construction and reduce the risk of construction operations.

## Keywords

Mountain, Seismic Exploration, Terrain Risk, Undulation, Slope

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地形是指地球硬表面由内外动力共同作业塑造而成的多种外貌形态[1]。地形是最基本的地理要素，由坡度、坡向、海拔、地形起伏度等影响因子构成。地貌形态直接或间接的影响人类生产生活方式，主要表现在农业、水利、交通等方面[2]。数字高程模型(DEM)可以通过与空间分析手段的结合，对一个地区的地形地貌进行系统评估和分析。

由于地震勘探野外作业的艰巨性、作业场地的复杂性，特别是山地地震勘探更加大了野外作业的危险性。地貌形态对山地地震勘探采集施工作业有着重要影响。目前，地震勘探野外采集施工中地形风险的识别主要依靠人员实地踏勘，存在主观因素较大，识别不全面等不足。因此利用高精度数字高程模型开展地形风险研究，对降低施工风险、提高施工效率具有重要意义。

## 2. 研究方法

### 2.1. 地形风险识别方法

地形基本属性主要指的是地面上点的形态指数。从地形应用到分析的角度上，地形相关的指数可大致分为两个层面，第一个是地形基本属性的计算，其中包括坡度、坡向等参数，而第二个层面与具体应用有着紧密关联[3]，本文主要在山地地震勘探方面开展研究。

坡度和坡向作为描述地形特征信息的两个重要指标，不但能够间接表示地形的起伏形态和结构，并且是地形风险模型分析的基础数据。起伏度也是描述地形的一个重要因子，它主要用于描述宏观地形变化状况，是定量描述地貌形态，划分地貌类型的重要指标[4]。坡度与起伏度两者在本质上都是地表垂直量与水平量关系的表达，计算基础都是基于数字高程模型，其中起伏度在空间尺度上比坡度略微宏观。所以，利用地形方向坡度和起伏度共同约束的结果更能表现地形风险程度。

同时，经过多年研究，发现单一坡度不能完全表达斜坡陡峭程度，在其他参数相同的情况下，从不同方向计算的坡度是不同的。因此，为了能够较好的反映地形风险真实情况，我们采用“多向交叉坡度 + 起伏度”的地形风险定量计算方法。

## 2.2. 数学模型

### 2.2.1. 坡度算法

坡度是地表位置上高度变化率的度量，是垂直距离与水平距离之比的反正切。DEM 中的单元可逐个近似为三维空间的平面，该平面陡峭的程度可用坡度来描述，定义地形曲面的  $z = f(x, y)$  在南北( $x$  轴)和东西( $y$  轴)方向上为高程变化率的函数，则坡度  $S$  为：

$$S = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (1)$$

本文计算地形坡度选取的方法为三阶不带权差分法。若定义  $3 \times 3$  的 DEM 网格编号(图 1)，则有公式：

$$S = \arctan \sqrt{\left[ \frac{Z_7 - z_1 + Z_8 - z_2 + Z_9 - z_3}{6 \times d_x} \right]^2 + \left[ \frac{Z_3 - z_1 + Z_6 - z_4 + Z_9 - z_7}{6 \times d_y} \right]^2} \quad (2)$$

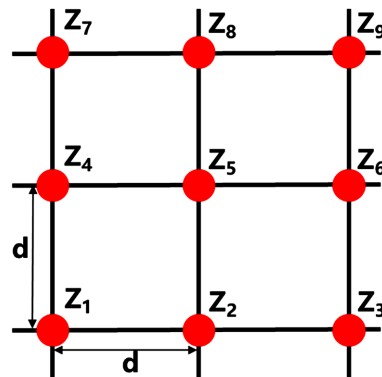


Figure 1. DEM  $3 \times 3$  partial moving window  
图 1. DEM  $3 \times 3$  局部移动窗口

式中， $d$  为等距离投影 DEM 的单元尺寸。针对等经纬度投影的 DEM， $d$  分别改为对应方向的  $d_x$  和  $d_y$ ；式中  $z_i (i=1, 2, 3, \dots, 9)$  为中心点 5 周围各网格点的高程值[5]-[11]。

### 2.2.2. 起伏度算法

目前，地形起伏度在各个学术应用领域都得到了广泛的关注。本文选取标准差法来衡量地形的起伏程度[12] [13] [14] [15] [16]。公式为：

$$P = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} \quad (3)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (4)$$

式(3)、(4)中， $P$  为统计单元的标准差， $N$  为统计单元的网格个数， $H_i$  为各网格的高程值， $\bar{H}$  为统计单元平均高程值。

## 3. 地形风险分级

长期以来，GIS 行业对地形的描述都为单一的坡度或者单一的起伏度。起伏度过于宏观，主要用于大范围地貌划分，在山地地震勘探采集施工中不适用。坡度虽然较微观，但方向性太强，任一方向都不

能完全反映地形难易程度。经过此次研究,形成了“双向交叉坡度 + 起伏度”的地形风险定量计算方法。提出了适用于四川盆地的四级地形风险分级方法,和适用于西北地区的六级地形风险分级方法。

### 3.1. 四川盆地地形风险分级方法

通过反复现场试验结合多年施工情况,四川盆地路网发达、植被茂密,可以借助植被攀爬。所以将四川盆地地形风险划分为四级(见表 1)。 $P$  为研究区域起伏度值范围,  $\bar{S}$  为多向交叉坡度平均值范围。具体划分值,根据不同工序和工区条件而有差异,如重装工序坡度影响比轻装工序大。

**Table 1.** Topographic risk classification table of Sichuan Basin

**表 1.** 四川盆地地形风险分级表

风险分类	级别	颜色	约束条件		说明
			起伏度	方向坡度	
极高风险	1 级	红色	P4	$\bar{S}4$	特别重大风险,任何工序不可进入区。
高风险	2 级	黄色	P3	$\bar{S}3$	地形起伏较大,坡度较陡,地形风险较大,需要执行作业前的审批。
中风险	3 级	橙色	P2	$\bar{S}2$	有一定地形起伏,坡度适中,有一定地形风险,需要制定一般性管控措施。
低风险	4 级	蓝色	P1	$\bar{S}1$	地形起伏小,坡度低,适应地震勘探野外生产。

### 3.2. 西北地区地形风险分级方法

西北工区往往人迹罕至,交通条件差,且具有地表裸露,局部地势特别陡峭,悬崖断壁林立等特点。野外作业时常常需要选择后勤保障点、直升机临时起降点、野外临时避险点、规划施工进行线路等。所以将西北地区地震勘探施工风险划分为六级(见表 2)。同样,具体划分值,根据不同工序和工区条件而有差异。

**Table 2.** Topographic risk classification table in northwest China

**表 2.** 西北地区地形风险分级表

风险分类	级别	颜色	约束条件		说明
			起伏度	方向坡度	
极高风险	1 级	红色	P6	$\bar{S}6$	特别重大风险,任何工序不可进入区。
高风险	2 级	黄色	P5	$\bar{S}5$	地形起伏大,坡度较陡,地形风险较大,需要执行作业前的审批。
中高风险	3 级	橙色	P4	$\bar{S}4$	有一定地形风险,借助保险绳施工的同时需要制定一般性管控措施。
中风险	4 级	深绿色	P3	$\bar{S}3$	地形有一定起伏,可进行地震勘探野外施工。
中低风险	5 级	浅绿色	P2	$\bar{S}2$	地形起伏小,坡度低,相对安全,可用于施工行进路线选择。
低风险	6 级	蓝色	P1	$\bar{S}1$	地势平坦区,适用于直升机临时起降、投放点选址等



## 4. 应用效果

### 4.1. 四川盆地应用效果

在四川盆地某地区的三维地震采集施工中，地形风险分级技术取得了较好的效果。根据区域 DEM 和地形风险图，可以确定地形风险主要分布在工区东南角的高难山体区，该区域共设计激发点 1053 个 (图 2)。根据工区情况针对钻井工序，采用  $P4 > 20$ ,  $\bar{S}4 > 60$ ;  $20 \geq P3 > 15$ ,  $60 \geq \bar{S}3 > 40$ ;  $15 \geq P2 > 10$ ,  $40 \geq \bar{S}2 > 20$ ;  $10 \geq P1 \geq 0$ ,  $20 \geq \bar{S}1 \geq 0$  的参数，规避地形风险指导炮点布设，使高难山体区高风险激发点减少 57%，降低了山地地震采集施工风险，保障了一线施工作业人员安全生产。

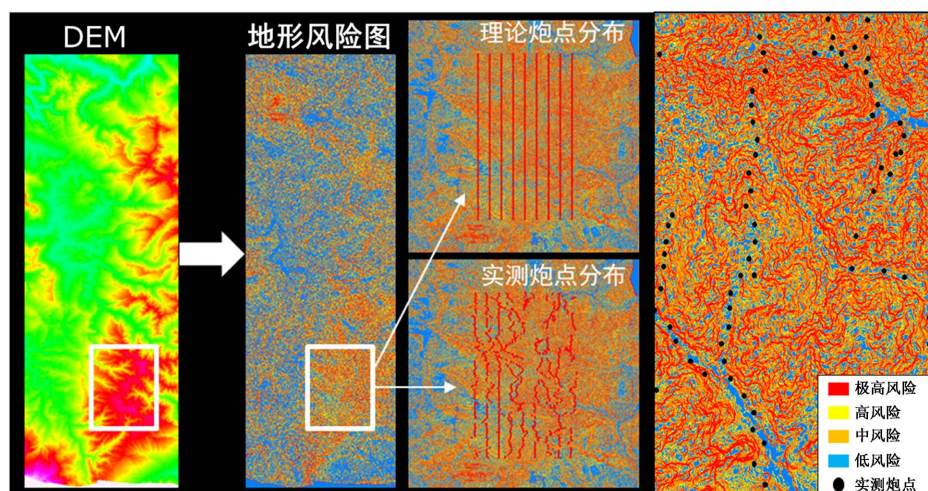


Figure 2. Topographic risk guidance trigger point layout map  
图 2. 地形风险指导激发点布设图

### 4.2. 西北地区应用效果

在塔里木盆地某地区的三维采集项目中，地形风险分级技术同样取得了较好的效果。根据实地踏勘，该区域是一个典型的高难山地，原计划激发点将全部丢弃 (图 3 左)。但通过地形风险分级 ( $P6 > 20$ ,  $\bar{S}6 > 60$ ;

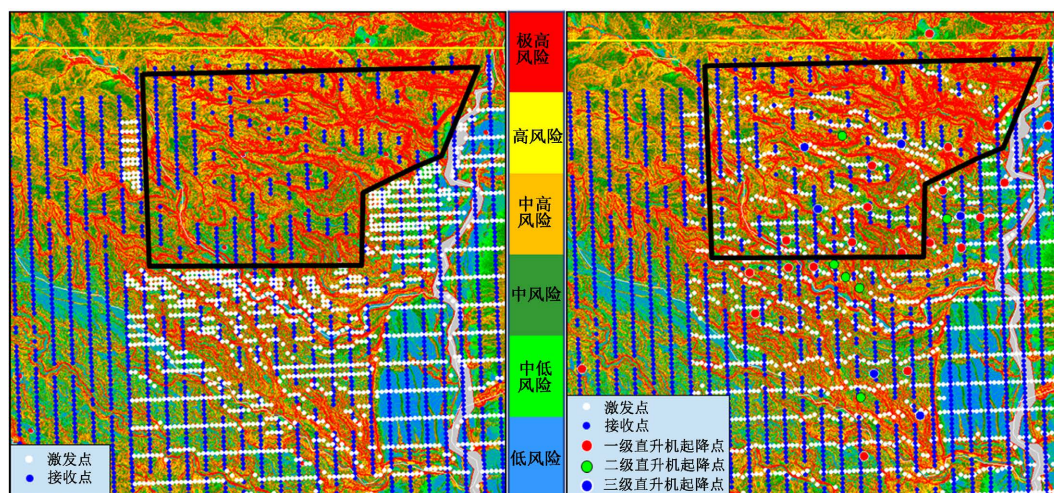


Figure 3. Comparison chart before and after optimization of the observation system design  
图 3. 优化后观测系统设计前后对比图



$20 \geq P5 > 15$ ,  $60 \geq \bar{S}5 > 50$ ;  $15 \geq P4 > 10$ ,  $50 \geq \bar{S}4 > 40$ ;  $10 \geq P3 > 5$ ,  $40 \geq \bar{S}3 > 30$ ;  $5 \geq P2 > 2$ ,  $30 \geq \bar{S}2 > 20$ ;  $2 \geq P1 \geq 0$ ,  $20 \geq \bar{S}1 \geq 0$ )进行施工模块划分, 优化选择保留了大部分激发点, 在一个施工模块内保证了一个直升机起降点(图3右)每个工序(测量、钻井、民爆、排列)将作业人员及装备降落在一个模块内(图4), 施工完成后乘直升机返回。解决了由于地形高陡无法施工的问题, 即保证了安全生产, 又保证了采集质量。

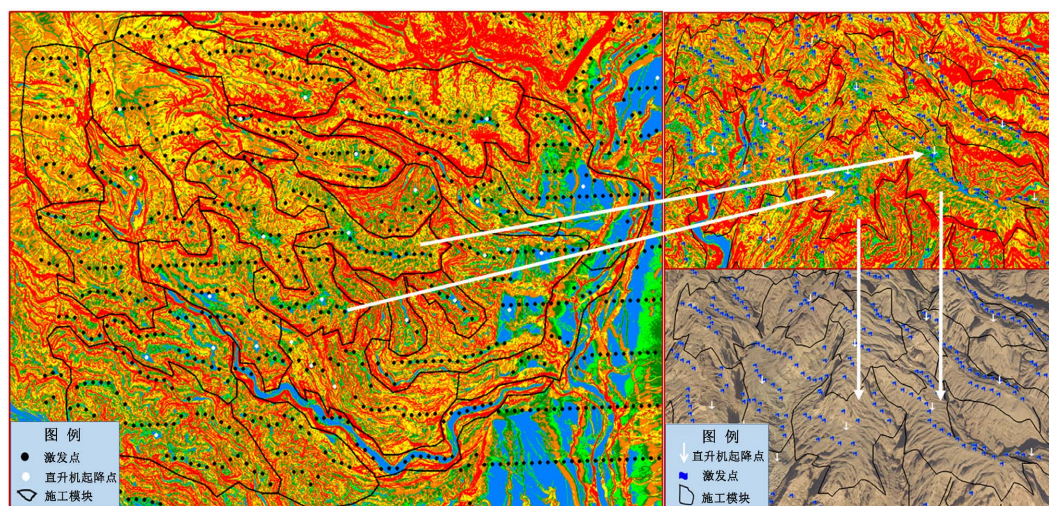


Figure 4. Modular construction design drawing based on terrain risk classification  
图4. 基于地形风险分级的模块化施工设计图

## 5. 结论

本文首次提出了四川盆地山地勘探四级地形风险分级技术和西北地区山地勘探六级分级技术, 填补了山地地震采集施工地形风险评价定量描述的空白, 为施工前期风险规避和施工过程风险控制提供了有效手段。

1) 在山地地震采集施工中, 由于四川盆地路网发达、植被茂密, 适用于地形风险四级分级; 由于西北地区交通条件差、地表裸露, 适用于地形风险六级分级。

2) 通过地形风险分级技术的应用效果, 说明采用“多向交叉坡度 + 起伏度共同约束”的地形风险分级方法可以较好的规避山地地震采集施工风险, 并在保障一线员工作业安全的同时, 提高施工效率。值得进一步推广应用。

## 参考文献

- [1] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等. 自然地理学(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [2] 高艺伟, 白昊睿, 高举红. 基于 DEM 的陕南地区地形地貌研究[J]. 科技风, 2021(5): 132-135.
- [3] Moore, I.D., Grayson, R.B. and Landson, A.R. (1991) Digital Terrain Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5, 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- [4] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991, 20(4): 311-319.
- [5] 刘学军. 基于规则格网数字高程模型解译算法误差分析与评价[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [6] 汤国安, 杨勤科, 张勇, 等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究——以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53-56.
- [7] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 258-263.

- [8] 陈楠, 王钦敏. 6 种坡度提取算法的应用范围分析——以在黄土丘陵沟壑区的研究为例[J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(4): 20-21.
- [9] 郝振纯, 安贵阳. 不同地形下 DEM 的坡度坡向算法比较[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 68-70.
- [10] 李粉玲, 李京忠, 张琦翔. DEM 提取坡度坡向算法的对比研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7355-7357.
- [11] Moore, I.D. (1996) Hydrologic Modeling and GIS. In: Gooldchild, M.F., Steyaert, L.T., Parks, B.O., Crane, M.P., Maidment, D.R. and Glendinning, S., Eds., *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, GIS World Books, Fort Collins, 143-148.
- [12] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-62.
- [13] 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 131-143.
- [14] 蒋好忱, 杨勤科. 基于 DEM 的地形起伏度算法的比较研究[J]. 水土保持通报, 2014(6): 162-166.
- [15] 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(4): 381-384, 401.
- [16] 王家耀, 崔铁军, 苗国强. 数字高程模型及其数据结构[J]. 海洋测绘, 2004(3): 1-4.