

构造塌陷地震

TECTONIC COLLAPSE EARTHQUAKE

邱泽华 张宝红 著

543

地质出版社

构造塌陷地震

邱泽华 张宝红 著

TECTONIC COLLAPSE EARTHQUAKE

Qiu Zehua Zhang Baohong

Institute of Crustal Dynamics,
State Seismological Bureau, Beijing

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

(京) 新登字 085 号

内 容 提 要

本书系统地论证了构造塌陷是地震的成因，从而提出了一个新的地震成因理论。本书以地震研究人员为主要对象，同时对有关领域的研究人员也有参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

构造塌陷地震 / 邱泽华, 张宝红著. - 北京: 地质出版社, 1994.12
ISBN 7-116-01785-2

I. 构… II. ①邱… ②张… III. 地质构造-塌陷-地震-研究 IV. P315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 14341 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑: 张怀素

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 850 × 1168 1/32 印张: 6.25 字数: 160 千

1994 年 12 月北京第一版 · 1994 年 12 月北京第一次印刷

印数: 1-800 册 定价: 7.50 元

ISBN 7-116-01785-2

P · 1423

前 言

粗略地说，从80年代初至今，作者对构造塌陷地震的研究已经十几年。然而，作者真正有一些条件专心开展这项工作则始于80年代末。这些年来，作者两次得到地震科学联合基金资助，一次得到作者所在的国家地震局地壳应力研究所青年科学基金资助，陆续发表过10篇文章，从多个角度论证了这种地震成因。本书就是在此基础上通过更深入的研究写成的。

复杂的构造运动会使地壳内的一些部位进入虚空状态，当这种虚空区达到一定规模时进而会发生岩层塌陷，造成地震，作者称之为构造塌陷地震。虚空区是竖直压力明显低于理论静压力并且处于膨胀状态的部位。膨胀使虚空区因有异常高的空隙度而呈低速—低阻，这可以用于解释地震带与地壳低速—低阻层的密切关系。高空隙度又决定了虚空区有异常高的压缩系数，这是最重要的，它为塌陷岩层的失稳运动提供了根据。虚空区特别容易在相对下沉部位出现，也很容易出现在升降转换部位，这些地方往往是地震活动带。张裂在构造塌陷过程中有重要作用。侧向张裂与铲形断层有密切关系。塌陷地震有塌方和陷落之分，其震中附近的地面形变完全不同；塌陷地震还有全破裂和半破裂之分，这使其地震波辐射图案不仅仅限于由封闭的环（圈）形组成；塌陷更有多断裂和单断裂之分，这与断层运动只注意一个平面的情况形成鲜明的对比。构造塌陷地震成因并不认为地震直接释放的能量以重力势能为主，而是同样强调应变势能的释放是主要的，然而这个应变势能应该看成由重力势能事先转换而来。因为地震主要释放应变势能，所以震源可以看成应变或应力张量源，这又为用测震方法对地震机制进行张量分析提供了根据。构造塌陷地震成因特别注意空隙液压的作用，在新的基础上应用膨胀—扩散模式说明了一些重要物理量在大地震前的

异常变化。作者对唐山地震进行了非常全面细致的分析，认为这就是一次构造塌陷地震。

本书对构造塌陷地震成因的论证主要包括两个部分：从第二章到第五章是基本理论，第六章和第七章是震例分析。基本理论大体包括三部分内容：1. 虚空区的存在及其结构；2. 构造塌陷的孕育和发生过程；3. 构造塌陷的震源机制。震例分析是分别从地震成因和前兆现象两方面进行的。对传统的断层地震成因的评论也许是必不可少的，从不同角度的评论分散在各有关章节中。

如果本书最终被证明对地震学的发展有所贡献，那么这首先要归功于前人宝贵的研究基础，归功于前人对地震现象进行的艰苦细致的考察和长期认真的观测。作者还要特别感谢在这些年来研究中得到过其重要帮助的金凤英、丁国瑜、秦保燕、黄湘宁、黄福明、冯树文、陈宏德和赵和平等人。其他对作者有过帮助的人们难以一一计数，这里一并致以衷心的感谢。

作者

1994年6月

目 录

第一章 前人的思想和模式	(1)
1.1 历史早期的情况	(1)
1.2 非构造塌陷地震	(3)
1.2.1 溶洞塌陷	(3)
1.2.2 煤矿采空区塌陷	(4)
1.2.3 构造塌陷的概念	(5)
1.3 檀原毅的模式	(6)
1.4 层间解缚模式	(11)
第二章 虚空区和虚空度	(13)
2.1 唐山地震的宏观塌陷区	(13)
2.2 静压力和虚空度	(16)
2.3 岩层的竖直静力平衡	(19)
2.4 地壳抗剪强度按深度的分布	(21)
2.5 虚空区的最大规模	(23)
2.6 潜在塌陷幅度和塌陷势	(26)
第三章 虚空区和膨胀	(29)
3.1 低速层和低阻层	(29)
3.1.1 低阻层	(29)
3.1.2 低速层	(31)
3.1.3 低速层与低阻层的一致性	(32)
3.2 低速-低阻和空隙度	(33)
3.3 膨胀和虚空度	(38)
3.4 超深钻探的发现	(41)
3.5 虚空区的压缩系数	(45)

3.6	真空隙液压和视空隙液压	(46)
3.7	考虑空隙液压的静力平衡	(47)
第四章	构造塌陷的孕育和发生	(50)
4.1	竖直构造运动的原因	(50)
4.2	虚空区形成的基本方式	(51)
4.3	塌陷发生的基本方式	(54)
4.4	构造塌陷的失稳	(55)
4.5	初始破坏	(61)
4.6	塌方和陷落	(63)
4.7	升降转换带和深部倾滑断层	(65)
4.8	侧向张裂	(68)
4.9	空隙液压的作用	(72)
第五章	构造塌陷的震源机制	(74)
5.1	重力与构造塌陷地震的能量变化	(74)
5.2	断裂方式与应力张量点源	(75)
5.3	一些简单塌陷的震源机制	(77)
5.4	唐山地震的震源机制	(82)
5.5	双力偶震源机制的局限性	(85)
第六章	唐山地震的成因	(90)
6.1	水准形变	(90)
6.2	地震序列的震中分布	(93)
6.3	构造背景	(96)
6.4	震害分布	(102)
6.5	喷水冒沙的原因	(106)
6.6	唐山—丰南地面裂缝带	(109)
6.6.1	裂缝带的顺扭情况	(109)
6.6.2	裂缝带的张性	(112)
6.6.3	裂缝带的成因	(113)
6.6.4	竖直位移与水平位移的比较	(116)

第七章 唐山地震的前兆现象	(118)
7.1 1970年丰南地震	(118)
7.2 跨唐山断裂的水准形变	(119)
7.3 地应力	(125)
7.3.1 震前变化情况	(125)
7.3.2 观测原理	(127)
7.3.3 变化的原因	(130)
7.4 地下水位的趋势性变化	(135)
7.5 地电阻率	(138)
7.6 重力	(141)
7.7 波速比	(145)
7.8 地下水位的临震变化	(149)
7.8.1 临震回升	(149)
7.8.2 饱和效应	(152)
7.8.3 预位移	(155)
7.9 其它临震异常	(155)
第八章 构造塌陷地震研究的发展	(160)
8.1 其它震例	(160)
8.2 诱发地震	(166)
8.3 圣安德烈斯断层和地震	(171)
8.4 地震成因的分类	(174)
参考文献	(177)
Abstract	(189)

Contents

1 Previous hypotheses and models	(1)
1.1 Early history	(1)
1.2 Non-tectonic collapses.....	(3)
1.2.1 Collapse of karst cave	(3)
1.2.2 Collapse of mining excavation	(4)
1.2.3 Concept of tectonic collapse	(5)
1.3 Dambara's model	(6)
1.4 Qin's model	(11)
2 Geovacuum and lower vertical pressure	(13)
2.1 Tangshan earthquake's collapse phenomena	(13)
2.2 Geovacuumity	(16)
2.3 Vertical statics	(19)
2.4 Shear resistance versus depth	(21)
2.5 The largest scale of a geovacuum zone	(23)
2.6 Applications of geovacuumity	(26)
3 Geovacuum and dilatation	(29)
3.1 Low-resistivity zone and low-velocity zone	(29)
3.1.1 Low-resistivity zone	(29)
3.1.2 Low-velocity zone.....	(31)
3.1.3 Relation to seismic zone	(32)
3.2 Porosity.....	(33)
3.3 Dilatancy and geovacuumity	(38)
3.4 Discoveris by super-drill	(41)
3.5 Compressibility	(45)

3.6	True pore-pressure and apparent pore-pressure.....	(46)
3.7	Vertical statics involving pore pressure.....	(47)
4	Evolution of tectonic collapse	(50)
4.1	Vertical tectonic movement	(50)
4.2	Basic mode of geovacuum	(51)
4.3	Basic mode of collapse	(54)
4.4	Destabilization in tectonic collapse	(55)
4.5	Initial failures	(61)
4.6	Rockfall-collapse and subsidence-collapse	(63)
4.7	Differential vertical movement belt and development of dip-slip fault.....	(65)
4.8	Lateral fracture	(68)
4.9	Effects of pore pressure	(72)
5	Focal mechanism of tectonic collapse	(74)
5.1	Gravity and energy change	(74)
5.2	Fracture pattern and focal stress tensor	(75)
5.3	Some elementary sources	(77)
5.4	Tangshan earthquake's focal mechanism.....	(82)
5.5	Shortcomings of double-couple mechanism	(85)
6	The cause of Tangshan earthquake	(90)
6.1	Levelling deformation	(90)
6.2	Distribution of aftershocks	(93)
6.3	Tectonic background	(96)
6.4	Distribution of damages	(102)
6.5	Waterspouts and sandboils	(106)
6.6	The main surface fissure zone.....	(109)
6.6.1	Strike-slip.....	(109)

6.6.2	Tensility	(112)
6.6.3	Explanation	(113)
6.6.4	Vertical displacements and horizontal displacements	(116)
7	Anomalies prior to Tangshan earthquake	(118)
7.1	The 1970 Fengnan earthquake	(118)
7.2	Levellings across Tangshan fault	(119)
7.3	Ground stress	(125)
7.3.1	Anomalous changes	(125)
7.3.2	Principles of the observation	(127)
7.3.3	Explanation	(130)
7.4	Long-term change of ground water level	(135)
7.5	Ground resistivity	(138)
7.6	Gravity	(141)
7.7	Velocity ratio	(145)
7.8	Short-term change of ground water level	(149)
7.8.1	Precursory rebound	(149)
7.8.2	Effect of saturating	(152)
7.8.3	Pre-displacement	(155)
7.9	Other precursory phenomena	(155)
8	Developing Studies	(160)
8.1	Supplementary examples	(160)
8.2	Induced earthquake	(166)
8.3	San Andreas fault and earthquakes	(171)
8.4	Causal classification of earthquakes	(174)
	References	(177)
	Abstract	(189)

第一章 前人的思想和模式

1.1 历史早期的情况

1964年，Hodgson在其著作中当谈到地震的分类时写到：“塌陷地震是由于巨大的地下洞穴塌陷造成的，这是最早的地震成因理论，早被废弃了”。这句话在很大程度上表明了现代地震学界对塌陷地震的评价，同时也反映了将塌陷看成地震的成因由来已久。

早在1914年，中国云南峨山发生了一次破坏性地震，死亡上千人，“公署，城垣，寺庙，桥梁倾覆无遗”，“田间喷出白沙及水”，震时地声“若履空谷”，震中地区“呈陆沉之势”。震后被委派前往考察的学者张鸿翼后来作出了这样的结论：“此次地震，乃地盘下落所致，属于陷落地震之一种，非火山地震，亦非断层地震也”（谢毓寿和蔡美彪，1985）。张鸿翼对云南峨山地震所作的结论表明，考察者同时考虑到了各种可能成因，这些成因与当时最先进的地震成因分类一脉相承。

回顾历史，人类对地震的认识始终与对自己脚下的大地的认识紧密联系，在多地震的地方，人们对地震的了解也更清楚。

古希腊人已经知道，整个大地绝不是从上到下都那样坚硬致密。被称为“第一个不依靠自然界以外的力量说明自然现象的人”的古希腊学者Thales（公元前624—545）提出，陆地是浮在水上的，地震时水从地下喷出来就表明了这一点。后来的Pythagoras学派指出，部分陆地会由于地震而沉没，例如希腊的赫利斯和布利斯城镇就是这样沉没的（小林英夫，1954）。而Aristotle（公元前384—322）的观点是，地下运行着某种气

体，火山喷发就是这种气体冲出地面的表现。

古罗马人 Lucretius (公元前 99—55) 提出：“地下岩层可以在地下洞穴或类似的部位中变动，当掉落时就造成地震” (Verney, 1979)。这或许可以称为对塌陷地震成因的最早的直接描述。另一个古罗马人 Strabo (公元前 63—约公元 20) 在其著作《地理学》中写道：“象布雷、比松那那样的城镇以及其它一些地方，就是由于地震而沉没在海中的” (小林英夫, 1954)。

在有关地质科学发展历史的著作中，丹麦学者 Steno (1638—1687) 提出的意大利托斯卡纳 (Tuscany) 地区的地层变动模型 (图 1-1-1) 经常被人们提到。按照这个模型，该地区地层变动的主要原因是“地下火”和地下水联合作用使地下形成空洞，然后地层塌陷。当时的大数学家 Leibnitz (1646—1716) 认为：“地球原来是一个燃烧的发光体，以后逐渐冷却下来直到现在。当冷却到使蒸汽凝结的较低温度时，就形成了覆盖包括最高山峰的整个世界的大洋。从熔融状态凝固而成的地球具有气泡和洞穴结构；因为有些地方有裂缝，所以地面的水流入地下，使原始大洋的水面降低了。巨大洞穴的破裂就是发生 Steno 所说的地层变位和紊乱的原因” (Lyell, 1873)。

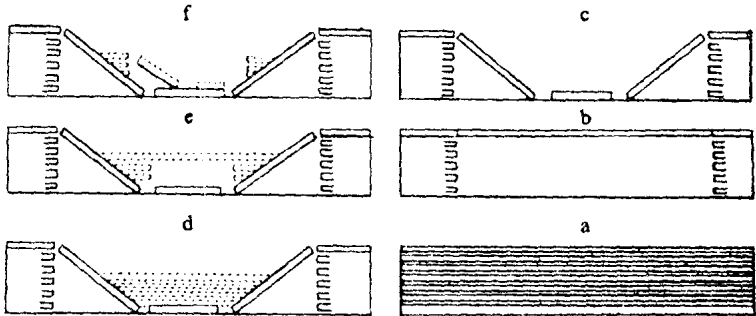


图 1-1-1 Steno 的地层变动模型 (据孙荣圭, 1984)

从 f 到 a 是从现今到先前的顺序

宇津德治 (1978) 主编的《地震事典》提到, 一直到 1905 年, 日本学者大森仍然把地震分成这样两类: 一类地震地面初动朝向震中, 是地下空洞的崩塌造成的; 另一类初动背向震中, 起因于在气体膨胀等因素的作用下地下空洞发生扩张。甚至当志田顺 1917 年最初提出地震初动分布的“节线”概念时, 也是把地震分成“陷落地震”和“破裂地震”两类 (宇津德治, 1987)。

塌陷曾经被一些著名学者看成地震的重要成因, 但是, 在比较严格的意义上, 塌陷地震成因并没有形成一个理论。塌陷能造成地震一直被看成不需要说明的常识, 人们以前关心的主要是地下是否存在空洞以及空洞如何形成。后来, 也许是由于断层地震成因理论广泛流行, 塌陷地震成因“理论”才被“废弃了”。

1.2 非构造塌陷地震

实际上不少学者仍然将塌陷看成地震成因之一。例如, 在 Bolt (1978) 的著作中, 塌陷地震被说成“发生在地下洞穴和矿井中的一些小震”。“小震”是一个大致的说法, 实际上这种洞穴塌陷地震可达 5 级 (中国科学院地球物理研究所, 1976)。

1.2.1 溶洞塌陷

溶洞的塌陷一般只能出现在石灰岩地层发育的地区。以喀斯特地貌名闻天下的桂林所在的广西就是这种塌陷地震比较多发的地区。例如 1935 年广西百寿县发生的一次塌陷, 塌陷区面积达五六十亩, “尽成深潭”, “当塌陷时, 声闻数十里, 附近屋瓦波动, 二、三十里内居民惊骇万状” (钟新基, 1978)。

1982 年 9 月发生在广西恭城县龙眼村的一次溶洞塌陷, 引起了山体崩塌, “崩塌体覆盖面积约五万多平方米”。塌陷前 20 天, 相继出现地裂, 宽度为几厘米至 1m。附近一电站的专眼看

水员目睹了这次塌陷过程，他看到开始时“落水洞附近缓慢下陷，伴有冒水、冒气和冒泡等现象，紧接着，落水洞附近塌落，其上方的山体崩塌”（钟新基，1982）。

钟新基（1982）对很多溶洞塌陷进行了总结，提出溶洞地区采排水流量突然减小，采排水水位突然降低或水位跳动剧烈，以及地下水颜色变浑浊、含沙量增大等现象，都可能是塌陷前兆。

1.2.2 煤矿采空区塌陷

在地下煤矿采掘中，人们需要在巷道内工作，因此对塌陷前巷道内的情况有所了解。与溶洞塌陷相比，人们对矿井塌陷的研究可以更有把握地进行。这里重点介绍山西大同煤矿的情况（山西地震局业务科和大同地震台，1976）。

人们注意到，在采空区大面积冒顶前，可能出现这样一些宏观现象：1. 顶板出现闷雷声，煤帮和煤柱出现“咣咣”的“炸帮”声，这些声音频度逐渐增高，范围逐渐扩大。这种现象几天一十几天前即开始出现；2. 巷道内岩层明显变形，出现墙上的钉钎拔不出来、煤壁“片帮”最厚达 2m，炮眼打完后不能装药，巷道地鼓不能通车以及支柱变形破坏等现象；3. 地面加速下沉，日下沉量可达数十毫米；4. 巷道内淋水现象加剧，原淋水为清水的地方，这时可能淋水变浊。

该煤矿巷道冒顶在频度方面的特征也是值得注意的。例如 1972 年 3 月的冒顶，从 3 月 3 日开始到 26 日， $M_L \geq 0.5$ 的地震频度每天在 20—59 次之间，波浪式地增加，27 日塌陷增到 60 次，28 日猛增到 315 次，强度也相应地增大，在此基础上出现了大面积的顶板冒落（ $M_L = 3.4$ ），以后，29 日塌陷降到 150 次，30 日降到 57 次。这被称为“主塌型冒落”。而 1975 年 5—6 月的冒顶，5 月 29 日发生塌陷 15 次， $M_L = 2.1$ 的地震 1 次，30 日塌陷 33 次， $M_L = 2.0$ 的地震 1 次，31 日增到 115 次， $M_L = 2.1$ 的地震 4 次，6 月 1 日仍为 115 次，仅有 1 次 $M_L = 2.0$

的地震，6月2日降到38次，最大者 $M_L=1.7$ 。这被称为一次“群塌型冒落”。

一个地震发生了，如果人们发现地震发生的地方出现了明显的地面下沉，甚至是一个大坑，那么人们就很自然地认为这可能是一次塌陷地震。但是塌陷有时发生在相当深的地方，并不造成明显的地面形变，此时人们就可能认为地震是其它成因的。1992年1月28日，《中国地震报》以“香山地震冲击预报思路”为题报道了一则消息，反映了这个方面的情况。这里将该文的主要部分抄录下来：

“去年11月30日8点43分北京香山地区发生一次 $M_L=3.5$ 级地震，以苹果园、古城为中心，京西大面积有感。……”

去年12月9日，就这次地震事件，国家地震局科技监测司组织了国家地震局所属的分析预报中心、地球物理所、北京市地震办公室与北京矿务局、地矿部562队等单位的研讨。地震、地质、煤炭多系统的地震科研合作尚属首次。……”

北京矿务局及门头沟矿根据矿区地震台网测定，这是一次矿山地震（顶板断裂活动），震源深度为700—800m，位于采空区。

地球物理所根据华北区域遥测台网测定，这是一次天然地震，震源深度为10km。它与大范围的深部构造应力场的调整有关。

地矿部562队根据所属4个遥测台网测定，这次地震属天然地震，震源深度为10—15km。

……不同的单位各执一辞，莫衷一是。北京矿务局及门头沟矿所持矿区台网尺度小，相对时间可靠，监测精度高。地震监测系统所持地震波的处理技术完善。通过这次地震事件研讨，不同的单位走到了一起，将宏观与微观、大台网与小台网的资料进行交流，无疑是一项开拓性的工作。”

1.2.3 构造塌陷的概念

溶洞或煤矿采空区，由于其成因特点，通常只能位于地表附

近数百米深度范围内，而构造地震一般发生在更深的地方。另外，由于溶洞或煤矿采空区的成因特点，这种洞穴塌陷也不可能造成太大的地震。然而这些都不是二者的本质区别。实际上，非构造性塌陷地震的所有各种现象，在构造地震中几乎都有。

一些学者曾经试图从震源机制的角度区分塌陷地震与构造地震，实际上这方面的研究并未取得令人信服的结果，而张少泉等(1994)认为，矿山地震与构造地震一样，也是“大部分具有双力偶机制”。本书作者认为：北京矿务局及门头沟矿对香山地震的定位是不容置疑的，也就是说，这次地震是一次矿山地震；“地震监测系统”根据对地震波的处理认为这是一次构造地震，这不过是再一次说明了二者本质上有共同性。有趣的是，徐世杰等(1987)曾经根据辽宁北票台吉煤矿矿震的测震资料提出，这种地震本质上“是一种构造地震”。

塌陷地震发生的前提是地壳中存在虚空区。但是以前人们局限于将虚空区设想为空洞，这种空洞也只被考虑成原生的或由于非构造力作用（包括人类的挖掘）而形成。构造塌陷地震成因理论的基本观点是，地壳的构造运动会造成大规模的虚空区，塌陷地震可以在此基础上发生。可以认为，当地下虚空区扩大到一定程度时，塌陷就会发生。因为溶洞和矿井等的形成以及扩大是非构造性的，所以导致的塌陷称为非构造塌陷。相应地，由于构造运动而形成以及扩大的虚空区导致的塌陷称为构造塌陷。在对构造塌陷地震的研究中，时常联想一下溶洞或矿井的塌陷情况是特别有益的。

1.3 檀原毅的模式

1967年，日本学者檀原毅提出，由于下部地壳和岩层比较柔软而上部地壳相对坚硬，“横压力”和深部隆起可能造成上下部