维普资讯 http://www.cqvip.com

第29卷 第3期
2007年9月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 29 No. 3
Sept., 2007

中国东部地区地震活动与构造应力场关系的有限元数值模拟

章 纯
(上海市地震局,上海 200062)

摘 要:运用有限元数值模拟方法结合板块构造边界条件和板内构造分布特征对中国大陆东部地区的基本构造应力场进行数值模拟,根据研究区受周边板块作用的情况分析板块边界作用力的变化对内部应力场的影响。对比有限元数值模拟结果解释了中国大陆东部地区地震活动空间分布的特点。

关键词: 地震活动; 有限元; 数值模拟; 应力场
中图分类号: P315.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0844(2007)03-0230-05

A Finite Element Numerical Simulation for Seismic Activity and Tectonic Stress Field in East China

ZHANG Chun
(*Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai* 200062, *China*)

Abstract: Using the finite element numerical simulation method with the plate tectonic boundary conditions and the characteristics of inner plate tectonic distribution, the basic tectonic stress field of eastern Chinese mainland is simulated. According to the effect situation from adjacent plates, influence of the acting force change on plate boundary to inner stress field of eastern Chinese mainland is analyzed. Comparing with the simulated result, the characteristics of seismic activity for space distribution in eastern Chinese mainland are expounded.

Key words: Seismic activity; Finite element; Numerical simulation; Stress field

0 引言

许多地震学者从不同角度研究了中国大陆及其邻区地震活动空间分布的不均匀性,傅征祥等对近代中国大陆及其邻区板内浅源强震空间分布的大尺度不均匀性进行了研究,认为中国大陆东部6级以上地震活动明显集中在30°～42°和19°～25°两个纬度带内[1]。在实际工作中我们也发现了同样的情况,图1是根据中国地震局分析预报中心目录数据绘制的北纬42°以南,东经109°以东地区1900年以来6级以上地震震中分布图,由图可见我国东部地区地震空间分布主要集中在华北地震区和东南沿海地震区内,江西、浙江、湖南等中间地带地震活动比较弱,6级以上地震寥寥无几。我国东部地区陆上主要断裂也分布在这二个区域内[2],这样的一种不均匀分布状况应当与地球动力学环境有着密切的联系。

自上世纪80年代以来,国内外许多学者就有关地壳应力场进行了大量的研究,并取得了一系列的研究成果。Zoback等编制了世界应力图,在分析了全球地壳应力场的资料后认为,板内大区域应力场是由于板块运动引起和控制的[3-4]。

我国地震工作者就震源机制解、有限单元法数值模拟以及地质资料分析等诸多方面对我国及其邻

收稿日期:2006-09-27
基金项目:地震科学联合基金(103028)
作者简介:章 纯(1962-),女(汉族),上海人,副研究员,主要从事地震预报方法研究及应力场研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

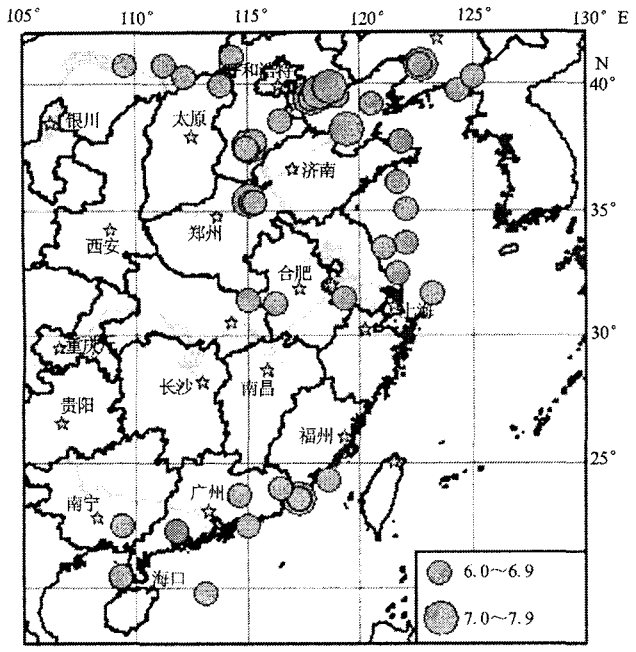

图 1　中国东部地区 1900 年以来 6 级以上地震震中分布图

Fig. 1　Epicenter distribution ($M \geqslant 6$) in eastern China since 1900.

区的构造应力场开展了大量的研究工作：汪素云和陈培善率先应用有限元数值模拟方法来模拟现代构造应力场[5]；之后王仁和梁海华采用叠加法反演东亚地区现代构造应力场[6]；许忠淮等利用有限单元方法反演中国大陆东部及附近地区板块边界作用力的大小[7]；汪素云等通过对中国及邻区地震震源机制解资料的分析，对中国及其邻近地区构造应力场进行了拟合反演研究[8]；梁海华等通过用有限元数值模拟方法反演中国及邻区的板块边界力和区内的构造应力场，分析计算应变能随离板块边界的距离增大所呈现的衰减规律[9]；臧绍先[10]、傅征祥[1]等详细研究了中国周边板块的相互作用方式。上述成果使我们对影响中国及其邻近地区构造应力场的因素有了一定的认识，认为我国大陆构造应力场的形成是由于印度板块、太平洋板块和菲律宾海板块共同挤压欧亚板块的结果。

随着有限元模拟技术的发展，利用数值方法模拟板内应力场的时、空演变过程，研究地块活动对板内地震的贡献已成为地球动力学研究的重要方法之一。本文将在以前工作的基础上吸取最新资料，以东部地区的应力图像及最新 GPS 观测结果作为拟合条件，利用功能强大的通用有限元软件 ANSYS，对以中国华东地区为主的包括华北及华南地区的构造应力场进行有限元数值模拟，研究中国东部地区受周边板块联合作用的应力场分布特征，分析周边板块作用力的变化对我国大陆东部地区内部应力场的影响，对比有限元数值模拟结果分析应力场与地震活动的关系，解释中国大陆东部地区地震活动空间分布的特点。

1　我国东部地区应力场三维有限元数值模拟

1.1　模型的建立

首先确定模型的边界。根据文献[2]，模型的东部以日本海沟、琉球岛弧、台湾岛弧和菲律宾岛弧为界；模型的北部以鄂尔多斯周缘断裂系北部边界的延长线为边界；模型西部边界为延鄂尔多斯周缘断裂系东北边界至龙门山－安宁河断裂至小江－红河断裂；模型南部边界的选取尽可能远离研究区，以对重点分析区域不产生不良影响为原则。

在建立地质模型时主要考虑对地质构造运动和地震活动起决定作用的活动断裂，参考文献[2]，整个模型中考虑的断裂带共有 30 条，包括：郯庐断裂、沧东断裂、茅山断裂带等、镇海－温洲断裂、基隆断裂、苏澳断裂、南澳兄第屿断裂、恩平－新丰断裂、桂林－南宁断裂、珠江口南缘断裂、南通－济州岛断裂、响水－嘉山断裂、萧山－上海断裂、闽浙沿海断裂、无隶－益都断裂、兰屿断裂、合浦－北流断裂、百色－合浦断裂、吴川－四会断裂、北卫滩断裂、三饶－陆丰断裂、晋获断裂、新乡－商丘断裂、盖县断裂、鸭绿江断裂、昌平断裂、威海断裂及东海三条断裂。这些断裂主要分布在华北地震区和东南沿海地震区。最终确定的研究区域及断层分布情况见图 2。

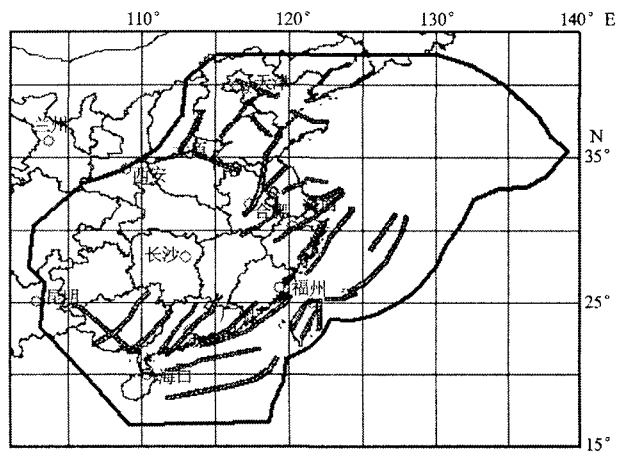

图 2　研究区边界及断层分布图

Fig. 2　Boundary and fault distribution of the study area.

由于地壳模型水平方向的尺寸远大于垂直方向

维普资讯 http://www.cqvip.com

的尺寸，而且我国东部地区的地震多数以走滑型为主，可以认为该地区现代构造运动的动力主要来自水平力的作用，因此模拟采用三维等厚度薄壳模型。地壳厚度采用东部平均厚度 33 km；断层处理采用非均匀连续介质模型；断层单元将处理为介质强度较低且粘滞系数较小的单元。

在载荷作用下，弹性变形是瞬间发生的，而粘性部分变形则随着时间的推移逐步发生，研究地球的各种长期变化必须考虑到地球介质的流变性质。考虑到后面一系列研究工作的需要，我们选用了粘弹性模型。

ANSYS 中集成的粘弹性问题模块使用的是广义麦克思威尔模型，在后面的计算过程中只用了一个麦克思威尔体，此时所用的模型即为标准线性固体。

1.2 介质参数的确定

根据中国大陆地壳结构分区，不同区域具有不同的速度结构。我们将华北和华南块体分割线延长至模型边界，将整个模型分成南北 2 个区域，即 2 种材料；另外考虑到断层内的岩石是经过错动的，与断层外区域相比有所不同，因此将断层定义为另一种材料。模型各区域的力学参数如表 1 所示。

表 1 计算模型的材料力学参数

材料号	区域	弹性模量 $E/10^{10}$Pa	泊松比 υ	剪切模量 $G/10^{10}$Pa	粘滞系数 η/Pa·s
1	北区	8.7	0.25	3.48	2×10^{22}
2	南区	9.2	0.25	3.68	4×10^{22}
3	断层	4.5	0.22	1.84	5×10^{21}

1.3 网格划分

在满足计算能力的条件下尽可能将单元划分得细一些，以提高其可靠性。网格划分后，整个模型的单元总数为 3 782 个，节点为 26 862 个，如图 3 所示。

1.4 边界条件的确定

研究区位于欧亚板块的东部，是一个被周围板块挤压围限的区域。综合分析表明研究区构造应力场主要起源于太平洋板块、菲律宾板块以及印度板块碰撞向东传递所致中国大陆内部块体间的相互作用。研究区西边界作用力与相邻板内块体的作用有关，不同边界段之间也有所差异。

模型主要从以下几个方面考虑研究区的受力环境：

(1) 东部边界的北段考虑太平洋板块的作用，由于太平洋板块以小角度向中国大陆俯冲，规模较大，其影响可以达到大陆内部很远的距离。

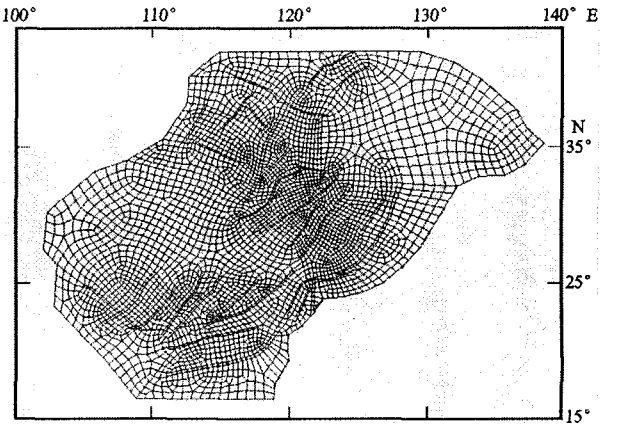

图 3 计算模型的网格剖分图(正视图)

Fig. 3 Grid diagram of computational model (Front view)

(2) 东部边界的南段考虑菲律宾板块的作用，在台湾附近与欧亚板块产生碰撞，但不是俯冲，而是高角度仰冲，因此其影响范围远不如太平洋板块。

(3) 印度板块对青藏高原的强烈碰撞对东亚地区构造应力场的强烈影响已得到普遍认同。NNE 向的碰撞作用传递到华北地区时已转变为 NE 向挤压，因此西边界北段所受到的压力方向是北偏东的。

青藏高原在 SN 向挤压力作用下，端部产生的 SE 向扩张推挤压力，使得研究区西部边界的南段受到的压力方向是向东偏南的。

(4) 根据许忠淮等对东海地区现代构造应力场的研究结果，琉球岛弧由于弧后扩张作用，东海地区地壳在水平方向上并未受到菲律宾板块俯冲推挤向大陆内部产生较强的应力作用，因此在计算中给出零位移边界[11]。

(5) 台湾岛处考虑了右旋运动对大陆的作用[12]。

本研究采用位移边界条件：设定底面法向自由度刚性约束，北部边界在南北向固定；南部边界在东西向固定。模型内应力场的建立是由东部边界和西部边界的位移加载实现的。将模型西边界分为 11 段，东边界分为 25 段，位移边界数据首先参考文献[2]中有关“中国大陆板内块体的现代运动”中的结果，将位移速率按角度进行分解，作为该处的边界条件。在模拟应力场时，采用试错法反复调整模型边界作用载荷的大小和方向，再与获得的研究区域 GPS 结果进行比较[13-14]，尽量使模拟得到的结果大致与最新获得的 GPS 观测资料相吻合，最终确定出模型边界的加载条件。

2 计算结果与分析

维普资讯 http://www.cqvip.com

由于研究区受周边板块的推挤已经历了相当长的时间，并已形成了一个基本构造应力场，模拟计算将累积5万年的位移总量加在模型的东西边界上，参考时间为5万个时间单位，采用分子步线性叠加的方式。5万年后，模型应力状态应当是各载荷子步所产生应力综合积累的结果，此时获得的是松弛以后的稳定应力场。

由于我国东部地区绝大部分地震都属剪切破裂，因此主要对该地区最大水平剪应力和应变能密度的分布状况进行讨论。在整个模拟加载过程中不考虑模型内部地震发生所引起的应力释放，因此计算结果仅作定性分析而不考虑其定量的意义。在模拟结果中应力场的大小仅具有相对意义，而绝对数值及一些边缘处的数据仅作参考。

图4(图版1图4)是模拟计算给出的研究区最大水平剪应力等值线分布图。该图实际上是中国东部地区受印度板块作用向东传递以及太平洋板块和菲律宾板块联合作用后的最大剪应力分布状况。由图可见：研究区应力分布很不均匀，模型边界处应力值较大，以后随距离增大逐渐衰减。中国大陆东部地区其应力值由西向东逐渐递减，这符合目前已普遍认同的观点，即印度板块对青藏高原的强烈碰撞挤压通过青藏块体传递到我国东部地区仍对其应力分布状况起着决定性的作用。而太平洋板块的作用明显影响到我国华北和华东沿海地区：在华北地区，太平洋板块的作用力和模型西部边界北段传递过来的力联合作用使得该地区剪应力值比较高；在华东沿海地区，太平洋板块的作用力随距离的增大逐渐减弱，但对该地区的影响仍然存在，同时也受到菲律宾板块碰撞作用所产生的一部分影响；在华南地区由于印度板块对青藏块体的挤压在青藏高原东南部发生偏转，传递到模型西南边界已是南东向，同时菲律宾海板块对欧亚板块的碰撞作用向西也传递到华南地区，应力场实际上是这二方面联合作用的结果，并在华南沿海地区形成高剪应力值地区；中间区域即我国江西、浙江、湖南等地剪应力值较低，与这一地区强震活动不多的事实是符合的。

从图中可以明显看到，在印度板块作用控制了我国应力场总体格局的前提下，太平洋板块和菲律宾板块对我国华北，华东和华南地区的应力场分布起着重要的调整作用。

琉球岛弧的弧后扩张也影响了我国东部地区的应力场。我们做过实验，琉球岛弧处取零边界与取微弱的东西向边界约束相比，前者使得琉球岛弧两端即太平洋板块和菲律宾板块对我国东部大陆的影响更大。

地壳中积累的应变能是地震释放能量的来源[15-16]，也是影响地震活动的重要因素，应变能密度高表明该区域具备了积累地震能量的条件。图5(图版1图5)是模拟计算得到的应变能密度等值线图，可见模型边界处应变能密度较高，显然是与边界条件有关；但在构造应力场作用下，研究区总体应变能密度分布同样也是非均匀的。相比较而言，应变能密度高值区仍在华北及东南沿海地区，与华北地震区和东南沿海地震区地震活动较频繁相符合。

与前面历史地震震中分布对比，可以发现剪应力及应变能密度较高的地区中强地震活动水平也较高，地震虽然不是一定发生在背景应力较高的地区，但背景应力较高的地区显然是容易发生地震的地区。

在实际地震活动中，华北地震带由北向南地震强度逐渐减小，东南沿海地震带由南向北地震强度也越来越小，在26°—29°N的中间地区，地震活动相对平静。这样的状况与有限元数值模拟结果得到的剪应力场及应变能密度分布情况非常吻合。也符合以往的观点：构造剪应力场是控制地震发生的主要因素，出现高剪应力值的地区是容易发生强震($M_S \geqslant 6.0$)的地区，即地震危险区[17]。

3　结论与讨论

(1) 对以中国华东地区为主的包括华北及华南地区的构造应力场进行了有限元数值模拟，从应力场分布情况来看，板块边界的推挤为板内应力场的形成提供了动力来源。太平洋板块的作用主要影响我国华北及华东沿海地区的应力场；菲律宾板块的作用主要影响我国华南地区的应力场，另有一小部分可传递到华东沿海地区。

(2) 根据应力场分布情况可以推断：华北及华东沿海地区的地震主要与印度板块、太平洋板块对欧亚板块的作用有关；华南沿海地区的地震主要与印度板块、菲律宾板块对欧亚板块的作用有关。

(3) 模拟计算结果表明：我国东部地区最大剪应力及应变能密度等值线图存在着明显的梯度。与历史地震震中分布对比，可以发现剪应力、应变能密度等较高的地区中强地震活动水平也较高，对应了历史上强震发生的主体地区华北地震区和东南沿海地震区；而剪应力、应变能密度等较低的地区地震活动水平也较弱。其结果解释了中国大陆东部地区地

维普资讯 http://www.cqvip.com

震活动空间分布不均匀的特点。

(4) 本文主要是针对我国东部地区所作的一些研究,在模型设计、边界约束上会有一些考虑不周的地方:考虑到计算能力,采用了薄壳模型,但根据地壳内应力分布特征,如能采用分层模型,在模型不同的深度采用不同的岩石力学参数和边界条件将会更接近实际情况。另外,本文的计算结果主要是作定性分析。今后的工作会在此基础上进一步深入。

[参考文献]

[1] 傅征祥. 中国大陆地震活动性力学研究[M]. 北京:地震出版社,1997.

[2] 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1989:4-21.

[3] Zoback M L. Global patterns of tectonic stress[J]. Nature, 1989,341: 291-298.

[4] Zoback M L. First and second order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project[J]. J. G. R., 1992,97(B8):11703-11728.

[5] 汪素云,陈培善. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟[J]. 地球物理学报, 1980,23(1):35-45.

[6] 王仁,梁海华. 用叠加法反演东亚地区现代构造应力场[A]// 国际交流地质学术论文集(2)[C]. 北京:地震出版社, 1985: 29-35.

[7] 许忠淮,汪素云,俞言祥. 根据观测的应力方向利用有限单元方法反演板块边界作用力[J]. 地震学报, 1992,14(4):446-455.

[8] 汪素云,许忠淮,俞言祥,等. 中国及其邻区周围板块作用力的研究[J]. 地球物理学报, 1996,39(6):764-771.

[9] 梁海华,侯建军,刘树文,等. 中国构造应力场与大震复发周期关系的数值模拟[J]. 地震地质, 1999,21(1):51-57.

[10] 戴绍先,宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义[J]. 地球物理学报,1996, 39(2):188-202.

[11] 许忠淮. 东海地区现代构造应力场及其成因探讨[J]. 地震学报, 1999,21(5):495-501.

[12] 周硕愚,吴云,等. 中国大陆东南边缘海现时地壳运动与地震动力学综合研究[J]. 地壳形变与地震, 2001,21(1):1-14.

[13] 王琪,张培震,马宗晋. 中国大陆现今构造变形 GPS 观测数据与速度场[J]. 地学前缘, 2002,9(2):415-427.

[14] 周硕愚,张跃刚,丁国瑜,等. 依据 GPS 数据建立中国大陆板内块体现时运动模型的初步研究[J]. 地震学报, 1998, 20(4):348-355.

[15] Utsu T,Seki A. A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock[J]. Zisin, 1955, 7: 233-240.

[16] Tsuboi C. Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area and strength of earth's crust[J]. J. Phys. Earthq., 1956,4: 63-66.

[17] 陈培善,白彤霞,肖磊. 根据环境应力场寻找中国大陆地区的潜在震源区[J]. 地震学报, 1995,17(3):294-304.

维普资讯 http://www.cqvip.com

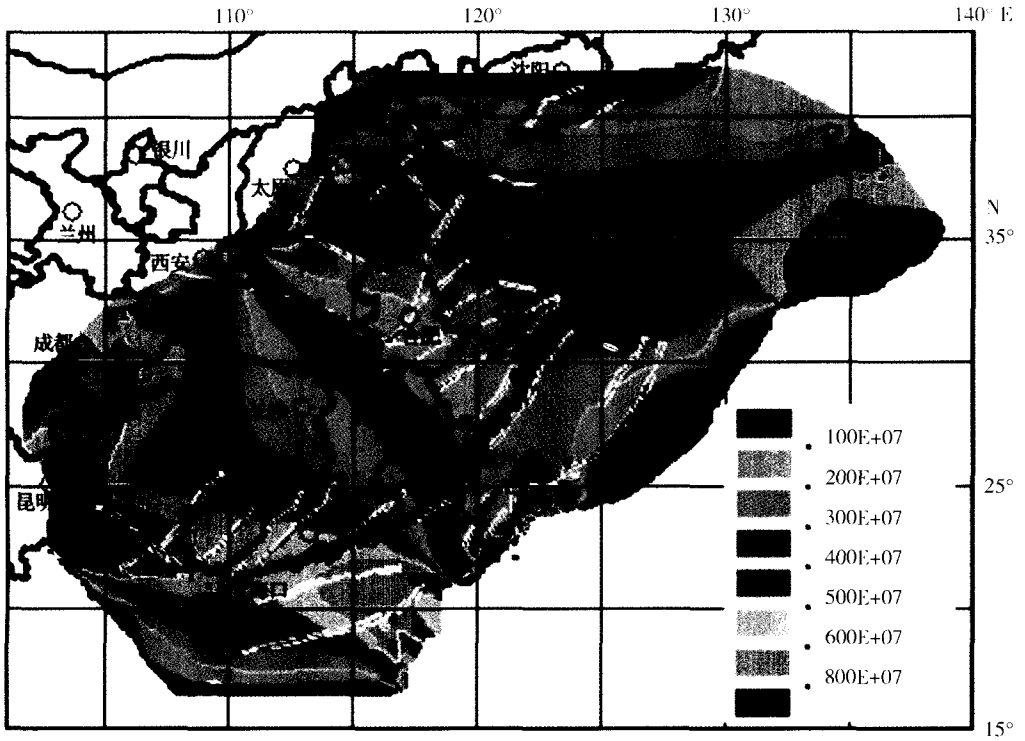

图 4　研究区基本应力场最大水平剪应力等值线图（单位：Pa）

Fig.4　The isoline diagram of maximum horizontal shearing stress for basic stress field in the research area.

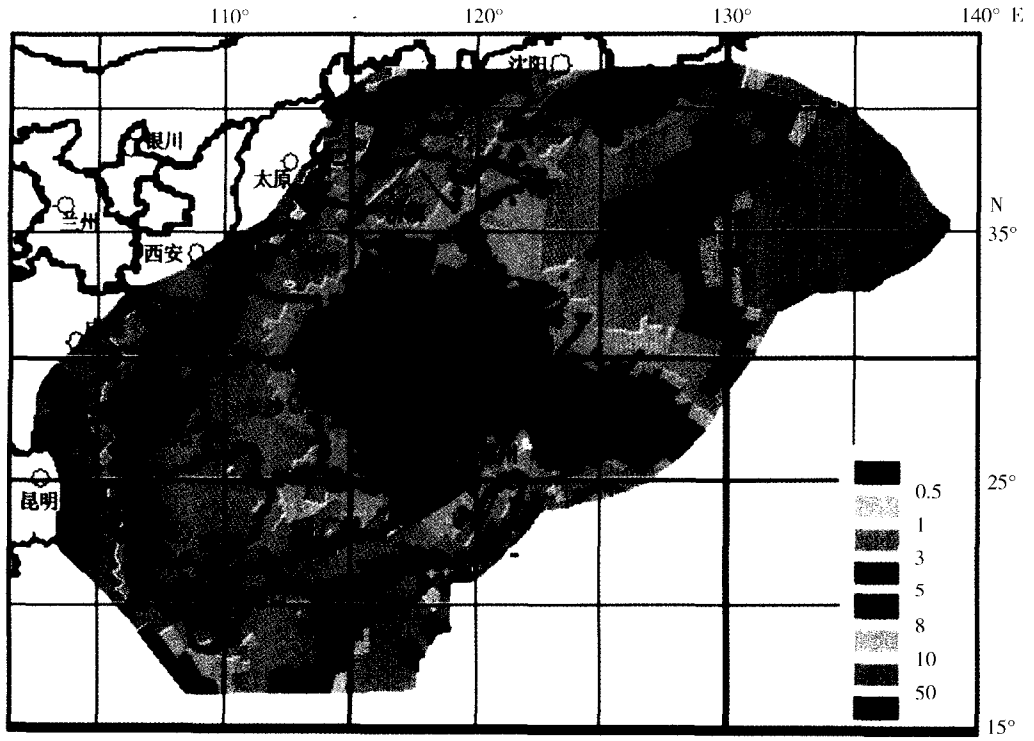

图 5　研究区应变能密度等值线图（单位：J/cm^3）

Fig.5　The isoline diagram of strain energy density in the research area.