中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 5 期: 789 ~ 797
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

# 塔里木盆地天然气中汞含量与分布特征

刘全有*

中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
* E-mail: qyouliu@sohu.com, liuqy.syky@sinopec.com

收稿日期: 2012-02-06; 接收日期: 2012-08-20; 网络版发表日期: 2013-04-19
国家自然科学基金(批准号: 40802028, 41173035)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB214800, 2005CB422108)和国家重大专项(编号: 2011ZX05005)资助

**摘要** 结合塔里木盆地天然气成因类型、烃源岩沉积环境、构造活动以及储层特征, 对 19 个主要油气田(藏)41 口井天然气中汞含量与分布特征进行了分析. 库车坳陷汞含量为 15.0~56964.3 ng/m$^3$, 平均值为 11793.7 ng/m$^3$, 塔北隆起为 16.1~28108.8 ng/m$^3$, 平均值为 6725.8 ng/m$^3$, 北部坳陷为 17.7~3339.5 ng/m$^3$, 平均值为 1678.6 ng/m$^3$, 中央隆起为 14.2~20220.6 ng/m$^3$, 平均值为 4311.1 ng/m$^3$, 而塔西南坳陷为 15428.5~296763.0 ng/m$^3$, 平均值为 156095.7 ng/m$^3$. 塔里木盆地各构造单元的天然气中汞含量具有明显的区域性不同, 塔西南构造活动强烈地带天然气中含量异常. 自生自储型和火山活动期天然气藏有利于汞富集, 而次生油气藏中汞含量明显偏低. 陆相沉积环境形成的煤型气中汞含量高于海相沉积形成的油型气. 因此, 塔里木盆地天然气中汞含量主要与天然气成因类型、沉积环境、构造活动和火山活动有关, 其中构造活动为主要控制因素, 其次为沉积环境和火山活动.

**关键词**
塔里木盆地
汞含量
构造活动
沉积环境
天然气类型
火山活动

关于天然气中汞的存在早在 20 世纪 80 年代中期, 前苏联学者 Озерова[1]认为石油、天然气田中含汞十分普遍. 天然气在燃烧和加工过程中, 汞会不断地释放到空气中. 因此, 油气燃烧已经被认为是空气中人类造成汞释放的主要来源. 而空气中汞又通过各种途径转为各种形式的汞化合物进入土壤、水以及动植物体等[2]. 这样, 汞不仅对环境造成污染, 而且对人类健康和饮用食品等也可能构成影响. 同时, 由于汞的吸附作用, 在油气运输、加工以及利用天然气进行发电等过程中, 因汞吸附在某些设备上而造成仪器不能正常工作, 甚至会造成破坏性事故[3,4]. 关于天然气中汞的影响直到 1973 才有相关报道, 在阿尔及利亚的一个液化天然气厂因铝受热转化器故障而发生重大事故, 调查发现是由于天然气中汞腐蚀引起的[4]. 通常认为, 天然气中的汞主要来源于烃源岩, 在气源岩热演化成烃过程中, 汞以挥发组分的形式随天然气一起聚集在天然气藏中[5,6]. 戴金星等[7]曾统计了国内外 12 个盆地(四川、渤海湾、鄂尔多斯、江汉、南襄、苏北、琼东南、松辽和中欧、北高加索、卡拉库姆和德聂伯-顿涅茨)煤型气(也称为煤成气)和油型气中汞含量, 8 个盆地 32 个气田或构造上 102 个煤型气汞含量为 10~3000000 ng/m$^3$, 通常大于 700 ng/m$^3$, 其中在中欧的赤底统的煤型气中汞含量达 3000000 ng/m$^3$. 我国 7 个盆地 29 个气(油)田或构造上 242 个油型气汞含量为 4~142000 ng/m$^3$, 一般小于 600 ng/m$^3$. 辽河盆地东部凹陷的天然气中汞含量为

中文引用格式: 刘全有. 塔里木盆地天然气中汞含量与分布特征. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 789–797
英文引用格式: Liu Q Y. Mercury concentration in natural gas and its distribution in the Tarim Basin. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4609-2

14000~70000 ng/m$^3$, 天然气类型为煤型气; 但在西部凹陷的天然气中汞含量为 41000~1930000 ng/m$^3$, 最高达 1930000 ng/m$^3$, 天然气属油型气[5]. 中国中原、华北、长庆油田和崖 13-1 气田天然气中汞含量统计表明[7], 煤型气中汞含量明显高于油型气. 腐殖质对汞有很强的吸附作用, 汞在泥炭或腐殖质沉积中丰度高. 在成煤作用过程中, 泥炭与腐殖质沉积分别成为煤层与碳质泥岩或泥岩. 随着成煤作用加深伴有气体生成, 汞的高挥发性使得其与煤型气中其他组分从煤层和碳质泥岩中一起运移出来. 这样, 腐殖型有机质形成的煤型气中汞含量明显高于混合型-腐泥型有机质形成的天然气[7]. 同时, 由于在深切地幔的深断裂和大断裂带, 汞与其他挥发性组分伴随着岩浆上升, 并与有机质生成的天然气混合在一起, 从而演变成天然气藏中的一个部分.

虽然关于自然界中汞的地球化学国内外做了许多工作, 但对于天然气中汞的研究十分薄弱. 由于分析技术和样品采集等诸多因素, 关于油气中汞及汞化合物的附存形式缺乏有力的数据, 使得在许多主要含油气盆地中对汞的预测较为困难. 同时, 已有关于汞的报道也存在一定的不确定性、不充分性和不易对比性[8~10]. 由于汞对环境的污染具有累积效应, 一旦造成污染将很难彻底消除. 所以, 天然气中汞含量的高低直接关系到输送管线安全性、沿线居民身体健康和生态环境污染, 以及利用天然气进行发电等其他用途中设备腐蚀情况. 近年来, 随着我国天然气工业大发展, 用气城市大量增加, 城市用户大量增加, 铺设管线大量增加. 塔里木盆地作为“西气东输”主要供气区, 天然气中汞含量以及分布特点显得尤为重要. 本文在对塔里木盆地 19 个主要油气田(藏)41 口井天然气样品采集(图 1), 结合天然气组分、稳定同位素(碳氢)和 $^3$He/$^4$He 比值基础上, 较为系统地分析了天然气中汞含量变化, 力图厘清天然气成因类型、沉积环境、构造活动以及储层特征对天然气中汞含量的影响, 为合理预测和预处理天然气中汞提供科学依据.

## 1 采集与测试方法

本次研究的所有样品均为现场(井场)采集. 采集装置主要包括捕汞管、流量计(0~250 mL/min)、干燥管、秒表、量筒、敞口瓶以及其他辅助设备. 利

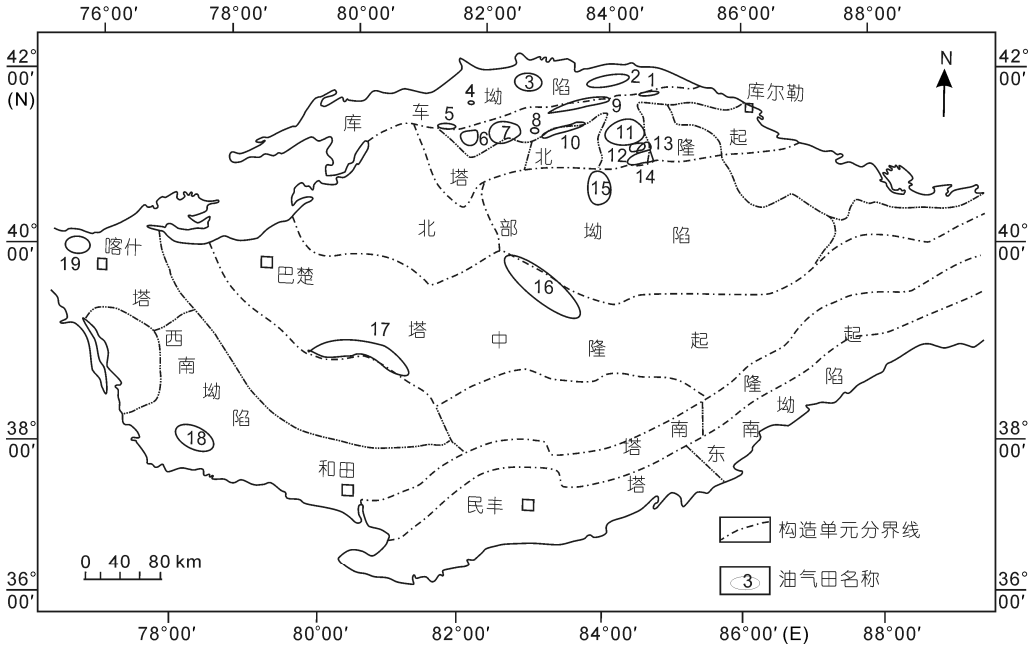



**图 1 塔里木盆地油气田(藏)分布图**

油气田编号与名称: 1-提尔根, 2-迪那, 3-克拉 2, 4-大宛齐, 5-却勒 1, 6-羊塔克, 7-英买力, 8-红旗区, 9-牙哈, 10-东河塘, 11-轮南, 12-轮古, 13-解放渠, 14-吉拉克, 15-哈德逊, 16-塔中, 17-和田河, 18-柯克亚, 19-阿克 1

用橡胶管将干燥管、流量计和捕汞管依次连接, 然后与天然气管道关口连接. 从捕汞管通过的气体利用排水法进行体积测量. 为了有效地吸附天然气中的汞, 气体流速一般控制在 200 mL/min, 流速波动小于 5 mL/min, 取样时间为 15 min. 如果天然气流速太快会影响捕汞管对汞的有效吸附. 捕汞管由中国科学院兰州地质研究所研制, 大小 8 mm×315 mm, 金丝 10 g, 含金纯度 99.999%, 最大汞的饱和量为 45.3 μg, 吸附率是 94%~97%, 解析率是 92%. 关于天然气中汞吸附方法, 徐永昌[11]曾做过详细报道.

捕汞管采集汞后, 把捕汞管在加热炉加热到 800℃, 左右脱附汞 30 s, 形成的汞蒸汽在 Ar/空气作为载气直接吹入仪器进行分析测试, 载气流速一般为 0.5 L/min. 测试汞仪器为 XG-4 塞曼测汞仪, 检测限均小于 0.02 ng 测试的积分值通过汞标准曲线计算出汞的绝对量, 然后利用气体体积获得天然气中单位体积的汞含量. 通过对同一采样点对比分析, 天然气中汞含量分别为 112.3 和 114.8 ng/m$^3$, 误差小于 3%[12].

## 2 塔里木盆地天然气中 Hg 含量特征

塔里木盆地各构造单元天然气中汞含量变化很大(表 1), 分布范围为 14.2~296763.0 ng/m$^3$, 平均汞含量为 15396.1 ng/m$^3$; 而各构造单元天然气中汞含量变化不一; 库车前陆盆地 17 个样品汞含量变化范围为 15.0~56964.3 ng/m$^3$, 平均值为 11793.7 ng/m$^3$, 塔北隆起 12 个天然气样品汞含量变化范围为 16.1~28108.8 ng/m$^3$, 平均值为 6725.8 ng/m$^3$, 北部坳陷 2 个样品(哈德逊油气田)汞含量变化范围为 17.7~3339.5 ng/m$^3$, 平均值为 1678.6 ng/m$^3$, 中央隆起包括塔中地区和和田河气田的 8 个天然气样品汞含量变化范围为 14.2~20220.6 ng/m$^3$, 平均值为 4311.1 ng/m$^3$, 而塔西南坳陷样品采自柯克亚油气田和阿克 1 井, 2 个样品的汞含量变化范围为 15428.5~296763.0 ng/m$^3$, 平均值为 156095.7 ng/m$^3$. 从表 1 可见, 塔里木盆地各构造单元的天然气中汞含量具有明显的区域性不同, 一般具有盆地边缘汞含量高, 盆地中心汞含量偏低; 如库车前陆盆地和塔西南坳陷汞含量明显高于中央的北部坳陷和中央隆起.

## 3 讨论

### 3.1 沉积环境、天然气类型与汞含量

烷烃气碳氢同位素($\delta^{13}$C, $\delta$D)已作为天然气成因类型与母质沉积环境有效鉴别指标广泛应用[13~16]. 根据烷烃气碳氢同位素组与烃源岩沉积环境关系[15], 可以将塔里木盆地天然气分为: Ⅰ. 与陆相沉积环境有关的煤型气, 母质主要为侏罗系煤系; Ⅱ. 与湖相沉积环境有关的煤型气, 母质主要为三叠系湖相泥岩或页岩; Ⅲ. 与海相沉积环境有关的寒武-下奥陶统烃源岩; Ⅳ. 与海相-海陆交互相沉积环境有关的中上奥陶统或石炭系烃源岩; Ⅴ. 石炭系海陆交互相烃源岩与中生界腐殖型有机质生成的混合气, 如柯克亚油气田; Ⅵ. 有机热解气与深部气体混合(图 2). 在塔里木盆地, 煤型气主要分布在前陆盆地, 包括库车坳陷、塔西南坳陷等, 而油型气主要分在台盆区, 如塔中、塔北地区. 塔里木盆地 19 个煤型气样品中汞含量变化范围为 15.0~296763.0 ng/m$^3$, 平均值为 26983.4 ng/m$^3$, 而 22 个油型气样品中汞含量变化范围为 14.0~28108.8 ng/m$^3$, 平均值为 5388.9 ng/m$^3$. 虽然前人认为煤型气中汞含量高于油型气[7,17], 但是塔里木盆地不同类型天然气中汞含量分析表明, 煤型气与油型气中汞含量差异不明显(图 3). 通过汞含量为 500~700 ng/m$^3$ 作为判识油型气和煤型气可能低估了油型气中汞含量. 因此, 利用天然气中汞含量鉴别天然气类型时需要慎重.

甲烷氢同位素组成受源岩沉积环境和热成熟度双重因素控制, 其中沉积环境(有机质类型)为主要控制因素, 其次为热成熟度[15]. 如图 4 所示, 塔里木盆地天然气中汞含量变化与烃源岩沉积环境具有一定的相关性; 一般甲烷氢同位素偏轻且沉积环境为湖相形成的天然气中汞含量明显高, 如迪那、提尔根和牙哈气田; 而甲烷氢同位素较重且沉积环境为海相形成的天然气中汞含量较低, 如塔中、吉拉克、解放渠、轮南和桑塔木等. Mason 和 Moore[18]研究认为, 在沉积岩中页岩中汞含量为 0.4 ppm, 砂岩为 0.3 ppm, 而碳酸盐岩为 0.2 ppm. 黑色页岩的汞克拉克值为 (0.23±0.03) ppm[19]. 在腐殖质、水和汞组成的溶液中(pH 为 3), 汞含量可达 1000 ppm. 在全球煤系中, 汞平均含量为(0.1±0.01) ppm, 沥青质平均汞为 (0.87±0.08) ppm, 而褐煤和次沥青质平均汞含量为 (0.62±0.06) ppm[19]. 我国的含煤地层中汞含量平均

**表 1　塔里木盆地天然气组分、稳定同位素以及汞含量数据表**

| 构造单元 | 气田名称(藏) | 井号 | 井深(m) | 产层 | 储层岩性 | 取样温度(℃) | Hg 含量($ng/m^3$) | 碳氢同位素组成(‰) | | | | 化学组分(%) | | | | | $^3He/^4He$ 比值($\times10^{-8}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | $\delta^{13}C_1$ | $\delta^{13}C_2$ | $\delta^{13}C_3$ | $\delta D_1$ | $N_2$ | $CO_2$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | |
| 库车坳陷 | 克拉 2 | Kela203 | 4050 | E | 砂岩 | 26 | 4323.0 | −27.3 | −18.5 | −19.0 | −155 | 0.58 | 0.66 | 97.86 | 0.82 | 0.05 | 4.90 |
| | | Kela2-8 | | E | 砂岩 | 26 | 4217.1 | −27.3 | −18.5 | −19.5 | −156 | 0.62 | 0.54 | 97.96 | 0.82 | 0.05 | 3.08 |
| | | Kela2-7 | | E | 砂岩 | 32 | 4697.7 | −27.6 | −18.0 | −19.9 | −154 | 0.69 | 0.05 | 98.41 | 0.8 | 0.05 | 4.06 |
| | 大宛齐 | DW117-3 | 518 | $N_{1\text{-}2}K$ | 砂岩 | 31 | 1165.0 | −32.8 | −21.6 | −21.2 | −178 | 4.53 | 0 | 88.31 | 4.72 | 1.53 | 1.96 |
| | | DW109-19 | 461 | $N_{1\text{-}2}K$ | 砂岩 | 30 | 1403.5 | −29.7 | −21.9 | −21.2 | −160 | 2.01 | 0 | 90.04 | 5.49 | 1.5 | 3.36 |
| | 却勒 | QL1 | 5930 | K | 砂岩 | 34 | 1012.7 | −31.2 | −23.9 | −22.8 | −163 | 2.5 | 0.17 | 84.38 | 6.8 | 3.23 | 5.32 |
| | 羊塔克 | YTK5-3 | | K | 砂岩 | 38 | 1263.2 | −34.7 | −23.6 | −21.6 | −168 | 2.29 | 0.32 | 85.97 | 6.91 | 2.76 | 7.14 |
| | | YTK5-2 | | E | 砂岩 | 34 | 707.5 | −34.2 | −24.1 | −22.8 | −166 | 3.09 | 0.14 | 83.1 | 6.94 | 3.67 | 6.72 |
| | 英买力 | YM7-H1 | | E | 砂岩 | 30 | 1386.6 | −32.4 | −22.7 | −19.8 | −160 | 2.58 | 0.12 | 90.14 | 4.62 | 1.27 | 7.28 |
| | 红旗区 | HQ2 | 5540 | O | 砂岩 | 27 | 15.0 | −33.4 | −22.6 | −22.2 | −169 | 2.98 | 0.51 | 84.06 | 6.73 | 2.95 | 9.10 |
| | 牙哈 | YH1 | 5600 | K | 砂岩 | 26 | 1604.3 | −30.9 | −21.8 | −22.3 | −179 | 1.82 | 1.63 | 83.32 | 5.66 | 2.39 | 4.76 |
| | | YH23-1-18 | | K | 砂岩 | 23 | 750.0 | −31.7 | −23.0 | −20.6 | −181 | 3.74 | 0.47 | 86.46 | 5.8 | 2.17 | 3.50 |
| | | YH23-1-14 | | K | 砂岩 | 23 | 37069.0 | −32.3 | −23.2 | −20.4 | −180 | 3.77 | 0.26 | 85.89 | 6.23 | 2.24 | 3.36 |
| | | YH701 | 6000 | E | 砂岩 | 30 | 27219.3 | −32.8 | −23.3 | −21.0 | −180 | 4 | 0.22 | 86.2 | 5.66 | 2.24 | 3.92 |
| | 迪那 | DN102 | 5768.11 | N | 砂岩 | 30 | 17652.3 | −33.5 | −21.1 | −19.7 | −179 | 0.48 | 0.35 | 89.23 | 6.64 | 1.93 | 3.50 |
| | 提尔根 | TRG101 | 5298 | K | 砂岩 | 28 | 39042.6 | −32.8 | −23.4 | −21.1 | −191 | 2.22 | 0.31 | 86.65 | 6.31 | 2.74 | 3.50 |
| | | TRG1 | 4839.5 | E | 砂岩 | 26 | 56964.3 | −35.4 | −22.7 | −20.9 | −189 | 2.1 | 0.28 | 85.36 | 7.03 | 2.98 | 3.36 |
| 塔北隆起 | 东河塘 | DH12 | 5808.88 | O | 白云岩 | 44 | 28108.8 | −32.4 | −32.9 | −23.8 | −169 | 3.14 | 0.38 | 84.15 | 6.48 | 2.85 | 7.56 |
| | | DH23 | 5700 | P | 砂岩 | 36 | 27181.4 | −40.0 | −32.2 | −30.3 | −176 | 3.59 | 1.62 | 79.98 | 7.39 | 4.17 | 14.8 |
| | | DH1 | 6001.15 | D | 砂岩 | 32 | 10308.6 | −40.4 | −37.7 | −34.2 | −224 | 24.28 | 16.76 | 49.43 | 4.11 | 2.09 | 7.00 |
| | 轮南 | LN2-33-1 | | T | 砂岩 | 47 | 18.0 | −32.0 | −35.8 | −31.9 | −147 | 6.04 | 0.15 | 85.77 | 3.41 | 2.12 | 6.16 |
| | | LG15-18 | | O | 白云岩 | 39 | 7075.6 | −41.3 | −37.9 | −34.5 | −190 | 4.66 | 5.29 | 73.49 | 5.6 | 4.48 | 6.58 |
| | 轮古 | LG16-2 | | O | 白云岩 | 29 | 2319.8 | −34.3 | −36.1 | −33.4 | −138 | 1.36 | 1.59 | 91.86 | 2.8 | 1.13 | 5.04 |
| | | LG201 | 5400 | O | 白云岩 | 30 | 2209.8 | −35.6 | −37.1 | −34.0 | −140 | 2.35 | 5.19 | 86.59 | 2.71 | 1.35 | 5.04 |
| | | LG13 | 5685 | O | 白云岩 | 30 | 1041.2 | −33.8 | −33.2 | −29.2 | −134 | 1.14 | 1.6 | 95.12 | 1.5 | 0.33 | 4.48 |
| | 解放渠 | JF1-13-4 | | T | 砂岩 | 31 | 17.7 | −35.4 | −36.1 | −33.8 | −155 | 5.62 | 1.47 | 84.01 | 3.98 | 2.34 | 8.40 |
| | 吉拉克 | JN4-H2 | | T | 砂岩 | 36 | 16.1 | −35.8 | −36.1 | −33.2 | −142 | 5.68 | 0.17 | 87.25 | 3.58 | 1.74 | 7.70 |
| | | JLK102 | 4342 | T | 砂岩 | 24 | 522.6 | −34.9 | −34.9 | −32.0 | −141 | 6.83 | 0.16 | 87.03 | 3.18 | 1.45 | 7.28 |
| | | LN59-H1 | | C | 砂岩 | 37 | 1889.5 | −38.9 | −37.7 | −34.6 | −130 | 3.66 | 0.34 | 94.45 | 1.14 | 0.2 | 2.80 |
| 北部坳陷 | 哈德逊 | HD113 | 5466.66 | $C_3$ | 砂岩 | 25 | 3339.5 | −24.4 | −36.5 | −33.5 | −175 | 43.26 | 7.75 | 24.58 | 5.54 | 9.06 | 3.08 |
| | | HD2-7 | 5706 | $C_3$ | 砂岩 | 23 | 17.7 | −35.9 | −36.7 | −33.4 | −182 | 30.03 | 1.35 | 34.48 | 12.04 | 11.17 | 3.50 |
| 塔中隆起 | 和田河 | Ma4-H1 | 2433 | O | 白云岩 | 44 | 6983.6 | −37.1 | −36.7 | −32.1 | −151 | 8.93 | 0.08 | 85.98 | 2.72 | 1.12 | 12.3 |
| | | Ma4 | 2800 | O | 白云岩 | 37 | 1548.8 | −37.2 | −38.2 | −34.5 | −151 | 7.44 | 1.72 | 87.21 | 2.1 | 0.82 | 12.7 |
| | 塔中 | TZ242 | 4546.56 | O | 白云岩 | 26 | 2205.2 | −37.1 | −35.3 | −32.1 | −125 | 3.48 | 2.29 | 90.15 | 2.25 | 0.89 | 6.44 |
| | | TZ16-6 | | O | 白云岩 | 31 | 20220.6 | −41.2 | −40.5 | −33.0 | −160 | 19.95 | 3.95 | 49.3 | 5.5 | 6.84 | 4.76 |
| | | TZ4-18-7 | | C | 砂岩 | 31 | 16.6 | −42.6 | −40.4 | −33.6 | −156 | 12.27 | 0.86 | 76.65 | 5.21 | 2.68 | 4.76 |
| | | TZ117 | 4510 | S | 砂岩 | 28 | 1085.3 | −40.0 | −38.8 | −33.2 | −162 | 10.11 | 0.61 | 75.69 | 5.9 | 3.68 | 4.76 |
| | | TZ62 | 4758 | O | 白云岩 | 23 | 2414.8 | −37.1 | −31.6 | −30.1 | −126 | 2.98 | 3 | 88.96 | 2.56 | 0.94 | 4.90 |
| | | TZ621 | 4885 | O | 白云岩 | 20 | 14.2 | −36.6 | −31.7 | −29.2 | −131 | 2.38 | 1.06 | 91.51 | 2.5 | 1.04 | 5.74 |
| 塔西南坳陷 | 柯克亚 | KS102 | | J | 砂岩 | 30 | 296763.0 | −29.3 | −25.8 | −25.1 | −155 | 1.13 | 0 | 90.49 | 4.68 | 1.85 | 17.8 |
| | 阿克 | AK1 | 4209.5 | T | 砂岩 | 29 | 15428.5 | −22.6 | −19.9 | −20.3 | −127 | 5.38 | 14.68 | 79.3 | 0.59 | 0.05 | 76.9 |

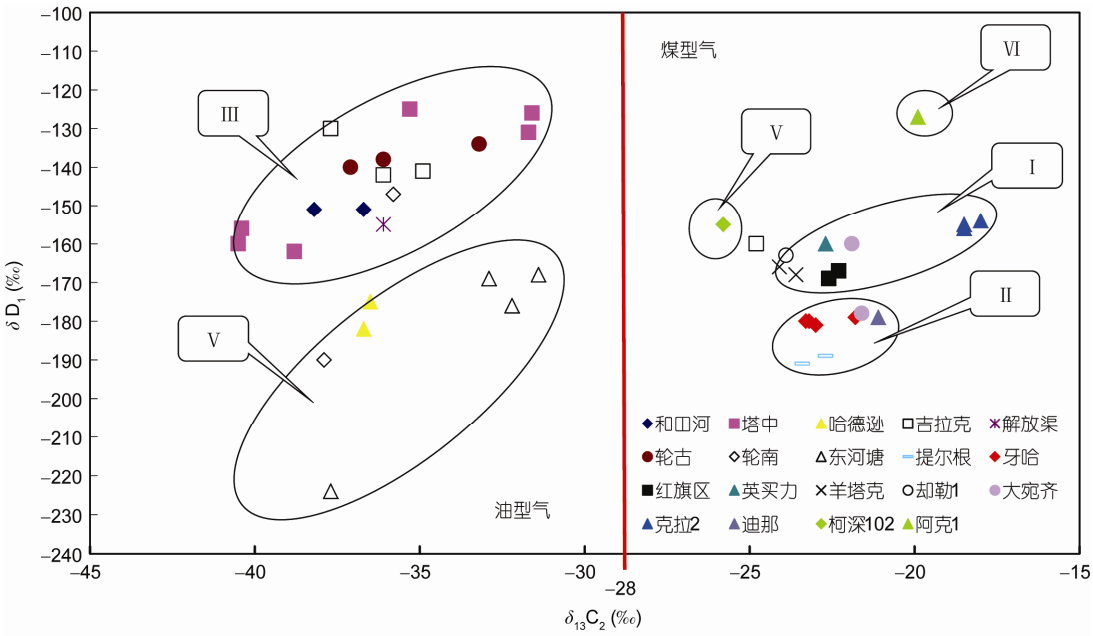



**图 2　塔里木盆地天然气$\delta^{13}C_2$与$\delta D_1$关系图**

Ⅰ. 与侏罗系煤系有关的煤型气; Ⅱ. 与三叠系湖相泥岩或页岩有关的煤型气; Ⅲ. 与海相沉积环境有关的寒武-下奥陶统烃源岩; Ⅳ. 与海相-海陆交互相沉积环境有关的中上奥陶统或石炭系烃源岩; Ⅴ. 石炭系海陆交互相烃源岩与中生界腐殖型有机质生成的混合气; Ⅵ. 有机热解气与深部气体混合

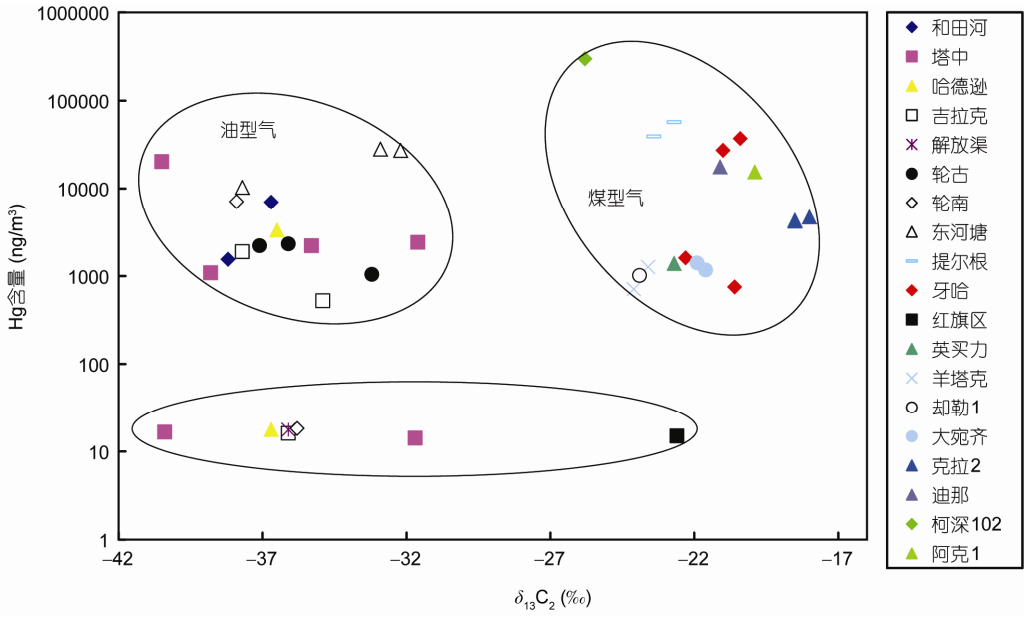



**图 3　塔里木盆地不同类型天然气$\delta^{13}C_2$与 Hg 含量变化图**

为 0.578 ppm, 西北地区平均为 0.22 ppm[20]. 因此, 湖湘沉积环境形成的腐殖型有机质中汞含量最高, 而海相层系的泥页岩和碳酸盐岩中汞含量低, 从而造成来自湖相烃源岩的煤型气具有高汞含量, 而海相层系的油型气中汞含量低.

需要特别指出, 7 个天然气样品中 Hg 含量低于

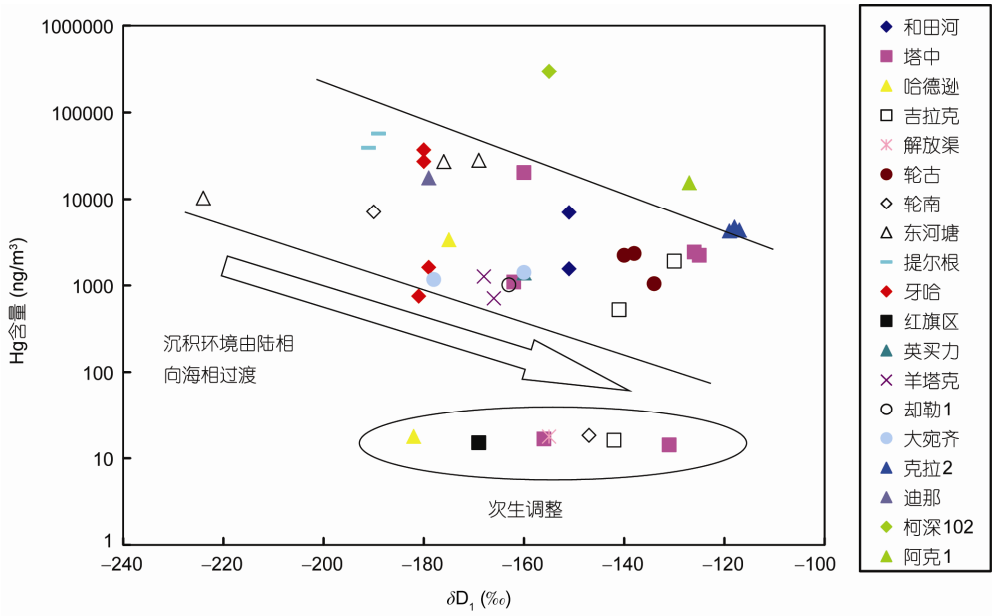



**图 4　塔里木盆地不同沉积环境天然气$\delta D_1$与 Hg 含量变化图**

100 ng/m$^3$, 如 LN2-33-1, JN4-H2, JF1-13-4, HD2-7, TZ4-18-7, TZ621 和 HQ2 井. 除了 HQ2 井外, 这些气藏为下部早期聚集的油气通过二次调整运移至上部气藏的[21,22], 因为汞具有很强的挥发性, 在气藏调整过程中, 汞极易散失, 从而造成上述部分气藏汞含量低. HQ2 井天然气为上覆三叠-侏罗系烃源岩生成的煤型气下渗在奥陶系气藏中, 为上生下储型气藏, 不利于汞向下聚集.

### 3.2　构造活动与汞含量

天然气中 $^3$He/$^4$He 比值通常用来指示盆地构造运动和火山活动等[23,24]. 塔里木盆地天然气中 $^3$He/$^4$He 比值主要为 $n\times10^{-8}$, 为典型地壳成因氦; 仅在 Ak1 井可能存在少量幔源气的混入 ($^3$He/$^4$He 比值 $7.69\times10^{-7}$)[25]. 图 5 为塔里木盆地天然气 $^3$He/$^4$He 组成与汞含量变化关系图. 由图可见, 塔里木盆地天然气中汞含量并没有随 $^3$He/$^4$He 比值的增加而增加. 除 Ak1 和柯克亚气田 KS102 外, 天然气中汞含量随着 $^3$He/$^4$He 比值增加表现为略有下降的趋势; 说明天然气遭受次生改造并不能引起天然气中汞富集, 反而会发生汞散失. Ak1 气藏可能存在深部流体作用, 使得天然气中含量偏高, 因为 Ak1 气藏处于南天山断褶带与昆仑山断褶带相互作用部位, 汞与其他幔源组份通过深大断裂运移到地壳. KS102 井汞含量高可能与气藏类型有关, 见下文论述.

### 3.3　储层特征与汞含量

塔里木盆地油气储层类型分布广泛, 奥陶系储层为海相白云岩、灰岩, 志留系、泥盆系、石炭系和二叠系均为海相砂岩为主; 而中生界、新生界储层主要为陆相砂岩、砂泥岩等. 由图 6 可见, 天然气储层岩性与汞含量之间没有明显关系, 但在侏罗系储层中天然气汞含量明显高于其他层位, 因为侏罗系储层的天然气主要分布在柯克亚气田, 天然气类型为煤型气, 其母质可能与侏罗系煤系有关, 气藏类型为自生自储型, 天然气中汞遭受散失小. 另外, 由于作为煤型气的生气母质煤和分散腐殖质有机物对汞有较大的吸聚能力, 汞在泥炭或腐殖质沉积中丰度高. 随着热演化程度增加, 汞的高挥发性使其与煤型气中其他气体组分从煤层和碳质泥岩中运移出来, 并聚集成藏[7]. 东河塘气田 DH23 井二叠系储层中天然气汞含量偏高可能与该时期火山活动有关, 因为在塔里木盆地二叠纪火山活动活跃, 主要分布在盆地的中部和西部[26]. 火山活动能引起含汞物质快速沉降使得汞沉积速率增加. 在荷兰的一个沼泽水域中, 过去的 100~200 年间, 汞的沉积率从 10000~20000 ng/m$^2$ 增加到 50000~100000 ng/m$^2$[27], 造成这样大幅增加一个重要原因是火山活动和气候变化, 因为汞

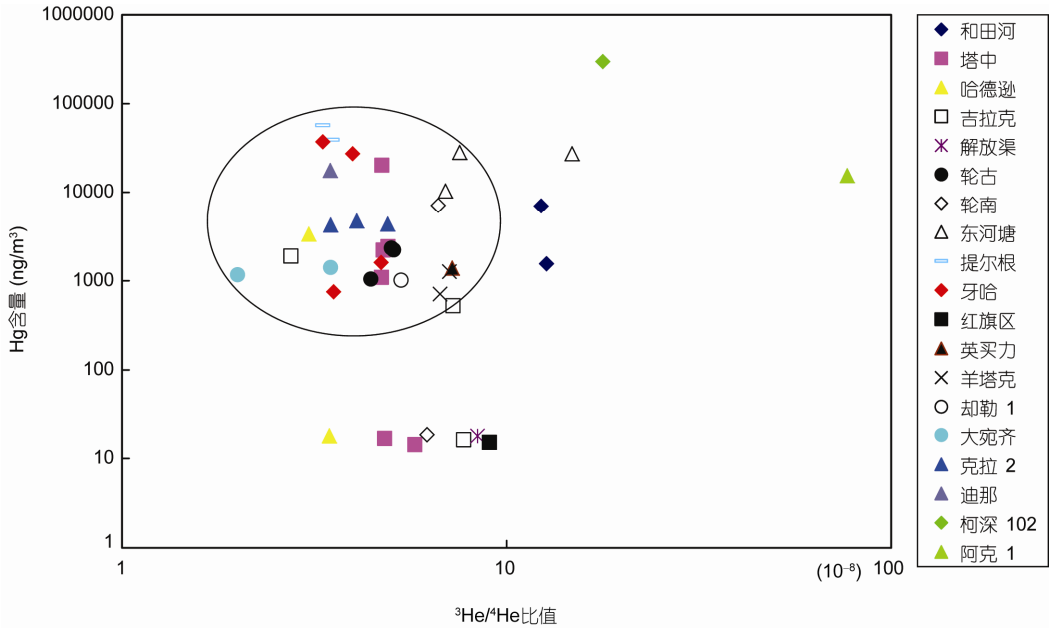



**图 5　塔里木盆地天然气 $^{3}He/^{4}He$ 比值与 Hg 含量变化图**

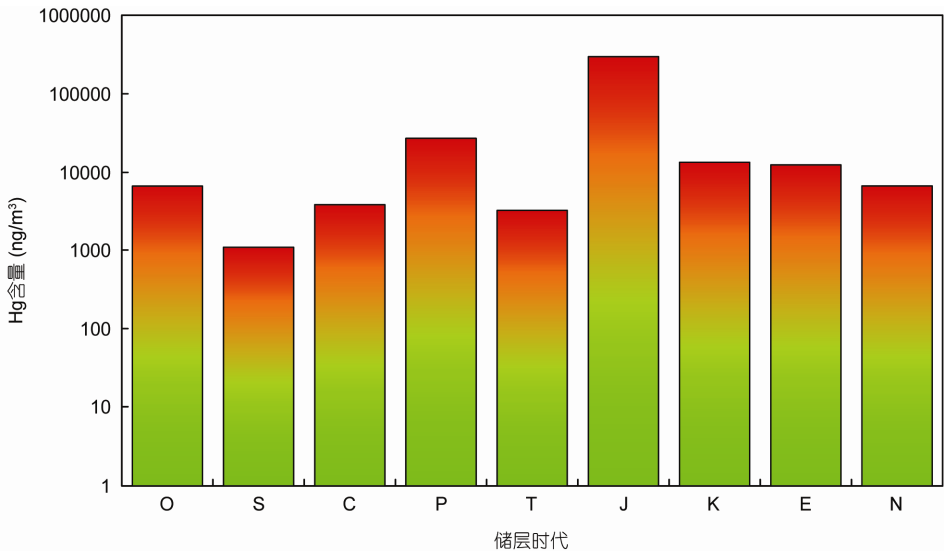



**图 6　塔里木盆地不同储层天然气中汞含量**

快速沉积正好对应于冰岛火山活动期(1783~1784, 1875 和 1947 年). 因此, 天然气中汞含量与天然气藏是否为自生自储有关. 火山活动也可以引起天然气中汞含量偏高.

### 3.4　库车坳陷天然气中汞含量

库车坳陷作为塔里木盆地主要天然气分布区和“西气东输”供气基地, 天然气中汞含量变化具有重要意义. 图 7 为库车坳陷各气田(藏)天然气中汞含量变化. 库车坳陷天然气中汞含量变化范围为 15.0~56964.3 ng/m$^3$, 整体上表现为东部天然气中汞含量高于西部, 其中汞含量最高的气田为提尔根, 2 口井的汞平均含量为 24001.7 ng/m$^3$, 其次为牙哈和迪那, 汞含量平均值分别为 21679.4 和 17652.2 ng/m$^3$. 克拉 2 气田 3 口井天然气中汞含量平均为 4412.6 ng/m$^3$, 高于其南部的羊塔克、英买 7 和却勒

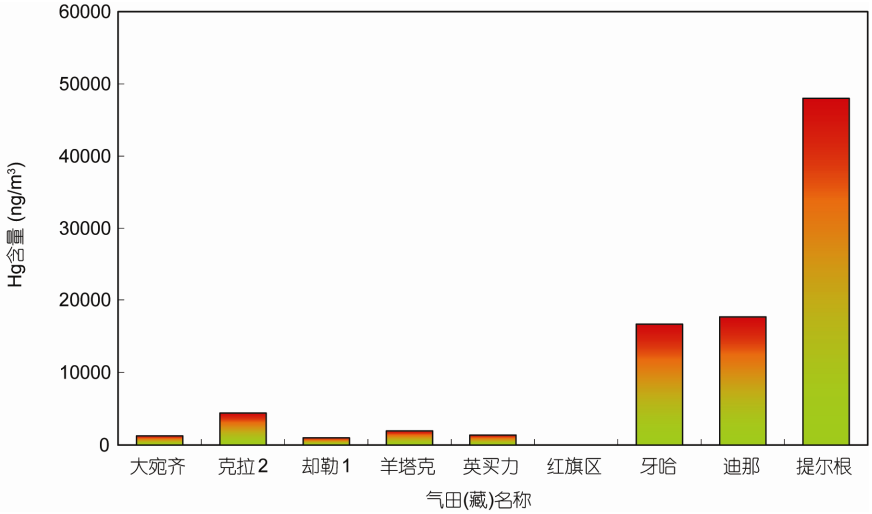



**图 7　库车坳陷不同气田(藏)天然气中汞含量**

1. 红旗区天然气中汞含量最低, 仅为 15.0 ng/m$^3$. 因此, 库车坳陷天然气田中汞含量具有东高西低, 北高南低的分布特点. 由于库车坳陷南缘斜坡的天然气部分为北部气源岩供给[16,28], 天然气在运移过程可能造成部分汞的丢失或稀释, 从而形成坳陷南缘天然气中汞含量偏低. 库车坳陷东部高于西部可能与坳陷东西源岩沉积环境差异有关, 因为甲烷氢同位素重于–160‰时, 随着$\delta D_1$ 的逐渐变重, 天然气中汞含量呈降低趋势; 而在库车坳陷东部烃源岩沉积环境为湖相沉积, 源岩多为泥岩或页岩, 坳陷西部为陆相煤系.

## 4　结论

通过对塔里木盆地 41 口工业天然气气井样品的采集, 塔里木盆地天然气中汞含量存在一定规律性分布, 一般具有盆地边缘汞含量高, 盆地中心汞含量偏低, 最高的汞含量分布在塔西南坳陷, 其次为库车坳陷; 北部坳陷哈德逊油气田汞含量最低. 塔里木盆地天然气中汞含量主要与天然气成因类型、沉积环境、构造活动和火山活动有关, 其中构造活动为主要控制因素, 其次为沉积环境和火山活动. 其主要分布特点为: 湖相沉积环境形成的天然气中汞含量高于海相; 自生自储型天然气藏中汞含量高, 而次生调整天然气中汞含量明显偏低. 库车坳陷天然气中汞含量具有东高西低, 北高南低的分布特点, 主要与沉积环境和天然气运移有关. 因此, 对于自生自储型或处于构造活动带附件的天然气藏, 天然气开发与利用过程中要高度重要异常汞含量.

**致谢**　感谢审稿专家提出的宝贵意见.

**参考文献**

1　Озерова Н А. Новый ртутный рудный пояс в Западной Европе. Геология Рудных Месторождений, 1981, 23: 49–56
2　Wilhelm S M, Bloom Nicolas. Mercury in petroleum. Fuel Process Technol, 2000, 63: 1–27
3　Shafawi A, Ebdon L, Foulkes M, et al. Determination of total mercury in hydrocarbons and natural gas condensate by atomic fluorescence spectrometry. Analyst, 1999, 124: 185–189
4　Leeper J E. Mercury-LNG's problem. Hydrocarbon Process, 1980, 59: 237–240
5　陈践发, 妥进才, 李春圆, 等. 辽河坳陷天然气中汞的成因及地球化学意义. 石油探勘与开发, 2000, 27: 23–24
6　陈践发, 王万春, 朱岳年. 含油气盆地中天然气汞含量的主要影响因素. 石油与天然气地质, 2001, 22: 352–354
7　戴金星, 戚厚发, 王少昌, 等. 我国煤系的气油地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价. 北京: 石油工业出版社, 2001

8 侯路, 戴金星, 胡军, 等. 天然气中汞含量的变化及应用——兼述岩石和土壤中汞的含量. 天然气地球科学, 2005, 16: 514–521
9 刘全有, 戴金星, 李剑, 等. 油气中汞的地球化学特征与科学意义. 石油勘探与开发, 2006, 33: 542–547
10 刘全有, 李剑, 侯路. 油气中汞及化合物样品采集与实验分析方法研究进展. 天然气地球科学, 2006, 17: 559–565
11 徐永昌. 天然气成因理论及应用. 北京: 科学出版社, 1994
12 刘全有. 塔里木盆地天然气地球化学与汞富集规律. 博士后出站报告. 北京: 中国石油勘探开发研究院, 2007
13 Dai J X, Li J, Luo X, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China. Org Geochem, 2005, 36: 1617–1635
14 Xu Y C,Shen P. A study of natural gas origins in China. AAPG Bull, 1996, 80: 1604–1614
15 刘全有, 戴金星, 李剑, 等. 塔里木盆地天然气氢同位素地球化学与对热成熟度和沉积环境的指示意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1599–1608
16 刘全有, 秦胜飞, 李剑, 等. 库车坳陷天然气地球化学以及成因类型剖析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊Ⅱ): 149–156
17 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨. 石油学报, 1985, 6: 31–38
18 Mason B, Moore C B. Principles of Geochemistry. New York: Wiley, 1982
19 Yudovich Y E, Ketris M P. Geochemistry of black shales. Leningrad: Nauka, 1988
20 Ren D, Zhao F, Wang Y, et al. Distribution of minor and trace elements in Chinese coals. Int J Coal Geol, 1999, 40: 109–118
21 Wang T G, Li S M, Zhang S C. Oil migration in the Lunnan region, Tarim Basin, China based on the pyrrolic nitrogen compound distribution. J Pet Sci Eng, 2004, 41: 123–134
22 Xiao X M, Liu D H, Fu J M. Multiple phases of hydrocarbon generation and migration in the Tazhong petroleum system of the Tarim Basin, People's Republic of China. Org Geochem, 1996, 25: 191–197
23 Xu S, Nakai S, Wakita H, et al. Helium isotope compositions in sedimentary basins in China. Appl Geochem, 1995, 10: 643–656
24 Xu Y C, Liu W H, Shen P, et al. Geochemistry of Noble Gases in Natural Gases. Beijing: Science Press, 1998
25 刘全有, 戴金星, 金之钧, 等. 塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因. 地质学报, 2009, 83: 107–114
26 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997
27 Madsen P P. Peat bog records of atmospheric mercury deposition. Nature, 1981, 293: 127–130
28 梁狄刚, 张水昌, 赵孟军, 等. 库车坳陷的油气成藏期. 科学通报, 2002, 47(增刊): 56–63