

三水盆地 SB-01 孔的有机质类型及其古气候指示意义*

陈亮¹, 刘春莲^{1,2}, 吴洁¹, 杨婷婷¹, 车晓光¹

(1. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275;
2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 采用有机岩石学和全岩热解分析方法, 对三水盆地 SB-01 孔的有机质类型进行了研究。根据有机质类型及分布特征, 结合岩性变化和已有的其它古气候证据, 分析了岩芯沉积时期的古气候演变过程。有机岩石学分析显示, SB-01 孔岩芯沉积物中的有机质类型以 II 型(包括 II₁ 和 II₂ 型)为主, 少量为 I 型, 偶见 III 型。热解分析结果表明有机质的热演化程度较低, 有机碳在热演化过程中损失不大。I、II₁ 和 II₂ 型有机质类型分别指示干旱、干燥和温湿的气候条件。莘庄组良坑段顶部以 II₁ 型有机质类型为主, 表明其沉积时期盛行较为干燥的气候条件。坭心组红岗段亚段 A 的有机质主要为 II₂ 型, 夹有含 I 和 II₁ 型的层位, 反映温湿气候条件占主导地位。亚段 B 的有机质类型为 II₂ 与 II₁ (或 I 型) 交替出现, 反映温湿与干燥(或干旱)气候条件的快速波动变化。亚段 C 下部主要为 II₁ 和 I 型有机质, 中上部以 II₂ 型有机质类型为主, 指示其气候由前期的干燥(或干旱)条件转为以温湿条件为主。

关键词: 有机质类型; 有机岩石学; 热解分析; 古气候; 三水盆地

中图分类号: R817 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)03-0122-06

Organic Matter Types of Core SB-01 in the Sanshui Basin and Their Paleoclimate Implications

CHEN Liang¹, LIU Chunlian^{1,2}, WU Jie¹, YANG Tingting¹, CHE Xiaoguang¹

(1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Organic matter types of core SB-01 from the Sanshui Basin were analyzed using organic petrology method and Rock-Eval pyrolysis. Based on organic petrology results, the organic matter is dominated by type II (including type II₁ and type II₂), mostly type II₁. Type I organic matter intermittently occurs at some intervals while Type III organic matter is occasional in presence. Pyrolysis results show that the organic matter is of lower thermal maturity and the organic carbon loss could be ignored, as indicated by the lower T_{max} values. Organic matter of Types I, II₁ and II₂ was deposited under arid, drier and humid climate conditions, respectively. The uppermost part of the Xinzhuang Formation is characterized by Type II₁, related to a dry climatic condition. Sub-member A of the Honggang Member is dominated by organic Type II₂, sandwiched by Type I and II₁, suggesting a prevailing humid climatic condition. Sub-member B is characterized by alternations of organic Types II₂ and II₁/I, reflecting rapid fluctuations of humid and dry/arid climatic conditions. Sub-member C shows Type II₁ and I in the lower part and shifts to Type II₂

* 收稿日期: 2009-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872024; 40272011); 中国科学院边缘海地质重点实验室和广州地球化学研究所开放研究基金资助项目(MSGL07-18)

作者简介: 陈亮(1980年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 刘春莲; E-mail: eeslcl@mail.sysu.edu.cn

in the middle and upper parts, indicating a dry/arid climate condition followed by a prevailing humid climatic condition.

Key words: organic matter types; organic petrology; rock-eval pyrolysis; paleoclimate; Sanshui Basin

湖相沉积岩中的有机质类型与古气候条件密切相关。在不同的古气候条件下,湖相沉积岩中的有机质类型也不同^[1]。前人研究表明,利用湖相沉积岩中有机质类型的分布特征可有效地指示湖泊沉积时期的古气候变化,是良好的古气候替代指标^[1-3]。广东三水盆地为一小型陆缘邻海拉张型断陷盆地^[4],沉积面积约 2 500 km²。盆地内沉积了一套厚达数千米的白垩纪-古近纪地层。古近纪早期埤心组红岗段发育富含有机质的黑色页岩,是盆地的主要生油岩^[5-7]。下伏莘庄组良坑段顶部以灰色具交错层理的粉-细砂岩夹灰黑色钙质泥岩与埤心组相区别。迄今对三水盆地古近纪时期古气候变化的研究还很薄弱,利用沉积岩中有机质类型的分布特征来分析其古气候变化的工作尚未见报道。本文主要采用有机岩石学分析方法,并结合全岩热解分析结果划分三水盆地 SB-01 孔下古近系莘庄组顶部至埤心组红岗段的有机质类型。根据其分布特征,结合岩性变化和已有的其它证据,分析了岩芯沉积时期的古气候变化。

1 样品和试验分析

SB-01 孔位于广东省三水盆地西北部,孔深 89 m (图 1)。约 73 m 处为埤心组与下伏莘庄组分界。莘庄组良坑段顶部以灰色具交错层理的粉-细砂岩为主,夹灰黑色钙质泥岩。埤心组红岗段可分为 3 个岩性亚段。亚段 A (73~52.5 m) 以灰黑色粉砂质泥岩、灰色泥质粉砂岩为主,偶夹有石膏,发育水平层理;亚段 B (52.5~22.5 m) 以暗色纹层状泥页岩与泥灰岩或灰岩交替出现、夹多层薄层石膏;亚段 C (22.5~0 m) 以黑色泥页岩为主,部分层位纹层理发育,偶夹石膏薄层。

考虑风化作用对近地表岩层的影响,顶部 4.5 m 未取样。根据岩性变化从 4.5~89 m 岩芯段采集了 100 个有机岩石学样品和 58 个全岩热解分析样品。将有机岩石学样品磨成光片,然后置于 JNO-EC 型落射荧光显微镜下进行观察分析。全岩热解分析样品干燥后,研磨成分析级粉末,在中国石油西南油气田公司勘探开发研究院地质实验室采用 YQ-VII 油气显示评价仪测试,其相应的有机碳含量 (TOC) 在德国蒂宾根大学 (University Tübingen) 地球化学实验室采用 Vario EL 元素分析仪测试。

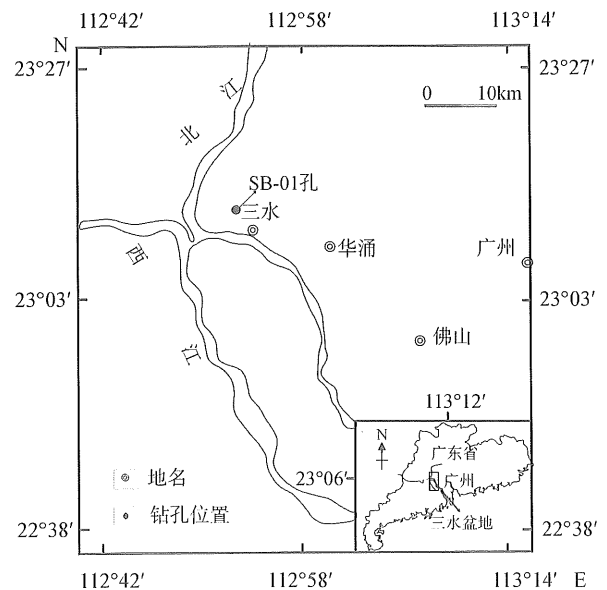


图 1 三水盆地 SB-01 孔位置

Fig. 1 Location of core SB-01 in Sanshui Basin

2 结果与讨论

2.1 有机岩石学分析

有机岩石学方法能有效地划分沉积岩中的有机质类型,在古气候变化研究中已成为一种重要的手段^[8-11]。本文采用荧光光学法划分有机质类型。在蓝光激发下,不同类型有机质的荧光光性如下: I 型 (腐泥型) 有机质表现为黄色和亮黄色; II₁ 型 (含腐殖腐泥型) 以黄色为主,含较少的黄绿色; II₂ 型 (腐泥腐殖型) 以黄绿色为主,含少量的黄色和亮黄色; III 型 (腐殖型) 荧光效应很弱。有机质类型的分布见表 1。SB-01 孔的有机质类型以 II 型 (包括 II₁ 和 II₂ 型) 为主,少量为 I 型, III 型仅在一个层位出现 (24.62 m), 其中 II₁ 和 II₂ 型有机质类型大致相当, II₂ 型略多。I 型有机质多分布在泥灰岩中,少数产自粉砂质泥岩和粉砂岩; II₁ 型主要分布在黑色泥页岩、粉砂岩和泥质粉砂岩中,少数见于泥灰岩和灰岩; II₂ 型绝大多数分布在黑色泥页岩中,少数相应于粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥灰岩和粉砂岩层位。从有机质类型与其分布层位岩性的关系来看, I、II₁ 和 II₂ 型有机质类型相应层位的有机碳含量总体上依次升高。

表 1 SB-01 孔有机岩石学分析结果

Table 1 Organic matter types based on organic petrologic analysis in core SB-01

岩段	深度/m	有机质类型	岩性	岩段	深度/m	有机质类型	岩性	岩段	深度/m	有机质类型	岩性
红 岗 段 亚 段 C	4.73	II2	a	红 岗 段 亚 段 B	28.80	II2	a	红 岗 段 亚 段 A	53.58	II2	b
	4.95	II2	a		29.40	II2	a		58.51	II2	b
	5.36	II2	a		29.63	II2	a		58.56	II2	b
	5.43	II1	c		30.34	II2	a		58.98	II1	e
	5.53	II1	f		32.08	II1	a		59.50	II1	c
	5.85	II1	f		33.19	II1	a		59.78	II1	c
	5.95	II1	a		34.12	II1	e		62.02	II2	b
	7.90	II2	a		34.26	I	b		63.59	II2	b
	9.70	II2	a		34.42	II2	a		67.16	II2	a
	10.62	II2	a		34.47	II1	e		69.57	I	d
	11.30	II1	e		34.69	II2	a	72.37	I	e	
	14.81	II2	a		34.85	II2	a	莘 庄 组 良 坑 段	73.08	II2	c
	15.84	II2	a		35.49	II2	a		74.28	II2	a
	16.02	II2	e		37.20	II2	a		74.56	II2	a
	16.20	II2	e		37.95	II1	e		74.82	II2	a
	17.68	I	e		39.63	I	e		74.94	II2	c
	17.81	I	e		39.74	II2	a		75.26	II2	a
	18.36	II1	a		41.37	II2	a		75.71	II1	a
	19.09	II1	a		42.10	I	e		76.64	II1	c
	20.59	II1	a		44.20	I	e		76.75	II1	d
	21.45	I	e		44.50	II1	e		76.81	II1	d
21.76	I	e	46.20	II2	a	76.88	II1	c			
22.73	II2	a	46.31	I	e	77.06	II1	d			
23.23	II1	a	46.35	II2	a	77.85	II1	c			
23.92	II2	a	46.60	I	e	78.05	II1	c			
24.62	III	a	47.87	II1	e	78.24	II2	d			
24.80	I	e	48.40	II2	e	78.71	II2	a			
26.08	II1	a	49.00	I	e	79.12	II1	d			
26.29	II1	a	51.15	II1	a	81.54	II1	a			
27.72	II2	a	52.04	II2	a	83.86	II2	a			
27.82	II1	a	52.20	II2	c	84.29	II1	c			
28.13	II1	a	52.27	II1	d	87.69	II2	d			
			52.43	II2	a	87.75	II1	d			
						87.89	II2	d			
						88.07	II1	d			

注: a、b、c、d、e 和 f 分别代表黑色泥页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、泥灰岩和灰岩。

2.2 全岩热解分析

全岩热解分析也是确定有机质类型、并评价其热演化程度的重要手段^[12-15]。SB-01 孔样品的最高热解峰温 (t_{\max}) 主要在 410 ~ 435 °C 之间变化, 除最低值 (387 °C)、最高值 (569 °C) 以及少量的相对高值 (可达 459 °C) 外。这表明有机质的热演化程度较低, 有机碳在热演化过程中损失不

大。氢指数 (HI) 由热解烃/有机碳含量求得, 其变化于 4 ~ 750 mg/g 之间, 变化范围极大。本文采用氢指数与最高热解峰温图解划分有机质类型^[12]。除了两个氢指数高 (HI > 745 mg/g) 的样品分布在 I 型区外, 其余样品处于 II 和 III 型区 (图 2)。

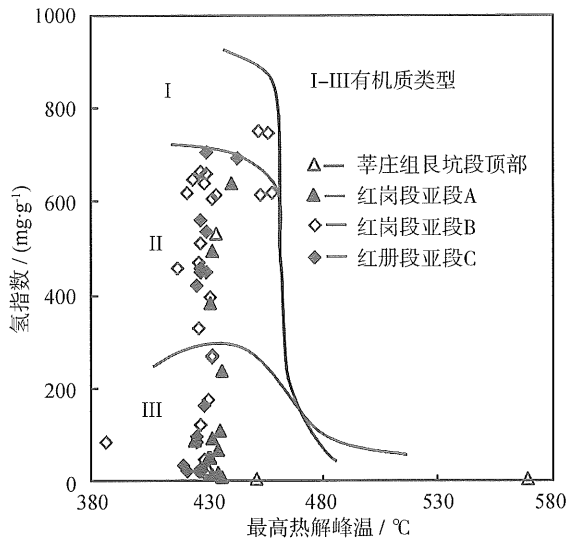


图2 氢指数 (HI) 与最高热解峰温 (t_{\max})

Fig. 2 Hydrogen Index (HI) plotted against t_{\max}

分布于 I、II 型区的样品均采自富有机质层位, 其中落入 I 型区的两个样品显示较高的有机质热演化程度 ($t_{\max} > 453$ °C)。分布于 III 型区的样品, 除了两个来自富有机碳层位外, 其余样品的有机碳含量表现为低值。这类低有机碳含量的样品在热解分析过程中往往会出现母岩矿物对热解烃的吸收作用, 从而导致低 HI 值。我们在有机岩石学分析中发现, 这类有机碳含量低的样品 (如粉砂岩和泥灰岩等) 同样具有明显的荧光效应, 大部分样品可观察到黄色至黄绿色荧光, 少量样品表现出亮黄色和黄色。表明该组样品的有机质类型也应以 II 型 (包括 II₁ 和 II₂ 型) 为主, 这类样品不适于采用热解分析法确定有机质类型。

2.3 其它古气候证据

2.3.1 稀土元素 沉积物中稀土元素组成参数的分布特征能有效地指示古气候的变化。稀土元素 (La/Yb)_N 比值和 $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ (下标校正表示经碳酸盐含量校正) 的高值均可反映温湿的气候条件, 其低值则分别指示较干燥或干旱的气候环境。SB-01 孔的稀土元素分布特征参见文献^[16], 这里仅作简短概述: 莘庄组良坑段顶部的 (La/Yb)_N 比值偏低, 而 $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 表现为高值, 且较为稳定; 红岗段亚段 A 的 (La/Yb)_N 比值明显高于前一阶段, $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 表现为高值; 红岗段亚段 B 的 (La/Yb)_N 比值波动较大, $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 变化频繁且幅度很大; 红岗段亚段 C 的 (La/Yb)_N 比值和 $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 总体上均表现为较高值。

2.3.2 微体古生物 SB-01 孔莘庄组良坑段顶部

的介形类丰度小, 属种较单一, 主要为 *Eucypris sanshuiensis*。轮藻的丰度较高, 以个体较大的、具瘤饰的种类为主, 如 *Stephanochara kiangsuensis*、*Peckichara subspherica*、*Rhabdochara jiangduensis* 等; 红岗段亚段 A 的介形类和轮藻的丰度和分异度均较低。介形类以 *Sinocypris nitela*、*Cypris buxinensis* 为代表; 轮藻主要为个体较小的种类, 如 *Obtusochara brevicylindrica*、*Gyrogona qianjiangica* 等。亚段 B 仅零星出现介形类 *Sinocypris nitela*, 轮藻消失。亚段 C 的介形类较为繁荣, 大多数层位均见较丰富的介形类化石, *Limnocythere* 和 *Candona* 大量出现^[17]。

2.4 古气候分析

根据有机质类型的分布特征, 结合岩性变化和其它数据, 对 SB-01 孔莘庄组顶部—砾心组红岗段沉积时期的古气候演化可作以下分析:

莘庄组良坑段顶部的沉积粒度较粗, 以粉—细砂岩为主, 其有机碳含量一般较低。该岩段的有机质类型以 II₁ 型为主, 仅在 75.26 (73.08 m 段为 II₂ 型。II₁ 型有机质为混合来源, 但以浮游生物的贡献为主, 少量来自陆生植物。表明流域降雨量较小, 陆生植物的生长受到不利影响^[18], 注入湖泊的陆源有机质较少, 指示较为干燥的气候条件。其时入湖径流量不大, 营养来源不十分丰富, 表层生产力不高。同时, 由于湖盆水体深度不大, 底层水体含氧丰富, 有机质易于降解, 导致有机碳含量偏低。该岩段沉积的稀土元素 (La/Yb)_N 比值偏低, 而 $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 值却较高。前者应与较干燥的气候条件有关; 后者可能由于陆源碎屑搬运距离较近所致。此外, 所含轮藻化石的丰度较高, 且以个体较大、具瘤饰的类型为主, 同样反映了干燥气候条件下湖盆水体较浅的条件。

红岗段亚段 A 的有机质类型主要为 II₂ 型, 夹有含 I 和 II₁ 型有机质的层位 (72.37 (69.57 m 和 59.78 (58.98 m)。II₂ 型有机质为混合来源, 但以陆生植物为主, 少量为湖生浮游植物。表明流域降雨量较大, 陆生植物繁茂, 注入湖泊的陆源有机质丰富, 应指示温湿气候条件。此时入湖径流量大, 带来丰富的营养物质, 使表层生产力提高。湖盆水体加深, 其底层水体易发育缺氧或贫氧条件, 有利于有机质的保存, 本岩段有机碳含量高于下伏的莘庄组良坑段。稀土元素 (La/Yb)_N 比值明显高于前一阶段, $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 表现为高值。轮藻化石面貌发生明显变化, 以个体较小的类型为主, 表明随着气候条件转为温湿, 湖盆水体加深。

红岗段亚段 B 的有机质类型为 II_2 与 II_1 (或 I 型) 交替出现。如前文所述, II_1 与 II_2 型有机质均为混合来源, 但前者以湖生浮游植物为主, 后者以陆生植物为主, 可分别指示干燥和温湿的气候条件。I 型有机质几乎全部来源于湖生生物, 陆生植物输入甚少, 表明流域降雨量极小, 陆生植物的生长受到很大限制, 注入湖泊的陆源有机质很少, 指示干旱气候条件。因而, 本岩段显示温湿与干燥 (或干旱) 气候条件的交替变化。在温湿的气候条件下, 陆生植物繁茂, 注入湖泊陆源有机质丰富。由于入湖径流量大, 带来丰富的营养物质, 表层生产力提高, 同时, 湖泊水体加深, 导致有机碳含量较高。而在间歇性干燥 (或干旱) 时期, 陆生植物的生长受到不利影响, 注入湖泊的陆源有机质明显减少。其时入湖径流量也相应减小, 营养物质相对贫乏, 具有相对较低的有机碳含量。本岩段岩性以暗色纹层状泥页岩与泥灰岩或灰岩交替出现、夹多层薄层石膏, 其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值波动较大, $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 变化频繁且幅度很大, 也同样反映了古气候条件的快速变迁。伴随这种气候条件的波动, 湖泊水体环境也发生快速变化, 尤其不利于底栖生物的生存, 因而地层中生物化石贫乏, 轮藻消失, 仅零星出现介形类。

红岗段亚段 C 下部和 5.95 (5.43m 段) 有机质为 II_1 和 I 型, 其余岩段均为 II_2 型。指示其气候由前期的干燥 (或干旱) 条件转为以温湿条件为主。其 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值和 $\Sigma \text{REE}_{\text{校正}}$ 总体上均表现为较高值。虽然湖泊水体条件有变化, 但每一阶段均持续一定时间, 较有利于底栖生物生存, 因此, 该岩段的大多数层位均见较丰富的介形类化石。

3 结 论

根据有机岩石学分析结果, SB-01 孔岩芯沉积物中的有机质类型以 II 型 (包括 II_1 和 II_2 型) 为主, 少量为 I 型, 偶见 III 型。热解分析结果表明有机质的热演化程度较低, 有机碳在热演化过程中损失不大。富含有机碳的样品具有较高的氢指数, 主要分布于 II 型区, 个别分布于 I 型区; 低有机碳含量样品分布于 III 型区, 但可能主要是由于样品在热解分析过程中母岩矿物吸收其热解烃而导致其氢指数降低, 因而未能客观地区分有机质类型。从有机岩石学分析结果来看, 这类样品的有机质类型也应属 II 型。

I 型有机质几乎全部来源于湖生生物, 并具有较低的丰度值, 可指示干旱气候条件。 II_1 和 II_2 型

有机质为混合来源, 前者以湖生浮游生物的贡献为主, 少量来自陆生植物; 后者以陆生植物为主, 部分来自湖生浮游生物, 分别指示干燥和温湿的气候条件。莘庄组良坑段顶部沉积以 II_1 型有机质类型为主, 表明其沉积时期盛行较为干燥的气候条件。埤心组红岗段亚段 A 的有机质主要为 II_2 型, 夹有含 I 和 II_1 型的层位, 反映温湿气候条件占主导地位。亚段 B 的有机质类型为 II_2 与 II_1 (或 I 型) 交替出现, 反映温湿与干燥 (或干旱) 气候条件的快速波动变化。亚段 C 下部主要为 II_1 和 I 型有机质, 中上部以 II_2 型有机质类型为主, 指示其气候由前期的干燥 (或干旱) 条件转为以温湿条件为主。

参考文献:

- [1] 尹秀珍, 万晓樵, 司家亮. 松辽盆地 G-12 井晚白垩世青山口组沉积时期古湖泊学替代指标分析 [J]. 地质学报, 2008, 82(5): 676-682.
- [2] MÜLLER A B, STRAUSS H, HARTKOPF-FRÖDER C, et al. Reconstructing the evolution of the latest Pennsylvanian-earliest Permian Lake Odernheim based on stable isotope geochemistry and palynofacies: A case study from the Saar-Nahe Basin, Germany [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240: 204-224.
- [3] MARTINEK K, BLECHA M, DANEK V, et al. Record of palaeoenvironmental changes in a Lower Permian organic-rich lacustrine succession: Integrated sedimentological and geochemical study of the Rudník member, Krkonoše Piedmont Basin, Czech Republic [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 230: 85-128.
- [4] 唐忠驭. 三水盆地火山活动与油气的关系 [J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(2): 89-100.
- [5] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志, 地质矿产部地质专报一区域地质志第 9 号 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [6] 张显球, 周晓萍, 陈修奕. 三水盆地白垩-第三纪钻井地层划分对比图集 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [7] 严俊君, 金之钧. 广东三水残留盆地特征及油气地质条件 [J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 141-146.
- [8] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27: 213-250.
- [9] WAGNER T. Petrology of organic matter in modern and late Quaternary deposits of the Equatorial Atlantic: climatic and oceanographic links [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 39: 155-184.

参考文献:

- [1] 汪家铭, 中岛正爱, 陆焯. 屈曲约束支撑体系的应用与研究进展(1) [J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7 (1): 1-12.
- [2] 周云. 防屈曲耗能支撑结构设计与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] 周云, 邓雪松, 杨叶斌, 等. 防屈曲耗能减震支撑研究应用与标准化 [J]. 钢结构, 2009 (增刊): 612-618.
- [4] 萩野谷学, 長尾直治, 田口孝, 等. 三重鋼管座屈拘束ブレースの耐震性能に関する研究 [C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 近畿, 2005.
- [5] 竹板和成, 長尾直治, 田口孝, 等. 三重鋼管座屈拘束ブレースの耐震性能に関する研究(その2 実験結果の考察と有限要素法解析) [C]//日本建築学会. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 近畿, 2005.
- [6] 松嶋直樹, 長尾直治, 田口孝, 等. 三重鋼管座屈拘束制震ブレースの耐震性能に関する研究(その3 実大要素実験の実験概要と実験結果) [C]//日本建築学会大会学術講演梗概集. 近畿, 2006.
- [7] 萩野谷学, 長尾直治, 神谷隆, 等. 三重鋼管座屈拘束制震ブレースの耐震性能に関する研究(その4 実大要素実験の考察) [C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 近畿, 2006.
- [8] KOETAKA Yuji, KINOSHITA Tomohiro, INOUE Kazuo, et al. Criteria of buckling-restrained braces to prevent out-of-plane buckling [C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2008.
- [9] 邓雪松, 褚洪民, 钱洪涛, 等. 三重钢管防屈曲耗能支撑性能有限元模拟分析 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25 (3): 99-103.
- [10] 周云, 钱洪涛, 褚洪民, 等. 新型防屈曲耗能支撑设计原理与性能研究 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 (4): 64-71.
- [11] 任重. ANSYS 实用分析指南 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [12] ANSI/SISC 345-05. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. American Institute of Steel Construction, Inc. 2005: 84-87.
- [13] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 51-58.
- [14] JGJ101-96. 建筑抗震试验方法规程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [15] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第126页)

- [10] WAGNER T. Late Cretaceous to early Quaternary organic sedimentation in the eastern Equatorial Atlantic [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 179: 113-147.
- [11] 郭建军, 陈践发, 朱忠云, 等. 柴窝堡凹陷达坂城次凹上二叠统烃源岩的地球化学特征及勘探方向 [J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 446-455.
- [12] ESPITALIÉ J G, DEROO G AND MARQUIS F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications [J]. Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1985, 40: 563-579 and 755-784.
- [13] LANGFORD F F, BLANC-VALLERON M-M. Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of pyrolyzable hydrocarbons vs. total organic carbon [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1990, 74(6): 799-804.
- [14] SABEL M, BECHTEL A, PÜTTMANN W, et al. Palaeoenvironment of the Eocene Eckfeld Maar lake (Germany): implications from geochemical analysis of the oil shale sequence [J]. Organic Geochemistry, 2005, 36: 873-891.
- [15] STEFANOVA M, IVANOV D, YANEVA N, et al. Palaeoenvironment assessment of Pliocene Lom lignite (Bulgaria) from bitumen analysis and preparative off line thermochemolysis [J]. Organic Geochemistry, 2008, 39: 1589-1605.
- [16] 陈亮, 刘春莲, 庄畅, 等. 三水盆地下古近系湖相沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 573-580.
- [17] 谢叶彩, 刘春莲, 商建林, 等. 三水盆地古近纪早期微体生物群及其古环境意义 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(2): 114-117.
- [18] DEMAISON G J, MOORE G T. Anoxic environments and oil source bed genesis [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1980, 64: 1179-1209.