

刘雪梅. 基于 GIS 技术的三维同震位移场构建[J]. 华南地震, 2018, 38(2): 81–87. [LIU Xuemei. Three-Dimensional Coseismic Displacement Field Construction Based on GIS Technology[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 81–87]

基于 GIS 技术的三维同震位移场构建

刘雪梅

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 重特大地震引起的同震位移场对分析研究发震构造起着至关重要的作用, 其空间表现形式直接影响到应急辅助决策的准确性和效率。考虑到二维同震位移场模型在内容表达和视觉效果上均存在一定的局限性, 将利用汶川 M_s 8.0 级地震所获取的 GPS 同震位移数据, 基于 ArcGIS 平台的 ArcScene 和 ArcGlobe 模块, 先后进行数据插值处理和基本高度设置, 以构建三维同震位移场模型。为使得所构建模型达到更好效果, 将利用多种数据插值法进行分析对比。鉴于原始数据点密集度较低、覆盖范围集中且分布均匀, 选用反距离加权法进行插值。分析对比已有研究成果, 表明: 模型在位移整体趋势以及极值呈现等方面均与现有成果相符合; 三维同震位移场模型表达内容更加丰富、直观, 视觉效果更加清晰、显著, 更有助于发震机制研究以及震情、灾情的分析与决策。

关键词: 同震位移; 三维同震位移场; 反距离加权法

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)02-0081-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.012

Three-Dimensional Coseismic Displacement Field Construction Based on GIS Technology

LIU Xuemei

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: The coseismic displacement field caused by the great earthquake plays an important role in the analysis of seismic structure, and its spatial expression form directly affects the accuracy and efficiency of the emergency assistance decision-making. Considering that the two-dimensional coseismic displacement field model has some limitations in the content expression and visual effects, this paper uses the GPS coseismic displacement data of Wenchuan M_s 8.0 Earthquake to construct the three-dimensional coseismic displacement field model basing on the ArcScene and ArcGlobe modules of the ArcGIS platform. In interpolation processing, in view of the low density, concentrated coverage and evenly distributed of the original data points, inverse

收稿日期: 2017-08-25

作者简介: 刘雪梅(1985-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究 GIS 在地震研究中的应用。

E-mail: maggieLiu2017@163.com.

distance weighting method is used to get the best model. Results of the analysis show that the model is consistent with the existing research results in terms of the overall trend of displacement and the presentation of extreme values; the three-dimensional coseismic displacement field model with rich expression, intuitive expression, clear visual effects, could provide help for the earthquake mechanism research and disaster analysis, etc.

Keywords: Coseismic displacement field; Three - dimensional coseismic displacement field; Inverse distance weighting method

0 前言

地震,尤其是重特大地震引起的永久地表破裂(同震位移)对发震特征(如,影响范围、能量释放空间分布等)的研究具有重要意义。长期以来,地震学家多通过地质学以及传统大地测量学(如,三角测量、水准测量等)手段来确定地壳运动和变形特征,但是这些方法严重依赖人力、观测周期较长且难以实现大范围覆盖。随着 GPS 形变监测网的覆盖面不断扩大以及精度的不断提升,该技术已成为监测地壳运动和地球动力学现象的主要手段之一。然而,目前利用 GPS 获取地表形变资料产生的同震位移场仍然停留在二维表达阶段^[1-4],这种表达方式内容单一、视觉直观性不强,不利于人们对震情、灾情信息的综合研判分析以及发震特征的快速评估。

随着三维技术的出现和发展,诸如地质工程、国土资源、城市规划等众多领域都步入了三维时代。三维 GIS 技术在内容表达和生产效率方面有其独到的优势。本文利用 GPS 获取地表形变数据,基于 ArcGIS 平台的 ArcScene 和 ArcGlobe 模块制作三维同震位移场,从小范围精细视觉和区域全局视觉分别展现三维同震位移,为地震发震机理的研究提供了内容更加丰富的基础资料,为地震灾情获取和分析处理提供了新的研究手段。

1 研究思路

GPS 同震位移场能反映出区域地壳形变特征,对认知构造变形具有十分重要的科学意义。本文以汶川 M_s 8.0 级地震为例展开研究,文中 GPS 数据的获取方式包括连续站和流动站,经过处理后的数据内容包括经度、纬度、EW(东西向)位移(水平位移分量)、SN(南北向)位移(水平位移分量)、东西向残差、南北向残差、站名、UP 位移(垂直位移分量)、垂直向残差,其中位置数据、水平和垂直位移量为研究所需。

本文主要通过 ARCGIS 软件实现三维同震位

移场。ARCGIS 是美国环境系统研究所 ESRI 发布的 GIS 软件平台。ArcGIS 为单用户或多用户在桌面 (ArcGIS Desktop)、服务器 (ArcGIS Server)、Web (ArcGIS Online) 和野外 (ArcGIS Mobile) 实现 GIS 提供了可伸缩的框架。其中 ArcGIS Desktop 包含三种可实现制图和可视化的应用程序, ArcMap 是在 ArcGIS Desktop 中进行制图、编辑、分析和数据管理时所用的主要应用程序,可用于所有 2D 制图工作和可视化操作; ArcGlobe 可用于通过连续的全球视图实现地理数据的无缝 3D 可视化,通常此应用程序专门用于处理按照不同细节层次显示的特大型数据集; ArcScene 用于实现所关注场景或区域的 3D 可视化,它将创建一个可对感兴趣的封闭区域进行导航和交互的 3D 场景视图^[5]。本文利用 ArcScene 实现局部三维同震位移场特写展示,利用 ArcGlobe 实现地震灾区全局性三维可视化展示,并利用模型构建器将这一流程自动化,以实现三维同震位移场场景的快速获取。

本文首先进行数据预处理,获取内容和格式符合要求的数据文件,以使得 GPS 数据与 ARCGIS 软件对接;通过位置数据添加以及数据类型转换等步骤实现数据导入;再通过位移量插值分别获取水平和垂直方向等值位移场。为取得效果更好的位移场模型,本文对多种插值法进行了分析比对,最终采用了最符合数据要求的反距离加权法。鉴于目前大多数的同震位移研究多将水平位移和垂直位移分开表示,本文创新性的将垂直位移量作为水平位移等值场的基本高度,实现颜色等值分类表示水平位移量,垂直高差表示垂直位移量,从真正意义上实现了三维同震位移场,相较传统的表达方式内容更丰富,视觉更直观易读。此外在整个操作过程中,本文采用模型构建器的方式将流程记录下来,实现了操作流程化。本文流程图如图 1 所示。

2 关键技术

2.1 水平位移场构建中的插值法选取比较

本文通过插值法获取水平同震位移场,研究期间分析比对了多种插值法及相关参数(表 1)。

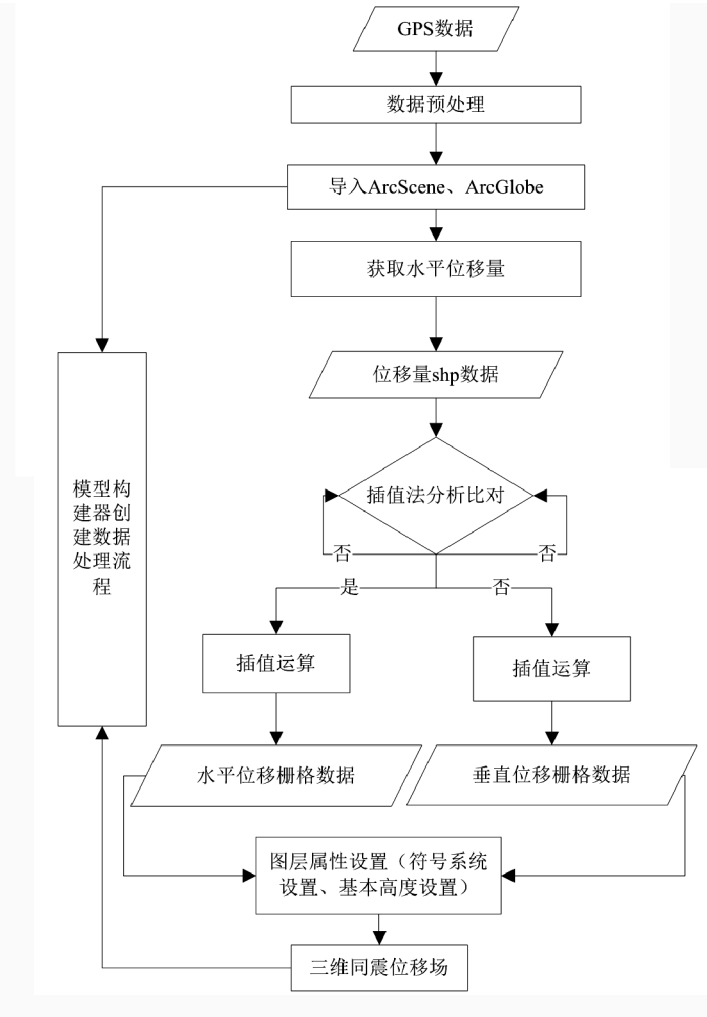


图 1 三维同震位移场构建流程图

Fig.1 Flow chart of Three- dimensional coseismic displacement field construction

表 1 插值法比对

Table 1 Comparison of interpolation method

插值法名称	方法优点	方法缺点
克里金法(Kring)	估计无偏性、变量空间结构性、能得到估计精度。	整体空间相关性差，光滑掉了部分有意义的异常带。
样条插值法(Spline)	易操作，计算量小。	难以对误差估计，采样点少时效果不好。
自然邻域插值法	保证极值在所使用样本范围之内，适用于面积大且密度高的点集。	具有局部性，难以推断趋势。
反距离加权法(IDW)	已知点分布均匀情况下插值效果好，插值结果在插值数据极值之间。	易受极值影响，易受幂值和搜索邻域策略影响，对拓扑和异常值敏感。
本文数据特点	密集度较低；覆盖范围集中；分布均匀。	
成果数据要求	反映同震位移整体趋势，需保留有意义的异常带(包括极值)，插值结果在极值之间。	

本文以汶川 M_s 8.0 级地震所获取的 GPS 数据为例^[9]，对比了四种插值法生成的同震水平位移场结果，如图 2 所示。

分析比对后，本文认为反距离加权插值法在数据选取、极值处理以及插值结果所呈现出的位移趋势等方面最符合本文研究要求，予以采用。

反距离加权法主要依赖于反距离的幂值。幂

值可基于距输出点的距离来控制已知点对内插值的影响，是一个正实数，通常选取 0.5 到 3 之间的值可获得最合理的结果。幂值越大，对最近点的影响越大，随着幂值的增大，内插值将逐渐接近最近采样点的值，邻近数据将受到更大影响，表面会变得更加详细，表面会变得更加详细，平滑度更低。

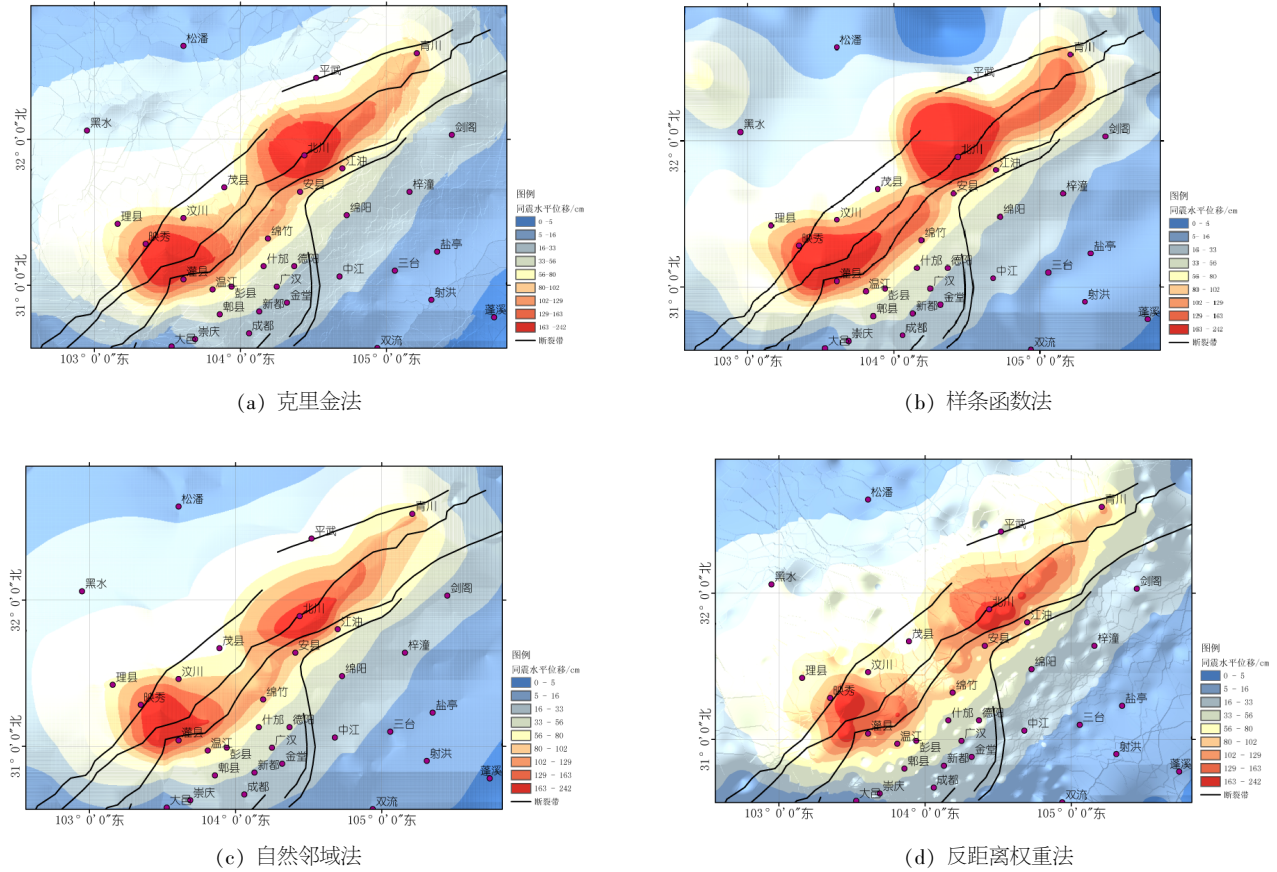


图2 四种插值法生成的同震水平位移场对比

Fig.2 Comparison of coseismic horizontal displacement field generated by four interpolation methods

指定较小的幂值将对距离较远的点产生更大的影响,从而导致平面更加平滑。因此,为了取得更加效果,将计算插值的权重,首先获取一个离散点子集,其中加权函数如下:

$$W_i = \frac{h_i^{-P}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-P}} \quad (1)$$

P 是一个任意正实数,本文中 $P=2$; h_i 是离散点到插值点的距离;

$$h_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (2)$$

(x, y) 为插值点坐标; (x_i, y_i) 为离散点坐标;

$$W_i = \frac{\left[\frac{R-h}{Rh} \right]^2}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{R-h}{Rh} \right]^2} \quad (3)$$

R 为插值点到最远离散点的距离; n 为离散点的总数; 离散点距离插值点越远,其对插值点的影响力越低,甚至完全没有影响力; 离散点越少可以加快运算速度。基于反距离加权法的插值原理,结合本文数据自身特点,此处设置幂值为2,

搜索半径点数为12。

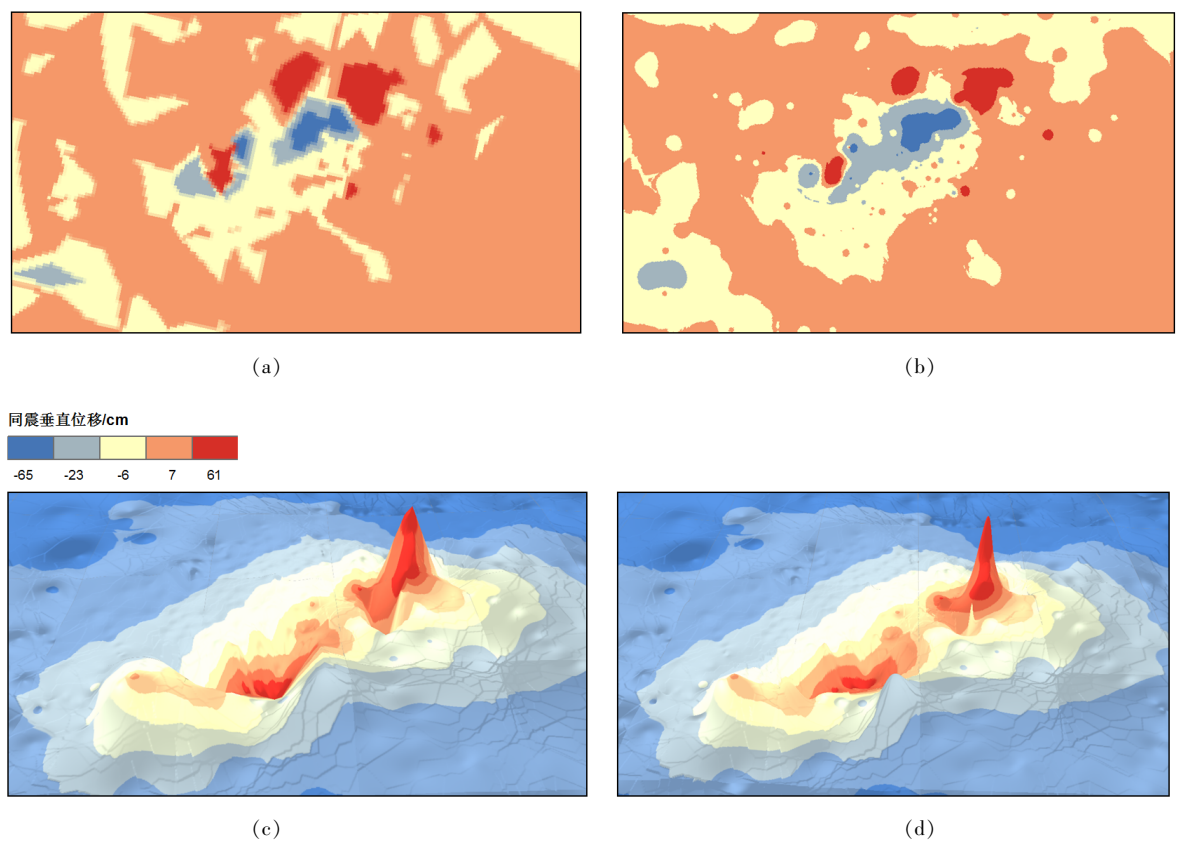
2.2 垂直位移场构建方法选取

本文在构建垂直位移场期间对比了不规则三角网(TIN)模型构建方法和反距离加权插值法。基于不规则三角网(TIN)构建的模型虽然能更好的表示局部特征,信息冗余量小,但其表面建模方式都是线性建模,局部以平面代替曲面,相对反距离加权插值法构建的模型表面不够光滑,如图3所示。

不规则三角网构建的模型表面棱角分明,在视觉效果和数据整体趋势分析方面都欠佳,因此本文采用反距离加权法进行插值处理。

2.3 模型构建器创建数据处理流程

为了提高数据处理效率,本文采用 ArcGIS 软件中的模型构建器模块,如图4所示,将数据处理流程化。模型构建器是用于构建工作流的可视化编程语言,是创建、编辑和管理模型的应用程序。其中所指模型是将一系列地理处理工具串联在一起的工作流。



(a)、(c)不规则三角网模型及所构建同震垂直位移场;(b)、(d)反距离加权插值模型及所构建同震垂直位移场

图3 不规则三角网(TIN)构建和反距离加权插值法获取的同震垂直位移对比

Fig.3 Comparison of coseismic vertical displacement obtained by Triangulated Irregular Network construction and Inverse Distance Weighted interpolation method

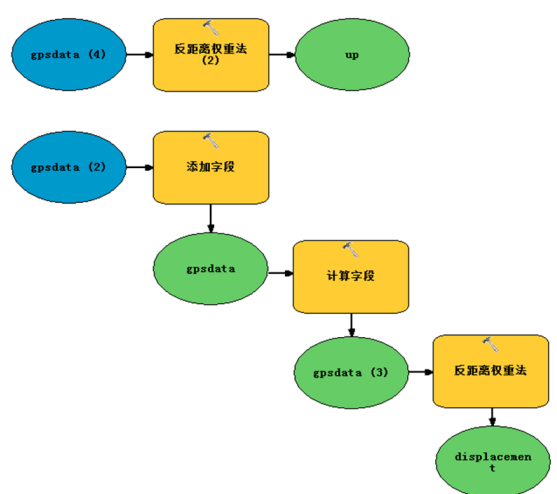


图4 模型构建器创建的数据处理流程图

Fig.4 Flow chart of data processing created by model builder

本文采用模型构建器的方式将一系列数据预处理和插值处理流程形成工作流，这种方式提高了数据处理效率，为快速获取地震灾情信息提供了新的技术手段。

3 成果展示与分析

本文利用 ArcGIS 平台的 ArcScene 和 ArcGlobe 模块制作三维同震位移场，以满足各类研究需求。

3.1 三维同震位移场景展示与分析

ArcScene 主要从小范围精细视觉对研究区三维数据进行展示，能够更加清晰的再现区域水平和垂直方向的位移变化。ArcGlobe 主要 from 大范围全局视觉进行展示，展现了研究区的相对位置以及整体位移趋势。本文以汶川 M_s 8.0 级地震数据为例制作三维同震位移场如图 5、图 6 所示。本图在处理垂直位移数据时采用了 0.01 倍的压缩，以获得更好的视觉效果。

据悉，汶川地震期间由于华南地块向北西方向运动，川青地块向东南方向运动，龙门山断裂带受到相邻地块的北西-南东方向的双向挤压作用，具有逆冲断裂带的性质。龙门山中段（映秀-北川）段和龙门山的北段（北川-青川）沿断裂带的

走滑量和垂直断裂带方向的缩短量不一致。中段以右旋走滑-挤压作用为特征,北段以挤压-走滑作用为特征^[9]。本文所呈现的三维同震位移场符合这一特征描述。如图 5、图 6 所示,映秀-北川段垂直位移量不明显,但水平位移量较大且呈明显的右旋走滑特征;北川-青川段垂直位移量较大,

最大幅度位于北川县城以东靠断裂带附近,再向东这一趋势迅速衰减,到内江一带几乎为零,但向北逐渐抬升,到青川处达到峰值。此外,从图中可以看出在主震区,如汶川、北川、青川有明显位移,尤其北川遭受破坏程度更加严重,这与实际情况相符^[9]。

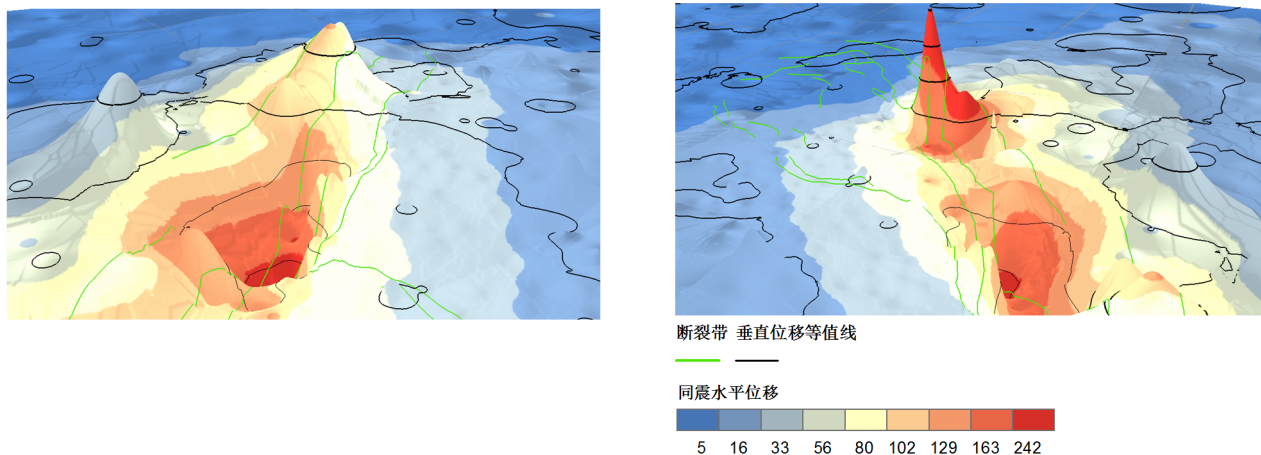


图 5 ArcScene 模块制作的汶川 M_s 8.0 地震三维同震位移场

Fig.5 Three - dimensional coseismic displacement field of Wenchuan M_s 8.0 earthquake produced by ArcScene module

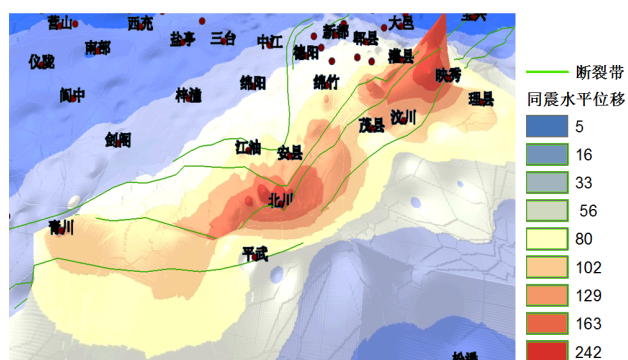


图 6 ArcGlobe 模块制作的汶川 M_s 8.0 地震三维同震位移场

Fig.6 Three-dimensional coseismic displacement field of Wenchuan M_s 8.0 earthquake produced by ArcGlobe module

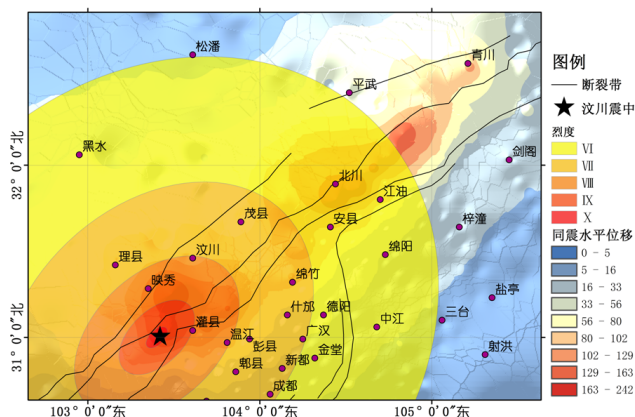


图 7 叠加基于经验模型计算的汶川 M_s 8.0 级地震烈度等值线图

Fig.7 Superimposed intensity contours of Wenchuan M_s 8.0 earthquake based on empirical model calculation

3.2 同震位移成果比较

为进一步证实所采用研究方法的合理性,本文将获取的汶川 M_s 8.0 级地震同震位移结果与基于经验模型计算的烈度等值线图以及 USGS 获取的烈度图分别进行了叠加对比,如图 7、8 所示

两次叠加对比结果可以看出,对比图之间的位移趋势大致相同,只在部分细部上存在区别,可见本文所采用的同震位移场获取方法合理。

4 结语

本文利用汶川 M_s 8.0 级地震获取的 GPS 同震位移数据,生成了三维同震位移场,研究期间对多种插值方法进行了分析对比,研究表明:

(1) 鉴于 GPS 点数据密集度较低、覆盖范围集中、数据点分布均匀,成果要求反映同震位移整体趋势,保留有意义的异常带(包括极值)且插

值结果在极值之间,本文同震水平位移场采用反距离加权插值法,其中幂值赋为2,搜索半径点数设为12。

(2) 鉴于构建不规则三角网(TIN)方法的表面建模方式都是线性建模,局部以平面代替曲面,构建效果整体表面不够光滑,成果在视觉效果和数据整体趋势分析方面都欠佳,本文同震垂直位移场采用反距离加权插值法。

本文将垂直位移量作为水平位移等值场的基本高度,实现颜色等值分类表示水平位移场,垂直高差表示垂直位移场,所获得的三维同震位移场与已有研究结果对比分析。

(3) 本文获取的三维同震位移场中龙门山断裂带中段水平位移较垂直位移量大,呈明显的右旋走滑特征;北段垂直位移量较大,最大幅度位于北川县城以东靠断裂带附近,再向东这一趋势迅速衰减,但向北逐渐抬升,到青川处达到峰值,主震区汶川、北川、青川有明显位移。这一结论与刘宇平等的研究结果相一致。

本文主要从三维可视化角度对同震位移场进行研究,但随着研究领域需求的不断提升,时间维度将会加入到未来的研究中,以便查看随着时间推移同震位移量的变化情况;此外本文的研究事例有限、成果图呈现效果有待优化。

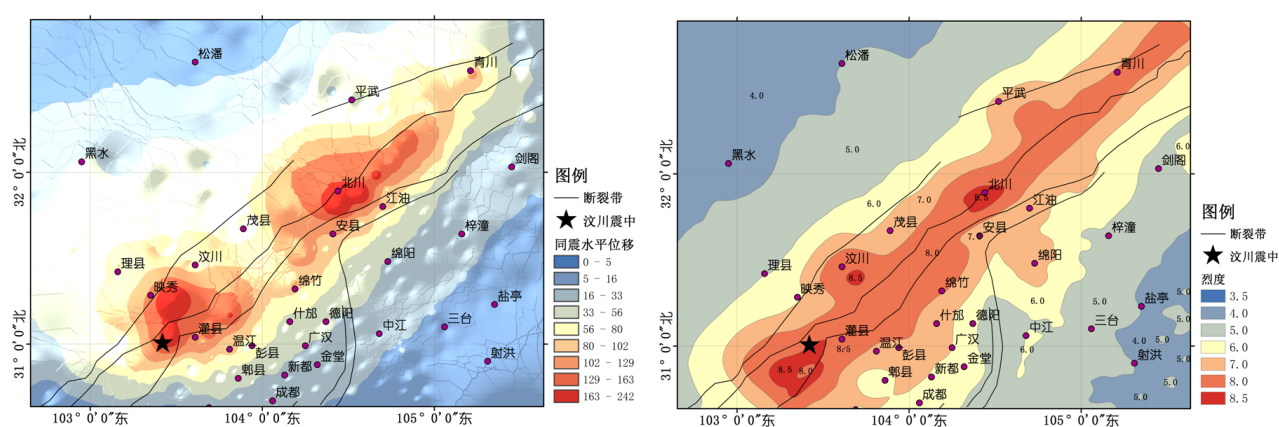


图8 与USGS获取的汶川 M_s 8.0地震烈度图对比结果

Fig.8 Compared with Wenchuan M_s 8.0 earthquake intensity map acquired from USGS

参考文献:

- [1] 刘宇平, 张青志. 四川汶川 M_s 8.0级地震的同震位移量[J]. 地质通报, 2008, 27(12): 2 086-2 088.
- [2] 徐克科, 牛元甫, 伍吉仓. 联合GPS、InSAR建立同震地表三维位移场[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(1): 5-18+23.
- [3] 李杰, 乔学军, 杨少敏. 2015. 西南天山地表三维位移场及断层位错模型[J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3 517-3 529.
- [4] 单新建, 张国宏, 汪驰升, 等. 基于InSAR和GPS观测数据的尼泊尔地震发震断层特征参数联合反演研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4 266-4 276.
- [6] 周斌, 刘涛, 文俊武. GIS技术在地震学研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 160-164.
- [7] Wang Qi, Qiao Xuejun, Lan Qigui. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(9): 634-640.
- [8] 王连捷, 王红才, 王薇, 等. 日本 M_w 9.0级地震同震位移场和应力场的有限元模拟[J]. 地球学报, 2013, 34(6): 665-670.