

文章编号: 0253-3782(2006)06-0654-15

张衡地动仪与公元 134 年陇西地震*

冯 锐 俞言祥

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 陇西地震是张衡地动仪的惟一测震实例,亦是检验地动仪复原模型是否合理的一个关键性判据.但长期以来,一直被误作公元 138 年 2 月 28 日的金城—陇西地震,因与史料矛盾而被国内外的研究所否定.本文通过对史料的详细考证,特别分析了《后汉书》对陇西地震的描写、各种史料揭示的当时历史背景、张衡的生平、张衡的诗文、汉代地名考,对比了清朝 5 次历史地震,估算了其烈度衰减,得出结论:这次陇西地震的时间应为公元 134 年 12 月 13 日(阳嘉三年十一月壬寅),作为一个粗估,其震中在水天一带,震级约 7 级.张衡晚年的悲剧也与这次地震有关.本文还利用近年 3 次陇西地震在洛阳台的宽频带地震记录,从震级定义、数字宽频带地震记录和小震记录合成大震记录等 3 个方面进行了数值模拟.得到洛阳灵台处的水平向最大地动位移应为 6~8 mm,最大加速度则不大于 10^{-2} m/s^2 .这些结果对新完成的张衡地动仪的科学复原模型起到了重要的定量检测作用.

关键词 张衡地动仪 陇西地震 史料研究 数值模拟 历史地震

中图分类号: P315.62 **文献标识码**: A

引言

(南北朝,刘宋)范晔的《后汉书·张衡传》述及到张衡地动仪对陇西地震的反应:“尝一龙机发,而地不觉动,京师学者咸怪其无征.后数日,果地震陇西,于是皆服其妙”.是件十分重要的史实.它不仅涉及到地动仪的真实性,也是进行地动仪科学复原的一个重要依据——如果能给出这次地震的地点和震级的粗估,那么就能估算出它在京师洛阳的震动水平,经振动台的复现来对复原模型做半定量检验.遗憾的是,这里存在研究的空白.

长期以来,公元 138 年 2 月 28 日的金城—陇西地震(金城在今甘肃省允吾县)一直被误作该震例,以为这是自公元 132 年地动仪问世至 139 年张衡去世间仅有的一次陇西地震.但近年国内外的研究都做出了明确的否定(Sleeswyk, Sivin, 1983; 国家地震局兰州地震研究所, 1989; 冯锐, 2003; 赵冠峰, 2004).因史料中,已经清楚地记载了京师地区对这次大地震是有感的:

“京师及金城、陇西地震,二郡山岸崩、地陷”——范晔《后汉书·顺帝纪》.

“京都、金城、陇西地震,裂城廓,室屋坏,压杀人”——司马彪《后汉书·五行志》.

这与前述的文字“地不觉动,京师学者咸怪其无征”矛盾.通过现场地质考察和古遗址考证,袁道阳等(2004)最近查明:公元 138 年地震的震中在兰州西北(36.1°N , 103.2°E),即

* 地震科学联合基金(104133)资助课题.中国地震局地球物理研究所论著 06AC1036.
2006-02-06 收到初稿,2006-06-26 决定采用修改稿.

† 通讯作者. E-mail: rfeng_cn@yahoo.com.cn

甘肃省永靖县西北的湟水、黄河交汇地区, 烈度Ⅷ度, 震级 $6\frac{3}{4}$. 因此, 把公元 138 年地震作为地动仪的反应事件是不成立的.

新的问题随之出现. 这个特指的陇西地震到底有没有发生过? 地动仪是否“没有达到科学的要求”(Qian, 1985)、“没有达到设计初衷”(赵冠峰, 2004), 亦或“《后汉书》的记载不一定是可靠的”(雷立柏, 2000). 如果不这样认为, 那么史料的证据又是什么?

最近, 在作者对张衡地动仪进行科学复原的研究中^①, 得到国家图书馆善本特藏库的协助, 幸而找到了记有地动仪的最早几份古代刻本. 除《后汉书·张衡传》外, 还有《初学记》、《事类赋注》、《太平御览·工艺部》、《太平御览·职官部》、《后汉纪》、《后汉书·顺帝纪》等共 7 份史料(冯锐等, 2006a, c). 通过逐字对比, 发现《后汉书·张衡传》中对地动仪的记述并不是一个作者完成的, 其主体部分是范曄(公元 398—445 年)对(西晋)司马彪(?—306 年)和(东晋)袁宏(公元 328—376 年)史料的修改, 而记述陇西地震的一段(即本文开头所引的一段文字)完全是范曄增写的内容. 以这个差异为线索, 通过对东汉晚期历史地震目录和出处的逐条对比, 又发现正是范曄已经同时在《后汉书·顺帝纪》中增加了一条在司马彪《五行志》、袁宏《后汉纪》(袁宏, 1987)中都没有记述过的“阳嘉三年十一月壬寅”(公元 134 年 12 月 13 日)地震, 以及因这次地震导致司徒和司空被同时撤查的历史, 终使疑虑得以澄清. 令人欣慰的是, 该事件在中国地震历史资料汇编中早已收录(谢毓寿, 蔡美彪, 1983), 只因当时研究不够, 发震地点暂未明确或误以京师标注罢了.

本文对史料进行了多方面的分析研究, 明确了陇西地震的时间, 进而推断了这次地震的地点和震级. 在此基础上, 利用 2003—2004 年间 3 次陇西地震在洛阳台的宽频带地震记录, 从震级定义、数字宽频带地震记录、小震记录合成大震记录等 3 个方面进行了数值模拟, 估算了这次陇西地震在京师灵台的加速度和地动位移量. 这些结果虽然仍具有半定量的性质, 但是对于地动仪的科学复原十分重要, 正是要利用这些参数来控制振动台的复原水平, 以修改和检验复原模型. 最近新完成的地动仪科学复原模型便是在这项研究的基础上实现的(冯锐, 2006b, d).

1 陇西地震的史料研究

1.1 地震的时间

目前掌握的东汉历史地震, 自公元 46—220 年共 80 条(中央地震工作小组办公室, 1971; 谢毓寿, 蔡美彪, 1983; 国家地震局兰州地震研究所, 1985, 1989). 除个别事件外, 完全基于司马彪《续汉书》(周天游, 1986)、袁宏《后汉纪》和范曄《后汉书》(王先谦, 1984; 惠栋, 1985)三人的资料而成. 这里, 因范文的八志三十卷(含《五行志》), 是(南北朝, 梁)刘昭从司马文中抽出补入的, 故仍作为司马文. 范文虽比前二人时代晚, 但在本纪、列传中不仅包括了前二人记述过的全部地震事件, 而且更加具体和细致, 还补充了一些新的地震事件, 因此其学术价值更高. 以张衡生卒年(公元 78—139 年)间的地震记载为例, 司马文 34 条、袁文 29 条、范文 39 条, 范曄文比前二人新增加了 4 条地震事件, 详见有关地震的史料来源表(附录).

^① 冯锐. 2006. 张衡地动仪: 从古书记载到验震仪器. 中国地震局, 河北省地震局编. 邢台地震 40 周年学术研讨会文集. 277~281.

通过对史料的逐字对比表明,司马文和袁文对地动仪的记载,分别以“观之,莫不服其奇丽,自古所来,未常有也”和“来观之者,莫不服其奇”结束,竟然都没有提及陇西地震(冯锐等,2006c)。而且二文所给出的从公元132年地动仪创制到公元140年间的8次地震,即公元133年6月、136年2月、137年5月、137年12月、138年2月、138年6月、139年4月、140年3月的地震,确实没有一次事件可与张衡地动仪相对应。除已被否定的138年2月金城—陇西强烈地震外,其余的7条全部为京师地区的有感地震(见附录),几份史料对地点的记述都是十分明确和一致的。

问题的焦点终于清楚:既然范晔在《后汉书·顺帝纪》中增写了地动仪的创制时间“阳嘉元年秋七月,史官始作候风地动铜仪”,又在《后汉书·张衡传》中详细叙述了地动仪对陇西地震的反应过程,范晔必然掌握这次地震的史料依据并需做出交代,否则无法排除诈传和虚夸的可能。况且这次地震属“自书典所记,未之有也”的大事,而且还曾引起过“京师学者,咸怪其无征”的社会矛盾,如果不是孤证,背后必有文章。

李善邦(1981)先生曾推断过,张衡的诗句“我所思兮在汉阳,欲往从之陇坂长”表述了思念陇西地震之意。新研究表明,该句出自张衡公元137年的《四愁诗》:“时天下渐弊,郁郁不得志……,我所思兮在汉阳,欲往从之陇坂长,侧身西望涕沾裳,……,路远莫致倚踟蹰,何为怀忧心烦纡”(《张河间集》)。下文将说明,地动仪对陇西地震的成功,既是张衡辉煌的顶峰,又是他悲剧的开始。张衡生前仅去过南阳、长安、洛阳、河间、泰山、淮南以及途径处(孙文青,1956),并没有去过汉阳(天水)和陇坂。但他对陇西竟出现了如此强烈的复杂感情,恐怕是在他公元136年被逐出京城后,既怀念陇西地震又悲愤时政的一种自述。那么,地动仪所测到的陇西地震就可以锁定在公元132—137年之间,很可能是在他136年去河间之前担任“侍中”期间的事。

史料考证的结果十分令人诧异,恰恰在范晔新增加的4条地震事件中(见附录),前3条分别是公元110年云南地震、120年地点不明事件和124年京师地震,最后的一条正是134年12月13日的地震。这不仅在时间上与地动仪的问世仅隔一年,还出现了汉朝廷的最高官员——三公(太尉、司徒、司空)九卿中的二位因此次地震被同时撤查的社会问题。原文如下:

阳嘉三年十一月壬寅,司徒刘崎、司空孔扶,以灾异免。

袁宏《后汉纪》卷十八

阳嘉三年十一月壬寅,司徒刘崎、司空孔扶免(注:扶字仲渊)。

范晔《后汉书·顺帝纪》

鲁国先贤传云,孔氏仲渊为司空,阳嘉三年,以地震免。

(清)惠栋《后汉书补注》卷二十一

注:惠栋曰鲁国先贤传云,孔氏仲渊为司空,以地震免。

(清)王先谦《后汉书集解》卷六

袁文中的“灾异”就是指地震,同公元122年5月23日地震“京师地震,癸巳,司空陈褒,以灾异免”(《后汉纪》卷十七)、公元133年6月18日地震“太尉庞参司徒王龚,以灾异免”(卷十八)的措词一样。因此,范晔在《顺帝纪》和《张衡传》两处同时增写的陇西地震和高官撤查的事件,存在逻辑上的对应关系,即司徒刘崎、司空孔扶是因为公元134年12月13日的陇西地震被革职的。

人们的疑虑在于,本纪没有在“以地震免”处紧接注明地震的地点。不过,这并不为怪。范曄写史的文字特点就是如此:地震的地点只在本纪和列传中的一处出现。就是说写地震,凡涉及地点和灾情,较多的出现在本纪中;写高官,凡涉及免职,就不会讲地震地点,较多的出现在列传中。本纪只记载全国性的大事、要事,可以具体到某次地震的年月日;而列传只记述个人的生平业绩,其细节充其量写到“以地震免”,从不讲具体的地震甚至地点。二者虽不在一处同时出现,但在纪、传的时间上有着完全确定的对应关系,因为官员的任职期间有准确的记载,而同一次地震事件又不会在第三处重述,使二者的对应关系十分简单和明确。纵观东汉历史,共有 12 次因地震罢免高官的事例,范曄都是按上述原则编纂的。因此在我国整理地震史料汇编时,便一直按照这一对应关系进行处理,并确实发掘出不少重要的地震信息。就研究二千年前的历史地震而言,其精度恐怕也只能达到这种水平了。今天,在整理地动仪这段历史地震资料时,把同一作者、在同一本书里、同时增写的《张衡传》中的陇西地震与《顺帝纪》中公元 134 年的高官“以地震免”对应起来,遵循了同样规则,并无越轨之举。

针对中国地震历史资料汇编中的这 12 次地震事件(谢毓寿,蔡美彪,1983),我们补充了相应的史料(表 1),便于讲清这种对应关系。

表 1 范曄对高官因地震免职与地震地点的记述特点

| 编号 | 地震时间 年-月-日 | 含有地震地点的记述 | 免职记述,不讲地震地点 |
|----|---------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 122-05-23 | 夏四月,京师地震 袁宏《安帝纪》 | 近以地震策免司空陈褒 《陈忠传》 |
| 2 | 133-06-18 | 己亥,京师地震 《顺帝纪》 | (王龚)迁司空,以地震策免 《王龚传》 |
| 3 | 134-12-13 | 果地震陇西 《张衡传》 | 司徒刘崎、司空孔扶免 《顺帝纪》 |
| 4 | 136-02-18 | 十二月甲寅,京师地震 《顺帝纪》 | (张衡)出为河间相 《张衡传》 |
| 5 | 138-02-28 | 京师及金城、陇西地震 《顺帝纪》 | 司徒黄尚免 《顺帝纪》 |
| 6 | 152-12-11 | 十月乙亥,京都地震 《桓帝纪》 | (黄琼)迁司空,会以地震策免 《黄琼传》 |
| 7 | 161-07-10 | 京兆、扶风及凉州地震 《桓帝纪》 | (黄琼)其年复为司空。秋,以地震免 《黄琼传》 |
| 8 | 165-11-05 | 九月丁未,京都地震 《桓帝纪》 | (周景)代刘宠为司空,视事二年,以地震策免 《周景传》 |
| 9 | 177-11-08 | 冬十月癸丑朔,日有蚀之,京师地震 袁宏《灵帝纪》 | 六年,迁球司空,以地震免 《陈球传》 |
| 10 | 191-07-31 | 六月丙戌,京师地震 袁宏《献帝纪》 | (种拂)代荀爽为司空,明年,以地震策免 《种拂传》 |
| 11 | 193-12-02 | 辛丑,京师地震 《献帝纪》 | (杨彪)代淳于嘉为司空,四年,以地震免 《杨彪传》 |
| 12 | 194-01-31 | 十二月辛丑,地震 《献帝纪》 | 司空赵温免 《献帝纪》 |

注:表中的出处除注明袁宏外,其余均引自范曄《后汉书》。

1.2 公元 134 年地震与张衡的悲剧

张衡留下的著作较多,对他的研究也比较细致。如果公元 134 年事件的确为地动仪所测的陇西地震,又引起过高官的撤查,那么张衡生平中的特殊变化就会成为一个旁证,使范文所述得以证实。从这个思路出发,我们把地震事件结合到张衡年谱(孙文青,1956;刘

永平, 1996)中, 便形成下述 132—139 年的张衡地震年谱^①. 读者将不难发现, 推断地动仪是对公元 134 年陇西地震的反应, 时间上最合理.

132 年(阳嘉元年)

8 月, 地动仪问世. 张衡上书《论贡举疏》.

133 年(阳嘉二年)

6 月 18 日京师地震, 地动仪应该出现反应(李善邦, 1981). 6 月 19 日, 顺帝刘保(19 岁)下罪己诏“朕以不德, 无以奉顺乾坤, 灾异不空设, 必有所应”(《顺帝纪》), 李固、马融和张衡三人上书地震对策. 李固认为地震是因用人不当引起, “本朝者心腹也, 州郡者四支也, 臣之所忧在心腹之疾”, 顺帝取李固的对策为第一名, 提升为议郎. 张衡与李固观点相同: “政善则休祥降, 政恶则咎征见, 天人之应, 天诚详矣……修政恐惧, 则转祸为福”(张衡《阳嘉二年京师地震对策》). 张衡也由太史令(年俸 600 石)升迁为侍中(年俸 2000 石), 侍从皇帝“掌握左右, 赞导众事, 顾问应对”(《后汉书》卷三六). 7 月 7 日, 三公中的二公——太尉庞参和司空王龚同时“以地震策免”, 中国历史第一次. 引起官场紧张, “诸常侍悉, 叩头谢罪, 朝廷肃然”, 于是“权臣皆切齿于(李)固, 将加之罪”(《后汉纪》卷十八). 李固后来冤死狱中、“露尸于四衢”“有敢临者加其罪”, 株连到他的“二公子皆受害”(《后汉书·李固传》). 张衡踌躇满志, 连续上书《请禁绝图讖疏》《论举孝廉疏》等政论.

134 年(阳嘉三年)

12 月 13 日陇西地震. 地动仪对这次地震的成功, 使那些“京师学者咸怪其无征”的责难者败北, 更使张衡对地震的发言权至高无上. 按照他的“妖星见于上, 震裂着于下, 天诚详矣”的观点, 顺帝在震后竟未下“群公百僚, 直言阙咎, 靡有所讳”的诏书, 而是直接询问张衡, 谁是天下最痛恨的人需要惩治? 张无言以答. 随后, 刚任职一年的司空孔扶(孔子的第 19 世孙)和司徒刘崎, 又同时“以地震免”(《顺帝纪》), 中国历史第二次. 范晔在《后汉书·张衡传》里写完了地动仪对陇西地震的成功反应之后, 继续写道: “帝引在帷幄, 讽议左右, 尝问(张)衡, 天下所疾恶者. 宦官惧其毁己, 皆共目之, 衡乃诡对而出. 阉竖恐终为其患, 遂共谗之”. 颇为李固事件的重演. 面对一年半内四位高官连续“以地震免”, 张衡自然变成宦官们声讨的对象, 地动仪恐怕也变成众臣“惧其毁己”的不祥之物. 这时, 张衡上书要求免去侍中, 宁愿降职而重做太史令, 言辞十分恳切: “臣仰干史职, ……愿得专于东观, 毕力于纪记, 竭思于补阙”(张衡《上疏请专事东观收检遗文》), 再上书《表求合正三史》, 愿超脱官场到东观书院, 收检残简编补汉史, 但“书数上, 竟不听”(《后汉书·张衡传》).

135 年(阳嘉四年)

又欲对孔子《易说》的篆、象二残缺篇做补编, 但也“竟不能就”(《后汉书》). 从此以后, 张衡再没有政论奏章和华丽诗词了. 而且他的文章属擅用典籍者, 以后的文章也不再用典, 被后人多以为恨, 史料特有“及后之著述, 多不祥典, 时人追恨之”(《后汉书》). 同年所写“惟天地之无穷兮, 何遭遇之无常? ……欲巧笑以干媚兮, 非余心只所尝”(《思玄赋》)就

^① 这部分的史料取自《后汉书》、《后汉纪》、《全后汉文》、《张河间集》、《张衡年谱》(孙文青, 1956), 以及由(明)张溥(2002)、(清)严可均(1999, 1985)、(清)王先谦(1984)、张震泽(1986)、周天游(1986)辑撰或校注的史料. 除较重要者外, 难以一一注明出处, 以节省篇幅. 事件的时间, 已经由史料中的干支纪年转换成阳历(万年历编写组, 1994). 有兴趣的读者可参看参考文献部分所列的史料.

是他当时的自我写照。以后四年所写，全部是悲伤黯淡的诗赋，即《怨篇》、《思玄赋》、《四愁诗》、《髑髅赋》、《冢赋》和收笔作《归田赋》，与两年前的频繁奏章——论举孝廉、论贡举、禁图讖、地震对策等竟成天壤地别。

136 年(永和元年)

2 月 18 日京师地震，正值农历大年卅，而上年闰八月(9 月 25 日)又曾日食，不吉利。顺帝遂采取一系列大动作：震后第二天 2 月 19 日(正月初一)再下罪己诏“朕秉政不明，日变方远，地摇京师”，3 月 5 日(正月十五)“宗祀明堂、登灵台、改元永和、大赦天下”(《后汉纪》卷十八，《后汉书》)。对官员的态度 180°转向：将公元 133 年因地震免职的庞参、王龚重新启用任三公太尉；惩戒张衡，逐出京师，二三月份迅即改任贫困的河间相(年俸 2000 石)，死前才准返京。张衡离京时痛述“同心离居，绝我中肠”(《怨篇》，张震泽，1986)。随着张衡政治地位的下降，地动仪的科学作用已不能发挥。

137 年(永和二年)

5 月 26 日和 12 月 23 日两次京师地震。张衡已离京城，顺帝无罪己诏，官员也无“以地震免”，天下太平。张衡写《四愁诗》，怀念陇西地震，悲愤俛邪打击，“时天下渐弊，郁郁不得志……，我所思兮在汉阳，欲往从之陇坂长，侧身西望涕沾裳”。写《髑髅赋》“死为休息，生为役劳，荣位在身，不亦轻于尘毛”。写《冢赋》“幽墓既美，鬼神既宁，降之以福，如水之平，如春之卉，如日之升”，期待来世(《张河间集》《全后汉文》等)。

138 年(永和三年)

2 月 28 日金城—陇西地震，损失相当严重，顺帝虽无罪己诏，但“司徒黄尚以灾异罢”(《后汉纪·顺帝纪》)。5 月 23 日，顺帝“遣光禄大夫案行，宣畅恩泽”。朝廷出现中常侍张逵等三人有罪事件，开始株连多人。张衡料自己来日不长，写《归田赋》“超尘埃以遐逝，与世事乎长辞”(《张河间集》)，求辞官回家，并上书顺帝“乞骸骨”，乞求自己死后遗骸的平安(《后汉书·张衡传》)。

139 年(永和四年)

4 月 24 日京都地震，帝无罪己诏，官无“地震免”。张衡被降职调回京城，由年俸 2000 石的河间相降为年俸 600 石的尚书，几个月后去世。张衡似无后嗣，死后由同岁的好友崔瑗葬于南阳府城东北的石桥镇，崔瑗后也获罪，三年后去世(《后汉书》卷八二《崔瑗传》)。

上述的张衡地震年谱说明，由于东汉末年的政治腐败和不能科学地解释地震，在“天诫论”思想的影响下，张衡晚年确实曾出现过一场悲剧。造成这个悲剧的直接原因，又与公元 132 年地动仪创制后，因连续发生 133 年、134 年地震而把汉朝廷最高长官三公——太尉、司徒、司空中的二公同时撤查紧紧相关，其惩戒的频度和力度空前绝后，开了中国历史的先河。这个做法在公元 136 年、138 年的地震时又继续重演(包括张衡公元 136 年被逐出京城)，以后竟然一直沿续近二千年到清朝。看来，张衡的科学活动在公元 134 年的陇西地震后已经不能继续，地动仪的作用也随之遭到致命地破坏。

公元 134 年，既是张衡辉煌的顶峰，也是他人生的转折。张衡与哥白尼(1473—1543 年)、伽利略(1564—1642 年)一样，当他们的革命性创造一旦可能危及到统治者的利害时，就会被很快地扼杀，继而成为发明者的殉难品。事实上，地动仪不同于浑天仪，后者只关系到天文历法的修订，而前者却涉及到天灾人祸，皇帝要下罪己诏，高官要被免职，震后的社会问题很复杂。从观测上来看，地动仪的维护难度也大，一年 365 天，须天天有人值

守才能捕捉到地震. 这种风险大、费力不讨好的事, 很难坚持数年. 可能是这个原因, “自此以后”直到公元 145 年顺帝去世. 尽管在公元 138 年、143 年发生过比公元 134 年陇西地震更大的地震灾害, 已经达到“裂城郭、压杀人, 死者人二千”; “山谷坼裂, 坏败城寺, 杀害民庶”的地步(《后汉书》). 但自公元 136 年把张衡排斥到河间后, 汉顺帝再也不下罪己诏了, “以地震免”高官的严酷做法已经大大和缓, 代之以“遣光禄大夫案行, 宣畅恩泽”的安抚政策. 经过公元 133 年和 134 年连续发生的地震撤官风波后, 地动仪这个“不祥之物”恐怕早已被冷落, 更无人再敢问津它的“丸声振扬”了.

从写史上看, 司马彪既未提陇西地震, 也未讲撤官事件, 不知是忌讳还是文字的丢失; 袁宏和范晔的“自此以后, 乃令史官记地动所从方起”恐为后补的空话, 因“灵台侍诏四十二人, 其十四人候星, 二人候日, 三人候风, 十二人候气, 三人晷景, 七人候钟律, 一人舍人”(《续汉书·百官二》, 刘昭注), 既无司地动仪的侍诏, 也未见“记地动所从方起”的后文(赵冠峰, 2004), 即使在张衡晚年的 136 年到 139 年间, 京师年年都遭迂到地震, 地动仪的灵敏度亦完全可以达到, 但史料中毫无地动仪工作的片言只语, 说明它已经不能发挥作用. 甚至在其后的百余年间也未见地震记录有明显增加的史料证据. 这说明, 地动仪的直接作用比较短暂, 随后不断遭破坏, 直到彻底失传.

1.3 公元 134 年地震的地点和震级

《后汉书·张衡传》中“果地震陇西”的地点所指, 系地域概念. “陇西, 陇山之西也”(臧励和, 1982; 张震泽, 1986). 它不是严格意义上的震中位置, 既非东汉的陇西郡(治狄道, 今甘肃临洮), 更非今日之陇西县城. 汉代时, 陇山以西的广袤地区人烟稀少, 常有边境战事, 很难具体准确. 比如公元 97 年 4 月地震在天水(清, 《伏羌县志》), 而公元 138 年 2 月地震在永靖西北(袁道阳等, 2004), 二者相距约 400 km, 但在《后汉书》中均统称为“陇西地震”(分别见于《和帝纪》和《顺帝纪》), 范晔和其它史料都不再作细致地区分.

根据张衡在公元 137 年“我所思兮在汉阳, 欲往从之陇坂长”的记述, 公元 134 年 12 月 13 日的陇西地震已经更加明确在陇山之西的天水一带. 因《后汉书·明帝纪》有“永平十七年(公元 74 年), 改天水郡为汉阳郡”, 故汉阳指当时的天水. 另, 东汉许慎在公元 121 年(安帝建光元年)完成的《说文解字》(许慎, 1963)有“陇, 天水大坂也”, 即汉代把陇山(在今陕西省陇县—甘肃省清水县一带)称为“陇首、陇坂、陇坻”, 谓磅礴高地之意. 成语“得陇望蜀”, 出自《后汉书·岑彭传》“既平陇, 复望蜀”一语, 这里的“陇”即天水的陇坂. 《三秦记》和《秦州记》还有“陇坂九迴, 不知高几许”“陇山东西百八十里, 登山巅东望, 秦川四五百里, 极目泯然”. 因此, 张衡在《四愁诗》中同时述及的“汉阳”和“陇坂”, 意在天水一带, 谓陇西. 考虑到天水—洛阳的震中距 600 km 左右, 史书讲“后数日驿至, 果地震陇西”, “数日”大体为 3—5 日. 除非十万火急的边境战事, 即便对皇帝的诏书, 驿站一般都是按“日行三百里”的速度传送消息的. 照此估算, 马在三五天内跑完 600 km 的路程也符合史料. 况且范晔把“天水地震”称之为“陇西地震”已经不只一次.

陇西地震在京师洛阳的影响是“一龙机发, 而地不觉动”, 烈度应为 III⁺~IV(關野雄, 1972), 即悬挂物(都柱等)有轻微摆动, 大多数人员无感. 这种情况有历史地震可佐证, 比如在清朝有过 5 次曾在洛阳地区造成 III 度左右的烈度、震中又在水天一带的事件, 它们是: 公元 1654 年 7 月 21 日天水南地震(M8.0)、1709 年 10 月 14 日中卫地震(M7½)、1718 年 6 月 19 日通渭南地震(M7½)、1765 年 9 月 2 日甘谷地震(M6½)和 1879 年 7 月 1 日文具

地震(M8.0)(冯锐, 武玉霞, 2003). 该处是南北地震带的北段, 处于南北向六盘山构造与东西向秦岭构造的交会部位, 至今仍然是地震活动的高发区.

这次地震的震级, 可作如下估算: 基于地震资料所得到的中国西部烈度 I 、震级 M 和距离 R 的统计关系为(中国地震烈度区划图编委会, 1991)

$$\begin{cases} I_1 = 5.643 + 1.538M - 2.109 \ln(R_1 + 25) \\ I_2 = 2.941 + 1.363M - 1.494 \ln(R_2 + 7) \end{cases} \quad (1)$$

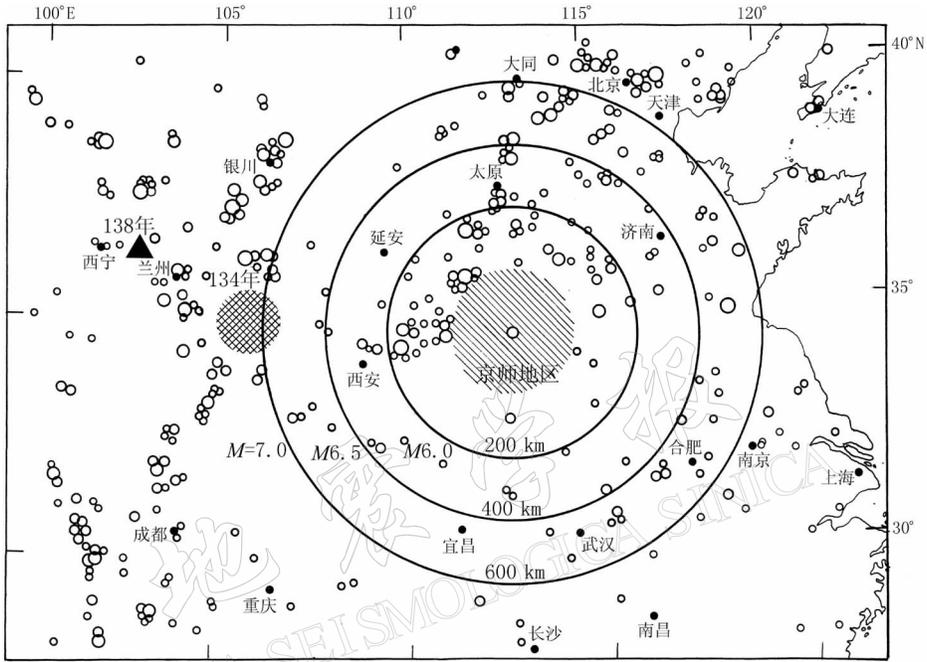


图 1 地动仪可以监测的范围和震级的粗估

图中的空心圈为历史地震震中(1965年前), 黑三角是公元 138 年 2 月 28 日金城—陇西地震的震中, 两个阴影区分别代表京师地区和推断的公元 134 年 12 月 13 日陇西地震的位置

式中, R_1, R_2 分别为长短半轴距离(km), 陇西地震在洛阳地区的烈度 $I = \text{III}^+ \sim \text{IV}$. 考虑到史料中的“京师”也是一个区域性概念, 而公元 134 年地震与 133 年地震都有司空司徒“以地震免”的严重事件, 具有一定的可比性, 后者既然有“地动、山崩、火灾之异”(《后汉书》卷六三, 《李固传》), “会复有地震, 缙氏山崩之异”(《后汉书》卷六一, 《左雄传》), 前者的震级恐可相比. 由式(1)反推, 大体可得距离 $R \approx 600 \text{ km}$, 震级 $M \approx 7.0$ 为妥. 图 1 给出了地动仪可以监测的范围和可控制的地震震级, 估计地动仪对 200~500 km 的 6 级左右的地震会有较好地反应.

1.4 小结

《后汉书·张衡传》所记述的陇西地震应为 134 年 12 月 13 日地震事件. 作为一个粗估, 其地点在汉阳(今天水一带, $34.5^\circ\text{N}, 105.9^\circ\text{E}$), 在洛阳地区的烈度约 $\text{III}^+ \sim \text{IV}$, 震级 $M \approx 7.0$ 为妥. 这个结论是根据范晔对陇西地震的描写、各种史料中揭示的当时历史背景、张衡的生平、张衡的诗文、汉代地名考证、清朝 5 次历史地震对比和烈度衰减估算作出的. 该事件在中国地震历史资料汇编中已收录(谢毓寿, 蔡美彪, 1983), 只是地点不明.

2 对公元 134 年地震的数值模拟

合理的估算公元 134 年陇西地震在洛阳地区的地动水平, 关系到对地动仪进行科学复原时的参数取值问题. 依前节所述, 取震级 $M=7$ 、震中距 $\Delta=600$ km, 采用了 3 种方法来估算陇西地震在洛阳的水平向最大地动位移, 并利用加速度峰值衰减关系估算加速度.

2.1 由震级定义估算

地震震级一般是以某一周期的最大地动位移来测定的. 因此, 如果已知地震震级与震中距, 就可以估算相应周期的最大地动位移. 我国面波震级的公式为(郭履灿, 庞明虎, 1981)

$$M_s = \lg\left(\frac{A}{T}\right)_{\max} + 1.66 \lg\Delta + 3.5 \quad (2)$$

式中, A 为水平向地动位移, 单位为 μm ; T 为周期; Δ 为震中距, 单位为度. 当震中距 $\Delta=600$ km 时, 地动位移的卓越周期为 $5\sim 8$ s. 对于震级 $M=7$, 卓越周期 $T=5$ s 时, $A=1.0$ mm. 这种估算显然是相当粗糙的, 尚不能代表实际的最大地动位移.

2.2 由数字宽频带地震记录估算

最直接的方法是通过实际地震记录来获取. 虽然公元 134 年陇西地震的震级与距离已有初步估计, 但由于现代地震仪器的历史不长, 很难找到一个恰好发生在水的 7 级地震并在洛阳获有地震记录. 幸运的是, 陇西地区地震活动性较高, 经常发生 5 级左右地震, 而且洛阳从 1970 年便设有一个地震台站, 从 2000 年起又有了数字宽频带地震记录, 并记录到了几次陇西地震. 相比于模拟式地震仪, 数字宽频带地震仪具有频带宽、动态范围大、分辨率高等突出优点, 对地震分析非常有利. 于是, 可通过对这些地震记录的适当修正, 估算出洛阳地区的水平向最大地动位移与加速度. 从式(2)出发, 若不计震中距的变化, 那么陇西地震($M_s 7$)在洛阳的最大位移可用下式从所记录到的地震的最大位移修正得到:

$$A = 10^{7-M_0} A_0 \quad (3)$$

式中, A_0 是洛阳地震台所记录到的地震的位移, M_0 是它的面波震级. 该台宽频带地震仪记录到了 3 次发生在甘肃陇西地区的较大震级的地震, 分别是: 2003 年 10 月 25 日, $M_s 5.7$ 地震, 甘肃民乐—山丹, 距洛阳约 1 100 km; 2003 年 11 月 13 日, $M_L 5.2$ 地震, 甘肃岷县, 距洛阳约 800 km; 2004 年 9 月 7 日, $M_L 5.0$ 地震, 甘肃岷县, 距洛阳约 800 km. 经过仪器响应校正后, 可得到这些地震在洛阳地震台三分向(N—S、E—W、U—D)的地动位移和加速度时程. 图 2 和图 3 分别是 2003 年 10 月 25 日地震和 2004 年 9 月 7 日地震的地动位移和加速度时程. 根据面波震级 M_s 和地方震级 M_L 间的换算公式

$$M_s = 1.13M_L - 1.08 \quad (4)$$

再利用式(3), 便可以得到将这 3 次地震修正为 $M_s 7$ 后在洛阳地震台的水平向最大地动位移, 分别为 1.6 mm, 1.3 mm 和 1.1 mm; 最大加速度分别为 $0.13 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$, $0.50 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 和 $0.80 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$. 考虑到洛阳地震台位于洛阳市龙门西山坡, 台基是厚层灰岩, 岩性致密坚硬. 而东汉灵台处于古洛河旁的河漫滩里, 夯实土的台基较高, 根据考古挖掘(中国社会科学院考古研究所洛阳工作队, 1978)和我们的现场踏勘, 置放地动仪的密室至少高出基础面 2 m 左右, 这种场地条件对地面震动会有一定的结构放大作用. 经综合评定, 认为用此种方法估算的“陇西地震”在洛阳灵台处的水平向最大地动位移应在 2~6

mm, 最大加速度则小于 10^{-2} m/s^2 .

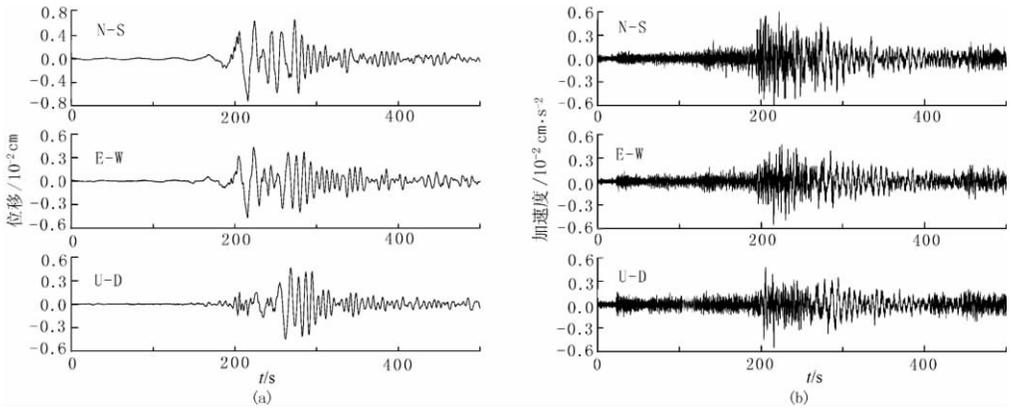


图 2 2003 年 10 月 25 日地震在洛阳地震台的三分向地动位移(a)和加速度(b)时程

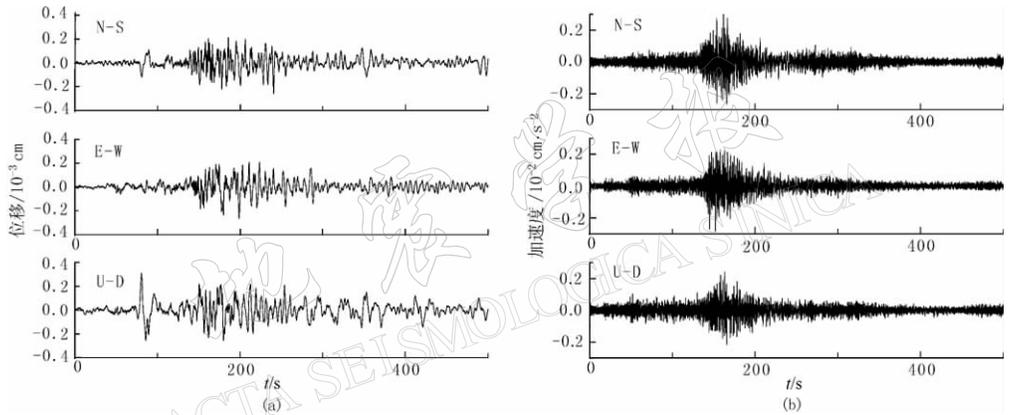


图 3 2004 年 9 月 7 日地震在洛阳地震台的三分向地动位移(a)和加速度(b)时程

2.3 由小震记录合成大震记录估算

经验格林函数法是以小震或余震作为格林函数来合成大震或主震的地震动时程. 其表达式为 (Hutchings, 1991)

$$u_n(\mathbf{X}, t) = \sum_i \frac{\mu A_i S(t')_i}{M_{0i}} * e_n\left(\mathbf{X}, t_i - \frac{\bar{x}_i}{v}\right)_i \quad (5)$$

式中, $u_n(\mathbf{X}, t)$ 是 \mathbf{X} 处 t 时刻的位移, A_i 为子源面积, $S(t')_i$ 为震源时间函数, M_{0i} 为标量地震矩, \bar{x}_i 为震源至子源的距离, v 是破裂速度, $e_n(\mathbf{X}, t'_i)$ 是经验格林函数, $*$ 表示褶积. 在合成的过程中, 震源时间函数取为图 4 所示的三角形.

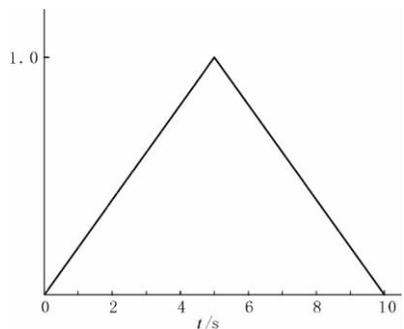


图 4 震源时间函数

现分别以 2003 年 10 月 25 日甘肃民乐—山丹 $M_S 5.7$ 地震, 2003 年 11 月 13 日甘肃岷县 $M_L 5.2$ 地震和 2004 年 9 月 7 日甘肃岷县 $M_L 5.0$ 地震为经验格林函数, 将图 4 所示的震源时间函数经地震矩调整后, 用式(5)进行计算, 便得到了合成的“陇西地震”在洛阳的水

平向地动位移和加速度时程. 其结果分别见图 5, 6, 7.

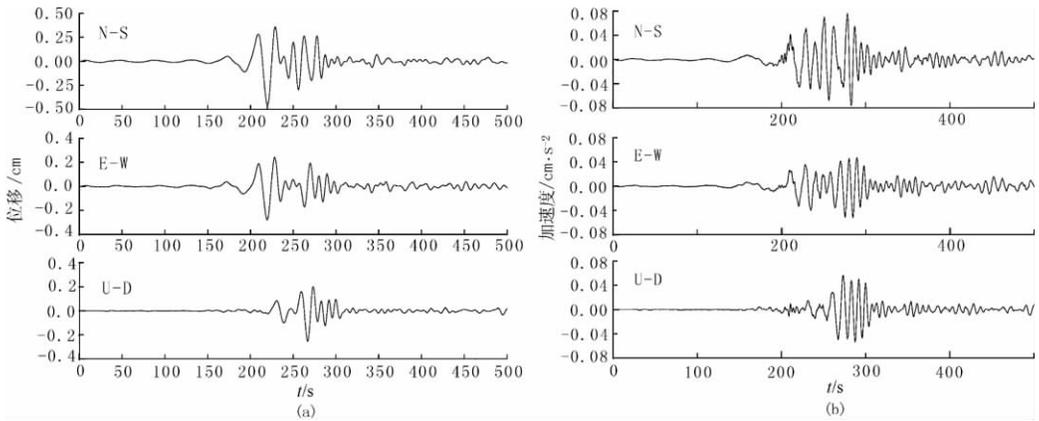


图 5 用 2003 年 10 月 25 日山丹 $M_{5.7}$ 地震合成后的洛阳地震台三分向地动位移(a)和加速度(b)时程

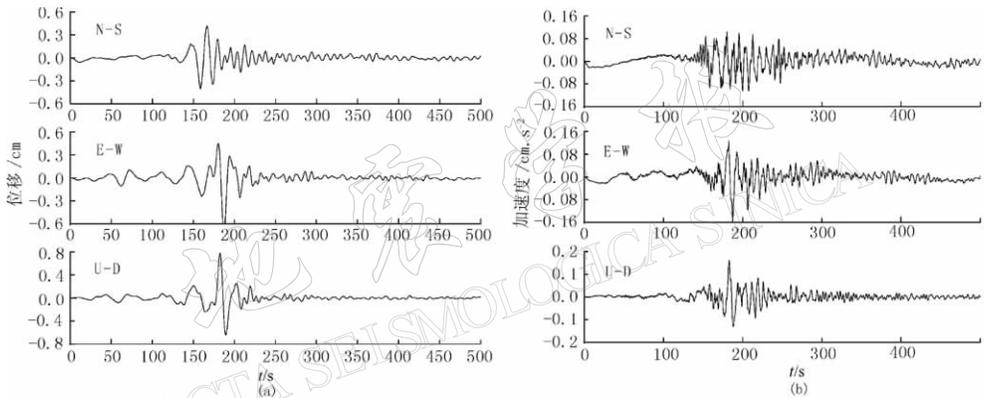


图 6 用 2003 年 11 月 13 日陇西 $M_{4.8}$ 地震合成后的洛阳地震台三分向地动位移(a)和加速度(b)时程

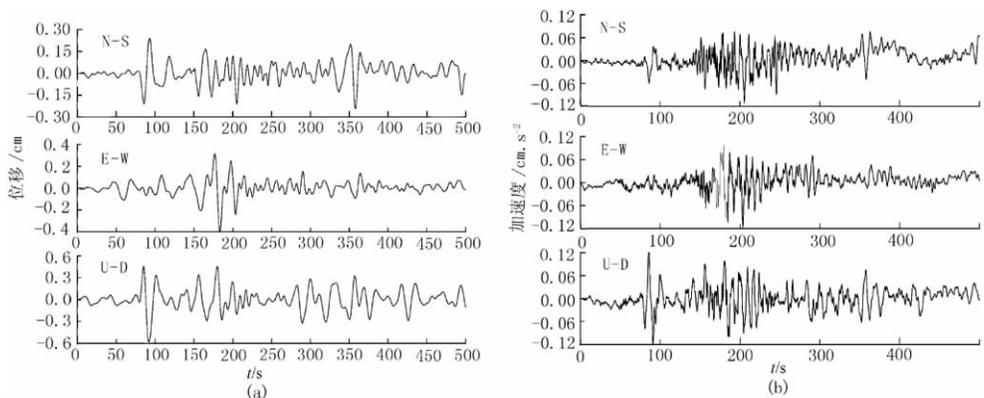


图 7 用 2004 年 9 月 7 日陇西 $M_{4.6}$ 地震合成后的洛阳地震台三分向地动位移(a)和加速度(b)时程

从这 3 张图可以看出, 将这 3 次地震作为经验格林函数所得到的“陇西地震”, 在洛阳地震台处的水平向最大地动位移分别为 4.5, 6.5 mm 和 4.1 mm, 最大加速度分别为 0.08

$\times 10^{-2} \text{ m/s}^2$, $0.16 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 和 $0.12 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$. 考虑到洛阳地震台和灵台台基条件的差异, 用此种方法估算的“陇西地震”在洛阳灵台处的水平向最大地动位移应为 $6 \sim 8 \text{ mm}$, 最大加速度小于 10^{-2} m/s^2 .

数值模拟结果可以与实际 7 级地震的记录进行对比: 2002 年 3 月 31 日我国台湾东部海域发生 7.1 级地震, 距震中约 800 km 的南昌数字地震台记录到该地震. 经处理后得到的位移与加速度图分别见图 8. 该地震在南昌地震台的最大位移约 4 mm, 最大加速度 $a = 0.4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$. 从这样一个实际地震记录来看, 我们所作的上述数值估算是比较合理的.

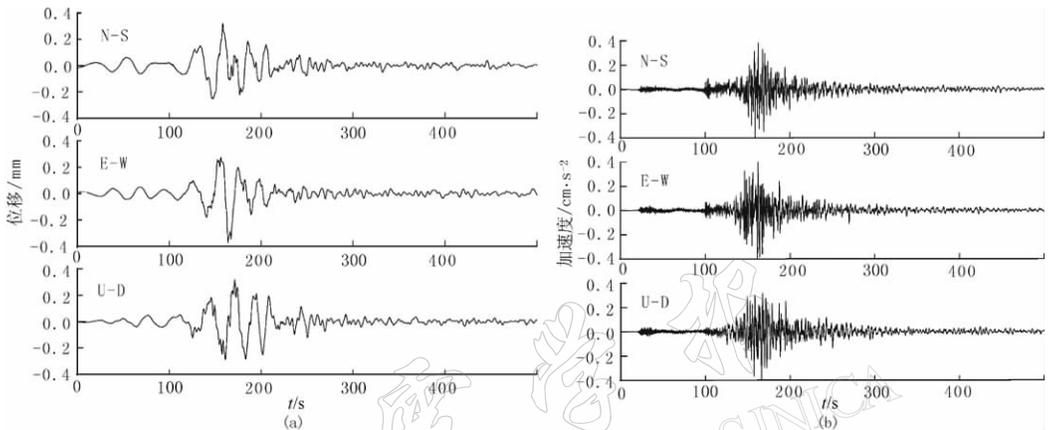


图 8 2002 年 3 月 31 日台湾东部 7 级地震在南昌地震台的地动位移(a)和加速度(b)时程

3 结论

1) 张衡地动仪对陇西地震的反应, 一直被误作公元 138 年 2 月 28 日的金城—陇西地震, 因与史料矛盾而被国内外的研究所否定. 作者通过对史料的详细考证, 特别是《后汉书》对陇西地震的描写、各种史料中揭示的当时历史背景、张衡的生平、张衡的诗文、汉代地名考证、清朝 5 次历史地震对比和烈度衰减估算, 明确了这次陇西地震的时间应为公元 134 年 12 月 13 日(阳嘉三年十一月壬寅)地震. 作为一个粗估, 其震中在汉阳(今天水一带), 震级约 7 级. 该事件在中国地震史资料汇编中已收录, 只是 20 余年前因研究不够, 地点不明确或误以京师标注罢了.

2) 由于东汉末年的政治腐败和不能科学地解释地震现象, 在“天诚论”思想的影响下, 张衡晚年曾出现过一场悲剧. 这与公元 132 年地动仪创制后, 因连续发生公元 133 年、134 年地震而撤查高官有着直接的关系, 开了中国历史的先河, 张衡也在 136 年地震后被逐出京城. 看来, 公元 134 年既是张衡辉煌的顶峰, 也是他人生的转折, 他此后的科学活动已经无以为继. 地动仪的直接作用比较短暂, 随之也遭到致命地破坏.

3) 为了分析公元 134 年陇西地震在东汉灵台的地面振动影响, 我们利用 2003—2004 年 3 次陇西地震在洛阳台的宽频带地震记录, 从震级定义、数字宽频带地震记录、小震记录合成大震记录 3 个方面进行了数值估算. 对于利用经验格林函数法所合成的“陇西地震”的地震动时程, 与台湾东部海域的一次实际地震记录进行对比, 确认了数值估算是比较合

理的。作者在考虑到洛阳地震台与灵台台基条件的差异后,得到洛阳灵台处的水平向最大地动位移应为 6~8 mm,最大加速度小于 10^{-2} m/s^2 。这些结果对新完成的张衡地动仪的科学复原模型起到了重要的定量检测作用。

参 考 文 献

- 冯锐. 2003. 张衡地动仪的否定之否定[J]. 防灾博览, (1): 5~9
- 冯锐, 武玉霞. 2003. 张衡候风地动仪的原理复原研究[J]. 中国地震, 19(4): 358~376
- 冯锐, 朱涛, 武玉霞, 等. 2006a. 张衡地动仪的科学性及其历史贡献[J]. 自然科学史研究, 25(增刊): 1~15
- 冯锐, 武玉霞, 朱涛, 等. 2006b. 对地动仪传统模型的置疑[J]. 自然科学史研究, 25(增刊): 16~33
- 冯锐, 武玉霞, 朱涛. 2006c. 地动仪的史料和模型研究[J]. 自然科学史研究, 25(增刊): 34~51
- 冯锐, 朱涛, 武玉霞, 等. 2006d. 张衡地动仪的科学复原[J]. 自然科学史研究, 25(增刊): 52~74
- 郭履灿, 庞明虎. 1981. 面波震级和它的台基校正[J]. 地震学报, 3(3): 313~319
- 国家地震局兰州地震研究所. 1985. 陕甘宁青四省(区)强地震目录[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 6~7
- 国家地震局兰州地震研究所. 1989. 甘肃省地震资料汇编[M]. 北京: 地震出版社, 12~15
- 惠栋(撰, 清). 1985. 后汉书补注(四)[M]. 北京: 中华书局出版, 1 104~1 105
- 雷立柏(Leeb). 2000. 张衡, 科学与宗教[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 249~254
- 李善邦. 1981. 中国地震[M]. 北京: 地震出版社, 170~200
- 刘永平(主编). 1996. 科圣张衡[M]. 郑州: 河南人民出版社, 1~361
- 孙文青. 1956. 张衡年谱[M]. 上海: 商务印书馆, 1~179
- 王先谦(撰, 清). 1984. 后汉书集解[M]. 北京: 中华书局出版, 114~675, 727~735
- 万年历编写组. 1994. 中华两千年历书(1~2060)[M]. 北京: 气象出版社, 1~700
- 谢毓寿, 蔡美彪(主编). 1983. 中国地震历史资料汇编(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社, 14~32
- 许慎(撰, 汉). 1963. 说文解字[M]. 北京: 中华书局, 306
- 严可均(辑, 清), 许振生审订. 1999. 全后汉文[M]. 北京: 商务印书馆, 57~63, 519~571
- 严可均(辑, 清). 1985. 全上古三代秦汉三国六朝文[M]. 北京: 中华书局, 52~55, 521~777
- 袁宏(撰, 晋)、周天游校注. 1987. 后汉记校注[M]. 天津: 古籍出版社, 437~564
- 袁道阳, 雷中生, 刘小凤, 等. 2004. 138年金城—陇西6 $\frac{1}{4}$ 级地震的史料考证与构造背景探讨[J]. 地震地质, 26(1): 52~60
- 中央地震工作小组办公室主编. 1971. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社, 1~3
- 中国社会科学院考古研究所洛阳工作队. 1978. 汉魏洛阳南郊的灵台遗址[J]. 考古, (1): 54~57
- 中国地震烈度区划图编委会. 1991. 中国地震烈度区划图(说明书)[M]. 北京: 地震出版社, 1~15
- 臧励和. 1982. 中国古今地名大词典[M]. 香港: 商务印书馆香港分馆, 1358
- 张溥(辑, 明). 2002. 汉魏六朝百三名家集(张衡河间集)[M]. 南京: 江苏古籍出版社, 396~413
- 张震泽(校注). 1986. 张衡诗文集校注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 1~378
- 赵冠峰. 2004. 张衡地动仪文献蠡读——对地动仪功能的重新认识[J]. 自然科学史研究, 23(4): 334~344
- 周天游(辑注). 1986. 八家后汉书辑注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 1~443
- 關野雄. 1972. 張衡の候風地動儀における都柱の復原[A]. 见: 財團法人東方學會編. 東方學會創立二十五周年紀念東方學論集[C]. 東京: 財團法人東方學會, 433~449
- Hutchings L. 1991. "Prediction" of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green's functions[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 81(5): 1 813~1 837
- Qian Wenyuan. 1985. *The Great Inertia, Scientific Stagnation in China*[M]. Sydney: Croom Helm, 20
- Sleeswyk A W, Sivin V. 1983. Dragons and toads, the Chinese seismoscope of A D 132[J]. *Chinese Science*, (6): 1~19

附录

根据中国地震历史资料汇编(谢毓寿, 蔡美彪, 1983), 下表给出了张衡在世期间(公元 78—139 年)的史料分布情况. 凡有记载者, 用·标注; 仅在范晔《后汉书》中才独有的地震记载, 用△标注. 司马彪为《后汉书·五行志》, 袁宏为《后汉纪》. 未注明地点者为史料的地点不明事件.

附表 张衡期间地震事件的史料来源

| 地震时间 年-月-日 | 地点 | 司马彪 | 袁宏 | 范晔 | 范晔文对增补事件所记 |
|---------------------|-----------|-----|----|----|------------------------------|
| 92-06-09 | 京师 | | · | | |
| 92-08-08 | | · | | · | |
| 93-04-07 | 陇西 | · | · | · | |
| 95-11-08 | 京师 | · | · | · | |
| 97-04-08 | 陇西 | · | | · | |
| 105-06-19 | 雍县 | · | · | · | |
| 107 | | · | · | · | |
| 108 | | · | · | · | |
| 110-01-12 | | · | · | · | |
| 110-04-14 | | · | | · | |
| 110-10-02 | | | | △ | (云南)益州郡地震 |
| 111-02-01 | | · | | · | |
| 113-02-06 | | · | · | · | |
| 114 | | · | · | · | |
| 115-12-11 | | · | · | · | |
| 116-03-01 | | · | · | · | |
| 117-01-17 | | · | · | · | |
| 117 | | · | · | · | |
| 118 | | · | · | · | |
| 119-03-10 | 京师 | · | · | · | |
| 120-01-17 | | · | · | · | |
| 120 | | · | · | · | |
| 120—121 年 | | | | △ | 灾谴频数, 地坼天崩, 高岸为谷 |
| 121-12-08 | | · | · | · | |
| 122-05-23— 06-20 | 京师 | | · | · | |
| 122-08-19 | 京师 | · | · | · | |
| 122-10-23 | | · | · | · | |
| 123 | 京师 | · | · | · | |
| 124-01-06 | 京师 | | | △ | 京师地动 |
| 124 | 京师 | · | · | · | |
| 125-12-15 | 京师 | · | · | · | |
| 128-02-22 | 京师, 汉阳 | · | · | · | |
| 133-06-18 | 京师 | · | · | · | |
| 134-12-13 | | | | △ | 司徒刘崎、司空孔扶免. 孔氏仲渊为司空, 以地震免 |
| 136-02-18 | 京师 | · | · | · | |
| 137-05-25 | 京师 | · | · | · | |
| 137-12-22 | 京师 | · | · | · | |
| 138-02-28— 06-02 | 京师, 金城—陇西 | · | · | · | |
| 139-04-24 | 京师 | · | · | · | |
| 140-03-22 | 京师 | · | · | · | |
| 总计 | | 34 | 29 | 39 | |

ZHANG HENG'S SEISMOMETER AND LONGXI EARTHQUAKE OF 134 AD

Feng Rui Yu Yanxiang

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract: Longxi earthquake was the only earthquake example, which Zhang Heng's Seismometer had detected. Therefore this event attracted the attention of the academic circle and also served as crucial evidence, examining the rationality of the reconstructed model of the seismometer. But for a long time, owing to the fact that the Jincheng-Longxi earthquake of February 28 of 138 AD was mistakenly taken as the said earthquake and that it went against the historical records and was refuted by the researches of both in China and abroad. By making careful textual research of historical records, especially by analyzing the description of Longxi earthquake of "Houhan Shu", by studying the historical background exposed by historical records at that time, Zhang Heng's biography, his poems and place names of Han Dynasty, by comparing 5 earthquakes occurred in Ming-Qing dynasties and their attenuation of seismic intensity, the authors have come to the conclusion that the Longxi Earthquake should take place on December 13, 134 AD (Yangjia 3 year). Rough assessment was that the epicenter should be in Tianshui area and the magnitude was about 7. Due to the political corruption and inability to scientifically explain earthquake phenomenon at the end of Eastern Han Dynasty, a tragedy occurred during the later years of Zhang Heng's life that he had direct relations with the earthquake 134 AD. In order to analyze the ground motion at Lingtai caused by Longxi earthquake in 134 AD, the digital broad-band seismic records of 3 Longxi earthquakes in recent years recorded by Luoyang Seismic Station are used. The numerical modelings are made from three aspects of seismic magnitude definition, digital broad-band seismic records and synthetic seismograms from small earthquake to big one. The results have shown that the maximum horizontal displacement at Lingtai, Luoyang, should be between 6~8 mm, and the maximum acceleration should be less than 10^{-2} m/s². These results have played an important role in quantitative test of the scientific reconstruction model of Zhang Heng's seismometer.

Key words: Zhang Heng's seismometer; Longxi earthquake; research on historical records; numerical modeling; historical earthquake