

中国地震发生频率与烈度的空间分布

刘 凯^{1,2}, 廖顺宝¹, 张 赛^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 考虑不同区域地震记录具有时间长度不等的特点, 对“震中分布分震级网格点密集值”算法进行改进, 结合 GIS 的空间分析方法将地震目录中的点数据空间化为能反映地震发生频率的栅格数据; 依据地震震级和烈度的关系以及地震烈度在空间上的椭圆衰减模型, 选择逼近和近似的计算手段, 并结合空间插值方法得到中国地震烈度分布的栅格图。从地震频率分布结果上看, 大致以宁夏、甘肃、四川和云南为界, 中国西部地区 3 级以上的地震发生频率要高于东部地区; 从地震烈度分布结果看, 中国甘肃、陕西、宁夏、山西、河北、四川、云南等位于地震带内的区域在发生地震时产生的烈度较高。

关 键 词: 地震目录; 地震频率; 地震烈度; 空间化; GIS

1 引言

地震是一种多发的地质灾害, 具有突发性和不可预测性, 并可引发火灾、海啸等严重次生灾害。近年来, 随着社会经济的发展, 地震给人类带来的损失也越来越大。2004 年 12 月印度洋地震引发的海啸和风暴潮灾害, 造成死亡和失踪人数达 30 多万, 其经济损失逾 200 亿美元, 成为人类历史上所记录的同类灾害中死亡人数最多的一次^[1]。2008 年 5 月 12 日中国四川省汶川发生的 8.0 级地震, 截至 2008 年 5 月 29 日 12 时已造成 68516 人遇难, 365399 人受伤, 失踪 19350 人, 累计受灾人数达 4554.7565 万人^[2]。由于地震的危害巨大, 世界上对于地震的观测和记录都十分重视, 地震观测系统已成为当前亚洲区域 GEOS (Global Earth Observation System of Systems, 全球地球观测系统) 的关注重点之一^[3]。

中国是一个地震发生频繁的国家, 自古以来关于地震的观测记录非常丰富。地震资料记录在各个地震目录中。地震目录是包含关于地震发生时间、位置、震级等诸多参数的数据库。当前, 地震目录的建设已经比较完善, 然而利用这些地震数据, 获取其中某些属性信息并使其能在面域空间上得到表达即空间化方面的应用研究相对较少。相对于地震

目录中的地震记录点, 地震属性信息空间化能提供关于地震分布、发生频率和破坏大小等多方面内容的更加直观的展示, 并能使地震信息具有丰富的表现形式。

地震的发生频率和地震烈度是最受关注的两个要素。前者说明地震发生在时间和空间上的分布特征, 后者则反映地震造成的破坏程度。因此, 在进行地震属性信息空间化时, 应当首先从地震发生频率和地震烈度分布两个方面来考虑。

2 相关研究进展

2.1 相关概念

地震的发生情况与现代构造运动密切相关, 不同地方地震活动性差异很大。本文为了描述指定区域内地震的活动状况, 提出“地震频率”的概念, 其定义为: 某区域在某一时间段内地震发生的次数与该时间长度的比值, 即:

$$f=N/t \quad (1)$$

式中: f 表示地震频率 (单位: 次/年), t 表示区域内地震记录的时间长度 (单位: 年), N 表示在该段时间内发生地震的次数。

地震烈度方面, 使用“地震平均烈度”描述某区

收稿日期: 2008-05; 修订日期: 2008-05.

基金项目: 本研究受到中国科学院地理科学与资源研究所创新三期领域前沿项目 (地球信息方法论体系) 课题- 地学数据空间化误差评价方法及案例研究专项资金资助。

作者简介: 刘凯 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感与 GIS 应用。E-mail: liuk@reis.ac.cn

域内地震所产生的烈度的总体情况,使用“地震最大烈度”描述区域内地震所产生烈度的极端情况。

2.2 研究进展

在地震频率空间化方面,王健在对中国大华北地区的地震震中分布研究中,提出“震中分布震级网格点密集值”(以下称“网格点密集值”)的概念,并由此计算得出了反映震中分布的等值线图^[4]。“网格点密集值”法的内容是:在研究区内,以一定的空间间隔()划分网格,并以网格的节点 j 为中心,假定在以 r_m 为半径的范围内对于给定震级 (m) 和时段(t) 的地震数为 n,则该点“密集值”被定义为:

$$V_{j,mt} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\ln(D_i)} e^{-D_i / r_m} \quad (2)$$

式中: V_{j,mt} 为网格点密集值, D_i 为第 i 个地震震中与节点 j 的距离。

秦承志等为突出显示地震在空间密集分布的特征地区,采用“滑动窗口”法进行点状数据在空间上的灰度密度转化^[5]。

在地震烈度研究方面,Howell-Schultz 从地震学角度导出了烈度随震中距离的衰减关系,提出了地震烈度椭圆衰减模型^[6],具体如下:

$$\text{沿长轴方向 } I_a = A_1 + B_1 M + C_1 \ln(R_a + R_{0a}) + a \quad (3)$$

$$\text{沿短轴方向 } I_b = A_2 + B_2 M + C_2 \ln(R_b + R_{0b}) + b \quad (4)$$

式中: I_a、I_b 表示地震烈度, M 表示震级;系数 A₁、B₁、C₁ 及 A₂、B₂、C₂ 均为回归常数; R_a 为长轴长度; R_b 为短轴长度; R_{0a} 及 R_{0b} 为预设常数; a 及 b 为不确定性,均值为零,标准差为 a_σ 及 b_σ。

根据地震烈度衰减模型,Anderson 和 Chandra 各自对美国西部地区的等震线资料进行分析和统计,拟合得到了相应的地震烈度衰减关系式^[7,8]。

汪素云等在研究烈度衰减时发现,由于等震线的形状在地震远场区趋向于圆形,因此在进行地震资料分析时取有感范围的半径作为远场控制点,并将这一半径称为有感半径,对应于有感半径地震烈度称为有感烈度,同时给出有感半径 R 和震级 M 的关系式^[9]:

$$\lg R = 0.611 + 0.289M$$

在编制《中国地震烈度区划图(1990)》时,分别对中国东西部地区烈度衰减进行统计分析,得到了中国东部和西部地区的烈度衰减关系^[10]:

中国东部

$$\text{沿长轴方向 } I_a = 6.046 + 1.480M - 2.081 \ln(R_a + 25) = 0.49$$

$$\text{沿短轴方向 } I_b = 2.617 + 1.435M - 1.441 \ln(R_b + 7) = 0.56$$

中国西部

$$\text{沿长轴方向 } I_a = 5.643 + 1.538M - 2.109 \ln(R_a + 25) = 0.64$$

$$\text{沿短轴方向 } I_b = 2.941 + 1.363M - 1.49 \ln(R_b + 7) = 0.61$$

式中各参数的含义可参考公式(3)和(4)。

3 地震频率分布空间化

3.1 “网格点密集值”法的分析和改进

“网格点密集值”法提供了一种地震分布空间化的方法,然而也存在以下不足:

(1) 网格控制点上的值不能反映各个区域地震资料在起止时间上的差异,这不符合现实中各区域地震资料具有时间长度不一致的特点,得到的各区域结果不具有可比性。

(2) 等值线的值仅表示相对大小,没有明确的物理含义。

为了使“网格点密集值法”能应用于地震频率空间化的实现,本研究对其作出如下改进:

(1) 考虑网格控制点周围一定范围内各个地震组成的集合的起止时间范围。这就为在时间长度不等的情况下比较地震频率做好准备。

(2) 将网格控制点周围一定半径内的地震发生频率作为网格点密集值。这使得网格点的值有明确的数量意义。

基于上述思想并结合“网格点密集值”方法,可以按照以下的步骤来进行地震频率的空间化:

(1) 在研究区域内建立等间隔的网格控制点。

(2) 对于每一个控制点,找到所有位于以该控制点为中心、以控制点间隔为边长的正方形范围内的地震,并计算这些地震的总数以及时间长度。

(3) 按照文中“地震频率”的定义,计算控制点的地震频率。

(4) 利用步骤(3)中的结果进行空间插值,得到地震频率空间化结果。

3.2 地震频率空间化实现

本研究以资源与环境信息系统国家重点实验室建立的“中国及其邻近地区集成地震目录数据库”为基础,通过对其中的数据进行分析,得知该数据库中 1900~2000 年的地震记录数占总记录数的 99.46%,表明该时间区间的地震记录完整性较好,因此从中选择了中国及其周边 100km 内的地震共 678 431 条记录,时间范围为 1900~2000 年。

根据对华北地区的地震震中分布的分形研究结果,其多重分形的无标度区域为 20km,一般地震震中误差约为 20km^[11],因此按照 20km×20km 的大小在中国区域及周边建立网格控制点。

在此基础上,应用 ArcGIS 和 ArcObjects 开发工具,对控制点地震频率值 f 进行计算。其中,对于时间长度为 0 的控制点(该点周边地震记录的最大与最小年份相同),以 $N/100$ 作为 f 值,即认为这些地震记录代表 1900~2000 年这一百年间的地震总数;对没有地震记录的控制点,将 f 值设置为零。

对经过计算得到的网格控制点进行 Kriging 插值,设定输出单元为 1km,并提取位于中国国界内的栅格数据,则得到地震频率分布栅格图(图 1)。

此外,分别选择出有感地震(震级 3)和破坏性地震(震级 4.7),并按照相同的方法各自计算,可得到中国有感地震频率分布(图 2)和中国破坏性地震频率分布(图 3)。

4 地震烈度分布空间化

4.1 地震平均烈度的定义

为叙述方便,本文以地震算术平均烈度为例说明其计算过程。地震算术平均烈度为:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i / n$$

式中 I 表示平均地震烈度, I_i 表示第 i 个地震在控制点产生的烈度, n 表示能够在控制点产生烈度的地震总数。

4.2 地震烈度值的计算方法

如果要得到平均地震烈度 I ,则应首先计算某个地震 i 在控制点产生的烈度 I_i 。

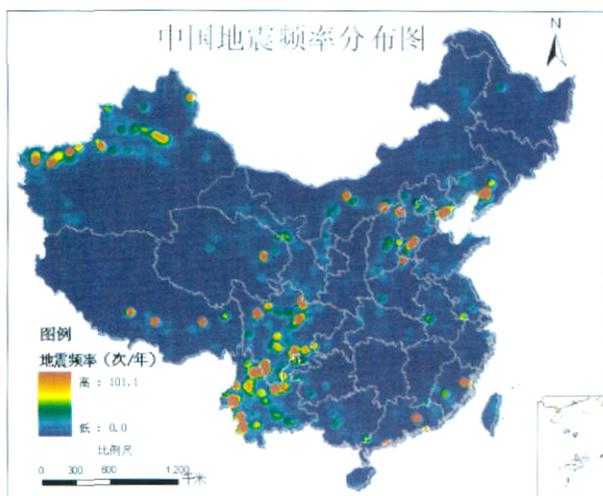


图 1 中国地震频率分布图

Fig.1 Frequency of earthquake in China

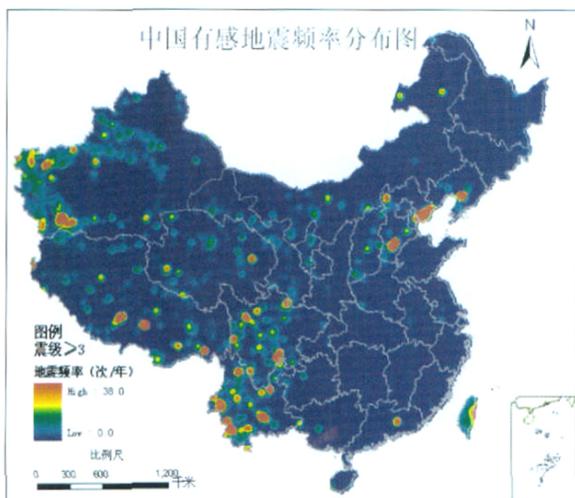


图 2 中国有感地震频率分布图

Fig.2 Frequency of felt earthquake in China

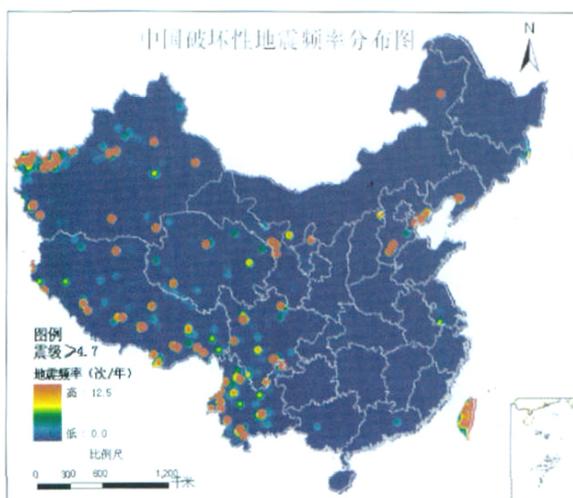


图 3 中国破坏性地震频率分布图

Fig.3 Frequency of destructive earthquake in China

若已知地震场中某点 P 的位置以及震中的位置、震级 M 和等震线的长轴方向,则可得到以下方程(设等震线的长轴为坐标横轴,震中为原点):

$$I_a = A_1 + B_1 M + C_1 \ln(R_a + R_{0a})$$

$$I_b = A_2 + B_2 M + C_2 \ln(R_b + R_{0b})$$

$$I_a = I_b$$

$$x_a^2 / R_a^2 + y_a^2 / R_b^2 = 1$$

式中 x_a 、 y_a 表示 P 点的坐标,其余参考公式(3)和(4)。由于 P 在等震线上,因此 $I_a = I_b$ 。

它们组成了关于 R_a 、 R_b 、 I_a 和 I_b 的高次方程组。尽管目前高次方程组存在数值解法如牛顿迭代法等,可是一般均需要一个初始值作为起算点。事实上,这个初始值通常需要根据方程给出,它位于方程某个实根附近。如果没有合适的初始值,很可能在用数值解法求解的过程中得不到收敛的结果,即无法求得方程的根^[12]。

实际上,在工程应用中地震的烈度一般都以整数来表示,如 5 度、6 度,而在计算中一般精确到 0.5 度就可以了^[9]。基于此,本文考虑用近似解法计算控制点的某个地震烈度值 I_i 。

若已知条件不变,即已知 P 点的位置以及震中的位置、震级 M 和等震线的长轴方向,由地震烈度的衰减关系可知,对每个不低于有感烈度值 I_0 的地震烈度 I_j ,都对应于某一条等震线。由于随着烈度的增加,等震线越向震中收缩,则如果 P 点位于烈度为 I_j 的等震线内,则说明 P 点的烈度 $I_i > I_j$,反之 $I_i < I_j$ 。因此,假设将 I_j 从有感半径值 I_0 逐渐增大直至烈度的最大值 12,则必然存在这样的情况,即在某个区间 $Q(I_j - I_{j+1})$ (> 0) 内,有 $I_i \in Q$ 。若 Q 取足够小,那么可认为此时 $I_i = I_j$ 。

4.3 地震烈度空间化的算法

根据上节中提出的地震烈度计算方法设计出地震烈度空间化算法如下。

初始条件:输入两个数据图层 Layer1 和 Layer2,其中 Layer1 为地震点数据,Layer2 为控制点数据。Layer2 中设当前烈度、当前地震总数、总烈度和平均烈度四个字段。其中,当前烈度字段记录本次计算中获得的烈度值,当前地震总数记录到目前为止地震数目的总数,总烈度记录当前地震烈度的总和,平均烈度记录最终结果。

算法计算过程:

1)对 Layer1 中的一个地震点,在 Layer2 中查找满足如下条件的控制点:

地震点到某个控制点的距离小于该点对应的有感半径 R_0 ,其中 R_0 依据此地震点的震级来确定;

从起算烈度 $I_j = I_0$,间隔烈度 0.25 (由于通常地震烈度的精度要求不需要很高,因此本论文取 0.25 度作为 I_j 每次增加的变化量)开始,通过计算 I_j 对应的长轴和短轴值得到椭圆,不断判断该控制点和 I_j 对应的椭圆的关系,直到该控制点第一次落在椭圆外面;

对此时获得的点,修改当前烈度值为 I_j ,为当前地震总数加 1,总烈度值加上 I_j 。

2)重复执行步骤 1)至 Layer1 中所有的地震点都已完全计算;

3)对 Layer2 中的地震点,用总烈度除以当前地震总数,得到地震平均烈度,再记入平均烈度字段。

4)空间插值。

4.4 地震烈度空间化实现

研究中以资源与环境信息系统国家重点实验室建立的“中国及其邻近地区集成地震目录数据库”为基础,从中选择了中国及其周边 100km 内震级大于 4 级的地震记录共 17,304 条,时间范围为公元前 2300 年至公元 2000 年。这一选择的隐含假设为,当震级小于 4 级时,由于其造成破坏性后果的可能性很小,因此认为其对一定范围内产生的影响(用烈度表示)可以被忽略。

参照第二节中所建立的网格控制点采用 ArcGIS 和 ArcObjects 结合烈度算法计算,通过 Kriging 插值的方法将点数据插值成 1km 的栅格数据,即得到了地震烈度的空间化结果(图 4)。

若在进行计算时采用控制点的最大烈度值作为该点的地震烈度,即在中间计算中不进行烈度值累加而仅比较新的计算值和原有烈度值的大小,并保留其中较大者作为烈度值,这样得到的地震最大烈度分布图(图 5)。

5 结果分析

5.1 地震频率分布结果分析

通过改进“网格点密集值”法来实现地震频率分布空间化,考虑了一定区域内地震记录数与记录

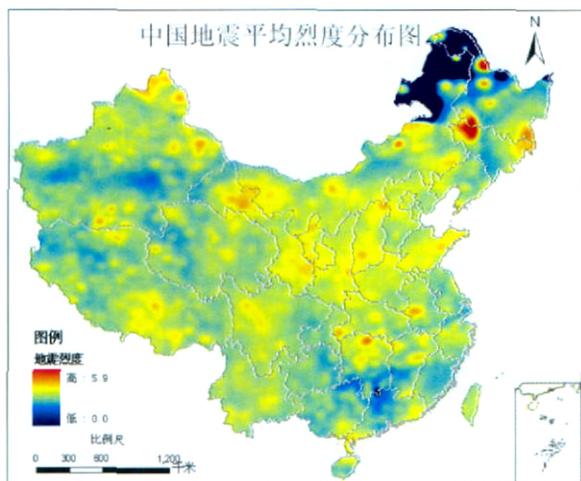


图 4 中国地震平均烈度分布

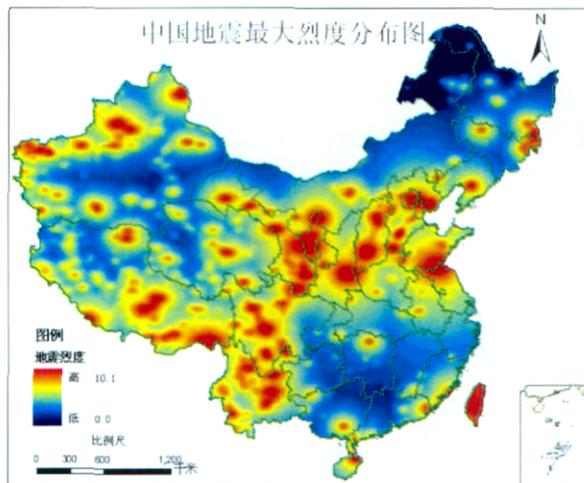
Fig.4 Spatialization of seismic intensity in China
(mean value)

图 5 中国地震最大烈度分布

Fig.5 Spatialization of seismic intensity in China
(maximum value)

时间范围具有相关性,引入了频率的概念,目的明确,结果图的每个栅格单元代表了其区域内一定时间的地震发生次数,有明确的物理意义,在更关心地震某段时间内发生的次数即地震频率在空间上的分布的情况下,本文认为改进的“网格点密集值”算法是较为合适的地震频率分布空间化实现方法。

对比应用改进的“网格点密集值”法得到的所有地震频率分布、有感地震频率分布和破坏性地震频率分布,发现随着震级的提高,计算结果对地震点带状分布特点的反映逐步变得不明显,地震发生的频率最大值也在逐渐减小,从最高的 101.1 次减至 12.5 次。这应当是因为震级越高的地震其发生的概率越小,这就使得地震点之间的距离趋于增大,从而不能呈现出地震带的形状特点。

另外,中国东部和西部地区地震活跃程度也随着震级升高而出现分化。在全部地震点频率分布空间化结果上,除地震带区域以外东西部地震发生的频率值相差不明显,而当地震震级大于 3 级以及 4.7 级时,陕西、宁夏、甘肃、四川、云南及其以西的地区普遍的地震发生频率值要高于东部地区,表明较强的地震在西部发生比在东部更为频繁。

5.2 地震烈度空间化结果分析

(1) 从中国地震烈度图上看,全国曾受到地震影响的范围比较大,遍布国内各个地区。但是,大部分地区发生地震时整体受到的影响并不是特别大,表现为平均烈度值不是特别高,计算得到的最大值

为 5.9,均值 4.1。从大的趋势上,中国地震的平均烈度自西北向东南先逐渐增大,到达中部为最高值,而后再逐渐减小。就各个省份而言,中国中北部和西南、西北部省份如河北、河南、山西、陕西、甘肃、宁夏、四川、云南、西藏等地区地震平均烈度值较高,表明这些地方受到地震的影响相对较大。而位于东南部的省份如江苏、浙江、广东、福建一带的地震平均烈度值较小。

(2) 对中国地震最大烈度的结果进行统计,得知最大值为 10.1 度,平均为 6.0 度。图 5 可以发现地震烈度值较大的地区(也即地震造成破坏较为严重的地区)具有比较显著的带状分布特征,尤其在中国中部自东北向西南有一条明显的条带,这也是中国东西部构造分化最显著的分界线。在此区域内的山西、陕西、甘肃、宁夏、四川、云南等省份,其遭受较强破坏地震比较多,如松潘地震、丽江地震和最近发生的四川汶川大地震等等。除此之外,河北、山东部分地区的地震也能造成较大的危害,如邢台大地震、唐山大地震等等。再有就是新疆天山地区也是破坏性地震的多发地。上述各个省份和地区多位于中国的地震带上,这些区域内地壳运动活跃,地震活动性较强,往往是强震的发生地。

(3) 将平均烈度图和最大烈度图对比可以发现,尽管全国受到地震的影响较为普遍,然而其强弱差异十分明显。在最大烈度图上可看到地震烈度的高值分布范围相当集中,与地震平均烈度图上大部分地区均有地震烈度值这一现象存在较大差异。

6 结语

地震频率和地震烈度是最受关注的两个描述地震的指标。通过对这两个要素进行空间化,一方面向科研人员和社会公众展示了更丰富的地震信息和内容,另一方面也为相关决策部门进行各种规划的编制工作提供依据。此外,在进行地震频率和地震烈度空间化中进行的相关研究,也能为地震信息处理技术提供有价值的参考。

本文在进行地震频率和烈度空间化时,直接应用了 Kriging 插值,没有根据地震带的分布对插值结果进行限定和修正,这可能导致结果存在一定的误差,尚需要进一步的研究和探讨。

参考文献

- [1] 赵庆良, 许世远, 王军 等. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展. 地理科学进展 2007 26(5):32-40.
- [2] 原国锋. 四川汶川地震已造成 68516 人遇难. 人民日报, 2008 年 5 月 30 日第二版.

- [3] 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用. 地理科学进展, 2007, 26(1):1-16.
- [4] 王 健. 地震活动性图象处理的网格点密集值计算方法. 地震学报 2001 23(3):262-267.
- [5] 秦承志, 裴韬, 周成虎 等. 基于数学形态学的地震带图像识别分析. 地球信息科学 2004 6(2):101-105.
- [6] Howell B F, T R Schultz. Attenuation of modified Mercalli intensity with distance from the epicenter. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65:651-665.
- [7] Anderson J G. The attenuation of Modified Mercalli Intensity with distance in the United States. Bulletin of the Seismological Society of America, 1978, 68 (4):1147-1179.
- [8] Chandra U. Attenuation of intensities in the United States. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69 (6):2003-2024.
- [9] 汪素云, 俞言祥, 高阿甲 等. 中国分区地震动衰减关系的确定. 中国地震 2000, 16(2):99-106.
- [10] 国家地震局. 中国地震烈度区划图(1990)概论. 北京:地震出版社, 1996.
- [11] 周成虎, 裴 韬, 李全林 等. 集成地震目录数据库及其应用研究. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [12] 黄健元. 计算方法. 南京:河海大学出版社, 2004.

Spatial Distribution of Earthquake Frequency and Seismic Intensity in China

LIU Kai^{1,2}, LIAO Shunbao¹, ZHANG Sai^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Based on the data in seismic catalog, the characteristic of unequal time periods in different areas is considered in the spatialization of earthquake frequency. "Value of grid nodes density calculating of earthquake epicenter distribution group by magnitude" method is improved to spatialize point data to grids which describe earthquake frequency from the seismic catalog with the assistance of GIS spatial analysis methods. Furthermore, according to the relationship between earthquake magnitude and intensity and the model of elliptical attenuation of earthquake intensity, spatial interpolation method, approximation method and approaching method are chosen to obtain grids which describe the average seismic intensity in China. The results of earthquake frequency distribution in China indicates that the frequency of earthquake magnitude above 3 in western China is higher than that of the eastern China bounded by a strip which consists of Shanxi, Ningxia, Gansu, Sichuan and Yunnan provinces. It is concluded from the results of seismic intensity distribution in China that Gansu, Shanxi, Ningxia, Hebei, Sichuan and Yunnan provinces, which are located in seismic belts, are likely to encounter earthquakes that often cause higher intensity.

Key words: seismic catalog; earthquake frequency; intensity; spatialization; GIS