

文章编号: 1000-0550(2003)02-0345-05

煤层气富集高产的主控因素^①

高波¹ 马玉贞² 陶明信¹ 马根喜³

1(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

2(兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室 兰州 730000)

3(甘肃省地质矿产勘察开发局 第二地质矿产勘察院 兰州 730020)

摘要 对煤岩的生储气能力、煤储层渗透率、煤层气保存条件等影响煤层气高产富集的主控因素进行了分析。煤岩组分和煤变质程度是影响煤层生储气能力的主控因素。煤层的储气能力与温度、压力、灰分及水分含量等亦有关。煤层的渗透率取决于煤层本身的裂隙系统,而裂隙的发育程度又与煤变质程度及构造活动的强弱相关。煤层气的保存则取决于顶底板的封盖能力、构造活动、水动力环境等条件。煤层气成藏条件是煤层气基础地质研究中的核心问题,应加强研究。

关键词 煤层气 高产 富集 渗透率 含气量 煤岩组分

第一作者简介 高波 男 1969年出生 博士研究生 油气地球化学

中图分类号 TE122.1 **文献标识码** A

煤层气是一种新兴的能源和优质的化工原料。开发利用煤层气,对于缓解我国常规油气供应紧张状况、改善煤矿安全生产条件、保护大气环境、促进国民经济可持续发展等方面具有重要的社会意义和经济意义。

我国进行煤层气勘探开发研究已逾十年,至今为止,已施工各类煤层气井近 200 口,取得了部分重要进展,如进行了两次全国性煤层气资源评价,在山西柳林、晋城等地区发现了煤层气工业气流。然而,从总体上看,效果不够理想,离商业性开发还有一段距离。究其原因,一是我国煤层气基础地质研究较为薄弱,对煤层气形成与分布的基本规律尚未搞清;二是我国煤田地质构造复杂多样,煤储层的渗透率普遍偏低,孔渗与含水条件与美国(现已形成煤层气产业)有很大的差异性,难以简单地利用美国现有的经验和开采技术。

虽然煤层气与煤型气的生烃母质均以Ⅲ型有机质(腐殖质)为主,但煤层气为一种自生自储于煤层中的非常规天然气,与煤型气相比,具有不同的成藏机理及控藏因素。至今尚未能从“成藏”的高度对其进行深入研究。因此,借鉴常规油气藏理论及其行之有效的办法,研究煤层气藏的形成过程,分析煤层气富集成藏的机理,尽快建立适合我国地质条件的煤层气理论体系,已成为我国煤层气研究的当务之急。尽管我国煤层气基础地质研究相当薄弱,但近若干年来,各有关方面围绕煤层气的选区评价与开发试验,做了大量的工作,获得了很多认识。本文在前人工作的基础上,从微观和宏

观两个方面,对控制煤层气富集高产的各种因素进行较系统的归纳与讨论,以期能为煤层气的勘探开发工作提供有益的信息。

1 煤岩的生烃能力及其制约因素

煤是由植物的遗体长期演化形成的、由高度集中的腐殖型有机质和部分无机物混合而成的可燃性有机岩。其基本结构单元为带有许多侧链和官能团(如甲基、羧基、羟基)的缩合稠环芳烃体系^[1,2]。其中稠环具有很强的键结合力及较高的热稳定性,侧链和官能团的键结合力很弱且热稳定性较差,在煤化作用的过程中,特别是后期阶段,易发生脱水、脱羧、脱甲基作用和裂解与缩聚反应,使芳香核缩聚加大、脂肪链减少,并产生大量的 CH₄、CO₂ 及 C₂H₆ 等挥发性产物。这些挥发性气体如果被煤层吸附、溶解于煤层水或呈游离气储存于煤层孔隙或裂隙中,则被称为煤层气。模拟实验等研究表明,不同的煤具有不同的生烃能力,煤的生烃能力主要取决于煤岩组分和煤变质程度。

1.1 煤岩显微组分

煤岩模拟实验等研究表明,在煤岩有机显微组分中,以壳质组生烃能力最强,镜质组次之,惰性组最差,其产出总烃气的比值在相当焦煤至无烟煤阶段大致为 1.5:1.0:0.7^[3](图 1)。由于煤一般以镜质组为主,含量常为壳质组的十多倍,因此煤系地层中的镜质组应是煤层气的主要贡献者。

① 国家 973 计划《中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究》项目资助

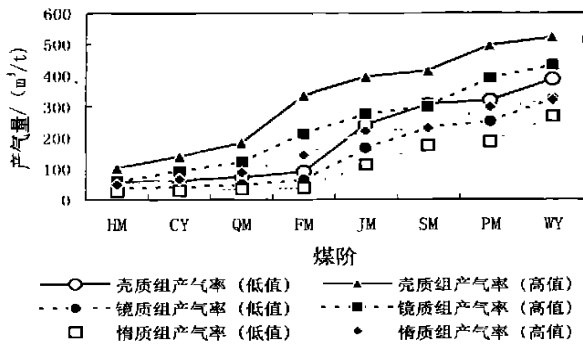


图 1 煤岩显微组分的生烃能力

(据文献 [3] 资料绘制)

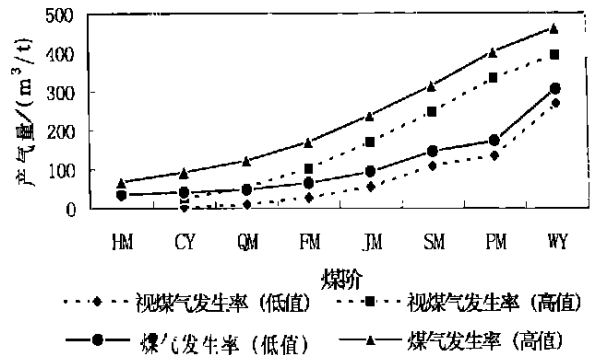
Fig. 1 Gas production of macerals in coal rocks
(modified from Ref. 3)

图 2 我国主要煤系不同煤阶煤的累计生气量

(据文献 [3] 资料绘制)

Fig. 2 Gas production of coal with different rank
in the main coal series of China
(modified from Ref. 3)

1.2 煤变质程度

煤岩变质程度与其生烃能力间的关系较为复杂。成煤过程又可划分为泥炭化作用与煤化作用两大阶段。在泥炭化作用阶段,有机质因生物化学作用可生成少量甲烷及二氧化碳,但由于缺乏盖层的保护而难以保存下来。煤化作用过程中,甲烷的产生机制有两种,即生物成因和热成因。煤化作用的早期阶段,甲烷由微生物分解有机质而成;随着埋藏深度增加,有机质经受的温度和压力升高,有机质在热催化作用下发生脱水、脱羧作用和裂解与缩聚作用,除生成甲烷、重烃及二氧化碳外,还可生成部分液态烃类^[2]。模拟实验等研究表明^[2,4],煤化作用早期(褐煤至长焰煤)生气量较低,且以甲烷和二氧化碳为主,重烃含量很低。随着煤变质程度的增加,生气量逐渐增大。煤化作用中期(气煤至肥煤),成分以甲烷为主,重烃含量增高,为湿气形成的主要阶段。煤化作用晚期(焦煤阶以后),甲烷成分占绝对优势,二氧化碳次之,重烃极少。随着演化程度的进一步升高,烃类裂解将达到充分程度。

由于煤是一种有机质高度富集的烃源岩,有机碳含量很高,生烃能力很强。煤的变质程度越高,其累计生气量越大。从图 2 可看出,在从褐煤到无烟煤的演化过程中,每吨煤可生成 268~393 m³ 的气体,远超过煤层自身的储气能力。因此,从这一角度来说,决定煤层含气量的主要因素不是煤层的生气能力,而是其储气能力与保存条件。

2 煤层的储气能力及其影响因素

煤岩既是煤层气的源岩,又是其储集层,具有基质孔隙和割理孔隙的双孔隙结构。煤层气主要以游离气、溶解气和吸附气三种形式赋存于煤储层中,其中游

离气主要存在于煤的孔隙、裂隙或空洞中,而溶解气则主要以水溶气的形式存在于煤层孔隙水中,因此游离气和溶解气的含量主要受到煤层孔隙度的影响。由于煤的孔隙主要以小孔(1000~100Å)和微孔(<100Å)为主,孔隙度一般都很低(一般<10%),加之甲烷在水中的溶解度较小,故煤层中游离气和溶解气的含量不高,呈吸附状态的甲烷才是煤储层中煤层气的主体,约占煤层气总量的 80% 以上^[5,6]。煤是一种多孔介质,具有较大的内表面积(可达 10~40m²/g),煤层甲烷受分子力的作用可被吸附于煤岩孔隙表面,因而煤层具有很强的吸附能力,可以吸附大量的煤层气,一般大于 10m³/t 煤^[7]。煤的高吸附能力使得煤层中的储气量较同一体积常规天然气储集层(砂岩、灰岩)的储气量高 2~3 倍^[6,8]。

如前所述,煤层气主要以吸附气的形式存在,煤层的储气能力主要取决于煤岩孔隙内表面积的大小,其影响因素很多,其中煤岩显微组分及煤变质程度是两个主要因素。煤岩的吸附能力与其显微组分的关系随着煤阶的不同而变化^[5,9]。当煤变质程度低于焦煤时,镜质组的吸附能力小于惰性组,吸附能力表现为:惰性组>镜质组>壳质组;煤变质程度高于瘦煤时,镜质组吸附能力大于惰性组,吸附能力表现为镜质组>惰性组>壳质组,此时,煤岩中的镜质组含量高则吸附能力更强;当煤变质程度介于焦煤—瘦煤之间,两者吸附能力相近。这可能是由于惰性组孔隙以中孔、大孔为主,镜质组孔隙则以小孔和微孔为主。随着煤化作用的进行,镜质组和惰性组中的挥发分不断逸出,导致镜质组的微孔隙和内表面积不断增加,但在瘦煤之前,镜质组内表面积仍小于惰性组的内表面积,所以吸附能力小

于惰性组;随着变质程度的进一步加深,镜质组内表面积大于惰性组,镜质组的吸附能力大于惰性组。煤变质程度对煤层储气能力的影响则表现为低,高变质煤吸附量大,而中等变质煤吸附量小^[5,7]。这是因为煤的内表面积取决于煤的孔隙结构。低煤阶煤以大孔为主,孔隙度较大,随着煤变质程度的加深,孔隙变为以微孔为主,造成中等变质程度煤孔隙度和内表面积小,吸附力也小,而低、高变质煤孔隙度和内表面积大因而吸附力也强。当煤级达到无烟煤阶段,随着热演化程度的进一步加深,煤层吸附能力迅速下降。

除煤岩显微组分和变质程度外,温度、压力、灰分、水分含量等也影响着煤的吸附能力^[5,6,9]。一般来说,煤层中气体吸附量随着温度的升高而下降,随着压力的增加而增大。由于煤层在地下所处的温压条件主要与其埋藏深度有关,随着埋深的增加,地层的压力和温度随之增加,且地层压力增加幅度较大,故煤层吸附甲烷能力随着煤层埋深的增大而增大。然而,温度与吸附能力的消长关系,又使得这种增加趋势仅局限于较浅的埋藏深度。煤岩等温吸附线测试实验表明,当压力大于 3 MPa 时,随着压力增大,吸附量增大幅度变小;当压力大于 6 MPa 时,压力对煤层吸附量影响已不明显,而与该压力相当的煤层埋深为 600~800 m^[7]。矿物含量和水分含量对煤岩吸附能力的影响则表现为煤岩吸附能力随着矿物含量和含水量的增加而降低。

3 制约煤层气保存的条件

煤层含气量的高低不仅取决于煤岩的生、储气能力,而且更与其保存条件息息相关。煤层气藏的保存程度又取决于顶底板的封盖能力、构造活动、水动力环境等条件。

3.1 封盖层条件

良好的封盖层不但可以阻止煤层气的垂向逸散,保持较高的地层压力和煤层气的吸附量,而且还可阻止地层水的垂向交替,减少煤层气的逸散量。一般来说,盖层能够封隔流体的原因有三个:毛细管压力封闭、浓度封闭和高压异常流体压力封闭^①。这三个因素尤其是前二个因素与盖层的物性有直接关系。一般而言,泥岩层致密且性能稳定,排替压力高,封盖能力强,是良好的封盖层;致密砂岩与灰岩如果孔渗性很差,亦可为良好的封盖层。

3.2 水动力条件

水动力条件同样也是影响煤层气高产富集的一个重要因素。其建设性作用表现为:承压水不仅有助于阻止煤层甲烷的逸散,增加煤层吸附甲烷的能力,进而提高煤层含气量,而且还有利于煤层甲烷的排水降压和

开采抽放。煤层水的不可压缩性还可对煤层割理、孔隙起到支撑作用,使得煤岩储层能保持较高的渗透率。在煤层气开采过程中,合理地控制煤层水的排采速度,还是防止井筒附近应力过分集中,避免煤储层孔隙度与渗透率急剧下降的重要途径^[10,11]。此外,承压水还有利于在煤层氧化带生成次生生物气,增加含气量。然而在产水量过大的强水循环区,由于水体补给状况良好,容易造成煤层气的散失,使含气量降低,对煤层气的聚集成藏起到破坏作用。

4 渗透率及其制约因素

渗透率是衡量流体在一定压差下通过岩石有效孔隙能力的一种量度,是煤层气开发中的关键性因素之一,直接关系到煤层气的生产能力。煤层的渗透率越大,气产量越高;而煤层渗透率越低,煤层气解吸率也就越低,采气效果也就越差。因此,一般将渗透率不低于 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为煤层气开发选区标准。我国含煤盆地煤储层渗透率普遍偏低,因此寻找高渗区是煤层气勘探的主要目标之一。由于渗透率的大小主要取决于岩石中连通孔隙的数量及裂隙,但对于煤储层而言,因其原始孔隙度较小,且微孔隙占很高的比例,故煤层的渗透性主要取决于煤的裂隙系统。其中主要受割理发育程度的影响,割理愈发育,渗透性愈好。

煤变质程度是影响煤层割理发育程度的一个主要因素。一般来说,低煤阶的煤层割理不发育,随着煤阶的升高,割理逐渐发育,在焦煤、瘦煤中割理最为密集;此后到无烟煤阶段,由于较高的温度、压力,有的割理因发生重新愈合现象而减少^[12,13]。

此外,成煤期后的构造活动也是影响煤层的渗透性和封闭条件的一个重要因素。构造活动是产生煤层次生裂隙的主要因素,对煤层气的高产富集既有建设性作用,也有破坏性作用。一方面构造运动可促进煤层裂隙系统的发育,提高其含气量和渗透率;另一方面,强烈的构造活动又使得煤系地层抬升并遭受风化剥蚀,严重破坏煤层的原始结构,降低煤层的渗透率。

5 典型实例

山西晋城地区为我国煤层气有利勘探目标区之一,前人已做了大量的工作,积累了丰富的资料,获得了很多重要的认识。近年来,已在该区樊庄、潘庄等井田获得工业煤层气流,显示了煤层气开发的良好前景。该区煤层气富集高产的有利条件可概括为以下几个方

① 傅广,王朋岩,陈昕.泥岩源岩层在封盖油气中的特殊作用.天然气地球科学,1997,8(2): 13~17

面^[14-18]: ① 本区煤层具有良好的生储气条件: 煤岩变质程度多达到低、中级无烟煤阶段,且在煤岩有机显微组分中镜质组占绝对优势,故在煤化作用过程中有大量烃类生成;煤层多、厚度大、分布稳定、连续性好,因而生成煤层气的物质基础雄厚;煤岩孔隙中的小孔、微孔比例高,煤岩含水量和矿物含量较低,具有较强的储气能力,属多生高储型。② 该区具有良好的煤层气封盖层条件: 主煤层顶底板岩性多以泥岩或灰岩(下主煤层顶板)为主,厚度较大,孔隙率低,渗透性差且排替压力很高,具有良好的封闭能力。对该区主力煤层及其顶板岩石的压汞实验表明,主力煤层顶板孔隙率低(为 5% 左右),孔隙连通性差,绝大多数属于封闭孔类型;顶板排替压力很高,为 2~19 MPa,且渗透率很低,为 $10^{-5} \sim 10^{-9} \mu\text{m}^2$ 量级,属于非渗透性盖层^[14,15]。③ 该区含煤地层水动力条件微弱,具有独立的水封闭系统,不仅有利于排水降压,而且可形成承压水封堵型气藏,对煤层气的保存极为有利。④ 该区位于沁水盆地南部斜坡带,构造简单,为一倾向北西的平缓单斜,构造形迹以宽缓的背、向斜为主,断裂构造很不发育,因而对煤层的连续性破坏不大,有利于煤层气的聚集和保存。同时,由于受后期构造运动多次叠加的影响,使得煤层构造裂缝普遍发育,提高了煤层的渗透率,使渗透率达到 $0.5 \times 10^{-3} \sim 3.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为煤层气的开发提供了良好的条件。

6 结语

以上仅是对影响煤层气富集高产的各种控制因素的概略综合分析。事实上,煤层气的富集成藏是一个极其复杂的过程,是多种地质作用综合的结果。目前国内外尚缺乏从“成藏”的理论高度对其进行系统的研究,而油气勘探的实践表明,建立在“圈闭”概念基础之上的油气藏理论具有重要的意义。因此,有必要根据煤储层及煤层气自身的特点,借鉴常规油气藏理论中一些行之有效的办法,通过对国内外一批典型煤层气藏形成条件的剖析及逼近地下条件的煤储层等温吸附实验,结合沉积学、煤岩学、大地构造学、地球化学、地热学、渗流力学等学科的交叉研究,对煤层气富集成藏的机理进行系统研究。在此基础上,分析中国煤层气的控气地质因素及其特殊性,建立符合我国地质条件的煤层气成藏地质理论与模式,进而分析和总结中国煤层气藏的分布规律,以便为制定煤层气的勘探开发战略提供依据。

参考文献 (References)

- 潘钟祥,高纪清,陈荣书.石油地质学[M].北京:地质出版社,1987. 44~165 [Pan Zhongxiang, Gao Jiqing, Chen Rongshu. Petroleum Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 44~165]
- 徐永昌等著.天然气成因理论及应用[M].北京:科学出版社,1994. 29~48, 189~206 [Xu Yongchang, et al. Origin of Natural Gas theory and application [M]. Beijing: Science Press, 1994. 29~48, 189~206]
- 张五岱,李小彦.我国主要煤系生气源岩的生产能力分析[J].煤田地质与勘探,1988,16(3): 31~37 [Zhang Wudai, Li Xiaoyan. Analysis of the hydrocarbon-producing potential of main coal measures source rocks in China [J]. Coal Geology & Exploration, 1988, 16(3): 31~37]
- 傅家谟,刘德汉,盛国英.煤成烃地球化学[M].北京:科学出版社,1992. 37~84 [Fu Jiemo, Liu Dehan, Sheng Guoying. Geochemistry of Coal-generated Hydrocarbons [M]. Beijing: Science Press, 1992. 37~84]
- 张新民,张遂安,钟玲文等.中国的煤层甲烷[M].西安:陕西科学技术出版社,1991. 29~81 [Zhang Xinming, Zhang Suian, Zhong Lingwen, et al. Coalbed Methane in China [M]. Xian: Science and Technology Press of Shaanxi, 1991. 29~81]
- 赵庆波,刘兵等编.世界煤层气工业发展现状[M].北京:地质出版社,1998. 8~37 [Zhao Qingbo, Liu Bing, et al. Development of Coalbed Methane Industry in the World [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 8~37]
- 关德师.煤层甲烷的特征与富集[J].新疆石油地质,1996,17(1): 80~84 [Guan Deshi. Characteristics and enrichment of coalbed methane [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1996, 17(1): 80~84]
- Kuuskrav V A, Brandenburg C F. Coalbed methane sparks a new energy [J]. Industry: Oil and Gas Journal, 1989, 87(41): 49~56
- 全裕科.影响煤层含气量若干因素初探[J].天然气工业,1995,15(5): 1~5 [Quan Yuke. Primary discussion on the factors affecting coalbed gas content [J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(5): 1~5]
- 高洪烈.论煤层气与地下水[J].中国煤田地质,1998,10(4): 45~48 [Gao Honglie. Review on coalbed gas and underground water [J]. Coal Geology of China, 1998, 10(4): 45~48]
- 周志成,王念喜,段春生.煤层水在煤层气勘探开发中的作用[J].天然气工业,1999,19(4): 23~25 [Zhou Zhicheng, Wang Nianxi, Duan Chunsheng. Action of coalbed water in the exploration and development of coalbed gas [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(4): 23~25]
- Law B E. The Relationship between coal rank and cleat spacing: Implications for the prediction of permeability in coal [R]. Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium, 1993. 435~441
- Close J C. Natural Fractures in Coal. In: Law B E, Rice D D, eds. Hydrocarbons from Coal. AAPG studies in Geology Series# 38. 1993. 119~130
- 张建博,王红岩.山西沁水盆地煤层气有利区预测[M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,1999. 26~51, 81~93 [Zhang Jianbo, Wang Hongyan. Favorable Area Prediction of Coalbed Methane in the Qinshui basin, Shanxi Province [M]. Xuzhou Jiangsu Press of China University of Mining and Technology, 1999. 26~51, 81~93]

- 15 刘焕杰,秦勇,桑树勋.山西南部煤层气地质 [M].江苏徐州:中国矿业大学出版社,1998.74~106 [Liu Huanjie, Qin Yong, Sang Shuxun. Geology of Coalbed Methane in Southern Shanxi, China [M]. Xuzhou Jiangsu Press of China University of Mining and Technology, 1998.74~106]
- 16 赵庆波等著,煤层气地质与勘探技术 [M].北京:石油工业出版社,1999.13~53 [Zhao Qingbo, et al. Geology and Exploration Technology of Coalbed Methane [M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1999.13~53]
- 17 张建博,陶明信.煤层甲烷碳同位素在煤层气勘探中的地质意义—以沁水盆地为例 [J].沉积学报,2000,18(4): 611~614 [Zhang Jianbo, Tao Mingxin, Geological significances of coalbed methane carbon isotope in coalbed methane exploration [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000,18(4): 611~614]
- 18 高波,陶明信,张建博等.煤层气甲烷碳同位素的分布特征与控制因素 [J].煤田地质与勘探,2002,30(3): 14~17 [Gao Bo, Tao Mingxin, Zhang Jianbo, et al. Distribution characteristics and controlling factors of $\delta^{13}\text{C}_1$ value of coalbed methane [J]. Coal Geology & Exploration, 2002,30(3): 14~17]

Main Controlling Factors Analysis of Enrichment Condition of Coalbed Methane

GAO Bo¹ MA Yu-zhen² TAO Ming-xin¹ MA Gen-xi³

1(State Key laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2(College of Resources and Environment, Key Laboratory of Western China's Environment System of Education Ministry, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

3(No. 2 Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu

Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730000)

Abstract In this paper, the authors have analyzed the main controlling factors that affect enrichment and high production of coalbed methane (CBM), such as generating and storing capacity of coal rock, permeability of coal reservoir and preservation conditions of CBM. Research shows that maceral and the degree of metamorphism of coal rock are key factors that control the generating and storing capacity of coal rock. Temperature, pressure and the content of mineral substance and water are also relevant to the storing capacity of coal rock. However, the permeability of coalbed is mainly controlled by fracture system of coal rock, which is relevant to the maturity of coal and the intensity of tectogenesis. The preservation of CBM pool is mainly controlled by the sealing capacity of roof and floor plate, tectonic activity and hydrodynamic environment. Because of its important role, we'd better strengthen the research on CBM pool forming conditions.

Key words coalbed methane, high production, enrichment, gas content, permeability, maceral

著名海洋地质学家、本刊副主编 业治铮先生逝世

著名海洋地质学家、沉积学家、南京地质矿产研究所名誉所长、青岛海洋地质研究所技术顾问、博士生导师、中国地质学会常务理事、中国矿物岩石地球化学学会常务理事、中国海洋地质学会理事长、中国海洋湖泊学会常务理事、《海洋地质与第四纪地质》主编、《沉积学报》副主编、《古地理学报》编委、中国科学院资深院士业治铮教授于2003年1月3日在南京逝世,享年85岁。

业治铮先生的逝世是我国科技界的一大损失

业治铮先生永垂不朽!