

张雨婷, 任叶飞, 温瑞智等. 2022. 基于决策树考虑地形特征的场地参数估计方法. 地球物理学报, 65(2):698-710, doi:10.6038/cjg2022P0021.

Zhang Y T, Ren Y F, Wen R Z, et al. 2022. A method of site parameter estimation based on decision tree theory considering terrain features. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(2):698-710, doi:10.6038/cjg2022P0021.

基于决策树考虑地形特征的场地参数估计方法

张雨婷, 任叶飞*, 温瑞智, 王大任, 冀昆

中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080

摘要 发展基于地形特征的场地参数 V_{S30} 估计方法因其具有重要应用需求而成为研究热点. 以我国新疆维吾尔自治区和河北省的 DEM 数据和工程钻孔资料验证了基于决策树理论考虑地形特征的 V_{S30} 估计方法在我国的适用性, 检验方法的准确性和对 DEM 数据精度的敏感性. 得到如下结论: (1) 基于决策树理论考虑地形坡度、表面纹理和局部凸度划分了两个地区的 16 类地形类别, 建立了考虑这三项地形特征的 V_{S30} 预测模型; (2) 经验证基于决策树理论考虑三项地形特征的 V_{S30} 估计方法具有普遍适用性, 但同时存在区域依赖性, 需要分区建立适用的 V_{S30} 预测模型; (3) 发现引入了表面纹理和局部凸度两项地形特征后, 较使用单一的地形坡度对 V_{S30} 预测的准确性有所提升; (4) 地形分类对 DEM 数据精度存在敏感性, 高精度数据对陡峭的山脉地区划分可能更为详细, 而低精度数据则能够对平坦的平原地区识别可能更为充分, 相比较而言 900 m 精度的 DEM 数据对于基于地形特征的 V_{S30} 估计方法相对较为实用. 上述模型和方法可为发展我国区域场地分类图提供一种有效的技术途径.

关键词 决策树理论; 地形坡度; 地形特征; 地形分类; 场地参数; V_{S30} 预测模型

doi:10.6038/cjg2022P0021

中图分类号 P315

收稿日期 2021-01-08, 2021-07-07 收修定稿

A method of site parameter estimation based on decision tree theory considering terrain features

ZHANG YuTing, REN YeFei*, WEN RuiZhi, WANG DaRen, JI Kun

Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract The development of site parameter V_{S30} estimation method based on surface terrain features has become a hot topic because of its numerous application demands. The DEM data and engineering boreholes collected from Xinjiang Uygur Autonomous Region and Hebei Province are used to validate whether the V_{S30} estimation method based on decision tree theory considering terrain features is applicable to China, and testify its accuracy in V_{S30} prediction and sensitivity to DEM data resolution. The following conclusions are drawn: (1) Based on the decision tree theory both regions are classified as 16 types of terrain categories by means of three terrain features, i. e., topographic slope, surface texture and local convexity, and the V_{S30} prediction models are developed considering proxies of these three terrain features; (2) It is validated that the V_{S30} estimation method based on decision tree theory considering terrain features has universal

基金项目 大中城市地震灾害情景构建重点专项(2018QJGJ07), 国家重点研发计划项目(2019YFE0115700), 国家自然科学基金(51878632, U1901602), 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019E036)资助.

第一作者简介 张雨婷, 女, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事工程地震等方面研究. E-mail:13036692571@163.com

*** 通讯作者** 任叶飞, 男, 1983 年生, 博士, 研究员, 主要从事工程地震等方面研究. E-mail:renyefei@iem.net.cn

application, but is regionally dependent and calls for developing V_{S30} prediction models separately; (3) It has been observed that the accuracy of V_{S30} prediction is improved after introducing two terrain features (i. e., surface texture and local convexity) on the basis of topographic slope; (4) Terrain classification is sensitive to DEM data resolution, and high-resolution data is more appropriate for steep mountain areas, while low-resolution data results in more detailed classifications in plain areas. In comparison, the 900m-resolution DEM data is relatively more practical for terrain-proxy methods in V_{S30} prediction. The proposed models and methods in this study could support for developing an effective technical approach for the development of regional site classification maps in China.

Keywords Decision tree theory; Topographic slope; Terrain features; Terrain classification; Site parameter; V_{S30} prediction model

0 引言

局部场地对地震动的放大作用在近年发生的许多破坏性地震中都有充分体现,例如,2017年伊朗萨尔波勒扎哈卜镇 M_w 7.3 级地震(Zafarani et al., 2020)、2018年陕西北强 M_w 5.3 级地震(王文才等, 2018)、2008年汶川 M_s 8.0 级地震(齐文浩等, 2020)等。许多研究(例如,Boore et al., 1997; Wills and Silva, 1998; Dobry et al., 2000)发现 V_{S30} (地表以下 30m 范围内土层的平均剪切波速值)与场地放大具有很好的相关性。因此, V_{S30} 作为典型的场地参数在工程地震领域得到广泛应用。例如,在地震动模拟工作中被用于衡量浅层地表放大幅值的指标(傅磊和李小军, 2017),用以评估土壤的地震液化程度(李程程等, 2020)等。获取场地 V_{S30} 值最直接和精确的做法是现场钻孔勘察和剪切波速测试,然而部分场地由于工作条件限制以及经济性考量,这种方式难以实现。因此,近年来发展了基于地形特征的 V_{S30} 估计方法。较典型的应用案例是,在美国 NGA 项目开发强震动 Flatfile 时确定台站的场地参数过程中得到有效应用(Seyhan et al., 2014)。另外,震后震动图(ShakeMap)的快速生成(陈鲲等, 2010)以及地震保险费率厘定(Li et al., 2019)等工作中由于对区域场地分类图有重要需求也需要采用该方法。

因此,基于地形特征的场地参数 V_{S30} 估计方法具有重要应用需求和前景。Fumal 和 Tinsley (1985)分别从岩石和土壤方面分析影响浅层剪切波速的物理性质,证明表面地形特征与浅层地下介质存在内在关联。他们提出硬度和裂缝间距是影响岩石剪切波速的重要性质,坚硬的岩石和粗糙的裂缝间距可以

抵抗风化作用,所以 V_s 较大的岩石具有更高的坡度;土壤的结构和相对粒度可以影响孔隙率,进一步影响土层的剪切模量,剪切波速会随着平均粒径的增加而增加,因此较低的 V_s 对应较低的地形坡度。在此基础上基于地形坡度的 V_{S30} 估计方法开始发展,该方法由 Wald 和 Allen 提出(Wald and Alan, 2007),他们针对活动构造区和稳定构造区,使用 30 弧秒的 DEM 数据分别建立了地形坡度与 NEHRP 场地类别、 V_{S30} 之间的经验关系矩阵,并且划分了全球的场地类别。我国学者在这方面也进行了众多相关研究,例如,陈鲲等(2010)使用 30 弧秒 DEM 数据估算了全国各场点 V_{S30} 值,并将结果运用于 ShapeMap 系统中以估算基岩上表土层的场地放大系数;陈学良等(2014)直接利用 Wald 和 Allen (2007)的经验关系矩阵,通过 V_{S30} 与 V_{S20} 之间的转换关系,得到了云南典型盆地基于我国抗震规范定义的场地分类结果。不过也有许多研究指出了该方法存在诸多不足并提出了相应的改进措施。Lemoine 等(2012)测试了 Wald 和 Allen(2007)的经验关系矩阵在欧洲的适用性,发现其仅适用于某些地区,对于特殊地质条件的地区该方法是失效的,例如火山高原、碳酸盐岩和冰川大陆地形地区。韶丹等(2018)发现在陕西宝鸡的个别区域不适宜直接使用该方法估计 V_{S30} 和划分场地类别,他们利用 V_{S30} 残差分布对分类结果进行了修正;亢川川(2017)利用四川省的实测钻孔数据,建立了适用于四川地区的 V_{S30} 与地形坡度经验关系矩阵,但结果表明四川盆地地区的地形坡度与 V_{S30} 的相关性并不显著,方法存在一定的使用局限性。史大成(2013)在地形坡度的基础上引入了高程和山前距离两个参数与 V_{S30} 共同建立相关关系,以提高 V_{S30} 估计准确性。Yong 等(2012)利用地形坡度、表面纹理和局部凸度 3 个

地形特征参数的分布差异,针对美国加州地区将场地划分为 16 个地形类别,利用实测钻孔数据建立了各类别的 V_{S30} 经验预测值。

因此,尽管基于地形坡度的场地参数估计方法操作简单又经济适用,但由于单一地形特征不能完全表征地表面浅层土层的区域分布差异,其准确性还有待提高。目前研究工作的焦点都在试图引入多个指标与场地参数建立相关关系。Yong 等(2012)提出的方法具有一定的推广度,仅采用开源的 DEM 数据即可实现;但是否存在一定的区域适用性还有待进一步验证。为此本文利用我国河北和新疆的工程场地钻孔数据,利用 Yong 等(2012)的方法将场地地形划分为 16 个类别并建立 V_{S30} 预测模型,分析该方法在我国的适用性以及区域依赖性;通过与基于地形坡度单一指标的 V_{S30} 预测方法进行对比,验证方法考虑三项地形特征之后是否对 V_{S30} 预测效果有所提升;最后还调查了方法对 DEM 数据精度的敏感性。期冀该项工作可为基于地形特征估计场地 V_{S30} 的方法在我国推广应用提供技术支撑,同时也为发展我国区域场地分类图提供另一种有效的技术途径。

1 基于地形特征的场地分类方法

Pike(1988)首先提出,通过等高线数据或是数字高程数据(DEM)计算得到的表面几何特征,可以很好地对不同地貌进行区分;之后 Iwahashi 和 Pike(2007)提出一种分类方案,通过使用三种表面几何特征将由高程表示的连续地形场地根据需求划分为 8 类、12 类或 16 类,这三种表面特征为:地形坡度、表面纹理和局部凸度(Iwahashi et al., 2001)。下面简要介绍其分类流程。

1.1 三种地形特征介绍

1.1.1 地形坡度

坡度是体现地表陡峭程度最直接的指标,也是地形的内在属性,因此在所有基于地形数据进行场地参数估计或场地分类的方法中都应用到了坡度。通过 DEM 数据计算地形坡度的方法实为计算 3×3 栅格矩阵中心栅格至周围相邻栅格上高程的最大变化率。

较低的坡度代表地形相对平坦的盆地、平原等,较高的坡度代表着山脉、高原等地区;坡度值大小受 DEM 精度影响,一般情况高精度的地形数据会产生连续的高坡度值而相对缺少低值部分,而低精度的地形数据会产生自动平滑的效果,使坡度值分布范

围较为均衡。

1.1.2 表面纹理

仅考虑坡度对地形进行划分是不够的,考虑坡体的凹凸度和粗糙度能够更好的把握运动坡体与稳定坡体的地形差异,更加准确的区分出山丘、梯田、冲积扇和平原等。通过原始 DEM 数据和中值滤波后数据之间的差异可以勾勒出山脊和山谷的分布,在大于零的位置被称为“峰”、小于零的位置被称为“谷”,计算以十个栅格单元总长度为半径的范围内“峰”和“谷”所占的百分比即为表面纹理值。通常情况下冲积层、扇、火山扇和岩屑处的纹理值相对较低,在山脉处的纹理值相对较高(Iwahashi and Kamiya, 1995)。

1.1.3 局部凸度

地形坡度和表面纹理对于区分较陡峭的区域是能够满足的,但是在较平缓的区域,这两个地形特征无法识别出冲积扇与洪泛区,因此引入第三个参数—局部凸度(Iwahashi and Kamiya, 1995)。原始 DEM 数据经过拉普拉斯滤波后(近似为高程的 2 次求导)正值表示为向上凸的区域,负值为向下凹的区域,零值为平坦区域;局部凸度值是指以十个栅格单元总长度为半径的范围内,凸起向上的单元所占总栅格数的百分比。通常情况低凸度值表征宽阔的山谷和山麓坡地,而高凸度值则更多地与其他典型的低地貌有关,如冲积扇或阶地等。

1.2 基于决策树理论的场地地形分类流程

基于决策树理论,根据地形坡度、局部凸度和表面纹理的不同阈值,通过二分法将场地划分为 16 个类别,流程如图 1 所示。第一阈值为各地形要素在整片区域内所有栅格的均值;第二阈值为各地形要素在区域中较平缓部分内的栅格(即坡度值低于坡度第一阈值的所有栅格)的均值;第三阈值为各地形要素在区域中最平缓部分内的栅格(即坡度值低于坡度第二阈值的所有栅格)的均值。由图中可见,流程考虑了地形坡度、局部凸度和表面纹理在 3 个阈值控制下的所有可能组合。第 1 类和第 16 类表示研究区域内所有三个地形特征分别具有最高和最低值的网格单元,而第 2~15 类则表示所有中间类型的网格单元。图 2 解释了如何利用这 3 个特征参数的 3 个等级阈值将区域内的栅格逐步进行二分,以最终确定 16 个场地地形类别。通过这 16 个分类可以实现明显的地形区分,例如第 1 类表示局部凸度高的陡峭细纹地形,往往与山区相对应,而第 16 类表示低凸度的非常平缓粗纹表面,通常是平坦的谷地

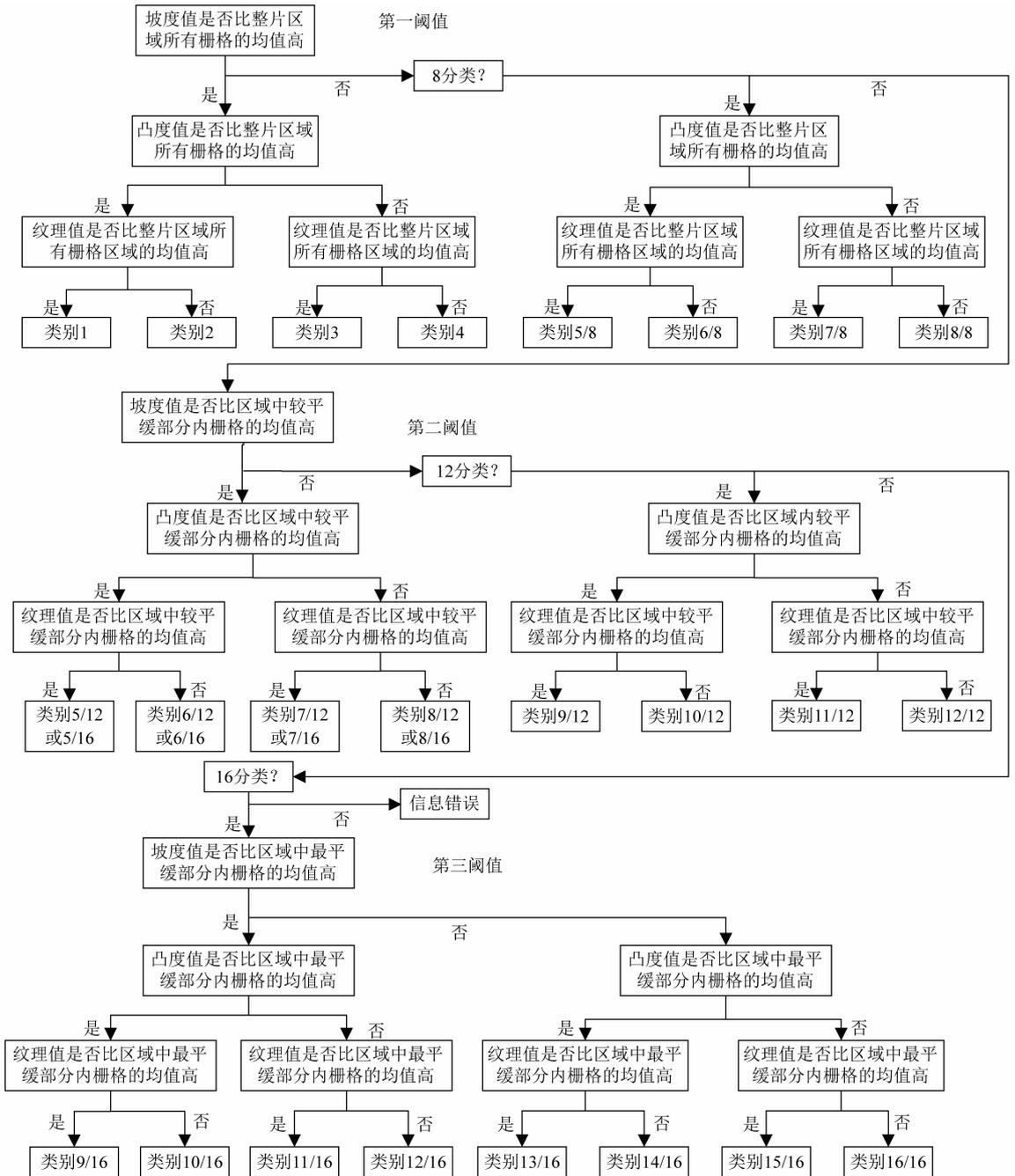


图1 基于三项地形特征的场地地形类别划分流程 (Iwahashi and Pike, 2007)

Fig. 1 Flowchart of site topography classification based on three terrain features (Iwahashi and Pike, 2007)

(Iwahashi and Pike, 2007).

2 河北和新疆地区 V_{S30} 预测模型的建立

2.1 数据选取

本文收集了新疆及河北地区大量的工程钻孔数据,分别为 1196 个和 706 个。计算了这些钻孔的场地 V_{S30} 值,其统计分布如图 3 所示。图中可见,河北

地区的 V_{S30} 主要分布在 $150 \sim 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,而新疆地区则主要分布在 $250 \sim 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。这与两个地区的地形分布是保持一致的,河北大部分地区位于华北平原,新疆地区分布有众多山脉(天山、昆仑山、阿尔泰山)。可以说,两个地区的地形特征具有各自代表性,选择这两个区域分别建立基于地形特征的场地参数预测模型是很有必要的,验证方法区域适用性的同时,也使验证过程更加科学合理。

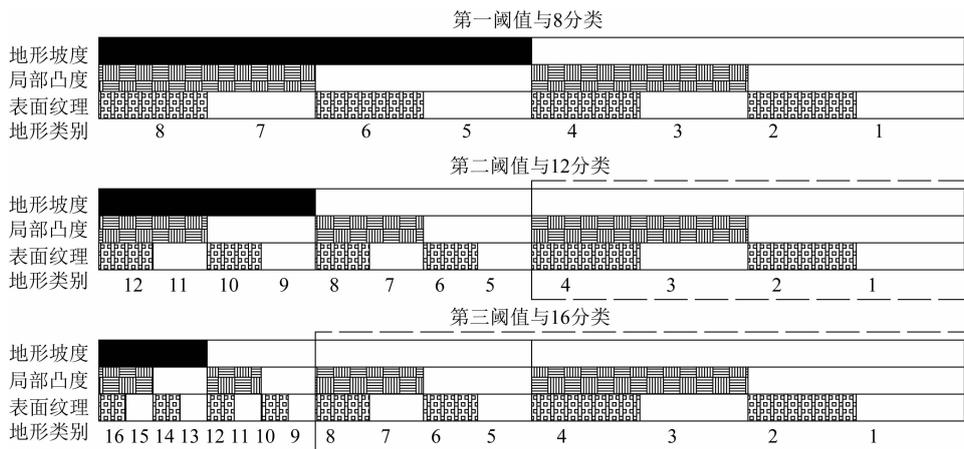


图 2 考虑 3 个等级阈值的二分法原理示意图(虚线框内表示该步骤确定的类别与上一步骤相同)
(Iwahashi and Pike, 2007)

Fig. 2 A schematic diagram of the principle of dichotomy considering three level of thresholds (the dashed box indicates that the category determined in this step is the same as the previous step) (Iwahashi and Pike, 2007)

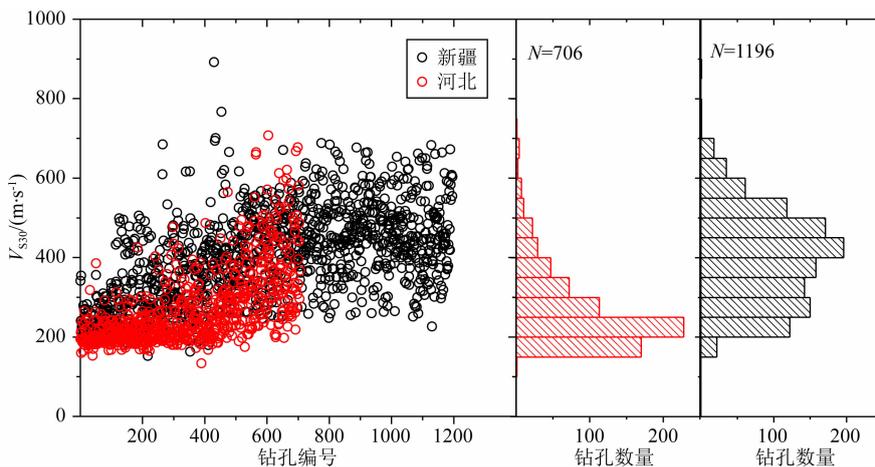


图 3 新疆与河北地区的工程场地钻孔剪切波速 V_{S30} 值直方图分布
Fig. 3 Histogram of V_{S30} values of borehole sites in Xinjiang and Hebei

为计算上述三个地形特征值,收集了这两个地区精度为 900 m(30 弧秒)的 DEM 数据,同时为测试建立的 V_{S30} 预测模型对 DEM 数据精度的敏感性,还收集了这两个地区 90 m(3 弧秒)精度的数据。

2.2 地形坡度单一特征的 V_{S30} 预测模型建立

借鉴 Wald 和 Allen(2007)建立地形坡度与 V_{S30} 经验关系矩阵的方法,在其基础上对河北与新疆地区分别建立相应的关系矩阵,见表 1. 图 4 给出了这两个地区 V_{S30} 与地形坡度的对应范围,整体上除 $V_{S30} < 180 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 外,在同一 V_{S30} 范围内,新疆地区的地形坡度上边界值要低于河北地区的上边界值,说明新疆地区 V_{S30} 值随地形坡度增加的上升趋势相对较快,这与新疆地区 V_{S30} 值整体大于河北地区有关(见图 3);图 4 中还可见,两个地区在 V_{S30} 为

180~240 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内的坡度上、下边界差异明显,主要原因是河北地区的 V_{S30} 分布在此范围内占有约 50%,且数据较为分散,对应相对较广的坡度范围。

2.3 三项地形特征的 V_{S30} 预测模型建立

首先分别利用 30 弧秒精度的 DEM 数据计算两个地区的地形坡度、表面纹理及局部凸度值,结果如图 5 所示. 新疆和与河北地区的地形坡度值主要集中于 $0 \sim 2^\circ$ 范围内,新疆地区坡度最高值接近 55° ,而河北地区最高值仅约 25° ;纹理值在 $0 \sim 90\%$ 范围内两个区域均有分布,同时可以发现两个区域低纹理值范围($0 \sim 20\%$)所占栅格总面积都较小;局部凸度值在新疆最高可达约 75%,而河北仅仅为 59%,但两个区域的栅格主要都分布在 $30\% \sim 60\%$ 范围内。

表 1 剪切波速 V_{S30} 与地形坡度关系矩阵

Table 1 The relationship between shear wave velocity V_{S30} and slope

类别	$V_{S30}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	坡度/($m \cdot m^{-1}$)		
		Wald 和 Allen(2007)	新疆地区	河北地区
E	<180	< 1.0×10^{-4}	< 1.0×10^{-4}	< 9.0×10^{-5}
	180~240	$1.0 \times 10^{-4} \sim 2.2 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-3}$
D	240~300	$2.2 \times 10^{-3} \sim 6.3 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-3} \sim 4.1 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-3} \sim 4.9 \times 10^{-3}$
	300~360	$6.3 \times 10^{-3} \sim 0.018$	$4.1 \times 10^{-3} \sim 0.013$	$4.9 \times 10^{-3} \sim 0.015$
C	360~490	0.018~0.05	0.013~0.04	0.015~0.053
	490~620	0.05~0.1	0.04~0.09	0.053~0.1
B	620~760	0.1~0.138	0.09~0.138	0.1~0.138
	>760	>0.138	>0.138	>0.138

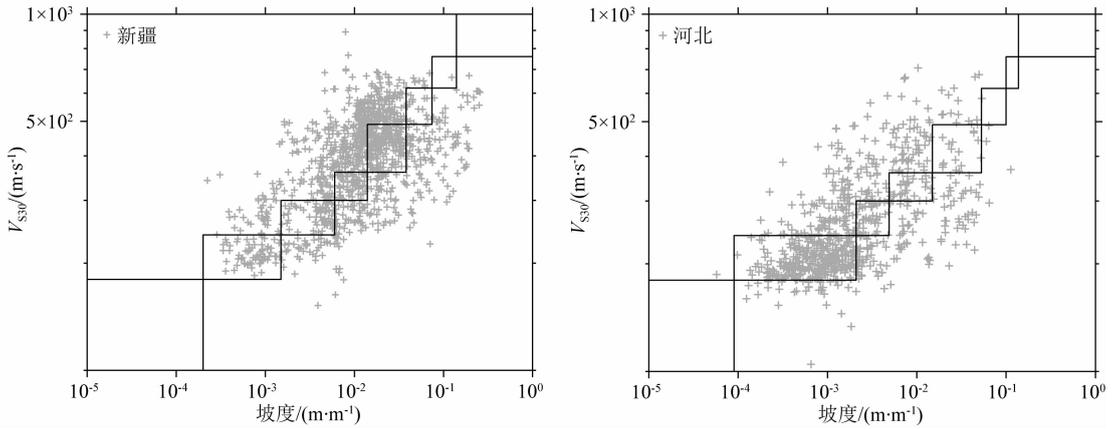


图 4 河北和新疆地区的场地 V_{S30} 与地形坡度的相关关系

Fig. 4 The relationship between V_{S30} and slope in Hebei and Xinjiang

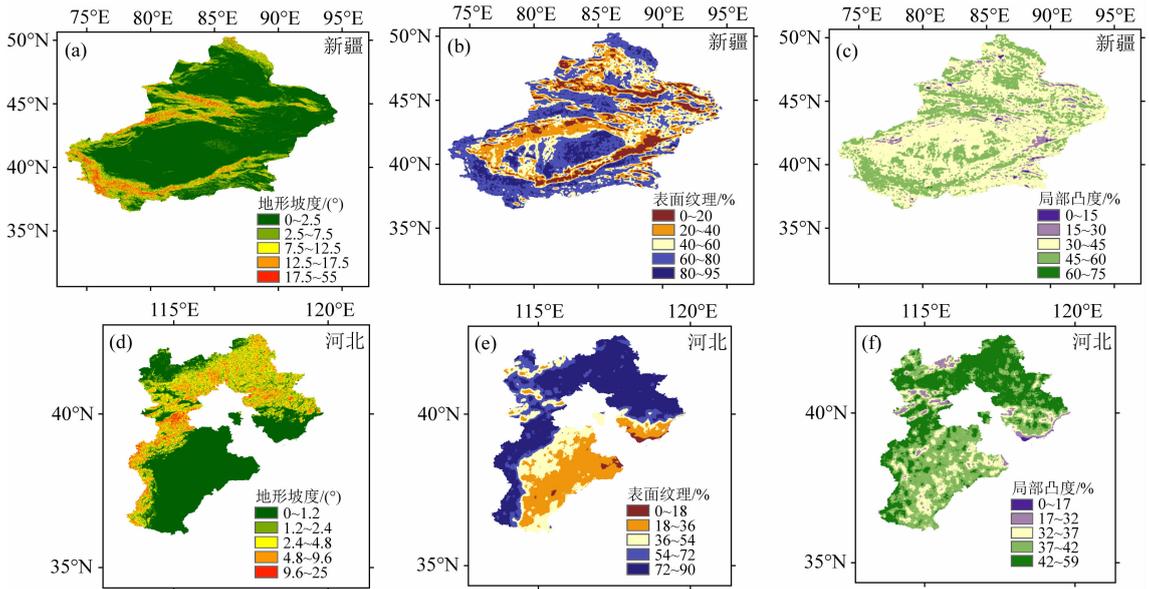


图 5 新疆和河北地区的三项地形特征值分布

Fig. 5 Spatial distribution of three terrain features in Xinjiang and Hebei

图 5 中可以发现,体现地表陡峭程度的地形坡度分布与两个地区的山脉、平原分布较为符合;表面

纹理在一定程度上也体现了这种分布,但同时可以发现新疆许多平原地区(对应地形坡度值在 0~

2°范围内)也出现了高纹理值,体现了沙漠盆地内分布着凹凸不平的广袤戈壁滩,也说明通过该特征值可针对平原地区的局部粗糙度加以分区.比较表面纹理与局部凸度的分布,可以发现两者形状相似,但局部凸度值的区间分布相对密集,说明其针对较平坦区域的地表粗糙度可更好地加以区分.

提取整片区域每个栅格处的地形特征值,根据图 1 地形分类流程,计算三层分类决策需要的各地形特征阈值,结果如图 6 所示.

从图 6 中可见,各等级阈值下新疆地区的地形坡度值和局部凸度值均高于河北地区,河北地区的地形坡度第三阈值仅 0.07,这缘于河北大部分地区位于较为平坦的华北平原具有较低的坡度值.对于表面纹理值,新疆地区第一阈值为 53.50,第三阈值为 45.73,河北地区第一阈值为 56.98,第三阈值为 35.01,河北的变化较新疆的更加剧烈;对于局部凸度值,新疆第一阈值为 41.70,第三阈值为 40.52,河北第一阈值为 40.21,第三阈值为 37.15,亦是河北的变化较新疆的更加剧烈,这是由于河北具有海拔较低且变化较小的大片平原,在进行坡度二分过滤后余下平原地区其表面纹理与局部凸度值也更低.

将上述结果与 Iwahashi 和 Pike(2007)给出的全球基于 900 m 精度 DEM 数据确定的三项地形特征阈值进行比较(图 7a),可以发现新疆、河北地区的地形坡度和局部凸度阈值变化趋势与全球的趋势相近,但表面纹理的变化却相对较为剧烈,原因是新疆、河北相对于全球来说区域面积较小,且有限的范围内平原、台地、丘陵、山地面积分布占比较为均衡(见图 8),计算得到的表面纹理值的分布并不集中(见图 6),引起三个等级的阈值存在一定的大小差距.

接下来根据图 1 的分类流程及图 6 确定的地形特征阈值对新疆及河北地区的地形进行分类,例如,将新疆地区地形坡度值>3.07°、局部凸度值>53.50%、且表面纹理值>41.70%的所有栅格单元划分为第 1 类地形,最终得到两个地区的 16 类地形分类如图 8 所示.

将地形分类图与地貌分类进行比较(图 8 所示)可以发现,两者存在一定的关联性.从地貌分类可见,新疆地区山脉与盆地相间排列,北部阿尔泰山,南部为昆仑山,中部为天山,天山南部是塔里木盆地,北部是准噶尔盆地.地形分类结果显示,第 13~

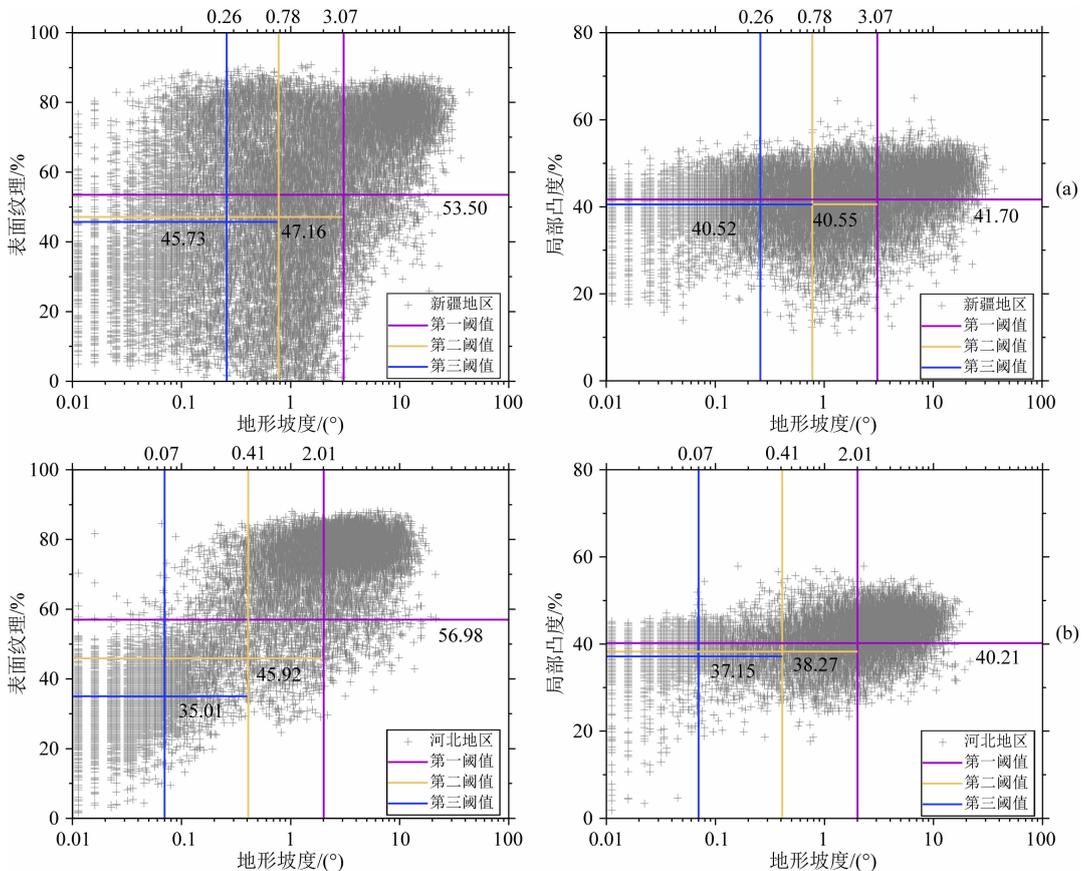


图 6 新疆(a)和河北(b)地区三项地形特征值的三个等级阈值确定结果

Fig. 6 The results of three levels of thresholds of three terrain features in Xinjiang (a) and Hebei (b)

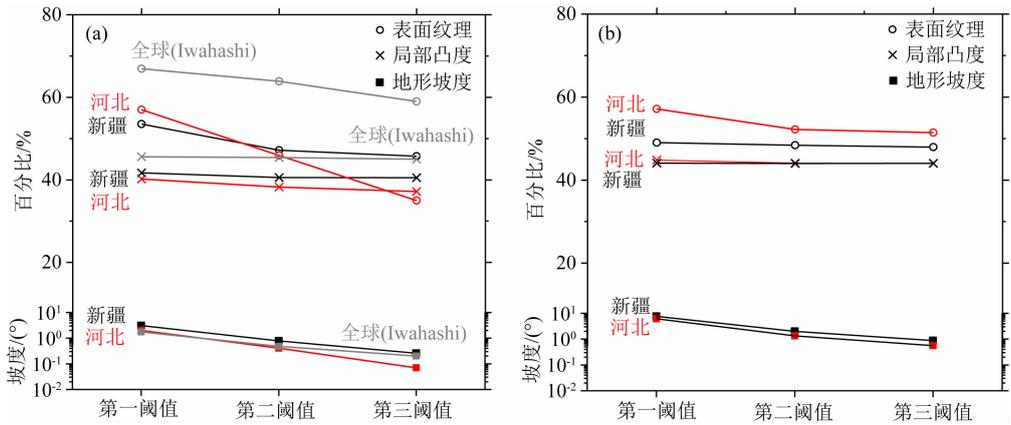


图 7 基于 900 m(a)及 90 m(b)精度 DEM 数据确定的三项地形特征阈值

Fig. 7 Thresholds of three terrain features based on 900m-resolution (a) and 90m-resolution (b) DEM data respectively

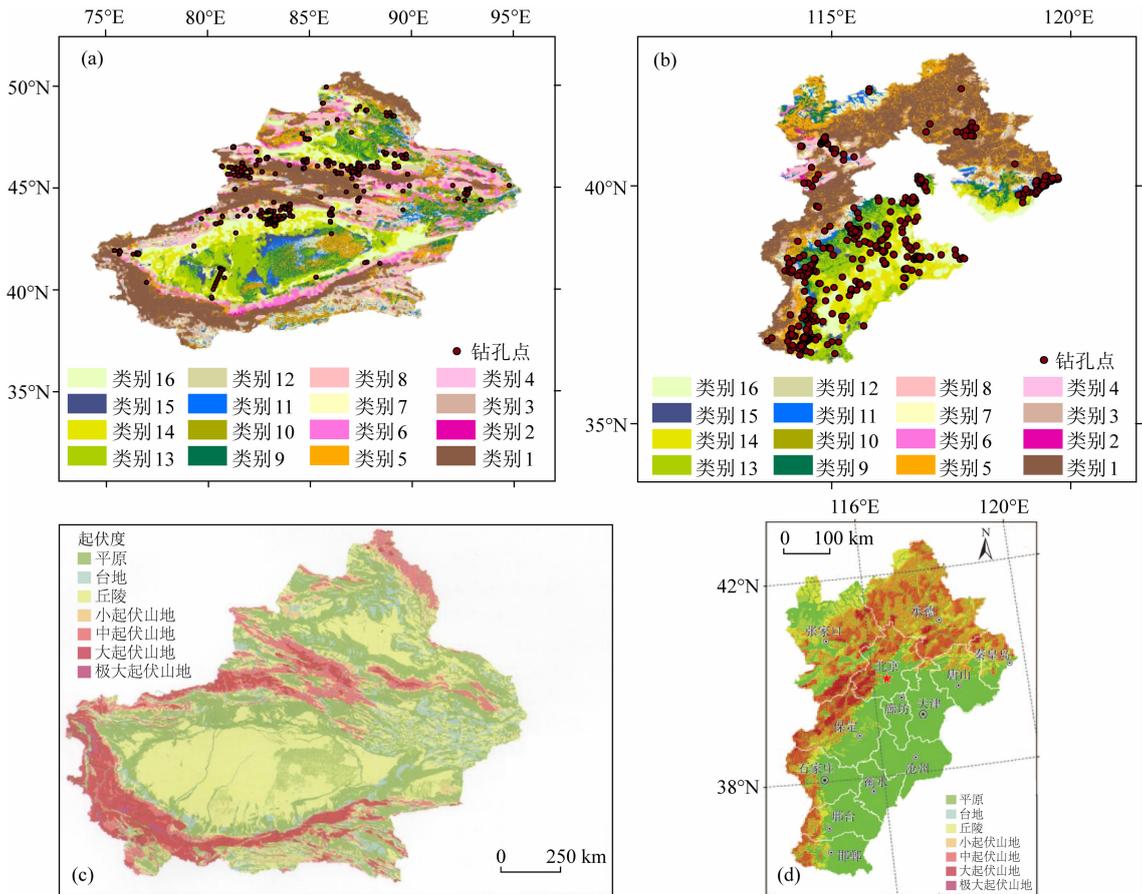


图 8 依据三项地形特征划分的新疆和河北地区地形分类图((a)新疆、(b)河北)及其与地貌分类图((c)新疆(程维明等,2009)、(d)京津冀(赵敏等,2016))比较

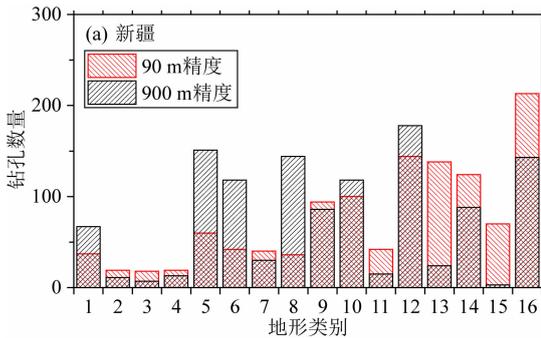
Fig. 8 The terrain classification maps of Xinjiang and Hebei based on three terrain features ((a) Xinjiang, (b) Hebei) and comparisons with the geomorphological classification maps ((c) Xinjiang (Cheng et al., 2009), (d) Beijing-Tianjin-Hebei (Zhao et al., 2016))

16 类地形主要分布在塔里木盆地与准噶尔盆地,第 1 类地形主要分布于阿尔泰山、天山与昆仑山地区,地形分类很好地体现了区域内地貌间的差异。从地貌分类可见,河北地势总体特征为西北高、东南低,西北主要为山地、高原和丘陵,中部和东南部为平

原。地形分类结果显示,第 13~16 类地形分布于东南部分的河北平原,整体地势较低;第 1 类地形分布于北部的燕山山脉与中部的太行山,整体地势较高,地形分类与地貌分类在空间分布上具有较好的对应性。

针对每一类地形分类给出 V_{S30} 预测值. 首先, 汇总每个地形分类下的钻孔数据 (图 9). 图中可见, 新疆地区地形类别 12 所占区域钻孔数量最多, 约占总体数量的 14.9%, 其次为类别 5 和类别 8, 分别占有总数的 12.6% 和 12.0%; 某些类别下的钻孔数据量极少, 例如类别 2、3、4 以及 11, 都不足 1%; 河北地区钻孔数量最多的类别是 11, 然后依次是类别 14、类别 13, 缺少类别 2 所占区域的钻孔数据. 可以发现两个地区的钻孔都集中在坡度相对较低的区域, 本文所获得的钻孔多数位于建设工程场地, 大都集中于生产活动地区. 这些地区是相对较为平坦的平原和盆地区域, 因此在代表高坡度值的山脉地区 (类别 1、2、3、4) 的钻孔数据则较少.

为了得到稳健的地形类别与 V_{S30} 之间的经验关系, 我们采用交叉验证多次迭代的方法. 首先, 随机



选取占总体数量为 65% 的钻孔作为标定组, 分别计算每个地形类别下的 V_{S30} 平均值作为每个类别的对应预测值; 剩下 35% 数量的钻孔 V_{S30} 值作为验证组, 也就是实测值. 通过计算实测值与预测值之间的均方误差 (Δ) 确定最佳的预测值:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{S30i}^{\text{obs}} - V_{S30i}^{\text{pre}})^2, \quad (1)$$

其中, V_{S30i}^{pre} 即为每个类别下标定组钻孔数据的均值、 V_{S30i}^{obs} 为验证组每个钻孔的 V_{S30} 值、 N 为验证组钻孔数量. 我们进行 1000 次随机选择与交叉验证的迭代, 选择 Δ 最低时的工况确定的 V_{S30} 预测值作为每个地形类别的 V_{S30} 最佳预测值, 结果如图 10 所示.

将新疆和河北地区的各地形类别对应的 V_{S30} 预测值与 Yong 等 (2012) 给出的美国加州地区的结果进行比较 (图 10), 可以发现, 整体上三者的变化趋

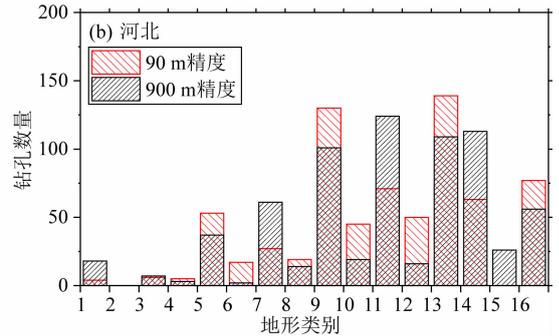


图 9 基于 900 m 精度和 90 m 精度 DEM 数据给出的新疆与河北地区 16 类地形类别对应的钻孔数量分布

Fig. 9 The numbers of boreholes corresponding to 16 terrain categories in Xinjiang and Hebei regions classified using 900m-resolution and 90m-resolution DEM data

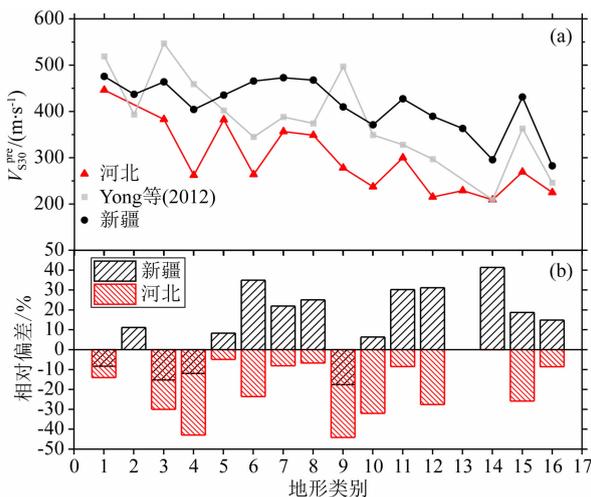


图 10 (a) 本研究得到的新疆与河北地区 16 个地形类别的 V_{S30} 最佳预测值与 Yong 等 (2012) 结果的比较及 (b) 两者之间的相对偏差

Fig. 10 (a) Comparisons of the best prediction values of V_{S30} for 16 terrain categories in Xinjiang and Hebei given by this study with the results of Yong et al., (2012) and (b) relative deviations between them

势较为一致, 编号较低的地形类别对应的 V_{S30} 值相对较高, 编号较高的地形类别对应的 V_{S30} 值相对较低. 图 10 还给出了新疆和河北地区的 V_{S30} 预测值与美国加州地区的相对偏差, 新疆地区除第 6、12、14 类别、河北地区除第 4、9、10 类别外, 其他类别的相对偏差都在 30% 以内. 新疆地区的 V_{S30} 预测值总体上要大于美国加州地区, 而河北地区则相反, 表明河北地区的场地土层总体要偏软. 可以发现, 对于钻孔数据量较少的地形类别, 例如新疆地区的地形类别第 7 和 11, 河北地区的地形类别第 3 和第 12, 其 V_{S30} 预测值与 Yong 等 (2012) 所得结果相差较大, 一定程度上说明仅由少量的钻孔数据预测整个地形类别的平均 V_{S30} 值将引起较大的不确定性, 下一工作将补充钻孔数据对结果进行修正. 可以观察到河北地区缺少第 2 类地形的 V_{S30} 预测值, 原因是该地形类别体现的是高坡度、高凸度和粗纹理的地形特征, 代表的是陡峭的山峰、山脊地区, 这些地区很少有工程建设项目, 因此钻孔数据较为匮乏.

3 预测模型准确性检验及对 DEM 数据精度敏感性分析

3.1 模型的准确性检验

为了评估上述基于地形特征的 V_{S30} 预测模型的准确性,同时也为了评价引入多个地形特征参数是否对模型的预测准确性有所提升,针对两种模型利用新疆和河北地区的钻孔数据,计算 V_{S30} 实测值与

预测值之间的残差:

$$R_i = V_{S30i}^{\text{obs}} - V_{S30i}^{\text{pre}}, \quad (2)$$

比较两种模型计算获得的残差标准差 σ_R 和残差均值 μ_R ,结果如图 11 和图 12 所示。

比较结果显示,新疆地区基于地形坡度单一地形特征预测 V_{S30} 得到的残差标准差 $\sigma_R = 116.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 较大于基于三项特性特征预测 V_{S30} 得到的残差标准差 ($96.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),前者给出的残差均值为 $21.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而后者为 $13.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 后者更加接近 0

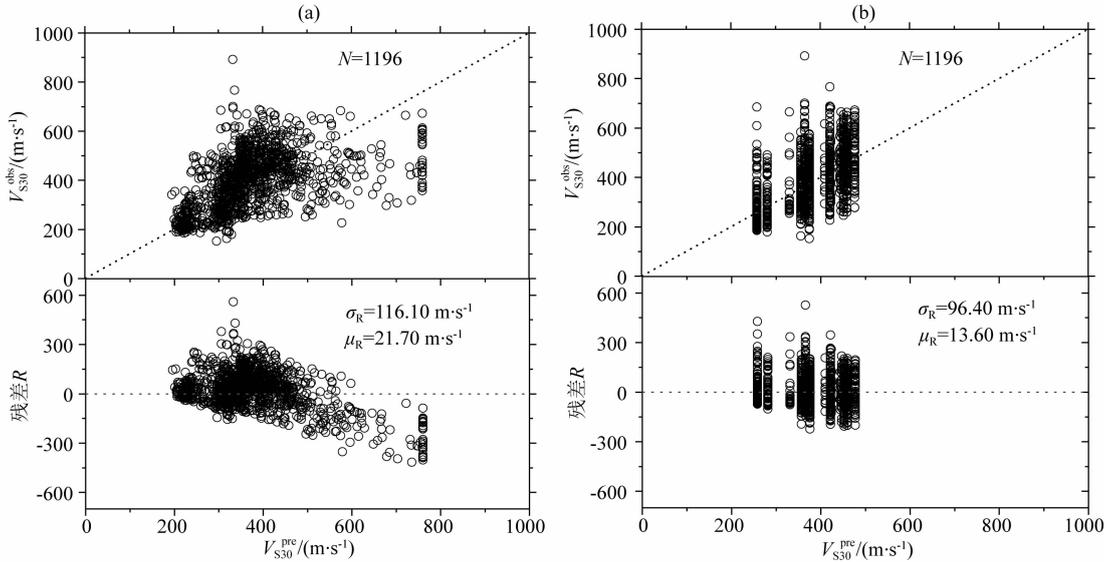


图 11 新疆地区利用两种预测模型对 V_{S30} 预测结果的比较

(a) 基于单项地形坡度的 V_{S30}^{pre} ; (b) 基于三项地形特征的 V_{S30}^{pre} 。

Fig. 11 Comparison of V_{S30} prediction results using two prediction models in Xinjiang

(a) V_{S30}^{pre} determined by means of only topographic slope; (b) V_{S30}^{pre} determined by means of three terrain features.

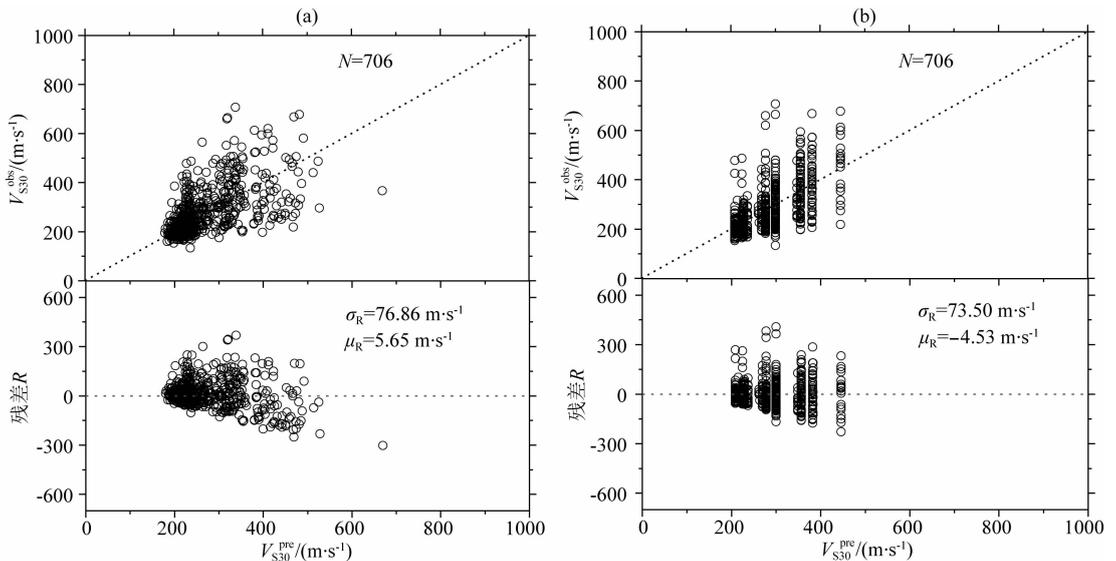


图 12 河北地区利用两种预测模型对 V_{S30} 预测结果的比较

(a) 基于单项地形坡度的 V_{S30}^{pre} ; (b) 基于三项地形特征的 V_{S30}^{pre} 。

Fig. 12 Comparison of V_{S30} prediction results using two prediction models in Hebei

(a) V_{S30}^{pre} determined by means of only topographic slope; (b) V_{S30}^{pre} determined by means of three terrain features.

值;河北地区给出的预测结果亦是如此. 由此说明, 相较于地形坡度单一特征参数建立的 V_{S30} 预测模型, 引入表面纹理和局部凸度后联合三项地形特征建立的 V_{S30} 预测模型其预测准确性有所提高. 我们也曾尝试建立基于决策树的双参数模型(地形坡度和表面纹理、地形坡度和表面凸度), 虽可以对 V_{S30} 进行较好的预测, 但是仅能将地形划分为 8 个类别, 与三参数模型相比对地形类别识别不够充分, 不能将某些 V_{S30} 具有明显差异的类别划分出来, 因此这里并不给出模型结果. 不过可以确定的是, 无论采用双参数还是三参数, 较单一地形坡度参数, 联合更多的地形特征参数将对地表浅层剪切波速具有更好的指示作用. 需要说明的是, 本项研究收集的部分地形类别的钻孔数据还是很有限(图 9 所示), 未来工作将补充更多的数据, 完善后的预测模型其准确性可得到进一步提升.

3.2 模型对 DEM 数据精度的敏感性分析

三项地形特征参数都是基于 DEM 数据计算的, 其精度是否对计算结果有所影响, 进而影响对 V_{S30} 的预测准确性, 接下来将利用高精度 90 m 栅格大小的 DEM 数据按照前述方法流程(图 1)建立模型, 以测试模型对 DEM 数据精度的敏感性.

首先确定了地形坡度、表面纹理和局部凸度在三个等级下的阈值(图 7b). 与利用 900 m 精度的 DEM 数据确定的阈值相比较, 结果显示, 提高 DEM 精度后, 地形坡度的各级阈值均有所增加, 新疆地区的第一阈值由 3.18 增加至 7.61, 河北地区的第一

阈值也由 2.01 增加至 6.19, 增加幅度较大. Allen 和 Wald(2009)曾指出采用低精度的 DEM 数据会产生自动平滑作用, 也就是采用高精度的数据形成相对较多的高值部分. 比较结果还显示, 表面纹理与局部凸度的阈值也有所提高; 三项特征的两个阈值变化相对趋于平缓, 这也是由于提高 DEM 数据精度后计算得到的三项特征在数值上分布相对集中, 低精度 DEM 数据产生的平滑作用会使数值趋于分散.

基于 90 m 精度的 DEM 数据划分的河北地区地形类别如图 13 所示, 比较局部区域内与基于 900 m 精度 DEM 数据划分的结果, 可以发现在河北地区, 利用高精度数据可以对陡峭的山脉地区(图 13b 中除左上角外其他大部分地区)进行更为详细的划分(针对第 1、2、3、4 类别), 能够更清晰的识别出山脊(谷)线, 而低精度数据能够对平坦的平原地区(图 13c 中左上角区域)识别划分更为充分(针对第 5、7、9、11 类). 考虑到人们日常生产活动多位于平坦的平原及盆地中部地区, 能够对这些地区的地形类别进行有效识别将更具现实意义, 因此选择 900 m 精度的 DEM 数据相对较为实用. 另外, 可以注意到基于 90 m 精度的 DEM 数据划分地形类别后, 各类别对应的钻孔数量有所变化, 如图 9 所示, 各类别对应的 V_{S30}^{PRE} 也将有所改变.

4 结论

本文以新疆和河北地区为例, 利用 DEM 数据

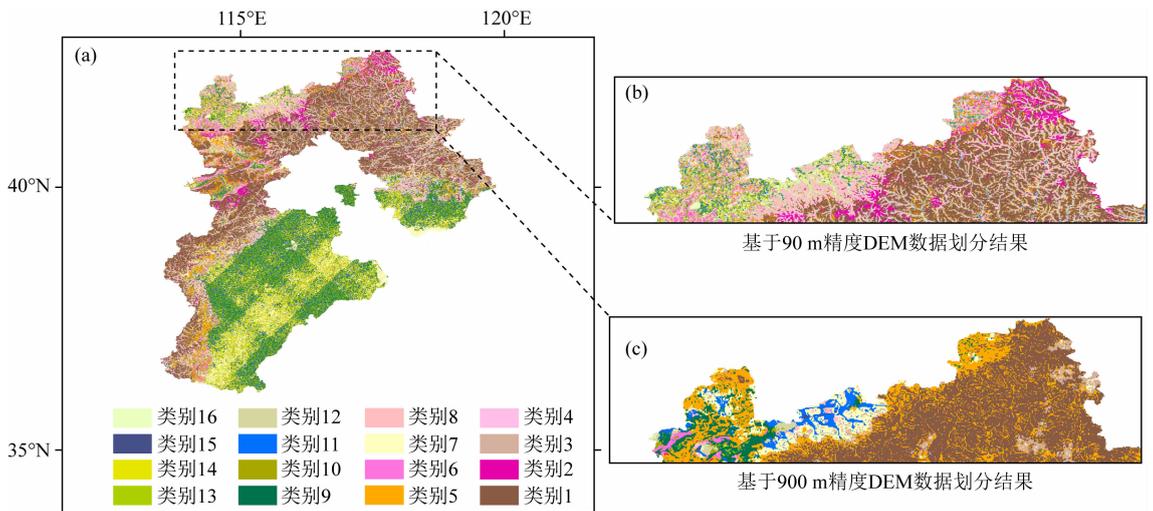


图 13 基于 90 m 精度的 DEM 数据划分的河北地区 16 类地形类别(a)

以及局部(b)与基于 900 m 精度(c)的 DEM 数据给出的结果对比

Fig. 13 The classification map in Hebei based on 90m-resolution DEM data and comparison between its local zoom-in results and those given based on 900m-resolution DEM data

和工程钻孔资料验证一种基于地形特征的场地参数 V_{S30} 估计方法在我国的适用性,检验考虑多项地形特征参数后是否对 V_{S30} 的预测准确性有所提升,并对 DEM 数据的敏感性进行了分析,主要工作及结论如下:

(1)建立了新疆和河北地区基于地形坡度单一特征的 V_{S30} 预测模型;利用决策树理论考虑地形坡度、表面纹理和局部凸度三项地形特征划分了两个地区 16 类地形类别,与已有研究进行比较表明划分的地形类别在空间分布上与地貌分布趋势相一致,在此基础上建立了基于三项地形特征的 V_{S30} 预测模型。

(2)比较了两个地区基于三项地形特征的 V_{S30} 预测模型以及美国加州地区的预测模型,结果显示各地形类别的 V_{S30} 预测值差异明显,但三个地区的变化趋势较为一致,说明基于决策树理论考虑三项地形特征的 V_{S30} 估计方法具有普遍适用性,但同时存在区域依赖性,需要分区建立适用的 V_{S30} 预测模型。

(3)利用两种预测模型对两个地区的 V_{S30} 进行估计,比较预测值与实测值残差的均值与标准差,发现引入了表面纹理和局部凸度两项地形特征后,对 V_{S30} 预测的准确性有所提升,表明联合多项地形特征可对地表浅层剪切波速具有更好的指示作用。

(4)分析了 DEM 数据精度对地形分类结果的影响,以河北地区为例,发现在区域内利用高精度数据对陡峭的山脉地区划分可能更为详细,而低精度数据则能够对平坦的平原地区识别可能更为充分。考虑到对人们日常生产活动频繁的平原及盆地中部地区开展场地参数估计更具现实意义,推荐使用 900 m 精度的 DEM 数据相对较为实用。

需要说明的是,基于地形特征对场地 V_{S30} 进行预测是存在较大不确定性的,但在缺乏钻孔数据的条件下或者针对整个区域划分场地类别时,因有实际应用需求此方法仍可发挥重要作用,未来可在提升模型精确性方面进一步开展研究工作。

致谢 感谢中国科学院在地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 上提供的 90 m 精度 DEM 数据,以及 WebGIS 提供的 900 m 精度的 DEM 数据 (<http://www.webgis.com/srtm30.html>)。感谢东京工业大学翠川三郎教授和东京大学客座研究员司宏俊博士为本研究提出的宝贵建议。

References

- Allen T I, Wald D J. 2009. On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (V_{S30}). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A): 935-943.
- Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seismological Research Letters*, 68(1): 128-153.
- Chen K, Yu Y X, Gao M T. 2010. Research on ShakeMap system in terms of the site effect. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 26(1): 92-102.
- Chen X L, Gao M T, Yu Y X, et al. 2014. Applicability of topographic slope method for seismic site soil classification of Yuxi-Jiangchuan-Tonghai-Basin in China. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics* (in Chinese), 34(S1): 146-152.
- Cheng W M, Chai H X, Zhou C H, et al. 2009. The spatial distribution patterns of digital geomorphology in Xinjiang. *Geographical Research* (in Chinese), 28(5): 1157-1169.
- Dobry R, Borcherdt R D, Crouse C B, et al. 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, 16(1): 41-67.
- Fu L, Li X J. 2017. The kappa (k_0) model of the Longmenshan region and its application to simulation of strong ground-motion by the Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(8): 2935-2947, doi: 10.6038/cjg20170803.
- Fumal T E, Tinsley J C. 1985. Mapping shear-wave velocities of near-surface geologic materials. Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region—An earth-science perspective. *Dallas, U. S. Geological Survey*, 127-150.
- Iwahashi J, Kamiya I. 1995. Landform classification using digital elevation model by the skills of image processing—mainly using the Digital National Land Information. *Geoinformatics*, 6(2): 97-108.
- Iwahashi J, Watanabe S, Furuya T. 2001. Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan. *Computers & Geosciences*, 27(7): 851-865. (in Japanese with English abstract)
- Iwahashi J, Pike R J. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86(3-4): 409-440.
- Kang C C. 2017. Topographic slope as a proxy for site category in Sichuan Area [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics China Earthquake Administration.
- Lemoine A, Douglas J, Cotton F. 2012. Testing the applicability of correlations between topographic slope and V_{S30} for Europe. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6): 2585-2599.
- Li C C, Li Z Y, Yuan X M. 2020. Simplified prediction method for regional seismic soil liquefaction. *Chinese Journal of Geophysics* (in

- Chinese), 63(5): 2084-2095, doi: 10.6038/cjg2020N0052.
- Li X J, Jing B B, Liu C, et al. 2019. Site classification method based on geomorphological and geological characteristics and its application in China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5): 1843-1854.
- Pike R J. 1988. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, 20(5): 491-511.
- Qi W H, Wang Z Q, Bo J S, et al. 2020. Study on earthquake disaster distribution and site response of Hanyuan abnormal intensity during the Wenchuan earthquake. *Journal of Harbin Engineering University* (in Chinese), 41(3): 383-389.
- Seyhan E, Stewart J P, Ancheta T D, et al. 2014. NGA-West2 site database. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1007-1024.
- Shao D, Sun Z, Tian Q H. 2018. Estimate V_{S30} base on drill data and DEM in Baoji area. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 39(1): 117-122.
- Shi D C. 2013. Study on ground motion amplification of regional site and amplification [Ph. D. thesis] (in Chinese). Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration.
- Wald D J, Allen T I. 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5): 1379-1395.
- Wang W C, Yin Z W, Su X Y, et al. 2020. Characteristics of strong ground motion of the 2018 Ningqiang M5.3 earthquake in Shaanxi province and local site response analysis. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 42(6): 1700-1705.
- Wills C J, Silva W. 1998. Shear-wave velocity characteristics of geologic units in California. *Earthquake Spectra*, 14(3): 533-556.
- Yong A, Hough S E, Iwahashi J, et al. 2012. A terrain-based site conditions map of California with implications for the contiguous United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1): 114-128.
- Zafarani H, Jafarian Y, Eskandarinejad A, et al. 2020. Seismic hazard analysis and local site effect of the 2017 M_w 7.3 Sarpol-e Zahab, Iran, earthquake. *Natural Hazards*, 103(2): 1783-1805.
- Zhao M, Cheng W M, Huang K, et al. 2016. Research on land cover change in Beijing-Tianjin-Hebei region during the last 10 Years based on different geomorphic units. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 31(2): 252-264.

附中文参考文献

- 陈学良, 高孟潭, 俞言祥等. 2014. 地形坡度场地分类法在玉溪—江川—通海盆地的适用性研究. *地震工程与工程振动*, 34(S1): 146-152.
- 陈鲲鹏, 俞言祥, 高孟潭. 2010. 考虑场地效应的 ShakeMap 系统研究. *中国地震*, 26(1): 92-102.
- 程维明, 柴慧霞, 周成虎等. 2009. 新疆地貌空间分布格局分析. *地理研究*, 28(5): 1157-1169.
- 傅磊, 李小军. 2017. 龙门山地区的 $kappa(k_0)$ 模型及汶川 M_s 8.0 地震的强地震动模拟. *地球物理学报*, 60(8): 2935-2947, doi: 10.6038/cjg20170803.
- 亢川川. 2017. 通过地形坡度估计四川省场地类别研究 [硕士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 李程程, 李兆焱, 袁晓铭. 2020. 区域土壤地震液化预测简化方法. *地球物理学报*, 63(5): 2084-2095, doi: 10.6038/cjg2020N0052.
- 齐文浩, 王振清, 薄景山等. 2020. 汶川地震汉源县城震害分布与场地反应分析. *哈尔滨工程大学学报*, 41(3): 383-389.
- 韶丹, 孙哲, 田勤虎. 2018. 联合钻孔资料及地形数据估算宝鸡地区 V_{S30} . *地震地磁观测与研究*, 39(1): 117-122.
- 史大成. 2013. 区域性场地地震动放大研究及应用 [博士论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王文才, 尹志文, 苏小芸等. 2020. 2018 年陕西宁强 5.3 级地震强地面运动特征及局部场地效应分析. *地震工程学报*, 42(6): 1700-1705.
- 赵敏, 程维明, 黄坤等. 2016. 基于地貌类型单元的京津冀近 10a 土地覆被变化研究. *自然资源学报*, 31(2): 252-264.

(本文编辑 汪海英)