

文章编号: 1000-0550(2007) 02-0307-07

江苏金湖凹陷古近系奇碳优势和偶碳优势共存的正构烷烃

宋宁^{1,2} 王铁冠¹ 李美俊¹

(1 中国石油大学石油天然气藏机理教育部重点实验室 北京 102249

2 中国石油化工股份有限公司江苏油田地质科学研究院 江苏扬州 225009)

摘要 苏北盆地金湖凹陷古近纪阜宁组二段暗色泥岩及其生成的原油中,正构烷烃系列存在着偶碳优势、奇碳优势以及二者共存的 3 种分布型式。本文重点探讨正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的形成原因。在这类暗色泥岩与原油中,正构烷烃通常低碳数部分呈 nC_{15} 、 nC_{17} 优势,中碳数具有 nC_{20} 、 nC_{22} 优势,高碳数为 nC_{25} 、 nC_{27} 、 nC_{29} 、 nC_{31} 优势;并且具有强烈的植烷优势、较高的伽玛蜡烷指数、含有一定量 β 胡萝卜烷和 C_{24} 四环萜烷。分析认为沉积水体环境和有机质来源的变化决定了正构烷烃的分布形式,该类正构烷烃形成于湖盆水体盐度分层的沉积环境,主要来源于湖盆内藻类和湖盆外高等植物蜡。

关键词 正构烷烃 沉积环境 生物标志物 金湖凹陷

第一作者简介 宋宁 男 1972 年出生 博士研究生 石油地质学 E-mail: songni@sohu.com

中图分类号 P593 **文献标识码** A

金湖凹陷古近纪阜宁组二段广泛发育一套半咸水—咸水湖相暗色泥岩,并生成大量低熟原油。前人对该区的有机地球化学进行过著有成效的研究^[1-7]。例如,包建平^[2]报道,阜宁组二段暗色泥岩的正构烷烃系列,在纵向向上间互出现偶碳优势和奇碳优势二种分布型式;具偶碳优势的正构烷烃,主峰碳数 nC_{20} 、 nC_{22} 、 nC_{28} 或 nC_{30} , 奇偶指数 (OEP) 0.39~0.91, 姥鲛烷与植烷比值 (Pr/Ph) 0.05~0.50, 多数 < 0.3, 属于半咸水—咸水缺氧的沉积,沉积有机质来源于湖盆内低等水生生物;而具奇碳优势的正构烷烃,主峰碳数 nC_{27} 、 nC_{29} 或 nC_{31} , OEP 值 1.59~3.70, Pr/Ph 值 0.34~0.80, 多数 > 0.3, 系水体淡化的正常湖泊沉积产物,有机质来源于陆源高等植物蜡^[8];反映了阜宁组二段沉积期,金湖凹陷曾经存在过两种不同的湖相沉积环境的交替变迁,导致沉积有机质生源构成与生物标志物组成的差异。

基于饱和烃气相色谱和质量色谱的分析结果,作者检验、证实了前人的上述研究成果^[1,2]。但是,在国内外的文献中,尚未见到涉及讨论奇碳优势和偶碳优势正构烷烃共存的问题。本文主要报道在金湖凹陷阜宁组二段暗色泥岩与原油样品中,检测发现正构烷烃系列同时存在奇碳优势和偶碳优势分布型式,并试图探讨其形成原因。

1 地质背景

金湖凹陷为中国东部油气勘探成熟区之一,位于苏北盆地东台拗陷的西部,北为建湖隆起,南至天长凸起,西临张八岭隆起,东与柳堡—菱塘桥凸起相连,面积约 5000 km² (图 1)。该凹陷为晚白垩世开始发育的箕状凹陷,主要发育新生界,自下而上划分为古近系阜宁组、戴南组、三垛组,新近系盐城组和第四系东台组,最大厚度达 5500 m。主要含油层系为阜宁组,自下而上进一步划分为一、二、三和四段。前人研究认为^[5,7],目前发现的原油绝大多数来源于阜宁组二段半咸水—咸水环境沉积的暗色泥岩。

2 样品与实验

本文共涉及 17 件阜宁组二段暗色泥岩与 2 件原油样品,采样井位分布见图 1。暗色泥岩样品的有机质丰度悬殊,有机碳 0.40%~4.74%, 氯仿沥青“A” 0.0105%~1.1342%。镜质组反射率 R_o 值 0.38%~0.71%, 表明沉积有机质处于低熟阶段。

按常规有机地球化学方法进行原油与岩样分析。泥岩清除表面可能的污染物后,粉碎至 100 目,用三氯甲烷抽提。原油样品经脱水处理后,用三氯甲烷浸泡萃取,滤去萃取物中的泥砂。泥岩的抽提物和去泥

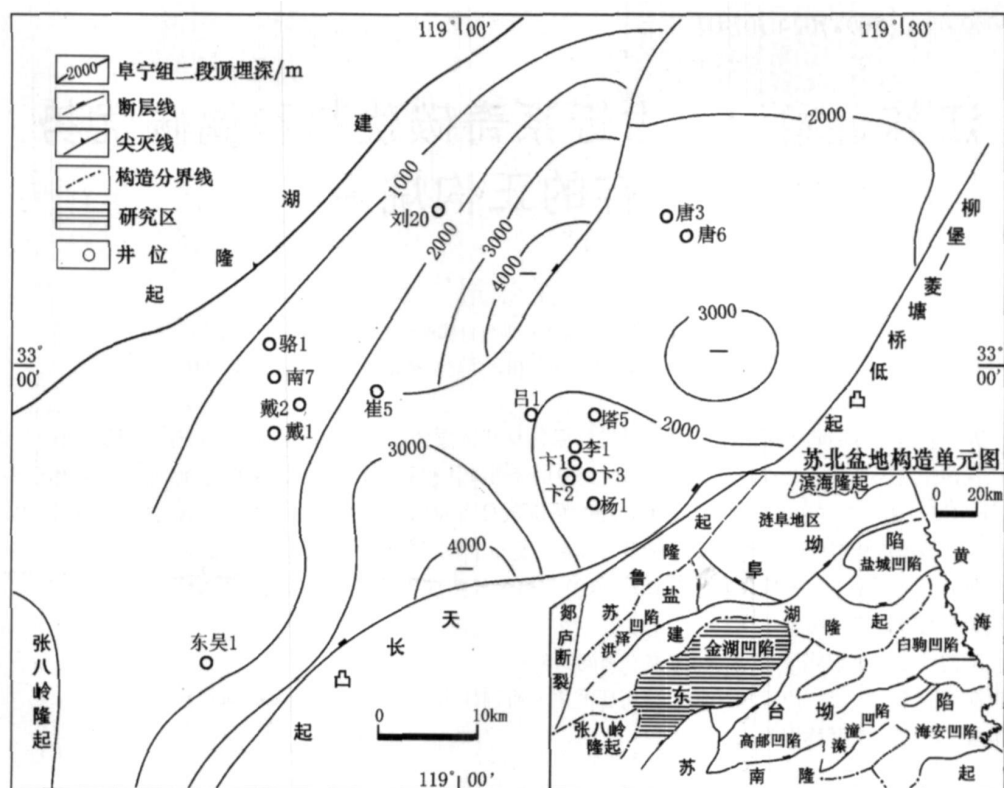


图 1 金湖凹陷泥岩与原油取样井位分布

Fig. 1 Map of sampling locations in the Jinhu Sag

砂的原油,以正己烷沉淀去除沥青质后,做柱层分析,用正己烷冲洗出饱和烃馏分。对饱和烃馏分进一步作气相色谱和色谱—质谱分析。

气相色谱分析在 HP6890 型仪器上进行,配置 SE54 弹性石英毛细色谱柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 氦气作载气。程序升温条件: 初始温度 80°C 恒温 5 m in, 以速率 4°C / m in 从 80°C 升至 300°C 后,再恒温 20 m in。

色谱—质谱分析在 Finnigan Mat SSQ-710 型仪器上进行, DB5-MS 石英毛细色谱柱 (60 m × 0.25 mm × 0.17 μm), 氦气为载气。升温程序: 40°C (5 m in); 40 ~ 300°C 速率 2°C / m in; 300°C (15 m in)。接口温度 250°C, EI 源, 电离能 70 eV, 离子源温度 250°C。

3 成果

3.1 饱和烃馏分的气相色谱特征

从 19 件油、岩样品的饱和烃馏分中,检测到的主要烃类为正构烷烃系列、类异戊二烯烃系列、甾烷和萜烷等(图 2), 各项生物标志物参数见表 1 和表 2。

作为饱和烃馏分中最主要的成份,正构烷烃系列的碳数范围 $n_{C_{10}} \sim n_{C_{44}}$, 轻重比 $n_{C_{21}}/n_{C_{22}}$ 值仅 0.20 ~ 0.76 高碳数正构烷烃丰度显然高于低碳数同系物,正构烷烃奇偶优势或偶奇优势明显,具有未成熟—低成熟的特征。

正构烷烃系列呈现三种分布形式: 第一类 1 ~ 7 样品正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存,主峰碳数 $n_{C_{23}}$, $n_{C_{25}}$ 或 $n_{C_{27}}$, OEP 值 0.64 ~ 5.09, 变化范围大; CPI 值 1.06 ~ 2.97, 绝大多数大于 1.10, OEP 值和 CPI 值的分布复杂。第二类 8 ~ 14 样品偶碳优势,主峰碳数 $n_{C_{22}}$ 或 $n_{C_{28}}$, OEP 值 0.37 ~ 0.87, 均小于 0.90 而 CPI 值 0.61 ~ 1.14, 绝大多数小于 1.10。第三类 15 ~ 19 样品奇碳优势,主峰碳数 $n_{C_{23}}$, $n_{C_{25}}$, $n_{C_{27}}$ 或 $n_{C_{31}}$, OEP 值 1.22 ~ 4.17, 均大于 0.90, CPI 值 1.30 ~ 2.49, 均大于 1.10。正构烷烃偶碳优势、奇碳优势的分布形式,已有详细报道^[1,2], 文中不再赘述。

下文重点关注,第一类正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的 1 ~ 7 样品。饱和烃馏分中,低碳数 $n_{C_{15}}$,

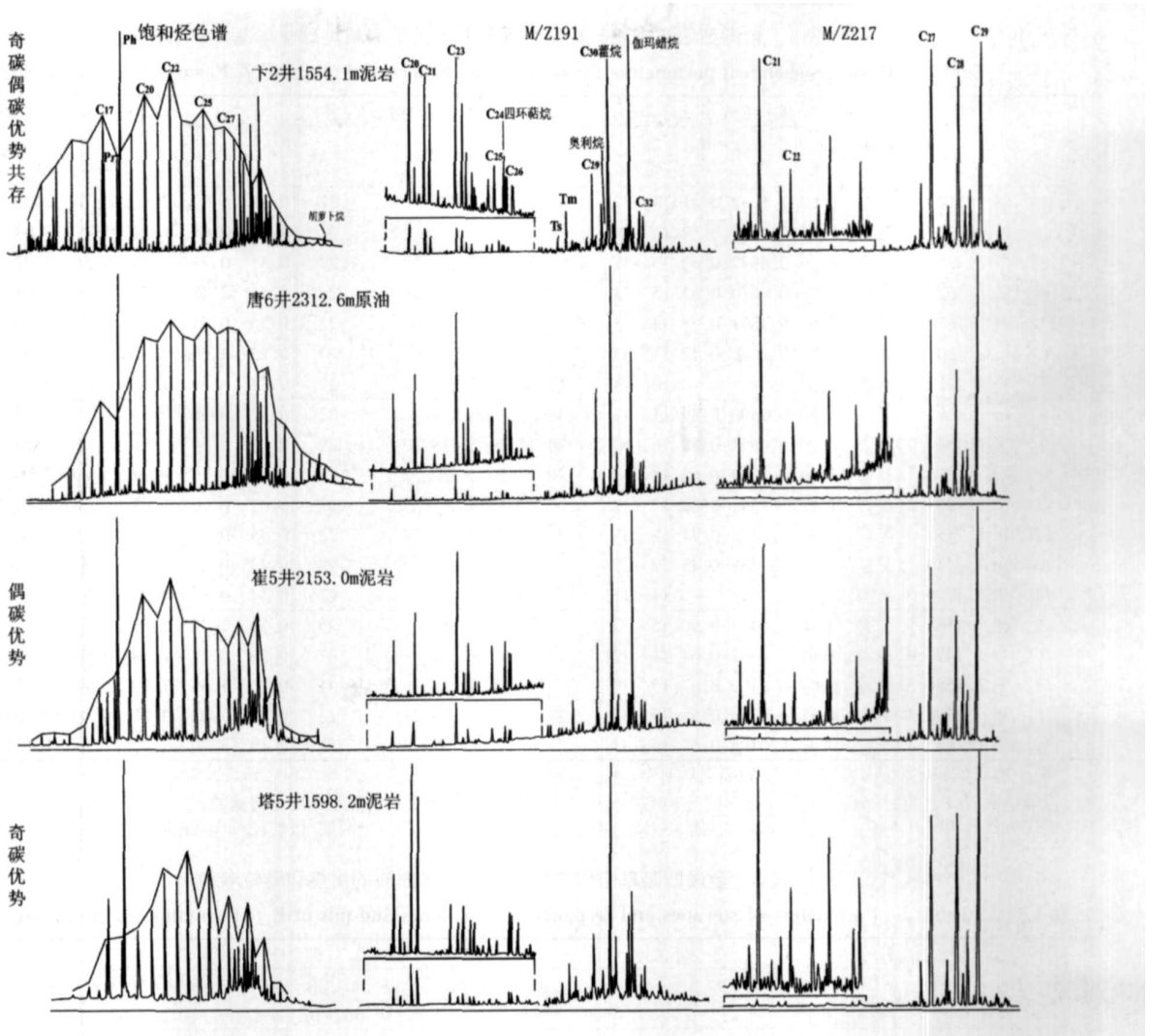


图 2 金湖凹陷阜宁组二段暗色泥岩和原油的饱和烃气相色谱、质量色谱图

Fig 2 Saturate gas chromatograms and mass chromatograms in mudstones and oils of E₁f₂ Formation for the Jnhu Sag

*n*C₁₇优势, 中等碳数 *n*C₂₀, *n*C₂₂优势, 高碳数 *n*C₂₅, *n*C₂₇, *n*C₂₉和 *n*C₃₁优势(图 2), 即低碳数和高碳数的正构烷烃是奇碳优势, 而中碳数的正构烷烃为偶碳优势。

类异戊二烯烃系列以姥鲛烷和植烷为主, 呈现出强烈的植烷优势, Ph/*n*C₁₈值 2.26~4.91, 即植烷丰度显著超过 *n*C₁₈。Pr/Ph值仅 0.12~0.33 这与正构烷烃偶碳优势的 8~14 样品类似, 而明显低于奇碳优势的 15~19 样品的 Pr/Ph值 0.30~1.36(表 1 和图 3)。

饱和烃中, 甾类和萜类的丰度分别占 7.95%~22.42%、3.25%~5.64%(表 2)。萜类中含有一定量的 β 胡萝卜烷, β 胡萝卜烷/*n*C₃₇值 1.21~5.02,

甾类、萜类分布与正构烷烃偶碳优势的 8~14 样品也极为相似(表 1、图 4), 而与奇碳优势的 15~19 样品差别明显。

3.2 正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存样品中的饱和烃色谱—质谱特征

甾、萜类的成熟度参数, 三降藿烷 T_s/T_m 值 0.05~0.46, T_s丰度显著低于 T_m; C₃₁ α^β藿烷 22S/(22S+22R)值 0.30~0.49 尚未达到平衡终点值 0.55~0.65^[8]。C₂₉ ααα 甾烷 20S/(20S+20R)值 0.06~0.18, C₂₉甾烷 αββ/(ααα+αββ)值 0.11~0.17, 也未达到平衡终点值 0.55~0.66 指示沉积有机质与原油的低成熟^[6]。可见, 甾、萜类主要反映样品的沉积环境和有机物来源信息, 而热演化对其的影响较为次要。

表 1 金湖凹陷阜宁组二段暗色泥岩和原油的有机地球化学基本参数

Table 1 Basic geochemical parameters for selected mudstones and oils of E₁f₂ Formation in Jintu Sag

类型	序号	井号	深度 /m	样品	基本参数				正构烷烃				类异戊二烯烃			$\frac{\beta}{nC_{37}}$	
					C /%	A /%	R ₀ /%	碳数范围	优势碳	主峰	$\frac{nC_{21}}{nC_{22}}$	OEP	CPI	$\frac{Pr}{nC_{17}}$	$\frac{Ph}{nC_{18}}$		$\frac{Pr}{Ph}$
奇碳偶碳优势共存	1	骆 1	1102.5	泥岩	3.60	1.1342	0.41	14~37	17, 20, 25, 27, 29, 31	27	0.22	5.09	2.97	0.76	2.26	0.29	1.21
	2	刘 20	1159.5	泥岩	1.31	0.1099	0.38	16~38	22, 25, 27	22	0.29	0.64	1.22	1.42	3.08	0.12	3.92
	3	卞 2	1554.1	泥岩	3.19	0.6847	0.60	15~37	15, 17, 20, 22, 25, 27	22	0.54	0.73	1.26	0.56	4.77	0.15	3.01
	4	戴 1	1625.1	泥岩	1.19	0.4670	0.63	15~34	17, 20, 22, 27, 29, 31	25	0.51	2.48	2.46	0.73	2.66	0.33	4.01
	5	戴 1	1636.0	页岩	1.61	0.1891	0.55	14~35	17, 20, 22, 25, 27, 29	22	0.76	0.74	1.06	0.91	2.99	0.31	5.02
	6	戴 2	1608.0	泥岩	4.74	0.2068	0.42	11~42	17, 20, 22, 25, 27	27	0.29	2.09	2.02	1.19	3.56	0.33	3.46
	7	唐 6	2312.6	原油	-	-	-	10~44	17, 20, 22, 25, 27, 31	22	0.34	0.80	1.12	1.01	4.91	0.16	1.50
偶碳优势	8	南 7	1295.0	泥岩	0.80	0.0590	0.39	11~42	22, 24, 26, 28, 30	22	0.22	0.38	0.77	0.59	1.35	0.30	1.38
	9	卞 3	1544.0	泥岩	2.90	0.4958	0.55	16~40	20, 22, 24, 26, 28, 30	22	0.25	0.54	0.61	0.48	3.82	0.09	3.05
	10	东吴 1	1886.3	泥岩	1.56	0.2784	0.65	14~37	20, 22, 26, 28, 30, 32	22	0.38	0.37	0.72	0.69	2.09	0.24	2.74
	11	吕 1	1909.2	泥岩	2.17	0.4691	0.62	14~39	17, 20, 22	22	0.62	0.66	1.03	0.58	4.61	0.14	1.67
	12	崔 5	2153.0	泥岩	2.41	0.3372	0.71	12~37	20, 22, 26, 28, 30, 32	22	0.45	0.78	1.00	0.75	3.64	0.19	7.42
	13	唐 3	2349.1	泥岩	2.01	0.1258	0.43	13~37	17, 20, 22, 28	28	0.43	0.69	1.14	0.83	5.55	0.17	3.01
	14	卞 1	1729.0	原油	-	-	-	14~41	22, 24, 28, 30	22	0.34	0.87	0.99	0.38	1.04	0.26	1.45
奇碳优势	15	刘 20	1164.5	泥岩	0.76	0.0477	0.50	15~37	25, 27, 29, 31	25	0.33	1.22	1.35	1.31	5.20	0.30	0.95
	16	李 1	1494.0	泥岩	1.91	0.0382	0.64	11~42	23, 25, 27, 29	27	0.28	4.17	2.49	3.08	2.31	1.36	0.75
	17	卞 2	1583.2	泥岩	0.47	0.0169	0.62	15~39	29, 31	31	0.20	1.59	1.30	0.73	1.75	0.34	0.66
	18	塔 5	1598.2	泥岩	1.58	0.0543	0.55	15~37	21, 23, 25, 27, 29, 31	23	0.39	1.33	2.00	0.60	4.63	0.37	0.84
	19	杨 1	1643.4	泥岩	0.40	0.0105	0.67	16~37	21, 25, 27, 29, 31, 33	31	0.49	3.70	2.42	0.57	0.94	0.54	0.73

注: C: 有机碳; A: 氯仿沥青 "A"; R₀: 镜质组反射率; nC₂₁- / nC₂₂+: 小于 nC₂₁正构烷烃峰面积之和与大于 nC₂₂-之比;
 奇偶指数 OEP: [(C_i + 6C_{i+2} + C_{i+4}) / (4C_{i+4} + 4C_{i+3})]^{(-1)ⁱ⁺¹}, 其中 C_{i+2} 为正构烷烃系列的主峰碳数;
 碳优势指数 CPI = 0.5 [C₂₅₋₃₃(奇) / C₂₄₋₃₂(偶) + C₂₅₋₃₃(奇) / C₂₆₋₃₄(偶)]; Pr/Ph: 姥鲛烷 / 植烷; β / nC₃₇: β 胡萝卜烷 / nC₃₇

表 2 金湖凹陷阜宁组二段暗色泥岩和原油的甾烷和萜烷参数

Table 2 Parameters of steranes and terpanes in mudstones and oils of E₁f₂ Formation in Jintu Sag

类型	序号	井号	萜烷						甾烷						甾烷 藿烷		
			萜烷 /%	三环 五环	$\frac{C_{24}}{C_{26}}$	Ts/Tm	$\frac{G}{G_{30}}$	$\frac{O}{C_{30}}$	甾烷 /%	$\frac{C_{29}S}{S+R}$	$\frac{C_{29}\beta\beta}{\alpha\alpha+\beta\beta}$	C ₂₇ R /%	C ₂₈ R /%	C ₂₉ R /%		$\frac{C_{27}R}{C_{29}R}$	
奇碳偶碳优势共存	1	骆 1	5.64	0.11	1.45	0.05	1.11	0.11	0.44	12.28	0.04	0.11	30.3	30.8	38.8	0.78	2.47
	2	刘 20	5.43	0.04	1.98	0.13	1.34	0.09	0.49	9.28	0.08	0.14	21.1	22.8	56.1	0.38	2.66
	3	卞 2	3.91	0.10	0.94	0.46	1.47	0.07	0.49	13.37	0.08	0.15	30.9	30.5	38.5	0.80	3.56
	4	戴 1	4.43	0.12	1.21	0.30	1.56	0.03	0.34	11.18	0.09	0.16	22.0	21.4	56.3	0.39	2.68
	5	戴 1	3.25	0.09	0.56	0.40	1.76	0.03	0.35	8.49	0.06	0.15	21.2	21.6	57.3	0.37	2.74
	6	戴 2	5.57	0.17	0.84	0.20	0.61	0.11	0.30	22.42	0.07	0.17	19.8	33.5	46.7	0.59	4.31
	7	唐 6	3.82	0.21	1.40	0.21	0.65	0.03	0.49	7.95	0.18	0.14	24.3	32.7	43.0	0.56	2.23
偶碳优势	8	南 7	5.24	0.07	1.97	0.34	0.60	0.08	0.43	7.65	0.08	0.17	24.8	27.7	47.5	0.52	1.74
	9	卞 3	4.82	0.23	0.67	0.36	1.13	0.18	0.45	10.08	0.07	0.16	20.4	28.7	50.8	0.40	2.95
	10	东吴 1	7.40	0.05	1.29	0.43	3.98	0.16	0.46	17.98	0.06	0.17	22.3	26.3	51.4	0.43	2.56
	11	吕 1	4.60	0.15	0.93	0.19	1.18	0.05	0.52	7.78	0.15	0.17	24.1	29.5	46.4	0.52	2.48
	12	崔 5	5.44	0.21	0.78	0.34	1.16	0.06	0.52	10.99	0.24	0.15	24.6	33.1	42.3	0.58	2.91
	13	唐 3	4.89	0.18	1.11	0.14	0.93	0.08	0.47	12.46	0.06	0.13	23.8	26.9	49.3	0.48	3.47
	14	卞 1	2.23	0.16	0.77	0.30	0.42	0	0.60	3.48	0.25	0.12	24.4	28.8	46.8	0.52	1.71
奇碳优势	15	刘 20	8.04	0.12	0	0.52	0.38	0.03	0.58	3.54	0.33	0.33	26.3	29.3	44.4	0.59	0.46
	16	李 1	2.27	0.05	0.74	0.40	0.09	0.08	0.37	0.77	0.06	0.26	30.9	27.5	41.6	0.74	0.29
	17	卞 2	4.12	0.10	0.94	0.38	0.41	0.15	0.48	3.05	0.12	0.18	20.0	22.2	57.8	0.35	0.83
	18	塔 5	3.92	0.17	0	0.48	0.56	0.03	0.37	2.85	0.08	0.21	24.8	33.7	41.5	0.60	0.86
	19	杨 1	3.35	0.11	0.81	0.45	0.26	0.05	0.58	0.84	0.28	0.29	19.8	22.9	57.3	0.35	0.24

注: 三环 / 五环: 三环萜烷 / 五环萜烷; C₂₄ / C₂₆: C₂₄四环萜烷 / C₂₆三环萜烷; Ts/Tm: 18α 三降藿烷 / 17α 三降新藿烷;
 伽玛蜡烷指数 G / C₃₀: 伽玛蜡烷 / C₃₀αβ 藿烷; O / C₃₀: 奥利烷 / C₃₀αβ 藿烷; C₃₁S / (S + R): C₃₁αβ 藿烷 22S / (22S + 22R);
 C₂₉S / (S + R): C₂₉ααα 甾烷 20S / (20S + 20R); C₂₉βββ / (αα + ββ): C₂₉甾烷 αββ / (ααα + αββ); C₂₇R, C₂₈R 和 C₂₉R: 规则甾烷 C₂₇ααα 20R, C₂₈ααα 20R 和 C₂₉ααα 20R.

萜类中已检出五环萜烷类、三环萜烷系列和少量四环萜烷。五环萜烷类主要包括 $C_{27} \sim C_{35}$ (缺 C_{28}) 藿烷、伽玛蜡烷和奥利烷, 分别指示细菌、原生动物和高等植物的生源; 其中 C_{30} 藿烷占明显的优势, 伽玛蜡烷含量丰富, 伽玛蜡烷指数 $0.61 \sim 1.76$ (表 2), 部分样品中伽玛蜡烷丰度高于 C_{30} 藿烷 (图 2), 指示沉积水体盐度较高, 或具有分层水体的沉积环境特征^[8, 9]; 奥利烷丰度低, 奥利烷 / C_{30} 藿烷值 $0.03 \sim 0.11$ 。三环萜烷系列以 C_{23} 三环萜烷为主峰, 碳数分布范围较窄, 仅限于 $C_{20} \sim C_{26}$, 与五环萜烷相比, 三环萜烷系列的丰度相对较低, 三环萜烷 / 五环萜烷值仅 $0.04 \sim 0.21$, 显示出陆相沉积与陆相原油的特点^[8]。含一定量的 C_{24} 四环萜烷, C_{24} 四环萜烷 / C_{26} 三环萜烷值 $0.56 \sim 1.98$ 。

甾类主要成分为 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷, 其次为少量 $C_{19} \sim C_{22}$ 孕甾烷和 4 甲基甾烷, 几乎不含重排甾烷, 4 甲基甾烷含量不高, 但普遍存在 (图 2)。 $C_{27} \sim C_{29}$ R 构型规则甾烷的丰度呈反“L”型或“V”字型分布, 即 $C_{27} R < C_{28} R < C_{29} R$ 或 $C_{27} R > C_{28} R < C_{29} R$, $C_{27} R / C_{29} R$ 值 $0.37 \sim 0.80$ (表 2), 以 C_{29} 甾烷占优势, 标志藻类与高等植物的混合生源的贡献^[4]。

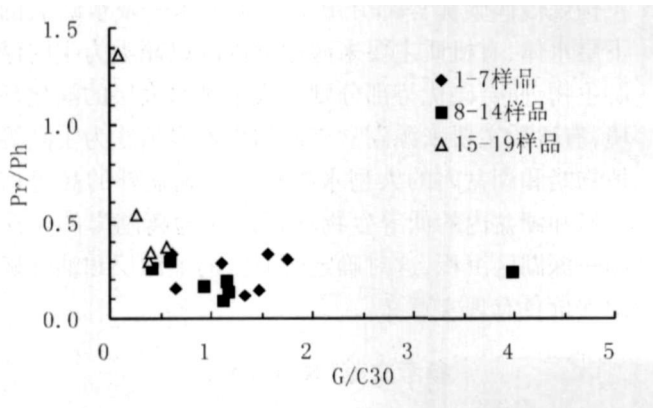


图 3 伽玛蜡烷指数与 Pr/Ph 相关图

Fig 3 Cross plots of gammacerane / C_{30} hopane and Pr/Ph

4 讨论

4.1 湖盆水体的沉积环境

前人的研究^[1, 2]业已证实, 在古近纪阜宁组二段沉积时期, 金湖凹陷曾经存在过两种不同的湖相沉积环境的交替变迁。正构烷烃偶碳优势的样品中 Pr/Ph 值 < 0.30 伽玛蜡烷含量丰富, 伽玛蜡烷指数高, 反映在干旱气候条件下, 处于半咸水—咸水缺氧的沉积环境, 湖盆可能具有分层水体与盐越层; 反之, 具奇

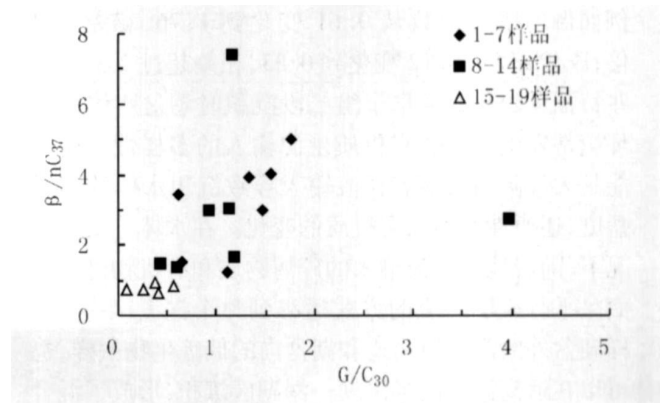


图 4 伽玛蜡烷指数与 β 胡萝卜素 / nC_{37} 的关系

Fig 4 Cross plots of gammacerane / C_{30} hopane and β -carotane / nC_{37}

碳优势的正构烷烃, Pr/Ph 值 > 0.30 伽玛蜡烷指数低, 表征在较为湿润的气候条件下, 湖盆水体淡化的沉积产物。

阜宁组二段典型岩性组合为纹层理发育的暗色泥岩、泥灰岩和油页岩与具块状层理或弱纹层理的泥岩和粉细砂岩等形成的不等厚互层, 组成有规律的韵律性沉积。暗色泥岩非常发育的纹层结构、底栖生物和生物扰动不发育以及其中某些特征的生物标志化合物, 如较高的伽玛蜡烷, 较低的 Pr/Ph 等, 都说明沉积过程中湖水出现稳定的分层现象^[9, 10]。

阜宁组二段指示沉积环境的参数, 如伽玛蜡烷指数、Pr/Ph、 β 胡萝卜素 / nC_{37} 等, 具有较好的相关性, Pr/Ph 随伽玛蜡烷指数的增大而减小 (图 3), β 胡萝卜素 / nC_{37} 随伽玛蜡烷指数的增大而增大 (图 4)。正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的 1~7 样品, 以具有强烈植烷优势, Pr/Ph 值仅 $0.12 \sim 0.33$ 伽玛蜡烷丰度多数超过 $C_{30} \alpha \beta$ 藿烷, 伽玛蜡烷指数普遍大于 0.6 最高达 1.76 含有 β 胡萝卜素, β 胡萝卜素丰度超过 nC_{37} , β 胡萝卜素 / nC_{37} 值大于 1.00 最高达 5.02 C_{24} 四环萜烷峰位明显。这些特征与偶碳优势的 8~14 样品相似 (图 3 和图 4), 反映沉积有机质总体上处于还原性的超盐水介质, 或属于垂向上具有盐度分层的水体沉积环境^[8, 9]。

同一构造带上, 位置相邻的卞 2 井、卞 3 井、李 1 井和塔 5 井, 样品深度相对集中 (图 1 和表 1), 其正构烷烃出现了三种不同的分布, 纵向上奇碳优势和偶碳优势共存、偶碳优势、奇碳优势的正构烷烃交替出现。另外, 正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的 1~7 样品, 另一个特征则是生物标志物组成的差异性,

例如伽玛蜡烷指数从 0.61 变化到 1.76 相差约 3 倍; Pr/Ph 值从 0.12 变化到 0.33 相差超过 2 倍。这些特征反映研究区阜宁组二段沉积时湖盆水体沉积环境常发生变化和有机质生源输入的多样性。这可能是大气降雨与地表径流输入导致沉积水体的相对盐度、还原性和输入有机质的变化。在水体分层的情况下,随着地表径流输入的碎屑物质和有机物可沿湖面呈平行或层间流的方式运移到整个深湖区^[10],这样湖盆外的高等植物蜡和湖盆内的低等生物一样,也可以在远离湖岸的半深湖—深湖区沉积,形成了混合的生物构成。

综上所述,金湖凹陷阜宁组二段正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的样品形成于水体盐度分层的沉积环境,生物标志物指示下层相对咸化水体的沉积环境,上、下层水体中不同来源的生物决定了正构烷烃分布特征。

4.2 不同碳数正构烷烃的成因探讨

不同有机质来源的正构烷烃,具有不同的组成特征。湖盆沉积物中有机质来源于湖盆内的细菌和藻类为代表的浮游低等生物、大型水生植物,或湖盆周围的陆生高等植物。一般认为^[11-13],来源于浮游植物的正构烷烃分布在低碳数范围,主导成分是 nC_{17} 或 nC_{19} , nC_{17} 主峰的出现常与藻类和光合细菌有关;来源于湖盆内大型水生植物的正构烷烃在 nC_{21} 、 nC_{23} 或 nC_{25} 处具明显优势;来源于湖盆周围高等植物蜡的正构烷烃分布在高碳数范围,奇碳优势,主导成分为 nC_{27} 、 nC_{29} 和 nC_{31} , nC_{27} 主峰的出现常与木本植物有关, nC_{29} 主峰的出现常与木本植物落叶有关,而 nC_{31} 主峰的出现常与草本植物有关。另外,具有 $nC_{14} \sim nC_{22}$ 偶碳优势的正构烷烃一般认为是咸水环境有机质的普遍特征^[6,14]。

正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的 1~7 样品,并非咸水环境中常见的单一偶碳优势,也非浮游植物和高等植物蜡中常见的单一奇碳优势,这意味着该类样品中正构烷烃系列具有多种成因或来源。(1) 低碳数 $nC_{12} \sim nC_{19}$ 正构烷烃,具有 nC_{17} 优势,可能主要来源于藻类和光合细菌。标志藻类生源的规则甾烷与反映细菌生源的藿烷相对含量比值 2.23~4.31 (表 2),表征在生源构成中藻类生源贡献多于细菌^[3]。(2) 中等碳数的正构烷烃,具有明显 nC_{20} 和 nC_{22} 优势,可能与嗜盐细菌有关^[14]。(3) 高碳数 $nC_{25} \sim nC_{40}$ 正构烷烃,具有 nC_{25} 、 nC_{27} 、 nC_{29} 和 nC_{31} 优势,主要来源于大型水生植物和高等植物蜡。根据 nC_{27} 、

nC_{29} 和 nC_{31} 相对含量的高低 (图 2),可以推断木本植物对正构烷烃的贡献大于草本植物。

另外,对于高碳数范围呈奇碳数优势的正构烷烃来源于高等植物蜡,有学者提出质疑,认为可能主要来源于藻类^[15]。根据胡国艺等一文的图 3^[4],正构烷烃 $nC_{22} \sim nC_{27}$ 单体烃同位素变化幅度不明显, nC_{27} 之后的单体烃同位素出现明显波动,说明 nC_{27} 前后正构烷烃的生源可能并不一致, nC_{27} 之前的正构烷烃主要来源于藻类, nC_{27} 之后的正构烷烃与高等植物蜡有关。特别是,在金湖凹陷该段的暗色泥岩中均检测到高等植物输入的标志物——奥利烷 (图 2),也进一步说明了母质中一定有高等植物蜡。

综上所述,金湖凹陷阜宁组二段奇碳优势和偶碳优势共存的正构烷烃,来源于多种生物。既有湖盆周围的高等植物蜡,又有湖盆内的浮游低等生物和大型水生植物。高等植物以木本植物为主,低等生物以藻类为主。

5 结论

金湖凹陷阜宁组二段正构烷烃奇碳优势和偶碳优势共存的样品,形成于水体盐度分层的沉积环境。正构烷烃偶碳优势部分形成于半咸水—咸水缺氧的下层水体,有机质主要来源湖盆内的以藻类为主的浮游生物;而奇碳优势部分则形成于湖水表层的淡化环境,有机质主要来源湖盆周围的以木本植物为主高等植物蜡和湖盆内的大型水生植物。湖盆外的高等植物蜡和湖盆内的低等生物均可以在远离湖岸的半深湖—深湖区沉积,这对确定研究区的油源层和油气资源评价具有现实意义。

参考文献 (References)

- 李任伟,林大兴,黄宛平,等. 苏北盆地有机地球化学环境分析. 中国科学 (B 辑), 1986, 6: 645-655 [Li Renwei, Lin Daxin, Huang Wanping, et al. Analysis on organic geochemical environment in Subei basin. Science in China (Series B), 1986, 6: 645-655]
- 包建平,王铁冠,干一女. 生物标志物组成与沉积环境研究. 见: 王铁冠,著. 生物标志物地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 66-73 [Bao Jianping, Wang Tieguan, Gan Yinyu. Study on biomarkers combination and sedimentary environment of E_{1f2} in Jinhu depression, Subei basin. In: Wang Tieguan. Study on Biomarkers Geochemistry. Wuhan: China Geology University Press, 1990. 66-73]
- 王铁冠,钟宁宁,侯读杰,等. 陆相湖盆生物类脂物早期生烃机制研究. 中国科学 (D 辑), 1996, 26(6): 518-524 [Wang Tieguan, Zhong Ningning, Hou Dujie, et al. Hydrocarbon generation mechanism of lipids in terrestrial basin. Science in China (Series D), 1996, 26

- (6): 518-524]
- 4 胡国艺, 冉启贵, 王铁冠, 等. 金湖凹陷阜宁组低熟烃源岩饱和烃组成及其生源探讨. 沉积学报, 1997, 15(增): 138-141 [Hu Guoyi, Ran Qigui, Wang Teiguan, *et al.* Discussion on source and saturated fractions in immature source rocks of Funing Formation, Jinhu depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(Suppl): 138-141]
 - 5 Pang Xiongqi, Li Maowen, Li Sumei, *et al.* Origin of crude oils in the Jinhu Depression of North Jiangsu-South Yellow Sea Basin, eastern China. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(4): 553-573
 - 6 黄第藩, 张大江, 王培荣, 等. 中国未成熟石油成因机制和成藏条件. 北京: 石油工业出版社, 2003. 511-542 [Huang Difan, Zhang Dajiang, Wang Peirong, *et al.* Genetic Mechanism and Accumulation Condition of Immature Oil in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. 511-542]
 - 7 宋宁, 林春明, 陈丽萍. 未熟—成熟油混合后生物标志物参数的变化特征. 新疆石油地质, 2004, 25(3): 267-282 [Song Ning, Lin Chunming, Chen Liping. Variation of biomarker parameters in the mixed immature and mature oils. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(3): 267-282]
 - 8 Peters K E, Moldovan J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. New Jersey: Prentice-Hall, 1993
 - 9 Sinnighe Damste J S, Kening F, Koopman M P, *et al.* Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 1895-1990
 - 10 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究与展望. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(1): 43-48 [Wang Guamin. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae. *Acta Petrologica Mineralogica*, 2004, 23(1): 43-48]
 - 11 Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(2): 261-289
 - 12 Reddy C M, Eglington T J, Palic R, *et al.* Even carbon number predominance of plant wax *n*-alkanes: a correction. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(4): 331-336
 - 13 Schwark L, Zink K, Lechterbeck J R. Reconstruction of postglacial to early Holocene vegetation history in terrestrial Central Europe via cuticular lipid biomarkers and pollen records from lake sediments. *Geology*, 2002, 30: 463-466
 - 14 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 中国新生界咸水湖相烃源岩原油生物标志物组合特征. 沉积学报, 1998, 16(3): 119-131 [Zhang Zhihuan, Yan Fang, Li Dongming, *et al.* Biomarker assemblage characteristics of source rocks and associated crude oils in saline lake facies of Cenozoic in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 119-131]
 - 15 Lichtfouse E, Derenne S, Mariotti A, *et al.* Possible algal origin of long chain odd *n*-alkanes in immature sediment as revealed by distributions and carbon isotope ratios. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(6): 1023-1027

An *n*-alkane Coexisting Even and Odd Carbon Number Predominance of Paleogene in Jinhu Sag

SONG Ning^{1,2} WANG Teiguan¹ LIM Eijun¹

(1 Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Education Ministry, China University of Petroleum, Beijing 102249

2 Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009)

Abstract The data of source rock and oil samples reveal three distribution patterns of *n*-alkanes in the second group of the Funing Formation in Jinhu Sag of Subei basin, eastern China. The three patterns are, respectively, the odd-to-even predominance, the even-to-odd predominance, the even and odd carbon number predominance coexisting in whole carbon number. In papers, the characteristics of a *n*-alkane coexisting even and odd carbon number predominance and its origin are investigated only. The short-chain *n*-alkanes and long-chain *n*-alkanes are characterized by a pronounced odd carbon predominance, with the dominant carbon number of nC_{15} , nC_{17} and with nC_{25} , nC_{27} , nC_{29} , nC_{31} . And the mid-chain *n*-alkanes are dominated by even carbon predominance, with the dominant carbon number of nC_{20} and nC_{22} . A number of biomarkers support sediments deposited in an anoxic, hypersaline lacustrine setting. These include the phytane preference, high gammacerane and the presence of β -carotene and C_{24} -tetracyclic terpane. The biomarkers are not homosphere, which shows that salinity and redox is not constant in lake. The *n*-alkanes are mainly derived from algae in lake and macrophytes on land or around edges of the lake. The *n*-alkane distribution patterns of the source rocks and oils studied are believed not to be dependent of the redox in depositional environments and the salinity of water body, but to be associated with original organic matter composition.

Key words normal alkanes, sedimentary environment, biomarker, Jinhu sag