

文章编号: 0253-9985(2006)02-0263-06

马岭油田北三区延 10 油层注水 开发中储层伤害研究

朱玉双¹, 李庆印², 王小孟²

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室 地质学系, 陕西 西安 710069

2. 中国石油 长庆油田分公司第一采油厂, 陕西 延安 716000)

摘要:马岭油田北三区延 10 油层粘土矿物主要成份依次为伊利石、伊/蒙混层、高岭石、绿泥石,对储层的潜在危害依次为伊利石、伊/蒙混层和高岭石所造成的水敏和速敏。本文利用马岭油田北三区延 10 油层真实砂岩模型进行的伤害研究表明,1)马岭油田北三区延 10 油层存在弱速敏,临界速度的大小与渗透率呈正相关,一般渗透率越小,临界速度也越小。由于实际注入水的矿化度较实验用地层水的矿化度要低,故注水开发中的速敏伤害较实验结果要强。2)马岭油田北三区延 10 油层存在弱-中等程度的水敏, K^+ 的存在和注入水盐度的提高会减轻水敏伤害的程度,注入水的盐度以 5~10 g/L 为宜。3)水敏伤害条件下的驱油效率较无水敏伤害条件下的驱油效率低 11.35%,宏观波及系数也明显降低,从而降低了油层采收率。建议加强对马岭油田北三区延 10 油层注水开发中的储层保护研究,在注水开发中采取更有效的储层保护措施,以提高油层采收率。

关键词:粘土矿物;储层伤害;速敏;水敏;驱油效率;采收率;马岭油田北三区延 10 油层

中图分类号: TP268 文献标识码: A

tivities caused by illite, mixed illite/smectite and kaolinite. Based on reservoir damage study by using real sandstone model in the study area, the following understandings are achieved. (1) The velocity sensitivity of reservoir is weak in the study area, and the critical velocity is in positive correlation to permeability. The reservoir damage caused by velocity sensitivity is actually stronger than the experimental results, as the salinity of injection water is lower than that of the formation water used in the experiment. (2) The reservoir in the study area is characterized by weak-to-moderate water sensitivity, and the existence of K^+ and the increase of injection water salinity may alleviate reservoir damage from water sensitivity. The injection water salinity would be appropriate in the range from 5 to 10 g/L. (3) The oil displacement efficiency with water sensitivity damage is

收稿日期: 2003-12-02

第一作者简介: 朱玉双(1972—), 女, 副教授, 油层物理与开发地质

11.35% lower than that without water sensitivity damage, and the overall displacement efficiency also remarkably lowers, resulting in a lower recovery ratio.

Key words: clay mineral; reservoir damage; velocity sensitivity; water sensitivity; oil displacement efficiency; recovery ratio; Yan10 reservoir of North-III block in Maling oilfield

马岭油田北三区(木钵区块)位于甘肃省环县木钵乡境内,主要含油层系为侏罗系延安组延 10 油层,次为延 9 油层。1999 年以延 10 为目的层,采用一套层系一套井网进行注采同步开发。目前开发上所面临的问题是含水率上升较快,并且油井见效后很快进入高含水阶段,油井产量急剧下降;与投注初期相比,注水压力升高,注水量下降。本研究选用真实砂岩模型^[1~4]对马岭油田北三区延 10 油层进行了储层伤害研究。

1 储层概况及粘土矿物组成

延 10 油层属构造-岩性油藏,岩性为中-细粒长石质石英砂岩,岩石颗粒分选好,磨圆度棱-次圆,粒径较粗,以中砂为主。砂屑成分以石英为主(69.3%),长石次之(16.2%),岩屑含量 8.1%,胶结物含量 9.6%。胶结物以粘土为主(占 80%,其中高岭土占 2.3%,水云母占 5.7%)。胶结类型以孔隙型、接触-孔隙型为主。据铸体薄片分析,平均孔隙半径为 62.31 μm ,平均喉道直径为 16.81 μm ,平均配位数为 0.818。有效孔隙度 15.4%,渗透率 $84.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。原油粘度(50℃)为 6.3 mPa·s,地层水的矿化度为 20.607 g/L,注入水的矿化度为 2.182 g/L,油层润湿性为亲水。

“X”衍射鉴定表明研究区目的层主要粘土矿物为伊利石(平均 64.5%),其次为伊/蒙混层(平均 18%)和高岭石(平均 13.2%),绿泥石含量很少(平均 4.3%)。

2 粘土矿物对储层的潜在伤害

粘土矿物是引起储层伤害的主要敏感矿物,在储层伤害的研究中占有极为重要的地位^[5]。在钻井、完井、油田开发和油层改造等各项措施的实施过程中,由于工作液、流速、酸液、压力等造成粘土矿物的吸水膨胀、微粒迁移、物理吸附和化学反应等,最终导致储层储集性能变差或丧失生产能力。

各种粘土矿物具有不同的敏感特性^[6],对储层产生的危害也有差别^[7,8]。

2.1 高岭石

高岭石是由二氧化硅四面体和铝八面体组成的单元晶层,对储层的潜在危害主要表现为速敏。砂岩储层中的高岭石以自生的为主,而自生高岭石结构决定了对碎屑颗粒的附着力很弱,因此,一旦有高速流体通过孔隙,高岭石集合体很容易从碎屑颗粒上脱落下来并被打成碎片,这些碎片随流体在孔隙内迁移,在孔隙的狭窄处(如喉道等)容易出现堵塞现象,使烃类的流通性变差,流动受阻,地层的生产能力就会降低^[7~9]。

2.2 伊利石

伊利石结构类似于蒙脱石,但是二氧化硅四面体晶片中的 Si^{4+} 多被 Al^{3+} 置换, Fe^{2+} , Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 置换了八面体晶片中的铝,其结构的不平衡,主要由四面体晶层里的置换引起,这种不平衡常需 K^+ 来平衡。当结构里有 K^+ 时,使得晶层联结更紧,遇水不发生膨胀。但在酸性水的浸析作用下, K^+ 被取代后降解为伊利石,在水作用下可引起膨胀。伊利石遇淡水易破碎而产生颗粒运移。伊利石多以桥状、絮状充填于砂岩孔隙中,它易在高速流体作用下被打碎,并随流体迁移,在喉道处会发生堵塞现象^[8,9]。因此,伊利石对含油气地层的潜在伤害是显而易见的。

2.3 绿泥石

绿泥石族矿物是三层型富铁矿物,含有两层四面体片和一层夹于四面体片中间的八面体片, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 分布在八面体片中^[6]。当储层进行酸化处理时,绿泥石被溶解并析出铁,最终形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮凝沉淀而堵塞喉道,降低储层的渗透率^[7~9]。

2.4 蒙脱石及伊/蒙混层

蒙脱石是由两个硅四面体晶片夹一个铝八面

体晶片构成,由于在八面体晶片内一些 Al^{3+} 被 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 置换,有时四面体岩层少量的硅被铝所取代,这种置换使电荷分布不平衡,每 1.5 个晶层缺一个正电荷。其他多余的电荷由吸附在表面和矿物晶层之间的离子 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^{+} 和 Na^{+}) 中和。这种三层状粘土的叠合使晶层的化学结合力非常弱,蒙脱石结构的显著特点是水和其他极性有机分子能够进入晶层间,引起晶格膨胀,乃至破碎、迁移^[10]。伊/蒙混层矿物在储层中产生的伤害以膨胀为主,并且在高速流体中产生微粒迁移。其膨胀大小取决于晶体结构中膨胀层所占的比例。据报道,即使膨胀层只占 30%~40%,当与淡水接触时,其体积可膨胀数倍^[7,9]。

延 10 油层粘土组成以伊利石为主,次为伊/蒙混层和高岭石,少含绿泥石。伊/蒙混层以蒙脱石为主,所以在注水开发中,伊利石、高岭石及伊/蒙混层易于产生的速敏和水敏伤害,是不可忽视的。由于产生酸敏的主要矿物绿泥石含量很少,故在酸化作业中可不必过多考虑绿泥石产生的酸敏效应。

石的渗透率发生了变化(图 1),说明随着注入速度的提高,发生了微粒迁移,并对储层岩石产生了一定的伤害。但岩石的渗透率不同,临界流速的大小也不同。临界流速是导致岩石中的喉道在较短时间内大量地被堵塞,造成多孔介质渗流能力骤然减小时的流速^[6]。如木 10-8-53 模型渗透率为 $25.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,随着流速的提高,开始模型渗透率发生较微弱的降低,当流速为 $8.099 \times 10^{-3} \text{ mL/min}$ 时,模型渗透率则随流速升高而明显降低,当流速进一步提高,渗透率呈缓慢降低的趋势;木 18-9-46 模型渗透率为 $2.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在流速仅为 $1.509 \times 10^{-3} \text{ mL/min}$ 时,随着流速的提高,模型渗透率就发生了明显的降低;并且随流速进一步提高,其渗透率进一步呈缓慢降低之势;当流速进一步提高,其渗透率下降趋势趋于平稳。发生这种现象的原因可能是在渗透率较低、孔道细小的岩石中,当流速较低时,运移的颗粒可以很快地在大量的细小喉道处架桥、堵塞,岩石渗透率也急剧下降;随流速提

一次渗透率损失。

速敏实验中发现,随着注入速度的提高,岩

渗透率的降低程度及与流速的关系,一般损

害率可以公式(1)计算

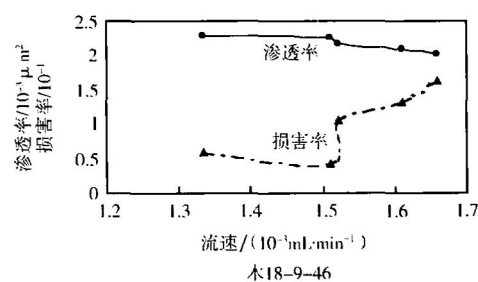
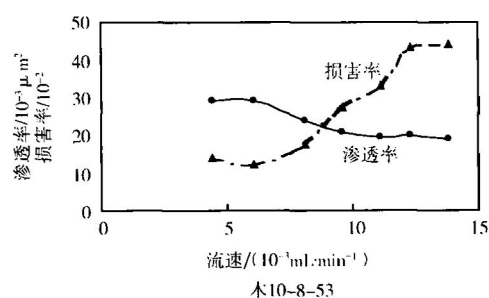


图 1 流速与渗透率、损害率关系

Fig. 1 Velocity vs. permeability and damage ratio

$$D_k = (K_{\text{初始}} - K_i) / K_{\text{初始}} \quad (1)$$

式中 D_k 为损害率, f ; $K_{\text{初始}}$ 为临界流速之前最初测定的岩样渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为某一流速下所测定的岩样渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

木 10-8-53 模型属中等速敏, 木 18-9-46 模型属于弱速敏。又据岩心实验研究^①, 延 10 油层整体属于弱速敏。经反向流动实验, 木 10-8-53 模型运移敏感指数为 0.26, 木 18-9-46 模型运移敏感指数为 0.17, 说明均存在微粒运移(图 1)。

值得说明的是上述速敏实验中使用的是地层水, 若产生速敏的微粒主要是粘土矿物, 则储层的临界速度还与流体的盐度有关。当流体流经含粘土微粒或胶结物的多孔介质且流速不变时, 随着含盐量的减少, 粘土膨胀引起临界流速的变化并导致渗透率的降低。显然, 流体盐度的减少将减弱颗粒与基质间的范氏引力, 增强它们之间的双电层斥力, 使之与基质间的结构力减弱。那些与基质胶结不好或非胶结的地层微粒将被释放到流体中去, 导致临界流速减小, 速敏性增强^[6]。也就是说, 在实际注水开发中, 由于注入流体盐度较低, 其临界速度将比实验室所得临界速度值要低, 速敏伤害程度也将较实验结果要强。

4 水敏实验

研究中共进行 12 块模型、3 种类型的水敏实验, 其中一种是地层水中不含 K^+ 的水敏实验(水敏实验 1)、一种是地层水中含 K^+ 的水敏实验(水敏实验 2)、及盐度与水敏伤害程度的关系实验(水敏实验 3)。

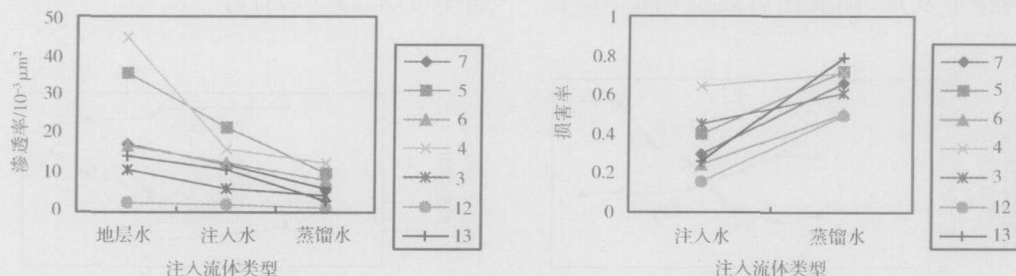


图 2 注入流体类型与渗透率、损害率关系

Fig. 2 Type of injection fluid vs. permeability and damage ratio

4.1 水敏实验 1、水敏实验 2

水敏实验 1、水敏实验 2 流体注入的先后顺序为地层水、注入水、蒸馏水。当注入流体由地层水改为注入水、蒸馏水后, 模型渗透率都发生了明显的变化, 说明发生了水敏(图 2)。当注入流体中注入水占 57% 时, 模型为中等水敏, 占 43% 为弱水敏; 当注入流体中蒸馏水 43% 时, 模型为中等水敏, 占 57% 时为强水敏, 伤害程度更强, 说明注入流体矿化度越低, 对储层伤害程度越严重。

12 号和 13 号两块模型进行的是第二种水敏实验, 即在地层水中加入一定量的 KCl(占 NaCl 与 KCl 总摩尔数的 1/10)。可以看出, 当注入水注入后其渗透率及渗透率损害率均较小(图 2), 平均渗透率损害率为 0.207; 而水敏实验 1 中, 注入水注入后其平均渗透率损害率为 0.406, 说明 KCl 的加入可以稳定粘土矿物, 降低伤害率。

4.2 水敏实验 3

该实验使用了矿化度分别为 20.8, 15.6, 10.4, 5.2 g/L 的地层水、2.18 g/L 的注入水和矿化度为 0 g/L 的去离子水。注入流体的顺序为地层水—注入水—去离子水, 以矿化度依次降低的顺序进行实验(图 3)。

当注入流体的矿化度逐渐降低时, 渗透率开始衰减得比较缓慢, 但当注入的流体矿化度降低为 2.18 g/L(地层水)或注入水 5.2 g/L 时, 随着注入流体矿化度的降低, 渗透率开始有较明显的下降(图 3)。说明当注入流体具有一定盐度时会减轻地层伤害程度。依据实验结果(图 3), 建议马岭油田北三区延 10 油层在注水开发中可逐

① 商方晓, 武平仑, 韩翼云, 等. 注入水水质对各区注水开发的影响. 科研报告, 2002

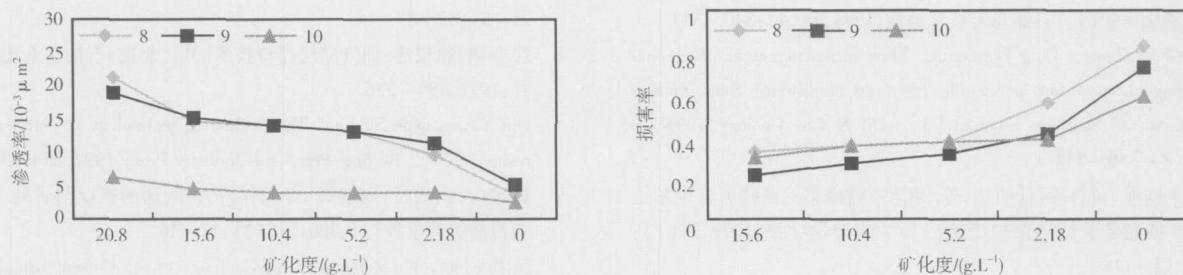


图 2 注入水的盐度与渗透率、损害率关系

化度为 9~10 g/L 较适宜(表 1)。还有研究认为^[6],逐渐或连续降低盐的浓度,储层岩心并未产生伤害。这在长期进行注水作业的现场应用是很重要的,在现场生产中,淡、咸水经混水站混配之后,将不同盐度的水注入到地层中即可,并且不断降低注入水的盐度,即可减轻储层伤害。储层伤害主要发生在近井地带附近^[6],因距离井底较远处,有较多的地层水与注入水混合,足以形成高盐度水,减轻储层伤害。所以,在注水开发中只要在注水初期注入高盐度水,随后可逐渐降低注入水的盐度,即可达到减轻储层伤害的目的。

4.3 水敏伤害与驱油效果

水敏伤害使储层的孔隙结构非均质性加强,造成注入水微观及宏观的波及系数均降低,最终油层采收率也降低^①。该实验表明,水敏伤害条件下的驱油效率较无水敏伤害条件下的驱油效率平均降低了 11.35%,宏观波及系数也明显降低。所以水敏伤害对石油开采效果的影响应高度重视,在油田生产中应采取有效的储层保护措施,以提高油层采收率。

据实验所得认识,在现场对马岭油田北三区延 10 油层进行了注高盐度水(含 K^+ ,矿化度为

层吸水能力上升、地层压力也逐步回升,吸水时间也有所改善。

参 考 文 献

- 1 朱玉双,曲志浩,孔令荣,等. 砂岩模型两相驱替实验中油层润湿性的判断[J]. 石油与天然气地质,1999,20(3):220~223
Zhu Yushuang, Qu Zhihao, Kong Lingrong, et al. Determination of oil reservoir wettability in two-phase displacement experiment of sandrock model [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(3): 220~223
- 2 朱玉双,曲志浩,蔺昉晓,等. 油层受水敏伤害时水驱油渗流特征[J]. 石油学报,2004,25(2):59~64
Zhu Yushuang, Qu Zhihao, Lin Fangxiao, et al. Seepage flow characters of oil displacement with water drive in water-sensitive formation of Mubo Yan10 reservoir. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 59~64
- 3 潘爱芳,曲志浩,马润勇. 油田注水开发中水源混配防垢技术[J]. 石油与天然气地质,2004,25(1):97~101
Pan Aifang, Qu Zhihao, Ma Runyong. Scale control through water mixing in waterflooding oilfields [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 97~101
- 4 朱玉双,曲志浩,孔令荣,等. 靖安油田长 6、长 2 油层驱油效率影响因素[J]. 石油与天然气地质,1999,20(4):333~335
Zhu Yushuang, Qu Zhihao, Kong Lingrong, et al. Effective factors of oil displacement efficiency in Chang-6 and Chang-2 reservoirs, Jing'an oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(4): 333~335
- 5 陈忠,唐洪明,沈明道,等. 川南香溪群四段低渗裂缝性砂岩

① 朱玉双,曲志浩,武平仓,等. 木钵延 10 油层微观水驱油特征及对注水开发的影响研究. 科研报告

- 储层保护[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 340~344
- Chen Zhong, Tang Hongming, Shen Mingdao, et al. Reservoir protection of low permeable fractured sandstones from Xiangxi Group of Southern Sichuan [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(4): 340~344
- 6 王随继, 黄杏珍, 任明达, 等. 柴达木盆地第三系碎屑岩中粘土矿物特征及储层保护措施[J]. 兰州大学学报, 1998, 34(1): 112~118
- Wang Suiji, Huang Xingzhen, Ren Mingda, et al. The characteristics of clay minerals in clastic rock and the reservoir protection in Tertiary system; Qaidam basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 1998, 34(1): 112~118
- 7 张守鹏, 李怀渊, 张成玉, 等. 岩石微观分析判别油层伤害的技术方法与应用[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 52~57
- Zhang Shoupeng, Li Huaiyuan, Zhang Chengyu, et al. Technical method and application for reservoir damaged identification by microexamining rock construction [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 52~57
- 8 裘亦楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 284~336
- Qiu Yinan, Xue Shuhao. The evaluation technology of petroleum reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 284~336
- 9 鞠斌山, 武增贵, 邱晓凤, 等. 油层伤害问题的概况与进展. 西安石油学院学报[J], 2001, 16(3): 12~16
- Ju Binshan, Wu Zenggui, Qiu Xiaofeng, et al. Present situation and progress in the research of formation damage [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2001, 16(3): 12~16
- 10 唐洪明, 曾凡刚, 陈忠, 等. 莲花油层中粘土矿物规律研究[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 233~238
- Tang Hongming, Zeng Fangang, Chen Zhong, et al. The study of clay minerals distribution in Lianhua reservoir [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 233~238

(编辑 高岩)

《戴金星天然气地质和地球化学论文集》(卷四) 评介

王庭斌

继《戴金星天然气地质和地球化学论文集》(卷一)、(卷二)、(卷三)之后,《戴金星天然气地质和地球化学论文集》(卷四)2005 年出版了。(卷一)、(卷二)、(卷三)和(卷四)将戴金星院士 30 多年来潜心从事我国天然气地质及地球化学领域丰硕科研成果的精华汇集出版,是年轻一代学者进一步开展我国天然气地质及天然气地球化学研究的宝贵财富。其中,(卷一)、(卷二)、(卷三)主要是戴金星院士在各时期天然气地质和天然气地球化学领域论著的精萃,(卷四)则作为他一生对祖国地质、天然气地质事业无私奉献的总结。作者为(卷四)作了一个代序的前言,回忆了他 70 个春秋的人生历程。应该说,这个自序不仅叙述了院士的生平,也是千千万万个生在旧社会,成长在新社会,由新中国培育出来的科技工作者的人生经历。也是众多将毕生的精力献身于我国地质事业、天然气地质事业的广大科技工作者实现地质梦(理想)的追述。

当年,少奇同志“地质工作者是社会主义建设时期的游击队员”的教导和“勘探队之歌”曾激励了几代人为祖国地质事业、为祖国天然气地质事业的发展奉献了毕生精力。正是由于戴金星院士及其战友们几十年来忘我工作、不懈努力,我国发现了一批世界级大气田,我国天然气地质储量进入了快速增长,我国从贫气国正在迈向产气大国,我国天然气地质理论取得了重要的进展。

为了获取更多的第一手资料,他不分寒暑,走遍了祖国大地。从高压气井到几百米深的矿井,从怒江雪山融化刺骨的冰水中,从腾冲诱人的热泉里,获取了各类成因天然气样品 1 600 多个,积累了 3 万多个天然气气体组分以及碳、氢、氮等同位素资料,为研究我国天然气的成因类型和天然气地质理论研究奠定了坚实的基础。他与战友们一起,亲赴生产一线,深入研究地质资料,为鄂尔多斯、塔里木以及四川等主要含气盆地大气田的发现做出了杰出的贡献。

(卷四)在“天然气地质篇”中不仅论述了中国一些含气盆地具体的地质理论问题,并且用多篇论述、描绘了中国天然气工业发展的美好前景。在“天然气地球化学篇”中的多篇论著中,重点论述了我国大型气田的天然气地球化学特征,并与世界上著名的煤成气区的天然气地球化学特征对比。所有的论著,都渗透了院士对建立和发展中国煤成气理论、开辟煤成气勘探领域以及对于各类天然气(无机与有机成因)成因及其成藏条件、中国大中型气田形成与控制因素及其远景预测等诸多方面丰富的科研成果。显示了他在中国找寻更多的大中型气田,加快发展我国天然气工业的信心。在“油气与中国”一文中不仅概要地总结了我国油气地质理论的进展,并且明确地指出了我国油气工业的发展是由于有符合中国地质特点的油气地质理论的指导,功不可没;要发现更多的大中型油气田,还必需进一步开拓思路,深入地研究中国的地质特点。进一步表述了他的“我的地质梦,我的地质路”和誓为寻找祖国宝藏的终身志向。

多年来,戴金星院士在潜心于天然气地质及天然气地球化学领域研究的同时,兴趣十分广泛,把请他写序不仅作为对某些地质问题的进一步论述,也以杂文式着笔,将地质问题的论述与文学爱好结合起来,以及对我国天然气成就的赋诗,使我们不仅看到他广博的地质知识,也可以一览他的文学风采。

戴金星院士虽已功成名就,还在为我国天然气事业的发展辛勤耕耘。深有“忆往昔,争荣岁月;展未来,壮志傲翔”之感。愿戴金星院士继续实现他的地质梦,继续走宽阔的地质路,为祖国地质事业、为祖国的天然气地质事业的发展,不断地构建、完善他的天然气地质理论体系。