

四川龙门山构造带活动的钟乳石记录

邵兆刚¹⁾, 孟宪刚¹⁾, 韩建恩¹⁾, 王 津¹⁾, 余 佳¹⁾,
贺承广¹⁾, 权 凯²⁾, 陈麒光¹⁾

1)中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2)中国地质大学(北京), 北京 100083

摘 要: 在四川龙门山地区开展构造地质调查过程中, 沿龙门山构造带发现了大量灰岩及钙质胶结的砾岩溶洞, 这些溶洞形成与构造带的分布密切相关, 有些则直接发育在断裂带中。与其它地区溶洞所不同, 发现这些溶洞顶部发育的钟乳石普遍发生了偏转现象, 即钟乳石目前的最下部生长方向与铅直方向一致, 而中部和上部石笋轴线明显与铅直方向存在一定角度的偏折, 野外调查表明, 沿龙门山构造发育的溶洞石钟乳及石笋的生长受断裂活动控制发生的明显的偏折和摆动现象, 为研究龙门山构造活动特征提供了难得的实际材料。钟乳石生长轴线的偏转及 AMS¹⁴C 测年结果表明, 龙门山构造带存在明显的周期性活动特征, 已有的测年结果反映龙门山构造带于 21.81 ka(或 22.85 ka)、19.3 ka(或 20.71 ka)处于构造活动期, 显示了构造的幕次活动特征, 测年结果记录到的幕次间隔期或周期为 2.14~2.5 ka。结合地震分析, 钟乳石生长揭示出石钟乳生长轴线的偏折是龙门山构造带幕次活动期短期内发生持续构造活动的结果, 并导致在幕次构造活动期的短时段内伴生大量的地震等构造活动。

关键词: 四川龙门山; 钟乳石; 生长轴偏转; 构造活动

中图分类号: P578.61; P597; P546 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.01.04

Activity of the Longmenshan Tectonic Belt in Sichuan: Evidence from Stalactite Record

SHAO Zhao-gang¹⁾, MENG Xian-gang¹⁾, HAN Jian-en¹⁾, WANG Jin¹⁾, YU Jia¹⁾,
HE Cheng-guang¹⁾, QUAN Kai²⁾, CHEN Qi-guang¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;
2) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

Abstract: In the Longmenshan structural geology survey within Sichuan Province, the authors found a large number of limestone and calcium cementation conglomerate karst caves along the Longmenshan tectonic belt, which are closely related to the tectonic belt distribution, with some occurring directly in the fault zone. Different from caves in other areas, the stalactites developed at the top of the caves generally assume deflection phenomenon, i.e., the growth direction of the bottom of the stalactite is consistent with the vertical direction; however, the axis of the middle and top part of the stalagmite obviously shows a certain angle deflection in comparison with the vertical direction. These findings provide valuable actual materials for the study of Longmenshan structure activity characterized by the fact that the cave stalactites and stalagmite's development show obvious deflection and switch caused by fault activities along the Longmenshan tectonic belt. The axis deflection of the stalactite and the AMS¹⁴C dating show that the Longmenshan tectonic belt is obviously characterized by cyclical activity. Previous dating revealed that the Longmenshan tectonic belt was in the period of tectonic activity at 21.81 ka (22.85 ka) and 19.3 ka (20.71 ka), which illustrates the structural episodes and cyclic active characteristics whose intervals or spans were 2.14~2.5 ka. The stalactite's growth process in

本文由科技部科技支撑计划项目“地震断裂带的应力环境、应变能的分布及其与地震关系”课题(编号: WFS0-007)和中国地质调查局地
质调查项目“青藏高原气候变化湖泊沉积记录研究”(编号: 12120113006100)联合资助。

收稿日期: 2013-07-29; 改回日期: 2013-11-01。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 邵兆刚, 男, 1970年生。博士, 研究员。主要从事区域地质、沉积相与古环境研究。E-mail: shaozhaogang@sina.com。

combination with seismic analysis reveals that the axis deflection resulted from the sustainable activities of Longmenshan tectonic belt in the period when deflection interface happened and during the fault activity period, and the activities led to a series of associated earthquakes in this period of structural activities.

Key words: Longmenshan, Sichuan; stalactite; axis deflection; tectonic activity

岩溶洞穴沉积作为一种重要的环境地质记录载体越来越受到人们的重视, 由于其形成过程具有周期长、沉积连续, 且能够精确定年的特点, 在开展古环境、古气候演化研究中发挥着巨大的作用, 而在岩溶记录中所反映的构造运动记录也逐渐被人们发现和研究, 如 Paolo 等(1984)、Postpischl 等(1991)提出了由于构造活动导致石笋生长轴线的变化以及洞穴沉积物的崩塌和生长异常可能是古地震的结果。Morinaga 等(1994)、Kagan 等(2005)和 Cadorn 等(2001)分别从石笋突变破坏、古地磁年代学、石笋氧同位素对比定年和实验室石笋破坏机理等方面对反映的古地震和构造运动进行了研究。但以往研究对象多以生长在溶洞底部的石笋记录为主, 而生长在溶洞顶部的钟乳石, 由于后期可能存在溶蚀作用, 造成定年困难而往往被人们所忽视。我们在四川龙门山地区开展构造地质调查过程中, 沿龙门山构造带发现了大量灰岩及钙质胶结的砾岩溶洞, 这些溶洞形成与构造带的分布密切相关, 有些则直接发育在断裂带中。与其它地区溶洞所不同, 这些溶洞顶部发育的钟乳石普遍发生了偏转现象, 即钟乳石目前的最下部生长方向与铅直方向一致, 而中部和上部石笋轴线明显与铅直方向存在一定角度的偏折。由于龙门山断裂带是处在活动中的构造带, 如果紧邻构造带洞溶钟乳石的偏折现象与龙门山构造活动相关, 则可为开展龙门山构造活动提供一个新的途径, 为此我们对这一现象进行了野外调查及同位素年代学研究。对钟乳石形成特征及其与构造活动关系进行了初步论证, 由于此前对这一过程的研究未见报到, 因此可以为本区龙门山构造带构造活动研究提供新的资料。

研究区位于龙门山构造带中部都江堰—彭州的山前断裂带中, 该带也是四川盆地与青藏高原的交接地带, 是我国地貌起伏最大的陡变带, 自西向东依次为韧性构造变形带、构造冲断带、山前褶皱带、前陆盆地, 具有明显分带。期间发育了龙门山后山断裂 F_1 (茂汶—汶川断裂)、主中央断裂 F_2 (映秀—北川断裂)和山前断裂 F_3 (灌县—江油断裂)3 条主干断裂(邓起东等, 1994; 贾秋鹏等, 2007; 李勇等, 2006a, b; 唐力君等, 2013)(图 1)。地震剖面显示, 构造带内部地层表现为强烈的逆冲叠瓦推覆构造, 构造带东缘则表现为挤压变形活动为主的构造变形特征。伴随青藏高原晚新生代以来的强烈隆升和变形,

龙门山地区新构造运动变形强烈, 断裂带呈现挤压-走滑特征。现今龙门山构造带的构造变形主要集中在中央断裂 F_2 和山前断裂 F_3 上, 山前古近系—新近系陆相地层发生强烈的掀斜作用, 地层倾角达 40° 左右, 前缘断裂带切割、错断了晚第四纪河流相堆积物(杨晓平等, 1999; 唐荣昌等, 1993; 贾东等, 1993; 林茂炳等, 1991; 张希等, 2011)。

1 龙门山构造带中段岩溶沉积特征及分析

在龙门山构造带中段开展野外调查过程中, 沿龙门山构造带发现了大量灰岩及砾岩溶洞, 其分布和洞体的延伸均受断裂构造制约, 或直接发育在断裂带中。这些与构造带伴生的溶洞顶部发育的钟乳石的中、上部轴线方向普遍发生了偏转。

1.1 塘坝村南灰岩溶洞

该灰岩溶洞位于四川省彭州市白鹿镇塘坝村南陡坎处(坐标: $N30^\circ12'40.410''$, $E103^\circ54'47.048''$), 溶洞高 1.5 m, 发育于断裂带中, 洞口朝向南东, 进洞后右拐呈 $NE45^\circ$ 方向延伸约 50 m, 洞内潮湿、无风, 溶洞顶部发育大量钟乳石, 钟乳石普遍存在彼此一致的多次偏折现象, 图 2、图 3A 为我们采集的一块发生 3 次偏转的钟乳石。对其中的 6 个石钟乳进行了倾伏方位测量(表 1), 从表中我们可以看出, 溶洞顶部钟乳石笋存在多达 3 次的偏折现象, 其中上部轴线的倾伏方位大多集中在 115° 左右, 倾伏角介于 $60^\circ\sim 80^\circ$ 之间, 而下部正在生长部分均呈铅直状态。图 3B 是样品切开后的剖面形态, 从中可以发现, 由于石钟乳往往围绕滴水中心形成, 在其生长过程中, 中心往往一直保留有过水通道, 使得石钟乳内部早期物质被溶蚀, 形成大量空洞。这一现象会对石钟乳的定年带来困难, 这也是洞溶钟乳石记录被长期忽视的原因。

1.2 葛仙山镇莲花洞

在四川省彭州市葛仙山镇的莲花洞我们同样发现了溶洞顶部石钟乳偏折现象, 该溶洞洞口直径仅 1 m 左右, 必须经过一段爬行才能进入, 但洞内空间十分开阔, 洞体宽度在 30 m 以上, 使该溶洞极易受地震等因素的影响, 溶洞顶部发育的石钟乳直径偏小, 仅为 5~10 cm, 且大部分发生折断, 反映出钟乳石受到构造强烈活动的破坏。但根部保留部分的轴线同样存在显著的偏折现象(图 4)。根部石钟乳倾俯向为 $320^\circ\angle 65^\circ$, 倾俯方向与区域构造走向大体

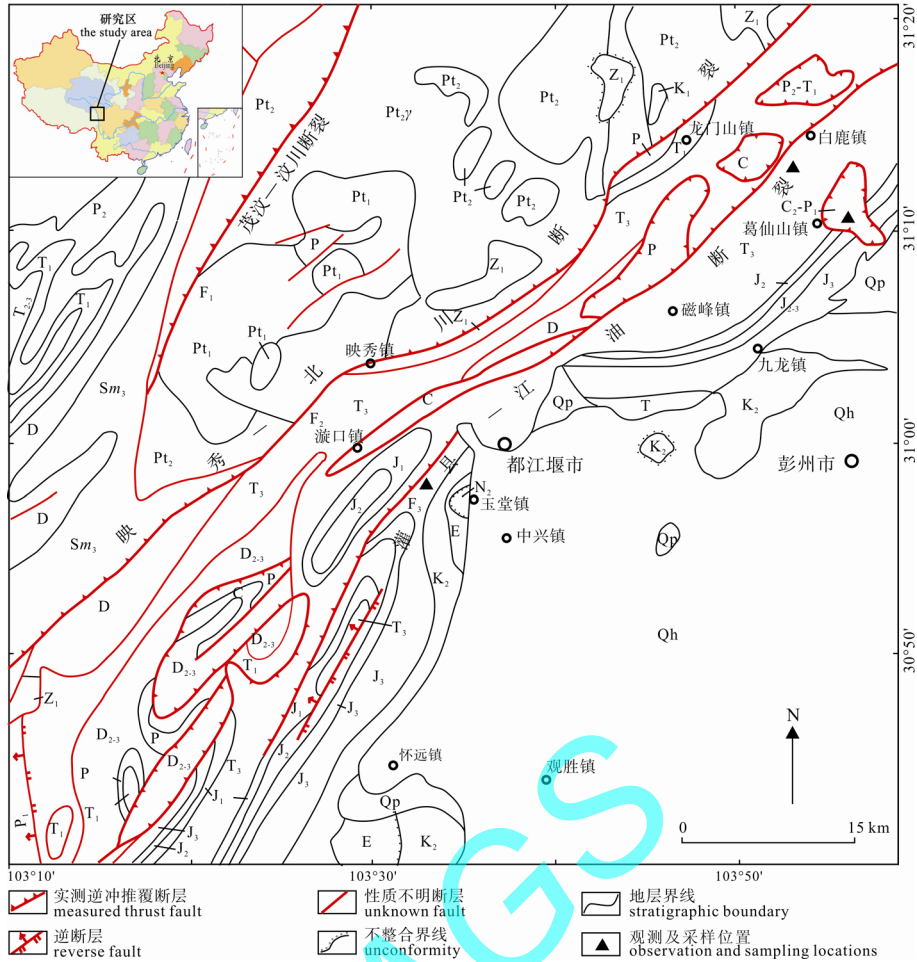


图 1 龙门山构造带中段地质简图

Fig. 1 Geological map of central Longmenshan tectonic belt

Pt₁-下元古界; Pt₂-中元古界; Pt_{2γ}-中元古代花岗岩; Z₁-下震旦统; Sm₃-志留系茂县群上岩组; D-泥盆系; D₂₋₃-中上泥盆统; C-石炭系; C₂-P₁-中石炭-下二叠统; P-二叠系; P₁-下二叠统; P₂-上二叠统; P₂-T₁-上二叠-下三叠统; T-三叠统; T₁-下三叠统; T₂₋₃-中上三叠统; T₃-上三叠统; J₁-下侏罗统; J₂-中侏罗统; J₂₋₃-中-上侏罗统; J₃-上侏罗统; K₁-下白垩统; K₂-上白垩统; E-古近系; N₂-新近系上统; Qp-更新统; Qh-全新统; F₁-茂汶-汶川断裂; F₂-映秀-北川断裂; F₃-灌县-江油断裂

Pt₁-Paleoproterozoic; Pt₂-Mesoproterozoic; Pt_{2γ}-Mesoproterozoic granite; Z-Lower Sinian; Sm₃-Silurian Upper Maoxian Rock Formation; D-Devonian; D₂₋₃-Middle-Upper Devonian; C-Carboniferous; C₂-P₁-Middle Carboniferous-Lower Permian; P-Permian; P₁-Lower Permian; P₂-Upper Permian; P₂-T₁-Upper Permian-Lower Triassic; T-Triassic; T₁-Lower Triassic; T₂₋₃-Middle-Upper Triassic; T₃-Upper Triassic; J₁-Lower Jurassic; J₂-Middle Jurassic; J₂₋₃-Middle-Upper Jurassic; J₃-Upper Jurassic; K₁-Lower Cretaceous; K₂-Upper Cretaceous; E-Paleogene; N₂-Upper Neogene; Qp-Pleistocene; Qh-Holocene; F₁-Maowen-Wenchuan fault; F₂-Yingxiu-Beichuan fault; F₃-Guanxian-Jiangyou fault

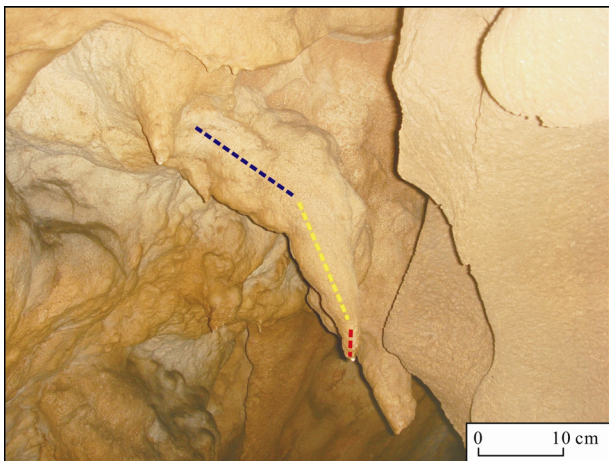


图 2 溶洞顶部石钟乳生长轴线偏折特征照片

Fig. 2 Photographs of deflected growth axis of stalactite on the top of the karst cave

垂直，在底部刚形成的石笋也存在相应的生长中心摆动现象。

1.3 玉堂镇龙凤沟溶洞

该溶洞发育在古近纪钙质胶结的砾岩中，洞体延断裂带发育，受地震破坏顶部已发生垮塌，但当

表 1 塘坝村南灰岩溶洞石钟乳统计一览表
Table 1 A statistic of stalactites in southern of Tangba county

编号	长度 /cm	直径 /cm	上部 倾伏向	中部 倾伏向	下部 倾伏向
1	100.0	30.0	110°∠60°	0°∠72°	铅直方向
2	120.0	50.0	240°∠80°	无	铅直方向
3	200.0	50.0	120°∠60°	5°∠80°	铅直方向
4	150.0	50.0	110°∠79°	折断	无
5	200.0	50.0	120°∠75°	折断	无
6	50.0	50.0	0°∠60°	无	铅直方向

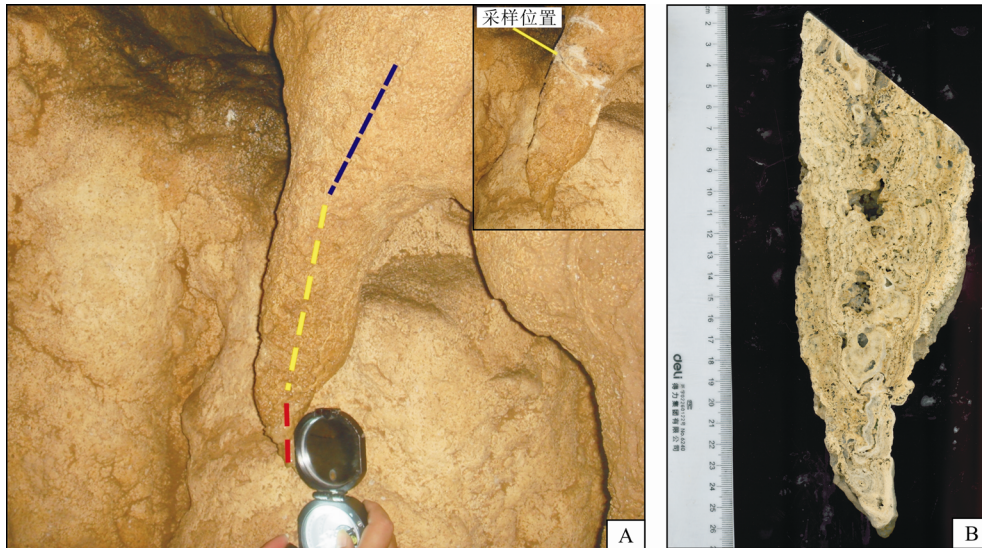


图 3 溶洞顶部偏转石钟乳及剖面照片
Fig. 3 Deflected stalactite on the top of the karst cave and its profile
 A-溶洞顶部发生偏转的石笋; B-石笋剖面
 A-deflected stalactite on the top of the karst cave; B-stalactite profile

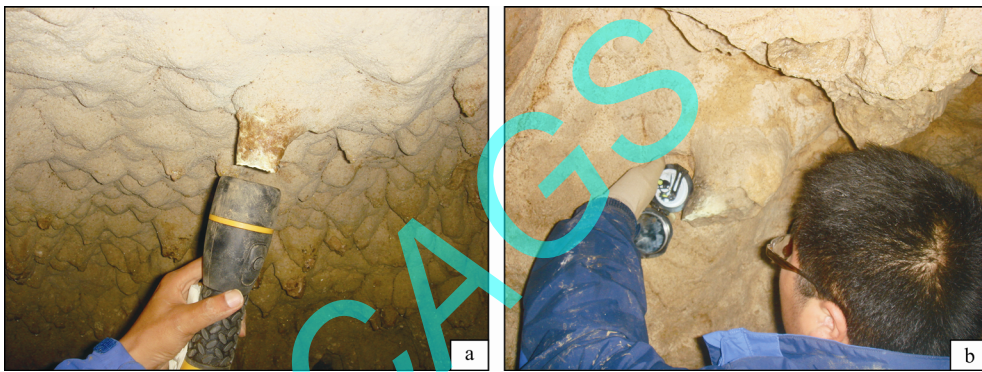


图 4 发生偏转的钟乳石遭后期折断
Fig. 4 Deflected stalactite was broken in the late period

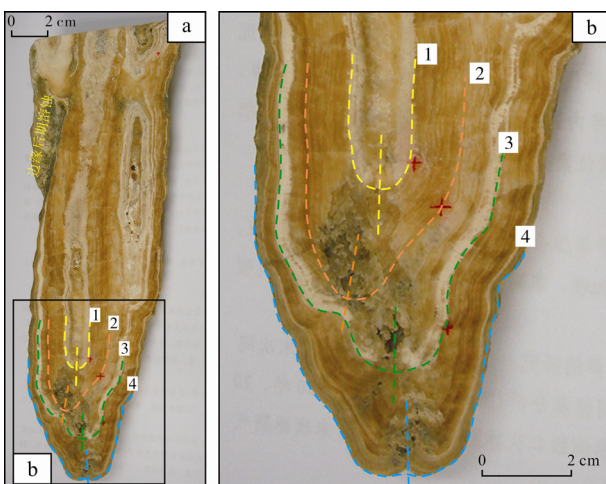


图 5 石钟乳剖面偏折及变化界面
Fig. 5 Deflected profile and variation interface of the stalactite

我们将这里获得的 3 号钟乳石沿纵向剖开后(图 5), 同样发现了石钟乳生长轴线的偏折, 在发生的 3 次偏折中第一次偏折的幅度最大, 后两次的变化幅度

逐渐减弱。随着石钟乳后期偏转角度逐渐加大, 在钟乳石上部迎水面发生了明显的溶蚀现象。样品中部存在过水通道, 但外侧生长纹层致密、清晰, 没有后期干扰现象。因此将这一样品分别在北京大学第四纪年代测定实验室及美国 Bata 实验室进行了 ^{14}C 同位素测年, 进而分析与其相关的构造活动的年代学特征。

2 石钟乳偏折的年代学测试

采用 AMS ^{14}C 测年方法对玉堂镇龙凤沟钟乳石样品无机碳酸钙进行了年代学测试。测年部位选择石钟乳出现 3 个偏折的界面位置, 表 2 给出了两个实验室测量的结果。从测量结果中可以发现, 由于 1 号测点临近石钟乳内部过水通道, 两次测年结果普遍较新, 其中北京大学实验室的测年结果显示 1 号测点年龄小于后期的 2 号测点, 而美国 Bata 实验室测试结果 1、2 号测点相差只有 30 a 左右, 表明石钟乳内部孔洞附近由于后期流水作用将导致局部

表 2 钟乳石 AMS¹⁴C 测年结果表
Table 2 Results of AMS¹⁴C dating of stalactites

测点号	测年结果 1			测年结果 2		
	年龄 /ka	误差 /a	间隔 /ka	年龄 /ka	误差 /a	间隔 /ka
1	19.81	±130	无	22.880	±100	无
2	21.81	±180	无	22.850	±100	无
3	19.30	±120	2.51	20.710	±80	2.14
4	17.10	±100	2.20	22.190	±90	无

注: 测年结果 1 在北京大学第四纪年代测定实验室测试; 测年结果 2 在美国 Beta 实验室测试。

样品受到干扰, 而使得测值偏新。两实验室 2、3 号测点结果均在 20 ka 左右, 反映了测试样品的可重复性以及结果的可靠性。由此可得出石钟乳 2、3 号突变界面之间存在 2.51 ka 或 2.14 ka 的时间间隔。4 号测点北京大学实验室测年结果为 17.10 ka, 与 3 号界面相差 2.2 ka。美国 BETA 实验室测年结果为 22.19 ka, 比 3 号界面年龄还大, 明显存在不协调现象, 怀疑样品受到污染所致。

3 成因及结果讨论

野外调查表明, 沿龙门山断裂带发育的溶洞石钟乳生长的偏折现象与断裂的构造活动密切相关, 而高精度的 AMS¹⁴C 测年结果则反映了该断裂活动存在着明显的周期性, 即在 21.81 ka(或 22.85 ka)左右龙门山断裂出现了强烈的构造活动, 造成沿断裂发育的溶洞顶面发生掀斜, 其上发育的石钟乳在短时间内发生倾斜, 其后构造活动处于一个平静期, 时间在 2.51 ka(或 2.14 ka)左右, 溶洞整体保持稳定, 石钟乳新生部分继续沿铅直方向稳定生长, 使后续石钟乳生长轴线与早期轴线发生偏离。在 19.30 ka(或 20.71 ka)龙门山断裂带在一次出现明显活动, 使得石笋生长轴线再次出现偏转, 只是偏转幅度小于前次变动。经过此次构造活动, 断裂带在其后的 2.2 ka 时间里又处于一个新的构造平静期, 至石钟乳结束沉积的 17.10 ka, 生长轴线一直保持稳定。而作为断裂活动的产物, 构造地震的发生也会存在同样的活动周期。

石钟乳生长轴线偏转所记录的时序特征为我们深入认识龙门山构造带的构造活动特征提供了难得的研究材料, 石钟乳偏折所反映的构造龙门山幕次周期活动特征与众多学者基于地震地质、探槽开挖和 GPS 数据估算出龙门山构造带的强震复发周期具有明显的一致性(李海兵等, 2008; 张培震等, 2008), 如地震地质滑动速率, 得出地震复发周期在 2233~4167 a 之间, 李勇等(2009)通过探槽研究, 认为龙门山断裂带单条断裂的强震复发周期在 2000~3000 a 之间。Burchfiel 等(2008)根据地震波反演的同震位移和 GPS 速率, 认为映秀—北川断裂上

8 级以上地震的复发间隔在 2000~10000 a 之间。而根据石钟乳变化结果, 可以获得构造活动的精确年龄。因此, 通过对不同时期洞溶钟乳石生长变化的研究, 可对龙门山断裂带的活动特征进行详细厘定。而另一方面, 如果认为石钟乳生长轴线的偏折是龙门山构造活动的结果, 那么构造带必将在偏折界面所在的年代发生持续活动, 并导致在构造活动期内产生一系列伴生的地震等构造活动现象。如 2008 年 5.12 汶川强烈地震后, 大量洞溶钟乳石的最新生长轴线依旧保持在铅直位置。这就为我们评价目前龙门山断裂的构造稳定性提出了挑战, 即汶川地震后, 龙门山地裂带将可能处于持续的活动状态, 并伴随一系列中、小地震产生。

4 结论

本文通过对龙门山构造沿线的溶洞石钟乳生长轴线变化调查及年代学分析, 探讨了其所揭示的龙门山断裂带活动的构造意义。

1) 野外调查表明, 沿龙门山构造发育的溶洞石钟乳及石笋的生长受断裂活动控制发生的明显的偏折和摆动现象, 为研究龙门山构造活动特征提供了难得的实际材料。

2) 钟乳石生长轴线的偏转及 AMS¹⁴C 测年结果表明, 龙门山构造带存在明显的周期性活动特征, 已有的测年结果反映龙门山构造带于 21.81 ka (或 22.85 ka)、19.3 ka (或 20.71 ka)处于构造活动期, 显示了构造的幕次活动特征, 幕次间隔期或周期为 2.14~2.5 ka。

3) 结合地震分析, 钟乳石生长揭示出石钟乳生长轴线的偏折是龙门山构造带在幕次活动期短期内发生持续构造活动的结果, 并导致在幕次构造活动期时段内伴生大量的地震活动。如果将汶川 8.0 级地震看作该断裂又一次进入活动期的标志, 则需要对该断裂的活动性及伴生地震进行持续关注。

致谢: 野外工作和室内分析期间得到了中国地质科学院地质力学研究所孙立循和韩同林研究员的全力支持和具体指导, 室内整理得到了中国地质科学院地质力学研究所张瑞丰教授级高级工程师和郭初笋工程师的热情帮助, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4): 389-403.
- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 张愷, 魏东涛, 沈扬. 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 9(3): 402-409.
- 贾秋鹏, 贾东, 朱艾澜, 陈竹新, 胡潜伟, 罗良, 张元元, 李一泉. 2007. 青藏高原东缘龙门山冲断带与成都平原的现今构

- 造表现: 数字地形和地震活动证据[J]. 地质科学, 42(1): 31-44.
- 李海兵, 王宗秀, 付小芳, 侯立玮, 司家亮, 邱祝礼, 李宁, 吴富晓. 2008. 2008年5月12日汶川地震(Ms 8.0)地表破裂带分布特征[J]. 中国地质, 35(5): 803-813.
- 李勇, 黄润秋, 周荣军, DENSMORE A L, ELLIS M A, 闫亮, 董顺利, RICHARDSON N, 张毅, 何玉林, 陈浩, 乔宝成, 马博琳. 2009. 龙门山地震带的地质背景与汶川地震的地表破裂[J]. 工程地质学报, 17(1): 405-417.
- 李勇, 周荣军, DENSMORE A L, ELLIS M A, 李永昭, 黎兵, 张毅. 2006a. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京: 地质出版社.
- 李勇, 周荣军, DENSMORE A L, ELLIS M A. 2006b. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 26(1): 40-51.
- 林茂炳, 吴山. 1991. 龙门山推覆构造带变形特征[J]. 成都地质学院学报, 18(1): 46-55.
- 唐力君, 王广, 王健, 王晓春, 刘舒波, 聂武. 2013. 汶川地震断裂带科学钻探工程一号孔主断层的随钻流体响应特征[J]. 地球学地球学报, 34(1): 95-102.
- 唐荣昌, 韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社: 368.
- 杨晓平, 蒋涛, 宋方敏, 梁小华, 陈献程, 邓忠文. 1999. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据[J]. 地震地质, 21(4): 341-345.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 冉勇康. 2008. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 51(4): 1066-1073.
- 张希, 王庆良, 唐红涛, 贾鹏. 2011. 汶川地震孕震背景与同震变化的铲形断层位错模拟[J]. 地球学报, 32(2): 189-194.
- its[J]. *Geology*, 33(4): 261-264.
- LI Hai-bing, WANG Zong-xiu, FU Xiao-fang, HOU Li-wei, SI Jia-liang, QIU Zhu-li, LI Ning, WU Fu-yao. 2008. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake(Ms 8.0) happened on May 12th, 2008[J]. *Geology in China*, 35(5): 803-813(in Chinese with English abstract).
- LI Yong, HUANG Run-qi, ZHOU Rong-jun, DENSMORE A L, ELLIS M A, YAN Liang, DONG Shun-li, RICHARDSON N, ZHANG Yi, HE Yu-lin, CHEN Hao, QIAO Bao-cheng, MA Bo-lin. 2009. Geological background of longmenshan seismic belt and surface ruptures in wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 405-417(in Chinese with English abstract).
- LI Yong, ZHOU Rong-jun, DENSMORE A L, ELLIS M A. 2006a. The geology of the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Yong, ZHOU Rong-jun, DENSMORE A L, ELLIS M A. 2006b. Geomorphic evidence for the Late Cenozoic strike-slipping and thrusting in longmen mountain at the eastern margin of the Tiben plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 40-51(in Chinese with English abstract).
- LIN Mao-bin, WU Shan. 1991. Deformational features of nappe structures in the longmenshan mountains[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 18(1): 46-55(in Chinese with English abstract).
- MORINAGA H, YONEZAWA T, ADACHI Y, INOKUCHI HIROO, GOTO H, YASKAWA K. 1994. The possibility of inferring paleoseismicity from paleomagnetic dating of speleothems, western Japan[J]. *Tectonophysics*, 230: 241-248.
- PAOLO F, DANIELE P. 1984. Seismotectonic and paleoseismic analyses using karst sediments[J]. *Marine Geology*, 55: 145-161.
- POSTPISCHL D, AGOSTINI S, FORTI P, QUINIF Y. 1991. Palaeoseismicity from karst sediments: the "Grotta del Cervo" cave case study (Central Italy)[J]. *Tectonophysics*, 193: 33-44.
- TANG Li-jun, WANG Guang, WANG Jian, WANG Xiao-chun, LIU Shu-bo, NIE Wu. 2013. Responding Features of Fluids during Drilling of the Main Fracture Zone in WFSD-1 Hole[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 95-102(in Chinese with English abstract).
- TANG Rong-chang, HAN Wei-bin. 1993. Active faults and earthquake in Sichuan[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YANG Xiao-ping, JIANG Pu, SONG Fang-min, LIANG Xiao-hua, CHEN Xian-cheng. 1999. The evidence of the south Longmenshan fault zones cutting Late Quaternary stratum[J]. *Seismology and Geology*, 21(4): 341-345(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Pei-zhen, XU Xi-wei, WEN Xue-ze, RAN Yong-kang. 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(4): 1066-1073(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xi, WANG Qing-liang, TANG Hong-tao, JIA Peng. 2011. The Simulation on Listric-fault Dislocation Background and Co-seismic Deformation of the Wenchuan Earthquake[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(2): 189-194(in Chinese with English abstract).

References:

- BURCHFIELD B C, ROYDEN L H, VAN DER H R D, HAGER B H, CHEN Z, KING R W, LI C, LÜ J, YAO H, KIRBY E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's republic of China[J]. *GSA Today*, 18(7): 4-11, doi:10.1130/GSATG18A.1.
- CADORIN J F, JONGMANS D, PLUMIER A, CAMELBEECK T, DELABY S, QUINIF Y. 2001. Modelling of speleothems failure in the Hotton cave (Belgium). Is the failure earthquake induced?[J]. *Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw*, 80(3-4): 315-321.
- DENG Qi-dong, CHEN She-fa, ZHAO Xiao-lin. 1994. Tectonics, seismicity and dynamics of longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, 16(4): 389-403(in Chinese with English abstract).
- JIA Dong, CHEN Zhu-xin, JIA cheng-zao, WEI Guo-qi, LI Ben-liang, ZHANG Qie, WEI Dong-tao, SHEN Yang. 2003. Structural Features of the Long men Shan Fold and Thrust Belt and Development of the Western Sichuan Fore land Basin, Central China. *Geological journal of China Universities*, 9(3): 402-409(in Chinese with English abstract).
- JIA Qiu-peng, JIA Dong, ZHU Ai-lan, CHEN Zhu-xin, HU Qian-wei, LUO Liang, ZHANG Yuan-yuan, LI Yi-quan. 2007. Active tectonics in the longmenthrust belt to the eastern Qinghai-Tibetan plateau and Sichuan basin: evidence from topography and seismicity[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 31-443(in Chinese with English abstract).
- KAGAN E J, AGNON A, BAR-MATTHEWS M, AYALON A. 2005. Dating large infrequent earthquakes by damaged cave depos-