

## Rapid Assessment of Disaster Loss and Spatial Distribution of Intensity Residuals in Linfen Area

Xiaofei Han<sup>1,2\*</sup>, Zihong Li<sup>1,2</sup>, Jianjie Bo<sup>1,2</sup>, Xiaoyun Zhao<sup>1,2</sup>, Shuangshuang Shi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

<sup>2</sup>State Key Observatory of Shanxi Rift System, Taiyuan 030025, China

Received December 19, 2018

Accepted January 27, 2019

### Abstract

Through the probability analysis of seismic hazard analysis, the probability distribution results of different intensity in each township of Linfen area are given. Through analysis, it is concluded that the probability of occurrence of high-intensity impact in the Linfen basin is higher than that of the mountains on both sides of the basin, and the difference is significant. Difference is positively correlated with the intensity. When calculating the seismic intensity, it is necessary to consider the difference in the seismic geological background, but also to consider the complexity and homogeneity of the site conditions. If necessary, correct the calculated intensity. Finally, based on the attenuation relationship applied to the local area, a hypothetical earthquake is caused to cause loss of buildings, casualties, and direct economic losses. Finally, if the Hongdong earthquake in 1303 or the Linfen earthquake in 1695 is repeated, the anti-collapse capability of Linfen area will be comprehensively evaluated.

*Keywords:* Seismic danger, Seismic intensity, Attenuation relationship, Loss of disaster, Intensity residual

## 临汾地区灾害损失快速评估及烈度残差空间分布特征

韩晓飞<sup>1,2</sup>, 李自红<sup>1,2</sup>, 薄建杰<sup>1,2</sup>, 赵晓云<sup>1,2</sup>, 史双双<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>山西省地震局, 太原 030021, 中国

<sup>2</sup>太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025, 中国

**摘要:** 通过地震危险性分析的概率性方法给出临汾地区各乡镇的不同烈度的概率分布结果, 通过分析得出临汾盆地未来 50 年发生高烈度影响的概率比盆地两侧山区要高的多, 而且差异性随烈度影响呈正相关。地震烈度评估计算时, 既要考虑地震地质背景的差异性, 也要考虑场地条件复杂性和均一性, 如有必要要对计算的烈度进行修正。最后依据适用于本地的衰减关系计算一次假设地震造成建筑物损失、人员伤亡、以及直接经济损失。最后评价如果 1303 年洪洞地震或 1695 年临汾地震重演, 综合评价了临汾地区的抗倒塌能力。

\* Corresponding author: [38094048@qq.com](mailto:38094048@qq.com)

**关键词：**地震危险性；地震烈度；衰减关系；灾害损失；烈度残差

## 1. 引言

临汾市地质构造复杂，存在着发生强烈地震的构造背景。1303年洪洞8级地震、1695年临汾7¼级地震就发生在临汾盆地。目前我们还不能准确地预报地震发生的时间，也无法阻止它发生；所以只能采取预防措施，尽量减轻地震可能造成的损失。减轻地震灾害的措施有工程上的措施和社会方面的措施。不论哪一类措施都必须以本区的地震危险性和它对社会的危害度为依据。彭艳菊（2012）对渤海地区地震危险性特征及工程抗震设防的关系进行了研究，在分析地震危险性区划结果的基础上，引入地震危险性特征参数K对研究区进行地震危险分区，证明地震环境可以造成危险性差异。马宗晋（1993），陈颀（1999），高孟谭（2004）对山西地震地区都作过系统性的防灾减灾研究。周中红（2011），白仙富（2014），李昌珑（2016）对地震影响场模型都做了专门研究，使理论分析结果更接近实际震害结果。Zhongyu He(2015)研究了不同国家的人民对自然灾害的响应情况。本文预测未来50年临汾市各乡镇地震危险性分析结果即各乡镇未来50年发生地震烈度为6、7、8、9、10度的概率分布图。并模拟一次M6.2级地震临汾市房屋建筑可能受到的地震破坏、人员伤亡和经济损失，为制订防灾规划提供依据。

## 2. 地震危险性分析

地震危险性定义为某种大小的宏观烈度或地面运动参数（地面运动加速度、速度和位移）在给定地点上给定时间周期内被超越的概率。与其他自然灾害的分析类似，地震危险性分析由两部分组成：①确定灾害的来源，这里给出地震的大小和空间位置；②确定这些震源在给定位置造成的影响，这里通常是给出由地震造成的地面运动。通常，地震的影响是指对一个给定的地震震源，在一个确定场点造成的地面运动的估计。场点上地面运动被认为受以下三种因素影响：震源、地震波的传播

路径和场地条件。有两种类型的地震危险性分析方法：确定性分析和概率性分析。确定性分析是以确定的数值预测给出场点未来遭遇的地震危险（地震烈度、地震动峰值加速度和速度等）的水平，概率性分析常以超越概率的形式预测给出在未来T年内场点的地震危险（地震烈度、地震动峰值加速度和速度等）。

### 2.1 地震危险性分析的确定性方法

确定性分析方法包括3个基本要素的确定：潜在震源、控制地震和地震危险性。确定性分析的第一步是确定可能影响场点的潜在震源，包括确切研究给出的断层和不甚了解的地质构造，潜在震源可以是点源、线源、面源或体源。在分析中为方便起见，场点与各潜在震源的距离以最短的距离计算。第二步则是选取控制地震，即根据各潜在震源的历史地震活动和地震地质构造特征等资料，确定未来可能期望发生的最大地震。再由这些可能的最大地震中选取控制地震，即选取在场点造成最大地震动的最大地震。第三步则确定。从震源到场点间地震动参数通过传播介质途径的衰减关系。第四步即可根据第三步给出场点的地震动参数。

### 2.2 地震危险性分析的概率性方法

在地震危险性分析的概率性方法中，Cornell方法是最具代表性和使用最为广泛的分析方法。对分析的场点，Cornell方法给出在不同的平均重现周期下超越一定地震动参数（地震烈度或峰值加速度PGA）的概率。Cornell分析方法的第一步与确定性方法的第一步相似，即确定可能影响场点的潜在震源，得到潜源区和场点间的距离分布 $f(r)$ ；但与确定性分析方法不同的是：假定在每一潜在震源区内，给定震级的地震发生在任一地点的可能性相等；地震事件的发生在时间和空间上的分布上是相互独立的，即符合Poisson分布。第二步则是根据各潜在震源的历史地震活动资料，确定

每一个震源的震级与频度关系，由此得到每一震源区的地震震级概率分布  $f(m)$  和可能的最大地震震级。第三步也与确定性方法的第三步相似，即确定从震源到场点地震动参数通过传播介质途径的衰减关系，但有所不同的是：需要考虑衰减关系中的不确定性因素，以及多个潜源不同的最大震级的衰减。第四步则是计算所研究场点的地震危险性概率，即根据 Poisson 分布，可计算出时间  $T$  内地震动参数  $I$  超过某一给定值  $i$  的概率  $P(i)$ ：

$$P(I \geq i) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^N \nu_j \int_{m_0}^{\mu} \int_{r=0}^{\infty} f_i(m) \times f_i(r) P(I \geq i | m, r) dr dm\right)$$

式中的  $\nu_j$  是第  $j$  震源区发生  $m_0 \leq m \leq \mu$  的地震的年平均次数， $P(I > i | m, r)$  为第  $j$  震源区发生震级为  $m$  的地震时，造成场点(距离  $r$ )地震动参数  $I$  超过某一给定值  $i$  的概率。

如果将连续的时间分化为离散的时间增量，假设年与年之间研究场地的年最大地震动参数  $z$  存在统计独立性，而各年的年超越概率保持不变，则根据 Bernoulli 重复独立试验结果，在  $T$  年内地震动参数  $I$  超过

某一给定值  $i$  的概率  $P_T(z)$  为

$$P_T(I \geq i) = 1 - (1 - P(i))^T$$

在震害预测里需要的是概率，因此必须将超越概率换算为概率。所以确定  $T$  年内地震发生的概率公式为：

$$P_T[I = I_k] = P_T[I \geq I_k] - P_T[I \geq I_k + 1]$$

式中  $P_T[I = I_k]$  和  $P_T[I \geq I_k + 1]$  是地震烈度大于等于  $I_k$  和  $(I_k + 1)$  的概率。

本文论述的临汾市位于汾渭地震带，属于华北地震区，见图 1。

### 2.3 临汾市地震危险性分析结果

临汾市各乡镇地震危险性分析结果，即各乡镇未来 50 年发生地震烈度为 6、7、8、9、10 度的概率分布图见图 2-6。

由图 2、图 3、图 4、图 5、图 6 可以看出，随着未来 50 年发生地震的烈度增大，发生高概率的事件越来越集中在临汾盆地。这与临汾盆地历史上的 2 个 7 级以上地震有很大的关系。

### 3. 地震影响场分析

在地震灾害快速评估中所使用的地震

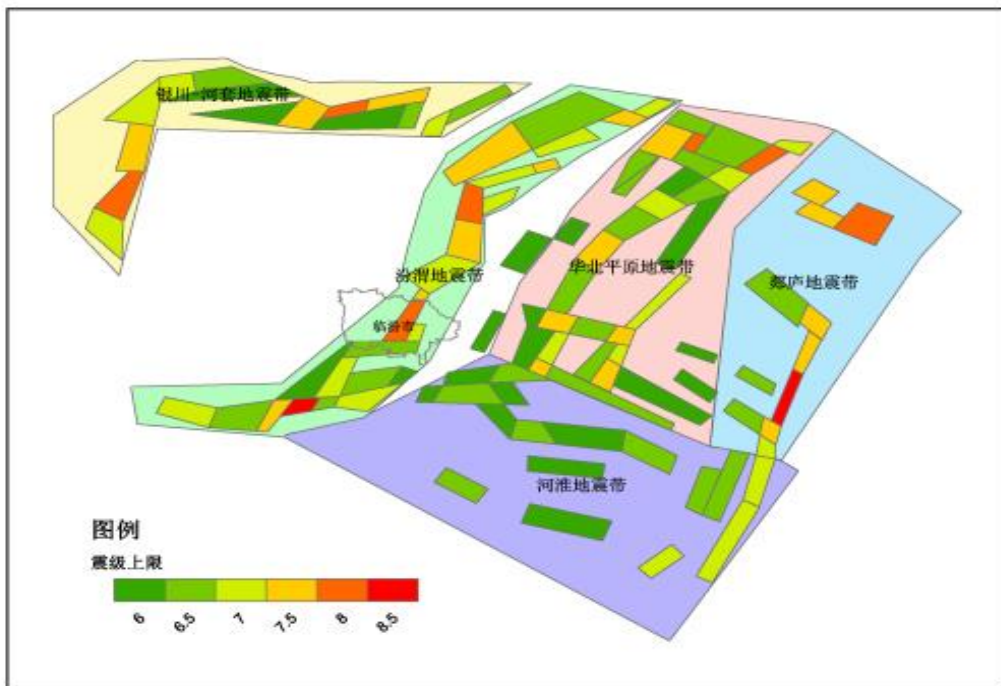


图 1 华北地震区地震带与潜在震源区分布图

危险性输入的基本做法是，以地震台网所测定的地震震中位置、震级，通过地震烈度衰减的经验公式计算烈度的分布。



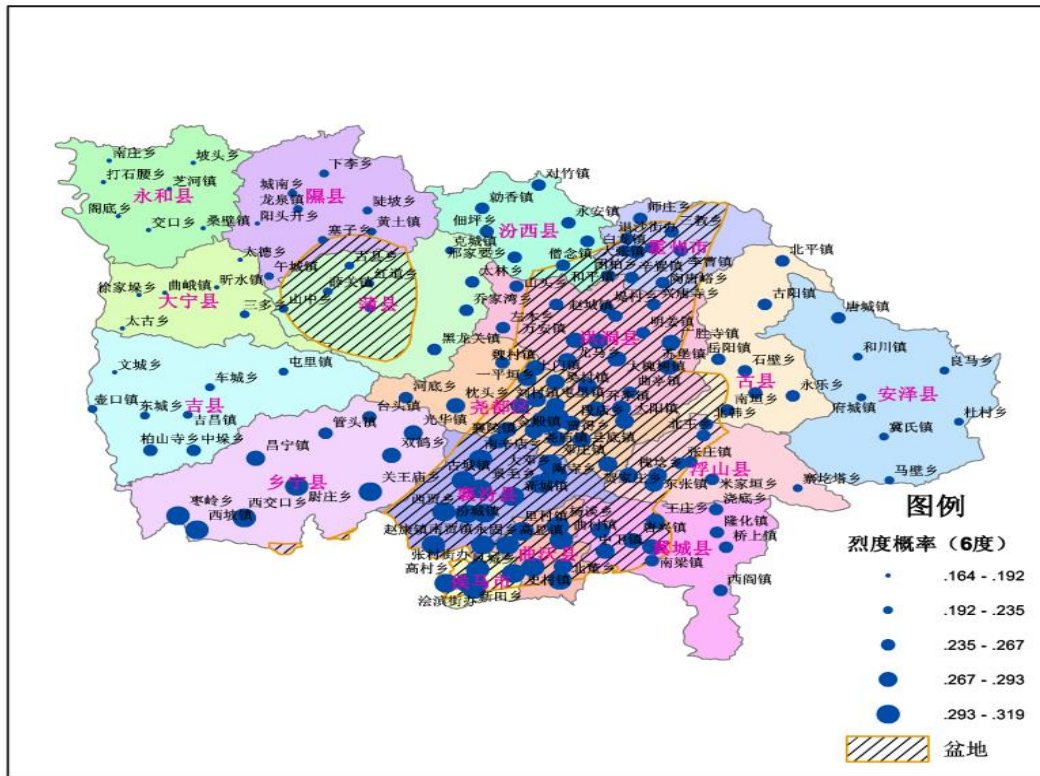


图2 未来50年发生6度地震烈度概率分布图

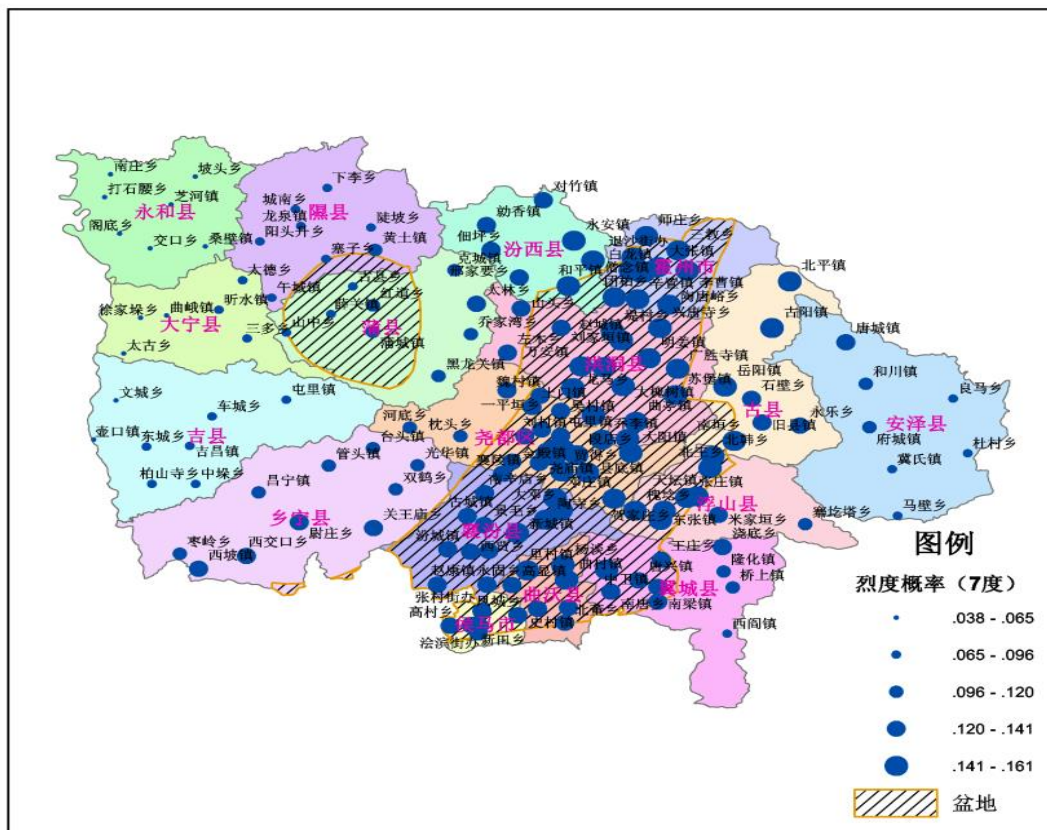


图3 未来50年发生7度地震烈度概率分布图



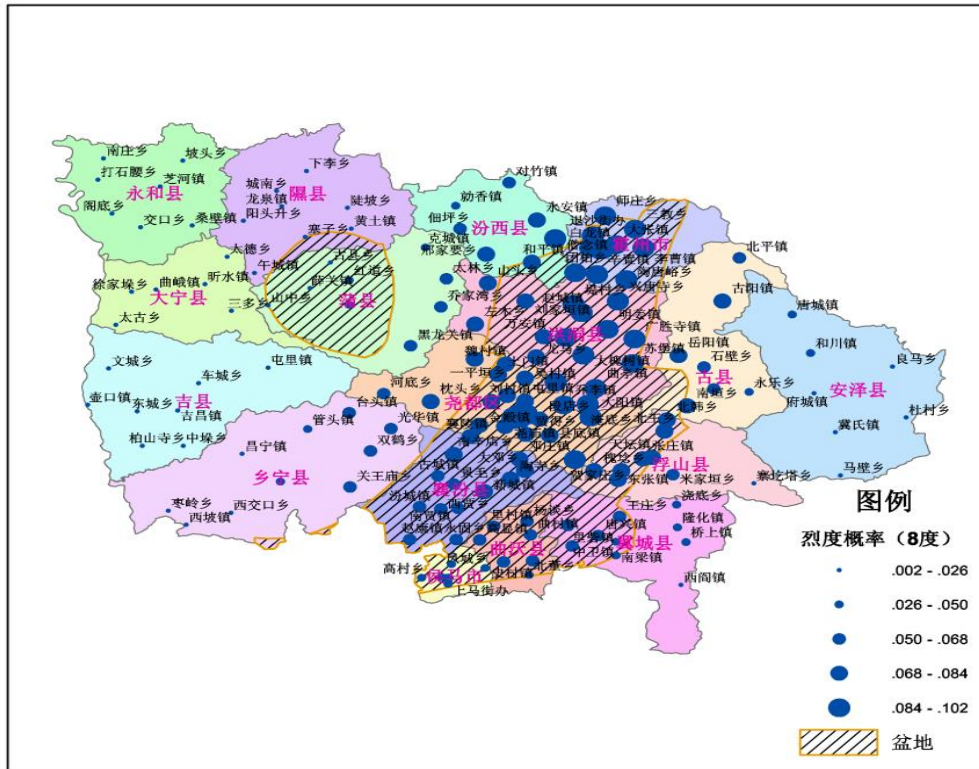


图 4 未来 50 年发生 8 度地震烈度概率分布图

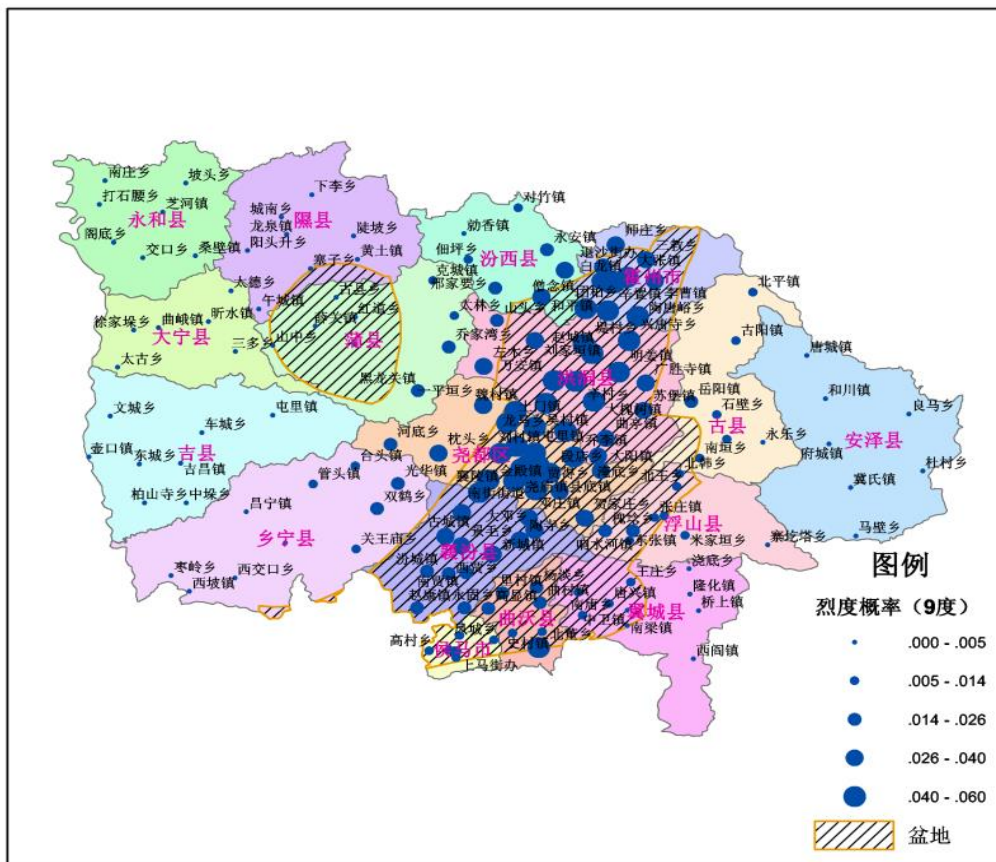


图 5 未来 50 年发生 9 度地震烈度概率分布图



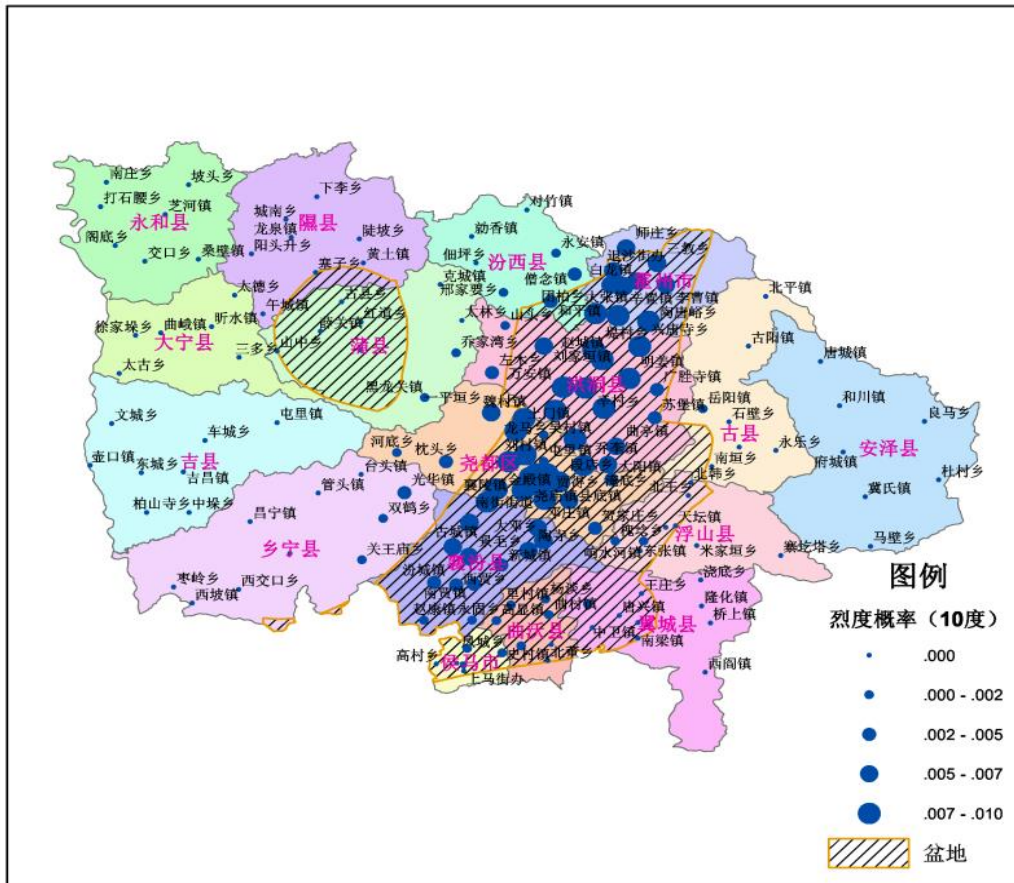


图 6 未来 50 年发生 10 度地震烈度概率分布图

### 3.1 地震烈度衰减关系

地震烈度衰减关系表示方式有两种：等效圆模型和椭圆模型。在已知或未知刚发生地震破裂方向轴的两种情况下可分别使用椭圆或等效圆模型去快速确定地震烈度的分布状况。

可使用的地震烈度衰减关系有：

(1) 等效圆模型（东部地区）

$$I = 4.493 + 1.454M - 1.792 \ln(R + 16) + \varepsilon = 0.5304$$

(2) 椭圆模型

① 东部地区

$$I_a = 5.019 + 1.446M - 4.316 \lg(R + 24) + \varepsilon = 0.5174$$

$$I_b = 2.240 + 1.446M - 3.070 \lg(R + 9) + \varepsilon = 0.5174$$

② 中国东部地区 8-8 $\frac{1}{4}$  级地震各烈度分区半长、短轴

上述公式中， $I_a$  和  $I_b$  沿长轴和短轴方向衰减的地震烈度， $R$  是震中距（公里）， $\varepsilon$  为剩余误差。

考虑到地震地质背景的差异性，本项目基于临汾盆地构造特点主要采用东部地区椭圆模型地震烈度衰减关系。对于椭圆模型，在一次破坏性地震发生之后不久，有时可以由震源机制解了解到地震的破裂方向，有时则不能，这取决于地震波初动或波形资料是否能快速获得；另外，也可以通过当地地震地质条件初步判定。

### 3.2 场地条件对地震烈度的影响

影响地震烈度分布的因素，除了震源特征（地震能量，应力降、破裂类型与方向等）外，还有场地条件。场地条件一般是指局部地表地质条件（地表几百米内的地基地下水埋深，局部地形及地表断裂破碎）。鉴于地震烈度主要是通过自然村里房屋破坏综合评定，而大多数房屋，是建在土层



上，地震烈度值自然是反应土层上地震动强烈的程度。所以，地震烈度衰减是相对土层而言。

对于地震灾害损失评估，假如要评估的震中区及邻近的场地条件较复杂和不均匀，那么就有必要对得到的烈度进行修正。表1是不同场地条件单元相对饱和冲积土的烈度修正(Evernen and Thomson, 1985)。

表1 不同场地条件相对饱和冲积土的烈度修正

地表地质条件	烈度修正 ( $\Delta I$ )
第四纪冲积层(水位>30米)	0.0
第四纪冲积层(水位=9~30米)	1.0
第四纪冲积层(水位<9米)	1.5
沉积岩	0.0~-1.6
火山岩、花岗岩、变质岩	-1.7~-2.0

#### 4. 算例

##### 4.1 地震影响场计算

实时地震地震影响场计算参数为：纬度 36.1、经度 111.5、震级 6.2、破裂方向 35 度，计算得到的等震线见图 7，烈度分区统计见表 2。

表2 中国东部地区 8-8 $\frac{1}{4}$  级地震各烈度分区半长、短轴

烈度分区	X	IX	VIII	VII	VI
半长轴 (km)	37	64	109	182	296
半短轴 (km)	14	28	57	118	253

##### 4.2 建筑物损失评估

利用前面计算得到的地震影响场，对临汾市建筑物的损失进行了快速评估，建筑物损失统计见表 3，建筑物毁坏面积分布图见图 8。

表3 建筑物损失统计表

烈度分区	破坏等级 (平方米)				
	完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
VIII	1781914	565977	352024	188654	97493
VII	10807389	5386248	1824489	1269010	737830
VI	22714510	8390577	2408107	508985	132539
合计	35303813	14342802	4584620	1966649	967862

##### 4.3 人员伤亡评估

利用前面计算得到的地震影响场，对临汾市人员伤亡进行了快速评估，人员伤亡统计表见表 4，人员死亡、受伤、无家可归人数分布图分别见图 9、10、11。

表4 人员伤亡统计表

烈度分区	死亡人数 (个)	伤亡人数 (个)	无家可归人数 (个)
VIII	5	18	15724
VII	72	288	121023
VI	0	6	100268
合计	77	312	237015

##### 4.4 直接经济损失评估

利用前面计算得到的地震影响场，对临汾市直接经济损失进行了快速评估，经济损失统计表见表 5，直接经济损失分布图见图 12。

表5 直接经济损失统计表

烈度分区	房屋建筑损失 (万元)	室内财产损失 (万元)	直接经济损失 (万元)
III	29211	3808	33019
VII	53201	7585	60790
VI	44985	1669	46655
合计	127397	13062	140464

#### 5. 临汾市烈度残差空间分布

利用临汾地震实际影响烈度值和理论影响烈度值得到烈度残差值，烈度残差空间分布图见图 4-6。

## 5.1 震害分布特征的综合分析

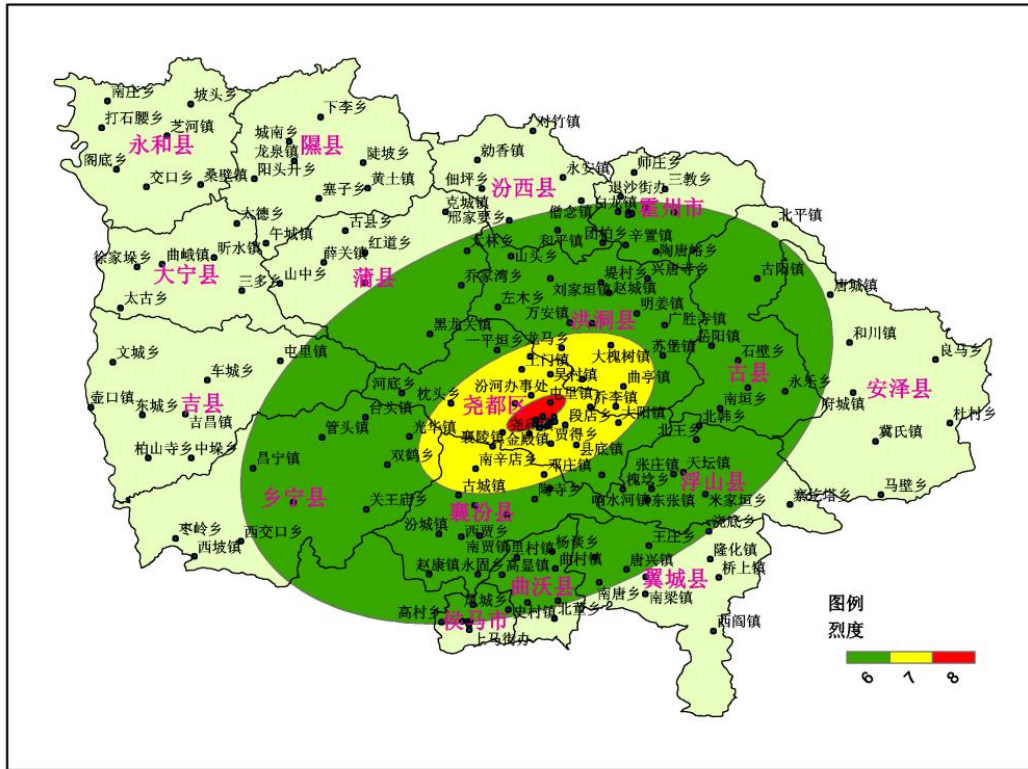


图 7 实时地震等震线图

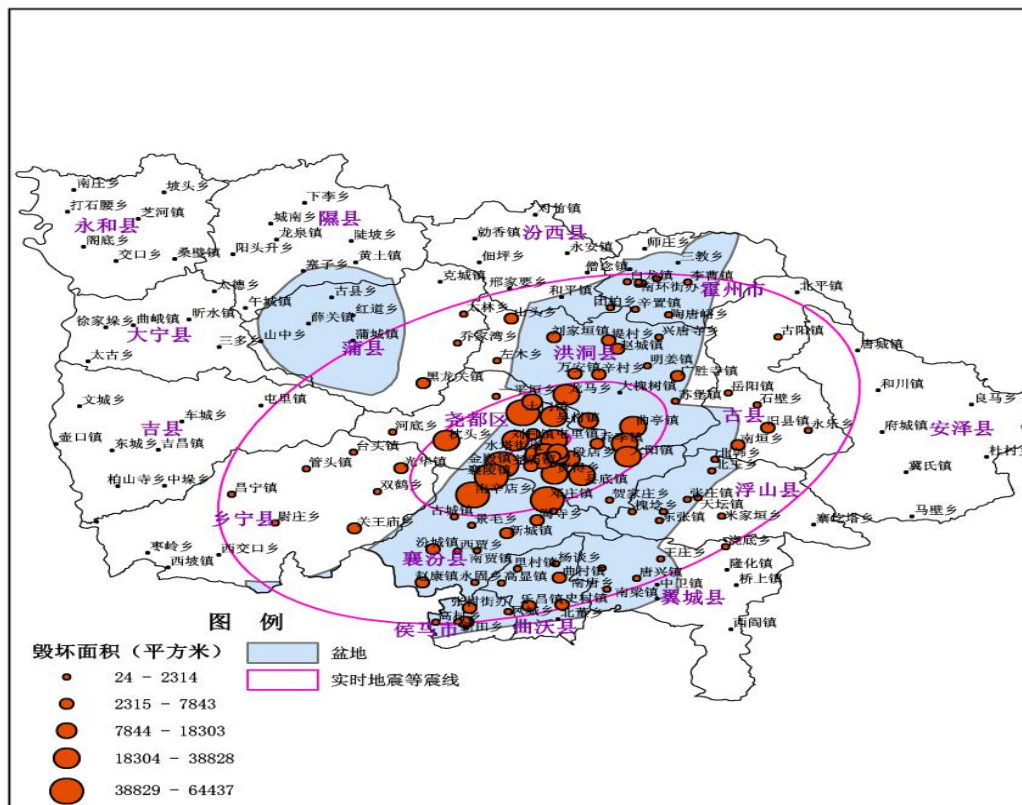


图 8 建筑物毁坏分布图

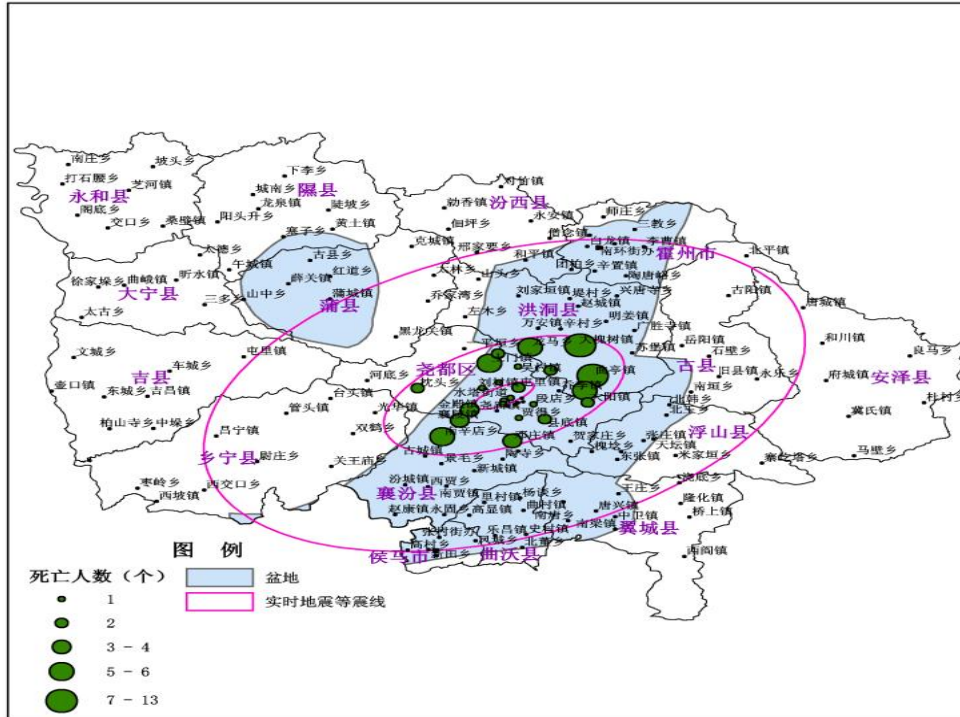


图9 死亡人数分布图

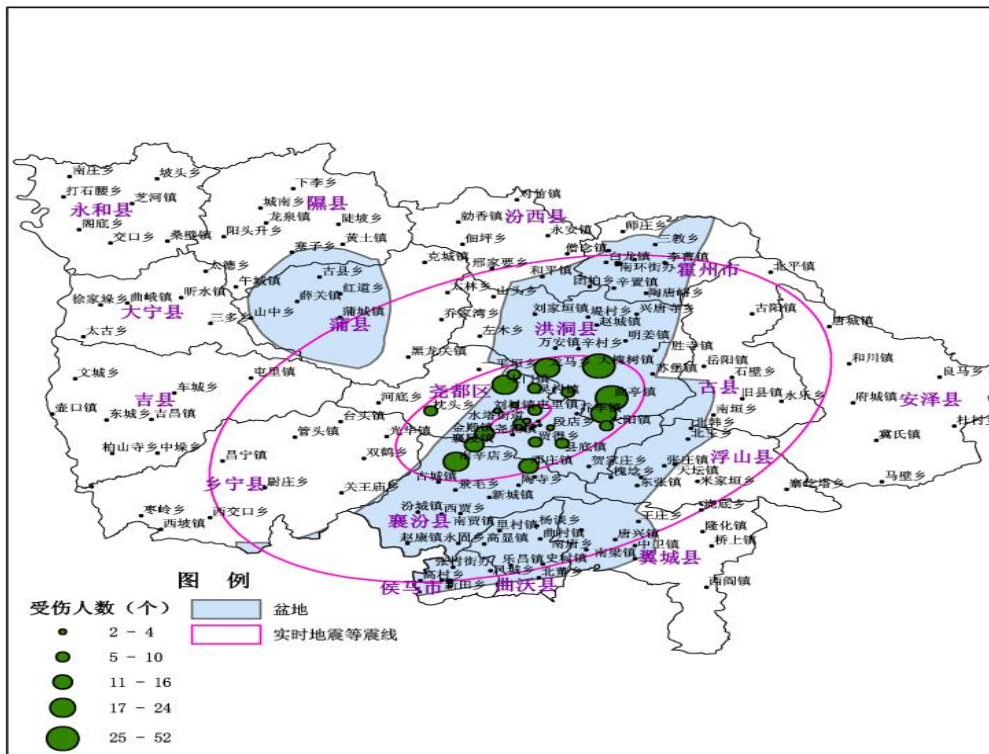


图10 伤亡人数分布图

由烈度残差分布图（图 13）可以看出，本次地震的实际影响烈度值在 24 个乡镇大于理论影响烈度值 1，32 个乡镇的烈度残差值为 -1，见表 6。将烈度残差分布图与盆地分布图叠加后发现，烈度偏大地区恰好是临汾盆

地或临汾盆地的周边。实际烈度等震线在盆地地区沿盆地展布方向被拉长，很明显是盆地效应加大了这些地区的震害。与 1303 年洪洞 8 级地震有类似的现象。



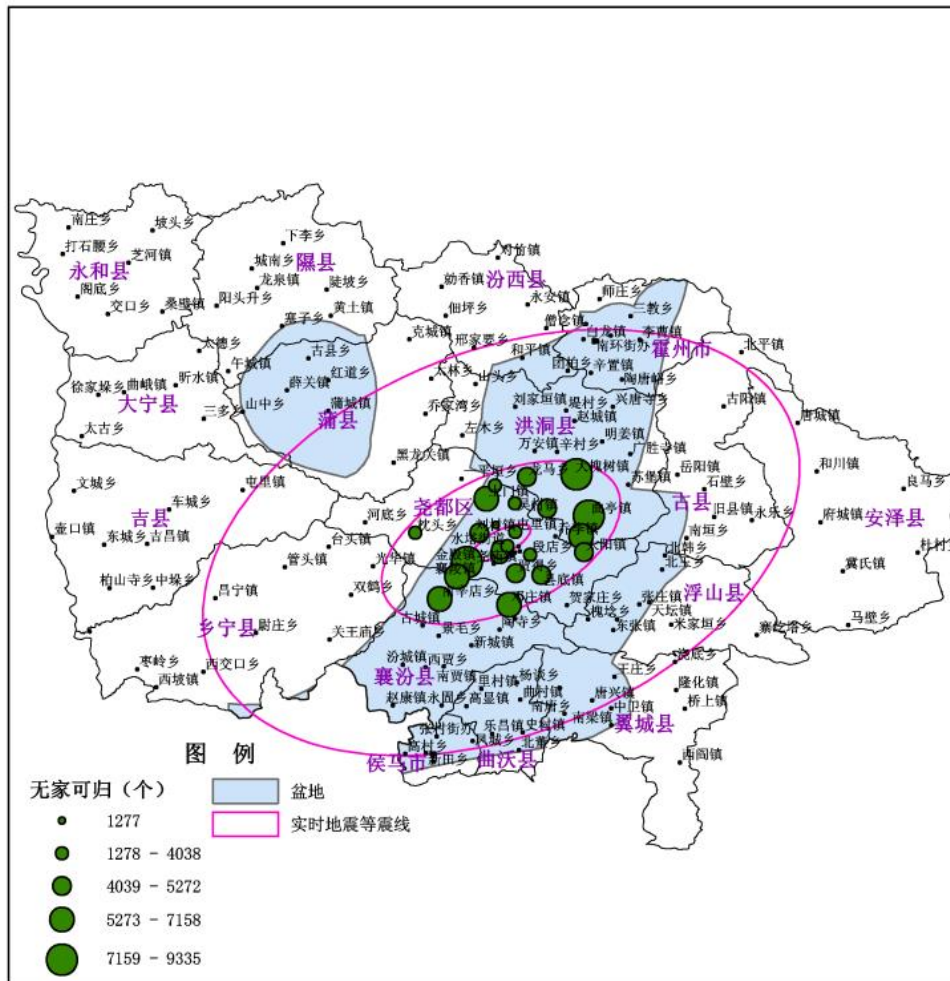


图 11 无家可归人数分布图

表 6 乡镇烈度残差分布

烈度残差值	1	0	-1
乡镇(个)	24	114	32
乡镇百分比	14.1	67.1	18.8

### 5.2 临汾市建筑物抗倒塌情况分析

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)的资料,确定临汾市所有乡镇的抗倒塌烈度  $I_e(a)$  (区划图表示的加速度值的 2 倍所对应的烈度值,对应的烈度值根据建筑抗震规范确定),并作为一个属性赋给这些乡镇。通过开发的软件分析,比较每个数据点的  $I_e(a)$  值  $I_e$  (实际烈度值) 值。将  $I_e > I_e(a)$  的数据点由图 14 给出。

如果 1695 年临汾地震同样大小的地震重演,即使图 14 所示地区的房屋建筑全部按抗震设计规范设计,仍有许多地区不能

保证抗倒塌的要求,即总的乡镇数达到 11 个(见表 7),占乡镇数目的 7%左右。况且广大农村地区对抗震设防国家标准执行的很不理想,如果 1695 年临汾地震重演,仍将有大量的房屋倒塌,这与我国“三级”设防的基本原则是不一致。

表 7 乡镇抗倒塌能力烈度残差分布

烈度残差值	1	0	-1	-2
乡镇(个)	11	37	83	39
乡镇百分比	0.065	0.218	0.488	0.229

### 5.3 临汾市建筑物抗倒塌能力综合分析

用同样方法可以得到洪洞地震抗倒塌能力分布图 15。将图 15 和图 14 进行叠加,以分析 1303 年洪洞地震或 1695 年临汾地震同样大小的地震发生时,实际的等震线与抗震设计规范大震设防烈度的差值,差值

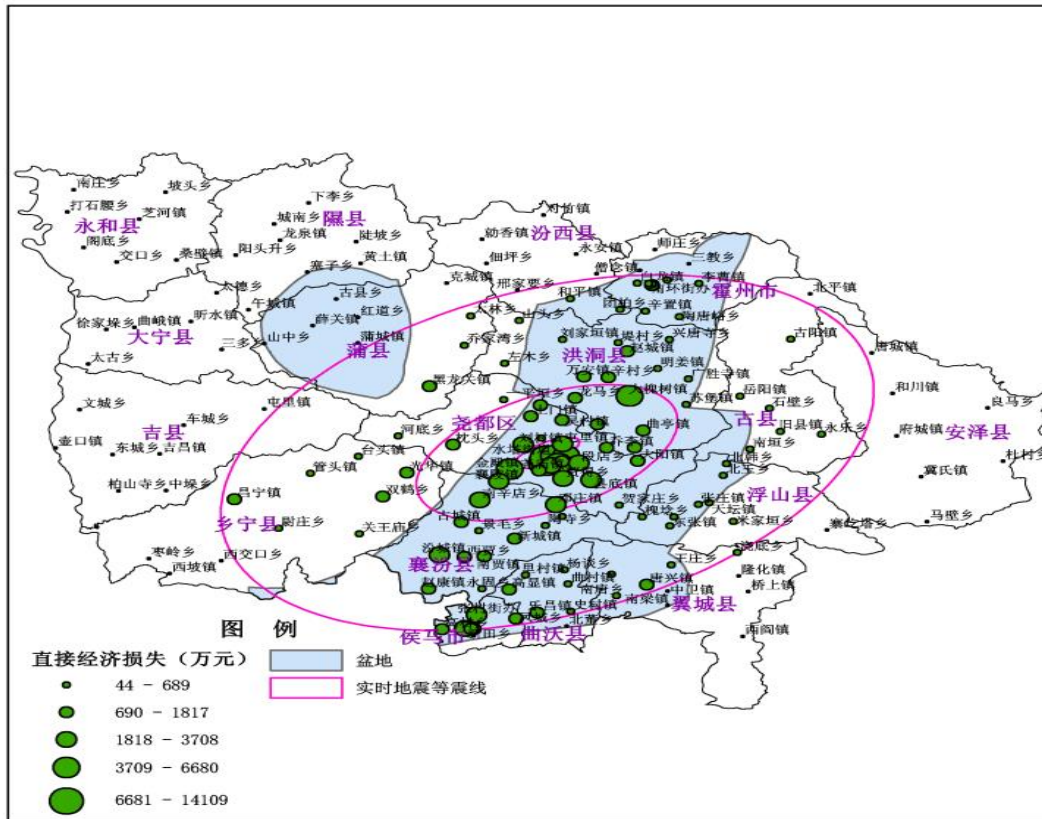


图 12 直接经济损失分布图

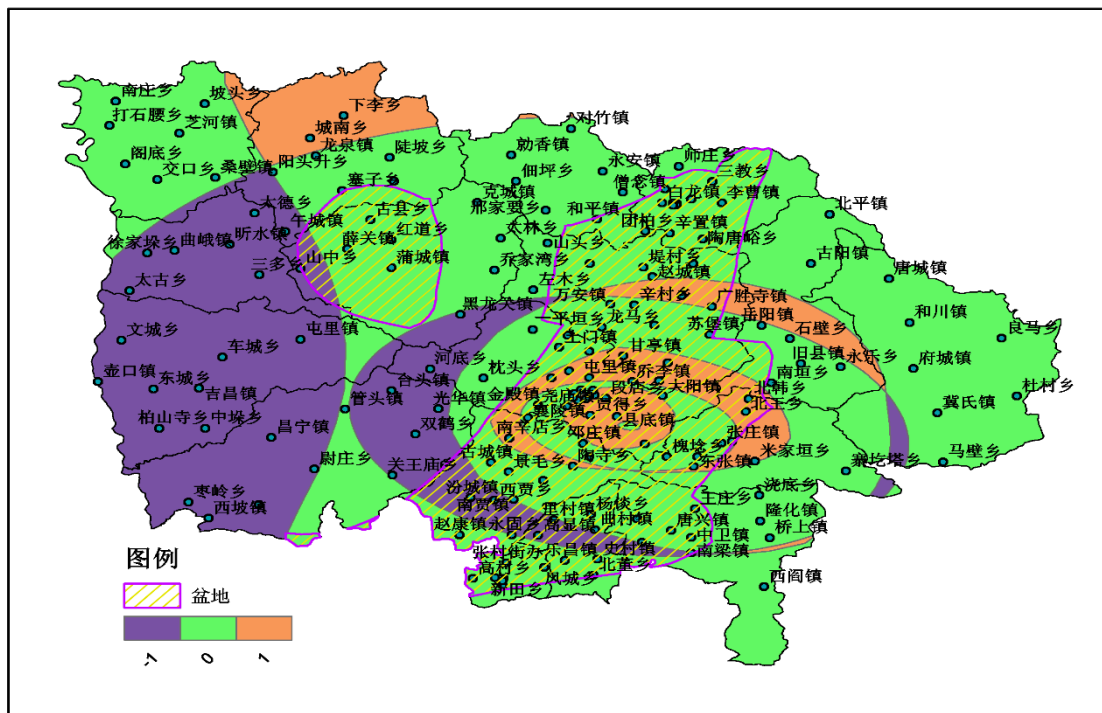


图 13 烈度残差空间分布图

结果见图 16，乡镇抗倒塌能力烈度残差分布见表 8。

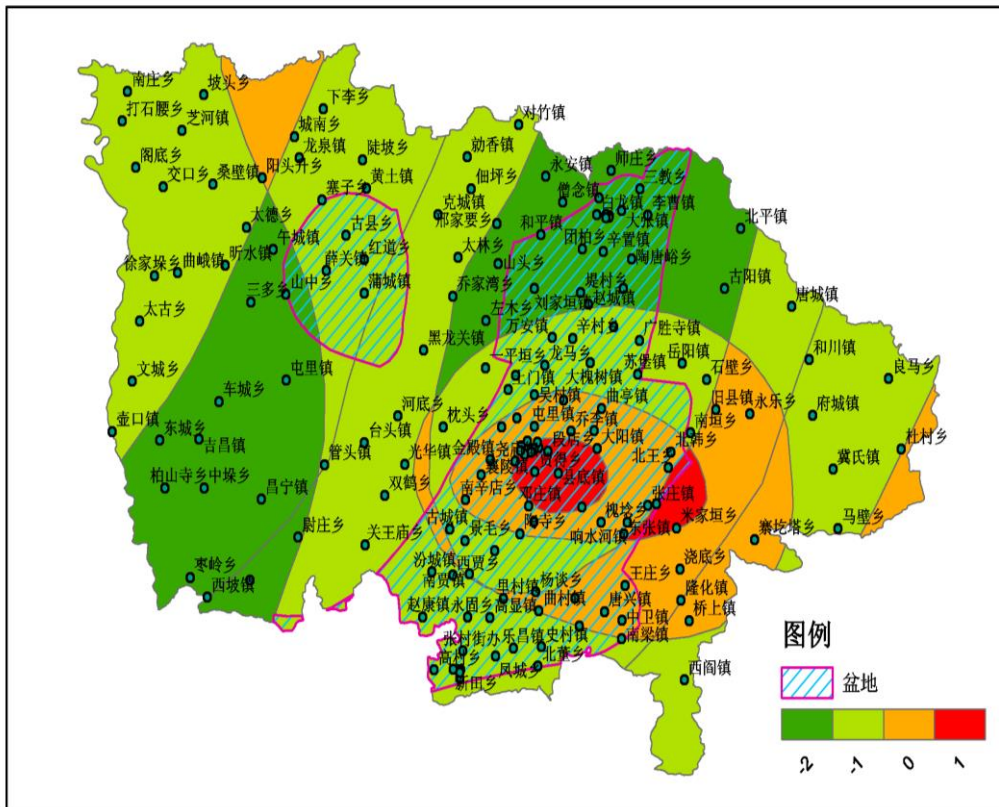


图 14 类似临汾地震抗倒塌能力分布图

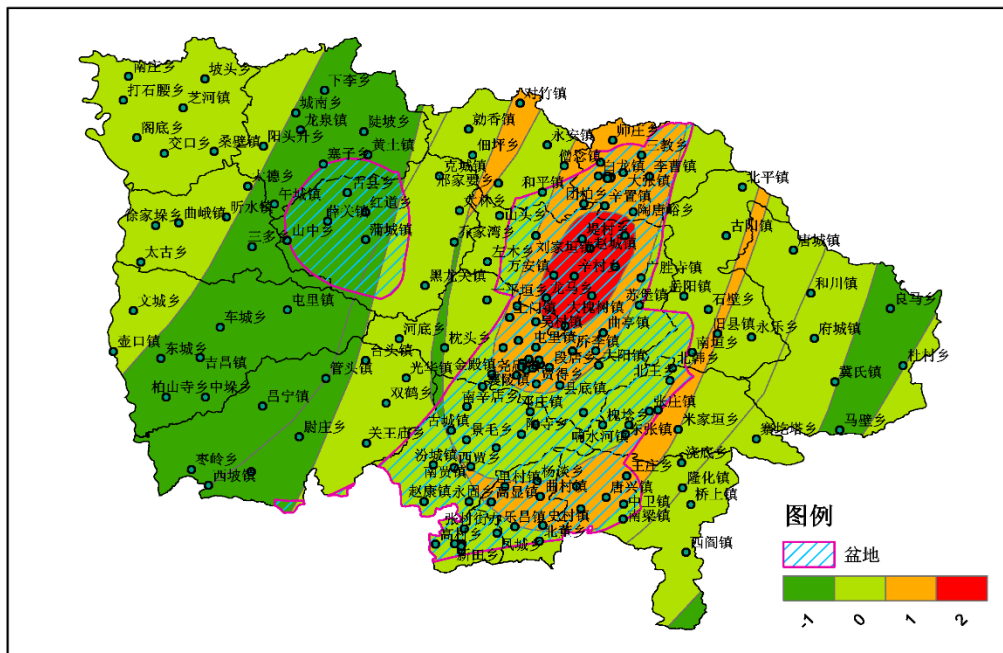


图 15 类似洪洞地震抗倒塌能力分布图

如果 1303 年洪洞地震或 1695 年临汾地震重演，即使图 16 所示地区的房屋建筑全部按建筑抗震设计规范设计，仍有许多地

区不能保证抗倒塌的要求，即总的乡镇数达到 61 个（总乡镇数目为 170 个），占乡镇数目的 36%。



表 8 乡镇抗倒塌能力烈度残差分布

烈度残差值	2	1	0	-1
乡镇(个)	9	52	92	17
乡镇百分比	0.053	0.306	0.541	0.100

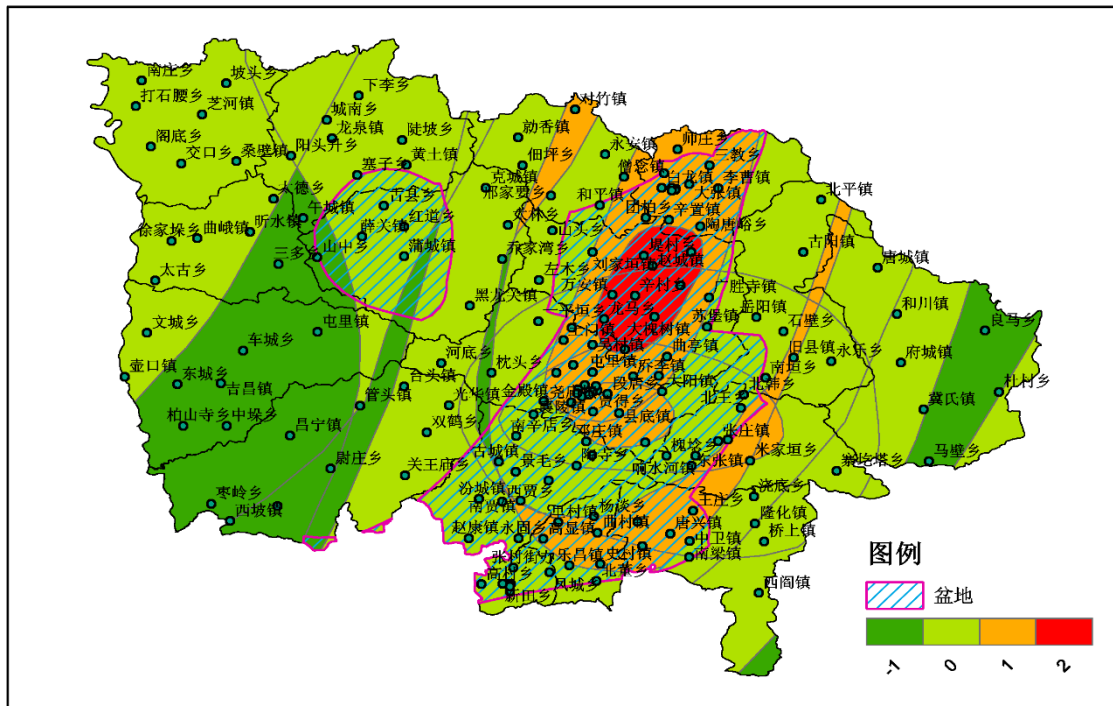


图 16 综合抗倒塌能力分布图

## 6. 结论

临汾盆地位于鄂尔多斯东南缘,历史上发生过两次 7 级以上地震,依据概率分析随着未来 50 年发生地震的烈度增大,发生高概率的事件越来越集中在临汾盆地。地震烈度的计算必须充分考虑场地条件的影响,复杂和不均匀的场地必须进行烈度修正。通过利用改进的衰减关系快速进行地震烈度评估以指导救灾,最终评价临汾地区在遭受类似 1303 年洪洞地震或 1695 年临汾地震时,整个城市的综合抗倒塌能力。

## 参考文献

[1] 白仙富,戴雨茨,赵恒.地震影响场应急评估方法研究.自然灾害学报,2014.23(4):91-102.  
 [2] 陈颢等.地震危险性分析和震害预测.地震出版社,1999.

[3] 高孟潭,金学申,安卫平等.1303 年洪洞 8 级地震 GIS 系统与震害分布特征分析.地震学报.2004.26(4):363-368.  
 [4] 李昌珑,徐伟进,吴健等.使用新模型的巴颜喀拉块体东部的概率地震危险性分析.地球物理学进展,2016.31(6):2370-2379.  
 [5] 马宗晋等.山西临汾地震研究与系统减灾.地震出版社,1993.  
 [6] 彭艳菊,吕悦军,徐杰等.渤海地区地震危险性特征及对工程抗震设防的启示.地球物理学进展,2012.27(1):18-28.  
 [7] 周中红,何少林,陈文凯等.甘肃地区地震烈度影响场计算模型参数的改进研究与应用.震灾防御技术,2011,6(2):180-189.  
 [8] Zhongyu He. Spatial Effect on Public Risk Perception of Natural Disaster: a Comparative Study in East Asia. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2015, 5(3):161-168.