

滇中中元古代昆阳群的地震事件沉积 及其地质意义*

杜远生^① 张传恒^② 韩 欣^① 顾松竹^① 林文娇^①

(^①中国地质大学, 武汉 430074; ^②中国地质大学, 北京 100083)

摘要 地震及其引发的海啸作为一种灾害性的地质事件可以在地层中形成地震-海啸事件沉积记录. 云南滇中地区中元古代大龙口组发育地震断裂层、微同沉积断裂、微褶皱纹理、泥晶脉(molar tooth 构造)、丘状层理等典型的地震-海啸沉积标志, 并形成震积岩(A, 包括液化泥晶脉灰岩、震裂岩、震褶岩、自碎屑角砾岩和内碎屑副角砾岩等)、海啸岩(B, 具丘状层理或平行层理的内碎屑灰岩)及背景沉积(C)三个沉积单元. 它们组合成 A-B-C, A-C, B-C 等 3 种类型的沉积序列. 这些沉积序列分别代表地震-海啸-背景沉积(地震引发海啸)、地震-背景沉积(地震未引发海啸)、海啸-背景沉积(远离地震中心)的事件沉积序列. 滇中地区中元古代处于裂谷盆地的构造背景下, 大龙口组的地震事件沉积是裂谷盆地构造活动的沉积响应.

关键词 云南省 中元古代 地震 海啸 震积岩 海啸岩

地震是一种灾害性地质事件, 是地壳运动的一种特殊而直观的表现形式. 它是由断裂活动、火山爆发、崩塌陷落等因素引起的地壳快速而剧烈的震动. 发生在海洋中的地震(海震, seaquake)可以引起巨大海啸(又称津浪 tsunami)和重力流. 现代地震、海啸及重力流通常对人类造成毁灭性的灾害, 史前地震和地史时期的地震可以形成特征的事件沉积, 为研究地震作用及其形成的沉积盆地和构造背景提供物质记录. 早在 20 世纪 50 ~ 60 年代, 一些学者就注意到地震作用对海底沉积物变形和位移的影响. Heezen 和 Ewing^[1], Heezen 和 Dyke^[2]先后对 1929 年加拿大 Grand Bank 大地震对海底沉积物位移、变形和引发的浊积岩进行了研究. 1969 年, Seilacher^[3]识别了地震作用改造未固结的水下沉积物形成的再沉积层, 并定义为震积岩(seismites). 之后, 许多沉积学家对震积岩、海啸作用形成的海啸岩(tsunamiite)和地震触发重力流形成的震浊积岩(seisnoturbidite)进行了研究^[4-10], 1984 年, “地震与沉积作用”(Seismicity and Sedimentation)专集出版对地震事件沉积作用进行了系统总结^[11]. 国内对震积岩的研究虽起步较晚, 但在华北、华南和西南三江中-新元古代、古生代海相及湖相地震事件沉积研究方面取得了许多重要成果. 如宋天锐、乔秀夫等人通过对华北中-新元古代及古生代地震及海啸沉积的研究, 提出了震积-海啸-震浊积事件沉积序列, 总结了震裂岩、震褶岩、震塌岩等地震事件沉积的不同岩相类型, 恢复了地震节律及其区域构造背景^[12-16]; 梁定益等人 and 孙晓猛等人研究了西南三江地区晚古生代震积岩及震积不整合^[17-19]; 吴贤涛、尹国勋研究了四川峨眉晚侏

罗世湖相震积岩等^[20]；南凌、崔之久和杜远生、韩欣总结了地震事件沉积的构造和沉积标志^[21,22]。在地震及其触发的海啸和重力流作用下，先成的沉积物可以被原地、近原地和异地改造形成不同的沉积构造，形成震积岩、海啸岩和震浊积岩等不同的岩石类型，并组合成不同的沉积序列。本文主要论述云南滇中地区昆阳群大龙口组的地震-海啸事件沉积特征，并对其地质意义予以探讨。

1 大龙口组的震积岩和海啸岩

云南中、上元古界广泛分布于滇中地区(图 1)，中元古界昆阳群自下而上分为下昆阳群因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组，上昆阳群大营盘组、黑山头组、大龙口组、美党组。上元古界为青白口系岔河组、柳坝塘组、华家箐组和震旦系澄江组、南沱组、陡山沱组、灯影组。发育地震事件沉积的大龙口组以碳酸盐岩沉积为主，自下而上分为 4 段。其底部鲁奎山段为中-厚层泥质灰岩、泥质条带灰岩；龙棚段为中-厚层灰岩、薄板状泥质灰岩及钙质泥岩；大六龙段为中-厚层灰岩和蠕条灰岩、角砾灰岩等；顶部三元宫段为厚层叠层石灰岩和泥灰岩、白云质灰岩等^[23]。

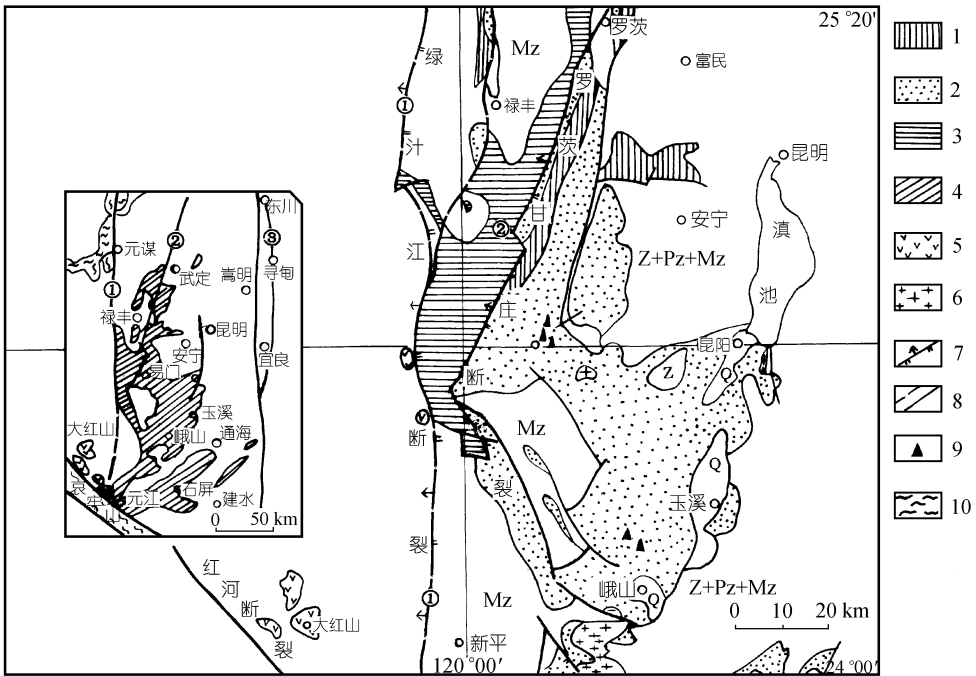


图 1 滇中罗茨—峨山一带地质简图

1. 新元古代青白口系；2. 上昆阳群；3. 下昆阳群；4. 昆阳群(不分)；5. 古元古代大红山群；6. 花岗岩；7. 逆冲断裂；8. 断裂和隐伏断裂；9. 研究剖面；10. 太古代变质杂岩。①绿汁江断裂；②罗茨-甘庄断裂；③小江断裂。Z 为震旦系；Pz 为古生界，Mz 为中生界，Q 为第四系

1.1 地震事件沉积的鉴别标志

滇中大龙口组大六龙段发育典型的地震-海啸作用的沉积、成岩和准同生变形构造。详细

研究表明, 大六龙段的蠕条灰岩为地震成因的泥晶脉(molar tooth 构造^[24]), 除此之外, 地震断裂层、微褶皱纹理、微同沉积断裂、丘状层理等标志也十分发育, 尤其在滇中易门-峨山一带最为典型。

泥晶脉是碳酸盐震积岩中一种特殊的构造, 它由泥晶方解石脉体组成, Bauerman 称之为 molar tooth 构造^[24]。大龙口组中的泥晶脉主要有两种类型: 一种为直脉状(图 2(d)), 一种呈不规则弯曲状(图 3(a), (b))。泥晶脉脉厚 2 ~ 6 mm。与后期构造裂隙充填亮晶方解石脉不同, 这些脉体是由泥晶方解石组成的。不规则弯曲状的泥晶脉脉体随机排列, 呈飘带状、飞鸟状等各种复杂的形态。直脉状的泥晶脉脉体近于平直, 多向上尖灭, 脉体有平行排列的趋势。不规则弯曲状的泥晶脉是液化的灰泥随机穿插层理形成的, 直脉状的泥晶脉是灰泥充填地震微断裂形成的。泥晶脉主要见于碳酸盐震积岩中^[9, 13]。

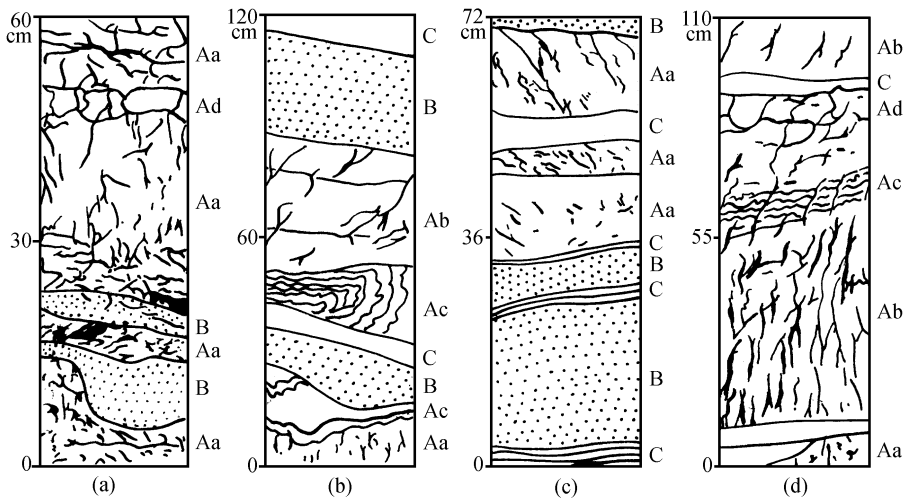


图 2 滇中地区大龙口组震积岩-海啸岩的沉积序列(根据照片简化)

Aa. 液化泥晶脉灰岩; Ab. 震裂岩; Ac. 震褶岩; Ad. 自碎屑角砾岩和内碎屑副角砾岩; B. 海啸岩; C. 背景沉积

大六龙段的地震断裂层是各种微断裂形成的岩层。微断裂以张性裂隙为主, 微断裂由岩层底部向上逐渐变细变少或均匀分布。断裂面不切层、不具共扼性, 沿断裂面充填灰泥质(图 2(d))。一些断裂形成阶梯状的微同沉积断裂(图 3(g))。地震断裂不同于后期构造形成的断裂, 后期构造形成的断裂以张扭或压扭性断裂为多, 断裂面平直且排列规整有序, 断裂切层、具共扼性, 断裂缝为结晶方解石充填。后期构造断裂往往切割早期形成的地震断裂。

微褶皱纹理是大六龙段震积岩中十分普遍的同沉积构造变形现象。微褶皱纹理也属于层内变形, 即地震微褶皱纹理局限于地震扰动层之内, 一般形态不规则、不协调, 定向性差, 尺度较小, 以区别于后期构造形成的褶皱变形(图 3(c), (d))。大龙口组的微褶皱纹理单个褶曲波长 1~20 cm 大小, 尤以 1~5 cm 为多, 褶曲层厚度多小于 1 m, 常见 20 cm 左右。

大六龙段的丘状层理是由平缓的丘状纹层组成的一种层理。丘状层的长高比(丘长/丘高)多达 10 以上。纹层倾角小, 一般小于 10°。一般认为, 丘状层理是海啸(津浪)形成的^[12, 13], 至少与典型震积岩伴生的丘状层理和地震引起的海啸有关。

由上述构造和沉积-成岩标志组成的大六龙段的地震事件沉积的不同类型。震积岩是地震

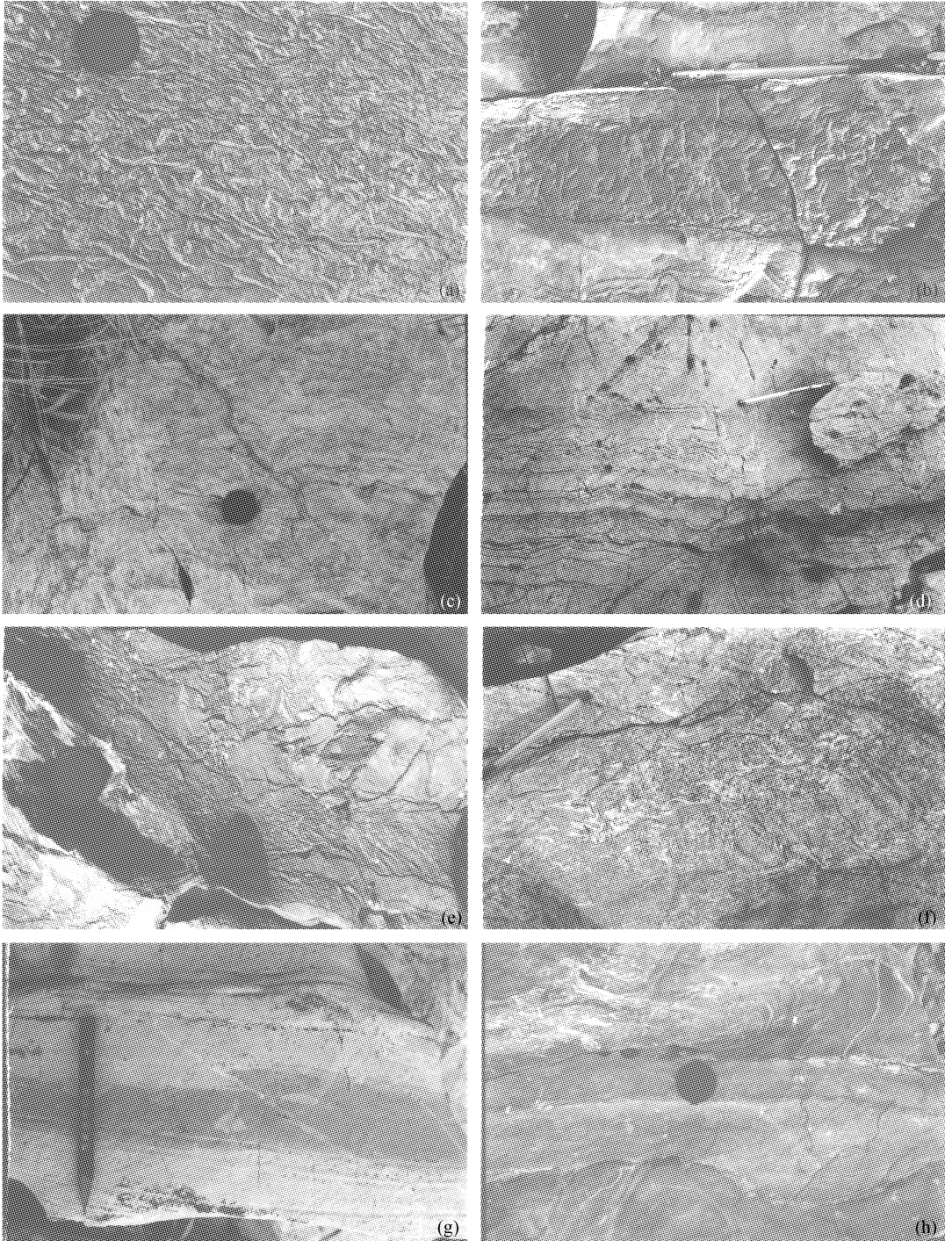


图 3

(a), (b) 泥晶脉构造; (c), (d) 震褶岩; (e) 自碎屑角砾岩; (f) 内碎屑副角砾岩; (g) 同沉积断裂; (h) 海啸岩

过程中沉积物震动形成的具各种震积构造的岩石(原地相), 包括液化泥晶脉灰岩、震裂岩、震褶岩、自碎屑角砾岩^[6](autoclast breccia, 相当于震塌岩^[13])和内碎屑副角砾岩^[6](intraclast parabreccia)等类型. 液化泥晶脉灰岩指具不规则弯曲状泥晶脉的灰岩(图 3(a), (b)). 震裂岩是指具微地震断裂和直脉状泥晶脉的灰岩(图 2(d)); 震褶岩是指具微褶皱纹理的灰岩(图 3(c), (d)); 自碎屑角砾岩是指地震颤动破坏原沉积层形成的初始断裂角砾灰岩(图 3(e)); 内碎屑副角砾岩是指自碎屑进一步位移形成的角砾灰岩(图 3(f)). 野外详细研究发现了两种不同类型的角砾. 一种是角砾呈塑性变形(软沉积变形)特征的塑性角砾岩(图版 3(f)). 这种角砾呈复杂的拉长、侧向变细和弯曲、锯齿状边缘, 具撕裂状痕迹. 另一种是磨圆和分选差的脆性角砾岩.

大六龙段的海啸岩是与震积岩共生的内碎屑副角砾岩或粗碎屑灰岩(近原地相)(图 3(h)). 这些碎屑灰岩的碎屑圆度较差和分选较好, 碎屑角砾常见塑性变形特征. 海啸岩中具丘状层理或不清晰的平行层理, 底部为明显的冲刷面. 海啸岩通常与典型震积岩共生, 也可孤立出现夹于背景沉积层中.

大龙口组大六龙段震积岩、海啸岩的背景沉积是中-薄层状细晶灰岩(原岩为泥晶灰岩), 内以水平层理或均质层理为主, 代表浪基面以下的浅海沉积. 大六龙段之上的三元宫段以叠层石灰岩和中厚层细晶灰岩为特色, 属潮坪-潮下带沉积.

1.2 震积岩-海啸岩的事件沉积序列

地震事件沉积序列是地震事件作用过程中地震及其引发的海啸、重力流形成的沉积单元的规律组合. 地震事件沉积作为一种特殊的事件沉积, 其沉积序列反映了地震事件的沉积作用过程. 当地震发生时, 首先引起的是对先成沉积物的原地改造, 此时形成各种震积岩. 如果地震触发海啸, 则形成海啸岩. 当地震触发重力流, 则形成震浊积岩. 地震过后, 接受正常沉积(即背景沉积). 一些学者根据不同时代、不同地区的实例, 总结了地震事件^[4]、地震-海啸-重力流^[12, 13]、地震-重力流^[5, 17, 19]的地震事件沉积序列. 滇中地区中元古代大龙口组形成于特殊的裂谷盆地背景, 因此形成了特征的地震事件沉积序列.

详细的研究分析表明, 滇中地区中元古代是一个补偿型的裂谷盆地, 大龙口组主要为补偿型的滨、浅海碳酸盐岩沉积^[25, 26]. 由于未能形成重力流沉积必备的陡斜坡地形条件, 故地震引发的重力流沉积不发育, 主要发育地震—海啸事件沉积. 因此, 该地震-海啸沉积序列自下而上由震积岩(A 单元, 原地系统)、海啸岩(B 单元, 准原地系统), 加上背景沉积(C 单元)3 个沉积单元构成. 其中单元 A 包括液化泥晶脉灰岩、震裂岩、震褶岩、自碎屑角砾岩和内碎屑副角砾岩等 4 种岩相类型, 它们以有序或无序的方式组合在一起.

根据地震及其引发海啸作用过程的差别, 大龙口组形成以下 3 种地震事件沉积序列: (1) 震积岩-海啸岩-背景沉积(A-B-C 序列, 图 2(a), (b)), (2) 震积岩-背景沉积(A-C 序列, 图 2(d)), (3) 海啸岩-背景沉积(B-C 序列, 图 2(c)下部). 上述 A-B-C 序列代表地震及其引发的海啸形成的事件沉积序列; A-C 序列代表地震未能引发海啸形成的地震事件沉积序列; B-C 序列代表远离震中区, 仅有海啸岩发育的事件序列. 沉积单元 A 中的岩相组合则代表地震发生时对先成沉积物的破坏程度和形式差异. 具泥晶脉的灰岩和震裂岩代表地震对震积层底部半固结和固结沉积物的液化或震裂; 对上部固结较差的沉积物的破坏以微褶皱变形为主; 震积岩顶部的角砾岩(包括塑性变形的角砾岩)代表地震造成半固结或非固结沉积物的破裂和位移.

2 地质意义

地震是活动构造背景下的一种自然灾变现象。现代地震活动带主要分布于汇聚型和伸展型的构造活动带,包括(1)环太平洋活动大陆边缘地震带,(2)阿尔卑斯-喜马拉雅-印尼大陆碰撞地震带,(3)大洋中脊(大洋中央裂谷)地震带,(4)大陆裂谷地震带(如东非裂谷、红海-亚丁湾、死海裂谷等)。与之类似,地质历史时期也存在不同的构造背景的地震活动带,这些构造活动带上的地震作用及地震事件沉积应是比较普遍的。

中元古代滇中地区处于活动的海洋裂谷盆地(昆阳裂谷)的构造背景下。已有的研究表明,滇中地区存在数条控制中元古代地层和沉积分布的巨型断裂:控制中元古代昆阳群分布西部边界的绿汁江断裂、东部边界的小江断裂,控制上、下昆阳群分布的罗茨-甘庄断裂等(图 1)。绿汁江断裂、罗茨-甘庄断裂是中元古代昆阳群沉积体系的突变带^[25]。中元古代昆阳群因民组、鹅头厂组、黑山头组等发育裂谷型碱性、中基性火山岩^[23, 25, 26]。因民组的重力流沉积、落雪组的叠层石礁在绿汁江断裂、罗茨-甘庄断裂附近发育^[26, 27]。著名的“因民角砾岩”^[23]发育有典型的斜坡相的角砾岩,也有对震积成因的怀疑。由于滇中地区中、新元古代昆阳群-青白口系以滨-浅海碎屑岩、碳酸盐沉积和斜坡相重力流沉积、裂谷型火山岩为特色,所以中、新元古代昆阳裂谷为一补偿型的多旋回裂谷盆地背景^[27, 28],裂谷演化经历了 5 次裂陷—补偿充填旋回^[26]。

地震事件沉积是裂谷盆地典型的事件沉积。地震事件沉积的空间分布与盆地的内部结构、构造活动性密切相关。滇中地区大龙口组的地震事件沉积发育最好的地区,一是易门地区,二是峨山地区。两处均位于罗茨-甘庄断裂的东侧,说明地震事件沉积的分布和罗茨-甘庄断裂的活动有关。罗茨-甘庄断裂是继承中元古代裂谷盆地的控盆断裂,在晋宁期、印支晚期、燕山-喜山期有不同程度的活动或被改造。该地震事件沉积引发海啸说明昆阳裂谷是一个开阔的裂谷海盆,其规模远远大于现代昆阳群的分布范围。大龙口组震浊积岩不发育,反映大龙口期沉积基底不具备大的斜坡,没有震浊积岩发育的地形条件。大龙口组地震事件沉积从一个侧面说明了元古代滇中裂谷盆地的存在,也可以帮助恢复裂谷盆地的空间格架。同时,大龙口组地震事件沉积的发现也为我们进一步寻找昆阳群其他地层地震事件沉积提供了一个新的线索。尤其是在因民组、鹅头厂组、黑山头组上部等盆地构造活跃期形成的地层中存在地震事件沉积的几率更大。

滇中地区中元古代裂谷盆地的形成和演化是和 Pangea-1950 的裂解、Rodinia 泛大陆(Pangea-850^[29])的形成密切相关的。滇中元古代大红山群为边缘海型的碎屑岩、碳酸盐岩和火山岩沉积^[26]。中元古代昆阳群和古元古代大红山群呈角度不整合接触,该角度不整合反映滇中地区古边缘海盆的闭合,所代表的构造事件是 Pangea-1950 的形成在扬子板块西缘的反映。因此,中、新元古代昆阳裂谷是在 Pangea-1950 的基础上裂解而成的。昆阳裂谷是一个具多期次有节律裂陷的补偿型裂谷盆地,自下而上因民组、鹅头厂组、黑山头组的裂谷型火山岩以及大龙口组的震积岩反映裂陷作用加剧,而落雪组、绿汁江组、大龙口组顶部、美党组下部含叠层石的碳酸盐岩代表裂谷被补偿充填。震旦系底部澄江组与中、下元古界之间的角度不整合反映昆阳裂谷的最终闭合,与 Rodinia 泛大陆(Pangea-850)的形成相对应。所以,滇中地区大龙口组的震积岩的发现不仅对恢复滇中地区中元古代沉积盆地的性质和演化,对认识

Pangea-1950—Pangea-850(Rodinia 泛大陆)之间的盆地转换在扬子克拉通西部边缘的表现也具有重要意义.

参 考 文 献

- 1 Heezen B C, Ewing M. Turbidity currents and submarine slumps and 1929 Grand bank earthquake. *Am J Sci*, 1952, 250: 849~873
- 2 Heezen B C, Dyke C L. Grand bank slump. *Bull Am Ass Petrol Geol*, 1964, 48: 221~225
- 3 Seilacher A. Fault-graded bed interpreted as seismites. *Sedimentology*, 1969, 13(1,2): 155~159
- 4 Seilacher A. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. *Mar Geol*, 1984, 55(1,2): 1~12
- 5 Mutti E, Ricci Lucchi F, Seguret M, et al. Seismoturbidites: a new group of resedimented deposits. *Mar Geol*, 1984, 55(1,2): 103~116
- 6 Spallotta C, Vai G B. Upper Devonian intraclast parabreccias interpreted as seismites. *Mar Geol*, 1984, 55(1,2): 133~144
- 7 Cita M B, Beghi C, Camerlenghi A, et al. Turbidites and megaturbidites from the Herodotus abyssal plain (eastern Mediterranean) unrelated to seismic events. *Mar Geol*, 1984, 55(1,2): 79~101
- 8 Kastens K M, Cita M B. Tsunami-induced sediment transports in the abyssal Mediterranean Sea. *Geol Soc Am Bull (Part1)*, 1981, 92: 845~847
- 9 Fairchild I J, Einsele G, Song T. Possible seismic origin of molar tooth structures in Neoproterozoic carbonate ramp deposits, north China. *Sedimentology*, 1997, 44: 611~630
- 10 Roep T B, Events A J. Pillow-beds: a new type of seismites? An example from an Oligocene turbidite fan complex, Alicante. *Sedimentology*, 1992, 39: 711~724
- 11 Cita M B, Ricci Lucchi F. Seismicity and sedimentation. *Mar Geol*, 1984, 55(1,2): 1~161
- 12 宋天锐. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震-海啸序列. *科学通报*, 1988, 33(8): 609~611
- 13 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 碳酸盐岩振动液化地震序列. *地质学报*, 1994, 68(1): 16~32
- 14 乔秀夫. 中国震积岩的研究与展望. *地质论评*, 1996, 42(4): 317~320
- 15 乔秀夫, 李海兵, 高林志. 华北地台震旦纪-早古生代地震节律. *地学前缘*, 1997, 4(3,4): 155~160
- 16 乔秀夫, 高林志. 华北中新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系. *科学通报*, 1999, 44(16): 1753~1758
- 17 梁定益, 聂泽同, 万晓樵, 等. 试论震积岩及震积不整合-以川西、滇西地区为例. *现代地质*, 1991, 5(2): 138~147
- 18 梁定益, 聂泽同, 宋志敏. 再论震积岩及震积不整合-以川西、滇西地区为例. *地球科学*, 1994, 19(6): 845~850
- 19 孙晓猛, 梁定益, 聂泽同. 大陆边缘震积岩序列——以金沙江中段震积岩为例. *现代地质*, 1995, 9(3): 1~277
- 20 吴贤涛, 尹国勋. 四川峨眉晚侏罗世湖泊沉积中震积岩的发现及其意义. *沉积学报*, 1992, 10(3): 19~24
- 21 南 凌, 崔之久. 地震混杂岩(震积岩)的沉积特征和识别. *地震地质译丛*, 1996, 18(6): 1~9
- 22 杜远生, 韩 欣. 论震积作用和震积岩. *地球科学进展*, 2000(4): 389~394
- 23 吴懋德, 段锦荪. 云南昆阳群地质. 昆明: 云南科技出版社, 1990. 1~265
- 24 Bauerman H. Report on the geology of the country near the forty-ninth parallel of north latitude west of the Rocky Mountains. *Geological Survey of Canada Report (1882-83-84, pt.B)*, 1885. 1~42
- 25 杜远生, 孙克祥, 李志伟. 云南元江地区中元古代昆阳群下亚群的沉积地质及控矿作用. *地球科学*, 1998, 23(1): 027~031
- 26 杜远生, 韩 欣. 滇中地区元古代沉积盆地演化及动力学初探. *现代地质*, 13(2): 199, 232~234
- 27 杜远生, 韩 欣. 滇中地区中元古代昆阳群落雪组叠层石礁的新发现及其意义. *地层学杂志*, 1999, 23(4): 294, 315
- 28 冉崇英, 陈好寿. 康滇裂谷旋回与铜矿层楼结构及其地球化学演化. *中国科学, B 辑*, 1994, 24(3): 325~330
- 29 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考. *地学前缘*, 1997, 4(3,4): 1~12