中国天然气水合物调查研究现状及其进展

张洪涛[1] 张海启[1] 祝有海[2]

(1.中国地质调查局,北京 100011;2.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

提要:天然气水合物大致经历了实验室研究、管道堵塞及防治、资源调查与开发利用4个发展阶段,中国目前正处于资源调查阶段的早期。自1999年开始,中国先后开展了南海、东海、陆上冻土区和国际海底区域天然气水合物的调查研究,相继发现了一系列地质、地球物理和地球化学异常标志,并在南海北部神狐地区成功采到水合物实物样品,取得了找矿工作的重大突破,显示出良好的找矿前景,但目前仍存在着调查研究程度较低、技术装备比较落后等问题。随着国家对天然气水合物重视程度的加强,中国天然气水合物的调查研究进程将会将进一步加快,并在不久的将来过渡到试生产阶段和商业性生产阶段。

关 键 词:天然气水合物;资源;南海;冻土

中图分类号:P618.13 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-3657(2007)06-0953-09

天然气水合物是一种新型的潜在能源,主要分布于海底沉积物和陆上永久冻土带中。据初步估算,全球天然气水合物资源量约为$21\times10^{15}m^3$[1],是煤炭、石油和天然气资源总量的2倍,足够人类使用千年以上。

自1810年英国科学家Davy 在实验室合成了氯气水合物以来, 人类就从未停止过对天然气水合物的研究和探索,期间也曾出现过数次研究高潮,20世纪60年代特别是80年代末以来,由于其巨大的能源潜力和环境效应,世界各国开始对天然气水合物展开了全方位研究,掀起了天然气水合物的又一个研究高潮。中国对天然气水合物的调查研究起步较晚,20世纪80年代初仅有少部分研究人员关注国际天然气水合物的研究进展, 并将相关成果介绍到国内,90年代末期才进入了快速发展时期,初步形成了天然气水合物调查研究的小高潮。笔者拟对中国天然气水合物调查研究的历史、现状及其问题进行初步总结,并对其发展前景进行展望,供相关部门和人员参考。

1 天然气水合物调查研究历史回顾

自人类发现天然气水合物以来, 大致经历了实验室研究、管道堵塞及防治、资源调查与开发利用4个阶段(图1)。传统上一直认为天然气水合物的研究历史始自1810年的Davy合成氯气水合物,但早在1778年,英国化学家Priestley有可能就在实验室里发现了二氧化硫水合物[2]。之后的研究几乎均在化学家们的实验室中进行, 试图合成各种各样的水合物,并希望能定量地描述它们的化学成分及其物理性质。1934年, 美国科学家Hammerschmidt发现天然气水合物会堵塞输气管道,影响天然气的输送,为此美国、前苏联、荷兰、德国等国先后开展了水合物的形成动力学和热力学研究以及如何防治输气管道中形成水合物问题,由此进入到管道堵塞及防治研究阶段, 这一阶段的水合物被认为是令人厌烦的东西。1965年,前苏联在西伯利亚麦索亚哈(Messoyakha)油气田区首次发现天然产出的天然气水合物,之后美国、加拿大也相继在阿拉斯加、马更些(Mackenzie)三角洲等陆上冻土区中发现了天然气水合物。1974年,前苏联科学家在黑海的沉积物中发现大块的水合物结核。1979年, 国际深海钻探计划(DSDP) 第66、67航次先后在中美海槽的钻孔岩心中发现了海底的天然气水合物。此后,水合物成为许多国家和部分国际组织关注的热点,美国、前苏联、日本、德国、加拿大、英国、挪威等国以及DSDP和随后的大洋钻探计划(ODP)、综合大洋钻探计划(IODP)进行了大量调查研究,先后在世界各地直接或间接地发现了大量天然气水合物产地。2002年春,美国、日本、加拿大、德国、印度等5国合作对加拿大马更些冻土区Mallik 5L-38井的天然气水合物进行了试验性开发, 通过注入约80℃的钻探泥浆,成功地从1200 m深的水合物层中分

收稿日期:2007-08-20;**改回日期**:2007-09-20

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(200410100001等)和国家自然科学基金项目(40473001)联合资助。

作者简介:张洪涛,男,1949年生,研究员,主要从事矿产资源勘查、海洋地质和新能源研究;E-mail:zhongtao@mail.cgs.gov.cn。

离出甲烷并予以回收，同时进行的减压法试验也获得了成功，由此进入到开发利用阶段[3,4]。目前世界各国都在大力开展天然气水合物的开发利用研究，预计在2020年前后能实现陆上冻土区水合物的商业性开发，2030—2050年前后有望实现海底水合物的商业性开发。

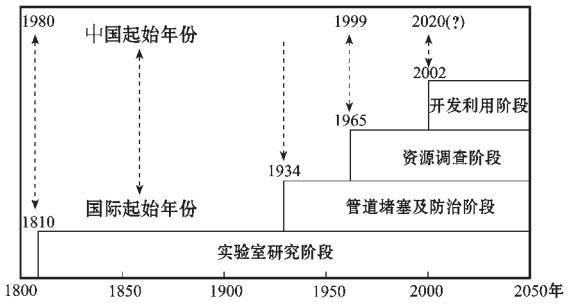


图1 天然气水合物领域发展历程示意图

Fig.1 Diagram showing the development process of gas hydrate

与国外相比，中国在这一领域的调查研究起步较晚，直至1980—1995年前后、西南石油学院、中国石油大学、中国科学院兰州地质研究所等单位才开始在实验室合成水合物研究，1999年广州海洋地质调查局对南海西沙海槽开展试验性的地球物理调查，2002年中国地质科学院矿产资源研究所等单位对青藏高原冻土区开展试验性调查。中国总体上仍处于资源调查阶段的早期，还未进入开发利用阶段。

2 中国天然气水合物资源调查概况

与国外的发展历程相似，中国天然气水合物也起始于实验室研究，然后再扩展到资源调查领域。中国在1999年正式实施试验性调查前还经历了一段短暂的预研究阶段，中国大洋矿产资源研究开发协会于1995年设立了“西太平洋气体水合物找矿前景与方法的调研”课题，这是中国天然气水合物资源领域的第一个调研课题，中国地质科学院矿产资源研究所等单位就天然气水合物在世界各大洋的分布特征及找矿方法进行了分析和总结，并对西太平洋的找矿远景进行了初步评价。随后原地质矿产部于1997年设立了“中国海域天然气水合物勘测研究调研”课题，国家863计划820主题也于1998年设立了“海底气体水合物资源勘查的关键技术”课题，中国地质科学院矿产资源研究所、广州海洋地质调查局、中国科学院地质与地球物理研究所等单位对中国近海天然气水合物的成矿条件、调查方法、远景预测等方面进行了前期预研究，为中国开展天然气水合物调查做好了资料和技术准备。

2.1 南海

南海是西太平洋最大的边缘海，总面积约350×10^4 km^2，依次分布着大陆架、大陆坡和中央海盆，面积分别约168.5×10^4 km^2(占南海的48.14%)、126.4×10^4 km^2(占南海的36.12%)和55.1×10^4 km^2(只占15.74%)。预研究结果表明，南海具备良好的天然气水合物成矿条件和找矿前景，尤以北部陆坡区和南部陆坡区为佳[5]，广州海洋地质调查局还通过复查原有地震资料在西沙海槽、东沙群岛南部、笔架南盆地、南沙断陷盆地等地发现天然气水合物存在的拟海底反射层(BSR)标志[6]。

1999年10月，为执行中国地质调查局的“西沙海槽天然气水合物资源前期调查”项目，广州海洋地质调查局“奋斗五号”调查船开启了中国天然气水合物调查的处女航，在西沙海槽开展高分辨率多道地震调查，由此揭开了中国天然气水合物调查的新篇章。该航次调查结果表明西沙海槽存在多段具有极性发转、上部空白反射、近似平行海底、地震速度局部增高的典型BSR标志，这一结果大大增强了中国决策部门和国内同行在南海寻找天然气水合物的信心。2002年，中国政府正式设立《我国海域天然气水合物资源调查与评价》国家专项，加上2000—2001年间的专项预研究项目，广州海洋地质调查局迄今共在南海北部陆坡完成了19个航次的地质、地球物理和地球化学调查，开展了高分辨多道地震、多波束、浅层剖面、单道地震、地质地球化学取样、海底摄像、热流测量等调查工作。与此同时，广州海洋地质调查局及其合作单位进行了相应的配套研究。通过上述工作，我们初步掌握了南海北部陆坡区天然气水合物的资源潜力及其分布状况，圈定了天然气水合物存在的BSR分布范围，发现了与天然气水合物有关的地质地球化学异常标志，初步预测了天然气水合物的分布范围、厚度并估算了资源量。

2007年5月1日，由中国地质调查局组织、广州海洋地质调查局实施、辉固国际集团公司Bavenit号船具体承担的中国天然气水合物钻探工程在南海北部成功钻获了天然气水合物实物样品，取得了找矿工作的重大突破。钻获水合物样品的具体位置为珠江口盆地南部的神狐地区，水深1230~1245 m，初步结果显示水合物样品采自于海底以下183~225 m处，呈分散浸染状分布，含水合物层段厚18~34 m，水合物饱和度20%~43%，释放出的气体中甲烷含量达99.7%~99.8%。

中国科学院南海海洋研究所也在一些调查航次中发现与天然气水合物有关的异常标志，如在2005年度的公共航次中分别在琼东南盆地和东沙群岛西南部地区发现冷泉碳酸盐结核[7]等标志，邓辉等[8]则通过对1989年采集的地震数据进行处理，解释出南沙海区也存在BSR，显示出这些地区也可能存在天然气水合物。另外，国家973项目“中国边缘海形成演化及重大资源的关键问题”于2001年委托广州海洋地质调查局“探宝号”调查船对南海东北部至菲律宾海盆进行了“973测线”的地震数据采集，通过数据处理也在台湾西南地区发现有BSR[9,10]。

在国际合作方面，1999年2—4月，大洋钻探计划(ODP)的“JOIDES Resolution”号首航南海，开展“东亚季风演变历史在南海的记录及其全球气候意义”的第184航次调查，共在南海完成了6个站位17个钻孔的钻探任务。考虑到该航次的部分站位恰好位于天然气水合物成矿远景区内，我们建议ODP组织及其该航次的首席科学家在184航次搭载天然气水

合物研究,结果在南海北部陆坡的1146站位深部发现孔隙水氯度降低、高甲烷含量和富^{18}O的自生菱铁矿结核等异常标志,显示可能存在天然气水合物[11],宋海斌等[12]则通过地球物理数据的分析处理,认为1144站位附近也存在BSR。2004年6—7月,广州海洋地质调查局与德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所(GEOMAR)组织了"南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究"合作项目,中德两国10个单位26名科学家开展了为期42天的SO-177航次的联合调查,在东沙群岛附近海域发现了世界上最大的冷泉碳酸盐岩——九龙甲烷礁(总面积近430 km^2),并发现了大量与天

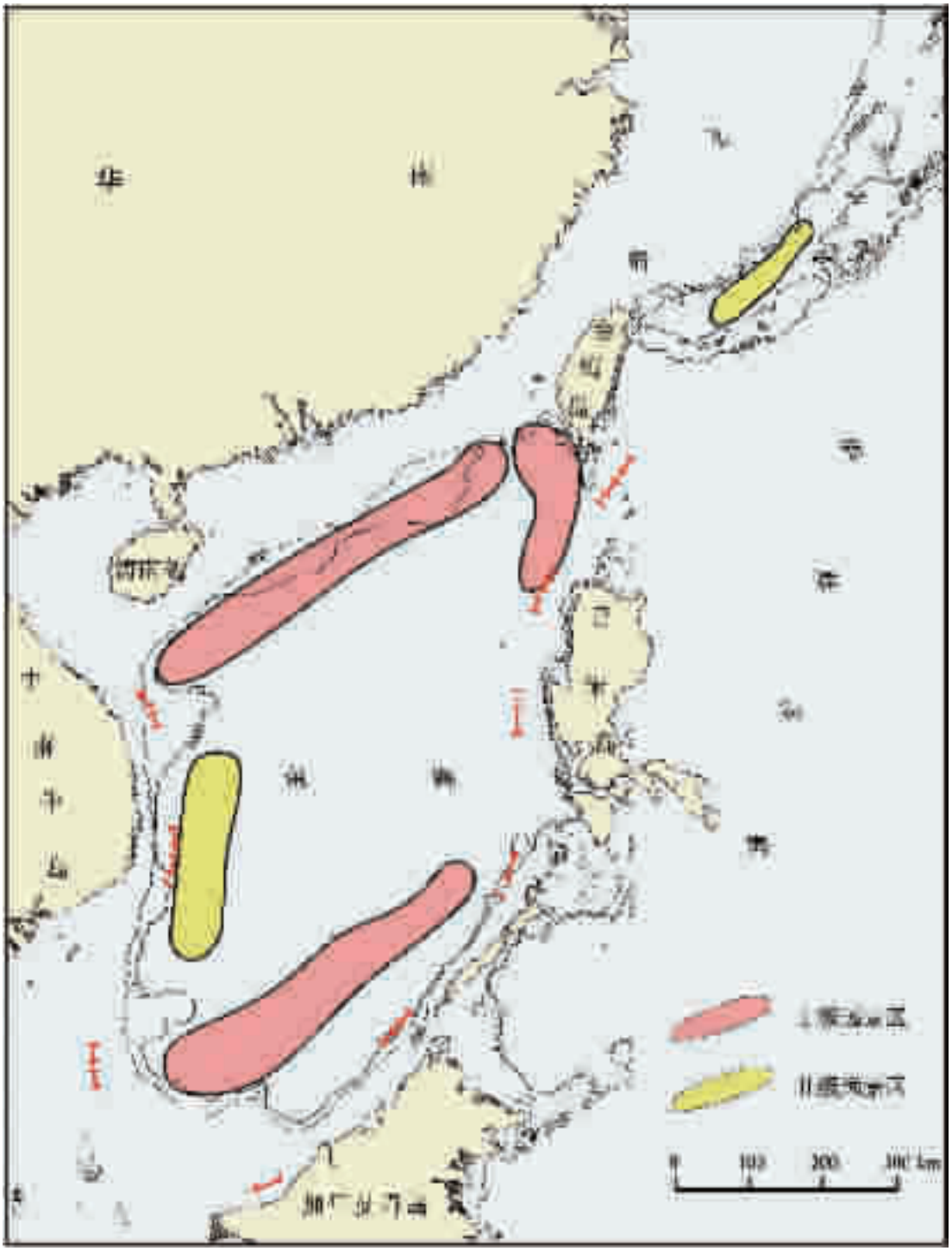


图2　中国部分海域天然气水合物找矿远景区预测图

Fig.2　Map showing prospect areas of gas hydrate in some offshore areas of China

然气水合物有关的地质、地球化学和生物学证据,如极浅的硫酸盐/甲烷界面(SMI)、化能生物群等,显示下部应有天然气水合物存在。

在广州海洋地质调查局对西沙海槽开展试验性调查以前,Hinz等(1989)利用联邦德国地球科学与自然资源研究所(BGR)于1986年7—8月在巴拉望—沙巴外海采集的多道地震资料进行处理分析,在南沙海槽发现有BSR[13],台湾同行也在台湾西南斜坡发现有BSR[14]。

南海是中国天然气水合物成矿条件和找矿前景最好的地区,也是调查研究程度最高的地区,且已取得找矿工作的重大突破。目前的各种调查研究结果显示,南海北部陆坡区和南部陆坡区最有可能找到天然气水合物,西部陆坡区如中建南盆地、万安北盆地也有可能找到天然气水合物(图2)。

2.2 东海

东海是西太平洋沟–弧–盆体系中的一个弧后盆地,主要包括东海陆架、冲绳海槽等单元,总面积约77×10^4 km^2,其中东海陆架约53×10^4 km^2,冲绳海槽约22×10^4 km^2。从水深、海底温度、热流值、沉积厚度、沉积速率、有机碳含量等区域地质条件来看,冲绳海槽特别是其西南斜坡具有良好的天然气水合物形成条件。东海海域迄今尚未开展过针对天然气水合物的专门调查,但杨文达等[15]、孟宪伟等[16]和方银霞等[17]在2000年就利用原来的地球物理资料进行分析和处理,在冲绳海槽发现与天然气水合物有关的BSR标志。最近,唐勇等[18]收集了冲绳海槽附近共45条测线的多道地震数据,经过AVO、波形反演等特殊处理技术,在冲绳海槽北部、中部和南部的16条地震剖面上发现了BSR,其中冲绳海槽中部和南部的BSR分布面积较广且比较典型。此外,Sakai等[19]于1990年报道了在冲绳海槽发现CO_2型水合物。由此可见,冲绳海槽特别是其中南部也可能存在天然气水合物(图2)。

2.3 陆地冻土区

中国多年冻土面积达215×10^4 km^2,占国土总面积的22.4%[20],是仅次于俄罗斯、加拿大的世界第三冻土大国。冻土区主要分布于青藏高原、大兴安岭及其他高山地区(图3)。根据原有地质和冻土资料,中国科学院兰州冰川冻土研究所等单位的有关人员[21–24]对青藏高原天然气水合物的形成条件进行了初步研究和预测,并建议有关部门对青藏高原冻土区开展相应的调查研究。中国地质调查局于2002年开始先后设立了4个调查研究项目,即"青藏高原多年冻土区天然气水合物地球化学勘查预研究"、"青藏铁路沿线天然气水合物遥感识别标志研究"、"我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查"和"陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究",国家自然科学基金委员会也于2005年设立了"青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成条件探讨"的面上科研项目。为完成上述任务,中国地质科学院矿产资源研究所等单位对中国冻

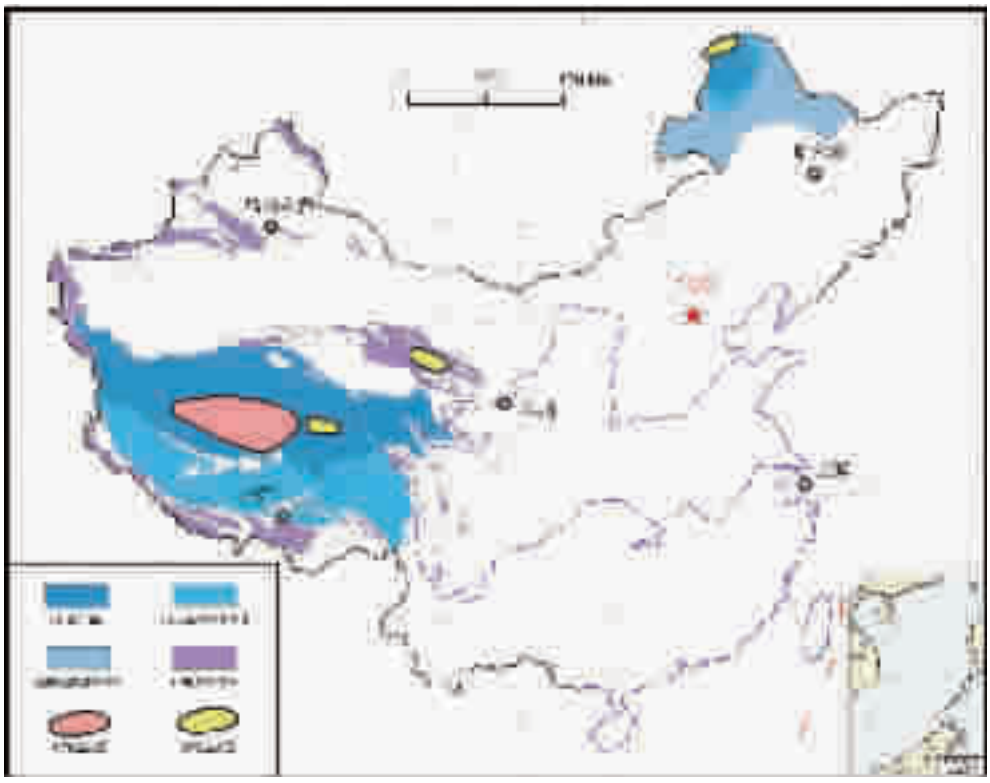


图3 中国冻土区天然气水合物找矿远景区预测图(冻土分布范围据参考文献[20])

Fig.3 Map showing prospect areas of gas hydrate in permafrost zones of China (permafrost distribution from Zhou et al.[20])

土区特别是青藏高原冻土区开展了地质、地球物理、地球化学和遥感等方面的探索性调查和评价工作,初步调查研究结果显示,青藏高原特别是羌塘盆地具备良好的天然气水合物成矿条件和找矿前景,其次是祁连山木里地区、东北漠河盆地和青藏高原的风火山地区等(图3),并在祁连山木里地区的冻土层内发现有连续逸出的可燃气体(甲烷),有可能在其稳定带内(171~574 m)形成天然气水合物[25]。

2.4 国际海底区域

迄今所发现的海底天然气水合物绝大多数均位于大陆边缘,也即各沿岸国家的领海或专属经济区内,而浩瀚的国际海底究竟有无天然气水合物目前尚不清楚,国际上也很少开展此类研究。为了尽快查明国际海底天然气水合物的成矿条件和找矿前景,在新一轮的"跑海圈地"运动中占据有利位置,中国大洋矿产资源研究开发协会于2001年设立了"太平洋国际海底天然气水合物成矿地质背景与找矿远景区预选研究"的探索性研究课题,由中国地质科学院矿产资源研究所等单位承担。课题组先后查阅了太平洋和南极近海地区大量地质、地球物理、地球化学和地热资料,特别是DSDP和ODP各航次的调查报告,复查了中国在CC区调查时所获得的地震剖面,并开展了部分样品的分析测试。在这些资料的基础上,课题组对太平洋和南极近海地区天然气水合物的成矿地质背景、异常标志进行了综合分析,认为南极近海地区有可能是国际海底找矿前景最好的地区,太平洋国际海底的局部地区也有较好的找矿前景,并圈出南极近海的威尔克斯陆缘区、中太平洋海山区内的沉积盆地和西太平洋Pigafetta盆地等供大洋协会下一步开展调查时的决策参考。但迄今为止,中国还没有开展国际海底天然气水合物的调查工作。

3 中国天然气水合物研究概况

3.1 科研项目

自1995年中国大洋矿产资源研究开发协会设立"西太平洋气体水合物找矿前景与方法的调研"课题以来,中国各相关部门开始大力重视天然气水合物的调查研究,并逐渐加大资助力量,到目前已形成科学技术部、国土资源部、自然科学基金委员会、中国科学院为龙头,其他部门为辅助的项目体系。总体上说,科学技术部设立的项目偏重于技术研发类,国土资源部偏重于资源调查类,自然科学基金委员会和中国科学院则偏重于基础研究类。

科学技术部的项目以国家863计划为主,"九五"期间863计划海洋探查与资源开发技术主题(820主题)就设立了前述的"海底气体水合物资源勘查的关键技术"前沿探索性课题。"十五"期间863计划加大了资助力度,为了解决"我国海域天然气水合物资源调查与评价"专项中的诸多关键技术难题,于2001年设立了包括地震识别技术、地球化学探测技术、资源评估技术和保真(保压、保温)取样技术在内的"天然气水合物探测技术"课题,由广州海洋地质调查局等单位承担。"十五"后期863计划又分别设立了"天然气水合物深水浅孔保温保压取心钻具的研制"(由国家海洋局第一海洋研究所承担)和"南海北部海域天然气水合物首钻目标优选关键技术研究"课题(由广州海洋地质调查局承担)及其3项青年基金。最近863计划已将"天然气水合物勘探开发关键技术"列为"十一五"的重大项目,分别就地震、电磁、热流、流体地球化学、原位地球化学、保真取样器、钻探取心、实验模拟和开采等方面的关键技术进行研发。另外,科学技术部在国际科技合作等计划中也有少量与天然气水合物相关的项目。

国土资源部的科研项目以资源类为主,目前最重要的当属《我国海域天然气水合物资源调查与评价》专项中的3个配套科研项目,每年都投入不少资金开展技术方法、环境效应和资源战略评价等方面的研究,由广州海洋地质调查局、青岛海洋地质研究所、国家海洋局、中国地质科学院、中国科学院、中国地质大学、南京大学等单位承担。中国地质调查局在"国土资源大调查"项目中对天然气水合物也给予了大力支持,先后设立了多个项目对中国海域和冻土区开展天然气水合物的调查研究。国家海洋局也设立有类似的资源和环境类科研项目。此外,国土资源部还在其他项目中对天然气水合物予以支持,如在百人计划中就设立有"天然气水合物中烃类气体地球化学异常标志及其成生机制研究"等项目。最近公布的《国土资源部中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中将"海域天然气水合物评价与勘查开发关键技术"列为国土资源部十个重大科技专项计划之一,天然气水合物的调查研究将会得到进一步的重视和加强。

国家自然科学基金委员会自1998年开始设立"气体水合物生成过程机理及其分形理论的研究"(中国科学院广州能源研究所舒碧芬承担)以来,至2006年共设立了与天然气水合物有关的项目43个,其中1998年1项,1999年1项,2000年4项,2001年6项,2002年4项,2003年8项,2004年1项,2005年10项,2006年8项,除2004年外基本上呈逐年增加的趋势。内容涉及到水合物的物性、资源、抑制、储运、开采、环境等方面的基础研究和应用基础研究。

中国科学院也大力重视天然气水合物的研究工作,于2004年组织了跨研究所、跨学科的优势研究力量组建了"中国科学院广州天然气水合物研究中心",并先后设立了"天然气水合物勘探开采模拟研究"、"天然气水合物开采中若干关键问题的研究"、"大陆坡天然气水合物形成的地质条件与成藏机理研究"、"海底天然气渗漏系统水合物成藏机制及识别方法"等知识创新重要方向项目4个、百人项目3个以及其他项目多个。研究内容涉及到天然气水合物合成、物性测试、开采模拟、成藏机理、资源评价等领域。

除上述四大部委外,三大油公司、教育部、中国工程院以及前述的中国大洋矿产资源研究开发协会等也先后设立过与天然气水合物有关的科研项目。

3.2 研究文献

笔者用文献计量学(Bibliometric)方法对CNKI(National Knowledge Infrastructure,国家知识基础设施)文献数据库进

行了检索和统计分析,以便了解中国天然气水合物的历史演变及其发展趋势。CNKI数据库是由清华大学、清华同方发起并创建的世界上最大的中国期刊数据库,共收录中国7486种期刊自1994 年 (部分刊物回溯至1979年甚至回溯至创刊号)至今的各种文献。笔者于2007年6月用"天然气水合物+气体水合物+甲烷水合物+气水合物" 的检索式对题名进行检索,共在CNKI数据库中检索出876篇文献,首篇文献出现于1982年的《化工学报》,是西南石油学院贺承祖[26]的"气体水合物生成温度的下降与阻止剂水溶液冰点的下降之关系"。第二篇文献为1990年《地球科学进展》上的"固体天然气水合物的成功合成", 以消息报道的形式报道了中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室与莫斯科大学列别琴科博士合作成功合成了固体水合物。然后从1994年开始每年都有水合物文献发表,并呈逐年增加的趋势(图4)。

通过对这876篇文献的详细分析发现,绝大部分都是根据国外文献编译的综述性文章,特别是2001年以前更是这样,涉及到中国海域或者冻土区的文献很少。根据笔者的不完全统计,姚伯初[6]于1998年发表的"南海北部陆缘天然气水合物初探"一文可能是针对中国海域存在天然气水合物的最早文献,而徐学祖[21]等于1999年发表的"青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议" 则是中国冻土区的首篇文献。自2001年以后涉及中国海域和冻土区水合物的文献逐渐多了起来,特别是最近几年根据实际调查成果撰写的论文日渐增加,说明中国天然气水合物的研究也在不断深入和提高。

2005年,郑军卫等[27]也用文献计量学方法对国际上的科学引文数据库(SCI)、INSPEC 数据库(ISI会议录)和DII数据库(德温特专利索引)进行了检索和统计分析,1995—2005年10月间共有天然气水合物方面的SCI论文1968篇、会议论文468 篇和专利580 件,且呈逐年上升趋势。在这10年间,中国学者发表的SCI论文83篇, 占全球的4.22%, 居世界第8位,INSPEC会议论文15篇,占全球的2.35%,居世界第9位,DⅡ专利13件,占全球的2.24%,居世界第6位。尽管在各项排名中中国均进入到前10名,但无论是论文数量、引用率,还是专利数量均与美国、日本等强国都有较大差距。从年际变化上来说,2001年以前只有寥寥数篇,但2001年以后增长较快(图4),这与近几年中国比较重视天然气水合物研究的事实一致。中国学者在SCI刊物上最早发表水合物论文的可能是中国石油大学的Du Y-H和郭天民先生, 他们于1990年就在化学工程科学(Chemical Engineering Science)杂志上发表了"甲醇体系中水合物形成条件预测"一文[28]。

3.3 研究成果

2004年,郭天民等[29]曾对中国天然气水合物领域的研究成果进行了初步总结,这里笔者将按资源调查、基础理论和技术装备等3方面进行简单的总结。

在资源调查方面, 通过近8年的工作我们已在南海北部陆坡的4个海区、南沙海槽和东海冲绳海槽等地发现天然气水合物的地球物理证据和地质地球化学异常标志,初步证实这些海区应有天然气水合物存在,特别是最近在南海北部神狐地区成功钻获了水合物的实物样品,显示出良好的找矿前景,并对陆上冻土区开展了探索性调查,显示羌塘盆地等地区有可能存在天然气水合物。同时,笔者也对中国海域和陆上冻土区天然气水合物的资源潜力进行了初步评价,结果显示中国天然气水合物的资源量接近于中国常规石油的资源量,具有良好的资源远景。

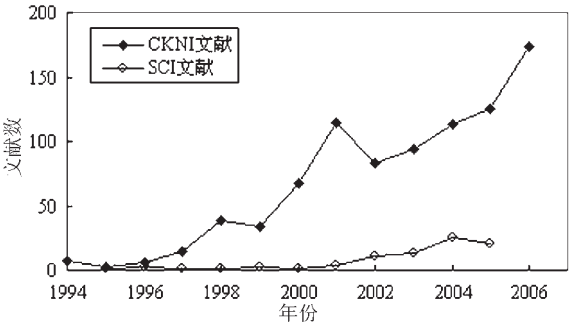


图4 中国天然气水合物文献年际变化图(中国学者发表的SCI文献数据引自参考文献[27])

Fig.4 Yearly change in literature of gas hydrate in China (data of papers in the Science Citation Index published by Chinese researchers from Zheng et al. [27])

在基础理论方面,中国的研究主要集中在水合物的相平衡(热力学)、形成与分解动力学、制冷剂热传递等方面[29]。在相平衡方面,中国学者陈光进等[30]基于水合物生成可分为二阶段的理论提出了一个水合物生成条件预测模型,对国际上广泛使用的van der Waals-Platteeuw模型进行了修正和扩展,被国际上命名为Chen-Guo模型, 这一模型目前已成功应用于含醇含盐抑制剂体系、含氢气体系水合物的生成条件以及气-液-液-水合物多相平衡体系闪蒸的计算。最近广州能源所首次报道了甲烷水合物的玻璃体导热特性,证实了国际上对这一特性的猜想,为评估天然气水合物资源与环境间的相互影响提供了重要数据。

在技术装备方面,通过国家863计划"天然气水合物探测技术"课题的研究,在天然气水合物地震采集技术、地震识别处理技术、船载地球化学探测系统和保真取心钻具等方面取得了显著进展,初步形成了适合中国海域特点的天然气水合物探测技术系列,共获得国家发明专利7项、国家实用新型专利7项、国家计算机软件著作权登记证书8项。中国科学院重要创新方向性项目"天然气水合物勘探开采模拟研究"则研制了具有国际先进水平的天然气水合物合成、物性测试和开采模拟等装置,共申请8项国家发明专利。此外,中国也在水合物开采技术、储运技术、"暖冰"(水合物)储能技术和气体分离技术等领域开展了一系列探索性研究。

4　中国天然气水合物调查研究的现存问题

如前所述,中国正处于资源调查阶段的早期,尽管十余年的调查研究取得了一系列进展,但由于起步晚、基础差,目前存在的问题仍然较多,主要有:

(1)调查工作程度较低。尽管1999年开始的资源调查在南海、东海和青藏高原等地发现了许多地球物理和地球化学异常标志,但总体上仍处于起步阶段,调查程度较低。即使调查程度相对较高的南海海域目前仍处于普查阶段,而东海和陆上冻土区则仍处于预测阶段或者是预查阶段。

(2)研究工作相对薄弱。在科研领域,尽管中国已投入了不少人力物力财力开展各项研究工作,初步形成了天然气水合物的研究热潮,但科研水平相对较低,如每年中国都发表有大量的论文,但多为综述性文章,结合中国实际情况的很少。基础理论研究方面也往往重复国外的研究成果,原创性贡献不多。实际上,南海海域地处中低纬度带,是先拉张后挤压的边缘海盆地,且同时具有离散型(被动型)和会聚型(主动型)大陆边缘,有别于其他海区,而青藏高原则为中低纬度带上的高山冻土,也有别于极地冻土。因此,南海和青藏高原天然气水合物的成矿机理和成藏机制均有其特殊之处,对这两个地区开展找矿迫切需要相关理论的指导。

(3)技术装备有待发展。尽管国家863计划等资助了天然气水合物技术装备的研制并取得了可喜的进展,但目前研制成功的调查技术和装备与国外先进水平相差较远,如目前采用的地震勘探和地球化学技术较为单一,未能系统化地开展全方位多层次的立体探测。另外,由于中国尚无深海钻探船,目前只是开展了相关技术与装备的前期研制,无法满足实际钻探所需,只能租借外国钻探船开展钻探。开发利用、储运等技术仅仅开展了探索性的实验研究或模型研究,离实际利用还有很长的距离。

天然气水合物的勘探开发是一项大型的、高难度的综合工程,涉及到海洋工程、勘探、开发,乃至材料、通讯、信息等众多技术领域,需依靠各领域的专家共同努力,开发出一系列高新技术装备。只有在技术装备上缩短与国外先进水平的差距,才有可能使中国天然气水合物的找矿和开发取得突破性进展,并加速其勘探开发进程。

5　中国天然气水合物发展展望

国际上目前天然气水合物调查研究的热点正有从资源调查逐渐向开发利用转移的发展趋势,不少发达国家都大力重视天然气水合物的开发利用研究,如美国要求在2015 年前后实现商业性开采,日本和印度则要求在2010年前后实现商业性开采。不少学者也对天然气水合物的开发利用前景进行了科学预测,如Grauls[31]认为2015年后有可能实现冻土区水合物的商业性开发,2030年后实现海底水合物的商业性开发,而Bil[32]则认为这一时间段分别在2015年和2060年。由此可见,大家对2015年前后有可能实现冻土区水合物的商业性开采看法比较一致,但何时能实现海底水合物的开发分歧较大。

中国目前正处于资源调查阶段的早期,资源分布情况不甚清楚,所估算出的资源量也仅仅是理论资源量(冻土区)、推测资源量(东海)或潜在资源量(南海),与国外一些著名水合物产地相比差距甚大,离开发利用还有不少距离。但随着中国有关部门的大力重视, 特别是国务院于2006年1月先后颁发的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》和《国务院关于加强地质工作的决定》均大力重视天然气水合物的调查研究工作,前者将"天然气水合物开发技术"列为22项前沿技术之一,重点研究天然气水合物的勘探理论与开发技术、天然气水合物地球物理与地球化学勘探和评价技术、突破天然气水合物钻井技术和安全开采技术,后者也将 "天然气水合物等非常规能源资源的调查评价和勘查"列为地质工作的主要任务。因此,中国天然气水合物的调查研究将会得到进一步加强和重视,调查研究进程将会进一步加快,并在不久的将来过渡到试生产阶段和商业性生产阶段。

参考文献(References):

[1] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there [J]. Earth-Science Reviews, 2004, 66: 183-197.

[2] Sloan E D. Conference overview[C]//Sloan E D, Happel J, Hnatow M A (eds.). International Conference on Natural Gas Hydrates. Annals of the New York Academy of Sciences, 1994, 715: 1-23.

[3] Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program [C]//Dallimore S R and Collett T S (eds.). Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1-36.

[4] 祝有海. 加拿大马更些冻土区天然气水合物试生产进展与展望[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 513-520.
Zhu Youhai. Production test from gas hydrate of Mackenzie permafrost, Canada[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 513-520(in Chinese with English abstract).

[5] 吴必豪, 马开义, 陈邦彦, 等. 西太平洋天然气水合物矿藏找矿远景刍议[J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊): 741-744.
Wu Bihao, Ma Kaiyi, Chen Bangyan, et al. Discussion on prospecting of gas hydrate resources in the Western Pacific [J]. Mineral Deposits, 1998, 17 (Supp.): 741-744(in Chinese).

[6] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4): 11-18.
Yao Bochu. Preliminary exploration of gas hydrate in the northern margin of the South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1998, 18(4): 11-18(in Chinese with English abstract).

[7] 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 海底天然气渗漏活动的新证据 [J]. 科学通报, 2006, 51(9):

1065−1072.
Chen Zhong, Yan Wen, Chen Muhong, et al. Discovery of seep carbonate nodules as new evidence for gas venting on the northern continental slope of South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(10):1228−1237(in Chinese).

[8] 邓辉, 阎贫, 刘海龄. 南沙海域天然气水合物地震特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4):89−94.
Deng Hui, Yan Pin, Liu Hailing. Seismic characteristics of gas hydrate in the Nansha waters [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(4):89−94(in Chinese with English abstract).

[9] 邓辉, 阎贫, 刘海龄. 台湾西南海域似海底反射分析[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(2):79−85.
Deng Hui, Yan Pin, Liu Hailing. An analysis on bottom simulating reflectors in southwest Taiwan sea area [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24 (2):79 −85 (in Chinese with English abstract).

[10] 丁巍伟, 陈汉林, 王渝民, 等. 台湾增生楔天然气水合物的地震特征[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(1):90−96.
Ding Weiwei, Chen Hanlin, Wang Yumin, et al. Geophysical features of gas hydrate in Taiwan accretionary prism, South China Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(1): 90−96(in Chinese with English abstract).

[11] Zhu Y, Huang Y, Matsumoto Y, et al. Geochemical and stable isotopic compositions of pore fluids and authigenic siderite concretions from Site 1146, ODP Leg 184: implications for gas hydrate [C]//Prell W L, Wang P X, Blum P, et al (eds.). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. 2003, 184:1−15[Online]. Available from World Wide Web: http://www−odp.tamu.edu/ publications/184_SR/202/202. htm.

[12] 宋海斌, 耿建华, Wang H K, 等. 南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5):687−694.
Song Haibin, Geng Jianhua, Wong H K, et al. A preliminary study of gas hydrates in Dongsha region north of South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44 (5):687−695(in Chinese with English abstract).

[13] Hinz K, Fritsch J, Kempter E H K. Thrust tectonics along the north−western continental margin of Sabah/Borneo[J]. Geologische Rundschau, 1989, 78:705−730.

[14] Chi W C, Donald L R, Liu C S, et al. Distribution of the bottom−simulating reflector in the Offshore Taiwan Collision Zone [J]. TAO, 1998, 9 (4):779−794.

[15] 杨文达, 陆文才. 东海陆坡冲绳海槽天然气水合物初探[J]. 海洋石油, 2000(4):23−28.
Yang Wenda, Lu Wencai. Preliminary study on gas hydrate in the continental slope and Okinawa Trough in the East China Sea [J]. Offshore Oil, 2000 (4):23−28(in Chinese with English abstract).

[16] 孟宪伟, 刘保华, 石学法, 等. 冲绳海槽中段西陆坡下缘天然气水合物存在的可能性分析[J]. 沉积学报, 2000, 18(4):629−633.
Meng Xianwei, Liu Baohua, Shi Xuefa, et al. Possibility of gas hydrate occurring in the western Lower Slope of Mid−Okinawa Trough [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18 (4): 629−633(in Chinese with English abstract).

[17] 方银霞, 金翔龙, 杨树锋. 冲绳海槽西北边坡天然气水合物的初步研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(增刊):49−52.
Fang Yinxia, Jin Xianglong, Yang Shufeng, et al. Gas hydrate study of the northwest slope margin of the Okinawa Trough [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22 (Supp.):49−52 (in Chinese with English abstract).

[18] 唐勇, 方银霞, 高金耀, 等. 冲绳海槽天然气水合物稳定带特征及资源量评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4):79−84.
Tang Yong, Fang Yinxia, Gao Jinyao, et al. Characteristics of gas hydrate stability zone and evaluation of resources in Okinawa Trough [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25 (4):79−84(in Chinese with English abstract).

[19] Sakai H, Gamo T, Kim E S, et al. Venting of carbon dioxide−rich fluid and hydrate formation in Mid−Okinawa Trough backarc basin [J]. Science, 1990, 248:1093−1096.

[20] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社, 2000:450.
Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Permafrost in China [M]. Beijing:Science Press, 2000:450 (in Chinese with English abstract).

[21] 徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议[J]. 地球科学进展, 1999, 14 (2):201−204.
Xu Xuezu, Cheng Guodong, Yu Qihao. Research prospect and suggestions of gas hydrates in permafrost regions on the Qinghai−Tibet Plateau [J]. Advances in Earth Science, 1999, 14 (2): 201−204 (in Chinese with English abstract).

[22] 张立新, 徐学祖,马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1/2):22−26.
Zhang Lixin, Xu Xuezu, Ma Wei. Permafrost and gas hydrates in the Qinghai−Tibet Plateau [J]. Natural Gas Geoscience, 2001, 12 (1/2):22−26(in Chinese with English abstract).

[23] 黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测[J]. 地质通报, 2002, 21(11):794−798.
Huang Peng, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. Prospect evaluation of natural gas hydrate resources on the Qinghai−Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (11):794−798 (in Chinese with English abstract).

[24] 陈多福,王茂春,夏斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1):165−172.
Chen Duofu, Wang Maochun, Xia Bin. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai−Tibet Plateau permafrost [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48 (1):165−172(in Chinese with English abstract).

[25] 祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2):58−63.
Zhu Youhai, Liu Yaling, Zhang Yongqin. Formation conditions of gas hydrates in permafrost of the Qilian Mountains, Northwest China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (1/2):58−63(in

Chinese with English abstract).

[26] 贺承祖. 气体水合物生成温度的下降与阻止剂水溶液冰点的下降之关系[J]. 化工学报, 1982, (4):383-387.
He Chengzu. The relationship between freezing point depression of aqueous inhibitor solution and depression of gas-hydrate formation temperature [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering. 1982, (4):383-387(in Chinese with English abstract).

[27] 郑军卫, 史斗. 从文献计量角度看国际天然气水合物研发态势[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6):825-829.
Zheng Junwei, Shi Dou. An analysis of status and trends of the international natural gas hydrate research and development on bibliometrics [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6):825-829(in Chinese with English abstract).

[28] Du Y H, Guo T M. Prediction of the hydrate formation for systems containing methanol [J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45 (4):893-900.

[29] Tianmin Guo, Bihao Wu, Youhai Zhu, et al. A review on the gas hydrate research in China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41:11-20.

[30] Chen G J, Guo T M. A new approach to gas hydrate modeling [J]. Chemical Engineering Journal, 1998, 71:145-151.

[31] Grauls D. Gas hydrate: importance and applications in petroleum exploration [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18:519-523.

[32] Bil K J. Economic perspective of methane from hydrate [C]//Max M D (ed.). Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. Dordrecht:Kluwer Academic Publisher, 2000. 349-360.

Gas hydrate investigation and research in China: Present status and progress

ZHANG Hong-tao[1], ZHANG Hai-qi[1], ZHU You-hai[2]

(1. *China Geological Survey, Beijing* 100011, *China*;
2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*)

Abstract: The gas hydrate-related activities may largely go through four development stages: laboratory curiosity, pipe clogging and its prevention and control, resource investigation and exploitation and utilization. At present China is in the early phase of the resource investigation stage. Since 1999, scientists of China have carried out gas hydrate investigations and research in the South China Sea, East China Sea, offshore permafrost zones and international sea-floor areas and found a number of geological, geophysical and geochemical anomalies of gas hydrate and successfully collected samples of gas hydrate in the Shenhu area in the northern South China Sea. Then a major breakthrough was made in mineral exploration and good prospects are shown in the area. However, at present there are still some problems such as a lower exploration level and relatively backward exploration techniques and equipment. With more importance attached to gas hydrate by China, gas hydrate investigation and research in China will be further accelerated and in the near term the stage of resource investigation will pass into the stage of trial production and the stage of commercial production.

Key words: gas hydrate; resources; South China Sea; permafrost

---

About the first author: ZHANG Hong-tao, male, born in 1949, senior researcher, mainly engages in the study of mineral resources, marine geology and new energy; E-mail: zhongtao@mail.cgs.gov.cn.