

地震数据分析平台的模型建立

摘要 长久以来,预测地震一直是世界性难题,但迄今科学界普遍认为,有可能反映地震前兆特征的指标不少于 10 个。已经有专业仪器在多个定点实时按秒记录这些指标的数据,期望通过对记录数据的分析研究找到地震的前兆特征。

本文利用从 2013 年 1 月 1 日至 2018 年 6 月 30 日按小时记录的、涉及 12 个变量的数据,以及 7 条该地区(陕西省西安市附近)地震的记录,试图找寻到预测地震发生概率,以及预测震级、震源深度的方法。

针对问题一: 首先引入 0-1 变量刻画地震发生与否。为与“地震记录”这样较少的数据量相匹配,本文从题目原始数据中随机抽取了 125 条记录,极大地压缩了数据量。其次,利用二分类 Logistics 回归模型进行拟合,每次进入一个变量,利用模型检验的显著性刻画变量预测地震发生的敏感度。最终,12 个变量按照敏感度从大到小排序为:电磁波幅度 EW>气压>气温>地温>电磁波幅度 NS>倾斜仪 EW>水温>雨量>水位>气氦>倾斜仪 NS>电压。筛选出前五个变量,它们的敏感度分别为 0.983, 0.987, 0.971, 0.924, 0.922。

针对问题二: 首先,利用问题一中筛选出的 5 个变量,进行主成分分析,得到 3 个实际含义深刻、且相关性较弱的主成分,分别代表电磁波幅度、气候条件、地温。利用这三个主成分构造综合评价模型,得到 7 次地震的综合评价值分别为 0.35、0.34、0.01、-0.08、0.43、0.38 以及 0.08。综合评价值呈现着明显的季节性波动,意味着地震与季节相关。最后,利用综合评价值和模糊数学的隶属度函数刻画地震发生的可能性大小,得到了 $a = 0.204285$, $\sigma = 0.418204$ 的高斯型、偏小型函数。

针对问题三: 首先,通过广泛收集相关资料,修正问题一中选入的变量。利用 Wilcoxon 秩和检验,认为气氦在地震前不同阶段的方差存在极大的差异,故将气氦重新纳入考虑范围。其次,为了有效截取数据片段、确认研究的时间范围,本文设计了一个流程图,以波动幅度为衡量标准,有效地截取了地震前电磁波幅度 EW 的数据。并且截取片段的波动幅度能够有效预测震源深度:

$$depth = 18931.56 - 3431.637 * \ln(\xi_i).$$

针对问题四: 首先,利用前文涉及到的有效变量,构建震级的回归模型:

$$magnitude = 2.481 + 5.836 * \text{电磁波幅度 NS} - 0.946 * \text{气氦}.$$

其次,将前文涉及到的各个模型逻辑自洽地进行集结,成为“地震数据分析平台”。通过流程图可知,在输入满足特定要求的数据后,首先“平台”会从内因和外因两个角度出发,进行地震发生概率分析;当通过概率分析,即被认为可能发生地震后,平台会根据回归模型输出预测的震级、震源深度,最终给出地震预测的报告。

此外,本文在最后给出了模型的评价与改进的方向。

关键词 地震; 二分类 Logistic 回归; 主成分分析; 隶属度函数; 仿真

1. 问题的重述

地震是地壳快速释放能量过程中造成的振动，期间会产生地震波的一种自然现象。据统计，地球上每年约发生 500 多万次地震，即每天要发生上万次的地震。其中绝大多数太小或太远以至于人们感觉不到，但真正能对人类造成严重危害的地震大约有一、二十次，对人类危害巨大。

虽然预测地震目前仍是世界性难题，但迄今科学界普遍认为，有可能反映地震前兆特征的指标不少于 10 个。

附录中是采集到的某地 2013 年 1 月 1 日至 2018 年 6 月 30 日按小时观测的 10 多个指标的数据，和该地区该时期内已发生地震的时刻、经纬度、震级及震源深度的数据。这些数据中隐藏着地震发生的前兆特征。科学地截取这些数据的有用片段，对数据进行合理地预处理，用数学方法揭示地震前兆的数据特征，是一项很有意义的研究工作。

现有以下四个任务：

任务一：分析数据特征，建立数学模型以度量各指标对地震发生的敏感程度；

任务二：构造由某些或全部指标构成的综合指标体系，使其尽可能地集中反映地震发生前的数据特征的统计规律；

任务三：结合题给数据，广泛查阅与地震相关的其它指标的数据和分析方法，建立数学模型来研究地震发生前的数量特征；

任务四：将上述各项任务的计算程序集结成一个“地震数据分析平台”，使其能够完成形如所给数据的其它地震数据的分析，并能自动输出上述任务的重要的分析结果。

2. 问题的分析

在题目所给原始数据中，有 12 个可能与地震发生相关联的变量，以及从 2013 年 1 月 1 日直至 2018 年 6 月 30 日按小时测量的数据。除此之外，题目还给出了该地区从 2013 年开始 7 次地震记录，包括地震的具体时间、经纬度、震级和震源深度。需要从这两部分数据中提取有用的信息，找到它们之间的关联。

2.1 问题（1）的分析

问题（1）要求分析数据特征，建立数学模型以度量各指标对地震发生的敏感程度。首先，为了刻画地震发生与否，引进了 0-1 变量；其次，考虑到相较于 12 个指标的数据，地震记录数量过少，故通过随机抽样的方式，产生了一个由 125 个观测组成的新数据集；最后，通过二分类 Logistics 回归模型，逐个引入变量分析显著性，从而得以度量个指标对地震发生的敏感程度。

2.2 问题（2）的分析

问题（2）要求构造由某些或全部指标构成的综合指标体系，使其尽可能地集中反映地震发生前的数据特征的统计规律。

问题（2）着重于刻画各个指标的综合反映能力。首先，选取问题（1）中

挑选出的敏感变量，进行主成分分析，找出2~3个能够包含各个变量特点而又互不相关的主成分，从而压缩数据信息。其次，对各个主成分赋予权重，进行求和，构造综合评价指标，并画出综合评价指标的时间序列图，找寻其中的统计规律。最后，引入模糊数学中的隶属度函数，根据综合评价指标预测地震发生的可能性大小，为指标体系带来实际的价值。

2.3 问题（3）的分析

问题（3）要求结合题给数据，广泛查阅与地震相关的其它指标的数据和分析方法，建立数学模型来研究地震发生前的数量特征。

相较而言，问题（2）注重反应整体指标的变化对地震发生的反映程度，而问题（3）则侧重于对各个指标分别进行数量特征的分析。

首先，需要广泛查阅资料，不仅包括地震本身的资料，还包括题目所给的原始变量、指标的资料。在此基础上，对问题（1）中得到的结论进行修正，重新引入新的变量。其次，对新引入的变量的特征进行分析，通过统计学检验得出结论。然后，对原本模型已有的变量进行更加深入的分析，通过流程图的方式，合理截取数据的有用片段，研究时间序列的结构和波动的趋势。最后，利用对时间序列波动所得到的数据，对震级、震源深度进行拟合，找寻它们之间的联系。

2.4 问题（4）的分析

问题（4）要求将上述各项任务的计算程序集成为一个“地震数据分析平台”，使其能够完成形如所给数据的其它地震数据的分析，并能自动输出上述任务的重要的分析结果。

首先，确认震级和震源深度这两个变量，已经找寻到与题目所给原始数据中的12个变量之间的关系。其次，将上述问题（1）至问题（4）中所建立的模型，以流程图的方式、逻辑自洽的结合在一起，搭建成“地震数据分析平台”，提供综合性的信息与预测。

3. 模型的假设与符号的说明

3.1 模型的假设

- （1）题目所给数据真实可靠，能够有效反映地质信息；
- （2）地震与各项指标的动态变化相关联，而非与各项指标的稳态相关联。

3.2 符号的说明

表 1 符号的说明

符号	说明
t	时间
x_1	电磁波幅度 EW
x_2	气压
x_3	气温
x_4	地温
x_5	电磁波幅度 NS
x_6	电压
x_7	水位
x_8	水温
x_9	气氦
x_{10}	雨量
x_{11}	倾斜仪 NS
x_{12}	倾斜仪 EW
y	综合评价值
$magnitude$	震级
$depth$	震源深度

4. 模型的建立、求解与分析

4.1 问题（1）模型的建立、求解与分析

根据题目所给数据，能够获知 2013 年 1 月 1 日至 2018 年 6 月 30 日陕西省西安市附近地区的电压、电磁波幅度 EW、电磁波幅度 NS、地温、水位、气温、气压、水温、气氦、雨量、倾斜仪 NS 和倾斜仪 EW 共 12 个变量的具体信息；同时，可以获知该地区在 2013 年至 2017 年这一时间段内发生的 7 次地震信息，包括地震时间、地震经纬度、震级以及震源深度。

4.1.1 数据的预处理

经过对数据的查找，发现部分原始数据存在异常。本文采用均值替换法，将异常数据剔除，利用发生异常值当天剩余的 23 数据的均值进行填补：

$$x_m = \frac{1}{23} \sum_{k=1, k \neq m}^{24} x_k, m = 1, 2, \dots, 24$$

其中， x_m 为填补值。

4.1.2 利用二分类 Logistics 回归模型的变量筛选

原始数据中的 12 个变量中，并非所有的变量都与地震的发生相关联。首先，引入 0-1 变量 y 作为因变量，用以刻画地震发生与否。由于地震发生时刻并不是整点，而原始数据全部为整点数据；考虑到地震发生时刻前后的数据相似性较大，

且存在一定的连续性，故将地震发生时刻前后整点的观测全部记为 $y = 1$ 。例如，2013 年 11 月 2 日 15: 11 分发生地震，那么就将 2013 年 11 月 2 日 15: 00 的观测和 2013 年 11 月 2 日 16: 00 的观测全部记为 $y = 1$ 。

其次，为了反映某一个变量对于地震发生预测的有效性，采用二分类 Logistics 回归模型进行检验。根据题目数据，仅有 7 条地震记录，将地震时间前后整点全部记为 $y = 1$ 后，也仅仅只有 14 条观测；因此，二分类 Logistics 回归的总样本量不应过大。

基于此，采用随机抽样的方法，在 2013~2017 年各年数据中随机抽取被记为 $y = 0$ 的观测。最终，得到一个每年 25 条观测，共 125 条观测的数据集（见附件 A.1），用以进行 Logistics 回归拟合。

考虑到不同变量之间可能存在较高的相关性，在对多个变量同时回归时，易产生多重共线性，导致无法有效检验每一个变量的实际效果；故采取每次引入一个变量的方法进行回归：

$$\pi = P(Y = 1|X_i = x_i) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_i}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_i}}, i = 1, 2, \dots, 12$$

通过 Logit 变换，Logistic 回归模型的参数问题转换为拟合线性模型的参数问题，采用极大似然法估计参数。利用统计分析软件 SPSS 进行拟合。

在每次仅进入一个变量的情况下，对模型整体的显著性检验就等价于对单个系数的显著性检验。以检验后得到的 p-value 为依据，进行筛选。

表 2 各个变量检验的 p-value

变量	电压	电磁波幅度 EW	电磁波幅度 NS	地温	水位	气温
p-value	.817	.017**	.078*	.076*	.597	.029**
变量	气压	水温	气氮	雨量	倾斜仪 NS	倾斜仪 EW
p-value	.022**	.412	.722	.430	.773	.260

以 p-value 为依据进行检验时，p-value 越小，说明变量效果越显著，对于预测地震是否发生的敏感性越强。根据表 2，各个变量的效果从大到小依次为：

电磁波幅度 EW>气压>气温>地温>电磁波幅度 NS>倾斜仪 EW>水温>雨量>水位>气氮>倾斜仪 NS>电压。

当显著性水平取 0.05 时，筛选出的变量为①电磁波幅度 EW；②气压；③气温。

当显著性水平取 0.1 时，筛选出的变量为①电磁波幅度 EW；②气压；③气温；④地温；⑤电磁波幅度 NS。

考虑到地震的发生与否，往往很难通过较少的变量准确反映，需要多个变量共同刻画。因此，这里倾向于选取较多的变量，故以 0.1 为显著性水平，得到电磁波幅度 EW、气压、气温、地温以及电磁波幅度 NS 这五个变量，分别记为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 以及 F_5 。

4.1.3 敏感度的计算

由于对二分类 logistics 回归模型进行检验时，得到的 p-value 为“极小型”指标，即越小越有利。在计算敏感度时，为符合“越大越敏感，越大越有利”的

常理，对数据进行处理：

- (1) 记第 i 个变量的 p-value 为 p_i ；
- (2) 进行平移变换，定义敏感度 $p'_i = 1 - p_i$ ；

从而，各个变量的敏感度为

表 3 基于二分类 Logistics 回归的各个变量的敏感度

变量	电磁波幅度 EW	气压	气温	地温	电磁波幅度 NS	倾斜仪 EW
敏感度 p'_i	0.983	0.978	0.971	0.924	0.922	0.74
变量	水温	雨量	水位	气氮	倾斜仪 NS	电压
敏感度 p'_i	0.588	0.57	0.403	0.278	0.227	0.183

4.2 问题（2）的模型的建立、求解与分析

4.2.1 主成分分析

对于地震发生而言，虽然每种指标在成因上互不相同，但是不同的指标之间往往具有相关性，其产生的原因是有潜在的因素对地震的各项指标起支配作用。为了找到这些潜在因素以及相应的支配作用，本文选用主成分分析法对这些问题进行解决。

鉴于问题（1）中对各个变量的有效性进行了筛选，故问题（2）中使用 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 以及 F_5 进行主成分分析。

首先，为消除不同变量的量纲的影响，首先需要对变量进行标准化集中处理：

$$\tilde{F}_{ij} = \frac{F_{ij} - \bar{F}_i}{s_i}$$

其中 \bar{F}_i 和 s_i 分别为 i 指标的均值和标准差。

其次，计算标准化数据的相关系数阵，求出相关系数矩阵的特征值和特征向量。

记第 i 个指标与第 i' 个指标的相关系数为 $r_{ii'}$ ，其计算方法为

$$r_{ii'} = \frac{\sum_{k=1}^{27} \tilde{F}_{ik} \tilde{F}_{i'k}}{5 - 1}, \quad i, i' = 1, 2, \dots, 27$$

则相关系数矩阵为 $R = (r_{ii'})$ ，其中， $r_{ii} = 1$ ， $r_{ii'} = r_{i'i}$ 。

然后，计算特征值与特征向量。

计算相关系数矩阵 R 的特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_5 > 0$ ，及其对应的特征向量

$\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_5$ ，其中 $\eta_i = (\mu_{1i}, \mu_{2i}, \dots, \mu_{5i})^T$ ，由特征向量组成 5 个新的指标变量：

$$\begin{cases} Y_1 = \mu_{11} \tilde{F}_1 + \mu_{21} \tilde{F}_2 + \dots + \mu_{51} \tilde{F}_5 \\ Y_1 = \mu_{12} \tilde{F}_1 + \mu_{22} \tilde{F}_2 + \dots + \mu_{52} \tilde{F}_5 \\ \dots \\ Y_5 = \mu_{15} \tilde{F}_1 + \mu_{25} \tilde{F}_2 + \dots + \mu_{55} \tilde{F}_5 \end{cases}$$

其中, Y_i 为第 i 主成分。

利用 SPSS 统计软件, 首先求得各个变量的相关性系数表 (见附件 A.2), 从表中可以发现, 某些指标具有很强的相关性。如果直接用这些变量对地震指标进行分析, 不仅会使得运算量过大, 同时还会造成信息的重叠。而主成分分析可以把多个变量转化成少数几个不相关的综合指标。

最后, 得到 3 个主成分, 它们的特征值和累计贡献率如下表:

表 4 主成分的特征值和贡献率

主成分	特征值	方差贡献率%	方差的累计贡献率%
1	2.320	42.006	42.006
2	1.590	34.684	76.691
3	0.927	20.054	96.745

3 个主成分为 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 , 这 3 个主成分提供了关于地震变量的 96.745% 的信息, 满足主成分分析原则。同时还可以看到, 主成分 1 和 2 的累计贡献率较大, 这就可以解释为主成分 1 和主成分 2 可能是较为重要的指标。

同时, 给出了各个主成分关于 5 个变量的系数 μ_{ij} , 如下表所示。

表 5 主成分关于变量的系数矩阵

	成份		
	1	2	3
电磁波幅度 EW	.987	.079	-.018
电磁波幅度 NS	.987	.067	.013
地温	-.002	.096	.995
气温	-.130	.959	.093
气压	-.368	-.891	-.052

从中可以看出, 主成分 1 主要解释了电磁波幅度 EW 和电磁波幅度 NS, 可以记为“电磁波幅度成分”; 主成分 2 为主要解释了气温和气压, 而这主要和气候变换相联系, 可以记为“气候成分”; 而主成分 3 则主要解释了地温, 可以记为“地温成分”。

4.2.2 综合评价指标的构建

在建立关于地震的综合评价指标时, 考虑赋予上述三个主成分不同的权重, 从而将三个指标“合成”为一个值, 寻找其中的统计规律。

这里, 不妨以三个主成分的贡献度为权重, 并进行归一化处理, 得到

$$w_1 = 0.4342, w_2 = 0.3585, w_3 = 0.2073.$$

从而可以构造综合评价值

$$y = \sum_{k=1}^3 w_k Y_k.$$

表 6 7 次地震的综合评价值

序号	地震 1	地震 2	地震 3	地震 4
综合评价值	0.35	0.34	0.01	-0.08
序号	地震 5	地震 6	地震 7	
综合评价值	0.43	0.38	0.08	

做出以时间为横坐标，综合评价值为纵坐标的散点图，其中 7 条纵参考线代表的是 7 次地震发生的时刻。

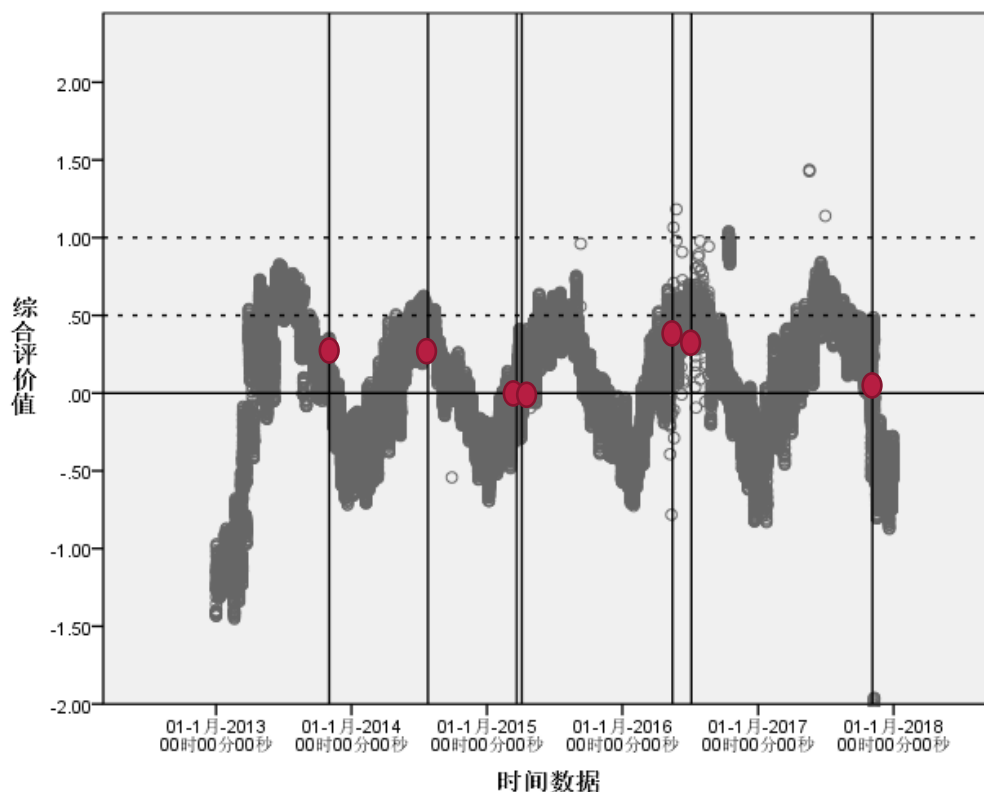


图 1 综合评价值的时间序列

从上图可以看出，综合评价值呈现明显的规律性特征：

- （1）综合评价值呈现波浪线波动的趋势；
- （2）观察对应的横坐标，不难发现，波浪线的波谷对应着每年年初，波峰对应着每年年中；
- （3）地震发生时，综合评价值基本处于两个位置上，①0 附近，②0.375 沿线；而且位置①和位置②上发生地震的频率相近。

考虑到综合评价值时间序列的形态，几乎可以断定，其与季节存在着密切的联系。事实上，主成分 2（“气候成分”）以及主成分 3（“地温成分”）都是与季节产生密切联系的，从而导致了最后的综合评价指标与季节联系密切。

经过统计，发生在春秋季节的地震为 5 次，而发生在夏季的地震为 2 次，没有地震发生在冬季。所以可以认为，春秋季节更易发生地震，夏季也会发生地震；而冬季则不易发生地震。

4.2.3 基于隶属函数的地震发生可能性

当利用模糊数学中的隶属度函数,对地震发生可能性进行定量描述时,需要考虑这样几个方面:

- 1) 当地震发生的可能性最大时,综合评价值应位于(0,0.5)之间;
- 2) 综合评价值位于位置①和位置②时,地震发生的可能性应相似;
- 3) 当综合评价值超过 0.5 时,地震发生的可能性迅速下降;
- 4) 暂不考虑综合评价值小于-0.1 的情况。

从而,利用高斯型隶属度函数,构造地震发生概率与综合评价值的关系:

$$P(y) = \begin{cases} e^{-\frac{(y-a)^2}{\sigma^2}}, & y \geq -0.1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

首先,确定 a 的值。为了保证综合评价值位于位置①和位置②时,地震发生的可能性应相似,取 $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = 0.204285$ 。

其次,确定 σ 的值。令 $P''(y) = 0$,得到拐点 $(a - \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma, e^{-\frac{1}{2}})$ 。当综合评价值超过拐点横坐标时,发生地震的可能性骤降,故令 $a - \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma = 0.5$,解得 $\sigma = 0.418204$ 。

4.3 问题(3)模型的建立、求解与分析

在第三问中,通过广泛阅读地震相关的其它指标的数据和分析方法,我们对地震的各项指标有了进一步的认识。

4.3.1 指标的进一步概览

氡:氡是一种放射性气体,是镭衰变的中间产物,氡在岩石的孔隙和裂隙中以自由氡、吸附氡和封闭氡的形式存在。实验证明,氡反应灵敏,当受到外界的压力、振动等作用时,氡容易从其赋存的介质中逃逸出来,因此,当地下应力发生变化时,地下水中的氡浓度会出现不同程度的变化,这就是氡观测的依据。氡作为地下流体学科的敏感组分,是地震科学研究中观测时间最长、研究最广泛的地下流体项目之一。

电压:大地中存在着微弱的电流,即地面下任意两点间有电位差。1861 年,慕尼黑附近发生地震,曾记录到与地震相伴随出现了地电流的变化。1923 年,日本关东大地震时,白鸟观测到地电流的异常。其后,地电流和地震的关系,以及作为地震预报手段的探讨,引起了人们一定的重视。但是,并未由此得出明确的结论。在地震发生前后,有的地方观测到地电流的异常变化,也有的地方,地震前后并未出现地电流的异常变化,即使在出现地电流异常变化的情形下,出现变化的时间和幅度也不尽相同。

地下水:我国早在四千年前就注意到了地下水与地震的关系,历史上关于地震前井、泉水的异常现象多有记载,并逐渐产生了通过观测井水和泉水的变化实现地震预报的思想。20 世纪 70 年代,我国辽宁海城、四川松潘—平武分别发生了 Ms7.3、Ms7.2、Ms7.2 级地震,震前一些井出现了水位大幅度升降,井水变浑、变色、变味、冒泡,等等。地震前频频出现的这些异常现象,说明地下水具有较为灵敏的映震能力。然而,近几十年的地震预报实践表明,并不是每次地震前都

会出现这类宏观异常现象；地下水异常甚至大规模宏观异常的涌现也并不一定预示着地震的来临。这说明，地下水异常与地震并非存在确定的对应关系，它们之间的关系是复杂的，地下水异常成因具有多重性。

电磁波辐射：关于震源电磁辐射的存在，近年来，国内外许多专家做了各种广泛深入的实验。其结果无论是小块岩石的摩擦、击碎实验；岩石的单轴压力和围压实验；或是化学爆破和地下爆破的野外观测以及实地的水压致裂实验，都证实岩石在破裂过程中产生电磁辐射。

通过上述资料，我们了解、注意并且推断：

（1）尽管在问题一的求解中，气氦、电压、地下水都非敏感变量，但在以往地震的研究中，这三项是较为重要的指标；

（2）气氦、电压、地下水三项指标在问题一中没能够被识别为敏感，可能是由于指标的时滞性——指标的剧烈变动并没有发生在地震期，而是发生在地震之前相当长一段时间；

（3）用以预测地震的指标，在一些地震前出现的异常现象，但是在另一些地震前可能并不会出现；地震前出现的异常现象，在一些地区出现了，却并没有地震发生——这说明各项指标与地震之间的关系是十分复杂的，不能期望在单个指标上，存在十分准确的地震前兆。

基于此，将气氦、电压和地下水这三个变量亦纳入第三问、第四问的考虑范围，研究他们在地震发生前的数量特征。

4.3.2 气氦变量的数量特征

首先，以每年年初为起点，该年最后一次地震时刻为终点，观察气氦变化的时间序列，如下图所示。

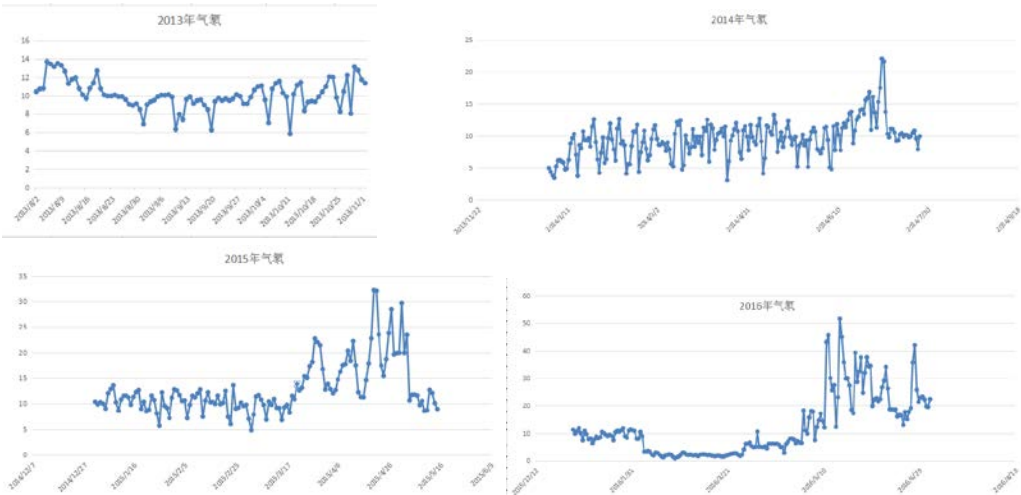


图 2 气氦变化时间序列

一方面，不难看出，气氦的变化规律呈现波动幅度逐渐增大的趋势；因此，气氦的爆发或许是地震即将发生的前兆。另一方面，当地震发生时，气氦含量又出现骤降——这或许就是“时滞性”的体现。

本文拟利用方差刻画变量变动的幅度。将地震发生前时期分为①地震发生前 6 个月到地震发生前 3 个月；②地震发生前 3 个月到地震发生时刻。

下表统计了阶段①和阶段②方差的对比关系。

表 7 阶段①和阶段②气氦方差对比

地震	阶段①气氦方差	阶段②气氦方差
1	2.4998	2.5165
2	5.9294	6.8298
3	1.2069	9.7966
4	1.8731	9.9293
5	8.9827	58.2469
6	12.5388	133.1114
7	9.7874	230.3169

不难看出，阶段②气氦的方差大于阶段①气氦的方差。那么，这种差异是否显著，有多显著？本文利用配对数据的 Wilcoxon 符号秩检验法进行检验。

首先，提出假设：

H_0 ：两个阶段的方差相等；

H_1 ：两个阶段的方差不相等。

第二步，选定显著性水平 $\alpha = 0.05$ ， $n = n_1 = n_2 = 7$ 。

第三步，根据样本值计算成对观测数据之差 D_i ，并将 D_i 的绝对值按大小顺序编上等级。最小的数据等级为 1，第二小的数据等级为 2，以此类推（若有数据相等的情形，则取这几个数据排序的平均值作为其等级）。

第四步，登记编号完成后恢复正负号，分别求出正等级之和 W^+ 和负等级之和 W^- ，选择 W^+ 和 W^- 中较小的一个作为 Wilcoxon 检验统计量 W 。

第五步，统计量 W 的均值和方差分别为 $E(W)$ 和 $D(W)$ ，确定统计量

$$z = \frac{W - E(W)}{\sqrt{D(W)}} = \frac{W - n(n+1)/4}{\sqrt{n(n+1)(2n+1)/24}} \sim N(0,1)$$

最后，利用 SPSS 统计软件进行检验，得到结果。

检验统计量 ^a	
	阶段② - 阶段①
Z	-2.366 ^b
渐近显著性(双侧)	.018

a. Wilcoxon 带符号秩检验

b. 基于负秩。

得到的 p-value 为 0.018，小于 $\alpha = 0.05$ 。故可以认为，阶段②的气氦方差远远大于阶段①的气氦方差。在迫近地震时刻，气氦释放量呈明显的井喷式增长。

4.3.3 电压变量的数量特征

首先，以每年年初为起点，该年最后一次地震时刻为终点，作出电压的时间序列图。

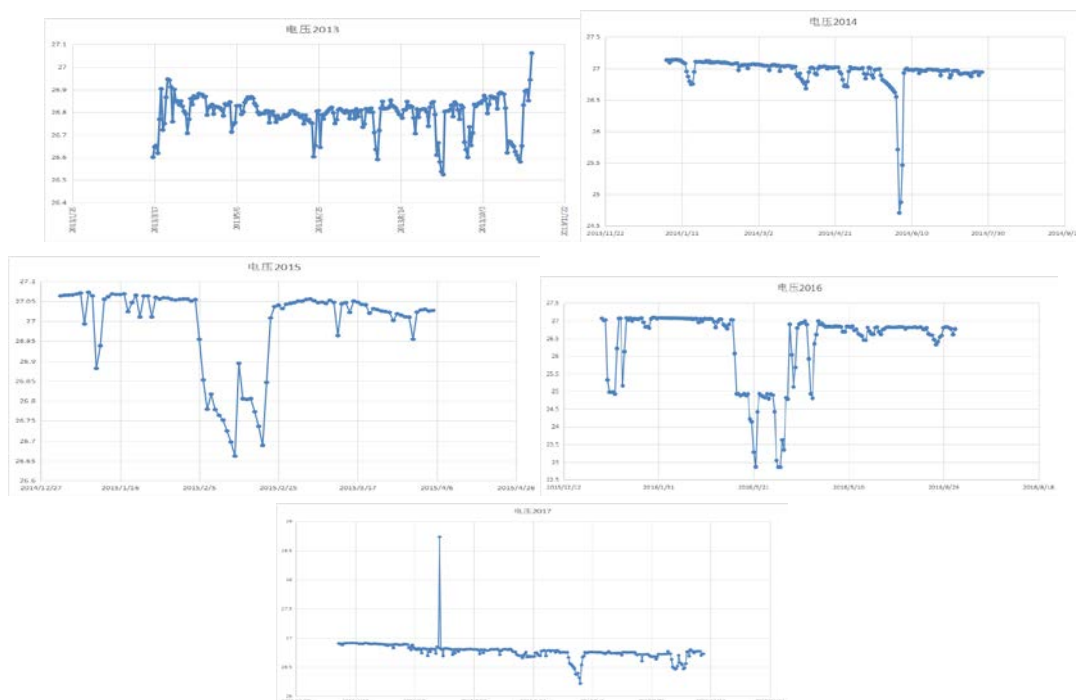


图 3 电压变化时间序列

观察上图，发现 5 年间电压发生波动时，波动的位置既可以在早期，也可以在中期，同时也可以在迫近地震发生时期。同时发现，电压波动的幅度较大，但不久又会回到原先的平稳水平。

仿照 4.3.2，对电压前后两个阶段的方差进行检验，得到结果。

检验统计量a	
	阶段② - 阶段①
Z	0.000 ^b
渐近显著性(双侧)	1.000

a. Wilcoxon 带符号秩检验

b. 基于负秩。

得到的 p-value 为 1.000，远远大于 $\alpha = 0.05$ 。可见对于电压变量而言，阶段①和阶段②的波动幅度并无明显区别。

4.3.4 水位变量的数量特征

首先，以每年年初为起点，该年最后一次地震时刻为终点，作出水位的时间序列图。





图 4 水位变化时间序列

观察上图，发现 5 年间水位发生波动时，波动的位置既可以在早期，也可以在中期，同时也可以在迫近地震发生时期。同时，水位波动的幅度都较小，且这种波动很有可能受到雨量等外在因素的影响。

仿照 4.3.2，对水位前后两个阶段的方差进行检验，得到结果。

检验统计量a	
	阶段② - 阶段①
Z	-1.352 ^b
渐近显著性(双侧)	.176

a. Wilcoxon 带符号秩检验

b. 基于负秩。

得到的 p-value 为 0.176，大于 $\alpha = 0.05$ 。可见对于水位变量而言，阶段①和阶段②的波动幅度并无明显区别，保持着较为平稳的水平。

4.3.5 电磁波幅度 EW 的数量特征

不同于上述三个变量（气氦、电压、水位），电磁波幅度 EW 在问题一中即被筛选出来，意味着电磁波幅度 EW 变量不存在过长的时滞性。也就是说，通过观察电磁波幅度 EW 的短时间变化趋势、幅度，就可以对地震进行较为精准的预测。

本文拟构建仿真算法流程，对地震发生前，电磁波幅度 EW 的序列构造进行研究。

该仿真算法流程的目的是，①确定对地震发生前数据研究的时间范围；②构造“波动幅度”变量，用以预测震级或震源深度。

步骤如下：

（1）将一天 24 个小时的“电磁波幅度 EW”数据取均值，形成新的“日均值”序列；

（2）假定地震前的时间段分为 3 个阶段：平稳期 1——波动期——平稳期 2；

（3）对某一次地震进行观测时，可能有平稳期 2，也可能没有；

（4）对某一次地震进行观测时，一定是从平稳期 1 波动（或跳跃）到波动期的；

- (5) 对某一次地震进行观测时，平稳期 1 至少保持平稳 20 天；
- (6) 取 10 天为 1 个时间单位；
- (7) 检测平稳的方法：若序列中相邻两天差值大于 1，即 $x_t - x_{t-1} > 1$ ，则序列不平稳，且将此种情况视作一次跳跃。
- (8) 最终输出

$$s = \frac{\max_i x_i - \min_i x_i}{\bar{x}}$$

s 的意义是极差与均值的比值，可以较为简易地反映波动的幅度；而除以均值，则是为了消除量纲。

可编写流程图如下：

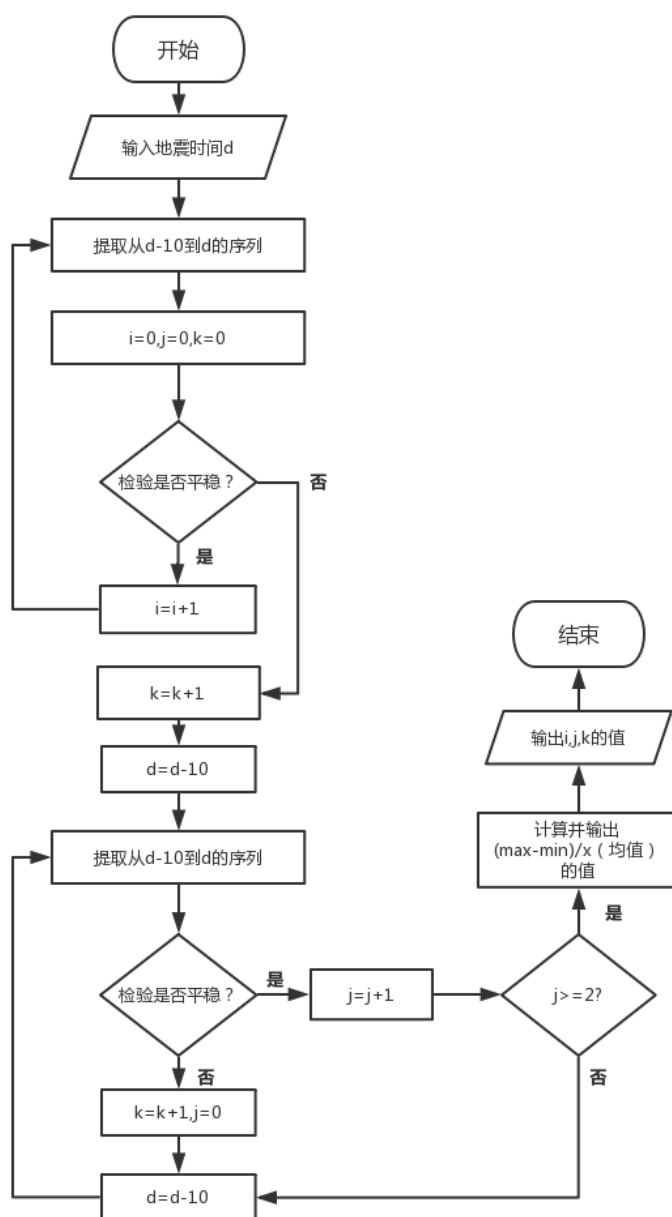


图 5 仿真算法流程图

由于 2015 年两次地震时间极为相近，故将地震 3、地震 4 的程序运行合为

一次。

根据该仿真算法，可以得到 i （平稳期 2 的时间单位）， k （波动期的时间单位）， j （平稳期 1 的时间单位）以及 w （跳跃次数）。7 次地震的具体情况如下，

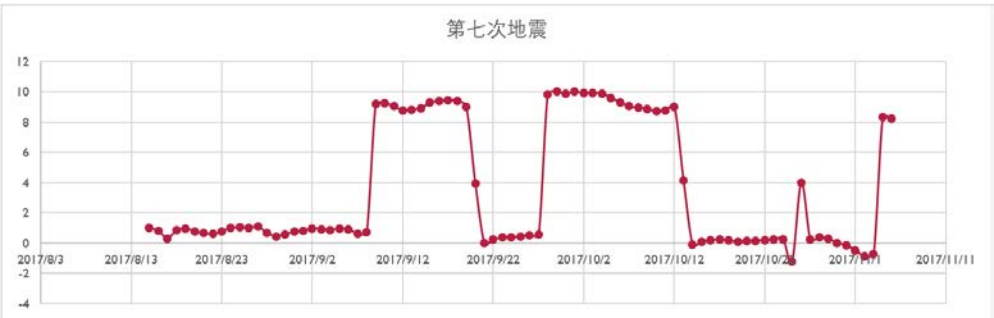
表 8 仿真算法结果输出

地震	确定日期	i	k	j	w	s
1	2013/10/3-2013/11/2	0	1	2	1	0.531041464
2	2014/5/7-2014/7/26	5	1	2	2	1.122632534
3	2015/1/21-2015/4/5	3	1	2	2	1.059904897
4						
5	2016/4/5-2016/5/15	1	1	2	2	12.43969533
6	2016/5/6-2016/7/5	3	1	2	2	16.91571145
7	2017/8/17-2017/11/5	0	5	2	7	3.178690006

这里仅展示第 6 次地震和第 7 次地震，在确定的“时间范围”内的时间序列图；其余见附件 A.3。



(a)



(b)

图 6 仿真算法得到的序列图

根据上表和上图，可以看出，序列波动的方式与“平稳期 1——波动期——平稳期 2”的模式相吻合。一般而言，地震发生之前波动次数越多、幅度越大，积攒的能量就越多，从而更有可能反映震级/震源深度所造成的影响。基于此，构造新的变量 $\xi_i = w * s$ ，将 ξ_i 与震源深度 $depth$ 进行回归拟合，得到方程

$$depth = 18931.56 - 3431.637 * \ln(\xi_i).$$

经检验，该模型的 p-value 为 0.045，模型十分显著；然而，该模型 $R^2 = 58.6\%$ ，拟合程度欠佳。不过考虑到仅有 7 条地震观测，难免会出拟合欠佳的情况；因此，

这样的拟合度是可以接受的。

4.4 问题（4）模型的建立、求解与分析

4.4.1 震级的预测

在 4.3.5 中，我们成功找到了震源深度和电磁波幅度 EW 之间的数量关系。那么，又如何预测震级呢？

本文拟采用多元线性回归进行拟合。

首先，考虑自变量的选取问题。在问题（1）中，我们筛选出了电磁波幅度 EW 、气压、气温、地温、电磁波幅度 NS 这五个变量。经过后续的一系列分析，可以认为，电磁波幅度 EW 、电磁波幅度 NS 刻画了地震的内在因素，而气压、气温、地温则刻画了地震发生时间的、与季节相关的的外在影响。

在问题（3）中，经过广泛阅读文献资料，我们考虑了时滞作用，并且重新引入了气氦、水位、电压这三个变量。

综上所述，共有电磁波幅度 EW 、气压、气温、地温、电磁波幅度 NS 、气氦、水位以及电压 8 个变量待选取。

其次，考虑衡量多元线性回归模型好坏的指标。事实上，解释变量 $magnitude$ 的总离差平方和 SST 看可以进行如下分解：

$$SST = SSR + SSE$$

其中 $SST = \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2$ 称为总离差平方和，反映了解释变量的总变动误差； SSR 称为回归平方和，反映了解释变量的总变动中能够被回归方程解释的部分； SSE 称为残差平方和，反映了解释变量的总变动中由随机因素所引起的变动误差。定义

① F 统计量，即

$$F = \frac{SSR/p}{SSE/(n-p-1)}$$

用以检验模型整体的有效性；

② t 统计量，即

$$t = \frac{\hat{\beta}_j}{\hat{\sigma}_e \sqrt{h_{jj}}}$$

用以检验单个系数的有效性；

③ 相关系数为回归平方和占总离差平方和的比重，即

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}$$

用以评价模型拟合的优劣。

利用上述三个指标作为评价标准，对 8 个待选取标量之间的多种组合进行反复尝试，最终选取了最优的回归曲线：

$$magnitude = 2.481 + 5.836 * \text{电磁波幅度 } NS - 0.946 * \text{气氦}.$$

显著性检验结果如下：

Anova ^a					
模型	平方和	df	均方	F	Sig.
1 回归	2.280	2	1.140	25.720	.005 ^b
残差	.177	4	.044		
总计	2.457	6			

a. 因变量: 震级

b. 预测变量: (常量), 气氦, 电磁波幅度NS。

系数 ^a					
模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	B	标准 误差	试用版		
(常量)	2.481	.207		11.978	.000
1 电磁波幅度NS	.390	.067	1.697	5.836	.004
气氦	-.076	.023	-.946	-3.252	.031

a. 因变量: 震级

无论是 F 统计量还是 t 统计量对应的 p -value, 都小于 0.05, 可见该多元线性回归模型相当显著。此外, $R^2 = 96.3\%$, 反映了电磁波幅度 NS 和气氦可以极好地解释震级的变化。

4.4.2 “地震数据分析平台”的构建

在该“地震数据分析平台”中, 应综合上述种种分析, 对输入的变量提出一定的要求, 从内因外因各个方面综合判断地震发生的概率, 并预测地震震级、震源深度。

Step1. 输入某一时点的电磁波幅度 NS, 气压, 地温以及气温; 但是气氦数据、电磁波幅度 EW 的数据必须为时间序列。气氦的时间序列应持续 6 个月, 而电磁波幅度 EW 的时间序列应持续 3 个月。

Step2. “平台”开始进行数据分析。先对地震发生的概率进行预测。这里兵分两路。流程图左支, 是从外因出发的概率预测: 主成分分析构成的评价指标受季节影响明显, 隶属度函数则将综合评价指标映射为成更具实际意义的“地震发生可能度”, 为“平台”使用者提供借鉴。

另一方面, 流程图右支, 则体现了从内因出发的概率预测。地震源自于地壳、板块的运动, 由此释放出气氦, 这其中存在着极为密切的逻辑联系与机理分析。将 6 个月的气氦时间序列一分为二。如果即将发生地震, 则往前 6 个月到往前 3 个月这段时期的气氦波动率, 一般而言会小于往前 3 个月到被预测期这段时间的气氦波动率。这可以通过非参数统计中的 Wilcoxon 检验进行验证。

然后, 将内因、外因相结合, 进行综合分析。如果隶属度函数给出的“地震可能度”很高, 气氦波动率在两个极端的差异也是显著的, 那么即判定, 可能会发生地震。如果两方给出的结论有所矛盾, 则可以采集更大样本的气氦数据, 进行进一步分析。

Step3. 若经过综合分析, 认为不会发生地震, 或者发生地震的可能性很低, 则可以结束分析, 给出报告。

若“平台”认为，有可能会发生地震，则需要进一步预测地震的震级、震源深度。这里再兵分两路。流程图左支，是用来预测震源深度的。首先对3个月的电磁波幅度EW时间序列执行图5的仿真程序，从而合理截取有用片段，控制研究的时间范围。通过仿真程序，可以输出合成变量 ξ_i ，代入回归模型，对震源深度进行预测。

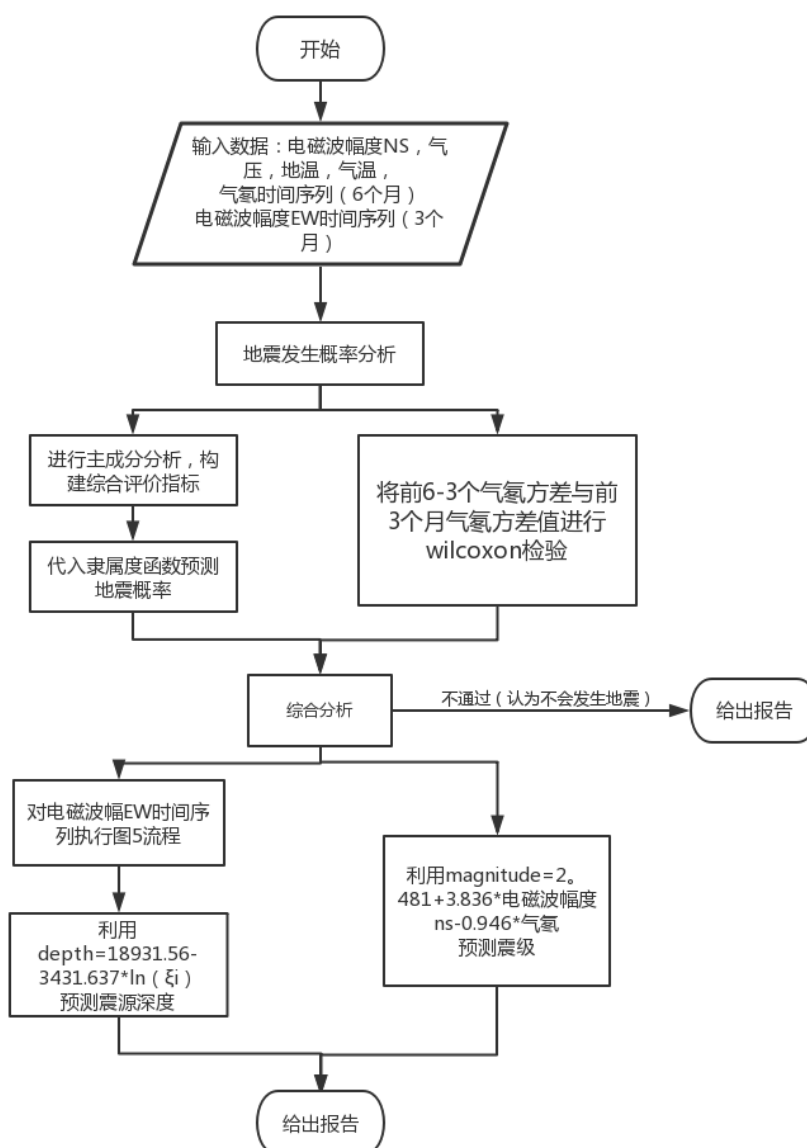


图7 “地震数据分析平台”

而流程右支，则是用来预测震级的。利用该时点数据电磁波幅度NS和气氦含量，代入回归模型，即可完成预测。

Step 4. 最后，综合上述所有的信息，输出报告，告知“平台”使用者关于该地点、该时刻地震发生的概率预测情况，以及震级、震源深度预测情况。

5. 模型的评价

5.1 模型的优点

(1) 本文从多个角度入手、比较系统地考虑了各个方面的、影响地震发生与否的变量,包括内因、外因等,较为全面、充实。

(2) 本文创造性地使用了流程图刻画时间序列的结构和波动,有助于锁定研究范围,提高研究效率。

(3) 最后,将全文的模型集合在一个“地震数据分析平台”中,突出了模型之间的环环相扣与逻辑自洽,为使用者提供了更具综合性的结果。

5.2 模型的缺点及改进的方向

(1) 第一问中,二分类 Logistics 回归模型结果的可靠性有待商榷;地震是否与季节有关,在学界尚无定论。因此,挖掘更加有效的方法对变量的有效性进行分析是模型改进的方向。

(2) 第三问的“仿真流程图”和第四问的“地震数据分析平台”并没有形成完整的程序、界面与平台,尚停留在理论阶段。因此,利用更加智能化的方式完成程序执行,是模型改进的方向。

参考文献

- [1] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型(第四版). 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [2] 王广才, 沈照理. 地震地下水动态监测与地震预测[J]. 自然杂志, 2012, 32(2): 90-93.
- [3] 金能均, 王英亮, 郭宝昌等. 地震电磁波与短临预报[J]. 地震学刊, 1995, (2), 55-59.
- [4] 李宏年. 电磁波辐射在地震短临预报中的研究[J]. 内江科技, 2009, (11), 24-25.
- [5] 贺准诚. 地电流和地震[J]. 西安交通大学学报, 1976, (4), 89-90.
- [6] 郭宝昌, 邹环宇, 杨玉娟等. 电磁波异常与相关地震的探讨[J]. 东北地震研究, 1997, 13(1), 31-38.
- [7] 李志鹏, 赵冬, 袁梅. 姑咱台气氡测值异常与地震预报探讨[J]. 四川地震, 2015, (4), 24-28.
- [8] 王博, 黄辅琼, 简春林. 嘉峪关断层带土壤气氡的影响因素及映震效能分析[J]. 中国地震, 2010, 26(4), 407-417.

附件

A. 1. 问题（1）中随机抽样所得数据

时间数据	电压	电磁波幅 度 EW	电磁波幅 度 NS	地温	水位	气温	气压	水温	气氮	雨量	倾斜仪 NS	倾斜仪 EW
2013/7/3 0 4:00	26.823333 33	5.4916666 67	6.8313333 33	17.681995 71	— 39416.696	— 33.58	— 946.0598	— 17.601376	— 9.81575	— 0	— 4.1475	— -1.9983
2013/10/ 31 22:00	26.896666 67	— 3.7535	4.7718333 33	17.747945 71	35566.986 8	— 16.074	— 960.5182	— 17.631132	— 14.06175	— 0	— 0.5633	— -1.9984
2013/11/ 2 15:00	26.8925 26.8925	3.9121666 67	4.6488333 33	17.750357 14	35473.468 4	— 18.1	— 955.955	— 17.620282	— 13.64625	— 0	— 0.6338	— -1.9984
2013/11/ 2 16:00	26.890833 33	3.9078333 33	4.6441666 67	17.750228 57	35501.363 6	— 18.398	— 955.6262	— 17.621552	— 13.8595	— 0	— 0.6376	— -1.9984
2013/11/ 2 20:00	27.06 27.06	4.0121428 57	2.1764285 71	17.641212 5	35560.973 4	— 17.982	— 958.1758	— 17.62363	— 11.15775	— 0	— 0.6723	— -1.9984
2013/11/ 4 14:00	27.060769 23	3.9821428 57	1.9458571 43	17.640008 75	— 35446.886	— 16.734	— 953.9796	— 17.610548	— 13.20075	— 0	— 0.9274	— -0.311

2013/11/														
8	12:00	27.0975	-4.514	57	17.638995	5	14.3975	957.60775	17.212335	15.489	0	0.8759	-0.4434	0
2013/11/ 27.099166														
9	10:00	67	-4.6	29	25	21191.519	13.9525	959.90675	17.209455	11.192	0	0.7972	-0.4723	0
2013/11/														
10	9:00	27.07	71	86	17.638155	2	15.55	959.5412	17.60539	12.834	0	0.7179	-0.5193	0
2013/11/ 27.068461														
12	5:00	54	57	29	75	6	14.824	955.527	17.604394	12.92725	0	1.2705	-0.5685	0
2013/11/ 27.066153														
12	18:00	85	14	1.922	75	2	15.604	958.306	17.596678	12.67075	0	1.1338	-0.6002	0
2013/11/ 26.899230														
15	10:00	77	-5.059	86	25	2	13.078	967.0892	17.582292	12.66275	0	0.7737	-0.7125	0
2013/11/ 27.076153														
18	7:00	85	-5.24	57	25	8	11.57	972.7098	17.567992	12.27125	0	0.5674	-0.8091	0
2013/11/ 27.073846														
18	12:00	15	57	71	75	8	12.688	972.0456	17.568218	11.901	0	0.6873	-0.8149	0

-													
2013/11/	27.073846	4.9432857	1.6978571	-									
18 23:00	15	14	43	17.635115	35843.175	13.256	972.8494	17.581494	10.3925	0	0.8354	-0.8203	0
-													
2013/11/	27.080769	4.9817142	1.3198571	17.630731	-								
24 1:00	23	86	43	25	35782.557	10.084	968.348	17.51268	14.5235	0	0.0751	-1.0753	0
-													
2013/11/	27.080769	4.9868571											
26 12:00	23	43	1.118	17.631115	-35718.65	12.728	958.903	17.4928	14.49475	0	0.0823	-1.1443	0
-													
2013/12/	27.084615	5.1357142	1.2441428	17.627976	35905.607								
1 3:00	38	86	57	25	8	10.238	963.9458	17.492964	7.27475	0	0.5923	-1.3605	0
-													
2013/12/	27.103846	5.4665714	35988.437										
5 4:00	15	29	0.555	17.62381	4	3.104	980.5692	17.4322	6.23525	0	0.1731	-1.511	0
2013/12/	27.106923												
7 13:00	08	-5.746	0.343	17.623025	35874.968	3.2	968.6532	17.387602	12.8675	0	0.1895	-1.6568	0
-													
2013/12/	27.106153	5.5692857	0.5621428	17.623256	35860.644								
7 16:00	85	14	57	25	8	3.988	967.327	17.385572	13.2055	0	0.1863	-1.6609	0
-													
2013/12/	27.102307	5.5997142	0.5388571	17.622526	-								
9 2:00	69	86	43	25	35915.473	2.908	966.4372	17.363596	12.27725	0	0.4153	-1.7696	0

2013/12/	27.102307	5.4842857														
10 14:00	69	14	0.713	17.623515	2	6.12	971.5648	17.341398	7.55275	0	0.3372	-1.7869	0			
2013/12/	27.136666	5.6262857	0.6351428	17.617891	39006.154				4.1173333							
28 3:00	67	14	57	25	25	5.2775	965.45625	16.631385	33	0	2.3133	-1.8062	0			
2013/12/	27.134166	5.6635714	0.5044285	17.618397	38929.641				4.0306666							
31 13:00	67	29	71	5	5	4.47	969.59125	16.463865	67	0	0.0122	-1.8629	0			
2014/4/1	27.034615		2.0882857	17.520427	-											
5 15:00	38	-3.919	14	5	38504.336	19.38	959.5182	17.197968	11.544	0	-1.18	-1.31	0			
2014/7/1	26.843333		4.7345714		36822.941											
2 10:00	33	-2.888	29	17.39598	6	32.942	945.3518	17.42115	11.10925	0.06	2.5452	0.1531	0			
2014/7/2	26.946153	1.9538571			37057.277											
6 2:00	85	43	5.009	17.585185	6	31.218	951.5428	17.6187	4.685	0.02	4.1475	-0.1461	1			
2014/7/2	26.946923	1.9851428	5.1242857	17.585016	37051.615											
6 3:00	08	57	14	25	6	31.046	951.4566	17.617908	4.58325	0.02	4.1475	-0.1609	1			
2014/7/2	26.937692	2.5531428	4.8352857	17.592083	-											
9 15:00	31	57	14	75	37029.628	33.718	948.1656	17.476174	8.34225	0	4.1475	-0.029	0			

			—	—		—								
2014/9/1	25.861538	211.22185	204.55557	17.590837	33404.522									
8 14:00	46	71	14	5	8	33.754	1003.625	17.508322	10.5465	0	4.1475	-0.3801	0	
						—								
2014/10/	26.989230		3.5931428		33529.631						—			
29 2:00	77	-3.125	57	17.58689	6	18	964.1252	17.558964	11.31325	0	0.1773	-1.7887	0	
						—								
2014/10/	26.989230		3.5931428		33529.631						—			
29 2:00	77	-3.125	57	17.58689	6	18	964.1252	17.558964	11.31325	0	0.1773	-1.7887	0	
						—								
2014/10/		3.6722857			33456.390									
30 8:00	26.82	14	3.067	17.58695	2	16.878	965.4652	17.561642	11.30725	0.02	-0.093	-1.8143	0	
						—								
2014/10/		3.6722857			33456.390									
30 8:00	26.82	14	3.067	17.58695	2	16.878	965.4652	17.561642	11.30725	0.02	-0.093	-1.8143	0	
						—								
2014/11/	26.990769	3.3144285	3.3464285	17.585283	33552.066						—			
2 8:00	23	71	71	75	2	17.034	964.259	17.567558	11.99375	0	0.0852	-1.8479	0	
						—								
2014/11/		2.7705714	3.5332857	17.587211	33610.926						—			
4 16:00	26.98	29	14	25	2	21.9	958.1666	17.57365	11.25675	0	0.0855	-1.84	0	
						—								
2014/11/	26.988461	3.0598571	3.5252857	17.583732	33583.129						—			
5 7:00	54	43	14	5	8	17.49	965.4234	17.573548	10.37475	0	0.0606	-1.8647	0	

			—			—								
2014/11/	26.987692	3.0224285		17.583462	33677.270							—		
8 23:00	31	71	3.27	5	6	18.394	960.8386	17.575782	5.75525	0	0.0394	-1.9114	0	
			—											
2014/11/	26.985384	2.9487142	3.4878571	17.583633	—							—		
10 21:00	62	86	43	75	33779.594	20.134	967.2806	17.584052	7.0885	0	0.0558	-1.9003	0	
			—											
2014/11/	26.991538	3.1231428	3.2745714	17.582307	33716.073							—		
12 19:00	46	57	29	5	4	17.388	956.9748	17.582136	13.1	0	0.0147	-1.9348	0	
			—											
2014/11/	26.993076	3.3535714	3.2757142		33651.454									
13 7:00	92	29	86	17.58071	4	15.802	962.27	17.581686	10.75625	0	0.0286	-1.9582	0	
			—											
2014/11/	26.993846	3.3987142	3.2192857	17.581261	—									
13 8:00	15	86	14	25	33642.332	15.978	963.4318	17.58163	8.2515	0	0.0376	-1.9596	0	
			—											
2014/11/	26.993076	3.1665714	3.2768571	17.580931	33715.545									
14 1:00	92	29	43	25	8	16.556	971.5582	17.584494	4.44875	0	0.0751	-1.9934	0	
			—											
2014/12/	27.059230	4.0321428	2.2644285	17.570681	33678.650							—		
8 23:00	77	57	71	25	2	6.358	977.6362	17.563396	6.34	0	0.7846	-1.9984	0	
			—											
2014/12/	27.057692	4.0655714	2.1115714	17.571956	—							—		
11 13:00	31	29	29	25	33712.789	7.612	962.2472	17.554048	14.17025	0	0.8859	-1.9984	0	

[illegible]

			—			—								
2015/3/2	27.030769	3.1248571		17.568622	33654.440							—		
2 10:00	23	43	3.177	5	4	14.858	956.2252	16.781202	13.701	0	1.9955	−0.1232	1	
			—			—								
2015/3/2	27.029230	3.0674285	3.2218571	17.569046	33654.413							—		
2 11:00	77	71	43	25	6	15.39	955.3664	16.779212	13.67025	0	1.9955	−0.1161	1	
			—			—								
2015/3/2	27.042307	3.3544285	2.8168571	17.567687	33625.286							—		
0 12:00	69	71	43	5	4	12.736	959.082	16.790854	12.4055	0	1.9956	−0.1979	0	
			—			—								
2015/3/2	27.020769	2.6404285	3.9185714	17.573288	33912.587							—		
6 17:00	23	71	29	75	2	20.962	953.7262	16.780922	18.93	0	1.9955	0.1649	0	
						—								
2015/4/5	27.029230		3.6308571	17.571237	34259.515							—		
1:00	77	−2.73	43	5	8	17.334	963.2338	16.844578	7.35125	0	1.9955	0.2894	1	
			—			—								
2015/4/5		2.7481428	3.6617142	17.571136	34239.479							—		
2:00	27.03	57	86	25	6	17.022	962.5616	16.84571	7.986	0	1.9955	0.2894	1	
			—			—								
2015/4/1	27.009230	1.6938571	4.3491428	17.576726	34497.627							—		
9 15:00	77	43	57	25	8	27.356	945.5504	16.945276	20.25775	0	1.9561	0.2894	0	
			—			—								
2015/5/1	26.995384	0.9252857	5.3158571	17.576723	34674.768							—		
4 20:00	62	14	43	75	2	30.376	949.5278	17.115932	12.72325	0	1.9953	0.2894	0	

			—			—								
2015/6/2	27.003076	1.0957142	4.8521428	17.587478	35081.161						—			
2 15:00	92	86	57	75	4	26.684	948.594	17.291536	10.6075	0	1.9954	0.2894	0	
						—								
2015/7/2	26.983076				34496.850						—			
23:00	92	−0.333	5.806	17.58552	6	27.408	949.4892	17.479638	10.48175	0.44	1.9954	0.2894	0	
						—								
2015/7/2	26.797692	0.7052857	5.3381428		33033.237						—			
8 12:00	31	14	57	17.59835	4	26.914	949.538	17.539678	10.658	0.18	1.9954	0.2894	0	
						—								
2015/7/2	26.988461	0.5335714		17.601133	32672.142						—			
9 3:00	54	29	5.507	75	8	26.842	948.1036	17.546204	10.70525	0	1.9954	0.2894	0	
						—								
2015/8/1		0.0634285	5.9864285	17.609136	32752.145						—			
6 14:00	26.98	71	71	25	6	31.952	952.1736	17.672952	10.6085	0	1.9953	0.2894	0	
						—								
2015/8/1	26.977692	0.1611428	6.1675714	17.610918	32788.344						—			
8 17:00	31	57	29	75	6	32.414	949.8944	17.69121	10.96325	0	1.9953	0.2894	0	
						—								
2015/9/9	27.006153		5.3261428	17.622806	32570.068						—			
1:00	85	−0.745	57	25	8	21.644	957.7416	17.875064	10.02325	0	1.9954	0.2894	0	
						—								
2015/9/2	26.987692	0.9238571	5.1827142	17.575062	32953.224						—			
8 14:00	31	43	86	5	4	19.034	962.1172	17.902182	9.7105	0.34	1.9955	0.2894	0	

		–			–									
2015/9/2	26.992307	1.0798571	5.0234285	17.574438	32836.717						–			
9 15:00	69	43	71	75	8	17.892	962.0466	17.888026	9.912	0.14	1.9955	0.2894	0	
2015/10/	26.834166				17.569353	–					–			
14 20:00	67	6.4395	7.148	75	32281.089	17.118	971.3164	17.577196	11.439	0	1.9955	0.2894	0	
		–			–									
2015/11/	24.969230	1.7392857	4.3511428	17.587157	32018.370						–			
26 16:00	77	14	57	5	8	13.466	971.2564	17.240356	11.52825	0	1.9956	0.2894	0	
		–			–									
2015/12/	24.981538	2.5662857	3.4667142	17.589847	32039.702						–			0
15 10:00	46	14	86	5	2	5.102	968.5252	17.086478	6.14975	0	1.9956	0.2894		
		–			–									
2015/12/	24.853333	2.4082857		17.594147	–						–			0
27 1:00	33	14	3.561	5	32200.877	5.826	967.4458	17.0033	10.1845	0	1.9957	0.2894		
		–			–									
2016/2/1	27.067692	2.8808571	3.1538571	17.607836	–						–			
2 2:00	31	43	43	25	32585.652	1.904	977.3474	16.798734	3.52675	0	1.9957	0.2894	0	
		–			–									
2016/2/1	27.066153	2.7517142	3.4451428	17.608052	32552.773						–			
2 18:00	85	86	57	5	8	3.04	974.2632	16.796004	1.56675	0.5	1.9957	0.2894	0	
		–			–									
2016/2/1	27.061538	2.6488571	3.5404285	17.608976	32649.649						–			
6 14:00	46	43	71	25	4	5.206	969.7626	16.736294	2.244	0	1.9957	0.2894	0	

-													
2016/2/1	27.060769		3.4957142		32684.762							-	
7 0:00	23	-2.618	86	17.60905	6	5.58	971.5506	16.733636	1.7945	0	1.9957	0.2894	0
2016/2/1	27.061538		3.7745714		-							-	
8 0:00	46	-2.522	29	17.60921	32665.086	4.838	974.8402	16.726706	1.18	0	1.9957	0.2894	0
-													
2016/2/2	27.051538		3.5725714	17.609817	32666.028							-	
1 17:00	46	-2.197	29	5	6	10.146	955.1806	16.70524	2.18875	0	1.9956	0.2894	0
-													
2016/3/2	24.933846	1.5591428	4.6261428	17.615723	33755.033							-	
4 9:00	15	57	57	75	6	14.888	959.9022	16.777182	2.47425	0	1.9955	0.2894	0
-													
2016/4/4	22.858461	1.2242857	4.9752857	17.617462	-							-	
22:00	54	14	14	5	33634.806	16.51	953.8494	16.76176	6.129	0	1.9955	0.2894	0
-													
2016/4/2	24.739230	1.2867142	4.7437142	17.617753	-							-	
2 3:00	77	86	86	75	33216.744	13.944	967.6448	16.879502	6.59425	0	1.9955	0.2894	0
-													
2016/4/2	26.978461			17.618172	33347.158							-	
6 20:00	54	-0.475	5.659	5	4	25.03	954.8712	16.909364	6.43625	0	1.9954	0.2894	0
-													
2016/5/1	26.836923	0.0228571		17.614111	35428.572							-	
2 22:00	08	43	5.013	25	2	25.53	961.2916	17.004698	19.82175	0	1.9508	0.282	0
2016/5/1	26.655384	0.4664285	6.4757142		-							-	
5 23:00	62	71	86	17.618825	35551.218	30.23	950.5494	17.062024	18.89225	0	1.9954	0.2894	1

2016/5/1			0.4384285		17.618832	-						-			
6 0:00	26.65	71	5.71	5	35553.543	29.63	950.499	17.062498	21.9365	0	1.9954	0.2894	1		
2016/5/1			0.0912857	10.303428	17.617152	-									
8 9:00	26.57	14	57	5	35489.429	27.174	955.969	17.078258	8.7795	0	1.9954	0.2894	0		
					-										
2016/6/1	26.801538	0.9417142	6.7137142	17.619411	35807.013										
3 16:00	46	86	86	25	6	34.238	944.151	17.222238	31.6195	0	1.9953	0.2894	0		
					-										
2016/6/1	26.821538	0.2421428		17.619523	35755.419										
7 15:00	46	57	5.779	75	2	27.472	946.9578	17.250922	18.26925	0	1.9954	0.2894	0		
2016/6/2			0.7027142		17.627844	-									
3 20:00	26.575	86	7.268	29	35536.032	30.984	944.2548	19.254078	18.77525	0.28	1.9954	0.2894	0		
					-										
2016/7/3	26.810909	0.4816666	7.0971666	17.620097	26720.550	34.036666		17.140196	23.915666						
1:00	09	67	67	5	67	67	946.522	67	67	0			0		
2016/7/3	26.810909	0.4938333	6.9346666	17.620092	-	32.356666		17.135583	22.312333						
9:00	09	33	67	5	26536.432	67	947.637	33	33	0			0		
					-										
2016/7/5				17.620257	26411.032		948.74933		19.217333						
7:00	26.581	-2.065	6.0322	5	67	26.07	33	17.12327	33	0			1		
					-										
2016/7/5				17.620253	26380.610	26.083333			20.284333						
8:00	26.577	-1.903	5.9496	75	67	33	948.918	17.12106	33	0			1		

–													
2016/7/6				17.620441	26294.233		947.01966	17.104233	21.400666				0
13:00	26.764	–1.2238	6.2654	25	67	34.48	67	33	67	0			
2016/7/8		1.2794285	6.1111428	17.620796	–				20.136666	–			0
16:00	26.9925	71	57	25	24044.323	35.3425	946.85275	17.03189	67	0	1.9953	0.2894	
–													
2016/7/2	26.996666		6.7478571	17.622427	24808.342			17.060297	18.876666	–			0
7 15:00	67	1.193	43	5	75	32.9425	948.0735	5	67	0	1.9953	0.2894	
–													
2016/8/2	26.998333	1.3082857	7.4705714	17.622303	25624.387					–			0
6:00	33	14	29	75	75	30.5575	952.586	17.14083	20.78	0	1.9953	0.2894	
–													
2017/1/1	26.915454	2.7171666	4.2701666		21160.077	0.3466666			8.0083333				0
2 6:00	55	67	67	17.619705	67	67	990.869	17.11915	33	0			
–													
2017/1/2	26.900909		4.6451666		20482.694	6.1933333	966.87033	17.140713					0
6 20:00	09	–2.3455	67	17.62148	67	33	33	33	28.14	0			
–													
2017/2/4	26.895454		5.0946666		20694.994	9.0866666		17.150526					0
22:00	55	–2.065	67	17.622845	67	67	966.592	67	10.662	0			
2017/2/1	26.882727				–		966.82033		23.351333				0
7 15:00	27	–1.7895	5.4355	17.62468	21832.492	8.97	33	17.13244	33	0			
–													
2017/2/2	26.878181			17.625598	20866.024	11.3333333	955.97333	17.148643	7.3706666				0
3 23:00	82	–1.5515	5.5625	75	33	33	33	33	67	0			

			—			—							
2017/2/2	26.883636	1.7623333	5.3548333	17.625736	20681.209	9.0766666	963.39133			4.8556666			0
4 20:00	36	33	33	25	33	67	33	17.1446	67	0			
			—			—							
2017/3/2		0.8298333	6.4346666	17.631646	19800.601					17.140056			0
6 21:00	26.85	33	67	25	67	19.18	964.562	67	3.587	0.2			
			—			—							
2017/4/6	26.804545	0.6751666	6.5673333	17.631787	19090.067			965.67166	17.139723	21.409333			0
0:00	45	67	33	5	67	19.86	67	33	33	0			
2017/5/2					17.637537	—							0
8 5:00	26.805	—2.2078	6.7956	5	19770.245	19.635	959.9525	16.407775	15.8985	0.2			
2017/5/2													0
8 19:00	26.775	—2.0972	6.8914	17.637555	—19725.16	22.71	961.3415	16.39785	26.7155	0			
					—								
2017/6/7					20367.685								0
4:00	26.692	—0.753	7.735	17.63769	5	29.125	943.5905	16.41072	51.047	0			
2017/6/7					17.637743	—							0
12:00	26.692	—0.864	7.6924	75	20347.837	31.385	941.839	16.408675	44.631	0			
					—								
2017/6/1					20370.695								0
4 2:00	26.678	—0.6316	8.0738	17.63863	5	31.215	947.9795	16.401365	38.013	0			
2017/7/6					—								0
9:00	26.787	—0.2238	8.2648	17.64243	18932.254	34.445	947.6855	16.37587	47.5355	0			

2017/8/1	26.739090	1.7291666		17.644183	—	31.786666	952.05366		24.350666		0
2 22:00	91	67	6.3445	75	22501.382	67	67	17.15649	67	0	
					—					0.166	
2017/9/1				17.704838	19197.510		957.82666		25.096666	66666	0
7 1:00	26.716	9.3794	10.9918	57	67	23.83	67	17.15717	67	7	
					—						
2017/9/1				17.704567	19137.376	25.956666	956.17133	17.155563			1
7 16:00	26.716	9.4402	11.1308	14	33	67	33	33	24.179	0	
					—						
2017/10/				17.728373	18585.197	23.523333	961.87733	17.156526	25.680666		1
5 3:00	26.722	9.9972	11.6256	33	33	33	33	67	67	0	
2017/11/				17.702511	—	11.166666		17.173896	28.479666		0
5 7:00	26.733	8.1762	11.141	43	18310.792	67	967.921	67	67	0	
					—						
2017/11/				17.702525	18297.440	11.173333	968.13933	17.174573	28.349666		0
5 8:00	26.732	8.1168	10.8696	71	67	33	33	33	67	0	
		—			—						
2017/10/		0.0003333	8.3683333	17.634957	18199.411						0
31 13:00	26.77	33	33	5	33	17.63	969.669	17.16682	16.788	0	
										0.433	
2017/11/				17.702585			960.07033	17.173813	30.854666	33333	0
5 17:00	26.678	8.5058	10.812	71	—18514.74	16.45	33	33	67	3	

2017/11/												
6	10:00	26.726	8.1684	10.6922	14	33	33	33	17.17327	33	0	0
2017/11/												
13	13:00	26.706363	1.5024285	5.4515714	17.525363	–	2.8433333	17.175963	33333	0	0	0
2017/12/												
28	22:00	26.840833	4.0115714	2.768	22	33	33	67	67	33	0	0

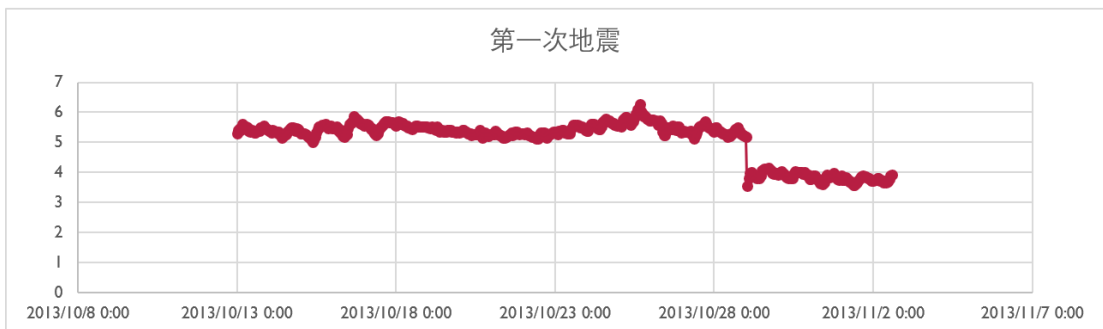
A. 2. 问题（2）中变量间相关系数表

		相关性				
		电磁波幅度EW	电磁波幅度NS	地温	气温	气压
电磁波幅度EW	Pearson 相关性	1	.967**	-.012**	-.041**	-.417**
	显著性（双侧）		.000	.008	.000	.000
	N	48168	48168	48168	48168	48168
电磁波幅度NS	Pearson 相关性	.967**	1	.017**	-.047**	-.405**
	显著性（双侧）	.000		.000	.000	.000
	N	48168	48168	48168	48168	48168
地温	Pearson 相关性	-.012**	.017**	1	.183**	-.139**
	显著性（双侧）	.008	.000		.000	.000
	N	48168	48168	48168	48168	48168
气温	Pearson 相关性	-.041**	-.047**	.183**	1	-.751**
	显著性（双侧）	.000	.000	.000		.000
	N	48168	48168	48168	48168	48168
气压	Pearson 相关性	-.417**	-.405**	-.139**	-.751**	1
	显著性（双侧）	.000	.000	.000	.000	
	N	48168	48168	48168	48168	48168

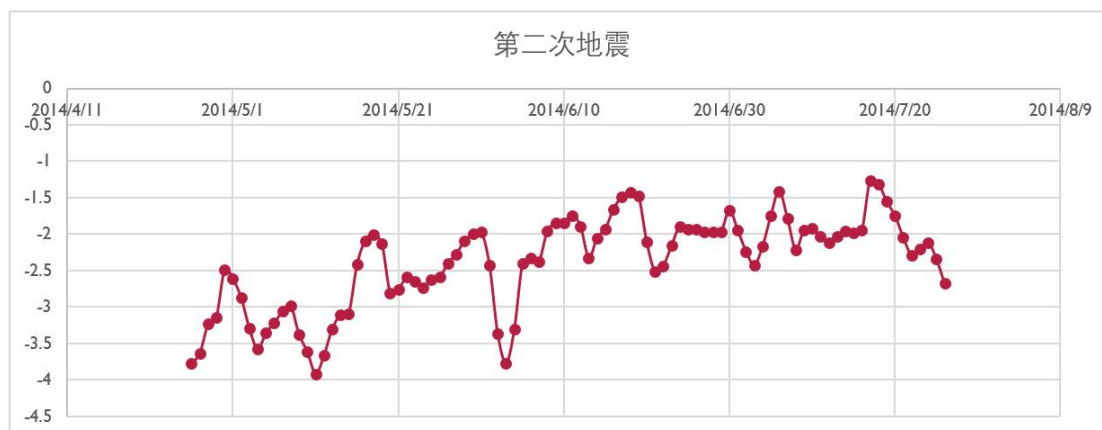
**．在 .01 水平（双侧）上显著相关。

A. 3. 问题（3）中仿真程序输出的时间序列图

A.3.1 第一次地震



A.3.2 第二次地震



A.3.2 第三、四次地震



A.3.4 第五次地震

