

# 腾冲科学钻探孔非弹性应变恢复法三维地应力测量

王连捷<sup>1)</sup>, 崔军文<sup>2)</sup>, 孙东生<sup>1)</sup>, 赵卫华<sup>1)</sup>, 钱华山<sup>3)</sup>

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;  
3) 北京超算科技有限公司, 北京 100085

**摘 要:** 用非弹性应变恢复法(简称 ASR 法)进行了腾冲科学钻探孔地应力测量。基于岩芯测量的 ASR 法是近年来发展起来的深部三维地应力测量的一种经济实用的新方法。使用该方法进行了 720 m 至 1098 m 深处的三维地应力测量, 获得了该深度范围的地应力状态。测量结果表明: 最大和中间主应力近于水平, 最小主应力近于铅直。最大水平主应力方向为 30°到 45°。测量结果与地震机制解进行了对比。对比表明, ASR 法得到的结果与地震机制解非常吻合。应力状态有利于高角度断层产生走滑运动, 低角度断层产生逆冲运动。这与腾冲地区的地震断层活动性质一致。测量结果对地震机理的研究有意义。

**关键词:** 地应力测量; 非弹性应变恢复; 腾冲科学钻; 震源机制解

中图分类号: P553; P315.727 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.01.11

## Determination of Three-dimensional in Situ Stresses by Anelastic Strain Recovery in Tengchung Scientific Drilling Hole

WANG Lian-jie<sup>1)</sup>, CUI Jun-wen<sup>2)</sup>, SUN Dong-sheng<sup>1)</sup>, ZHAO Wei-hua<sup>1)</sup>, QIAN Hua-shan<sup>3)</sup>

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;*  
2) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*  
3) *Beijing Sup-compute Technology Co., Ltd., Beijing 100085*

**Abstract:** Three-dimensional in-situ stress is measured by anelastic strain recovery method (ASR) in Scientific Drilling well in Tengchong of Yunnan province. ASR method is an economic and practical new method, which is developed for three-dimensional in-situ stress measurement at great depth in recent years. In-situ stress state is obtained in depth from 720 m to 1098 m by ASR method. The results of measurement show that the maximum and intermediate principal stress is nearly horizontal, and the minimum principal stress is nearly vertical. The direction of the maximum horizontal stress is from 30° to 45°. Measurement results by ASR are compared with the focal mechanism solution. Comparison shows that the results by ASR are in good agreement with focal mechanism solutions. The stress state is conducive to strike slip movement for high-angle faults and to thrust movement for low-angle faults. This stress state is consistent with activity nature of earthquake faulting in Tengchong area. The results are meaningful for study in earthquake mechanism in Tengchong area.

**Key words:** In-situ stress measurement; anelastic strain recovery; scientific drilling well in Tengchong; focal mechanism solutions

云南腾冲科学钻探孔位于印度板块与欧亚大陆碰撞前缘怒江断裂带东侧的腾冲地块, 区内有强烈的火山, 热构造和地震活动。开展腾冲科学钻探钻孔的地应力测量, 查明地应力状态, 对火山和地震活动的研究具有重要意义。

我们用非弹性应变恢复法进行了腾冲科学钻探孔深部的地应力测量。获得了 720 m 至 1098 m 深度范围的应力状态和分布规律。为阐明腾冲火山-地热区的构造应力场特征, 研究腾冲地区火山和地震活动提供了地应力依据。

基于岩芯测量的非弹性应变恢复法(简称 ASR 法)是近年来发展起来的深部三维地应力测量的一种新方法。ASR 法首先由 Voight(Voight, 1968)提出,并由 Teufel(Teufel, 1983)进行了一些实用性研究和进一步的发展。但他们考虑的是二维问题。Matsuki(Matsuki, 1991)将其发展为三维问题。近年来,ASR 法逐渐被应用于实际的深部三维地应力测量中(Matsuki, 1993; Weiren, et al., 2007; Lin et al., 2008)。汶川 5.12 大地震后,我国大陆首次应用 ASR 法进行了汶川地震断裂带科学钻的地应力测量(崔军文等, 2013; 孙东生等, 2013; Cui, 2014)。本文是我国大陆又一次用该方法进行的深部地应力测量。

本文对 ASR 法进行了简述,对腾冲科学钻探钻孔的地应力测量结果进行了分析,并与震源机制解进行了对比。ASR 法的测量结果与震源机制解很一致。所获得的地应力状态与该区地震断层活动性质相协调。

## 1 地应力测量方法

ASR 法是基于岩芯非弹性应变恢复测量的一种深部应力测量的新方法。其原理是基于岩石的流变性。岩石是一种黏弹性体,具有流变性(耶格等, 1981; 尹祥础, 1985)。当岩芯被钻出后,即脱离应力场的作用,岩芯卸荷,首先发生弹性应变恢复,随后发生非弹性(滞弹性)应变恢复,根据岩芯非弹性应变恢复量,可以确定三维原地应力状态。

由钻孔中取出的带有定向标志线的岩芯(定向标志线是用于岩芯定向的。为了获得主应力方向,需进行岩芯定向。定向方法有多种,本文用古地磁方法定向),经清洗后,将应变计粘贴在岩芯表面。至少在 6 个方向粘贴应变片。图 1 是在 9 个方向( $a_1$  到  $a_9$ )粘贴应变片的一种布置,每个方向有两个应变计。共有 18 个应变计,即 C1, C2...C18。

用 6 个方向的非弹性应变恢复的观测值可以求出非弹性应变分量,主应变(包括主应变的大小,方位和倾角)。若多于 6 个方向的观测值,则通过最小二乘法进行计算。

由主应变进而求出非弹性主应变偏量  $e_{ai}(t)$  和非弹性体应变  $\varepsilon_m(t)$ 。当已知非弹性恢复柔量时,由下式可求出主应力(Matsuki, 2008):

$$\sigma_i = \frac{e_{ai}(t)}{J_{as}(t)} + \frac{\varepsilon_m(t)}{J_{av}(t)} + p_0 \quad (1)$$

$\sigma_i$  为三个主应力( $i=1, 2, 3$ )。

$p_0$  为孔隙压力;  $J_{av}(t)$  和  $J_{as}(t)$  分别为体积模式和剪切模式的非弹性恢复(ASR)柔量。

非弹性恢复柔量可由实验室实验求得(孙东生等, 2014; Gao, 2014),也可以近似地认为

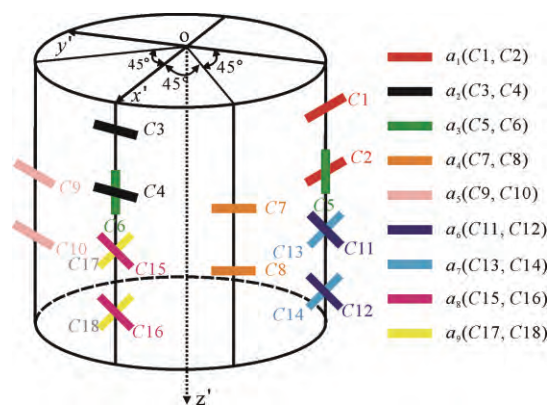


图 1 岩芯表面应变计的布置(王连捷等, 2012)

Fig. 1 The layout of strain gauges on the surface of a rock core (WANG et al., 2012)

$\frac{J_{as}(t)}{J_{av}(t)} = 2$ , 进而由铅直应力求得恢复柔量(Lin et al., 2006)。铅直应力可表示为:

$$\sigma_v = \left\{ \left[ l_p^2 e_{a1}(t) + m_p^2 e_{a2}(t) + n_p^2 e_{a3}(t) \right] / 2 + e_{am}(t) \right\} / J_{av}(t) + p_0 \quad (2)$$

式中:  $l_p, m_p, n_p$  为铅直应力与三个应变主轴之间的方向余弦。

铅直应力又可按上覆岩层的重量计算:

$$\sigma_v = \rho gh \quad (3)$$

如果已知测量深度  $h$ , 从地表到测量深度的平均密度  $\rho$  及重力加速度  $g$ , 则  $\sigma_v$  可由式(3)求出。再由式(2)求出  $J_{av}(t)$ , 进而求出  $J_{as}(t)$ 。

## 2 腾冲科学钻地应力测量

### 2.1 腾冲科学钻孔简况

腾冲科学钻位于云南省腾冲县以北约 20 km 处(图 4), 是火山、地热、地震活动区。钻孔深度 1300 m。对 720 m 至 1098 m 深度, 5 个岩心样品(样品长度 10~20 cm)进行了测量, 获得了该深度的三维地应力状态。

### 2.2 非弹性应变恢复曲线

来自深度 720 m 至 1098 m 岩心样品的典型非弹性应变恢复曲线如图 2a。该曲线进行了拟合平滑处理, 所以曲线光滑。连续观测近 7 天。曲线符合非弹性应变恢复的变化规律。曲线的变化量达 50~600 多微应变, 超过仪器测量误差, 满足测量要求。

由 9 个方向应变观测曲线使用前面叙述的方法计算出三个非弹性主应变( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ )和平均主应变( $\varepsilon_m$ ), 如图 2b 所示。

### 2.3 主应力的方位和倾角

三维最大主应力的方向为北东  $32^\circ \sim 52^\circ$ , 倾角小于  $32^\circ$ , 最大和中间主应力近水平。最小主应力近铅直如表 1。水平最大主应力的方向为  $30^\circ \sim 45^\circ$ ,

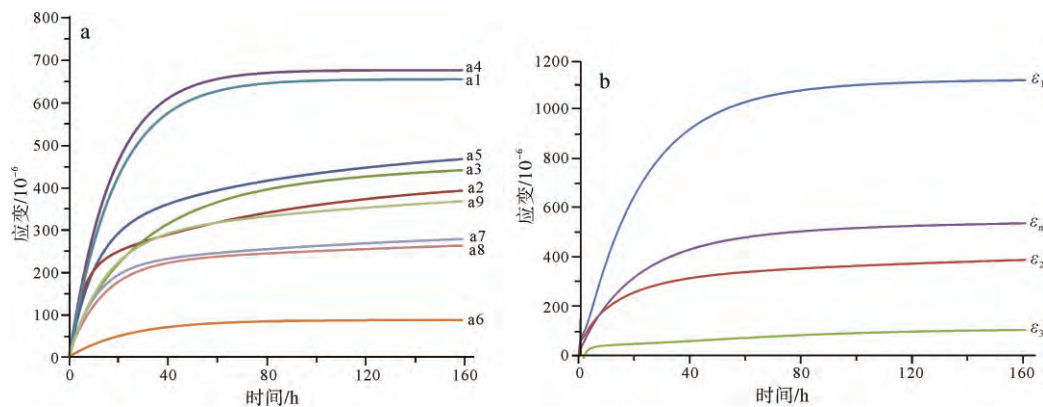


图 2 TC5 号样品非弹性应变恢复曲线  
Fig. 2 Anelastic strain recovery curves from Sample TC5  
a-9 个方向的非弹性应变恢复观测曲线; b-非弹性主应变恢复曲线

a-anelastic strain recovery curves of measured nine directions from Sample TC5; b-anelastic principal strain curves

表 1 主应力的方位和大小  
Table 1 Azimuth and magnitude of principal stress

样品号	深度/m	三维主应力									铅直应力大小 /MPa	水平主应力			
		方位和倾角/°						大小/MPa				大小/MPa	S <sub>H</sub> 方位 /°		
		S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>		S <sub>3</sub>		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>V</sub>			大小/MPa	
		方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角							S <sub>H</sub>	S <sub>h</sub>
TC-3	720	216	16	124	6	15	73	28	20	16	18.7	27	17	35	
TC-5	970	32	32	300	2	207	58	35.4	28.6	21.2	25.2	32.6	28	35	
TC-7	1020	223	2	313	19	130	71	37	27	25	26.5	36	25	43	
TC-8	1070	52	15	147	17	284	69	37.6	32	27	27.8	37.4	31	45	
TC-9	1098	210	26	112	17	352	58	38	31	26.4	28.5	37	28.1	30	

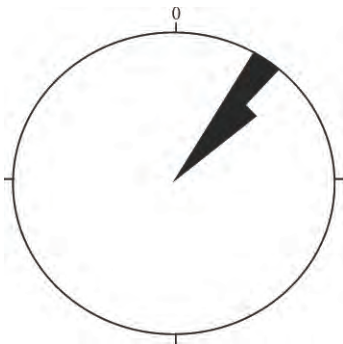


图 3 水平最大主应力的方向  
Fig. 3 Azimuth of horizontal maximum principal stress by ASR

优势方位 35°，如表 1 及图 3。

2.4 主应力方向与地震机制解的比较

图 4 给出了 ASR 得到的最大水平主应力方向和地震机制解的  $p$  轴方位的分布。可以看出，ASR 得到的水平最大主应力方向与地震机制解的  $p$  轴方向是很一致的。文献(王绍晋和龙晓帆, 2000)指出，腾冲火山区强震和中小地震震源机制解的  $P$  轴方向大多数为北北东—北东向，仰角多数小于 30，接近水平。这与本文结果一致。

不但最大水平主应力方向和地震机制解的  $p$  轴方位很一致，而且 ASR 的三个主应力空间方位(包括倾角)与地震机制解的三个轴( $P$  轴,  $T$  轴和  $N$  轴)



图 4 最大水平主应力方向与震源机制解的  $p$  轴方向比较( $p$  轴方向据吴中海等, 2013 修改)  
Fig. 4 The horizontal maximum principal stress from ASR And P-axis of focal mechanism solutions (P-axis is from WU et al., 2013)

的空间方向和倾角也有较好的一致性，如图 5 所示。

图 5 为三个主应力轴和地震机制解三个轴的下半球投影。可以看出， $\sigma_1$  与  $P$  轴， $\sigma_2$  与  $T$  轴， $\sigma_3$  与  $N$  轴相对应。也就是 ASR 得到的三个主应力与地震机制解的三个主轴在空间方位上有较好的一致性。



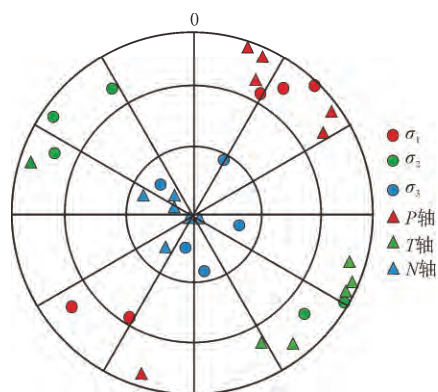


图 5 ASR 得到的三个主应力方位和倾角与地震机制解三个轴的方位和倾角的比较

(地震机制解据中国地震台网中心, 2014)

Fig. 5 Azimuth and dip angle of principal stress by ASR and principal axis of focal mechanism solutions (focal mechanism solutions is from China Earthquake Network Center, 2014)

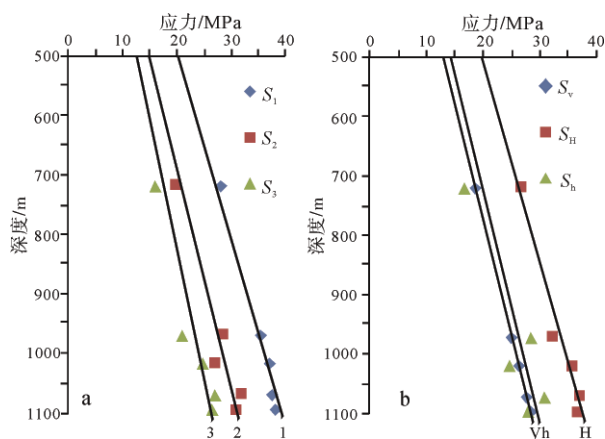


图 6 三维主应力随深度的变化

Fig. 6 The changes with depth of the in-situ stresses

a-三维主应力随深度的变化( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ 分别为最大, 中间和最小主应力, 标有 1, 2, 3 的直线为拟合直线); b-水平应力随深度的变化( $S_H$ ,  $S_h$ ,  $S_v$ 分别为水平最大, 水平最小主应力和铅直应力; 标有 H, h, V 的直线分别为  $S_H$ ,  $S_h$ ,  $S_v$ 的回归线)

a-the changes with depth of the three-dimensional principal stresses ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  are maximum and intermediate and minimum principal stresses and the straight lines labeled as 1, 2, 3 show the regression lines); b-the changes with depth of the horizontal principal stresses ( $S_H$ ,  $S_h$ ,  $S_v$  are the maximum and minimum horizontal stresses and the vertical stress respectively and the straight lines labeled H, h, V show the regression lines)

## 2.5 主应力的大小

在 720 m 和 1098 m 深度之间, 最大主应力在 28~38 MPa 之间; 中间主应力在 20~32 MPa 之间; 最小主应力在 16~27 MPa 之间。水平最大主应力  $S_H$  在 27~37.4 MPa 之间; 水平最小主应力  $S_h$  在 17~31 MPa 之间。图 6a 为三维主应力大小随深度的变化, 图 6b 为水平主应力大小随深度的变化。可以看出他们都随深度近于线性增加。

主应力随深度变化的拟合方程和相关系数为:

最大主应力:  $S_1 = 0.0319H + 4$ ,  $R^2 = 0.96$ ;

中间主应力:  $S_2 = 0.0257H + 2.5$ ,  $R^2 = 0.89$ ;

最小主应力:  $S_3 = 0.0218H + 2$ ,  $R^2 = 0.88$ ;

水平最大主应力:  $S_H = 0.0295H + 5$ ,  $R^2 = 0.92$ ;

水平最小主应力:  $S_h = 0.025H + 0.7$ ,  $R^2 = 0.80$ ;

铅直应力:  $\sigma_v = 0.026H$ 。

铅直应力由上覆岩层重量得出。

由图 6b 可以看出, 水平与铅直应力的关系为  $S_H > S_h \approx S_v$ 。这种应力状态有利于高角度断层发生走滑运动和低角度断层发生逆冲活动。与该区的地震断层活动性质一致。该区大多数地震断层倾角大于 60, 为高角度走滑断层, 地震多为右旋走滑断层错动。有部分地震断层倾角小于 45, 较为平缓, 为逆冲断层活动(王绍晋和龙晓帆, 2000)。这与该区应力状态是协调的。

## 3 结论

(1)ASR 法得到的三维最大和中间主应力近于水平, 最小主应力倾角近于铅直。水平最大主应力方向为  $30^\circ \sim 45^\circ$ , 优势方位为  $35^\circ$ 。

(2)在 720 m 至 1098 m 的深度, 三维最大主应力为 28~38 MPa 之间。水平最大主应力  $S_H$  为 27~37.4 MPa 之间。应力大小随深度近于线性增加。应力的关系为  $S_H > S_h \approx S_v$ 。这种应力状态有利于高角度断层发生走滑运动和低角度断层发生逆冲活动。这与该区的地震断层活动性质一致。

(3)水平最大主应力方向与震源机制解 P 轴方位一致。三个主应力的空间方位和倾角与地震机制解的三个轴有较好的对应关系。

(4)腾冲火山区应力场与印度板块和亚欧板块的碰撞形成的北北东—北东向应力场一致。应力场的研究对该区火山及地震活动研究以及工程建设有意义。

致谢: 对日本高知岩心研究所林为人教授在 ASR 方法方面的帮助, 首席科学家许志琴院士的帮助一并表示感谢。

## Acknowledgements:

This study was supported by the Science and Technology Project (No. Sinoprobe-05-07) and National Natural Science Foundation of China (No. 41404080).

## 参考文献:

- 崔军文, 李宗凡, 王连捷, 林为人, 王薇, 孙东生, 高露, 钱华山. 2013. 汶川地震断裂带科学钻探 1 号孔(WFSD-1)非弹性应变恢复法(ASR 法)三维地应力测试与“5.12”汶川地震的形成机理[J]. 岩石学报, 29(6): 2033-2047.
- 孙东生, LIN W, 崔军文, 王红才, 陈群策, 马寅生, 王连捷. 2014. 非弹性应变恢复法三维地应力测量—汶川地震科学钻孔中的

应用[J]. 中国科学: 地球科学, 44(3): 510-518.

孙东生, 林为人, 王连捷, 崔军文, 王薇, 黄尧. 2013. 汶川地震断裂带科学钻一号孔 ASR 法地应力测量[J]. 中国地质, 40(3): 840-845.

王绍晋, 龙晓帆. 2000. 腾冲火山地区地震构造应力场研究[J]. 地震研究, 23(2): 172-178.

吴中海, 李贵书, 毛晓长, 尹福光, 翟刚毅, 张虎. 2013. 泛亚铁路云南大理至瑞丽沿线基础地质与主要工程地质问题[M]. 北京: 地质出版社: 1-467.

耶格 J C, 库克 N G W. 1981. 岩石力学基础[M]. 中国科学院工程力学研究所(译). 北京: 地震出版: 1-690.

尹祥础. 1985. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社: 1-512.

中国地震台网中心. 2014. 地震数据管理与服务系统[OL/DB]. [2014-08-28]. <http://www.cnsdmc.ac.cn>.

## References:

- CUI Jun-wen, LI Zong-fan, WANG Lian-jie, LIN Wei-ren, WANG Wei, SUN Dong-sheng, GAO Lu, QIAN Huan-shan. 2013. Determination of Three-dimensional in-situ Stresses from Anelastic Strain Recovery (ASR) of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1) and Formation Mechanism of the "5.12" Wenchuan Earthquake[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2033-2047(in Chinese with English abstract).
- JAEGER J C, COOK N G W. 1981. *Fundamentals of Rock Mechanics*[M]. Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences (Translated). Beijing: Seismological Press: 1-690(in Chinese).
- CUI Jun-wen, LIN Wei-ren, WANG Lian-jie, GAO Lu, HUANG Yao, WANG Wei, SUN Dong-sheng, LI Zong-fan, ZHOU Chun-jing, QIAN Hua-shan, PENG Hua, XIA Ke-mei, LI Ke. 2014. Determination of Three-dimensional in situ Stresses by Anelastic Strain Recovery in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1)[J]. *Tectonophysics*, 619-620: 123-132.
- GAO Lu, LIN Wei-ren, SUN Dong-sheng, WANG Hong-cai. 2014. Experimental Anelastic Strain Recovery Compliance of Three Typical Rocks[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 47: 1987-1995.
- LIN Wei-ren. 2008. A Core-based Method to Determine Three-dimensional IN-SITU Stress In deep Drilling Wells: Anelastic Strain Recovery Technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(12): 2287-2294.
- LIN Wei-ren, KWAŚNIEWSKI M, IMAMURA T, MATSUKI K. 2006. Determination of Three-dimensional in-situ Stresses from Anelastic Strain Recovery Measurement of Cores at Great Depth[J]. *Tectonophysics*, 426(1/2): 221-238.
- LIN Wei-ren, YE H En-Chao, ITO H, HIRONO T, SOH W, WANG Chien-ying, MA Kuo-fong, HUNG Jih-hao, SONG Sheng-rong. 2007. Preliminary Results of Stress Measurement by Using Drill Cores of TCDP Hole-A: An Application of Anelastic Strain Recovery Method to Three-dimensional in-situ Stress Determination[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 18(2): 379-393.
- MATSUKI K. 1991. Three-dimensional in-situ Stress Measurement with Anelastic Strain Recovery of a Rock Core[C]. WITTKE W. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics*. Aachen: 557-560.
- MATSUKI K, TAKEUCHI K. 1993. Three-dimensional in-situ Stress Determination by Anelastic Strain Recovery of a Rock Core[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30(7): 1019-1022.
- MATSUKI K. 2008. Anelastic Strain Recovery Compliance of Rocks and its Application to in situ Stress Measurement[J]. *Int. J Rock Mech Min Sci*, 45: 952-965.
- SUN Dong-sheng, LIN Wen-ren, WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, WANG Wei, YAO Huang. 2013. In-situ Stress Measurement by the Anelastic Strain Recovery Method in WFSD-1[J]. *Geology in China*, 40(3): 840-845(in Chinese with English abstract).
- SUN Dong-sheng, LIN Wen-ren, CUI Jun-wen, WANG Hong-cai, CHEN Qun-cen, MA Yin-sheng, WANG Lian-jie. 2013. Three-Dimensional In situ Stress Determination by Anelastic Strain Recovery and its application in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1[J]. *Science China*, 44(3): 510-518(in Chinese with English abstract).
- TEUFEL L W. 1983. Determination of in-situ Stress from Anelastic Strain Recovery Measurements of Oriented Core[C]//*Rock Mechanics in Productivity and Protection-the 25th Symposium on Rock Mechanics*. Denver, USA: 421-430.
- VOIGHT B. 1968. Determination of the Virgin State of Stress in the Vicinity of a Borehole from Measurements of a Partial Anelastic Strain Tensor in Drill Cores[J]. *Felsmechanik u. Ingenieurgeologie*, 6: 201-215.
- WANG Lian-jie, SUN Dong-sheng, LIN Wei-ren, CUI Jun-wen, PENG Hua, GAO Lu, WANG Wei, TANG Zhe-min, QIAO Zi-jing. 2012. Anelastic Strain Recovery Method to Determine in-situ Stress and Application Example[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1674-1661(in Chinese with English abstract).
- WANG Shao-jin, LONG Xiao-fan. 2000. Study on Tectonic Stress Field in Tengchong Volcanoareas[J]. *Journal of Seismological Research*, 23(2): 172-178(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, LI Gui-shu, MAO Xiao-chang, YIN Fu-guang, ZHAI Gong-yi, ZHANG Hu. 2013. Basic geology and the Main Engineering Geological Problems Along Pan Asia Railroad from Dali to Ruili in Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-467(in Chinese with English abstract).
- YIN Xiang-chu. 1985. *Solid Mechanics*[M]. Beijing: Earthquake Press(in Chinese).