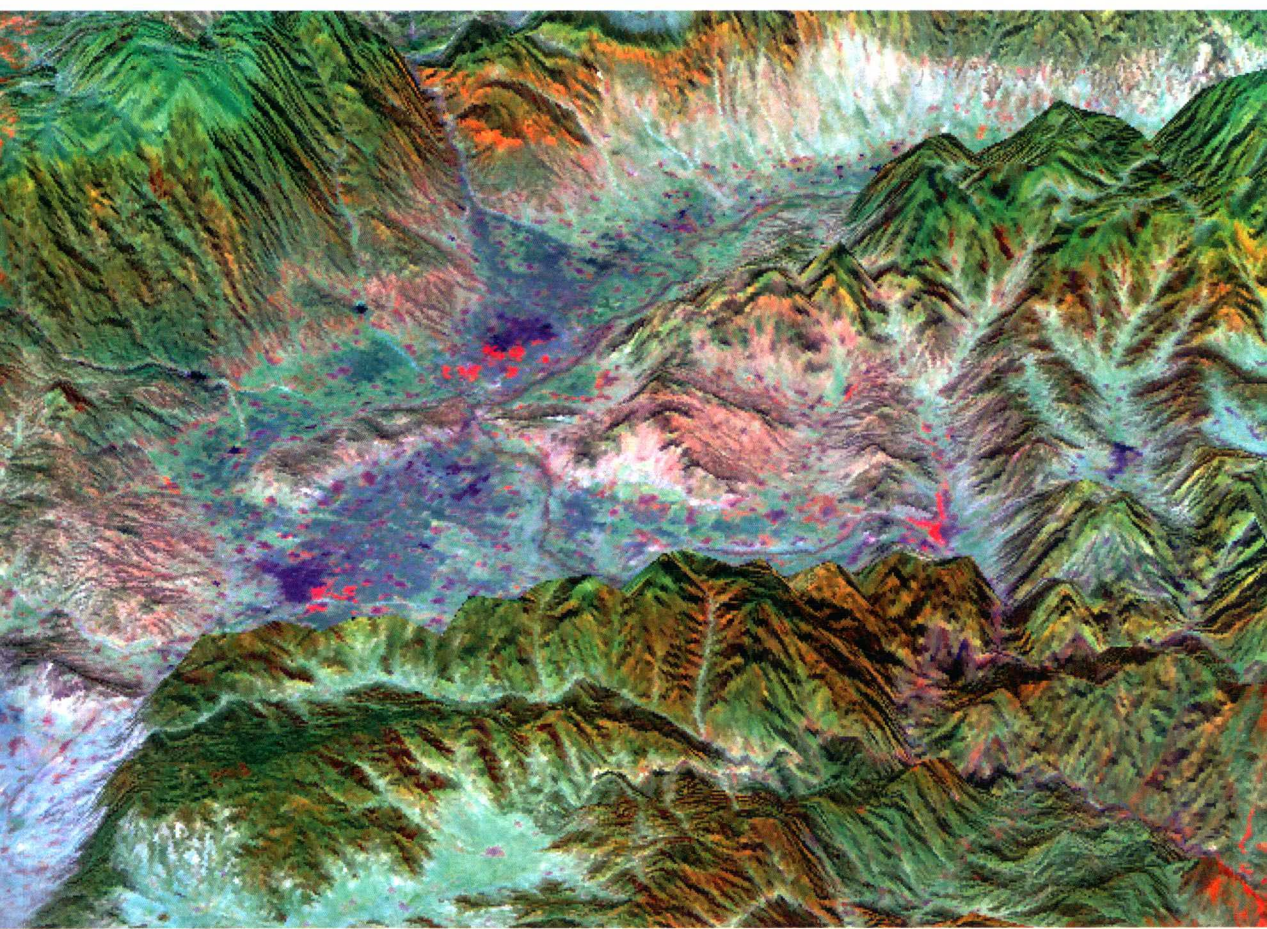


30

地壳构造与地壳应力文集

中国地震局地壳应力研究所 编



地震出版社

地壳构造与地壳应力文集(30)

中国地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

2018

图书在版编目(CIP)数据

地壳构造与地壳应力文集. 30 / 中国地震局地壳应力研究所编.

—北京: 地震出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-5028-4985-6

I. ①地… II. ①中… III. ①地壳构造—文集 ②地壳运动—文集

IV. ①P313.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 239531 号

地震版 XM4261

内 容 提 要

本书为中国地震局地壳应力研究所连续性学术论文集的第 30 集。全书包括地震灾害评估、地球物理学、地质年代学、遥感地质解译及其数据处理方法、地震监测、地应力测量技术等方面的内容。

本书可供地震地质、工程地质、地应力测量、遥感地质、地震预报、对地观测技术及应用等领域的人员和有关大专院校的师生阅读。

地壳构造与地壳应力文集(30)

中国地震局地壳应力研究所 编

责任编辑: 张宝红

责任校对: 凌 樱

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

专业部: 68467982 68721991

<http://seismologicalpress.com>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印有限公司

版(印)次: 2018 年 10 月第一版 2018 年 10 月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 277 千字

印张: 12

书号: ISBN 978-7-5028-4985-6/P (5690)

定价: 35.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

编 委 会

主 编：徐锡伟

副主编：陈 虹 杨树新

编 委：（按音序排列）

陈 虹	陈连旺	崔效锋	付子忠	郭啟良	黄锡定
黄忠贤	江娃利	雷建设	李海亮	李 宏	陆 鸣
陆远忠	吕悦军	马保起	欧阳祖熙	邱泽华	申旭辉
宋富喜	唐荣余	田家勇	王建军	王兰炜	王子影
吴荣辉	谢富仁	谢新生	杨树新	杨选辉	张宝红
张国宏	张鸿旭	张景发	张世民	周振安	朱守彪

目 录

新版中国地震综合等震线图的编制和特点	沙海军 吕悦军 谢卓娟 (1)
Marc/Mentat 中的 Contour Bands 图在 ArcGIS 中实现	姚 瑞 杨树新 黄禄渊 郝天平 陆远忠 许兆义 (6)
利用双平面波相速度反演方法研究华南地区岩石圈结构	陈佳维 周 彤 宁杰远 (19)
盆地沉积物源分析研究进展	李林林 (27)
就地生成宇宙成因核素测年方法概述	吕延武 梁欧博 (48)
四分量式钻孔应变仪的诞生和发展	——为纪念“全国第一届地应力专业工作会议”40 年而作 ... 苏恺之 (65)
洞体应变观测噪声评价的时序分析方法	成万里 (77)
利用聚类方法快速检测前兆观测数据中的异常数据	——以水管倾斜仪观测数据为例 ... 杨德贺 刘大鹏 (85)
昌平地震台水位 2018 年 1 月 26 日突跳型异常核实分析	刘福生 杨选辉 张国红 (98)
水压致裂法地应力测量在成昆铁路垭口隧道的应用	丁文富 张雨露 (107)
枯竭气藏型储气库中地质力学问题浅谈	贾 晋 王成虎 王 璞 (116)
多源遥感与重力数据下的滁河断裂空间展布及构造特征	王 鑫 张景发 李进田 (126)
关于重构三维形变场的方法综述	纪润池 张景发 申旭辉 李永生 (136)
地震灾害应急遥感合作与共享现状	夏婷婷 张景发 (150)
基于 SAR 图像的震害建筑物信息提取方法综述	詹 森 张景发 李 强 (159)
InSAR 技术与失相干研究综述	李进田 张景发 申旭辉 李永生 (173)

Content

The Compilation and Characteristics of the New Comprehensive Isoseismal Map in China	Sha Haijun Lyu Yuejun Xie Zhuojuan (5)
Plotting the Contour Bands of Marc/Mentat in ArcGIS	Yao Rui Yang Shuxin Huang Luyuan Hao Tianping Lu Yuanzhong Xu Zhaoyi (18)
Phase Velocity Structure of South China Block Imaged by Double-plane Wave Fitting Method	Chen Jiawei Zhou Tong Ning Jieyuan (26)
The Development in Sedimentary Provenance Studies	Li Linlin (47)
A Review of the In-situ Cosmogenic Nuclides Dating Method	Lyu Yanwu Liang Oubo (64)
The Advent and Development of Four-Component Borehole Strainmeter—In Commemoration of the 40 th Anniversary of the First Ground Stress Workshop in China	Su Kaizhi (76)
Time Series Analysis Method for Assessment of Cave Strain Observation Noise	Cheng Wanli (84)
Detect Anomalous Events in Precursor Observation Data Using Clustering—Taking Water Pipe Inclinator Observation Data for Example	Yang Dehe Liu Dapeng (97)
Verification and Analysis of Water Level Jumping Anomalies on January 26, 2018, at The Changping Seismological Station	Liu Fusheng Yang Xuanhui Zhang Guohong (106)
The Application of Hydraulic Fracturing Stress Measurements in the Yakou Tunnel of Chengdu-Kunming Railway	Ding Wenfu Zhang YuLu (115)
Brief Discussion on Problems of Geomechanics in Depleted Gas Reservoirs	Jia Jin Wang Chenghu Wang Pu (125)
Spatial Distribution and Structural Characteristics of Chuhe Fault Derived from Multi-Source Remote Sensing and Gravity Data	Wang Xin Zhang Jingfa Li Jintian (135)
A Review of Methods for Reconstruction of Three-Dimensional Deformation Field	Ji Runchi Zhang Jingfa Shen Xuhui Li Yongsheng (149)
Remote Sensing Cooperation and Sharing of Earthquake Disaster Emergency Response	Xia Tingting Zhang Jingfa (158)
Review of Building Information Extraction Methods for Earthquake Damage Based on SAR Images	Zhan Sen Zhang Jingfa Li Qiang (172)
A Review of InSAR Technology and Decoherence Research	Li Jintian Zhang Jingfa Shen Xuhui Li Yongsheng (185)

新版中国地震综合等震线图的编制和特点

沙海军 吕悦军 谢卓娟

(中国地震局地壳应力研究所 北京 10085)

摘要 中国地震综合等震线图是编制中国地震动参数区划图的一张基础图件。本文以 1991 年版中国地震综合等震线图为基础, 补充 1980 年以后破坏性地震等震线资料, 使用地理信息系统软件 ArcView 编制了新版中国地震综合等震线图。并将新版图件与 1991 年版进行对比, 分析了新版中国地震综合等震线图的主要特点。新版中国地震综合等震线图可为认识我国历史强震的烈度分布特征和地震构造条件提供帮助, 它对于地震区划、国土利用规划以及防震减灾决策等也有重要的参考价值。

关键词 综合等震线; 地震区划; 地震烈度

一、引言

根据历史地震的灾害记载和地震现场调查资料, 中国的地震工作者编制了超过 2000 个地震的等震线图。依据历次发生的破坏性地震等震线图, 可以综合评价一个地区历史上受到的最大地震烈度。这种以等值区方式, 表示一定区域内各地点受到历史地震最大影响烈度的图件, 即为综合等震线图 (国家地震局中国地震区划图编委会, 1991)。

中国地震综合等震线图是编制中国地震动参数区划图的一张基础图件 (国家地震局中国地震区划图编委会, 1991)。该图显示了全国范围内最大地震影响烈度的分布情况, 反映了全国范围内各个地点受到的最大地震影响。它对于认识历史强震的震害分布和地震构造条件, 以及地震危险性评估都有重要的参考价值。

综合等震线图的编制工作涉及处理数量众多的等震线, 费时费力。为减轻编图的工作量、提高工作效率, 可以使用地理信息系统管理等震线资料, 绘制综合等震线图 (屈春燕等, 1999)。沙海军等 (2008) 利用地理信息系统 ArcView 提供的数据管理和制图功能, 提出和发展了新的综合等震线编制方法, 并应用于编制新版中国地震综合等震线图, 即 2016 年 5 月由地震出版社出版的中国地震综合等震线图 (GB18306-2015 中国地震动参数区划图编制基础图件)。

最早的中国地震综合等震线图, 称为“中国强烈地震等震线综合图”, 是在 1957 年

作者简介: 沙海军, 男, 副研究员, 主要从事地震活动性模型、地震危险性评估等研究。Email: shjshare@163.com。

编制地震区划图时编绘的。1977 年,国家地震局全国地震烈度区划编图组在编制地震烈度区划图时,也编制了类似的图件,称为“中国历史地震烈度分布图”。第三版的中国地震综合等震线图于 1991 年正式出版,其资料截止于 20 世纪 80 年代。考虑到资料的一致性和继承性,本文以 1991 年版中国地震综合等震线图为基础,补充新近发生的地震等震线资料,使用地理信息系统编制了新版中国地震综合等震线图,并分析该图的空间分布特征及相对于 1991 年版图的主要变动情况。

二、新版中国地震综合等震线图的编制过程

1. 编图的技术流程

在编图工作中,首先对 1991 年版中国地震综合等震线图进行数字化;然后利用 1980~2010 年期间破坏性地震等震线,编制 1980 年后中国地震综合等震线图;最后将 1991 年版和 1980 年后中国地震综合等震线图合并,形成新版中国地震综合等震线图。

2. 1991 年版中国地震综合等震线图的数字化

根据 1991 年版中国地震综合等震线图的说明,该图的投影方式为等积圆锥投影,中央经线为东经 110°,双标准纬线分别为北纬 25°和 47°。

数字化工作的第一步是对 1991 年版中国地震综合等震线图进行扫描和配准。由于 1991 年版中国地震综合等震线图由两张纸质图组成,首先需要用扫描仪将两张纸质图录入计算机,存储为图片文件。然后将图片文件载入 ArcView 软件中,并通过设置投影方式和在图片中选择易于辨识的控制点,分别对 2 个图片进行地理坐标系的配准。

在 ArcView 软件中采用与等震线数据库一致的属性表,对配准后的全国综合等震线图进行数字化,在同一图层中,分别建立Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度、Ⅹ度、Ⅺ度和Ⅻ度等烈度区。

3. 1980~2010 年地震等震线数据库的建立

1990 年以前的等震线资料主要来源于《中国近代地震目录(公元 1912 年-1990 年)》等。1991 年以后的资料主要来自每年一期的《中国地震年鉴》和一些地震现场考察报告。破坏性地震等震线资料的截止时间是 2010 年 12 月,2006 年后仅收录部分 6 级以上地震的等震线资料。

在 ArcView 软件中,建立等震线数据库的主要步骤包括:①等震线图的收集整理;②将一个等震线图分解为一个线图层(等震线条图层)和一个面图层(等烈度区图层),为每个图层构建合理的属性表;③数字化等震线,并在数据表中输入各种属性值。具体建库方法参见沙海军等(2008)的论文。

在等震线数据库中共录入 1980~2010 年间 231 个破坏性地震的等震线数据,其中,包括 4.0~4.9 级地震 33 次、5.0~5.9 级地震 135 次、6 级以上地震 63 次。这些等震线数据是编制 1980 年后中国地震综合等震线的基础资料。

4. 新版中国地震综合等震线图的编绘

利用地理信息系统 ArcView 提供的数据库管理和制图功能,沙海军等(2008)提出新的

综合等震线图编制方法，并采用该方法编绘了新版中国地震综合等震线图。

首先使用 1980~2010 年等震线数据库的等震线资料，编制了 1980 年后中国地震综合等震线图。由于 1980 年以后未发生烈度为Ⅻ度的地震，因此 1980 年后中国地震综合等震线图层由Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度、Ⅹ度和Ⅺ度 6 个等烈度区组成。

然后合并 1991 年版和 1980 年后中国地震综合等震线图。具体操作是：在 ArcView 中载入 1991 年版和 1980 年后全国综合等震线图层，使用 Merge 命令合并相同烈度的等烈度区，即可生成新版中国地震综合等震线，图层中包含Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度、Ⅹ度、Ⅺ度和Ⅻ度 7 个等烈度区，以不同颜色表示。

等烈度区边界资料的可靠程度不同，在图中分为三类：资料可靠、资料不很可靠和根据经验公式推测。故另外新建 1 个图层，以不同线型表示三类可靠程度不同的等震线。

三、新版中国地震综合等震线图的空间分布特征

图 1 为新版中国地震综合等震线图，显示了我国历史地震最大影响烈度的空间分布，其分布特征归纳如下。

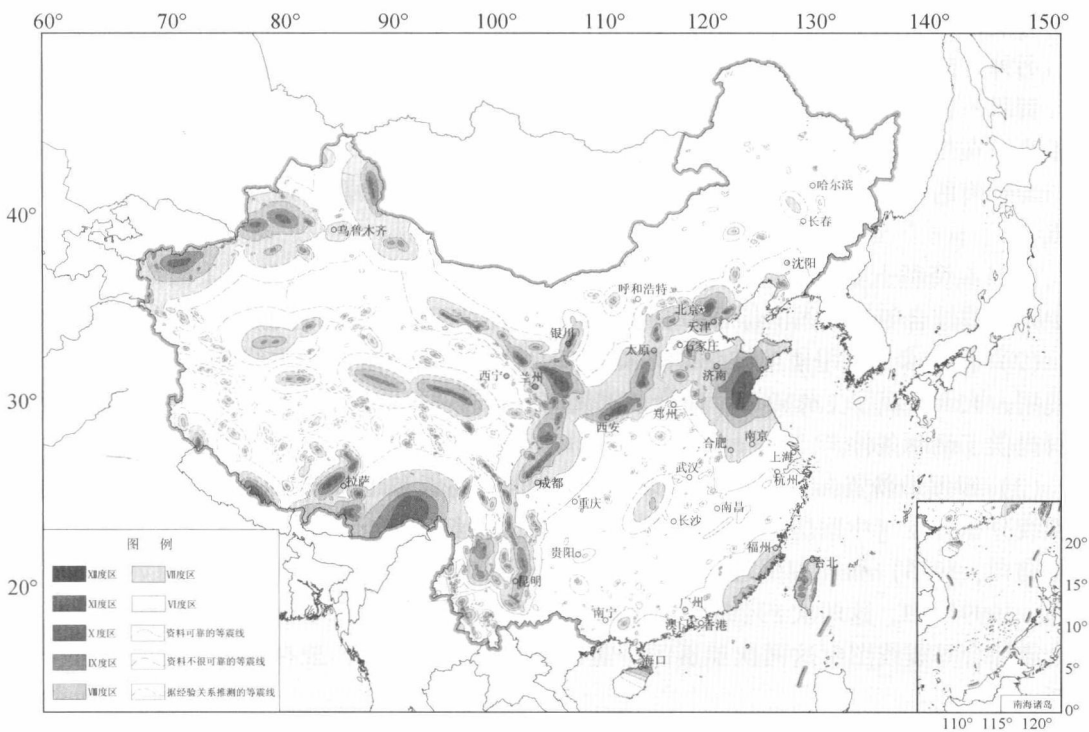


图 1 新版中国地震综合等震线图

中国历史地震的最大影响烈度在空间分布上是不均匀的，高烈度区的分布与活动地块

边界及内部活动断裂带的分布基本一致。

从Ⅶ度以上高烈度区分布情况看:中国东部的高烈度区主要分布在华北地区(包括辽宁、河北、山东、山西、陕西和宁夏)和东南沿海地区(包括台湾、福建和海南)。在中国西部地区,高烈度区主要分布在西南地区(包括西藏、云南和四川)、河西走廊-祁连山区(青海和甘肃)和新疆地区。

Ⅵ度以下低烈度区主要分布在我国华中和华南地区。另外,鄂尔多斯地区、塔里木盆地和内蒙古高原也分布有大面积的低烈度区。

与中国地震动峰值加速度区划图(中国地震局,2001)相对比,新版中国地震综合等震线图Ⅶ度以上高烈度区与峰值加速度 0.05g 以上分区,低烈度区与峰值加速度 0.05g 及 0.05g 以下分区的分布格局基本一致,反映二者含有相同的地震和构造活动信息。

四、讨论与结论

新版中国地震综合等震线图反映了中国范围内历史地震引起的最大影响烈度的分布,但由于各地区的历史地震资料的完整性起始时间不同,所以,在比较不同地区受到的最大影响烈度时,需要考虑这些地区的地震资料完整性是否一致。同时,应该说明的是,地震综合等震线图实际上是历史上遭受过的最大地震烈度分布图,并未考虑史前地震的影响。

另外,新版中国地震综合等震线图中等烈度区界线的可靠程度是不同的,分为资料可靠、资料不很可靠和根据经验公式推测 3 类,特别是根据经验公式推测的边界线,其可靠性不高,在使用时需要注意这个问题。

与以前的中国地震综合等震线图相比,新版中国地震综合等震线图主要有以下 3 个特点:

(1) 在资料上更为丰富和完整。新版中国地震综合等震线图在资料上沿用了 1991 年版中国地震综合等震线图的综合等震线数据,并补充了新近发生的地震等震线资料。

(2) 在技术上采用地理信息系统来管理等震线数据和编制等震线图。地理信息系统的使用,大大提高了工作效率,减少了错误率。同时,等震线数据库的建立也为以后更新资料提供了便利条件。

(3) 根据最新资料,更新了 1668 年山东郯城 8½ 级和 1950 年西藏察隅 8½ 级地震的等震线分布。在《中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)》(国家地震局震害防御司,1995)和《中国近代地震目录(公元 1912—1990 年)》(中国地震局震害防御司,1999)中,这两次 8½ 级地震的等震线图是最新正式出版的资料。而 1991 年版中国地震综合等震线图中这两次地震的等震线与最新资料不符,故在新版中对它们进行了更新。

新版中国地震综合等震线图以最新的资料,展示了我国历史地震最大影响烈度的分布情况。其高烈度区沿活动地块边界及内部活动断裂带分布的基本格局,显示了与地质构造的紧密联系。该图所展现的历史烈度影响情况和地质构造信息,对于地震动参数区划、国土利用规划和防震减灾决策等都具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 国家地震局中国地震区划图编委会. 1991. 中国地震综合等震线图 (含说明书). 北京: 地震出版社.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录 (公元前 23 世纪—公元 1911 年). 北京: 地震出版社.
- 屈春燕, 叶洪. 1999. 利用 GIS 绘制综合等震线. 地震地质, 21 (2): 156~158.
- 沙海军, 吕悦军, 赵建涛. 2008. 利用 ArcView 绘制综合等震线图的简便方法. 震灾防御技术, 3 (1): 95~99.
- 中国地震局. 2001. 中国地震动峰值加速度区划图 (GB18306-2001 图 A1). 北京: 中国标准出版社.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录 (公元 1912 年—1990 年). 北京: 中国科学技术出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2015. 《中国地震动参数区划图》. 北京: 中国标准出版社.

The Compilation and Characteristics of the New Comprehensive Iseismal Map in China

Sha Haijun Lyu Yuejun Xie Zhuojuan

(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing, 100085, China)

Abstract: The comprehensive isoseismal map in China is a basic map for compiling the map of China's ground motion parameters zonation. Based on the comprehensive isoseismal map in China published in 1991, supplementing the isoseismal data of destructive earthquakes since 1980, a new comprehensive isoseismal map in China is compiled with GIS software of ArcView. Comparing the new version with the 1991 version, the main characteristics of the new version are analyzed. The new version of China's comprehensive isoseismic map can help to understand the intensity distribution characteristics and the conditions of seismic tectonics of China's historical strong earthquakes. It also has important reference value for seismic zonation, land use planning, and decision-making on earthquake prevention and disaster reduction.

Keywords: comprehensive isoseismal; seismic zonation; earthquake intensity

Marc/Mentat 中的 Contour Bands 图 在 ArcGIS 中实现

姚 瑞¹ 杨树新¹ 黄禄渊¹ 郝天平² 陆远忠¹ 许兆义³

(1. 中国地震局地壳应力研究所 地壳动力学重点实验室 北京 100085)

(2. 北京锐宇博图科技有限公司 北京 100192)

(3. 北京交通大学 北京 100044)

摘 要 将数值模拟结果生成矢量图可以方便其与其他学科成果进行比较、融合和分析。以应用通用有限元软件 MSC. Marc/Mentat 反演的中国陆域现今应力场为例, 将结果文件中的应力六分量转成主应力数据。应用普通克里金法 (Ordinary Kriging), 选取最优变异函数模型, 借助 ESRI. ArcGIS 的地统计分析 (Geostatistical Analyst) 模块绘制 Contour Bands 图。结果表明该方法与反距离权重插值法、自然邻域插值法相比具有一定的优越性, 并且绘制出的 Contour Bands 图与 Mentat 自动插值生成的图基本一致。该方法可为区域化变量在各领域的应用和对比提供参考。

关键词 地统计学; Contour Bands; 克里金; ArcGIS; Marc/Mentat; 地统计分析; 地应力

一、引 言

MSC 公司的 Marc/Mentat 是国际上通用的功能齐全的高级非线性有限元分析软件 (陈火红等, 2007), 可以实现求解域合理离散以及对各项求解结果的自动插值及三维图形显示 (刘峡, 2007), 在地震学、地球物理学、地质学、岩土工程等领域应用较广 (靳德武, 2004; 白可, 2011; 程红, 2014; 邸龙, 2006; 冯瑞玲等, 2002; 高素荷, 2011; 李远光等, 2011; 李志勇等, 2007; 刘洁平等, 2008; 石磊, 2005; 时晨, 2012; 王振宇, 2012; 吴多太, 2009; 杨强等, 2004; 张令心和石磊, 2006; 赵会德和钱向东, 2004; 周敏, 2004)。但由于它后处理功能中只能将 Contour Bands (假设图形显示的等值线之间的值在面范围内的所有位置都是相同的, 俗称云图) 等模拟结果以栅格而非矢量数据的形

作者简介: 姚瑞, 女, 1985 年生, 助理研究员, 主要从事地应力测量数据应用、构造应力场数值模拟方面的研究。Email: yaorui_4123@163.com。

基金项目: 中央级科研院所基本科研任务专项 (ZDJ2017-11)、国土资源部公益性行业科研专项 (201311181) 和中国地震局地震监测台网运行经常性项目。

式保存,使得这些模拟结果无法配合或叠加其他图层(如:地质构造图、地震动预测图、活动断裂图、中国震例图、人口热力图、工程地质图、应力图、岩性分布图等)进行地震分析预报、地震灾害预测和辅助决策、地震区划、岩土工程勘察、岩体应力分析等,同时也满足不了用户对空间信息的查询、检索、计算和统计需求。

ESRI ArcGIS 是一套完整的 GIS 平台产品,具有强大的地图制作、空间数据管理、空间分析、空间信息整合、发布与共享的能力。它提供的 Geostatistical Analyst (地统计分析)模块可以基于地统计方法对离散点数据插值,生成矢量数据。

地统计插值法建立在对观测点的空间自相关分析基础之上,依据自然现象的空间变异规律进行插值,从而可以得到无偏最优估计量。传统的空间确定性插值法,如几何方法中的泰森多边形法和反距离加权法、统计方法中的趋势面和多元回归法、函数方法中的样条函数、双线性插值和立方卷积法等,往往直接通过周围观测点的值内插或者通过数据公式来内插,较少从变量自身特点出发,考虑观测点的整体空间分布情况,且难以对插值误差做出理论估计。而克里金法(Kriging)能克服这一缺点。它是基于采样数据反应的区域化变量的结构信息(由变异函数或协方差函数提供),根据待估点或块段有限邻域内的采样点数据,考虑样本点的空间相互位置关系和与待估点的空间位置关系,对待估点进行的一种无偏最优估计,并且能给出估计精度。大量研究表明,克里金法相比于传统空间确定性插值法具有较高的可靠性(刘爱利等,2012)。

本文以 MSC. Marc 计算的结果为例,将结果文件中应力六分量数据导出,介绍了两种由六分量获取主应力的方法,然后应用克里金法,对比并选取最优变异函数模型,在 ArcGIS 软件中实现云图的可视化显示,并生成矢量文件(如 .shp 格式),从而实现辅助其他学科的观测资料分析。

二、获取 MSC. Marc 计算结果的主应力信息

本文以杨树新(2013)反演的中国陆域现今应力场为例,制作“最大主压应力 σ_1 量值矢量云图”。该论文建立了包括现今主要活动断层以及岩石圈实际分层结构(地面、莫霍面、岩石圈)的有限单元球壳模型,使数值模型与地质模型更加吻合。在此基础上以重力和板块构造作用为主要影响因素,以地壳浅表的实测原地应力研究成果为目标约束,反演分析了中国陆域现今地应力场。该数值模型在垂向分为 5 层单元(6 层节点),第二层单元埋深为 2km 左右,是该文中最感兴趣区域,将其也设定为本文的目标层。MSC. Marc 计算结果(如 .t19 文件)只提供了应力张量的 6 个分量数据,首先要求解出主应力数据作为本文的实例数据。本节介绍两种获取主应力数据的方法。

1. path_plot 方法

path_plot 方法是 Msc. Mentat 后处理模块中提供的一种通过指定路径显示或导出计算结果的方法。首先导出只包含每二层节点的“.dat”文件,含节点号 Node_ID 和坐标信息(有限元坐标系 o-xyz)。然后编辑一个加载位置点的过程文件(.proc),加载顺序要与“.dat”文件中的顺序一样,格式如下:

```
* set_ pathplot_ path
x1 y1 z1
x2 y2 z2
.....
```

用 MSC. Mentat 后处理工具 “path_ plot” 中 “Sample Points” 模式中的 “Positions” 方法加载上述过程文件。加载运行完成后, 在 “Add curvers” 中选上变量 “Principal Stress Min” (最大主压应力, MSC. Marc 中规定拉为正、压为负), 并保存。Msc. Marc 中建立的球壳模型是在直角坐标系下描述的, 需将其转化为地理坐标, 以方便在 ArcGIS 中显示。

将上述信息拼合成一个文本文件, 包含节点号、经度、纬度、高程, 即为在 ArcGIS 中用地统计方法绘制 Contour Bands 图准备好数据。

2. MATLAB 编程求解方法

利用 MSC. Marc 计算结果 (如 .t19 文件) 提供的 6 个应力分量信息直接求解主应力方位、倾角、量值, 示例代码如下:

%将 6 个应力分量信息存入 Excel 文件 “data. xlsx” sheet1 的 B: G 中, 设数据条数为 row, 起始行号为 row0。

```
for k=row0: 1: row0+row-1
A=xlsread (‘data. xlsx’, 1, [‘B’, num2str (k), ‘: G’, num2str (k) ] );
sigmax=A (1);
sigmay=A (2);
sigmaz=A (3);
sigmaxy=A (4);
sigmayz=A (5);
sigmaxz=A (6);
A= [sigmax sigmaxy sigmaxz; sigmaxy sigmay sigmayz; sigmaxz sigmayz sigmaz];
[ V, D] =eig (A);
Vrot=rot90 (V);
Drot=rot90 (D, 2);
for i=1: 3
sigmaD (i) =rad2deg (acot (Vrot (i, 1)/Vrot (i, 2) ) );
if and (cosd (sigmaD (i) ) * Vrot (i, 1) >0, sind (sigmaD (i) ) * Vrot (i, 2)
>0)
sigmaD (i) = 90-sigmaD (i);
else sigmaD (i) = 270-sigmaD (i);
end
end
sigma123= [ sigmaD (1) rad2deg (asin (Vrot (1, 3) ) ) Drot (1, 1) sigmaD
(2) rad2deg (asin (Vrot (2, 3) ) ) Drot (2, 2) sigmaD (3) rad2deg (asin (Vrot
```

```
(3, 3) ) ) Drot (3, 3) ];
```

```
xlswrite ('data.xlsx', sigma123, 1, [ '1', num2str (k), ': Q', num2str (k) ] );  
end
```

代码运行完毕后, 将会在“data.xlsx” sheet1 的 I: Q 列分别输入每一条 6 分量应力数据所对应的最大主压应力方位、倾角、量值, 中间主压应力方位、倾角、量值和最小主压应力方位、倾角、量值。

三、基于地统计学在 ArcGIS 中制作云图

地统计是用于分析和预测与空间现象或时空现象相关联的值的统计数据类。它将数据的空间 (在某些情况下为时态) 坐标纳入分析中。ArcGIS Geostatistical Analyst 是一个扩展模块, 它提供了一套可以构建和使用空间 (和时间) 坐标模型的工具。这些模型可以应用于各种情况并通常用于生成未采样位置的预测, 也可用于生成这些预测的不确定性的度量值。(ArcGIS 教程)

我们可利用此扩展模块先对空间数据进行探索性分析, 然后利用“地统计向导”功能选取合适的克里金法的类型并设定详尽的参数来制作云图。

1. 探索性空间数据分析

为正确、合理地对空间采样点数据进行地统计分析和建模, 在对空间采样点数据进行地统计分析之前, 应首先了解数据的频率分布、是否存在全局趋势、是否存在离群值、是否存在空间自相关等基本统计信息、数据质量信息、数据特点等, 了解数据是否满足克里金插值条件, 之后再行变异函数建模或克里金插值 (刘爱利等, 2012)。

(1) 频率分析

与直方图检验数据频率分布方法相比, QQ 分布图可更直观地观察数据和标准正态分布数据的接近程度, 若散点与 45°斜线的位置关系比较紧密, 则说明数据近于正态分布。在地统计学中, 并不一定要求数据呈正态分布, 但如果空间数据不符合正态分布, 那么线性克里金法就不是无偏最优的插值法。最大主压应力量值数据的 QQ 分布如图 1 (a)。经查证, 图形两端偏离 45°斜线的数据为数值模型的东南角边界数据和印度板块边界附近的两处数据, 排除此数据之外, 其 QQ 分布见图 1 (b)。

(2) 离群值分析

ArcGIS 地统计模块提供的离群值分析方法包括直方图法、Voronoi 图法、半变异函数/协方差云图法。本文以半变异函数云图法为例识别全局离群值与局部离群值。图 2 小框中的数据经查验亦为模型中东南边界和印度板块边界附近的两处数据。一般地, 离群值可能是人为错误导致的, 也可能是异常自然现象的体现。因此, 应仔细分析离群值产生的原因, 慎重修改或剔除离群值。本文的实例数据是综合了各种资料并经复杂的科学计算而得到的模拟结果, 我们认为其模拟结果合理, 故不剔除数据。

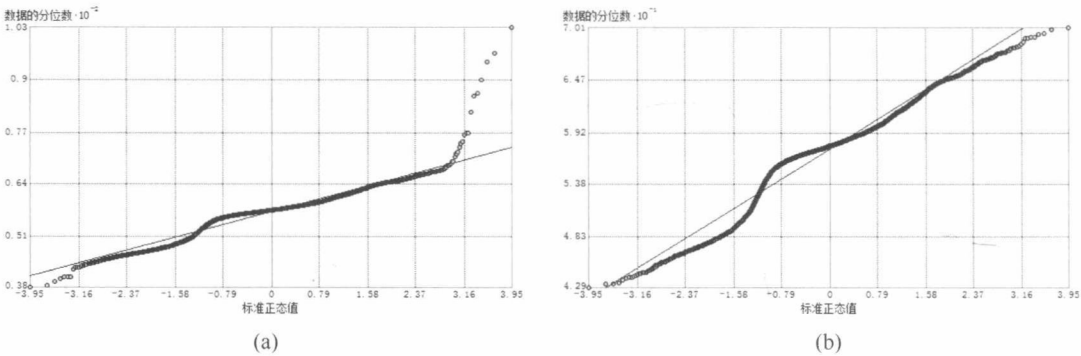


图 1 QQ 分布图
(a) 剔除数据前; (b) 剔除数据后

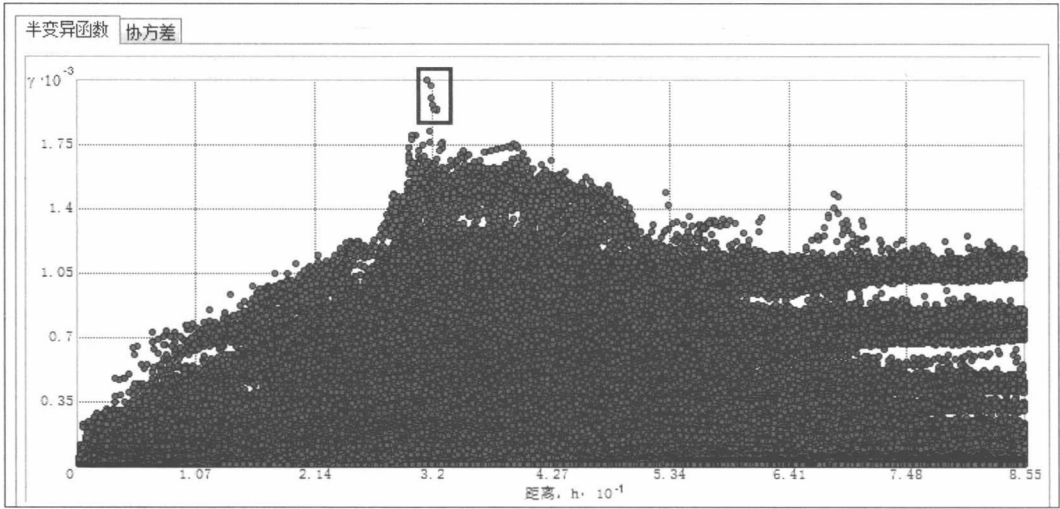


图 2 半变异函数/协方差云

(3) 全局趋势分析

全局趋势分析如图 3 所示，图中横轴正向为东，竖轴正向为北，两条曲线分别为数据在侧面投影的拟合曲线。可见，无论从南到北还是从西向东，数据的全局趋势均呈现“U”型变化趋势，模型中部数据变化平缓。

(4) 空间自相关分析

从图 2 可看出，空间距离近的点的最小主压应力量值差异性小，空间距离远的点的最小主压应力量值差异性较大，数据基本是空间自相关的。

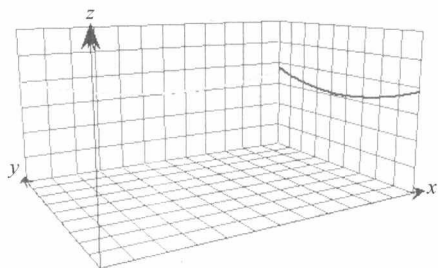


图3 全局趋势分析图

2. 克里金方法和变异函数模型的选取

由于研究目的和条件不同,会产生各种各样的克里金法,包括:简单克里金法 (Simple Kriging)、普通克里金法 (Ordinary Kriging)、泛克里金法 (Universal Kriging)、指示克里金法 (Indicator Kriging)、概率克里金法 (Probability Kriging)、析取克里金法 (Disjunctive Kriging) 和协同克里金法 (Co-Kriging)。其中简单克里金法和普通克里金法属于线性平稳的统计学范畴 (区域化变量的数学期望是一个常数),即预测值是已知的线性无偏估计量。两者区别为:对于简单克里金法而言,数值期望为已知的;而对于普通克里金法而言,数学期望是未知的。简单克里金法的估计精度很大程度上依赖于数学期望的准确度,但是通常情况下很难正确估计数学期望值 (刘爱利等, 2012)。本文选取普通克里金法来进行分析。

实际工作中区域化变量的变异性往往很复杂,可能在不同方向上有不同的变异性,或者在同一方向上包含着不同尺度的多层次的变异性,因而计算出实验变异性后,无法用一种理论模型来拟合,需要构造一个综合的变异函数模型。有基台值的变异函数模型包括纯块金效应模型、球状模型、指数模型、高斯模型;无基台值模型包括线性无基台值模型、幂函数模型、对数模型。实践证明,实际工作中绝大多数的实验变异函数散点图都可以用有基台模型拟合 (刘爱利等, 2012)。一般符合以下准则的模型为最优:①标准平均值接近于 0;②均方根尽可能最小;③平均标准误差尽可能接近均方根预测误差;④标准均方根接近于 1 (张余庆等, 2013)。本文比较了球状模型、指数模型和高斯模型,见表 1,最优模型为指数模型,其变异函数一般公式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}), & h > 0 \end{cases}$$

式中, h 为点间距, C_0 为块金常数, C 为拱高, C_0+C 为基台值。