

冯锐、武玉霞 2013 张衡地动仪的诞生,中国地震 29(2),179~197。

· 研究论文 ·

张衡地动仪的诞生

冯锐 武玉霞

中国地震台网中心,北京市西城区三里河南横街5号 100045

摘要 地动仪的诞生有着深厚的历史背景,本文旨在探讨张衡科学思想的形成过程和物质基础。张衡生活在东汉文化发展的顶峰时期,“观察异象、辨别凶吉”的朴素愿望是研制地动仪的原始动力。作者追溯了当时的历史背景、张衡的学术历程、地动仪的问世过程,分析了东汉早期的地震活动、古代的地震观念和灵台科学活动的特点。指出地动仪的研制起步于公元128年,张衡基于感性认识升华出两个地震概念——地震的位置可按方位判断、地震和地裂必须加以区别,这使地动仪的研制有了明确的技术追求。仪器制作上,张衡崇尚“制器尚象”的原则。地动仪的测震原理模仿了悬挂物(即天然验震器)对地震的反应,技术实现上借鉴了门门类的触发机构,还通过龙首吐丸的方式留下了发生地震的物质证据,这3个关键问题的解决成就了公元132年地动仪的问世和134年的成功验震,构成他科技创新的完整内容。地动仪的发明深化了人类对自然规律的认识,对当时的东汉及其后世界文化的发展具有积极意义。

关键词: 地动仪的发明 张衡 古代地震观念 东汉早期的地震活动 悬挂物 触发机构

[文章编号] 1001-4683(2013)02-0179-19 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

张衡地动仪在科学上的重要地位并不在于测到了一个或几个东汉时期的地震,而是标志着人类摸索出了一条能在运动系统当中测量系统自身运动的途径,即通过悬挂物的惯性来揭示运动系统间的差异。这不仅仅是技术上的突破,更是科学思想的跃变,使人们对自然规律有了新的认识,直到17世纪被牛顿提升为力学3大定律之首——惯性定律而被广为应用。研究张衡的科学贡献、正确认识地动仪的历史价值,是学界的义务和责任。

回顾历史,张衡身后的地动仪一直未被国人认识,千余年间处于被否定、讥讽和空谈的地位。及至清末,对其也未做过认真研究。著名学者何琇(公元1724~1805年,《四库全书》总纂官纪晓岚的老师)云:“张衡地动仪,余终不信有其事。气动于数千里,而机(即地动仪——作者注)应于此,万无此法”(何琇,1889)。国学大师李澄宇(公元1882~1955年)

[收稿日期] 2012-10-16; [修定日期] 2013-01-02。

[项目类别] 国家自然科学基金项目(40644019); 中国地震局科学研究专项“地动仪复原模型的优化和定型设计”。

[作者简介] 冯锐,男,生于1941年,毕业于中国科学技术大学,研究员。从事地震学地球物理学领域的研究。

Email: fr97214@sina.com

言：“张衡作浑天仪难，而候风地动仪尤难。盖非难其动，难其应地（震）而动，且远地动亦可应之也。”（《读后汉书·书张衡传》）。与此相反，就在同样的年代，日本人服部一三（Ichizo Hattori，1851～1929年）和英国人米尔恩（John Milne，1850～1913年）在1875～1880年间首先对张衡地动仪进行了复原研究，逐字逐句翻译《后汉书·张衡传》中有关记载，深入分析了它的测震原理和结构，确认都柱为悬挂状态，做过几十种对比试验，1883年明确肯定其重要价值和验震器的地位，1892年设计了悬垂摆式地震仪原型，1894年发明了现代（水平摆）地震仪（Herbert-Gustaf et al，1980），随后在1897年将之架设到台湾台北（阿部胜征，2000），终于开创了现代地震学的新时代。至此，国人如梦方醒，才知“世界最早的验震器是由中国人张衡发明的”（Milne，1883）。

国内对张衡的地动仪有个认识过程。吕彦直（1893～1929年）于1917年、翁文灏（1889～1971年）于1924年、李善邦（1901～1980年）于1931年最早肯定了它并进行了介绍（翁文灏，1924；李善邦，1945），中国对地动仪的复原研究是王振铎（1912～1992年）于1936年开始的，并于1951年提出了（传统）复原模型（王振铎，1963）。近十几年国内的研究更加深入和丰富，美英日法比等国和港澳台地区对2008年建立的科学复原模型（冯锐等，2006）做了大量宣传介绍，《中国大百科全书》（第二版，2009）、中学课本（人民教育出版社，2011）、中国科技馆和上海科技馆等都采用了新的复原模型。当然，否定论者也有，2010年底的媒体小报出现一股把中医和地动仪均视为“伪科学”的炒作，称“地动仪仅仅是个无用的摆设”、“它更重要的身份是礼器”、“中国古代没有科学”，研究地动仪属于“历史泡沫”，造成公众认知的一时混乱。在《人民日报》和学界严肃的批评下（吕绍刚，2010），闹剧才收场。韩国，又出现了把张衡地动仪作为高丽非物质文化遗产的荒谬主张。

这警示我们，正确地、科学地认识地动仪很有必要，面对科学与神学、科学与社会观念的纠结，浅尝辄止无助于认识的深入和准确。本文探讨地动仪的诞生历史，也属于认识上的薄弱环节，误解颇多。如李艳平（1997）指出，研究的目的是要证明发明者有过哪些贡献，掺以虚假的浮夸，而是要通过对历史的追溯，探寻正确认识是如何获得的，分析张衡创造性思维有哪些特点，理性的看待中国古代科学在世界文化中的地位，汲取有益的思想营养等等，这是科学史研究的价值所在。

1 时代背景

1.1 有利的历史条件

张衡一生（公元78～139年）经历了汉章帝、和帝、殇帝、安帝和顺帝五代王朝。

公元25年东汉王朝建立，明章二帝期间（公元57～88年）“天下安平，百姓殷富”，史称东汉盛世。永元三年（公元91年）汉军出居延塞，匈奴战败后离开蒙古高原向东欧顿河一带大规模西迁，进一步稳固了东汉科技进步、生产发展的社会基础。我们注意到，人们耳熟能详的汉代科技成果大多出自该时段，即从公元89年汉和帝登基到公元132年地动仪问世期间，恰值张衡年富力强才华横溢的顶峰期。比如：

① 王充作《论衡》（约公元90年，后文所涉年代均为公元纪年），这是一部20多万字的哲学著作；

② 王符作《潜夫论》36篇，其中广涉政治、哲学、自然科学等诸多领域；

- ③ 班固所作《汉纪》(92年),是继司马迁《史记》后的鸿篇巨作,共为二十五史之伯仲;
- ④ 班超通使西域31年而归(103年卒),甘英于97年抵波斯湾,促进了东西文化的交流;
- ⑤ 蔡伦发明造纸术(105年),117年向各地推广,位居中国四大发明之首;
- ⑥ 刘珍始作《东观汉记》(110年),又撰《释名》30篇,为《后汉书》的主要依据;
- ⑦ 许慎作《说文解字》(121年),9353个汉字,为中国第一部字典,规范了汉语文字体系;
- ⑧ 《九章算术》经过几代人及马续等努力,和帝时成书,奠定了中国古代数学体系;
- ⑨ 霍融改进漏刻,贾逵创制太史黄道铜仪定黄道宿度(105年前),张衡作地形图(115年)、漏水转浑天仪(117年)、《灵宪》(118年),恒星记载量已达2500颗,与现代观测值接近;
- ⑩ 冶金、制陶、水利等工程技术和文学成就。

地动仪问世前,东汉的科技水平和生产力已高度发展(王渭清,2008)。盛世出成果,大批思想家、历史学家、数学家和科学家顺潮而出,如2位杰出的史学家(班固、刘珍)、3位著名的思想哲学家(王充、王符、仲长统)中的2位、4位重要文化圣人(蔡伦、许慎、张衡、张仲景)中的3位,构成东汉200年文化发展的顶峰时期。这个历史环境对张衡的科学思想和科学活动产生了有益的影响,他受惠于时代,亦光辉了历史。同期的西方,也在古罗马出现了托勒密(Claudius Ptolemaeus,约公元90~170年)等杰出人物,在哲学、数学、天文学等领域创造了辉煌。从此,东西两种科学体系完成了奠基、分异,开始独立发展。张衡和托勒密作为东西方文化的同期代表人物被世界关注(雷立柏,2000)。

1.2 张衡的学术历程

张衡的曾祖父是西汉王莽时代的大地主,祖父张堪对东汉的建立有过战功,后任渔阳太守,父亲家境败落,曾靠朱晖接济(《后汉书·张堪传》、《后汉书·朱晖传》)。张衡生于西鄂(今河南南阳),长于贫困。当时京师设有太学,传授儒家五经(诗书易礼春秋)六艺(礼乐射御书数),但张衡未曾上过。贫寒造就了他刻苦钻研、独立思考的作风,少有因循习旧、阿谀逢迎的迂腐。

张衡幼年敬仰南阳学者杜诗(《后汉书·杜诗传》),青年时期结识了大学问家贾逵,研读过西汉杨雄《太玄经》等天文历法,与马融、王符、窦章等多位重要学者过从甚笃,其中文学家崔瑗和史学家刘珍对他影响最大。深究他的科学成就,绝非无师自通、人云亦云,是他博采众长、勇于实践的总结。比如他发展的浑天说和浑天仪,继承了西汉落下闳的天文成果(查有梁,2007)和耿寿昌的设计;他写的《太玄经注》,是在研读杨雄著作并与崔瑗切磋后二人分别写成的;他把浑天仪和“瑞轮萸荚”(《晋书·天文志》)改用漏水推动而实现了匀速运转,是受到了杜诗的水排技术启发;他制作的指南车和记里鼓车,是根据史料记载对周朝失传物的复原;他比照班固的《两都赋》并结合亲身游历,创作出辉煌篇章——《二京赋》;他受过刘珍的指导,对《史记》和《汉纪》提出了十几条修改意见;在《周髀算经》“径一周三”和《九章算术》“渐进分数”的基础上,他把圆周率的推算精度提高到 $3.1622 \sim 3.1466$;他任职太史令13年,发挥了灵台学者和工匠们集体的创造力量,在文学、天文、地理、数学和机械学的广泛领域都做出了成就,流传于今的著作还有53篇(孙文青,1956),凝聚了那个时代华

夏民族的聪明才智。张衡同俄国的罗蒙诺索夫、意大利的达芬奇、古罗马的托勒密等一样,都无愧为一个民族的文化巨人。

地动仪的诞生有着深厚的人文历史背景,不是简单的“质疑”能否定的。

1.3 地动仪的问世过程

公元89年,汉和帝登基。仅过3年,先皇章帝的亲戚窦宪便被和帝杀掉,东汉皇权与外戚出现了第一次激烈较量,此后的大权为皇后邓绥家族取代,邓氏之兄邓鹭加爵特进并车骑将军,外戚仍权倾朝野。105年12月和帝卒,邓太后遂临朝亲政16年,支撑了殇帝2岁而亡、安帝年幼的艰难朝纲。鉴于外戚曾有过被刘氏皇族追杀的前朝教训,邓太后当政便一直取低调、开明和积极的态度,促进了社会稳定和经济发展,东汉早期的大部分文化成果都出自这一时段(89~121年),邓太后的历史作用得到颇高评价(白玉林等,2006)。和帝初年曾广征仁人志士,邓鹭于公元109年招募杨震、张衡等学者名流入朝,111年张衡应诏任郎中,115年升任太史令,制作了浑天仪,撰写了《灵宪》、《算罔论》等大量天文学著作。

121年3月邓太后病故。长期被压抑而未能亲政的安帝一上台,便开始了清算报复,立刻免掉三公,诛灭外戚邓氏势力(包括造纸术发明家蔡伦),张衡也被调任公车司马令搞行政杂务,东汉王朝出现了第二次激烈的皇权斗争。谁知新的权贵佞臣更加腐朽暴虐,安帝在123年5月凉州汉阳6.8级地震时竟将自己的乳母王圣也封为野王君(《后汉书·左雄传》《资治通鉴》),社会哗然。东汉由盛变衰,从此一蹶不起(白玉林等,2006)。张衡显然不谙政事,此刻对一直赏识他的特进邓鹭提出了请求“蓬莱(指东观书院——作者注),太史之秘府,道家所贵。衡再得当之,窃为幸矣”(张衡《与特进书》)。盼重任太史令,居朝而游离于政,继续学术研究。孰知邓鹭早已成被清除的对象,几个月后便和儿子一起绝食自杀(《后汉书·邓鹭传》)。

失之东隅,收之桑榆。公车司马令是个与全国邮传系统关系密切、汇总各地呈文、接待上书贤士的杂务,竟促使张衡与地震结下不解之缘,成绩斐然。121年刚上任,就遇到10月10日的强地震,“郡国三十五地震,或地坼裂,坏城郭室屋,压杀人”,安帝下诏“遣光禄大夫案行,赐死者钱,人二千。除今年田租,其被灾甚者,勿收口赋”(《后汉书·五行志》《后汉书·安帝纪》)。据新的研究(冯锐等,2013),这次6½级地震发生在冀南-鲁西一带,余震延续到122年、124年,地震有感半径约300km,京师洛阳的烈度约Ⅲ度,人无震感而悬挂物已经摇晃摆动。从史料记载来看,张衡所能得到的呈文却极其含糊:仅知道35个郡国出现了震感,不知何处最甚。

依“郡国总数”上报灾情为官方传统做法,自西汉起已延续百余年。同类型的呈文并不限于地震,还有“京师及郡国四十大水”、“郡国十四大风”、“郡国三十雨雹”、“郡国二十蝗”、“郡国十八淫雨伤稼”等,系由当时的历史条件决定。汉朝的行政管理只是形式上划为州-郡-县三级,不过州官(刺史)是个品秩六百石的小官,只监察地方长官的行为,不负责行政事务;而郡官(太守)是品秩二千石的实权大官,汉朝实行小官监察大官的制度曾取得过颇佳效果(周振鹤,1998)。故而郡国才是田税口赋的关键性收取、截留与核算单位,“王国”更属亲王自己的分封领地,于是灾情和赈济的发放、徭役和抽丁的分派等只能依“郡国”为基本单位上报。至于驿站和邮传系统,东汉只有官邮而无私邮,中央与地方的联系(除军事烽火台外)全部依靠邮驿,通信的关禁制度十分严格“五里一邮,十里一亭,三十里一置”,

过关要严查符信、文书须登记造册、驿使有特殊服饰,快马日行三百、车传七十、步行四五十里(臧嵘 2007)。如此严格的控制导致郡国向上报告容易,向下调查困难。加之东汉人口密度很低,公元 125 年的全国人口仅为 4869 万人(《后汉书·地理志》),因此对县一级的具体震情很难掌握。即使“二三个县”有震感或受灾也要以“一个郡”来上报朝廷,这就是东汉早期的基本情况。于是张衡势必面对一个极其糟糕的局面:京师已见地震引起悬挂物的不停摇动,而邮驿的呈文既迟缓又含混,全然不知何处最甚。东汉 13 个州、105 个郡国、1180 个县(邑、道),一个郡国的平均面积约达 3~5 万平方千米(相当今 7~10 个县)。公元 121 年 10 月“郡国三十五地震”的报告意味着全国三分之一的地方都在闹地震,如何尊旨“勿收今年田租口赋”?这次地震的前后 2 年,在荆州南阳、凉州汉阳也都发生了 6½ 级强地震(表 1),余震不断,三京(长安、南阳、洛阳)均有震感,于是诸如郡国四十二地震、郡国三十二地震、郡国二十七地震等等的消息不断传来……。在震灾和位置都不清楚、全国闹地震、年年躲地震的情况下,位于中原的京师就会有种被四面八方的地震包围的恐惧感,社会所受冲击之大可想而知。于是,尽快得知地震的大体方向便成为社会生活的一种朴实愿望。

125 年 3 月安帝卒,仅执政 4 年。东汉又出现第三次腥风血雨的皇权斗争,经宫廷政变废掉北乡侯刘懿后,11 岁的济阴王刘保于同年 11 月被拥为顺帝。曾经受压的先皇旧臣们抬了头,朝政逐渐稳定。未料当年 12 月 15 日再次地震,京师及周边 16 个郡国均有震感(表 1)。126 年也是多事之秋,京师瘟疫,张衡有《大疫上疏》,当邀顺帝亲顾。而编纂汉史《东观汉记》的刘珍等 2 人又相继去世,生前“上言请(张)衡参论其事”推荐张衡完成修史。鉴于地震、瘟疫和修史 3 件紧迫大事都涉及到太史令之职责——“掌天时、星历……,凡国有瑞应、灾异,掌记之”(《后汉书·志第二十五,百官二》)。调张衡重任史官,既合理也遂了他多年夙愿,只是导致 10 余年的官禄未能升迁。张衡的赴任显然是对刚上台的顺帝的及时支持,届时曾作《应间》:“余去史职五载而复还,非进取之势也……,君子不患位之不尊,而患德之不崇;不耻禄之不夥,而耻智之不博”。这种高尚品德自然得到了顺帝和满朝的赞赏,其事业易于开展。

真正改变张衡人生的是 128 年 2 月 22 日凉州汉阳 6½ 级地震。

按当时的观念,地震属凶兆:121 年,太后亡、闹地震、换朝廷;125 年,安帝亡、闹地震、换朝廷。今日又震,若罔顾上天警诫,势必社稷丧乱、国之将亡。这对根基未稳的 14 岁小皇帝顺帝就形成了巨大的政治压力,地震对策成为朝纲大事,时时要提防。应对灾祸,古有灵台。“天子有灵台者,所以观祲象、察妖祥也。”(《诗经·大雅·灵台》,郑玄笺)祲,阴阳相侵,即“观察异象、辨别凶吉”之意。祈盼灵台能对天地合一的灾祸实现神圣的知晓、明示和解脱,为国事占卜凶吉、对天道(自然规律)远而求之。但当时灵台的天文、气象观测并不针对地震,厚望便转至张衡身上。顺帝在 128 年地震后迅速下诏:“京都地动,汉阳尤甚,加以比年饑饉,夙夜恟惧。群公卿士,其深思古典,有以消灾复巽,救此下民,忠信嘉谋,靡有所諱”(《后汉纪》)。两年后,张衡给出回应,首次坦亮了自己的地震观点:

前年京师地震土裂,……阴阳未和,灾眚屡见。神明幽远,
冥鉴在兹……,天道虽远,凶吉可见(《上陈事疏》)。

谓前年的地震是阴阳矛盾所致,属常见之灾害;神灵潜藏远处,仍在暗中盯视着人们;天地规律虽深奥,但地震的吉凶祸福是有办法知道的。据此推测,研制地动仪的起步时间应在 128

年汉阳地震后不久(王惠苑,2009)。这个起步使百姓的朴素愿望上升到朝廷大事,属于“天人感应”主导理念下的科学行为。

132年8月,地动仪诞生。自128年以来的短短4年间完成了试验、设计、制模、铸造和安装调试等大量工作,即便在今天条件下也是非常紧张、极度困难的。审视张衡二任太史令的7年,别无华章,仅创制地动仪一件,可见精力投入之大。史载地动仪曾“验之以事,合契若神”(《后汉书·张衡传》),可能暗指当时的多次试验抑或小地震观测。它的成功自然载入正史,引起当朝的一片喜悦,“来观之者,莫不服其奇。……自古所来,书典所记,未常有也”(《续汉书》)。

133年,张衡因功升迁侍中,位同三公,“帝引在帷幄,讽议左右……,赞导众事,顾问应对”(《后汉书》卷三六),成为中国几千年历史上第一位、也是唯一官居皇帝左右的科学家。

134年,地动仪成功检测陇西地震(冯锐等,2006a),顺帝特准铸鼎,彪炳青史。(南朝,陈)虞荔(公元502~561年)《鼎录》有“张衡制地动图,记之于鼎,沉于西鄂水中。”^①铸鼎,社稷大事,东汉无一科技发明享此殊荣。

2 地震和张衡的实践

2.1 东汉早期的地震活动

东汉早期(特指公元25~132年)关于地震活动的记载是一项基础性的、背景性的资料,对追索张衡地震思想的形成过程很重要,也是认识地动仪诞生过程的一个基本依据。地震情况不明,地动仪的诞生就说不清。由于前期研究不足,除公元46年10月21日河南南阳 $6\frac{1}{2}$ 级地震外,这个时期的事件皆因一时难以定夺震级和位置故而在《中国地震目录》(顾功叙,1983)中存在百年的资料空段。最近,高建国(2001)、冯锐等(2013)在《中国地震历史资料汇编》(谢毓寿等,1983)和其它史料的基础上对这些地震参数做了研究,给出了统一估算的新结果(表1),更清晰地揭示出了地震活动特点。

新的研究表明,地动仪问世之前的主要地震事件是4次震级 $\geq 6\frac{1}{2}$ 的强地震,即119年3月荆州南阳地震、121年10月冀南-鲁西地震、123年5月和128年2月的凉州汉阳地震(表1,图1),震后都有持续1~2年的余震活动,震级多在 $5\frac{1}{2}$ 的水平。只有陇西地区(包括凉州汉阳)的地震活动比较强。其他的地震事件主要分布于北方,震中至京师洛阳的距离多数超过200km,除107年和113年两次 $5\frac{1}{2}$ ~6级的地震外,均属5~ $5\frac{1}{2}$ 级的中等强度的地震,少数地震小于 $4\frac{3}{4}$ 级。地震记载上存在时空不均匀性。据6级以上大震20年平均发震频度统计,从秦汉直到隋朝的地震活动水平一直平稳在每年2~5次,起伏并不大,故此期间不属地震高发期。

京师洛阳虽经历过多次地震影响,但并不强烈,4次 $6\frac{1}{2}$ 以上的强震震中都在洛阳300km以外(图1),京师的地震烈度仅有III⁺~IV,基本为有震感或强有感水平,并没有遭受过破坏性或中等强度的震害。史料中其他的一些“京师地震”多为“远处地震,京师有

^① 东汉顺帝期间共铸过二鼎:一鼎曰“鱼鼎”,131年冀州大水后置于伊水,高四尺,三足。另一鼎则特准张衡为地动仪所铸,上有地动仪图形。恐为139年后在安葬张衡时才将该鼎移至西鄂(今河南南阳大石桥),但迄今未见此鼎之踪影。

表 1 东汉早期地震情况总表

序号	时代背景			时间 (公元纪年)	史料记载的位置			震级	推测的位置 或 至京师距离	
	皇帝	张衡	罪己诏/地震诏		郡国	京师	其他			
1	光武		罪己诏/	46. 10. 21	郡国 42			** 6½	河南南阳	
2	章		罪己诏/	76. 5. 2			山阳东平	≤ 5	山东山阳	
3	和	南阳, 幼年		92. 6. 9			京师	≤ 4¾	京师	
4				92. 8. 8	郡国 13			5½	> 240 km	
5				93. 4. 7			陇西		陇西	
6		京师, 求学		95. 11. 8			京师	≤ 4¾	京师	
7				97. 4. 8			陇西		陇西	
8					105. 6. 19			雍县		雍县
9		安· 邓太后 执政	南阳		107	郡国 18			5½ ~ 6	> 280 km
10				108	郡国 12			5 ~ 5½	> 230 km	
11				110. 1. 12	郡国 9			5 ~ 5½	> 200 km	
12				110. 4. 14	郡国 4			≤ 5	> 130 km	
13					110. 10. 2			云南益州		云南益州
14	郎中			111. 2. 1	郡国 10			5 ~ 5½	> 200 km	
15				113. 2. 6	郡国 18			5½ ~ 6	> 280 km	
16				114	郡国 15			5½	> 250 km	
17	太史令			115. 12. 11	郡国 10			5 ~ 5½	> 200 km	
18				116. 3. 1 ~ 3. 29	郡国 10			5 ~ 5½	> 200 km	
19				117. 1. 17	郡国 9			5 ~ 5½	> 200 km	
20				117	郡国 13			5½	> 250 km	
21				118	郡国 14			5½	> 250 km	
22				119. 3. 10	郡国 42	京师		6½	~ 300km 河南南阳	
23				120. 1. 17	郡国 8			5 ~ 5½	南阳余震	
24			120	郡国 23			5½ ~ 6	南阳余震		
25			120 ~ 121					南阳余震		
26	安	公车司 马令	/地震诏	121. 10. 10	郡国 35			6½	~ 300km 冀南-鲁西	
27				122. 5. 23 ~ 6. 20			京师	≤ 4¾	冀南-鲁西余震	
28				122. 8. 19	郡国 13	京师		5½	冀南-鲁西余震	
29				122. 10. 23	郡国 27			5½ ~ 6	冀南-鲁西余震	
30				123. 5	郡国 32	京师	汉阳	6½ ~ 7	汉阳	
31				124. 1. 6		京师		≤ 4¾	京师	
32				124	郡国 23	京师		5½ ~ 6	~ 320 km	
33				125. 12. 15	郡国 16	京师		5½	~ 280 km	
34	顺	太史令	/地震诏	128. 2. 22		京师	汉阳	** 6½	汉阳	
35		侍中	罪己诏/撤高官	133. 6. 18		京师		≤ 5	京师	
36			撤高官	134. 12. 13			陇西	6½ ~ 7	陇西	
37		河间相	罪己诏/撤高官	136. 2. 18		京师		≤ 5	京师	
38			/地震诏	138. 2. 6		金城	金城陇西	** 6¾	金城、陇西	

注: 地震事件根据《中国地震历史资料汇编》,震级加**者引自《中国地震目录》,凡史料中的比如“郡国十八地震”字样,在表中均简记为“郡国 18”。其余的地震参数均引自冯锐等(2013)。

感”抑或附近的小地震(冯锐等,2013)。一些作者不考虑地震大小、远近和系列关系所推断的地动仪设计思想(比如王振铎,1963;王鹏飞,2005),恐怕是在认定了地震处于强高潮期、洛阳烈度极高、房倒屋塌严重前提下的猜测,并不符合历史地震的实际。

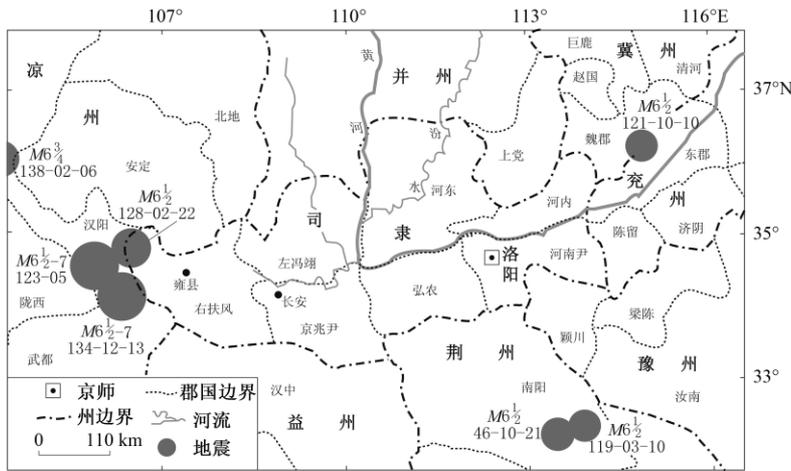


图1 东汉早期强地震的分布概图

2.2 古代地震观念和灵台科学活动的特点

东汉建立后,汉光武帝、明帝、章帝尚处稳定政权、休养生息阶段,直到和帝、安帝时(公元89~125年)才出现社会祥和、文化昌盛的局面,史料对灾异的记载量随之迅速丰富(参见表1),人们对地震等自然灾害也更加关注,如何认识地震和应对地震的问题突显起来。

受到董仲舒“天人感应”的影响,汉光武帝在去世前1年(公元56年)东赴泰山封禅,“初起明堂、灵台、辟雍,及北郊兆域。宣布图讖于天下”(《后汉书·光武帝纪下》),讖纬之学被正式奉为国教强化了迷信观念(路思贤等2005),灵台遂于公元59年开始启用。地震等自然灾害被视为上天对君主失察的惩戒、谴责和警告,“天谴观”遂成为社会的主导观念,祭天祀地亦变成地震对策的核心。光武、章、安、顺帝都曾为地震下过诏书自责,继而还有一系列的诸如征集谏言、任举新官、删减律令、减免租赋、明堂祭祖、灵台祈天、参见史官、观验物变、校正浑仪、军队休战、大赦天下、身着素服、避进正殿、不理政事、改年号等等措施和礼仪。东汉王朝共13位皇帝,地震崇拜观念的最虔诚者当属顺帝刘保,在位的19年竟为地震2次改年号(公元136年阳嘉改永和,144年汉安改建康)、1次垂询地震对策(公元134年)、2次下《地震诏》(公元128、143年)、2次下《地震罪己诏》(公元133、136年)、3次派光禄大夫赴震区(公元128、138、143年)、4次“以地震免”高官(公元133、134、136、138年)……,古代的几乎所有的地震对策他全都采用过,达到登峰造极之地步。恰值128年发生6½级汉阳强地震,顺帝又有强烈的避凶趋吉的政治需求,这种特殊的形势把研制地动仪推上了历史的舞台,并写入《后汉书·顺帝纪》②。

有个观点需要澄清,有人因为古代存在迷信便断言“地动仪是个无用的摆设抑或礼器,中国古代没有科学”,这是不对的。人类发展史上,古代各国的科学和神学始终是纠缠在一

② 关于研制地动仪的目的和动力,学界曾有过不同看法。王鹏飞(2005)认为朝廷想要快速测定震中以掌握全国地震动态,李约瑟(1976)推测政府为了及早采取抗震措施以救灾,黄瑞棠(1999)甚至主张“为了深入探讨地震成因和其他规律”。这些现代观念的猜测并无史料依据。事实上,公元134年地动仪成功测到陇西地震后,朝廷全无上述举动。顺帝立刻询问张衡,谁是天下最痛恨的人需要惩治?随后将司空和司徒“以地震免”(《后汉书》),想转祸为福。此事可略见当时地震观念之一斑。

起的(王渭清 2008),唯物性的观测和宗教崇拜、探索自然的努力和占卜算卦长期混为一体,这种纠结至今尚存,只不过分量不同。张衡虽然把地震看成“天人之应,天诚祥矣。修政恐惧,则转祸为福”(《阳嘉二年京师地震对策》),但又坚信“天道虽远,凶吉可见”,而且是第一位抨击讖纬之学搬神弄鬼、坚决上书《请禁绝图讖疏》的人。所以,自夏商周以来的灵台便一直具有观象和祭天的双重功能(陈遵妣,1989),灵台的工作人员计42名,职责十分明确:“十四人候星,二人候日,三人候风,十二人候气,三人暑景,七人候钟律,一人舍人”(司马彪《续汉书志·百官二》刘昭注),日夜“仰以观于天文,俯以察于地理”(《周易·系辞上》)。灵台集中了当时重要的人才、设备和经费,性质上属于进行科学活动的官方机构。张衡作为灵台的负责人,有这样一个稳定的官方机构和技术力量的支持,才可能潜心研究地震和仪器。

灵台的科学活动有3个特点:

①观测性科学 灵台的神圣职责是“观祲象、察妖祥”,决定了古人对地震、天文、气象、物候的观测非常虔诚、细致和准确,敬畏自然的信念使古人对客观现象的洞察力极其敏锐。

②仪器的设计思想源于缩微和模仿自然现象 观测性任务,导致仪器的设计思想取决于对常见的、稳定的、具有特征性现象的观察和启示,再根据仪器对客观现象的重演来达到《周易》的“以象验天”之目的。比如计时的漏壶,借用水滴掉落的等时特点;候气的葭草律管,模仿风吹灰飞现象;浑天仪的三重圆环,缩微了日月运行轨道;同样,地动仪的都柱在于模仿悬挂物对地震的反应。

③浓厚的官方色彩 灵台的人员、机构、经费、仪器和任务都是由朝廷直接投资和管辖的,观测结果只能报告天子,民间甚至诸侯都不得建灵台,不得从事天文、气象、地震等等专门观测,这是中国古代特有的现象(陈久金等,1998)。从官方对地动仪青铜材料的投入量上看:由灵台地基推算出的地动仪总重量大约为数吨(武玉霞等,2011),北京防灾科技学院2012年安置了新的地动仪复原模型,原大尺寸,通高3.2m,直径1.9m,青铜总重量2.1吨,二者的数量级相符。若以东汉五铢钱直径2.5cm、标准重3.5g来估算(高英民,2007),仅青铜耗材一项就至少要用掉100万余枚五铢钱,而公元121年、128年地震的赈济款不过“赐死者钱,人二千”。可见地动仪的制作强烈地取决于朝廷的政治需要,非个人兴趣所为。

2.3 张衡的地震实践和两个古朴的地震概念

张衡一生出行简单,公元136年前到过南阳、长安和洛阳,只在124年2月随安帝去过一次泰山和淮南(孙文青,1956)。实践出真知,但是张衡没有到过大震极震区,而且汉代建筑以夯土和木框架的混合结构为主(孙机,1991),震灾区的普遍现象是“土墙坍塌、房柱极少脱榫倾倒”即“墙倒屋不塌”现象(楼庆西,2003),谈不上什么“房柱倾倒对科学思想的启迪”。张衡从公元111年起在京师为官25年,京师没有发生过强地震,他仅在担任公车司马令时(公元121~125年)有可能从文字上接触过各地的地震奏章,因此张衡对地震的亲身实践主要是公元119~128年间对七八次京师外围地震(或京师附近的小地震)的体验,尤其会对4次强地震(震级 $\geq 6\frac{1}{2}$,震中距 ≥ 300 km,表1)的感受最深刻。这些地震在洛阳的烈度不过III⁺~IV,房屋不倒塌,只会出现地面晃动和悬挂物摇摆,也就是史书上写的“地摇京师”、“地动摇尊”现象。

张衡的实践虽然简单,但这种认识具有清晰的可重复性,有助于两个古朴概念的形成:

一是地震的位置可按方位判断,二是地震和地裂必须加以区别。

关于灾异位置的判断。古代的传统方法是方位占卜,即天文分野——“天则有列宿,地则有州域”(《史记·天官书》)列宿配州国即“分野”。天之中在璇玑,二十八宿分为8(或12)个区位,分别对应地下的九州(或十三个郡国),天象在某区位的变异现象可用来占卜所相配的州郡的吉凶祸福(陈久金等,1998;张闻玉,2008),这就是始于春秋战国的占星术——“以星土辨九州之地,以观天下之妖祥”(《周礼·春官·宗伯》)。太史令本是神权政治的官职,灵台的星象家与史官自古就是一家,张衡自然持分野观点把观天测地的结果统一起来,如他所说:“在天成象,在地成形;天有九位,地有九域;天有三晨,地有三形。有象可考,有形可度”(《灵宪》)。“三形”指山、水和地,“九域”之中在中原,即八尺表竿“日至之影,尺有五寸”(《周礼·地官大司徒》)的地方,其他八域(州)围绕中原。这种将宇宙划成八个区位的远古理念影响深远,配上八卦之后还表现于汉代的式盘、陵墓和舆服当中。

表 2 九州地域的方位关系

	中心	东	东南	南	西南	西	西北	北	东北
地动仪上的八方位		震	巽	离	坤	兑	乾	坎	艮
古代九州	豫	徐	扬	荆	梁	雍	冀	兖	青
东汉十三州	司隶	豫、徐	扬	荆、交	益	凉	并	冀、幽	兖、青

地域九州是华夏文化,张衡把它用到地震方位的判断上符合当时的实际情况,有合理性。汉朝行政区划为13州,是在古代九州模式下对秦朝36郡的发展(图3):以京师的司隶校尉部为中心,与放射状排列的7个州、继而外围5个州接壤,中央高度集权,驿道关卡统一,对各州的联系最多只越过1个州。奇特的行政区划,后世各国均无。地动仪“外有八方兆,龙首衔铜丸……,虽一龙发机,而其余七首不动”的设计,就是把地平方位化成8等分,以8个龙头为中心方向(即古代天文学中的“二绳”和“四维”8条线)控制8个展角45度的扇形区,铜球掉下即表明这个州有地震,复杂的定位问题转化成扇形区域的分野。同时,浑天仪的地平环上也有同样划分,不过还要用八天干、十二地支进一步精化成24个地平方位(张闻玉,2008)。地动仪和浑天仪的刻度划分有着严格的统一性(表2,图2)。

从表1看,张衡所遇地震的绝大多数在280km、350km以外,甚至600km的距离上,京师的震感实际上都是瑞利面波,自然会有“寻其方面,乃知震之所在”(《后汉书》)的感觉(虽然地震射线与波动偏振面的一般性关系十分复杂,张衡不可能做现代意义上的观测和总结,此不详述)。1703年意大利人J. de la Haute Feuille发明了西方第一台地震仪器——水银验震器(图4(a)),地震时的水银会从容器里摇晃出来,溢流道也是8个方向;1873年Von Lasaulx设计的仪器里也有8个方向定位结构(图4(b))。他们的8方向设计是由技术精度所致,并无文化背景(Sleeswyk,1983)。

张衡的第二个古朴概念,是把地震和地裂明确区分开。他是同时代中唯一认识到这点的人,并在文章中独特地使用了“震裂”一词:

“京师地震土裂。裂者,威分;震者,民忧也”(《上陈事疏》,130年)。

“自改试以来,累有妖星震裂之”(《举孝廉疏》,132年)。

“妖星见于上,震裂着于下”(《阳嘉二年京师地震对策》,133年)。

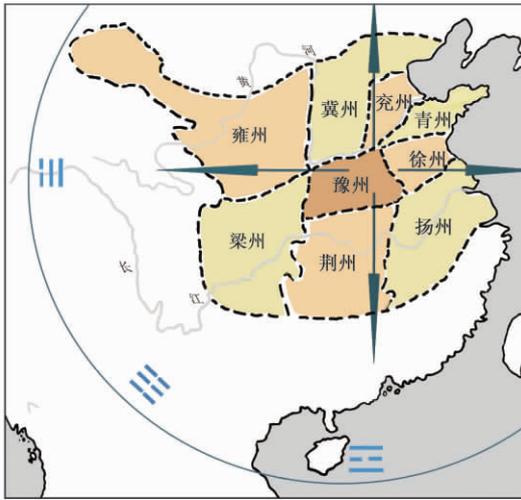


图2 古代九州地图。以豫州为中心,八个州围绕在四周,呈一定的方位分布。图中标注了南、西南、西的三个八卦卦形

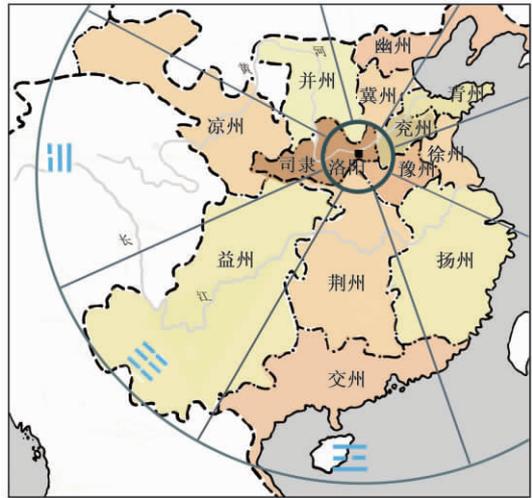
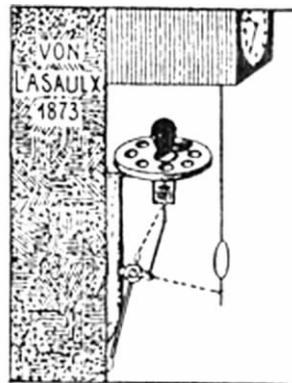


图3 东汉 13 州的行政区划。以司隶校尉部为中心区,其它各州呈放射状排列于四周。图中标注了地动仪龙首所对应的 8 个扇形区域



(a)



(b)

图4 西方早期发明的测震仪器(Sleeswyk, 1983)。(a) 1703 年的水银验震器 (b) 1873 年的报警器。

两种仪器所设计的 8 个方向结构是由技术精度所决定的,没有文化背景上的含义

其中“裂者,威分;震者,民忧也”的含义:地裂,预示皇威要削弱、大臣异心;地震,预兆百姓将骚动、四处逃难。这个名句和《易经》等一起作为占卜的经典被收入《开元占经》(唐)和《灵台秘苑》(北宋),流传千年。

不难理解,“地裂”或史料中被等同使用的“山崩、地坼、地陷”等词,在性质上不同于“地震”,人员感觉也截然不同:前者以上下颤动为主,后者以水平摇晃为主。在地动仪问世之前,张衡已经能够把二者清醒地区分开了。既然顺帝《地震诏》所企盼的仅是测“地震”的对策,不是测那种看得见、影响小的“地裂”;皇威的削弱可以通过察撤官员来解决,但百姓的骚乱逃难却无法控制。因此,张衡的注意力势必要放在日常生活中那些只对水平摇晃能有反应、不怕上下颤动的天然结构上。

John Milne 是世界第一台地震仪(1894年)的发明人,在认识上也有过同样的升华过程。1876年刚到日本时他就遇到了地震的剧烈摇晃,但到1880年才建立起一个明确的概念(Herbert-Gustar,1980),他说欲做一件凡是地面振动(不管是不是地震)都能有反应的装置那是非常简单和极其容易的,地上竖个直立竿或在尖顶上放个球就行了,但这类装置没有测震学的任何价值,不过为警报器(Alarm)罢了。他意识到张衡一类的发明则不然,而是一种只对地震有反应、不怕其他类型振动的特殊装置,故专门取了一个新名词——验震器(Seismoscope)。显然,张衡和Milne都认识到了地震和其他地面运动的不同,感性认识经过了理性的升华,因此他们的发明具有创新性,不同于科学活动中的偶尔发现。

3 地动仪的创制

制作仪器,张衡崇尚“制器尚象”的原则。即以“天地之象”为最大的效法目标,再用仪器来“以象验天”(许结,1998;朱洁,2009)。地动仪的测震原理模仿了悬挂物对地震的反应,技术实现上借鉴了门闩类的触发机构,通过龙首吐丸的方式留下了发生地震的物质证据,这3个关键问题的解决成就了地动仪及其应用,构成张衡科技创新的完整内容。本节重点讨论前两点。

3.1 用悬挂物测震的科学思想

张衡的测震思想,可以根据史料来追溯一二:

中有都柱,傍行八道……如有地动,地动摇樽,樽则振,施关发机,龙机发,即吐丸。(据《续汉书》《后汉纪》《后汉书》)

前19个字明确地交代了:“仪器中间有个沉重的柱状体,平时可以侧向移动,如果发生地震,就只见到樽体有摇晃和反复振荡,但没有见到沉重的都柱出现侧向动作和其他反应。”这是什么现象?这就是典型的惯性现象。物体越沉重,惯性越大,现象越明显。这种差异的存在,表明地动仪的“都柱”和“樽体”之间在地震之时出现了相对位移,在非惯性系统(即摇动的樽体)中所显现出来的都柱惯性力就先施加于关,再触发于机,铜丸随之而吐出。以上,学界无异议。

争议在于,沉重的都柱如何在地震中表现出静止而没有反应呢?19世纪人们认为是悬挂都柱,20世纪中叶改为直立细竿,21世纪又回到悬挂都柱,即悬垂摆工作原理(冯锐等,2003、2006a、2006b、2006c)。

地动仪模仿悬挂物对地震的反应是最自然、最合理的。首先,悬挂物只对地面的水平运动有反应而不怕垂直运动的干扰,具有“只有地震我才动,不是地震我不动”的天然属性。其次,悬挂物的灵敏度比人高。人能感觉到的地震烈度在Ⅳ度以上,而悬挂物却在烈度低至Ⅲ度、甚至Ⅱ度时就会出现摇晃反应。所以对表1中的那些300~500km以外的6级以上地震,京师洛阳的烈度会处在Ⅲ度以下,即人员无感、悬挂物肯定出现明显的摇晃。《后汉书》描述的公元134年陇西地震现象——“京师学者咸怪其无征,后数日驿至,果地震陇西。”并不奇怪,属地动仪问世之前就已经在洛阳重复过多次的现象。第三,悬挂物具有普遍性和易观测特点。它们在百姓日常生活中大量存在,一旦晃动起来,会像秋千般地晃个不停,远远超过地震的瞬间。于是“地震发生”与“悬挂物摇晃”二者间反复出现的、大量的、稳定的对应关系,就会被千百万群众察觉,更因悬挂物一般会在高于人的位置上摇晃从而造成深刻的

心理恐惧,成为诞生科学思想的物质基础。现代地震学里,悬挂物就是“天然验震器”,它是评定Ⅲ度以下低烈度事件的唯一客观参照物。

东汉的悬挂物非常普遍,吊桶、吊篮、吊灯、吊绳、秋千、编钟、编磬、悬垂、流苏、纺线锤、吊锤、方胜,庖厨的吊肉,室内四壁悬挂的字画,案头笔架悬挂的毛笔,青铜的人形吊灯、提链吊壶,青丝穿吊的铜钱等等,不胜枚举。西汉《淮南子》也记述了汉代有悬钟、悬鼓、悬磬、悬鐸等^③(图5)。

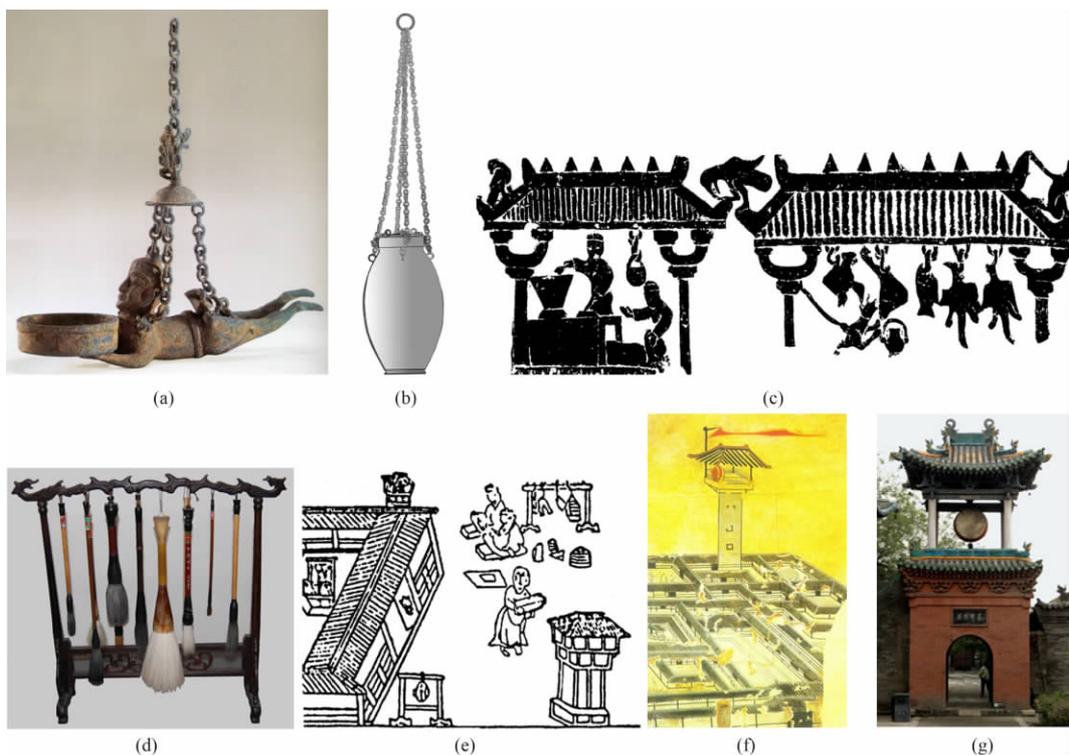


图5 汉代的各种悬挂物。(a)人形吊灯,(b)悬链吊壶,(c)庖厨的吊肉,(d)案头的悬挂毛笔,(e)画像石中近处的悬鼓,远处的吊肉,(f)汉代壁画中高悬于碉楼的悬鼓,(g)流传于今的钟鼓楼上的悬鼓

《后汉书》中还有个趣闻:清官拒腐有绝招——悬鱼。一个叫羊续的官员,人家给他送了鲜鱼,他公开地把鱼悬挂在屋外庭院中(图6(a)),行贿者自愧不敢再来。此事传开,赞声鹊起,纷纷仿效。从东汉始,我国的房屋建筑便出现了一个特殊的附属结构——在房脊两侧的山墙最高处要专门做一个悬挂物(图6(b)),以后就固定化了,古建筑学上称为悬鱼(贾洪波,2010)。

最后提一句,人类在几千年的实践中迄今只发现两种天然结构能用于验震:悬挂物和液体表面,它们的垂直向重力和水平作用力是自然解耦的。因此,对于地动仪的工作原理,从

^③ 悬钟(磬、鐸)最为常见,但悬鼓结构于今少见。古代城池都建有钟楼和鼓楼,以“晨钟暮鼓”宣告集市的开张与结束。从史料和汉画像石所见,古代的鼓确为悬挂状,《淮南子·汜论训》有“禹之时,以五音听治,悬钟、鼓、磬、鐸,置鞀,以待四方之人士”其中的鞀为拨浪鼓,它不是悬挂的。《后汉书·灵帝纪》有“梁下有悬鼓,我欲击之,丞卿怒”,《洛阳伽蓝记》更为具体地描述了汉代的鼓楼“上有二层楼,悬鼓击之,以罢市”这与图5(f)的汉代壁画情况是一致的。

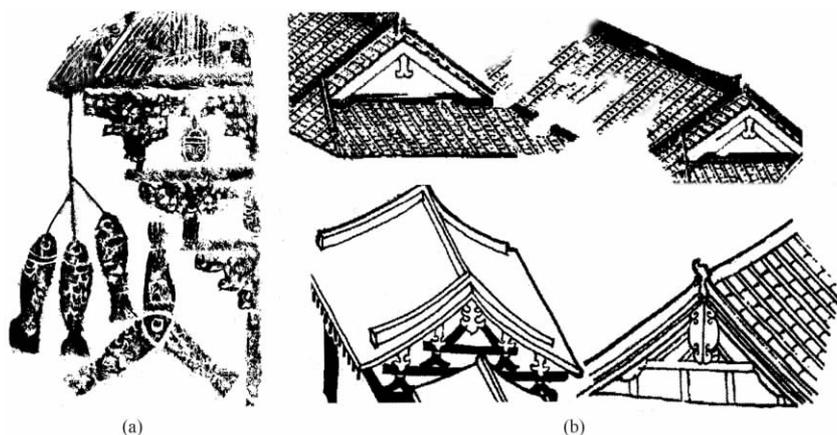


图6 悬鱼 (a) 汉代画像石中的悬鱼挂在屋外庭院中, (b) 房屋山墙顶部的悬鱼结构, 官员以示清廉 (贾洪波 2010)

现代地震学之父 Milne(1883) 到中国地震学的几位已过世的奠基人如傅承仪院士(李强, 2008)、李善邦院士(1981)、秦馨菱院士(1993), 都一致地坚持认为地动仪利用的是悬垂摆工作原理^④。早期误解的直立竿原理, 属概念性错误。

3.2 技术上的创新——检测微弱信号的触发机构

悬挂物对地震的摇摆反应一般都能观察到, 但是要把它直接用到地动仪上还是不行的。极其微弱的地震波信号(运动频率极低, 加速度很小), 导致悬垂摆过小的摆动幅度和动量并不足以直接推动一系列的荷载, 比如推动龙机转动和铜丸掉落。1783年, 意大利人 Salsano 曾在观测那不勒斯地震时做过尝试, 他在悬垂摆的四面摆了几个小铃, 想通过悬挂物撞击铜铃来判断地震, 终因撞击力过小而未成功(Dewey, 1969)。史料记载地动仪曾测到陇西地震(约600余千米远), 按地震学的理论估算(关野雄, 1972; 冯锐等, 2006a), 陇西地震在灵台引起的水平向最大地动位移应在6~8mm左右, 最大加速度不大于1gal, 地震波优势周期在几秒到十余秒。后人有理由追问: 对如此微弱的地震波信号, 张衡有没有在技术上采取过特殊的办法? 这显然是一个判断它是否工作过的重要旁证, 否则很难让人相信一个古代的纯机械结构能达到这么高的灵敏度, 同时还需要具有极强的抗干扰能力。

研究表明, 《续汉书》和《后汉记》里有一段至关重要的话, 把技术关键交代清楚了:

中有都柱, 傍行八道……施关发机, 机、关巧制, 皆隐在尊中。

就是说, 地震时的都柱并没有直接撞击杠杆“机”, 而是首先把它的惯性力施加在一个称作“关”的机构上, 只是在它启动之后, 才引发出龙机(杠杆)的动作, 最后使铜丸吐出。这个“关”究竟是什么? 极其要紧。

许慎(约公元58~147年)是与张衡同时代的人, 他在《说文解字》里解释了: “關, 以木横持門戶也”, 即门闩(图7)。看一下象形汉字, 不难更加清楚和直观地理解古文“關”(图

^④ 1976年唐山地震后, 傅承仪曾当面告诉王振铎: 他的地动仪复原模型采用直立竿原理是错误的, 都柱应该悬吊, 地动仪是悬垂摆工作原理。王振铎的女婿李强在2003年向本文作者讲了这种情况, 又在他的文章(2008)中加以明确。李善邦(1981)推测: 地动仪的都柱“很可能是吊着”。秦馨菱(1993)著文: 地动仪“内中悬有一个摆, 还有杠杆等。”



图7 门户上的小横木,即为古文的“关”

8): 门字里面的一个小杠,即持门户的小横木。古文的“開”字,是在小杠下面有左右两只手,它们反向一拨,门就开了;门要“閉”上,则把小杠的状态一改变——中间打一个竖道成小十字,门就闭合了。所以“关”是发挥“四两拨千斤”作用的一个极其轻小、极其灵敏的结构,只要它的状态稍微一变会导致巨大能量的释放或封闭,这不正是现代科技中的触发机构嘛。



图8 象形的古汉字表达了门闕的作用,小横杠在“打开”和“闭合”时有不同状态

触发机构,看似一个非常微小的技术细节,实则独辟蹊径的检测微弱信号的关键措施,只有实践过的人才可能认识到它、理解它、并最终解决它。可以断言,地动仪肯定工作过,这个特殊结构的采用绝对不是史学家或外行们能够杜撰、猜想或编造出的东西。由于它简单有效,后世的很多仪器都采用。比如QZY型强震加速仪的前端就是一个触发装置——悬垂摆式验震器(图9)地震的微小信号先触发它,然后主机才能开始记录(中国科学院地球物理研究所,1975)。Milne(1883)在仔细研究了地动仪后曾深有感触地讲过“张衡地动仪的价值决不仅仅在于它是一个古老的发明,更重要的在于,它竟以极其相近的思路留给了现今时代的科学仪器以许多有意义的启迪。”

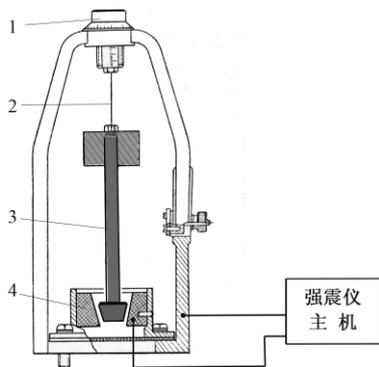


图9 强震仪的前端触发装置是个悬垂摆式验震器。图中,1 旋钮,调节重锤高度控制灵敏度;2 悬丝;3 下端为锥形的重锤,石墨材质;4 内壁呈锥形的圆环,石墨材质。当地面的水平运动造成重锤下端与圆环接触后,控制电路被接通,启动主机。该图根据中国科学院地球物理研究所(1975)的原图而简化

作为对张衡科学思想的一种表达(尽管不是惟一的),我们在复原模型的中央尖针上放一个小铜球,组成“关”结构(它显然是轻巧,但又极其不稳定的),再用悬挂的都柱从上方控制住它(图10)。原大青铜模型的都柱重422kg,小关球重200g,二者惯比高达2100。当且仅当地面出现水平运动(哪怕是1~2mm的微量位移),小关球就会被释放,它的动能足以推动杠杆,并使龙首吐丸。在北京工业机械自动化所和北京工业大学的实验室里,我们已经利用振动台对唐山、云南、越南、汶川、玉树、山西等14次实际地震记录进行了复现测试,原大青铜模型的反应十分灵敏,抗干扰性能良好。

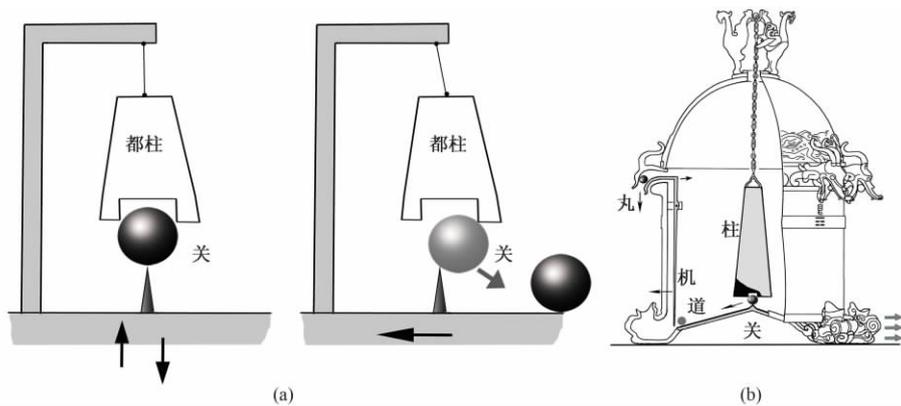


图10 复原模型的小关球设置是一种触发结构。(a) 置于针尖上的小关球是极其不稳定的,但通过悬挂的都柱可以控制它的状态。当且仅当地面出现水平运动时,都柱因为惯性而不动才能把小关球释放出来撞击杠杆。(b) 新复原模型的内部结构和对地震的反应

4 地动仪问世后的影响

4.1 对地震认识的深化

先秦,“地动”一词多指地球的天文运动,如在战国《列子·天瑞》和《春秋纬》里有“天左旋,地右动”和“地动见于天象”等记述。西汉《史记》中的“地动”,泛指地震和其他地面振动。东汉早期,混用“地动”和“地震”二词,比如王充的“地固将自动”(《论衡·变虚篇》)。自张衡起,开始明确地提出“地震”和“地裂”是两类现象,并且从地动仪的观测结果中意识到地面摇晃方向与震中有某种关系,还存在仪器能察觉到而人员会无震感的现象。禁锢的思想获得解放,地震不再诡谲,如日食和月食一样也可以被观测、探索和解释,人类文明迈出了的一步。

公元132年地动仪诞生后,133年6月18日京师感到过一次地震,顺帝的《地震诏》直接用了“地摇京师”几个字,是自西汉宣帝刘询自公元前70年6月《地震罪己诏》之后首次接受“地震摇晃”的概念。人们对地震破坏的特点更加清楚,及至清朝已记载有“屋宇动摇,人皆迷惑。屋随之摇摆,迎风欲倒。壁间字画,摇如悬旌。墙上所挂物件,摇摆不定”等现象。后人掌握了这些特点,就会在房屋设计、抗震减灾各项措施上采取合理对策。

4.2 地震记载的重要进步

汉朝对各种自然灾害如地震、洪水、干旱、风雹、蝗灾的上报和记载一直沿用郡国总数的方式。唯独地震特殊,地震波会传播,一两个郡国受灾会出现几十个郡国有震感,所以“郡国地震”的上报方式会放大灾情、造成“全国闹地震”的极其糟糕的局面。自公元 126 年张衡重任太史令后,这种延续百余年的含混记载地震的方式戛然而止(见表 1),此后的地震史料变得细致而丰富,有了具体的破坏、损失和现象等细节记载。三国魏明帝公元 234 年 12 月地震的时候,人们竟然注意到了地震的方向和声音:“京都地震,从东南来,隐隐有声,摇动屋瓦”(《魏书·明帝纪》)。这些巨大的变化显然与地动仪的问世有关,留存了宝贵资料。

4.3 天谴观念的消弱

顺帝对地动仪的支持,旨在占卜凶吉、服务政治。地动仪问世后,权倾朝野的三公中的两位竟连续两年“以地震免”,开了中国历史的先河,不过诸多祭天祀地的对策既不能终止地震活动,也未转祸为福。天谴观被严重动摇,导致公元 136 年 2 月地震后直至汉末再也没有一位皇帝登灵台祈佑平安。魏晋以后,人们对地震现象的研究转向了自然主义的观察和记录。

地动仪问世所产生的深刻社会影响,实难估量,直到 19 世纪末对现代地震学的诞生仍具有思想启迪作用(冯锐等 2003、2006a、2006b、2006c、2010;武玉霞等 2007)。

5 结论

张衡一生正值东汉科技文化发展的顶峰时期,对他的思想和创作产生了重要影响。地动仪问世前主要有 4 次震级 $\geq 6\frac{1}{2}$ 的大地震,洛阳处于基本有震感或强有感区域,并没有遭受过破坏性或中等强度的震害。

张衡有两个古朴概念,即一是地震的位置可按方位判断,二是地震和地裂必须加以区别。基于这两点,使其发明有了明确的技术追求。“制器尚象”是张衡制作仪器的原则,地动仪模仿了悬挂物对地震的反应,技术实现上模仿了门闩类的触发机构,还通过龙首吐丸的方式取得了地震记录,这 3 个关键问题的解决成就了 132 年地动仪的问世和 134 年的成功验震,构成他科技创新的完整内容。

地动仪的发明深化了人类对自然规律的认识,对当时和世界文化的发展具有积极意义。

作者对审者及编者的认真审阅和编辑加工表示诚挚谢意。

参考文献

- 白玉林主编,2006,《后汉书解读》,北京:华龄出版社,279。
陈久金、杨怡,1998,《中国古代的天文和历法》,北京:商务印书馆,190。
陈遵妣,1989,《中国天文学史(第四册)》,上海:上海人民出版社。
冯锐、武玉霞,2003,张衡候风地动仪的原理复原研究,《中国地震》,19(4):358~376。
冯锐、俞言祥,2006a,张衡地动仪与公元 134 年陇西地震,《地震学报》,28(6):654~668。
冯锐、朱涛、武玉霞等,2006b,张衡地动仪的科学性及其历史贡献,《自然科学史研究(增刊)》,1~15。
冯锐、田凯、朱涛等,2006c,张衡地动仪的科学复原,《自然科学史研究》,25(增刊):52~74。
冯锐、李先登、田凯等,2010,张衡地动仪的发明、失传与历史继承,《中原文物》,1:88~98。

- 冯锐、俞言祥 2013, 东汉早期的地震活动探讨, 地震学报, 35(5): (待出版)。
- 高英民 2007, 中国古代钱币, 北京: 学苑出版社, 440。
- 高建国 2001, 汉代地震考(上) 城市与减灾, 5, 20~23。
- 顾功叙主编, 1983, 中国地震目录, 894, 北京: 科学出版社。
- 何琇, 1889, 樵香小记, 守山阁丛书, 石印, 上海: 鸿文书局。
- 黄瑞棠, 1999, 数术穷天地, 制作侔造化——浅论张衡[A], 见刘永平(主编)《张衡研究》, 西苑出版社, 300~308。
- 贾洪波 2010, 中国古代建筑, 天津: 南开大学出版社, 276。
- 雷立柏 2000, 张衡 科学与宗教, 北京: 社会科学文献出版社。
- 李强 2008, 简评冯锐复原张衡地动仪的设计思路, 自然科学史研究, 27(3), 378~387。
- 李善邦, 1981, 中国地震, 北京: 地震出版社, 177。
- 李善邦, 1945, 震式地震仪, 地球物理专刊, 7(2), 21~28。
- 李艳平, 1997, 历史实验的复制研究, 首都师范大学学报(自然科学版), 18(增刊), 41~43。
- 李约瑟, 1976, 中国科学技术史(第五卷地学, 第二分册), 北京: 科学出版社。
- 楼庆西 2003, 中国古代建筑二十讲, 北京: 生活·读书·新知三联书店。
- 路思贤、李迪 2005, 天文考古通论, 北京: 紫禁城出版社, 1~18。
- 吕绍刚 2010, 地动仪惹了谁, 人民日报, 十二版, 12月6日。
- 秦馨菱, 1993, 1933年2月6日来信, 清华九级校友联络组《清华大学九级校友通讯》, 8, 100。
- 孙机, 1991, 汉代物质文化资料图说, 北京: 文物出版社。
- 孙文青, 1956, 张衡年谱, 北京: 商务印书馆, 170。
- 王渭清 2008, 科学与神学的纠葛——兼论张衡科技成就与东汉神学政治之关系, 社会科学家, 7, 22~24。
- 王振铎, 1963, 张衡候风地动仪的复原研究, 文物, (2), 1~8; (4), 1~20。
- 王鹏飞, 2005, 张衡候风地动仪功能测试和感震原理的探讨, 自然科学史研究, 24(4): 291~318。
- 王惠苑 2009, 对张衡地动仪功能的几点思考, 河南社会科学, 17(3), 128~130。
- 翁文灏, 1924, 地震, 上海: 商务印书馆, 26~27。
- 武玉霞、朱涛 2007, 张衡地动仪的失传, 中国地震, 23(1): 93~103。
- 武玉霞、王培波、冯锐等 2011, 地动仪复原模型的造型设计, 自然科学史研究, 30(1), 77~94。
- 谢毓寿、蔡美彪主编, 1983, 中国地震历史资料汇编(第一卷), 北京: 科学出版社。
- 许结, 1998, 论张衡学术与东汉中叶文化思潮, 学人, 14, 439~486。
- 臧嵘 2007, 中国古代驿站与邮传, 北京: 商务印书馆, 186。
- 查有梁 2007, 落下闳的贡献对张衡的影响, 广西民族大学学报(自然科学版), 13(3), 73~78。
- 张闻玉 2008, 古代天文历法讲座, 桂林: 广西师范大学出版社, 341。
- 中国科学院地球物理研究所, 1975, 地震仪器概论, 北京: 科学出版社, 238~242。
- 周振鹤, 1998, 中国历代行政区划的变迁, 北京: 商务印书馆, 188。
- 朱洁 2009, 张衡造物艺术思想研究, 武汉理工大学博士学位论文, 1~137。
- 阿部胜征 2000, 李毓昭、张佳微译: 大地震, 北京: 晨星出版有限公司, 9。
- Dewey J, Byerly P, 1969, The early history of seismometry (to 1900), Bull Seism Soc Amer, 59(1), 183~227。
- Herbert-Gustar L K, Nott P A, 1980, John Milne: Father of Modern Seismology. Tenterden Kent: Paul Norbury Publications Ltd, 1~90。
- Sleeswyk A W and Sivin V, 1983, Dragons and toads, the Chinese seismoscope of A. D. 132, Chinese Science, (6), 1~19。
- Milne J, 1883. Earthquakes and Other Earth Movements, London: Kegan Paul Trench, Trubner and Co. Ltd。
- 關野雄, 1972, 張衡の候風地動儀における都柱の復原, 東方學論集・東方學會創立二十五周年紀念, 財團法人東方學會, 433~449。

The birth of Zhang Heng's seismoscope

Feng Rui Wu Yuxia

China Earthquake Networks Center , Beijing 100045 , China

Abstract The first seismometer in the world was invented in 132 AD by Zhang Heng in the Eastern Han Dynasty and the birth of this instrument had strongly social and historical background. For Zhang Heng's scientific idea , the present authors would like to discuss its forming process and material basis. Zhang Heng lived in a highly developing period of culture and science in the Eastern Han Dynasty. The original pursue of studying and designing such instrument in ancientness was just a quite simple desire to observe nature anomalies for future prediction. The authors in this paper review briefly the social background at that time , the academic course of Zhang Heng and the historical process of the instrument creation. The paper also analyses the seismic activities in early Eastern Han Dynasty , ancient ideas for earthquake , as well as scientific activities carried in the ancient observatory (Ling Tai) . It appears that corresponding study work of the instrument started in about 128 AD. Based on his experience , Zhang Heng came to two simple and unsophisticated concepts of earthquake , i. e. the quake position could be judged according to its orientation and the earthquake should be distinguished seriously from landslip. Such perceptual knowledge was very significant and made the innovation following clearly after technical requirements. The general principle of Zhang Heng's making is to imitate the objective world as much as possible. The principle of his seismoscope includes the imitated response of hanging object to earthquake , the detecting technique of triggering bolter mechanism , and the recording system realized by dragons spitting a ball. Successful settlements of above three key problems in science and technique made Zhang Heng's innovation completed. The birth of Zhang Heng's seismoscope indicated the first successful use of material inertia by mankind , and had positive social effects in history.

Key words: The birth of seismoscope Zhang Heng Ancient idea for earthquake
Seismic activities in early Eastern Han Dynasty Hanging object Trigger
mechanism