

前陆冲断构造带地应力响应特征 及其对油气分布的影响

赵军¹, 彭文², 李进福³, 王贵文⁴, 李军⁵

1. 西南石油学院石油工程学院, 四川成都 610500

2. 西南财经大学, 四川成都 610072

3. 塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000

4. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

5. 长江大学资源与环境学院, 湖北荆州 434102

摘要: 我国中西部地区前陆盆地山前逆冲构造带挤压应力异常强烈。强烈的构造应力不仅改变了储层的性质, 而且还直接控制着油气的聚集和分布。研究发现, 泥岩对地应力的响应十分灵敏, 通过泥岩的测井响应可建立对地应力进行定量评价的方法, 计算结果与实验结果进行了对比, 表明该方法具有较好的可靠性。在对单井地应力分析的基础上, 确定了地应力的分布, 研究了地应力对储层物性的影响, 并分析了地应力与构造样式的关系, 为前陆盆地山前构造带的油气勘探与评价提供了新的思路与方法。

关键词: 前陆冲断带; 挤压应力; 测井响应; 储层; 油气分布; 定量评价。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2005)04-0467-06

收稿日期: 2004-12-12

In-Situ Stress Logging Responding Characteristics of Piedmont Thrust Belt and Its Influence on Hydrocarbon Distribution

ZHAO Jun¹, PENG Wen², LI Jin-fu³, WANG Gui-wen⁴, LI Jun⁵

1. Faculty of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum Institute, Chengdu 610500, China

2. South-Western University of Finance and Economics, Chengdu 610072, China

3. Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

4. Faculty of Earth Sciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

5. Faculty of Resource and Circumstance, Yangtze University, Jingzhou 434102, China

Abstract: Compressive tectonic stress is extremely strong in the piedmont thrust belt of the median-west of China. The strong tectonic stress not only changes the reservoir properties but also directly controls hydrocarbon accumulation and distribution. The characteristics of shale, particularly shale resistance, can easily reflect the state of terrestrial stress. This characteristic can be used to evaluate the stress quantitatively, which was proved to be reliable by a comparison of the data from an acoustic emission experiment. Based on the in-situ stress analysis of many wells, in-situ stress distribution has been determined. The effect of terrestrial stress on reservoir property was studied and the relation of local terrestrial stress with structural styles was analyzed. Results show that the high-quality reservoir always coincides with relatively low terrestrial stress belts.

Key words: piedmont thrust belt; compressive stress; logging response; reservoir; hydrocarbon distribution; quantitative evaluation.

前陆盆地是世界上油气最富集的一类盆地. 据统计,其拥有的石油可采储量占世界大油田石油总可采储量的 63.8%,天然气为 32.3%(李志明和张金珠,1997). 在我国,前陆盆地主要分布在中西部地区. 近年来,我国前陆盆地山前构造带的油气勘探受到了高度重视,并取得了一系列重大发现. 这些地区构造挤压应力十分强烈,对油气藏的形成与保存产生了很大的影响. 对应力场的研究,有助于揭示油气分布规律,预测油气富集区(贾承造等,2000;康竹林和翟光明,1995). 本文以库车前陆冲断带为例,研究了地应力的地球物理响应特征,并在此基础上对地应力进行了定量计算,确定了地应力分布规律,研究了地应力纵横向非均质性对储、盖层与油气分布的控制作用.

1 前陆冲断带地应力响应特征

塔里木盆地库车前陆山前构造带为强挤压应力区,冲断变形十分强烈,形成了各种复杂的推覆构造样式(图 1). 在这些构造带中,泥岩对地应力的响应十分灵敏,强烈的挤压应力所造成的异常压力在地球物理测井上具有明显的响应特征(Aoback *et al.*, 1985). 在正常压实条件下泥岩的声波时差和电阻率随深度呈指数变化(真柄钦茨,1981),其表达式为:

$$x = x_0 e^{-cz}$$

式中: x 在正常压实深度 z 处的声波时差或电阻率; z 地层深度; x_0 地表处的声波时差或电阻率; c 常数. 反映在单对数坐标图上为一条直线,这就是所谓的正常压实趋势线. 当岩石受到强的挤压应力作用时,将使电阻率和声波时差偏离正常趋势线,电阻率向增阻方向偏移,声波时差往低值方向偏移. 偏移幅度越大,构造挤压作用越强. 图 2 是库车前陆盆地克拉构造上的一口井的地应力响应特征图. 从图上可看出:在地应力集中的泥岩段中,泥岩的电阻率或声波

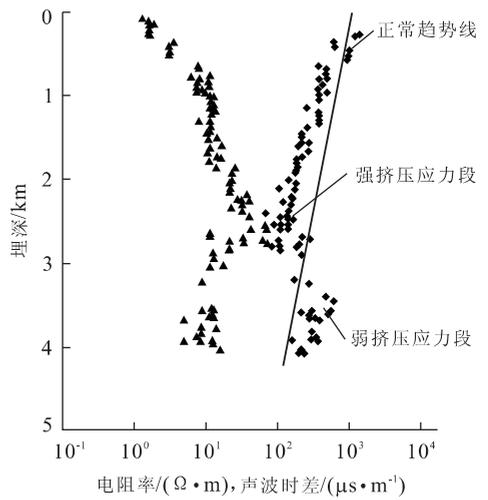


图 2 库车前陆构造带地应力测井响应

Fig. 2 In-suit stress logging responses in Kuqa foreland

时差能灵敏地反映挤压应力强弱的变化. 在强挤压带电阻率增大而声波时差变小;而在弱挤压或张性应力带电阻率和声波时差的变化规律则与之相反.

2 地应力定量评价方法

对山前构造区地应力进行定量计算的基本方法是:在稳定构造地区(即构造挤压应力较弱的地区,如前陆盆地隆起过渡带等)选取厚层泥岩段,之所以选取泥岩是因为泥岩沉积相对稳定,且对地应力反应敏感;统计该泥岩段的测井信息(R_t, D_t 等)与最大地应力(压力)之间关系,建立估算地应力的定量数学模型;然后,利用泥岩声发射实验(Yoshikawa and Mogik, 1990;丁原辰等,1997)(Kaiser 实验)确定的原地应力大小与计算的应力进行对比,完善定量计算的数学模型. 在前陆挤压构造应力带,这种地应力计算方法简单、连续且计算精度能达到实用的要求. 表 1 列出了计算的地应力与实验测量地应力对比情况,两者具有较好的一致性.

3 山前构造应力带对储层物性的影响

山前构造带影响储层物性的地质因素有很多,但地应力是最重要的影响因素之一. 从克拉 2 井到依南 2 井再到依南 4 井,其储层的物性差异很大,造成这种差异的主要原因就是各井所处构造部位的地应力不同.

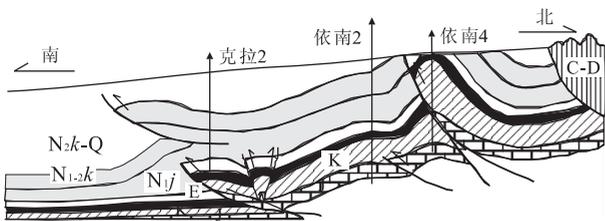


图 1 塔里木盆地库车前陆构造示意

Fig. 1 Schematic section of Kuqa foreland in Tarim basin

表 1 库车凹陷山前地区测井地应力与实测地应力对比

Table 1 Comparison of calculated and experimental stress results in Kuqa depression

井名	深度/ m	电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	声波时差/ ($\mu s \cdot m^{-1}$)	测井计算最大主应力/ MPa	实验分析最大主应力/ MPa	相对误差/ %
克拉 A	3 860	1.4	266	85.95	86.0	0.058
克拉 A	4 020	2.0	266	85.95	88.0	2.330
克拉 A	4 045	1.3	256	90.36	88.0	2.680
克拉 A	4 175	2.6	246	74.94	90.0	5.480
克拉 A	4 275	2.7	246	94.94	92.0	3.200
克拉 B	3 629	3.2	263	86.80	89.7	3.200
克拉 B	3 988	6.0	220	108.10	105.3	2.600
克拉 B	3 992	6.0	220	102.90	97.0	6.080
克拉 C	4 358	10.0	207	115.30	112.3	2.680

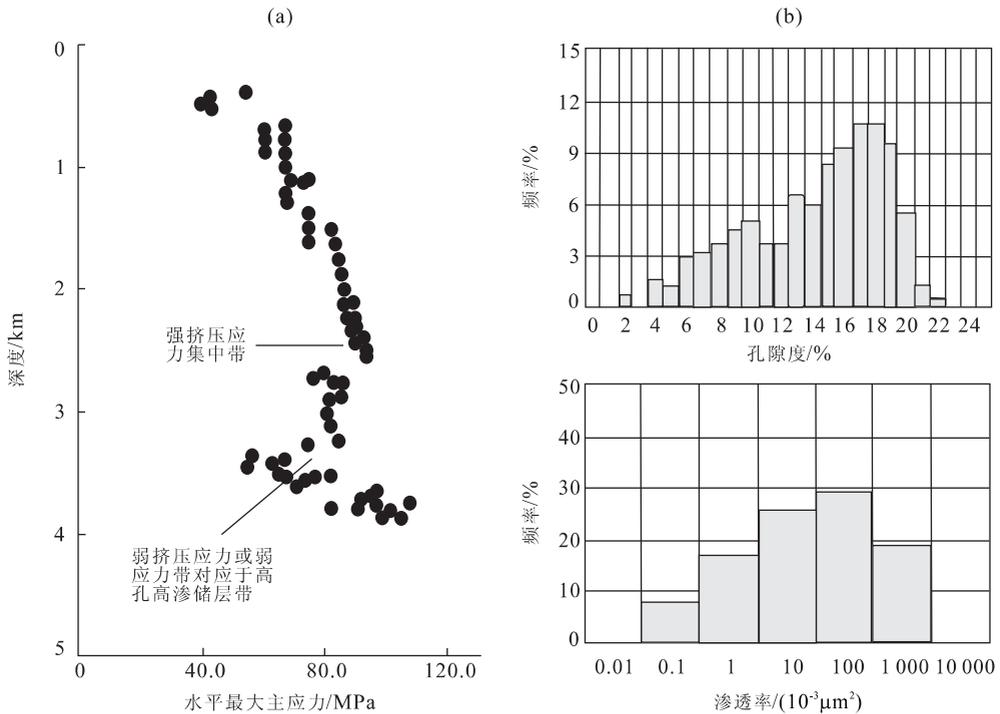


图 3 克拉 2 井地应力分布及其储层物性特征

Fig. 3 Distribution of terrestrial-stress and reservoir parameters in Kela 2 well

(1) 挤压背景下相对低地应力区有利于原生孔隙的保存. 图 3a 给出克拉 2 井计算的地应力分布, 显示了在强挤压应力背景下存在一个相对较低的应力区, 该低地应力区对应于大型气藏发育区(克拉 2 气田). 1 500~3 100 m 井段为强挤压带, 地应力一般为 70~80 MPa, 局部达 120 MPa 以上; 3 100~4 000 m 井段地应力相对较低, 一般为 45~55 MPa, 与此相对应形成了高孔高渗储层. 图 3b 为相应层段孔隙度、渗透率分布图, 孔隙度分布范围在 8%~20% 之间, 渗透率分布范围在 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1\,000 \times 10^{-3} \mu m^2$, 储层物性好, 孔隙类型基本属于原生粒间孔隙.

(2) 挤压应力环境下高应力区使储层物性变差. 与克拉 2 井相比, 依南 2 井区承受的挤压应力更强烈(图 4a), 地应力一般达 70~120 MPa, 而且在强挤压背景下不存在明显的低地应力区, 这一点明显地不同于克拉 2 构造. 正是这种强烈的地应力差异造成了储层物性的巨大差异. 图 4b 为相应层段的孔隙度、渗透率分布图. 由图可见, 该区为典型的低孔低渗储层.

(3) 持续的高强挤压应力有利于裂缝的发育. 应力比依南 2 井区更强的依南 4 井区, 其超强的地应力促使该区裂缝发育, 并形成了裂缝性储层. 但该区的原生孔隙度损失殆尽, 很难形成常规意义的油气

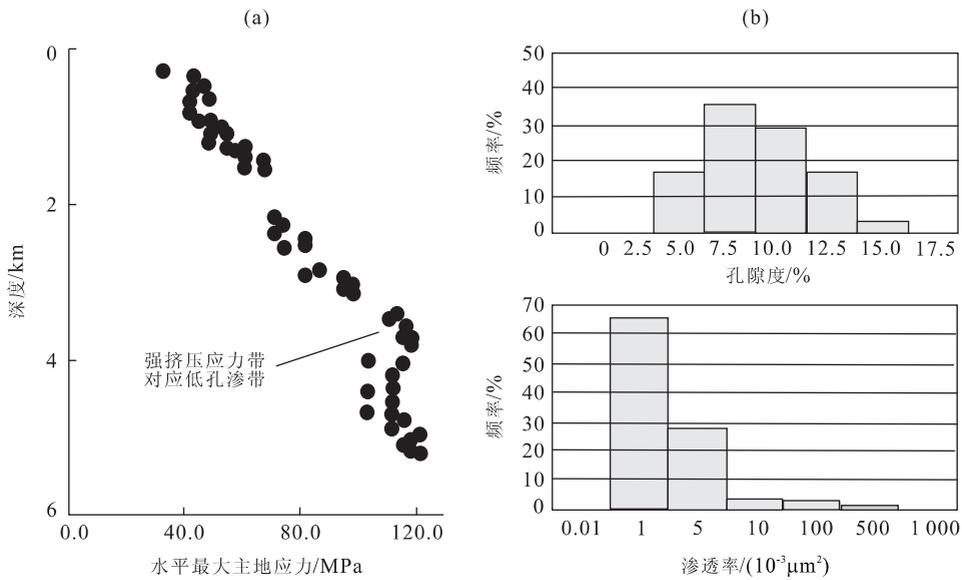


图 4 依南 2 井地应力分布及其储层物性特征

Fig. 4 Distribution of terrestrial-stress and reservoir parameters in Yinan 2 well

藏. 从克拉 2 井到依南 2 井再到依南 4 井随地应力由弱到强, 原生孔隙由发育到不发育, 而裂缝的发育程度则逐渐变强.

总之, 山前地区的地应力分布是很复杂的, 即所谓压中有张, 张中有压. 这种应力的非均质性导致了储层的非均一性, 因此, 局部的弱挤压应力区就是有利的勘探目标区.

4 挤压应力环境下的储盖组合分析

在正常应力沉积区, 作为盖层的泥岩电阻率特征与邻近砂岩的孔隙度和渗透率性能没有必然的联系. 但在挤压构造带, 储层与相邻盖层作为承受同一应力场的载体, 它们之间存在着内在联系. 而泥岩的电阻率又是地应力的灵敏计, 因此, 可借助泥岩电阻率来分析邻近砂岩的储集性能.

在克拉 2 井, 对应于泥岩电阻率低 (电阻率 $3 \sim 5 \Omega \cdot \text{m}$) 的井段, 局部挤压应力弱, 砂岩物性好; 依南 2 井、依南 4 井区泥岩电阻率普遍大于 $10 \Omega \cdot \text{m}$, 挤压应力强, 储层物性差, 很难形成大型油气富集带. 统计表明: 在库车山前构造带, 对于好的储层段, 邻近泥岩电阻率一般都小于 $6 \Omega \cdot \text{m}$, 当泥岩电阻率为 $6 \sim 15 \Omega \cdot \text{m}$ 时, 说明挤压应力较强, 储层物性变差; 当泥岩电阻率大于 $15 \Omega \cdot \text{m}$ 时, 则很难形成常规意义上的油气藏 (图 5). 图 5 表明, 高产能的好储层其邻近泥岩电阻率小于 $5 \Omega \cdot \text{m}$, 随着泥岩电阻率

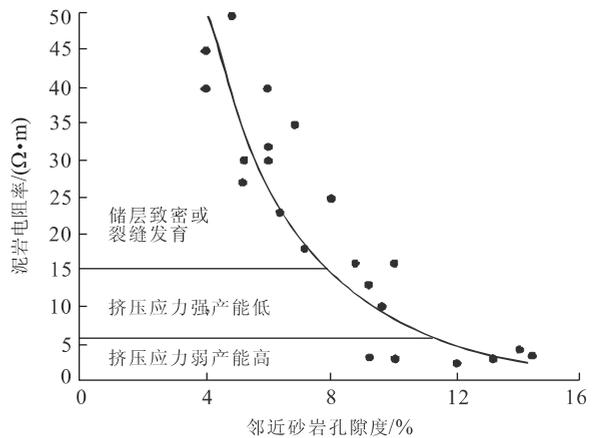


图 5 库车山前构造泥岩电阻率与邻近砂岩储层物性关系
Fig. 5 Relationship between shale resistivity and physical property of adjacent reservoir in Kuqa depression

的增加, 储层物性逐渐变差, 最终即使改造也没有产能. 若地应力进一步加强, 泥岩中可发育裂缝, 使传统意义上的泥岩盖层转化为裂缝性储层, 形成所谓“储盖倒置”现象.

总之, 在强挤压应力下, 储层和邻近泥岩存在着内在的联系, 可以通过对泥岩电阻率的分析更加深刻地了解油气分布的规律.

5 地应力分布形式与构造样式的关系

地应力分布在地层纵向上具有极大的非均质性, 这种非均质性是造成山前地区储层物性差异的

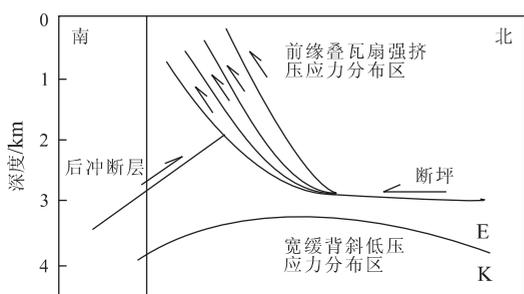


图6 库车山前地应力分布与构造样式模式

Fig. 6 Pattern of in-situ stress distribution and structural styles in Kuqa depression

主要原因。除岩性因素外,局部构造样式与局部地应力分布形式密切相关。不同性质的区域地应力场决定了主要构造样式,区域挤压应力场形成各种大型推覆断裂体系和挤压背斜组合(如库车山前构造带),区域张性应力场条件下,则形成各种张性断裂及其伴生的构造样式(汤良杰等,2003,2004;杨明慧等,2004)。反过来,局部构造样式的形成又影响局部应力场的性质和大小。挤压应力作用下形成背斜构造,背斜构造的形成又引起局部应力场的变化。在中性面以上为局部张性应力,形成了张性裂缝等,而在中性面以下为局部挤压应力场,形成压性裂缝等。

山前构造带由于区域滑脱面的存在(下第三系膏泥岩、侏罗系中煤系地层)在区域挤压应力作用下形成了特殊构造样式和构造的多层次性,一般浅层为地层倾角较高的逆冲推覆构造,深部为宽缓背斜构造(林畅松等,2002)。与此相对应,局部应力场性质是不相同的。浅部推覆构造带表现为挤压应力,深部宽缓构造为弱挤压应力或张性应力(图6)。这种环境则有利于储层保持较高的孔渗条件。西气东输主力气田克拉2气田就是在这样的背景下形成的。

总之,在山前强挤压背景下,局部构造的弱应力区,尤其是盐下构造带无论其储层条件还是盖层条件都十分有利于油气的储集与保存,是形成大油气田的有利区带。

6 结论

(1)山前构造带强烈挤压应力具有显著的地球物理测井响应特征,尤其是泥岩电阻率能灵敏地反映应力集中状态,可以利用这种响应特征对地应力分布状况进行定量评价。(2)山前逆冲带地应力具有强烈的非均质性,导致了储、盖层品质的非均质

性,从而造成了油气分布的巨大差异。(3)前陆构造带泥岩电阻率能较好地反映地应力的大小,泥岩电阻率与邻近砂岩储层物性有着内在的联系,可以藉此进行储层评价和油气评价。(4)本文所提供的方法和得出的结论是针对前陆构造带挤压应力这种特殊环境的,没有这个条件,所提出的方法可能不适用。该方法对我国中西部前陆盆地挤压应力区具有普遍意义,可以将该方法应用于此类地区,为这类盆地的勘探提供一种新的思路与技术手段。但是,山前构造带地应力与油气分布异常复杂,它们之间的关系还受到多种因素的制约。

References

- Aoback, M. D., Moos, D., Mastin, L., 1985. Well bore breakouts and insitu stress. *Journal of Geophysical Research*, 90(7): 5523—5530.
- Ding, Y. C., Sun, B. S., Wang, X. H., et al., 1997. Present stress state determined by AE in the northern Tarim oil field, Xinjiang. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(2): 215—218 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., He, D. F., Lei, Z. Y., et al., 2000. Foreland thrust belt petroleum exploration. Petroleum Industry Press, Beijing, 142—146 (in Chinese).
- Kang, Z. L., Zhai, G. M., 1995. Foreland basins and their hydrocarbon potential in China. *Acta Petroli Sinica*, 16(4): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Kinji, M., 1981. Compaction and liquid migration. Petroleum Industry Press, Beijing, 43—49 (in Chinese).
- Li, Z. M., Zhang, J. Z., 1997. In-situ stress and petroleum exploration & development. Petroleum Industry Press, Beijing, 286—288 (in Chinese).
- Lin, C. S., Liu, J. Y., Zhang, Y. M., et al., 2002. Depositional architecture of the Tertiary tectonic sequences and their response to foreland tectonism in the Kuqa depression, Xinjiang. *Science in China (Series D)*, 32(3): 177—183 (in Chinese).
- Tang, L. J., Jia, C. Z., Pi, X. J., et al., 2003. Salt-related structural styles of Kuqa foreland fold belt, Xinjiang. *Science in China (Series D)*, 33(1): 38—46 (in Chinese).
- Tang, L. J., Jin, Z. J., Jia, C. Z., et al., 2004. A large-scale salt nappe complex in the leading edge of the Kuqa foreland fold-thrust, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 17—25 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., Jin, Z. J., Lu, X. X., et al., 2004. Displacement

transfer zone of Kelasu triangle zone, Kuqa thrust and fold belts in Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(2): 191—197.

Yoshikawa, S., 1990. Experimental studies on the Kaiser effect of stress history on acoustic emission activity—A possibility for estimation of rock stress. *Journal of Acoustic Emission*, 8(4): 113—123.

附中文参考文献

丁原辰, 孙宝珊, 汪西海, 等, 1997. 塔北油田现今地应力的 AE 法测量. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(2): 215—218.

贾承造, 何登发, 雷振宇, 等, 2000. 前陆冲断带油气勘探. 北京: 石油工业出版社, 142—146.

康竹林, 翟光明, 1995. 中国的前陆盆地与油气聚集. *石油学*

报, 16(4): 1—8.

真柄钦茨, 1981. 压实与流体运移. 北京: 石油工业出版社, 43—49.

李志明, 张金珠, 1997. 地应力与油气勘探开发. 北京: 石油工业出版社, 286—288.

林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等, 2002. 库车凹陷第三系构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应. *中国科学(D 辑)*, 32(3): 177—183.

汤良杰, 贾承造, 皮学军, 等, 2003. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式. *中国科学(D 辑)*, 33(1): 38—46.

汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等, 2004. 库车前陆褶皱—冲断带前缘大型盐下推覆构造. *地质学报*, 78(1): 17—25.

杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 等, 2004. 库车褶皱冲断带克拉苏三角带的位移转换构造. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(2): 191—197.

(上接 466 页)

展”、“地球物理中动力学系统方法的基本问题”、“动力学和预测”、“大气超低频可变性”、“非线性永冻圈动力学”、“永冻圈科学非线性动力学”、“水循环中的尺度独立性和非线性”、“海洋、大气和气候中的尺度独立性、多重分形和湍流结构”、“尺度独立性、次网格模型、尺度下降和参数化方法”、“地球物理中的极值: 尺度独立性问题 and 现代统计方法”、“地球物理中的不确定性、随机动力学系统和随机建模”、“地震空间模式和地震触发动力学”、“固体地球科学中的分形、多重分形、尺度独立性”、“地学时空数据分析”、“环境中的空间模式”、“地球科学中的小波和时频分析”、“定量预测”、“非线性数据同化”、“减少气候灾害”、“地球物理流体中的湍流搬运和混合”、“非线性波、不稳定性 and 波—流相互作用”、“喷射和漩涡”。

本届年会是设立非线性分会较多的一次年会。会议期间还召开了非线性分会的全体委员会工作会议, 讨

论了非线性过程的发展现状和前景。

地质过程与矿产资源国家重点实验室主任成秋明教授作为分会召集人主持了“固体地球科学中的分形、多重分形、尺度独立性”分会, 并作了“关于在特征空间中识别极值幂律分布新的多重分形模型”和“广义自相似原理和 S-A 模型在矿产预测中的应用”2 篇报告。

此外, 成秋明教授作为“固体地球科学中的分形、多重分形、尺度独立性”分会负责人参加了与会期间举行的地球物理中的非线性过程委员会工作会议。为更好地反映非线性理论在地学中应用的现状和前景, 会上成秋明教授建议将“地球物理中的非线性过程”改为“地学中非线性过程”, 将“非线性地球物理”改为“非线性地学”。与会委员普遍认为该建议有利于非线性地学研究领域的拓展和应用研究成果的交流, 并建议 EGU 委员会讨论和批准。