

基于地层岩性分布的地震时空网络建模方法

李茹 王岚* 朱海雄

西安测绘总站

DOI:10.12238/gmsm.v7i8.1946

[摘要] 本文提出了地震时空网络的定义,并分析了地震时空网络的一些拓扑特性。利用川渝地区的地震数据及地层岩性数据资料,本文计算出了地震时空网络相关统计特征量的分布关系,即度分布、平均路径长度、平均聚类系数。本文将证明网络的度分布和弧段权重分布形式呈幂律分布,说明本文所构建的地震时空网络是无标度的,且幂律分布的发现对于研究大地震的动态非常重要。

[关键词] 地震数据; 地层岩性分布; 时空网络建模

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

A seismic spatio-temporal network modeling method based on stratigraphic lithology distribution

Ru Li Lan Wang* Haixiong Zhu

Xi'an Division of Surveying and Mapping

[Abstract] In this paper, the definition of seismic spatio-temporal network is proposed and some topological properties of seismic spatio-temporal network are analyzed. Using the seismic data and stratigraphic lithology data information in Sichuan and Chongqing, this paper calculates the distribution relations of the relevant statistical characteristic quantities of the seismic spatio-temporal network, i.e., the degree distribution, the average path length, and the average clustering coefficient. In this paper, it will be demonstrated that the degree distribution of the network and the form of the arc weight distribution are in the form of a power law distribution, which indicates that the seismic spatio-temporal network constructed in this paper is scale-free and the discovery of the power law distribution is very important for the study of the dynamics of large earthquakes.

[Key words] seismic data; stratigraphic lithology distribution; spatio-temporal network modeling

引言

地震活动具有复杂的时空特征,所以从复杂系统动力学角度出发来研究地震,是一个新兴且充满活力的研究领域。早在20世纪末对于“复杂网络”的开创性工作就逐渐展开,它在揭示真实系统的复杂动态中起着至关重要的作用,网络中节点表示元素,连接节点的边表示节点的相互作用或相关性。运用复杂网络理论,地震点与连接地震点数据的边被整合到一个复杂的系统中,不仅可以对地震数据的时空分布关系建立模型,也暗示了从空间角度看岩体间的相互作用强度。

国外,基于复杂网络地震数据的研究源于日本的Abe团队。该团队在2004年对于1984~2001年间南加州以及日本的地震资料进行了分析,提出利用复杂网络方法来研究地震数据间的关系,在他们的研究中,一个地理区域被分成许多小的和规则的格网单元,无论任何震级大小的地震发生在该格网内(震中位于该格网内),都会将该格网视为网络中的一个节点。只要在相应的两

个格网中发生两次连续的地震,就会产生连接两个顶点的边。然后,可以根据地震序列构建不同格网下地震事件的关系^[1]。研究发现,不同时间尺度下的地震事件之间存在着复杂的相互影响关系,并且地震网络具有无标度特性,地震数据的连通性呈现出一种新的特征,进而该团队提出了一种基于时间序列的地震网络构造方法,具有重要的理论意义^[2]。张占英等人对地震频发的区域——美国加州进行研究,同样将研究区域划分为大小相等的单元,并将曾发生地震的格网单元视为网络的节点,以每一次地震发生后在时间和空间上的影响范围来构建基于时空影响域的地震网络,而影响范围的划分是由震级来确定的,由此来统计地震活动发生的规律,同时,为寻求最佳的空间尺度进一步研究了其拓扑结构及特征参数(平均聚类系数、平均最短路径长度、幂指数)的变化^[3]。

基于这些理论,本研究认为,为地震网络建模引入更多的地质信息具有重要意义,将地震网络视为一种利用岩体划分地理

区域而非规则格网的加权网络,这有助于揭示构造运动的动态和地震的时空规律。

1 研究区概况

在本文中,已获得的川渝地区的地质岩性数据包括地层、几何形状、岩体强度、岩体类型(如碳酸盐岩,岩浆岩,砂岩,泥岩等)地理数据。该地区内大部分强烈地震发生在四川西部和北部,例如叠溪地震(7.5ML,1933.8.25),康定地震(7.5ML,1955.4.14),炉霍地震(7.9ML,1973.2.6),松潘地震(7.2ML,1976.8.16),汶川地震(8.0ML,2008.5.12),芦山地震(7.0ML,2013.4.20)和九寨沟地震(7.0ML,2017.8.8)。地震学家认为,地震的成因和地震波的传播与岩体的强度有关。例如,地震波在坚硬岩体中的传播比在软弱岩体中的传播快。因此,研究不同强度岩体的空间分布和拓扑特性可能有助于揭示深部地震动力学。如图1所示,为研究区内不同强度岩体的地理专题图。研究区内共包含6130个强度不同的岩体,由1109个坚硬岩体,2272个相对坚硬岩体,259个软弱岩体,2045个相对较弱的岩体,241个松散岩体和204个水体组成。从图1中可以看到四川省西部和北部有许多硬质岩体和相对硬质岩体,其中有几个大断层,包括龙门山断层带,咸水河断层带,金沙江断层带和大梁山断层区。

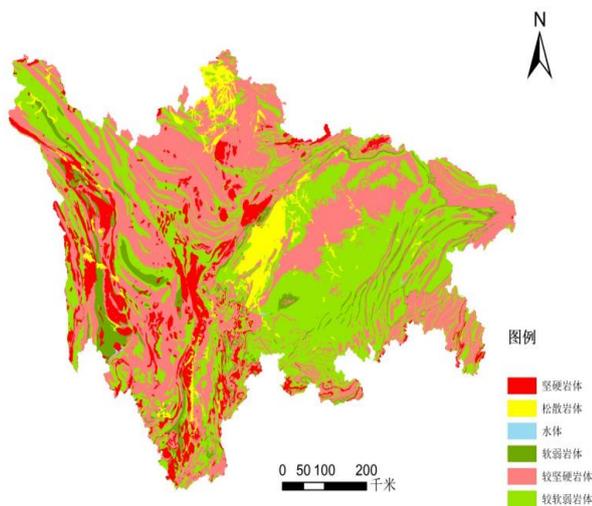


图1 川渝地区不同强度岩体分布专题图

2 地震时空网络建模方法

2.1 基本原理

基于规则格网的地震时空网络建模方法是通过规则格网的划分来研究地震的时空动态分布情况,为了更进一步的研究地震数据的复杂性和地震的形成,我们认为有必要考虑研究区域的地质结构,特别是岩体的分布情况^[4]。

从物理学的角度来看,地震是一种主要由地壳运动引发的物理现象。岩体之间的相互作用可以释放出巨大的能量从而引起地震。地壳运动可能导致岩体破裂,激发巨大能量并引发地震波。地震波可以通过不同类型或不同强度的岩体在大范围内进行传播。因此,地震学家和地质学家通过研究岩体的空间数据,来挖掘它们之间的相互作用或其他动力学特征。岩体之间的相

互作用是一个非常复杂的动力学现象,不能由单个岩石来确定。岩石圈中存在大量的岩石,这可以看作是复杂的动态系统。在这个真实的系统中,每个岩体都是系统的一个组成部分,并且可能会影响整个系统的稳定性和其他动力^[5]。因此,地震在很大程度上与岩体是有关联的。结合地质岩性数据和地震数据集,有助于研究地震的时空特征及其与岩体的关系。因此,这项研究具有明确的物理意义^[6]。

在此基础上,我们建立基于地质岩性数据的地震时空网络,其基本原理如下:研究区域按照不同的岩体类型进行划分,这些岩体无缝地相互毗邻,覆盖了整个研究区域;每个岩体,其中发生任何震级大小的地震事件,都代表网络中的一个节点;如果在这两个节点处发生两个连续地震事件,则在两个节点之间产生一条边;弧段的权重被定义为其两个节点之间的连续地震事件的总数;如果在同一岩体中发生两个连续事件,则应生成一个环(即该弧段的两个末端节点是相同的节点)。图2给出了地震网络建模的原理,其中节点对应于发生过地震事件的岩体类型,弧段连接两次连续的地震。

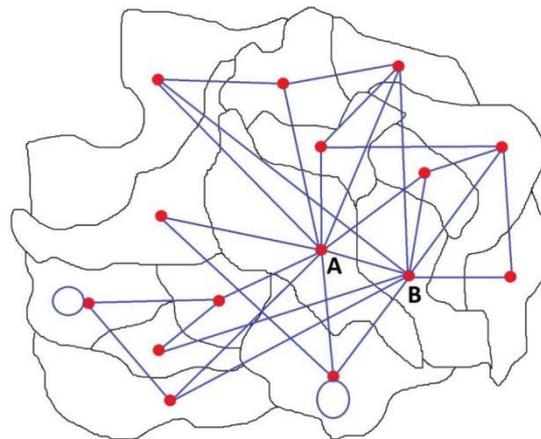


图2 基于地质岩性数据的地震时空网络建模原理

2.2 方法描述与技术路线

基于地质岩性数据的地震时空网络建模方法,将研究区域内的岩体抽象为网络中的节点,网络中的边由节点处发生两个连续地震事件来表示,它的拓扑结构是无向图,但其中涉及到弧段权重定义的问题,我们认为在该方法下,将弧段权重定义为发生连续地震事件的总数,通过分析网络中弧段权重的分布,则可以确定岩体间的相互作用关系,以此来判断岩体间的深层动力学与地震之间的关系。并且,地震时空网络的统计特征量:度与度分布、平均聚类系数、平均路径长度、幂律指数都可作为衡量网络拓扑结构的重要指标。该方法下的技术路线如图3所示:

2.3 实现过程

首先获取基于地质岩性数据的地震时空网络的基础地理数据库:数据来源于国家地震科学数据共享中心和地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,它们为本研究提供了川渝地区1990年1月1日~2008年12月31日($ML \geq 2.0$)的44091个地震记

录和川渝地区地层岩性数据。由国家地震科学数据共享中心获取到的地震记录包括日期、时间、经纬度、深度、震级、参考位置等,川渝地区地层岩性数据包含覆盖整个研究区内的岩石类型和岩石强度等数据。

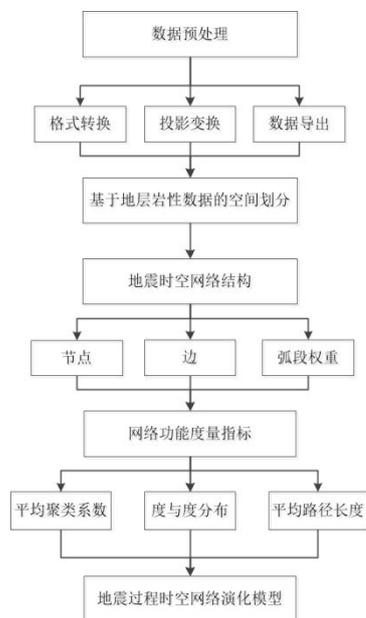


图3 地震时空网络建模技术路线图

然后,对本研究的基础地理数据进行预处理:

(1) 格式转换: 将包含所有地震记录数据的Excel数据导入ArcMap10.1中,就会形成44091个地震点,如表1所示,地震点数据的属性字段包含日期、时间、经纬度、深度、震级、参考地点,同时导入川渝地区地层岩性数据,如表2所示,该数据的属性字段包含面积、周长、岩石类型、岩石强度、地层组、特征等。

表1 地震点的属性数据结构

日期	时间	经度	纬度	深度	震级	参考地点
文本	文本	双精度	双精度	双精度	文本	文本

表2 地层岩性数据的属性数据结构

面积	周长	岩石类型	岩石强度	地层组	特征
双精度	双精度	文本	文本	文本	文本

(2) 投影变换: 设定统一的投影坐标系为Beijing_1954_GK_Zone_18N,投影类型为Gauss-Kruger,单位为米,地理坐标系为GCS_Beijing_1954;

(3) 数据导出: 将川渝地区整个研究区域按照岩石类型进行划分显示,并显示所有的地震点,即构建了包含地震点数据和岩石类型面数据的基础地理数据库。

其次在Visual Studio2010软件下,借助ArcGIS Engine10.2二次开发包,编程语言为c#进行系统建模。建模完成后,导出实验所得到的地震时空网络,在Gephi软件的帮助下,实现地震时空网络的可视化。该软件可以处理运行大量的节点,同时具备网络分析常用的统计特征指标:度数、聚类系数、平均路径长度等,无需编程知识就可实现网络的可视化。该地震时空网络中共包含1913个节点和15036条边,平均度数 $\langle K \rangle = 15.72$ 。由此,我们便完成了基于地层岩性数据的地震时空网络建模。

2.4 网络度分布统计

在复杂网络中,对度分布研究可简单抽象为网络拓扑结构里其节点的连接情况,因此度分布是一个可以准确反映网络结构的统计特征量。由本文所提出的基于地层岩性数据的地震时空网络建模方法中,度分布可以描述不同类型的岩体之间的相互作用情况^[7],因此也须对地震网络的度分布进行统计并分析。数据依旧选取1990~2008年川渝地区的地震数据作为研究样本,此地震网络的度分布情况如图4所示,统计结果表明,地震时空网络表现出无标度的特性,且度分布的幂律指数 $\lambda = 1.48$ 。因此,地震时空网络的度分布函数为: $P(k) \sim k^{-1.48}$ 。本文所构建的川渝地区地震时空网络是明确的。且人们普遍认为地震活动主要是由地壳运动造成的,与本文所提出的地震时空网络也是基于地层岩性数据构建相吻合。

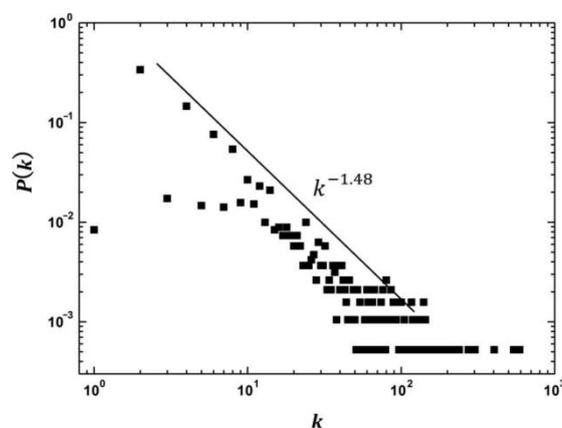


图4 地震时空网络的度分布图

3 结论

本文对详细描述了基于地层岩性数据的地震时空网络建模方法的基本原理,网络中边的连接规则按照地震事件发生的时间先后顺序进行连接,弧段权重定义为其两个节点之间的连续发生地震事件的总数。同时,详细描述了实现过程与技术路线,最终实现了基于地层岩性数据的地震时空网络的可视化。研究得到地震网络的度分布服从幂律分布,因此网络中节点与节点存在较强的自相关性,这表明区域内的岩体之间存在很强的相关性。而活动岩体之间的关系比其他岩体更紧密,如果活动岩体处发生地震,则会在很大程度上导致其他活动岩体发生震动。

[参考文献]

[1] Abe S, Suzuki N. Scale-free network of earthquakes[J]. Europhysics Letters, 2004a, 65(4): 581-586.

[2] Abe S, Suzuki N. Small-world structure of earthquake network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004b, 337(1-2): 357-362.

[3] 张占英, 肖文俊, 赖正文等. 度分布为正态分布的复杂网络度序列长度的研究与分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(01): 139-144.

[4] 张正帅, 陈时军, 周晨等. 利用复杂网络技术分析地震活动性特征[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2018, 15(2): 10-17.

[5] 赵娜, 王铮. 不同比例尺下DEM的地形特征空间自相关性差异——以川渝地区和长三角区为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(05): 50-54.

[6] 赵祯. 基于时空影响域的地震分布区域特征分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

[7] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏, 等. 复杂网络研究概述[J]. 物理, 2005, 34(1): 31-36.

作者简介:

李茹(1995-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事工作为测绘工程、摄影测量与遥感。