

气体水合物的研究现状与科学问题

Present State in the Research of Gas Hydrates and Its Scientific Problems

赵生才

(中国科学院科学政策局, 研究员 北京 100864)

气体水合物 (Gas Hydrates) 被科学家喻为“易燃冰”或“可燃冰”。已有研究成果表明: (1) 这是一种优质、洁净的未来能源; (2) 蕴藏量极大, 是现有地球化石燃料 (石油、天然气和煤) 总碳量的 2 倍, 前景诱人; (3) 我国广大海域有气体水合物形成的地质环境和条件; (4) 作为替代能源, 对我国社会、经济发展和国家安全具有重要的战略价值。

鉴于我国加入 WTO 后国际竞争的加剧以及气体水合物作为未来接替能源对我国社会经济发展、生态环境协调、能源结构优化和国家安全等层面上的重大战略影响, 气体水合物研究与开发无疑是一个极具前瞻性和战略性的重大课题。

一、气体水合物——能源载体和气候要素

气体水合物是由气体和水形成的一种冰状白色固态晶体, 水分子一般通过氢键合成多面体笼, 笼中包含有客体的天然气分子。这种具笼形构造的气体水合物常在特定的高压低温条件下形成并稳定存在, 广泛发育在浅海底层沉积物和深海大陆斜坡沉积地层以及极地地区的永久冻土层中。

科学家预测, 在全球范围内广泛存在着几乎是

纯甲烷的气体水合物资源, 蕴藏量极大。其含碳量约为 10×10^{18} 克, 为全球已知化石燃料矿藏石油、天然气和煤总含碳量 5×10^{18} 克的 2 倍。这无疑是一个激动人心的惊人发现。科学界普遍认为, 气体水合物终将成为人类未来极具潜力的洁净能源。

研究表明, 沉积物中气体水合物若由于周围环境变化, 使其敏感的温度—压力平衡条件遭遇破坏时, 会导致气体水合物解体和逃逸, 进而影响全球气候变化。有科学家推测, 全球性温度增高可能是大量气体水合物因失稳而造成的后果。气体水合物研究有可能成为理解全球气候变化的一把钥匙。

二、艰辛的认识和探索历程

人们真正认识气体水合物, 经历了漫长艰辛的历程。1810 年, 英国皇家学会学者 Humphry Davy 在实验室首次人工合成了氯气水合物。随后其它气体水合物相继合成, 并引起了各国化学家对其化学组分和物质结构的激烈争论。但历经百年, 人们对气体水合物在自然界的存在仍知之甚少。20 世纪初, 由于输气管道、气井及一些工厂设备内常形成沉积物而造成堵塞, 经研究才认识到堵塞乃气体水合物

现形式有: 水资源时空分布不均、水土流失严重、水资源利用效率低下、水资源合理配置的调控能力弱以及水分区域循环损失严重等。生态用水作为一个动态的过程, 可以调整区域内部以及区域间的水资源分布, 使之在时空分布上更趋于合理化和集约化, 同时可以保证和提高水土保持生态环境建设的不同对象的水资源利用效率, 促进区域水分循环的良性演变。因此, 生态用水在水土保持生态环境建设中具有重要的地位, 是该项工程的重要环节。

4. 合理的生态用水是水土保持生态环境建设的实现目标 生态用水 (数量、分布) 不只是一个动态范畴, 同时也是一种可持续发展状态。上文指出, 生态用水的调节是一个动态过程。水土保持生态环境建设所调整的正是生态环境中不同要素间的相互关系, 所要实现的目标是各要素间的合理整合与协调发展。生态用水作为一种可持续发展状态, 实际是水资源在生态环境各要素间的合理配置的一种格局, 是水土保持生态环境建设的一种健康模式。所以, 合理的生态用水同时也是水生保持生态环境建设的实现目标。

到目前为止, 生态用水及其相关理论仍处于初

级阶段, “生态用水”作为一个科学概念, 尚无明确定义。而且, 生态用水在国际学术界仍视为水资源调配问题。但由于我国特殊的水土流失以及生态环境问题, 生态用水在国内已受到了多方面的重视, 而且在海滦河流域以及新疆等地区取得了一定的成果。另外, 国家自然科学基金委员会也资助了一些相关领域的研究课题。总之, 生态用水在水土保持生态环境建设中具有重要的意义, 这一点勿容置疑。但是作为一个新课题, 其基本概念、理论构架以及实践控制等还有待于进一步研究和发展。

参考文献

- [1] 贾保全, 慈龙骏. 新疆生态用水量初步估算. 生态学报, 2000(2)
- [2] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报, 2000(4)
- [3] 李令跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系. 水科学进展, 2000(3)
- [4] 樊自立, 马映军. 干旱区水资源及合理开发利用的几个问题. 干旱区研究, 2000(3)
- [5] 王建生, 徐子恺, 姚建文. 单位水量粮食生产能力分析. 水科学进展, 1999(4)

(责任编辑 肖庆山)

所致。至 40 年代,科学家获得了不同组分气体水合物的温—压平衡曲线。1946 年苏联学者 N. H 斯特里诺夫从理论上做出结论,认为自然界有可能存在气体水合物矿藏。从此,自然界存在的气体水合物进入专家学者的科学视野。60 年代,N. H 斯特里诺夫等一批苏联科学家大胆预测天然气可以固体形式存在于地壳中并形成气体水合物矿藏。1972 年,终于证实位于北极圈地区的麦索雅哈气田(1968 年发现)是一个典型的气体水合物矿藏。随之,苏、美等国科学家的各种有关气体水合物基础研究的理论著作相继问世。

20 世纪 60 年代在全球出现大规模研究、探测和勘探气体水合物矿藏的热潮。至 90 年代中期,以 DSDP 和 ODP 两大计划为标志,美、俄、荷、德、加、日等诸多国家探测天然气水合物的目标和范围已覆盖了世界上几乎所有大洋陆缘的重要潜在远景地区以及高纬度极地永久冻土地带。天然气水合物研究和普查勘探已进入一个崭新阶段,商业化开发成为重要目标。

此外,鉴于天然气水合物敏感而脆弱的稳定性,科学家对其可能对全球气候变化的影响以及可能引发的海洋地质灾害也给予了特别的关注。

三、基础研究硕果累累, 理论体系基本形成

1. 气体水合物的组成、结构及其类型已有完整概念 实验研究表明,天然状态气体水合物是由水和天然气组成的一种多呈白色的似冰状结晶物。气体水合物中封存的天然气基本上是 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 等烃类同系物,以及 N_2 、 CO_2 、 H_2S 等非烃分子,但多以甲烷为主,甚至有纯甲烷水合物。甲烷水合物普遍存在方式是构成 $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$,理论值为 1:16.4。水分子可形成多面体骨架,内含孔洞并被气体分子所占据。按其“笼型结构”的物化特征被划分为 I 型(立方体心结构)和 II 型(菱形立方结构)两种结构,有时也出现中间结构 H 型(六方晶系)形式,3 种晶体结构与其不同的成因密切相关。经研究证实,大多数水合物处于“气—水合物—水(冰)”三相平衡之中。

2. 气体水合物的形成条件、稳定性和相平衡 普遍认为,气体水合物的形成和沉积环境、岩石成因、地下流体、矿化度和地温梯度等因素密切相关。气体水合物的稳定性主要取决于所处环境的温度、压力以及气体的组成,因而往往会因其组分不同而处于不同的温/压条件下,也即处在一种对环境条件敏感的平衡状态。实际勘查、取样分析及实验研究业已勾画出几乎所有重要产出地区的气体水合物相图和温—压平衡曲线,并阐述了各种可能的影响因素。气体水合物一般仅分布于岩石圈浅部(地表以下不超过 2 000 米),在大陆只出现在极区永冻土地带,海洋环境中则可遍及底层水温为 -2°C (极区海底水温 0°C) 的广阔海域,其中水深超过 300~500 米的大陆斜坡带和陆棚区以及极地永冻带为最有利地区。气体水合物一般呈碎块状、条带状、断续层状、团块状等形态分布,明显受沉积条件和岩性控制。

3. 气体水合物形成的动力学、成因类型及地质

模式 Bernard、Kvenvolden 等将气体水合物划分为热成因、微生物成因和二者混合成因 3 种,认为 R 值 ≥ 100 ,甲烷 $\delta^{13}\text{C} \leq -60\text{‰}$,则视为微生物成因; R 值 ≤ 100 ,甲烷 $\delta^{13}\text{C} \geq -60\text{‰}$,视为热成因;介于两者之间的,则可用混源甲烷来解释。其形成与冰冻成岩作用有相似之处,两者的动力学和物理化学过程基本一样,从其形成特性上可以把气体水合物看成是一种特殊的冰岩类型。

4. 气体水合物生成带的时间尺度、气体运移及圈闭类型 人们已发现的气体水合物生成带或水合物矿藏,似乎并不具有久远(地质史尺度)的历史。在西伯利亚、马更些三角洲、阿拉斯加北部斜坡等北极地区已查明气体水合物仍在大量形成;在海洋绝大部分海底的浅部大多发育有或赋存着气体水合物,这表明目前发现的气体水合物生成带或矿藏都是地质历史晚期发生的。出现在海底或海底附近浅部由微生物作用而形成的甲烷等烃类气体会沿断层、节理或底辟构造向上部运移,但运移距离可能很短;且只能在稳定带内进行。当气体水合物的物质来源是来自下伏烃藏的深变质气时,则会发生沿断层等通道的垂直运移,这是其上部局部构造形成气体水合物带的重要条件。

5. “自保护效应”的发现 Ershov、Yakuchev 等在自己的实验中都发现,气体水合物在初始分解时会导致在水合物表面形成一层冰膜,达到一定厚度时能减缓和阻止水合物的进一步分解,并将该现象称为气体水合物的“自保护效应”。在野外实地勘查中也证实,在离开稳定带范围之外,气体水合物仍具有一定的稳定性。进一步研究、认识“自保护效应”对气体水合物的形成条件、赋存状态、分布范围和资源量预测以及钻井安全、地质灾害、全球气候变化等,都将有重要意义。

四、普查勘探进展及开发实践的突破

气体水合物矿藏的综合普查和勘探工作一般包括对选择剖面的地球物理探测,在深水打示范井和参数井,以密封装置采集岩芯,实施地球物理测井,以及对岩芯和气体样品的实验室研究。70 年代以来,普查勘探技术方法有巨大进展,勘探开发获得首次成功。

1. 大规模的陆地和海洋地球物理综合探测

美国、法国、日本、德国等国家采用海洋剖面诊断系统,几乎在整个世界海洋沉积物上层实施了物探项目计划,并进行了海底钻采样品工作。同时,俄、美、加等国还分别在俄罗斯、美国以及加拿大的北极地区永久冻土带开展了富有成效的地震勘探和钻井取芯工作。据报道,到目前已探测了几千万公里的剖面,在几千个点上采了样,打了几百口井。工作程度最高的是大西洋、太平洋和印度洋的一些海域,在 100 多万公里探测剖面上发现了生成气体水合物的构造。

2. BSR 关键技术的确立和广泛应用

1971 年前后,在大规模实施海洋地球物理探测过程中,R. Stoll、M. E. wing、G. Bryan 等许多学者都注意到,在海洋的不同地区均存在一种异常的地震反射层,呈现出高振幅、负极性、横向连续、大致平行于海底或与海底沉积层小角度斜交的特征,被称为似海底

反射层 (bottom simulating reflectors, 简称为 BSR)。Hollster 等学者经研究论证 (1972~1980) 后认为, BSR 的出现与海底存在气体水合物有关, 多出现于海底以下 100~1 100m 左右。BSR 技术的广泛应用积累了丰富的知识和经验。利用地震反射资料可确定海底 BSR 层, 进而从中识别气体水合物形成、分布的地质条件, 区分矿层顶底面埋深, 确定矿层产状和厚度, 查明气体水合物饱和度, 识别矿层下面的游离气等。BSR 现已被视为天然气水合物的地震地层学证据, 成为勘查气体水合物的关键技术。

3. 钻采与储运技术获得新的发展 为确保钻井的安全性, 人们探索 and 开发了许多新的独特钻井技术, 例如采用低密度泥浆以利气体水合物分解, 或采用抑制性泥浆防止天然气突出。针对气体水合物矿层的特点, 借鉴常规石油开发中原有的技术和经验, 近年来逐渐发展了热开采技术、化学试剂法、减压法等一系列新的技术方法。实际开采中往往将热开采技术与降压法相结合, 这很可能成为未来大规模开发气体水合物的常用有效方法。

4. 气体水合物矿藏开发实践获得突破性成功 20 世纪 70 年代初, 前苏联专家首次确认在麦索雅哈气田打到了气体水合物矿藏。该气田至 1988 年已连续生产了 14 年 (后又断续生产到 1992 年), 在生产高峰年的 1972 年, 年开采量达 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。这一突破性成功坚定了人们最终打开气体水合物宝藏大门的信心。

五、气体水合物资源评价与资源量预测成果

一般说来, 气体水合物资源储量与含气体水合物的沉积物的面积、储层厚度及孔隙度, 以及气体水合物的饱和度、水合指数等参数密切相关。

1. 评价方法与资源量预测 1973~1975 年苏联学者 A. A. Trofimuk 等对世界海洋气体水合物的资源量进行了评价并提出了评价方法, 他提出全球天然气水合物含碳量估算值约为 $(2.7 \sim 14) \times 10^3 \text{ GT}$ ($1 \text{ GT} = 10^{15} \text{ g}$)。之后, 一些国际机构和 J. Krasen 等许多学者多次以不同分析方法评价了世界各种构造环境中的天然气水合物资源量。美国学者 Kvenvolden 和 Claypool (1988、1995) 重新估算了全球气体水合物资源量, 并指出, 目前各国专家对气体水合物中甲烷总量较为一致的估计值为 $2.0 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 并认为如果这一估计正确, 气体水合物中甲烷的总含碳量则是当前已探明的所有化石燃料矿产 (煤、石油、天然气) 总含碳量的 2 倍。

2. 全球范围的重要产地日益成为共同关注的目标 Kvenvolden 等许多学者通过对目前全球天然气水合物的重要产地的多次分析评价, 认为包括了海洋中的 30 个, 大陆上的 8 个, 是目前研究程度高、前景诱人且最受关注的重要产地。这些重要产地在全球的分布, 明显呈现出受地理格局控制的特点, 主要集中在两大类地理位置: 一是分布在各个大陆向海延伸的大陆边缘水深超过 300~500m 的地带; 二是高纬度永久冻土带地区以及向海延伸的永冻层带。另外, 海底水下浅层进行活塞重力取芯的结果表明, 海底浅层也是气体水合物赋存范围之一。

3. 资源评价成果促进了各国的勘探开发步伐 近二三十年来, 大规模的国际合作和综合地球物理普查勘探, 以及日益被重视的对气体水合物资源

量的预测和评价工作, 使一些国家逐渐认清了本国自己的气体水合物资源家底, 从而加速了这些国家的勘探开发步伐。美国于 1999 年 6 月制定了“美国甲烷水合物多年研究发展项目计划”, 旨在为美国 2015 年进行天然气水合物商业性生产提供必须的科学知识与成果。日本和印度出于资源短缺的严峻压力和对新能源的巨大期望, 于 1995 年分别提出“气体水合物研究发展 5 年计划”和“国家勘探开发 (1995~1999) 计划”。德国于 2000 年 3 月正式推出未来 15 年大型地学研究计划, “气体水合物: 能源载体和气候因素”研究项目被列入该计划。此外, 俄罗斯、加拿大、荷兰、法国、巴西等国在国家或企业公司支持下, 气体水合物的研究和开发也都十分活跃。

六、气体水合物稳定性及其环境效应日益受到关注

气体水合物仅仅在某种低温和较高压力状态下才是稳定的, 处于与周边条件十分敏感的平衡之中。当这些赋存条件发生变化时 (诸如气候变化、构造活动、地震、火山甚至人为开采等) 往往能够导致气体水合物的失稳和释放, 并可能造成海洋地质灾害或影响全球气候变化, 引发强烈的环境负效应。

根据对海底探测的结果, 8 000 年前位于挪威大陆边缘总量大约 5 600 立方公里的沉积物从大陆坡上缘向挪威海盆滑动了 800 公里, 当时引起的海啸造成毁灭性的后果。科学家推测这个极为著名的 Storrega 海底块体滑塌事件, 很可能正是由气体水合物释放而促成的。

大约 5 500 万年前古新世末期的化石证据表明, 此时期海洋和陆地的温度都急剧上升, 在世界范围形成一次温度异常 (LPTM, 即 Late Paleocene Thermal Maximum, 晚古新世温度峰值)。这是研究人员发现的气体水合物释放甲烷影响全球气候变化的十分古老的迹象。

关于气体水合物的失稳现象、发生原因、失稳后引发的地质灾害, 以及失稳作用、甲烷逸散对全球气候变化的影响等环境效应, 现已积累了大量资料, 取得了重要研究成果。研究表明, 失稳现象的发生与气体水合物赋存环境条件的变化呈现复杂的互动作用关系。

尽管已有的科学考察和室内研究成果已经描绘出气体水合物的失稳作用可能引发严重环境效应, 认识到它们之间存在着复杂的相互作用关系, 但在当今有关的气候讨论中, 对来自天然气体水合物资源的甲烷对温室气体在全球气候模型中的意义, 以及对全球碳平衡的贡献却考虑得很少, 对此可能引发的海洋地质灾害, 也考虑得很少。

近年来, 美国、日本、德国等国家制定的气体水合物研究计划中, 均已列有涉及全球碳循环或气体水合物对全球气候变化影响等环境效应的课题。科学家认为, 以下科学工作是不可缺少的。

1. 对大陆斜坡和冷陆棚海区的气体水合物矿藏进行长期观察, 并重建甲烷的脱气过程, 可能会对记录和理解气候变化做出贡献。

2. 关于永久冰冻带的展布、结构和可能的开发以及与永冻层相关的气体水合物及其状态变化过程等方面的知识, 对于下一步实测未来气候发展可能是一个决定性的前提。

(下转第 5 页)

水库运行之后, 江汉平原冷侵田的面积还将会扩大, 渍害程度将会加深。由此看来, 围湖造田和围湿造地, 不仅没有达到增加粮食产量的预想目的, 反而使之失去了原有的资源、环境功能, 加剧了该区的洪涝灾害。因此, 我们认为应将这些耕地还原为湿地, 以发挥其蓄洪抗旱、调节气候、降解环境污染、保护生物多样性等资源和环境效益。

3. 人工控湖

为了防洪减灾和洪水资源利用并举, 应当尽快考虑对我国东部的两大淡水湖——洞庭湖和鄱阳湖实施人工控制(陆中光先生等 1986 提出)。以鄱阳湖为例, 说鄱阳湖是我国的第一大淡水湖是指其高水位时而言的。据测算, 湖水位 19.8m 时的面积为 3 210km², 湖容为 252 亿 m³; 当低水位 9m 时, 面积只有 217km², 湖容仅 4.6 亿 m³。“洪期一大片, 枯期一条线”便是其真实写照。鄱阳湖平均每年的入江水量大约是 1 457 亿 m³, 相当于黄河年水量的 3 倍, 这是一笔相当可观的淡水资源。但在自然条件下, 其大部分得不到利用。汛期鄱阳湖所充蓄的 100 多亿立方米淡水, 在汛期后的一两个月很快就流失了, 此时长江并不缺水; 而在长江下游最需要补水的 12 月至 3 月份, 鄱阳湖则仅提供 28 亿 m³ 的水量。由此可见, 如果任其自然, 就会造成大量优质淡水(调研证明鄱阳湖是长江中下游的优质水源)白白浪费掉, 这对于我们这样一个严重缺水的国家来说, 是十分可惜的。只有建闸控制, 才能发挥其资源效益, 跨区域调水才有可能。实施人工控制鄱阳湖, 还有

(上接第 13 页)

3. 气体水合物的自保性在实验室和野外现场均已被证实。这表明气体水合物在比原认定深度浅得多的地方有产出的可能性, 且更易受地表气候变化、海水温度变化或地质事件的影响。因此进一步研究和认识气体水合物的“自保护效应”, 对于全球变化研究有重要意义。

4. 发展和创建实验条件下的气体水合物状态, 以进行自然条件(高压、低温)下沉积岩石中气体水合物特性研究, 进而在现场(In-situ)条件下进行水合物形成与解体动力学研究(如, 岩石基质的催化作用, 热传导或者气体的可利用性圈定边界, 气体组分同位素的分馏作用和地下水化学分馏作用等)以及有关岩石物理化学性质变化的动力学研究(如, 热导性, 孔隙度, 持续稳定性)。这些已日益受到重视。

5. 为将研究成果运用于自然系统, 人们正将现有的知识输入到数字模拟技术中, 以求借助这种技术计算出在百万年间赋存于体积庞大的岩石中的自然状态气体水合物的稳定作用和失稳作用。

七、我国面临的形势与抉择

我国是发展中的大国, 面对发展的紧迫需求, 对我国能源潜势、结构及其发展作出战略判断和战略抉择, 实乃头等大事。

油气资源需求快速增长与已探明资源量不足

防洪、发电、航运、消灭血吸虫等方面的收益, 对此, 陆中光先生等(1986)曾做过详细论述。

4. 洪水利用与南水北调

南北方水量不均是我国最大的资源与环境问题。长江中下游的洪灾和华北平原的旱灾, 成了制约我国社会和经济可持续发展的主要障碍, 实施南水北调已势在必行。然而, 中线和东线南水北调的主要问题是水源不足。在夏半年, 调水不存在问题; 但在冬半年北方最缺水的时候, 又恰是长江的枯季, 调水就成了“穷人向穷人借钱”了。80 年代以来, 长江湖区界大通站以下枯季入海流量的显著下降, 地表水短缺和地下水的超量开采, 已经给长江三角洲地区带来了严重的咸水入侵、地面沉降等环境问题。在这种情况下实施南水北调, 无疑会对长江三角洲的环境问题“雪上加霜”。自 1992 年以来, 枯水期(主要是 2~4 月份)汉江中下游频频发生“水华”, 长江下游水体的污染也有加重趋势。若调水之后, 随着流量减少, 环境容量降低, 污染将会增大。因此, 只有充分利用水库、湖泊和湿地蓄积长江汛期洪水, 供枯季北调, 才可有效地缓解南水北调对长江中下游环境的影响。以南水北调东线为例, 南水北调东线方案计划从江都调水 140 亿 m³, 如果鄱阳湖实施人工控湖工程, 汛期拦截下来的 100 多亿 m³ 洪水, 在长江枯水期下泄, 就可以大大缓解南水北调东线工程冬半年的水源不足问题。

(参考文献略)

(责任编辑 王宏章)

的矛盾正在明显加剧, 能源需求中油气所占比重的攀升正促使对国外石油依赖程度快速增大, 这已成为对国家战略安全的潜在威胁。

作为一个发展中的大国, 我们不可能奢望现代化建设主要依靠国外的生产供应来实现。

凡事预则立, 不预则阙。现有研究表明, 我国东海陆坡、南海北部陆坡、台湾东北和东南海域、冲绳海槽、东沙和南沙海槽等地域均有天然气水合物产出的良好地质条件, 气体水合物资源赋存前景巨大。我国几十年来油气勘探开发积累的经验 and 大量资料可供借鉴和利用, 现有雄厚的科研力量也较易转向天然气水合物研究。同时, 气体水合物开发利用的前期研究与发展周期一般需要 20~30 年或更长时间。因此, 天然气水合物研究这一极具前瞻性和战略性的重大课题, 应尽快进入决策部门的视野, 纳入国家的发展战略规划。

参 考 资 料

- [1] 石斗, 孙成权, 朱岳年编. 国外天然气水合物研究进展. 兰州大学出版社, 1992
- [2] 中科院环境科学信息中心. 天然气水合物专辑. 天然气地球科学, 1998(3)、(4)
- [3] 赵生才. 气体水合物: 能源载体和气候要素. 科学计划译丛, 2000(4)
- [4] Erwin Suess 等. 易燃之冰. 科学, 2000(2)

(责任编辑 蔡德诚)