

崔尧,王爱国,张波,等.基于地质属性和地形特征的场地参数  $v_{S30}$  估算方法[J].地震工程学报,2024,46(6):1437-1445.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230524001

CUI Jiao, WANG Aiguo, ZHANG Bo, et al. A method for estimating site  $v_{S30}$  based on geological attributes and topographic features[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1437-1445. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230524001

## 基于地质属性和地形特征的 场地参数 $v_{S30}$ 估算方法

崔尧<sup>1</sup>, 王爱国<sup>1,2</sup>, 张波<sup>1,2</sup>, 陆诗铭<sup>1</sup>, 冯紫微<sup>1</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 平均剪切波速是地震工程领域中一个非常重要的参数,可用于预测场地的抗震性能和响应特性。利用甘肃省的钻孔资料、DEM数据以及1:25万地质图,建立一种综合考虑地质属性和多项地形因子的  $v_{S30}$  估算方法,并与传统的  $v_{S30}$  估算方法进行对比验证。结果表明:地质属性和地形特征在场地  $v_{S30}$  估算中具有较强的指示作用;在划分地质单元的基础上,引入地形坡度、表面纹理、局部凸度,以及最邻近河网高差指数等4项地形因子建立的甘肃省场地参数  $v_{S30}$  估算方法,在河西走廊、黄土高原等地质属性和地形特征差异明显的地区,其估算精度高于传统的  $v_{S30}$  估算方法。所提方法得到的  $v_{S30}$  估算结果可为甘肃省场地参数  $v_{S30}$  值的确定提供参考,还可为地质属性和地形特征差异显著地区  $v_{S30}$  值的估算提供一种新思路。

**关键词:** 场地效应; 平均剪切波速; 甘肃省;  $v_{S30}$ ; 估算方法

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1437-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230524001

## A method for estimating site $v_{S30}$ based on geological attributes and topographic features

CUI Jiao<sup>1</sup>, WANG Aiguo<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, LU Shiming<sup>1</sup>, FENG Ziwei<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** As a crucial parameter in earthquake engineering, the average shear wave velocity playing a pivotal role in predicting the seismic performance and response characteristics of a specific site. This study introduces a comprehensive method for  $v_{S30}$  estimation, integrating geological attributes and diverse terrain factors. By utilizing drilling data, digital elevation model data, and 1:250 000 geological map of Gansu Province, the proposed method undergoes a comparative validation against conventional  $v_{S30}$  estimation methods. The results show that geological attributes

收稿日期: 2023-05-24

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2020IESLZ02)

第一作者简介: 崔尧(1994-),男,云南曲靖人,硕士研究生,研究方向为活动构造。E-mail: jiaocui68@gmail.com。

通信作者: 王爱国(1972-),男,湖北洪湖人,正高级工程师,主要从事地震地质与地震工程方向的研究。

E-mail: waguo2008@163.com。

and topographical features have a strong indication in the  $v_{S30}$  estimation of specific sites. Based on the division of geological units, the proposed estimation method of  $v_{S30}$  in Gansu Province was established by introducing four topographic factors, namely, topographic slope, surface texture, local convexity, and height above nearest drainage. In regions characterized by marked disparities in geological attributes and terrain features, such as the Hexi Corridor and Loess Plateau, the estimation accuracy of the proposed method is higher than that of the traditional methods. The estimation results of  $v_{S30}$  obtained by the proposed method can provide a reference for determining the value of  $v_{S30}$  in Gansu Province, and also provide a new idea for estimating the value of  $v_{S30}$  in areas with significant differences in geological attributes and topographic features.

**Keywords:** site effect; average shear wave velocity; Gansu Province;  $v_{S30}$ ; estimation method

## 0 引言

场地效应是指地震波在地壳、土壤和岩石中传播时,受到地质结构和地表条件的影响而发生变化的现象。地震工程研究表明,不同场地类型对地震损伤的影响存在很大差异,这促使场地分类方法得到迅速发展<sup>[1]</sup>,而不同类型的地表和地下地质条件会对地震波的传播速度、幅度和频率产生显著影响,从而导致地震烈度在不同地区出现差异<sup>[2-3]</sup>。在定量描述地震场地效应的方法中,定性分析地表一定深度范围内平均剪切波速与局部场地地质属性之间的对应关系是最直接的方法<sup>[4-5]</sup>。该方法因成本较小、方法简单以及可操作性强等优势,成为相关领域学者关注的焦点。已有研究表明,地表 30 m 深度范围内的平均剪切波速可作为度量场地效应的一个直接参数,并被广泛应用到一些破坏性地震的震害效应评估中<sup>[6-8]</sup>。

Wald 等<sup>[9]</sup>建立了一种基于地形坡度的场地参数  $v_{S30}$  的估算方法(Terrain Slope-based  $v_{S30}$  Estimation Method, 本文简称 TS 方法),以衡量其与地表沉积覆盖层之间的相关性。该方法操作简单、易于实施,因此被广泛采用。但鉴于单一参数无法完整描述地表形貌特征,Yong 等<sup>[10]</sup>提出了一种运用多种地形因子(地形坡度、表面纹理、局部凸度等)的场地参数  $v_{S30}$  估算方法(Terrain Factor-based  $v_{S30}$  Estimation Method, 本文简称 TF 方法),用于定量描述场地的地貌响应<sup>[11]</sup>。此外,为提高  $v_{S30}$  估算值的准确性,一些学者在这些方法的基础上,尝试引入其他因素,并探索数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的精度对  $v_{S30}$  估算值的影响<sup>[12]</sup>。Wills 等<sup>[13]</sup>将地形坡度作为一项参数加入到地质分区中,建立了综合地质和地形坡度的混合  $v_{S30}$  估算方法,并将其应用到美国加州地区  $v_{S30}$  地图的绘制中。米欣雪等<sup>[14]</sup>基于地质图数据提出场地分类方

案,有效识别了不同地质单元与场地类别的关联,并展现了其在区域性场地分类中的实用性。Thompson 等<sup>[15]</sup>在地表地质和地形坡度的基础上建立了克里金法的  $v_{S30}$  拟合模型,使区域  $v_{S30}$  估算结果的不确定性得到了较好改进。Zhang 等<sup>[16]</sup>利用北京、天津、广西、广东等地区的钻孔数据,基于地形分类建立了中国地区地表 30 m 深度的  $v_{S30}$  预测模型,为地震灾害情景模拟提供了可靠的地面运动模型。尽管在一些地区,这些方法估算的  $v_{S30}$  结果具有较高的精度,但在局部地区,由于不同模型之间存在的差异和区域依赖性<sup>[17]</sup>,其估算精度仍无法达到要求。

本文首先在地质属性的基础上,加入多项地形因子(包括地形坡度、表面纹理、局部凸度和最邻近河网高差指数),构建一种混合多因子的  $v_{S30}$  估算方法;然后,结合甘肃省的钻孔  $v_{S30}$  数据,估算甘肃省场地参数  $v_{S30}$  值;最后,将所得结果与传统  $v_{S30}$  估算方法得到的结果相比较,检验不同方法对甘肃省  $v_{S30}$  估算的适用性。

## 1 区域背景

甘肃省位于青藏高原东北缘,包括北山地区的戈壁和沙漠、河西走廊的山前盆地、祁连山—六盘山和秦岭等地区的山地,以及陇中地区的黄土高原。这些地区具有多样的地质构造和地貌类型,呈现出明显的地形变化。受青藏高原隆升的影响,全省相对高差最大约 5.1 km,平均坡度约 9.4°。总体上,地势呈现出西高东低、南高北低的变化特征。

不同地区的基岩和沉积特征因地质构造和地形类别的差异而产生变化。以甘肃省为例,其西北部和陇东地区为华力西期以前的褶皱系,中部祁连山地区为加里东期的褶皱系,而南部的甘南、陇南和秦岭地区则属于印支期的褶皱系。河西走廊及其周边的戈壁地区广泛分布着巨厚的山前洪积扇砂砾石

层,而高山峡谷地区的山间盆地主要分布着大量的粗颗粒沉积物,陇中、陇东黄土高原区则主要形成于第三纪,并含有厚层的风积黄土<sup>[18]</sup>。值得注意的是,甘肃省及其周边地区还发育了一系列活动断裂,且地震活动频繁。

据史料记载,甘肃省曾发生过数次 8 级以上的地震,包括 1654 年天水南 8 级、1879 年武都南 8 级和 1927 年古浪 8 级地震,属于中国地震灾害高发的地区之一<sup>[19]</sup>。基于上述地震地质特征,本研究改进了传统的  $v_{S30}$  估算方法,旨在提高甘肃省场地  $v_{S30}$  估算的准确度,这对于该地区的震害风险评估将具

有重要意义。

## 2 数据与方法

利用收集到的甘肃省 511 个工程钻孔和 134 个强震台站钻孔的剪切波速数据<sup>[20]</sup>(图 1),计算各个站点的  $v_{S30}$  值,并结合 DEM 数据进行综合分析,建立基于 TS 方法和 TF 方法的  $v_{S30}$  估算模型。在此基础上,引入地质数据,提出了一种综合考虑地质属性和地形特征的  $v_{S30}$  估算方法(Hybrid  $v_{S30}$  Estimation Using Geological-Topographical Features, 本文简称 HGT 方法)。

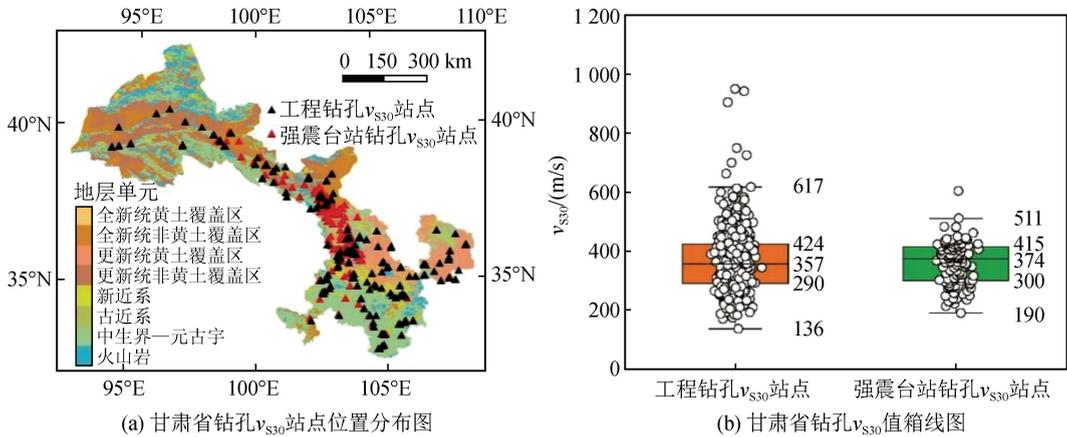


图 1 甘肃省钻孔  $v_{S30}$  位置分布统计图(底图审图号:GS(2020)4619 号,底图无修改)

Fig.1 Statistics of borehole  $v_{S30}$  location distribution in Gansu Province (Review number of the basemap: GS(2020)4619, with no modification)

### 2.1 数据

本文收集的甘肃省 511 个工程场地钻孔数据主要用于甘肃省  $v_{S30}$  估算模型的构建;Xie 等<sup>[20]</sup> 基于经验外推模型计算的 134 个强震台站的钻孔  $v_{S30}$  数据,主要用于对三种估算方法的误差检验和估算性能的评价。由不同站点  $v_{S30}$  数据空间分布和统计结果可知(图 1),除了在甘肃省北部地区收集的站点  $v_{S30}$  数据分布相对较少外,其余地区站点  $v_{S30}$  数据的疏密程度分布均匀。对比两类站点  $v_{S30}$  数据的统计百分位数结果[图 1(b)],发现其四分位差异较小。因此,利用这些数据来建立  $v_{S30}$  估算模型并评估其估算性能是科学、有效的。

在进行约束地形特征的地形参数计算时,采用两种不同精度(30"和 3")的 DEM 数据(<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123>)。其中,30"精度的 DEM 数据用于 TS 方法中地形坡度的提取和 TF 方法中的地形分类;3"精度的 DEM 数据则被用于 HGT 方法中地形分类矢量图的划分。为了确保地质信息的质量和准确性,进一步提高地

形特征和地质属性约束计算中输入数据的全面性和可信度,采用中华人民共和国 1:25 万数字地质图数据(<http://geodb.cgs.gov.cn>)作为地质分类数据。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 基于地形特征的 $v_{S30}$ 估算方法

基于地形特征的  $v_{S30}$  估算方法包括 TS 方法和 TF 方法。如图 2 所示,TS 方法主要依赖于工程测量的钻孔  $v_{S30}$  数据以及从 DEM 数据中提取的地形坡度,通过两者之间的分段线性关系建立区域  $v_{S30}$  估算模型。考虑到大陆构造的活跃度,该方法将地质构造的活动性分为构造活跃区和稳定大陆区,并结合工程钻孔  $v_{S30}$  数据和坡度之间的线性分段关系,构建不同构造活动区的  $v_{S30}$  估算关系矩阵,从而迅速估算全球的  $v_{S30}$  分布值。其基本原理是考虑地形坡度与地表浅层沉积物厚度之间的对应关系,即在地形坡度大的山地、高原等地,地表浅层沉积物的厚度较小;在地形坡度小的平原、丘陵等地,地表浅层沉积物的厚度较大。

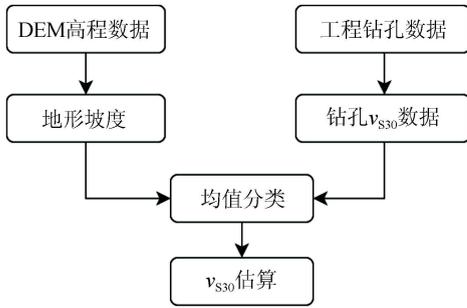


图2 TS方法估算流程图

Fig.2 Flowchart of the TS estimation method

如图3所示,TF方法估算步骤如下:首先,在地形坡度的基础上引入表面纹理(中值滤波提取的“谷”和“峰”的空间密度)和局部凸度(拉普拉斯滤波器提取的凸点的空间密度)两项地形参数,计算二者的栅格像元平均值,并将其作为划分地形类别的阈值;然后,利用决策树分类方法分割16种地形矢量单元<sup>[21]</sup>,并计算不同地形类别范围内站点 $v_{s30}$ 数据的平均值;最后,将计算得到的平均值作为该地形类别的 $v_{s30}$ 估算值,并形成最终的 $v_{s30}$ 估算图。

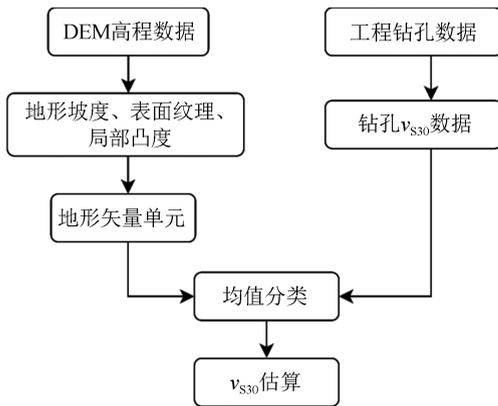


图3 TF方法估算流程图

Fig.3 Flowchart of the TF estimation method

### 2.2.2 综合地质与地形特征的 $v_{s30}$ 估算方法

地表浅层沉积物的物理属性,包括岩性、地层年龄和颗粒大小等,被确定为场地参数 $v_{s30}$ 值差异的主要原因<sup>[22]</sup>。在TS和TF方法中,当地表地质属性的空间分布特征与地形的起伏变化呈现较好的对应关系时, $v_{s30}$ 估算结果的精度较高;然而,在那些地质属性和地形特征的空间分布存在明显差异的区域中,仅仅考虑地形参数与钻孔 $v_{s30}$ 之间的对应关系,可能导致 $v_{s30}$ 值估算结果的准确性出现较大偏差。为解决此问题,本文提出一种综合考虑地质属性和地形特征的场地参数 $v_{s30}$ 估算方法(即HGT方法),其估算流程见图4。HGT方法旨在提高

$v_{s30}$ 估算的准确性,尤其是在地质属性和地形特征差异明显的地区。

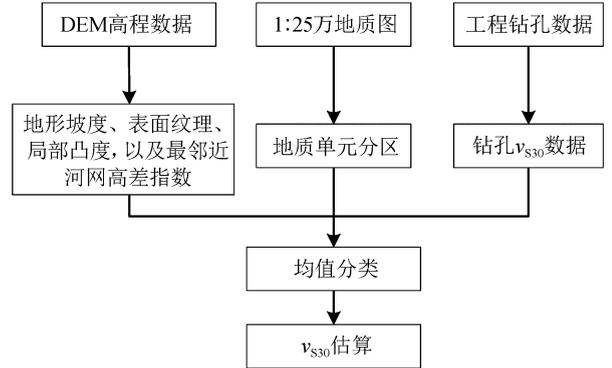


图4 HGT方法估算方法流程图

Fig.4 Flowchart of the HGT estimation method

大比例尺地质图蕴含着丰富的地质信息,包括地层在地表出露的空间范围、年代、厚度,以及岩土体颗粒的物理属性等,它们在描述区域场地效应的动力特征时具有重要作用。Wills等<sup>[23]</sup>通过提取地层年代、平均剪切波速等信息,建立了地质属性与平均剪切波速之间的对应关系,并提出了基于地质属性的场地参数 $v_{s30}$ 估算方法。Forte等<sup>[24]</sup>将地层岩性、年代、沉积环境和土壤颗粒类别视为地震土壤分类图的地质分类指标,并据此绘制了区域的工程场地分类图。本文首先参考现有的地质分类方法,结合甘肃省地层单元的岩性、年代及土壤颗粒等地质物理属性,划分了8个具有不同地质物理属性的地质单元类别(表1),其中,黄土覆盖区和非黄土覆盖区的划分主要考虑到陇中地区发育了厚层更新世黄土,且黄土覆盖区地形起伏度大;其次,利用DEM数据,结合地理信息系统(Global Positioning System, GPS)软件,提取了地形坡度、表面纹理、局部凸度和最邻近河网高差指数4个地形因子,并根据其变化情况,在甘肃省内划分了15个地形类别(图5);最后,参考所划分的地质单元和地形类别来进行 $v_{s30}$ 值估算,即根据二者之间的对应关系,计算不同分类单元内工程钻孔的 $v_{s30}$ 平均值,并将其作为该分类单元的 $v_{s30}$ 估算值。为了增强估算的精确性和可靠性,选取了Wills等<sup>[23]</sup>对美国加利福尼亚州不同地质单元计算的 $v_{s30}$ 平均值作为对照组,这些数据所涉及的地质单元和地形类别的分类与HGT方法基本保持一致。

#### (1) 地形分类

采用自动、半自动化的地形分类方法实现甘肃

表 1 甘肃省地质单元分类表  
Table 1 Classification table of geological units in Gansu Province

地质年代	场地类别	$v_{S30}$ 平均值/(m/s)		地层特性	
		工程钻孔站点	对照组 <sup>[23]</sup>		
全新统	黄土覆盖区(GU1)	C、D	338	349	狭窄山谷、小盆地和盆地边缘附近的第四纪(全新统)冲积层,地层颗粒较细
	非黄土覆盖区(GU2)	C、D	379	354	高山山脉前沿附近和主要河道中的第四纪(全新统)冲积沉积层,地层颗粒较粗
更新世	黄土覆盖区(GU3)	D	318	302	第四纪(更新世)厚层黄土沉积物
	非黄土覆盖区(GU4)	C	428	387	薄层砂砾石
新近系(GU5)	C	360	390	洪积的砾石层,主要分布于山谷峡口宽阔地带	
古近系(GU6)	C	-	455	第三纪(主要是古新世和始新世)页岩和粉砂岩单元	
中生界—元古宇(GU7)	C	450	515	主要为细颗粒胶结度强的砂岩	
火山岩(GU8)	B、C	-	748	结晶岩,例如:白垩纪花岗岩、侏罗纪变质岩、片岩和前寒武纪片麻岩	

注:“-”表示因钻孔数较少,未计算出结果

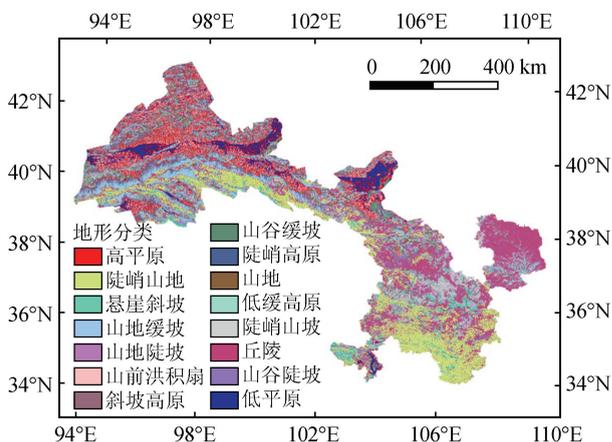


图 5 甘肃省地形类别分布图(底图审图号:GS(2020)4619号,底图无修改)

Fig.5 Distribution map of terrain categories in Gansu Province (Review number of the basemap: GS(2020)4619, with no modification)

省地形类别划分<sup>[21]</sup>。首先,利用 3"精度的 DEM 数据提取地形坡度、最邻近河网高差指数、表面纹理和局部凸度 4 个地形因子;其次,在局部凸度、表面纹理和坡度自然对数等地形分类图层中,创建噪声(DEM 数据的不均匀分布区域)多边形图层,用于检验并去除噪声,例如,在 ArcGIS 软件中,通过对比世界卫星影像和坡度地图将冰盖等区域识别为噪声;接下来,利用 DEM 计算的地形参数栅格和补充专题数据,将区域划分为均匀的坡度,并创建多边形数据;然后,利用 Iwahashi 等<sup>[25]</sup>提出的分割方法,在 eCognition 软件中将地形坡度参数和最邻近河网高差指数的自然对数比的权重设置为 2:1,尺度参数设置为 10,形状参数设置为 0,实现自动化分割;最后,将计算后的地形参数栅格数据转换为多边形矢量图层,并使用 K-均值聚类进行分类。K-均

值聚类可较为准确地识别山区、丘陵、梯田、洪积扇和平原等地貌类别,在聚类分析过程中,主要是利用坡度自然对数、最邻近河网高差指数和表面纹理的字段属性值来分类。其中,在利用 SPSS(IBM)软件进行聚类计算时,需要将集群数量设置为 15 和 40,收敛准则设置为 0,最大迭代次数设置为 999,将地形划分为 15 个简单的地形单元和 40 组地形数据。

## (2) $v_{S30}$ 值估算

基于分类的地质和地形单元实现甘肃省场地参数  $v_{S30}$  值的估算,主要步骤如下:

① 以图 5 所示的 15 个简单地形单元为基准,分别计算每个地形单元内站点  $v_{S30}$  的平均值,以此作为甘肃省第一类场地参数  $v_{S30}$  估算值;

② 将表 1 所列的每个地质单元都划分为 15 个简单的地形单元,计算这 15 个地形单元内钻孔数量大于 5 的  $v_{S30}$  平均值,并将其作为这一地质单元中不同地形单元的  $v_{S30}$  估算值,即甘肃省第二类场地参数  $v_{S30}$  估算值;

③ 利用第一类场地参数  $v_{S30}$  估算值,替补不同地质单元中分类地形单元下空缺的  $v_{S30}$  估算值,将第二类 and 替补的  $v_{S30}$  估算值组合,形成最终的甘肃省场地参数  $v_{S30}$  估算值。

## 3 $v_{S30}$ 估算结果

### 3.1 基于地形特征的 $v_{S30}$ 估算结果

在 TS 方法中,我们使用了 Wald 和 Allen 构建的全球  $v_{S30}$  估算经验关系矩阵<sup>[9]</sup>,用以估算甘肃省的  $v_{S30}$  值。图 6(a)呈现的估算结果显示,在甘肃省西北部的戈壁、沙漠等地区, $v_{S30}$  估算值  $< 300$  m/s;而在陇中、陇东等厚层更新世黄土覆盖地区, $v_{S30}$  估算值  $>$

360 m/s;在构造剥蚀的高山地区, $v_{S30}$  估算值 $>490$  m/s。与实地考察的场地属性进行对比检验,发现在

河西走廊山前平原、戈壁以及沙漠地区的估算结果明显偏低,而黄土高原地区的估算结果明显偏高。

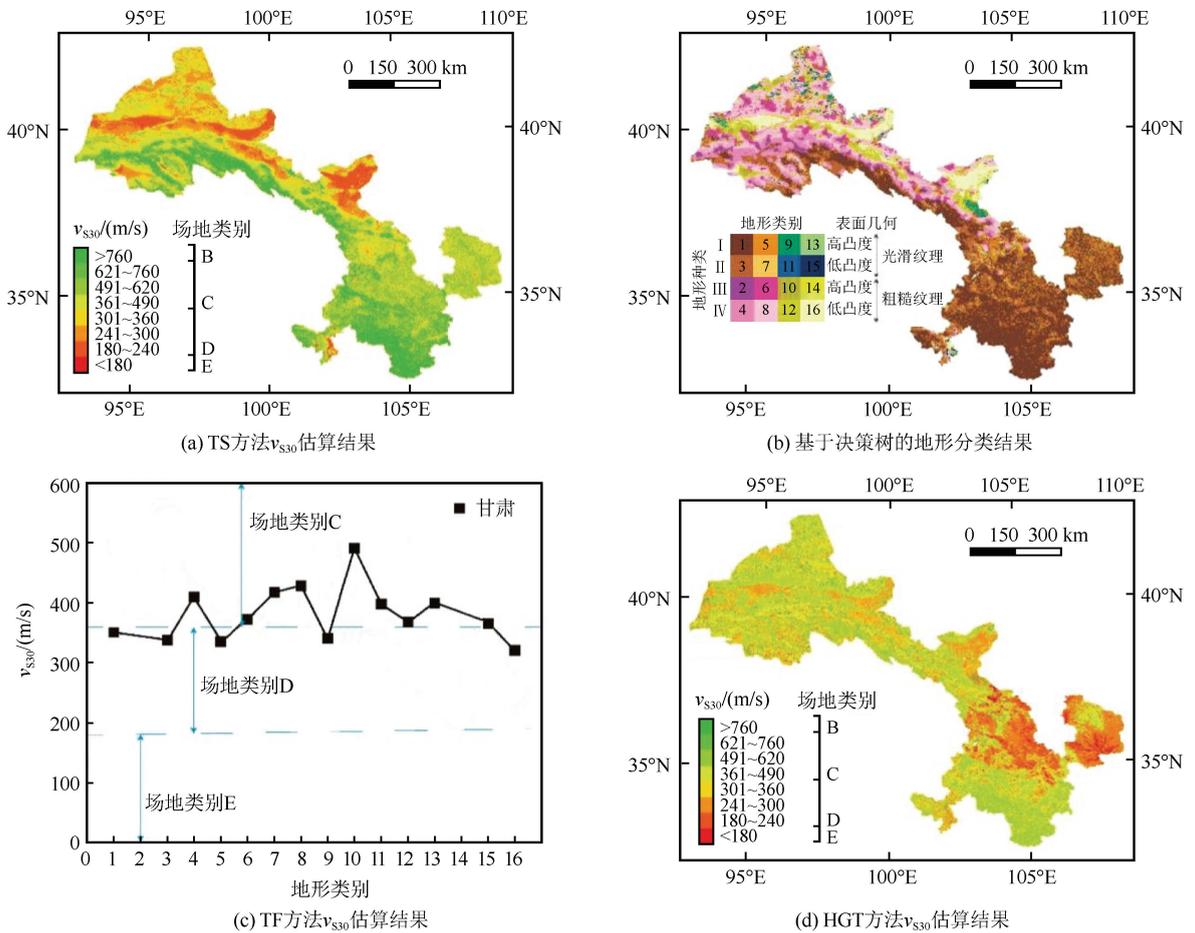


图6 不同估算方法得到的甘肃省场地参数  $v_{S30}$  分布图(底图审图号:GS(2020)4619号,底图无修改)

Fig.6 Distribution of site parameter  $v_{S30}$  in Gansu Province estimated by different methods

(Review number of the basemap: GS(2020)4619, with no modification)

在 TF 方法中,利用地表的形貌特征来定性描述岩土体物理属性的空间分布特征。该方法主要参考了 Iwahashi 等<sup>[25]</sup>提出的决策树地形分类方法,在甘肃省内划分了 16 种地形类别,并建立了工程钻孔  $v_{S30}$  值与地形类别的对应关系。地形分类结果与 TF 方法估算的  $v_{S30}$  值分别如图 6(b)、(c) 所示。基于甘肃省地形的起伏变化特征分析, $v_{S30}$  估算值与地形起伏变化具有明显的正相关性;在地形起伏变化的秦岭、祁连山造山带内和更新世厚层黄土分布区域, $v_{S30}$  估算值 $>519$  m/s;在河西走廊的戈壁、平原等地区, $v_{S30}$  估算值 $<350$  m/s;而在部分构造剥蚀严重的山谷、沙漠等地区, $v_{S30}$  估算值 $<300$  m/s。结合实地考察的场地属性检验,该方法在黄土区与戈壁平原区域的估算结果和实际情况存在较大偏差。

### 3.2 综合地质与地形特征的 $v_{S30}$ 估算结果

自动、半自动化分类的地形矢量多边形不仅可以用来量化不同地貌轮廓的空间分布,还可以作为滑坡易发性和地震破坏性等自然灾害评估和预测的基础参数<sup>[26]</sup>。在利用 HGT 方法对甘肃省场地参数  $v_{S30}$  值进行估算时,由于部分地质单元(如地质年龄较老的 GU5、GU6 和地层岩性坚硬的 GU8)收集的钻孔数据较少,其  $v_{S30}$  值估算趋于保守。由  $v_{S30}$  估算结果的空间分布图[图 6(d)]可得,在山前洪积扇、黄土高原分布的地区和河谷地带, $v_{S30}$  估算值 $<330$  m/s;在河西走廊平原, $v_{S30}$  估算值 $>350$  m/s;在河西走廊戈壁分布区, $v_{S30}$  估算值 $>400$  m/s。

## 4 讨论

$v_{S30}$  估算结果的准确性直接影响估算模型的适

用性。为验证不同  $v_{S30}$  估算方法的准确性和模型的适用性,采用 134 个强震台站的  $v_{S30}$  数据进行统计分析<sup>[20]</sup>,考察上述三种  $v_{S30}$  估算方法的性能,分析其偏差、平均绝对偏差、均方根偏差、平均百分比绝对偏差和百分比均方根偏差等指标。

#### 4.1 可适性评估

对三种  $v_{S30}$  估算方法的评价指标进行计算,结

果如表 2 所列。可见 HGT 方法的误差最小,其统计分析的偏差、平均绝对偏差、均方根偏差、平均百分比绝对偏差和百分比均方根偏差分别为 26.94 m/s、63.63 m/s、80.46 m/s、19.89% 和 22.40%;仅考虑地形坡度的 TS 估算方法的误差最大,其次是 TF 方法。因此,统计检验指标的结果表明,HGT 方法在甘肃省场地  $v_{S30}$  估算中具有更强的适用性。

表 2 不同  $v_{S30}$  估算方法的评价指标表

Table 2 Evaluation indexes for different  $v_{S30}$  estimation methods

$v_{S30}$ 估算方法	偏差 / (m/s)	平均绝对偏差 / (m/s)	均方根偏差 / (m/s)	平均百分比绝对偏差 / %	百分比均方根偏差 / %
TS 方法	112.32	169.96	226.98	52.63	63.18
TF 方法	83.48	120.26	146.16	38.21	41.36
HGT 方法	26.94	63.63	80.46	19.89	22.40

#### 4.2 估算性能检验

在进行估算性能检验之前,先分析地壳浅表层软硬地质单元的物理属性对场地  $v_{S30}$  估算结果的地质响应特征的影响,并依据美国场地分类规范 NE-HRP<sup>[27]</sup> 对估算结果进行场地分类,结果如图 6 所示。由图可知,使用 TS 估算方法得到的结果显示:甘肃省有 32% 的区域被划分为 D 类场地,55% 的区域划分为 C 类场地,13% 的区域划分为 B 类场地。这一分类结果表明,甘肃省大部分区域被划分为松软场地类型,与实际的区域场地特性相比存在较大误差。使用 TF 估算方法得到的结果显示:甘肃省有 18% 的区域属于 D 类场地,而 82% 的区域属于 C 类场地,其中较为坚硬的 D 类场地的占比相对较少。使用 HGT 估算方法得到的结果显示:甘肃省有 26% 的区域属于 D 类场地,74% 的区域属于 C 类场地。这一估算结果可以与分类地质单元的物理属性、地理空间分布等特征相结合进行分析。因此,通过比较三种估算方法得出的场地分类占比,并综合分析三种方法估算值与真实场地特征可知,HGT 法在甘肃省场地参数  $v_{S30}$  值估算中具有较高的精度。

开展区域性场地  $v_{S30}$  的估算工作,构建地形起伏变化与地表沉积层厚度之间的对应关系具有重要意义,其中,地表沉积物的物理属性对  $v_{S30}$  估算方法的估算性能具有直接影响。为了评估不同地质属性和地形特征对  $v_{S30}$  估算性能的影响,在充分考虑地质属性和地形特征差异的基础上,利用甘肃省划分的 8 种地质单元(表 1)和 134 个强震台站的  $v_{S30}$  数据,采用分类统计检验方法(包括残差和偏差率),对

三种  $v_{S30}$  估算方法的性能进行检验,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,TS 方法的估算结果在可接受的残差范围内(-0.4~0.4)表现出了较大的离散性,除 GU2 地质单元外的其他地质单元出现  $v_{S30}$  值高估的现象[图 7(a)];混合地形多参数的 TF 方法在估算性能方面表现出了较好的结果。为此,在 TF 方法的基础上引入地质属性参数,构建混合多因子的 HGT 方法,并将其与 TF 方法进行对比检验。检验结果显示[图 7(b)、(c)],除了 GU8 地质单元之外,两种方法的可适性都很强。值得注意的是,HGT 方法不仅考虑了地质属性,还融合了地形特征,其估算残差更小。通过偏差率曲线的统计结果[图 7(d)]可以看出,HGT 方法比 TS 和 TF 方法具有更好的估算性能。由此可见,在区域地质属性和地形特征差异显著的区域中,HGT 方法具有更强的推广优势。

## 5 结论

本文针对甘肃省实测钻孔剪切波速和 DEM 数据,探讨了在地质属性和地形特征差异显著的地区,不同  $v_{S30}$  估算方法的估算性能,并得到如下结论:

(1) 以甘肃省为例,提出了一种混合地质属性和地形特征的场地  $v_{S30}$  估算方法。该方法引入了与地质属性直接相关的岩土体物理属性、地形坡度、表面纹理、局部凸度和最邻近河网高差指数等多项指标,较好地提升了场地  $v_{S30}$  估算的准确性。

(2) 本文提出的场地参数  $v_{S30}$  估算方法,在人类活动密集的甘肃省东部平原、盆地及低山丘陵等

地的估算精度较高,可为甘肃省震后震害快速评估与抗震设防等工作提供重要参考。然而,受到采集钻孔数量和钻孔位置的限制,位于甘肃省人口密度

较低的西部山区的  $v_{S30}$  估算值趋于保守。因此,在今后的研究中需要增加相应地区的钻孔数据来降低估算过程中产生的误差。

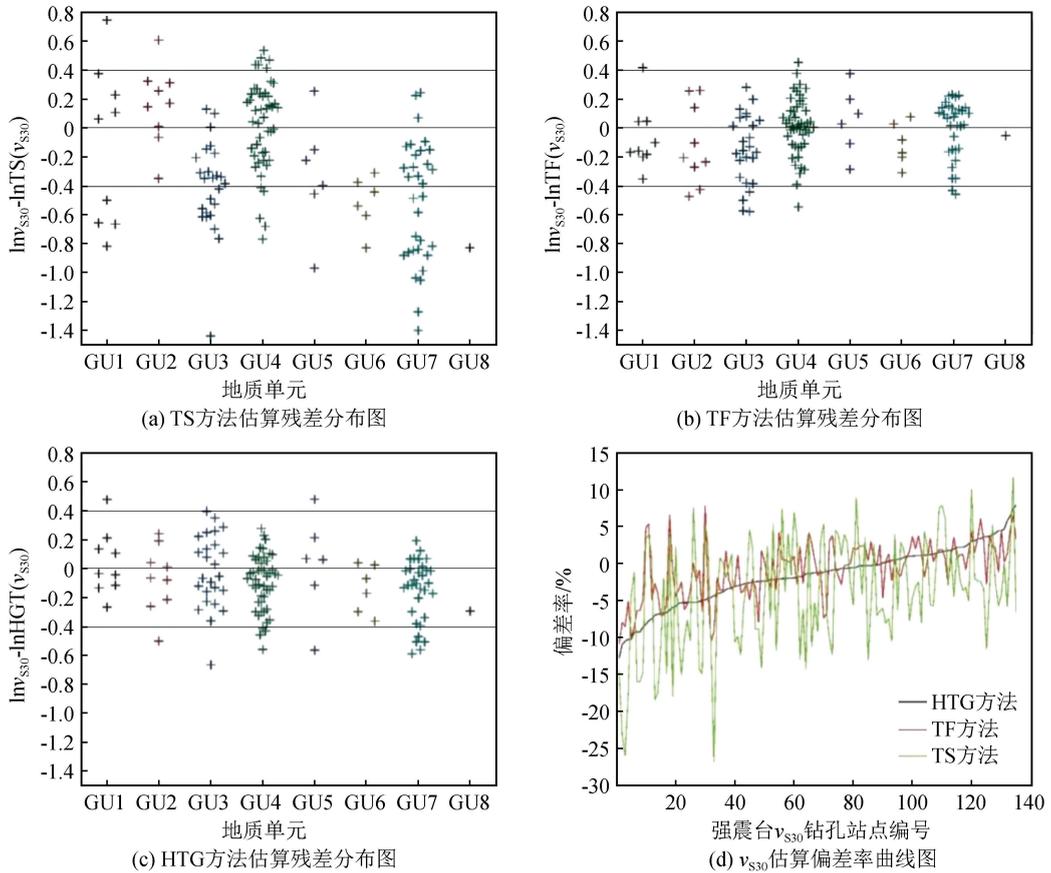


图7 三种  $v_{S30}$  估算方法估算性能检验图

Fig.7 Performance evaluation plots for the three  $v_{S30}$  estimation methods

(3) HGT方法在局部地区对场地  $v_{S30}$  的估算结果存在一定的不确定性,然而,在地质属性和地形特征差异显著的地区进行  $v_{S30}$  估算时,结果相对可靠。

## 参考文献(References)

- [1] 张雨婷,任叶飞,米欣雪,等.区域场地分类方法研究综述[J].世界地震工程,2023,39(2):189-199.  
ZHANG Yuting, REN Yefei, MI Xinxue, et al. Research progress of the regional site classification method [J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(2): 189-199.
- [2] WILLS C J, PETERSEN M, BRYANT W A, et al. A site-conditions map for California based on geology and shear-wave velocity [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6B): S187-S208.
- [3] 袁丽侠.场地土对地震波的放大效应[J].世界地震工程, 2003, 19(1): 113-120.  
YUAN Lixia. The amplifying effect of ground soil to earthquake wave [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1):

- 113-120.
- [4] 朱姣,陈国兴,许汉刚.地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响[J].岩土工程学报,2015,37(11):2079-2087.  
ZHU Jiao, CHEN Guoxing, XU Hangang. Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2079-2087.
- [5] 朱姣,陈国兴,许汉刚,等.苏州第四纪深厚地层剪切波速空间变化特征及其应用[J].岩土工程学报,2018,40(4):726-735.  
ZHU Jiao, CHEN Guoxing, XU Hangang, et al. Spatial variation characteristics of shear wave velocity structure and its application to Quaternary deep sediment layers in Suzhou region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 726-735.
- [6] BORCHERDT R D, GLASSMOYER G. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 603-641.
- [7] BOORE D M, JOYNER W B. Site amplifications for generic

- rock sites[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(2): 327-341.
- [8] 李渝生, 黄润秋. 5·12 汶川大地震损毁城镇的震害效应与重建选址问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1370-1376. LI Yusheng, HUANG Runqiu. Earthquake damage effects of towns and reconstruction site selection in Wenchuan earthquake on May 12, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1370-1376.
- [9] WALD D J, ALLEN T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1379-1395.
- [10] YONG A, HOUGH S E, IWAHASHI J, et al. A terrain-based site-conditions map of California with implications for the contiguous United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(1): 114-128.
- [11] THAMARUX P, MATSUOKA M, POOVARODOM N, et al.  $v_{S30}$  seismic microzoning based on a geomorphology map: experimental case study of Chiang Mai, Chiang Rai, and Lamphun, Thailand [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(7): 309.
- [12] 张雨婷, 任叶飞, 温瑞智, 等. 基于决策树考虑地形特征的场地参数估计方法[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 698-710. ZHANG Yuting, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. A method of site parameter estimation based on decision tree theory considering terrain features[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(2): 698-710.
- [13] WILLS C J, GUTIERREZ C I, PEREZ F G, et al. A next generation  $v_{S30}$  map for California based on geology and topography[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(6): 3083-3091.
- [14] 米欣雪, 张雨婷, 任叶飞, 等. 一种场地  $v_{S30}$  经验估算最佳模型的选用方法: 以新疆地区为例[J]. 西安建筑科技大学学报, 2023, 55(2): 288-292. MI Xinxue, ZHANG Yuting, REN Yefei, et al. A method for selecting the optimal model of  $v_{S30}$  empirical estimation: a case study of Xinjiang region[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2023, 55(2): 288-292.
- [15] THOMPSON E M, WALD D J, WORDEN C B. A  $v_{S30}$  map for California with geologic and topographic constraints[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2313-2321.
- [16] ZHANG Y T, REN Y F, WEN R Z, et al. Regional terrain-based  $v_{S30}$  prediction models for China[J]. Earth, Planets and Space, 2023, 75(1): 72.
- [17] REN Y F, ZHANG Y T, JI K, et al. Site classification scheme based on geological age and genesis for Xinjiang and the Capital Metropolitan areas of China [J]. Earthquake Spectra, 2024, 40(1): 174-199.
- [18] 杨雨. 甘肃省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. YANG Yu. Lithostratic of Gansu Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.
- [19] 甘肃省地方史志编纂委员会, 甘肃省志地震志编纂委员会. 甘肃省志·地震志(1991—2010)[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 2018. Gansu Provincial History Compilation Committee, Gansu Provincial Seismology Compilation Committee. Gansu provincial chronicle: seismic chronicle (1991—2010)[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 2018.
- [20] XIE J J, LI X J, WEN Z P, et al. Soil profile database and site classification for national strong-motion stations in Western China[J]. Seismological Research Letters, 2022, 93(3): 1930-1942.
- [21] IWAHASHI J, PIKE R J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature[J]. Geomorphology, 2007, 86(3-4): 409-440.
- [22] 周健. 场地剪切波速模型建模及其在中国场地分类和场地  $v_{S30}$  地图中的应用[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2021. ZHOU Jian. Modeling of site shear wave velocity model and its application in site classification and site  $v_{S30}$  map of China [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2021.
- [23] WILLS C J, CLAHAN K B. Developing a map of geologically defined site-condition categories for California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4A): 1483-1501.
- [24] FORTE G, CHIOCCARELLI E, DE FALCO M, et al. Seismic soil classification of Italy based on surface geology and shear-wave velocity measurements [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 122: 79-93.
- [25] IWAHASHI J, YAMAZAKI D, NAKANO T, et al. Classification of topography for ground vulnerability assessment of alluvial Plains and mountains of Japan using 30 m DEM[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2021, 8(1): 1-23.
- [26] IWAHASHI J, YAMAZAKI D. Global polygons for terrain classification divided into uniform slopes and basins[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2022, 9(1): 1-24.
- [27] Building Seismic Safety Council. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures; FEMA 450[S]. Washington D.C.: Building Seismic Safety Council, 2001.

(本文编辑: 赵乘程)