

天然气地球化学

珠江口盆地白云凹陷深水区 LW3-1-1 井 天然气地球化学特征及成因探讨

朱俊章¹, 施和生¹, 何敏¹, 庞雄¹, 杨少坤², 李昭伟²

(1. 中海石油有限公司深圳分公司技术部, 广东 广州 510240;

2. 中海石油有限公司深圳分公司勘探部, 广东 深圳 518067)

摘要: 根据组分组成、轻烃组成、碳同位素组成和氢同位素组成, 分析了珠江口盆地白云凹陷深水区 LW3-1-1 井天然气的地球化学特征、成因与来源, 指出: 该天然气藏为纯烃湿气藏, 天然气成熟度较高, 处于凝析气演化阶段; 天然气母质类型为腐殖—腐泥型, 以干酪根裂解气为主, 主要来自第三系恩平组和珠海组烃源岩, 其中恩平组的贡献较大; 天然气碳同位素值呈正序分布, 气源相对单一, 且为有机成因; 天然气 δD 值偏重。推测珠江口盆地白云凹陷南部在始新世—渐新世恩平组沉积时期有过海侵。

关键词: 珠江口盆地; 白云凹陷; 深水区; 天然气; 地球化学特征; 成因与来源

中图分类号: TE122.1⁺13

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2008)02-0229-05

0 引言

近年来, 在国外深水油气勘探取得了丰富的成果, 使很多深水领域油气资源已进入开发, 乃至生产阶段。在我国超过 500 m 水深的海域约占海域总面积的 3/4。我国南海北部陆坡区的盆地南沙海域 13 个新生带沉积盆地均部分或全部位于深水区, 但我国深水领域的油气勘探才刚刚起步, 多处于资源评价和战略选区阶段。

目前, 深水区是指 400 m 水深线以外地区, 而超深水区是指水深大于 1 500 m 的区域^[1]。本文研究井 LW3-1-1 井位于南海北部珠江口盆地珠二坳陷白云凹陷东部荔湾 3-1 (LW3-1) 断背斜构造上, 海水深度 1 480 m。该井在上渐新统珠海组和下中新统珠江组共 4 个目的层获得工业气流, 累计天然气地质储量约为 (800~1 100) 亿 m³。

针对珠江口盆地白云凹陷深水区的油气勘探才刚刚起步的实际情况, 本文来分析已发现工业油气流井的天然气的地球化学特征, 并探讨其成因和来源, 对于珠江口盆地白云凹陷深水区油气资源潜力评价和勘探方向决策一定会有所裨益。本项研究的

主要目的为: ①论述该井各层系天然气的地球化学特征; ②探讨天然气的成因和来源。

1 石油地质背景

1.1 基本地质特征

珠江口盆地由北向南可划分为 5 个北东向的大型构造带, 即北部断阶带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带和南部隆起带, 各个构造带又可分若干个凹陷和低凸起^[2]。

白云凹陷位于珠江口盆地南部坳陷带, 其包括白云东凹、白云主凹和白云西凹, 是一个长期继承发育的封闭与半封闭的凹陷。该凹陷面积约 25 500 km², 沉积厚度大于 11 000 m, 下第三系厚度大于 6 000 m。白云凹陷内始新统文昌组、始新统一渐新统恩平组均有广阔而稳定的静水湖相巨厚泥岩分布, 是有利的生烃凹陷。

恩平组沉积之后一直到 23.8 Ma, 盆地处于裂后热沉降阶段, 在白云凹陷南部广泛发育典型三角洲斜交—S 型前积组合反射结构, 表明上渐新统珠海组是一套快速增长、沉积厚、砂泥互层、分布面积巨大的浅海陆架—三角洲沉积, 而半深海—深海相

发育于白云凹陷南部。LW3-1-1 井钻揭的珠海组大套泥岩处于海相三角州前沿相带, 为中等烃源岩。

1.2 烃源岩特征

白云凹陷是珠江口盆地面积最大、第三系沉积岩厚度最大的凹陷。主要发育有文昌组、恩平组、和珠海组等 3 套有效烃源岩系。文昌组和恩平组暗色泥岩加煤层累计最大厚度达数千米。珠海组暗色泥岩具有良好的生烃能力。珠江组暗色泥岩已进入低熟阶段, 具有一定的生烃能力。

恩平组泥岩为一套含煤岩系。在恩平组沉积时期基本上结束了文昌组沉积时期断陷分割的现象, 使白云主凹成为整个珠二坳陷的沉降和沉积中心, 统一的白云凹陷格局形成。在白云凹陷内, 恩平组时期湖相沉积面积约 2 400 km², 恩平组烃源岩平均 TOC 统计值为 2.19%, 有机质丰度高, 干酪根类型以 II₂ 型为主, 部分为 II 型和 I 型干酪根。恩平组烃源岩现今主要处于成熟—高成熟演化阶段, 为本区重要的烃源岩。

LW3-1-1 井钻揭的珠海组泥岩均质性强, 有机质丰度中等, 其 TOC 值大多介于 1.0%~1.5% 之间, PG 值大多介于 2.0~4.0 mg/g 之间, 主要为中等烃源岩。珠江组烃源岩有机质丰度低, 绝大部分样品的 TOC<0.6%, PG<2 mg/g, 属于差烃源岩。

白云凹陷主洼 02EC1530 测线剖面模拟结果表明, 在距今 20 Ma 时, 该剖面最大埋深处, 文昌组地层进入高成熟和过成熟干气阶段, 恩平组烃源岩开始进入主要生、排油时期; 在 16 Ma 以来, 在距今 11 Ma 时, 该剖面珠海组地层处在生油窗, 成熟度 (R_o) 为 0.5%~1.25%。

2 天然气地球化学特征

天然气的组分和同位素特征是研究天然气成因、来源和进行气—源对比等非常重要的地球化学

指标之一^[3-4]。天然气中甲烷随着源岩的热演化程度增加而逐步富集重碳同位素¹³C^[4]。甲烷的氢同位素也随其热演化程度增强而变重^[5]。

本次研究中对 LW3-1-1 井珠江组和珠海组共 4 个气层(气层 1 到气层 4)的天然气样品的组分组成、轻烃组成、碳同位素和氢同位素组成进行了分析。

2.1 天然气的组分特征

天然气的组分通常分为烃类组分和非烃组分, 烃类组分主要为甲烷、乙烷及乙烷以上的重烃组分。LW3-1-1 井珠江组和珠海组天然气藏为烃类气藏, 烃类含量大于 96%; 气层 1 到气层 3 中天然气样品 N₂ 含量为 0.04%~0.06%, CO₂ 为 3.01%~3.21%, 干燥系数为 90.79%~91.52%; 气层 4 天然气样品中 N₂ 含量为 0.11%~0.15%, CO₂ 为 2.37%~2.42%, 干燥系数为 88.26%~88.35%。LW3-1 构造天然气藏中无机气体含量低, 为纯烃气藏, 且均为湿气。

2.2 天然气轻烃组成

轻烃中链烷烃、环烷烃和芳香烃的相对含量通常与其烃源岩有机质类型相关, 并受沉积环境和成熟度的影响。

由表 1 可见, LW3-1-1 井天然气中 C₆ 系列各组分的摩尔分数由大到小的顺序依次是环烷烃、正构烷烃和芳香烃; C₇ 系列各组分的摩尔分数中环烷烃最高, 正构烷烃和芳香烃相当; C₈ 系列各组分的摩尔分数中芳香烃略大于正构烷烃。在芳烃系列中, 苯的摩尔分数最低, 甲苯和 C₂-苯相当; 在气层 1 到气层 4 中苯的含量分别为 2 645 μg/L、3 347 μg/L、1 988 μg/L 和 1 309 μg/L, 甲苯的含量分别为 5 688 μg/L、7 995 μg/L、5 639 μg/L 和 4 169 μg/L。在环烷烃系列中, 甲基环己烷的摩尔分数最高, 甲基环戊烷和环己烷相当。正己烷、正庚烷和正辛烷的摩尔分数相当。

表 1 LW3-1-1 井天然气各组分摩尔分数归一化百分含量数据

| 井深(m) | 正己烷(%) | C ₁ -环戊烷(%) | 环己烷(%) | 苯(%) | 正庚烷(%) | C ₁ -环己烷(%) | C ₁ -苯(%) | 正辛烷(%) | C ₂ -苯(%) |
|---------|--------|------------------------|--------|------|--------|------------------------|----------------------|--------|----------------------|
| 3 070.5 | 15.33 | 8.03 | 7.30 | 7.30 | 13.14 | 11.68 | 13.14 | 10.22 | 13.87 |
| 3 144.5 | 14.36 | 9.57 | 8.51 | 7.45 | 13.30 | 12.77 | 14.89 | 9.57 | 9.57 |
| 3 184.0 | 13.60 | 8.00 | 8.00 | 6.40 | 13.60 | 12.80 | 15.20 | 10.40 | 12.00 |
| 3 499.0 | 14.35 | 10.55 | 9.28 | 2.53 | 15.61 | 14.35 | 6.75 | 16.88 | 9.70 |

在天然气轻烃组成中, 环戊烷系列与水生生物输入有关, 环己烷系列与陆源高等植物输入有关。LW3-1-1 井天然气中甲基环戊烷和环己烷相当, 表明

其气体生源构成中水生生物和陆源高等植物输入并存。LW3-1-1 井天然气轻烃组成中, 芳烃系列含量较高, 这可能与气源的沉积环境及天然气成因有关。

2.3 天然气碳同位素组成

天然气的甲烷碳同位素除与母源构成和成因类型有关外,主要受热演化程度的控制。LW3-1-1 井天然气甲烷碳同位素值分布在 $-36.6\text{‰} \sim -37.1\text{‰}$ 之间(表 2),成熟度较高。

张士亚等^[6]通过对天然气重烃碳同位素研究认为,天然气的重烃碳同位素虽然受热演化程度的影响,但主要受源岩母质碳同位素的控制。通常,由腐泥型有机质生成的天然气,其 $\delta^3\text{C}_2 < -28\text{‰}$;而由腐殖型有机质生成的天然气,其 $\delta^3\text{C}_2 > -28\text{‰}$ 。LW3-1-1 井天然气样品中 $\delta^3\text{C}_2$ 值介于 $-28.9\text{‰} \sim -29.6\text{‰}$ 之间,天然气母质类型应为腐殖—腐泥型。

由于有机成因的天然气是由于干酪根或高分子液态烃分解而成。因而天然气的甲烷及其同系物的

碳同位素组成特征受热力学分馏控制,也就是说富集轻碳同位素的基团优先分解成为小分子组分。因此,由同一烃源岩在相同阶段形成的天然气其碳同位素分布特征为 $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4 < \delta^3\text{C}_5$,也就是说随着碳数的增加逐渐富集重碳同位素^[7]。另一方面,随着热演化程度的增加天然气将逐步富集重碳同位素,同时天然气中甲烷、乙烷、丙烷、丁烷和戊烷之间的碳同位素差值将逐步减小^[8]。因而不同成因类型、或同一源岩不同演化阶段生成的天然气混合而形成的天然气藏,将改变 C_1-C_5 的碳同位素分布特征,甚至发生碳同位素倒转^[9]。该井所钻遇的天然气藏中天然气碳同位素总体呈正序分布,即 $\delta^3\text{C}_1 < \delta^3\text{C}_2 < \delta^3\text{C}_3 < \delta^3\text{C}_4 < \delta^3\text{C}_5$,表明天然气为有机成因,且气源相对单一。

表 2 LW3-1-1 井天然气各组分碳同位素($\delta^3\text{C}$)数据

| 气层号 | 井号 | 深度(m) | $\text{C}_1(\text{‰})$ | $\text{C}_2(\text{‰})$ | $\text{C}_3(\text{‰})$ | $i\text{C}_4(\text{‰})$ | $n\text{C}_4(\text{‰})$ | $i\text{C}_5(\text{‰})$ | $n\text{C}_5(\text{‰})$ |
|------|-----------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| GAS1 | LW3-1-1Sa | 3 070 | -37.1 | -5.7 | -29.0 | -27.2 | -27.1 | -26.2 | -26.8 |
| GAS2 | LW3-1-1 | 3 144.5 | -36.6 | -6.1 | -29.1 | -27.4 | -26.8 | -27.0 | -26.6 |
| GAS3 | LW3-1-1Sa | 3 189.5 | -36.8 | -5.7 | -28.9 | -27.5 | -26.9 | -27.4 | -27.2 |
| GAS4 | LW3-1-1 | 3 499.5 | -36.6 | -7.8 | -29.6 | -29.1 | -28.1 | -28.2 | -26.6 |

一般情况下,有机成因 CO_2 在天然气中的含量多低于 8‰ ,其碳同位素多小于 -10‰ ;而无机成因 CO_2 在天然气中的含量多大于 10‰ ,其碳同位素多大于 -8‰ 。该井天然气中 CO_2 碳同位素介于 $-5.7\text{‰} \sim -7.8\text{‰}$ 之间,应以无机成因为主。

2.4 天然气氢同位素组成

天然气的氢同位素主要受源岩沉积环境水介质的影响,Schoell M^[10]报道由海相源岩生成的天然

气比陆相源岩生成的天然气明显地富集重氢同位素。沈平等^[11]依据对我国主要沉积盆地天然气氢同位素组成特征的研究,认为来自海相(或咸水湖相)源岩生成的天然气,其甲烷的 δD 同位素值大于 -190‰ ,而陆相淡水环境源岩生成的天然气,其甲烷的 δD 同位素值小于 -190‰ 。该井天然气样品中甲烷的 δD 同位素值介于 $-158.1\text{‰} \sim -175.6\text{‰}$ 之间,表明其气源岩沉积水介质环境偏咸水。

表 3 LW3-1-1 井天然气各组分氢同位素(δD)数据

| 气层号 | 井号 | 深度(m) | $\text{C}_1(\text{‰})$ | $\text{C}_2(\text{‰})$ | $\text{C}_3(\text{‰})$ | $i\text{C}_4(\text{‰})$ | $n\text{C}_4(\text{‰})$ | $i\text{C}_5(\text{‰})$ | $n\text{C}_5(\text{‰})$ |
|------|-----------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| GAS1 | LW3-1-1Sa | 3 070 | -158.1 | -135.6 | -120.3 | -107.8 | -117.8 | -103.4 | -115.7 |
| GAS2 | LW3-1-1 | 3 144.5 | -158.4 | -137.5 | -123.5 | -110.0 | -118.8 | -106.0 | -120.8 |
| GAS3 | LW3-1-1Sa | 3 189.5 | -155.8 | -138.2 | -122.8 | -110.1 | -120.0 | -104.1 | -117.2 |
| GAS4 | LW3-1-1 | 3 499.5 | -175.6 | -164.5 | -160.1 | -125.6 | -153.3 | -118.4 | -134.4 |

3 天然气成因与来源讨论

综合分析 LW3-1-1 井珠江组和珠海组共 4 个气层(气层 1 到气层 4)的天然气样品的组分、轻烃、碳同位素和氢同位素组成特征,有助于分析天然气的成因和来源。

3.1 天然气成因类型

天然气组分组成(体积比 C_2/C_3)和碳同位素组成($\delta^3\text{C}_2-\delta^3\text{C}_3$)受制于天然气所处的热演化阶段和成因类型。采用天然气的(C_2/C_3)与($\delta^3\text{C}_2-\delta^3\text{C}_3$)关系图可进行成因识别^[1,12-13]。LW3-1-1 井天然气主要为干酪根裂解气(图 1)。

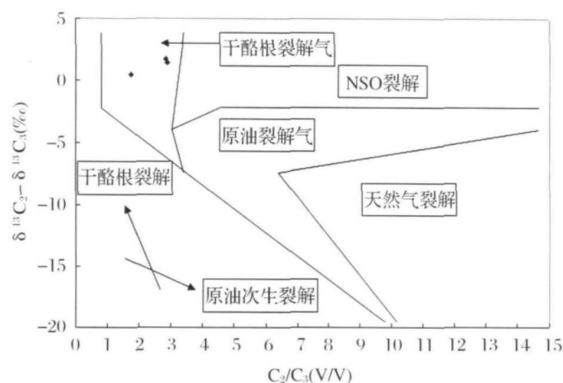


图1 LW3-1-1井天然气(C_2/C_3)— $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 成因识别

3.2 天然气成熟度

天然气的组分组成特征可以判断天然气成熟度,随成熟度的增加,甲烷的含量增加,天然气组分越来越轻^[12]。由图2可见,LW3-1-1井天然气藏为较高成熟天然气藏, R_o 约为1.1%~1.4%。气层1到气层3的天然气的成熟度较气层4的高。

LW3-1-1井天然气样品中乙烷碳同位素值介于-28.9‰~-29.6‰之间,天然气母质类型应为腐殖-腐泥型。甲烷碳同位素值分布在-36.6‰~-37.1‰之间,由甲烷碳同位素计算的 R_o 约为1.6%~1.8%(II₁型干酪根)或1.1%左右(II型干酪根)。

对于凝析油伴生气($R_o=1.0\%\sim 2.0\%$),甲烷的 δD 值分布在-250‰~-150‰之间。该井天然气样品中甲烷的 δD 值介于-158.1‰~-175.6‰之间,表明天然气的源岩处于凝析气演化阶段。

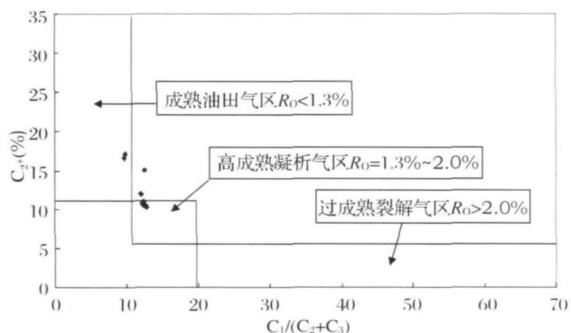


图2 LW3-1-1井天然气 $[C_1/(C_2+C_3)]$ 与 C_2+ 成熟度判别

3.3 天然气来源分析

原油中的轻芳烃除与母源有关外,还来源于母质的后生作用,最可能源于含直链和类异戊二烯链的化合物,其分布主要与温度和石油成熟过程中的深成热解作用阶段有关。珠江口盆地始新统文昌组

中深湖相源岩及其所生成的油气轻烃组成中环己烷系列和苯系列含量低,而LW3-1-1井天然气样品中环己烷系列和苯系列含量高,即LW3-1-1井天然气来源于中深湖相烃源岩的可能性小。

LW3-1-1井天然气和恩平组(白云凹陷北坡PY33-1-1井)、珠海组(LW3-1-1井)岩石吸附气的苯/ nC_6 —甲苯/ nC_7 关系图(图3)表明,LW3-1-1井天然气和恩平组、珠海组岩石吸附气的苯/ nC_6 和甲苯/ nC_7 值具有较明显的正相关关系,可能说明LW3-1-1井天然气与恩平组、珠海组烃源岩具有成因联系。从相似程度来看,LW3-1-1井天然气中恩平组烃源岩的贡献应大于珠海组的贡献。

天然气中甲烷的 δD 值表明,在恩平组沉积时期白云凹陷南部应为偏咸水的沉积环境,推测恩平组沉积时期有过海侵。

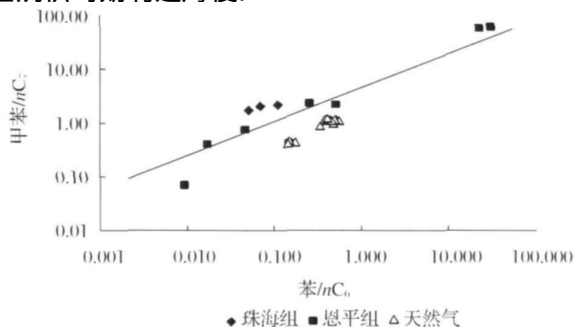


图3 LW3-1-1井天然气与源岩(珠海组和恩平组)苯/ nC_6 —甲苯/ nC_7 关系

4 结论

(1) LW3-1-1井珠江组和珠海组天然气藏中无机气体含量低,为纯烃气藏,且均为湿气,干燥系数介于88.26%~91.52%之间。

(2) 天然气组成中 C_7 -环戊烷、甲基环己烷、甲苯及正庚烷含量均势,表明其气体生源构成中水生生物和陆源高等植物输入并存。

(3) 天然气碳同位素总体呈正序分布,即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4 < \delta^{13}C_5$,表明天然气为有机成因,且气源相对单一。 $\delta^{13}C_2$ 值介于-28.9‰~-29.6‰之间,天然气母质类型应为腐殖-腐泥型。

(4) 天然气样品中甲烷的 δD 值介于-158.1‰~-175.6‰之间,表明其气源岩为偏咸水的水介质沉积环境。

(5) 天然气中 CO_2 碳同位素值介于-5.7‰~-7.8‰之间,应以无机成因为主。

(6) 天然气的成熟度较高,处于凝析气演化阶

段。天然气主要为干酪根裂解气,与恩平组及珠海组烃源岩具有成因联系,且恩平组烃源岩的贡献大于珠海组的贡献。

参考文献:

[1] 庞雄,陈长民,彭大钧,等.南海珠江深水扇系统及油气[M].北京:科学出版社,2007:1-5.

[2] 陈长民,施和生,许仕策,等.珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M].北京:科学出版社出版,2003:22-23.

[3] Stahl W. Carbon isotope fractionations in natural gas[J]. Nature, 1974, 251(1): 134-135.

[4] Schoell M. Genetic characterization of natural gas[J]. AAPG Bulletin 1983, 67(12): 2225-2238.

[5] 陈践发,李春园,应光国,等.煤型气烃类组分的稳定碳、氢同位素组成研究[J].沉积学报,1995, 13(2): 59-69.

[6] 张士亚,郜建军,蒋泰然,等.利用甲烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法[G]//石油与天然气地质文集(第一

集)——中国煤成气研究.北京:地质出版社,1988:48-58.

[7] Galimov E. Source and mechanisms of formation of gaseous hydrocarbons in sedimentary rock[J]. Chemical Geology, 1988, (1/2/3): 77-95.

[8] James A T. Correlation of natural gas by use of carbon isotope distribution between hydrocarbon components[J]. Am Assoc Geol Bull, 1983, 67: 1176-1191.

[9] Fuex A N. The use of stable carbon isotope in hydrocarbon exploration[J]. J Geochem Explor, 1977, 7: 155-188.

[10] Schoell M. Multiple origin of methane in the earth[J]. Chemical Geology, 1988, (1/2/3): 10.

[11] Shen ping. Characteristics of carbon and hydrocarbon isotopic compositions of light hydrocarbons[J]. Science in China: series B, 1995, 38(2): 211-220.

[12] 朱俊章,施和生,庞雄,等.珠江口盆地番禺低隆起天然气成因和气源分析[J].天然气地球科学,2005 16(4): 456-459.

[13] 何家雄,陈胜红,姚永坚,等.南海北部边缘盆地油气主要成因类型及运移分布特征[J].天然气地球科学,2008 19(1): 34-40.

Origins and Geochemical Characteristics of Gases in LW3-1-1 Well in the Deep Sea Region of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

ZHU Jun-zhang¹, SHI He-sheng¹, HE Min¹, PANG Xiong¹, YANG Shao-kun², LI Zhao-wei²
(1. Technology Department, CNOOC China Limited-Shenzhen, Guangzhou 510240, China;
2. Exploration Department, CNOOC China Limited-Shenzhen, Shenzhen 518067, China)

Abstract: The geochemical characteristics and origins of natural gases in LW3-1-1 well in deep sea region of the Baiyun sag in the Pearl River Mouth basin are studied by use of components, light hydrocarbons, stable carbon and hydrogen isotopes of the natural gases. The natural gases are pure hydrocarbon wet gases, with relatively high maturity, and generated in condensates stage. The natural gases are derived mainly from the Enping Formation and secondly from the Zhuhai Formation source rock with the Humic-Sapropelic kerogen. The positive sequence distributions of carbon isotopes of the gases reveal that these gases are organic in origin and are from the same source. It is concluded that the sea water spreading occurred during Eocene-Oligocene according to the relatively heavy deuterium isotopes in methane of the gases.

Key words: Pearl River Mouth basin; Baiyun sag; Deep sea region; Natural gas; Geochemical characteristic; Origin and source.

资料

参数文献标注法——顺序编码制

正文中引用的文献的标注法可以采用顺序编码制,也可以采用著者一出版年制。《天然气地球科学》杂志采用的是前者,即顺序编码制。

顺序编码制是按正文引用的文献出现的先后顺序连续编码,并将序号置于方括号中,文中方括号中序号与文后参数文献表中顺序号一一对应。

同一处引用多篇文献时,只须将各篇文献的序号在方括号内全部列出,各序号间用“,”如遇连续号,在起讫号之间用“-”号。