

doi:10.3799/dqkx.2014.019

高演化海相烃源岩元素地球化学评价： 以四川南江杨坝地区下寒武统为例

曹婷婷¹, 徐思煌^{2*}, 周炼³, 王约⁴

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214151

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550003

摘要: 评价高演化海相烃源岩已成为国内油气勘探的难点。尝试以四川南江杨坝地区下寒武统烃源岩为例, 利用元素地球化学参数建立高演化海相烃源岩评价的新方法。在计算得到与海洋自生有机质相关的自生元素含量基础上, 通过聚类分析将成因作用相同的自生元素聚为一类, 并建立指示有机质沉积环境及基本属性的参数与自生元素含量之间的线性关系, 从而优选出与有机质富集密切相关的自生元素, 并利用因子分析得到4个反映有机质从形成、沉积到埋藏过程中环境变化的主因子, 最终得到能够反映烃源岩的形成条件优劣的公式。依此对南江杨坝下寒武统烃源岩的品质进行划分。实践证明, 该方法可为高演化海相烃源岩的评价提供一些新思路。

关键词: 海相烃源岩; 元素含量; 地球化学; 石油地质; 四川盆地。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2014)02-0199-11

收稿日期: 2013-05-06

Element Geochemistry Evaluation of Marine Source Rock with High Maturity: A Case Study of Lower Cambrian in Yangba Section of Nanjiang County, Sichuan

Cao Tingting¹, Xu Sihuang^{2*}, Zhou Lian³, Wang Yue⁴

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214151, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China

Abstract: How to evaluate the marine source rocks with high maturity is of crucial importance. Element geochemical indexes are used to build a new evaluating method for source rock in this study. In this paper, the samples are from the Lower Cambrian in Yangba section of Nanjiang County, Sichuan. We used the measured Xxs (a relative excess of X compared to titanium in post-Archean Australian shale), the authigenetic elements from the the same environment are treated as a class. Then, illustrate the linear relation between each of TOC, $\delta^{13}C_{carb}$ and $\delta^{13}C_{org}$ and the authigenetic elements from the same class, optimize the authigenetic elements that have closely relationship with enriched organic matter. Finally, the factor formula is built to indicate the changing of the quantity and quality of organic matter during the process of formation, deposition and burial according to the factor analysis. This formula is used to divide the rank of source rock quality of the Lower Cambrian in Yangba section. Thus, this geochemistry evaluation method would provide some new ideas for identifying and evaluating the marine high-maturity source rocks.

Key words: marine source rock; element content; geochemistry; petroleum geology; Sichuan basin.

基金项目: 中国石化股份有限公司海相油气勘探前瞻性研究项目(No.G0800-06-ZS-319)。

作者简介: 曹婷婷(1986—), 女, 助理工程师, 主要从事油气成藏方面的研究。E-mail: caotingqi@sina.com

* **通讯作者:** 徐思煌, E-mail: xusih@cug.edu.cn

我国南方古生界海相地层,受长期的热演化和强烈构造运动改造的影响,烃源岩中有机质的数量和质量都发生了较大地变化.传统的基于残余有机碳的评价方法在这类高演化地区的应用面临很多困难,尤其是氯仿沥青“A”、氢指数等地球化学评价指标在高演化作用下难以奏效(谢树成等,2007;Xu *et al.*,2007).因此,建立一套新的评价高演化海相烃源岩的方法就成了我国海相油气勘探的首要任务.目前,微量元素、碳氧同位素等无机参数开始用于烃源岩的研究(腾格尔等,2006),同时 Mo、U、V、Cu、Ni 和 Zn 6 个微量元素的综合系数已用于评价四川广元上寺剖面二叠系的烃源岩,并获得了较好的效果(陈慧等,2010).本文以川东北南江杨坝地区下寒武统地层为例,运用元素地球化学原理,通过测试该剖面地层岩石样品中常量元素、微量元素及总有机碳含量等特征,分析与烃源岩形成相关的元素特征,同时建立有机碳含量与元素含量之间的拟合方程,从而优选出与有机质富集密切相关的自生元素;再次

根据优选出的自生元素,利用因子分析得到 4 个反映有机质从形成、沉积到埋藏过程中环境变化的主因子,并最终得到一个能够反映烃源岩形成条件优劣的公式,提出一套基于元素地球化学的高演化海相烃源岩评价新方法.

1 地质背景

四川南江杨坝剖面位于四川北部的南江杨坝县,西部与旺苍—广元一带相接,南至巴中—达县一带,在构造上位于通南巴构造带的北部,米仓山构造带与大巴山构造带交界的地区(图 1).研究区内寒武系地层分布广泛,剖面上仅出露下寒武统地层,总厚度约 860 m.其地层从下到上依次为:筇竹寺组、仙女洞组、阎王庙组和石龙洞组,其中筇竹寺组底部为黑色薄层的炭质泥岩,下部发育有灰黑色粉砂质泥岩,中部发育有深灰色—灰黑色泥质粉砂岩,并夹有灰白色薄层粉砂岩,上部为灰色厚层钙质泥岩,部分

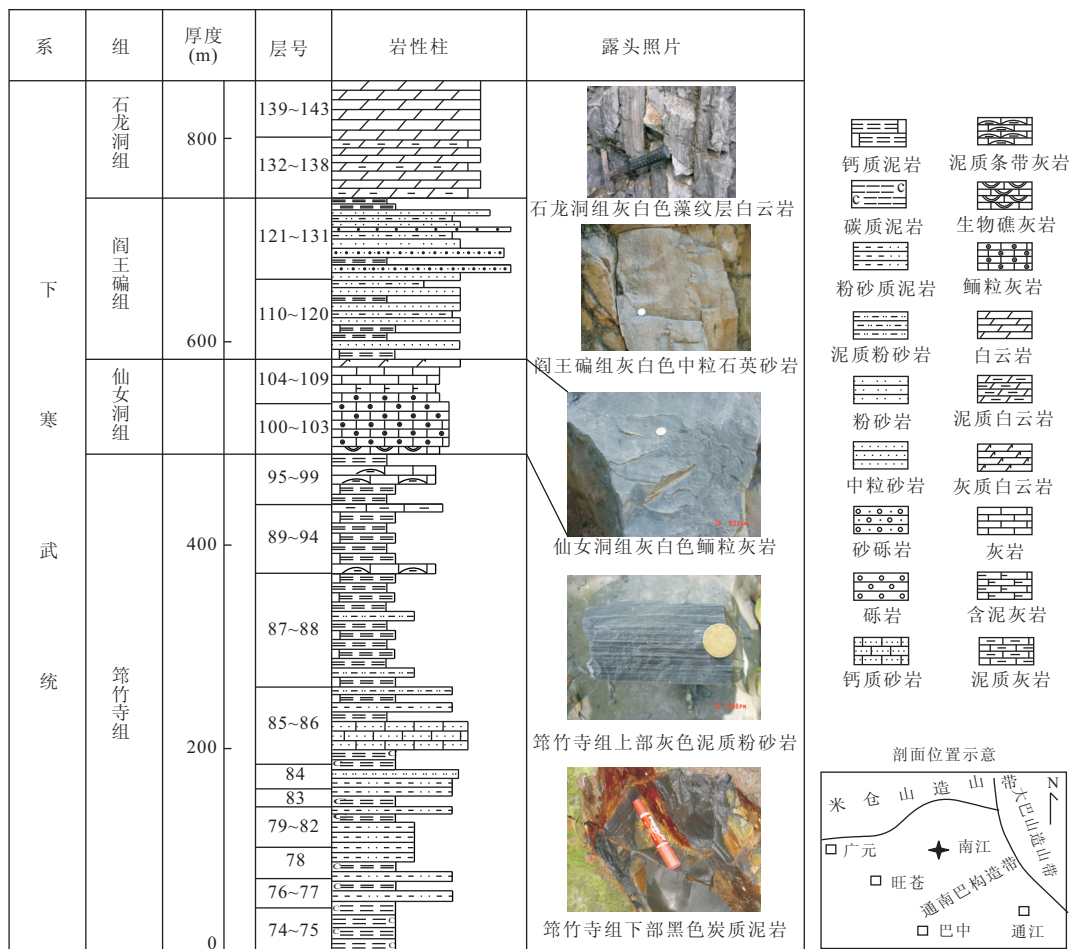


图 1 四川南江杨坝地区地理位置及下寒武统地层柱状图

Fig.1 Location and the stratigraphic column of the Lower Cambrian in Yangba area of the Nanjiang County, Sichuan basin

发育薄层泥灰岩;仙女洞组底部见浅灰色薄层状生物碎屑灰岩,下部多为鲕粒灰岩,上部发育有灰色—深灰色的瘤状灰岩,部分层位见有泥质灰岩,顶部发育薄层的灰质白云岩,厚约 90 m;阎王碛组多发育灰白色中—粗粒的石英砂岩、粉砂岩及砾岩,部分层位见有钙质砂岩;石龙洞组以发育白云岩及泥质白云岩为主。

2 样品采集及测试

本次研究的样品采自四川省南江杨坝镇寒武系露头剖面,筇竹寺组、仙女洞组、阎王碛组及石龙洞组地层按照沉积相的不同共划分为 70 个小层(其中从 74~99 小层为筇竹寺组,100~109 小层为仙女洞组,110~131 小层为阎王碛组,132~143 小层为石龙洞组),每一小层采集 1~3 个样品,共计 95 个样品。样品采集过程中,尽可能采集未经风化的新鲜样品,将其粉碎至 200 目的粉末后分析。其中,总有机碳含量的测试是在中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所利用 LECO CS-200 仪器完成的;微量元素的测试是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 ICP-MS 完成(表 1)。

3 研究区烃源岩元素地球化学评价

沉积岩在沉积过程中,受外界物理化学作用的影响,沉积物中的元素与水介质中的元素发生交换、吸附等作用,导致元素发生迁移和聚集。尽管大部分过渡元素在含量上发生了一些变化,但相关元素的分布形式依然不变(赵振华,1997;Alberdi-Genolet and Toceo,1999),而稳定的碳同位素可以反映其原始特征(王大锐,2000;腾格尔等,2006)。因此,尽管古生界地层演化程度高,但微量元素、碳同位素组成较稳定,能够较好地保存原始地球化学信息,常将其作为反映沉积环境的指标(Miller *et al.*,1993;Bailey *et al.*,1996;张义纲,2005)。例如:Ti、Al 等在陆源碎屑沉积物中较富集,可用来指示母岩的来源;Sr 元素可用来反映海水的古盐度;微量元素 V、Cr、Ni、U 及稀土元素 Ce、Eu 对沉积环境的氧化还原条件较敏感(陈衍景等,1996;腾格尔等,2005a;刘士林等,2006);稳定碳同位素的变化则受大洋缺氧事件的影响(胡修棉等,2001;密文天等,2012)。根据这一原理,这些元素就可以用来指示烃源岩在形成、演化

过程中的环境变化,进而反映有机质在形成、沉积及埋藏过程中,其数量与质量上的变化,并反映出烃源岩的优劣。前人研究发现,与生物生长发育有关的营养元素(包括 P、Ba、Zn、Cu 等)能够反映原始海洋的古生产力(Clavert,1987;黄永建等,2005;腾格尔等,2005b), $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 多用来恢复古生产力(腾格尔等,2006), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏重体现了较高的生物产率(李红敬等,2012);V/Cr、Ni/Co 及 U/Th 的比值常用来指示沉积环境中的氧化还原环境(Jones and Manning,1994;腾格尔等,2004);Mo 同位素(δMo)、自生钼[Mo(a)](Mayers *et al.*,2005;Zhou *et al.*,2008;曹婷婷等,2012)含量与有机碳的堆积速率存在一定的相关性,可以很好地反映有机碳埋藏量的变化。古生产力、氧化还原条件及有机碳埋藏量这 3 个因素反映了从有机质生成—沉积—埋藏这一系列过程中,其数量与质量的变化,因此综合研究指示这 3 个因素的元素含量的变化必定能够用来评价烃源岩。

3.1 与有机质富集相关的元素优选

对海相烃源岩来讲,为了充分反映海洋中自生有机质的数量,首先要去除来自陆源碎屑中的那部分有机质。因此本次研究过程中对采用的元素含量都经过了晚太古代澳大利亚页岩(PAAS)(Taylor and McLennan,1985)的校正。

研究中采用变量的聚类分析方法,将属于同一类成因作用或者来自相同沉积环境中关系较密切的元素聚为一类。本文探讨的聚类是建立在各元素含量、总有机碳含量(TOC)、无机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)及有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)这几项参数的基础上的。其中,总有机碳含量(TOC)是烃源岩优劣的最根本属性,反映了有机质的数量;而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 能够很好地反映沉积环境的变化(Kuypers *et al.*,1999;张水昌等,2006)。因此将这 3 项参数加入到元素的聚类分析中,形成的不同变量组合最能反映与有机质变化相关的沉积环境的特征(图 2)。

此次聚类分析用到的校正后的生源元素如下: Al_{xs} 、 Ba_{xs} 、 Ca_{xs} 、 Fe_{xs} 、 Mg_{xs} 、 Mn_{xs} 、 Mo_{xs} 、 P_{xs} 、 Sr_{xs} 、 V_{xs} 、 Cr_{xs} 、 Co_{xs} 、 Ni_{xs} 、 Cu_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Pb_{xs} 、 U_{xs} 、TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 这 20 个参数。其聚类结果如下:

第 1 类包括: Ca_{xs} 、 Fe_{xs} 、 Mg_{xs} 、 Mn_{xs} 、 Sr_{xs} 、 Co_{xs} 、 Pb_{xs} 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$,这一类元素中 Fe_{xs} 、 Mg_{xs} 、 Mn_{xs} 、 Co_{xs} 、 Ca_{xs} 、 Sr_{xs} 是与生物发育密切相关的营养元素, Pb_{xs} 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 主要反映了海平面的升降变化。因此这一大类主要反映原始有机质的数量。

表 1 四川盆地南江杨坝地区下寒武统微量元素分析(单位: 10^{-6})
Table 1 Element contents of the Lower Cambrian in Yangba area of the Nanjiang County, Sichuan basin

样品	Al	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Mo	P	Sr	V	Cr	Co	Ni	Ti	Cu	Zn	Pb	U
74-1	18 311.92	718.93	2 310.99	2 6337.88	7 600.06	67.07	24.54	810.15	39.93	2 093.24	173.63	14.84	173.64	3 336.32	87.85	176.20	34.22	11.34
74-2	57 122.81	912.64	2 885.38	8 952.95	6 614.88	20.81	55.04	257.81	58.30	382.15	82.20	2.17	24.47	3 378.74	27.46	95.85	37.36	24.91
74-3	40 994.65	858.01	1 708.78	10 410.32	5 812.95	25.49	54.95	323.18	47.48	287.89	122.76	3.66	32.60	3 340.13	28.49	101.81	34.08	25.07
74-4	56 324.46	918.46	769.07	24 581.74	5 899.68	33.32	53.58	593.60	69.11	349.32	134.54	12.26	72.84	3 368.13	56.46	103.76	32.62	24.72
74-5	55 272.38	876.66	3 238.46	7 232.46	5 153.79	20.09	24.14	282.99	80.38	732.58	128.38	1.68	32.12	3 596.13	22.73	80.05	33.33	16.05
75-1	57 414.19	836.68	4 509.22	9 739.08	5 388.70	39.77	27.45	374.95	92.69	607.14	68.99	3.06	39.19	3 299.95	39.50	48.61	29.61	15.63
75-2	64 456.40	964.24	2 991.06	17 996.97	9 256.53	78.80	19.54	729.36	96.99	319.98	94.05	5.71	27.19	4 065.38	29.63	54.63	35.96	9.85
75-3	70 171.97	970.45	2 575.92	2 2487.61	7 794.50	77.09	23.08	217.15	104.21	272.93			4 183.46					
76-1	52 129.31	766.52	50 628.92	17 371.01	11 233.02	361.08	2.14	882.92	278.85	202.86	40.74	9.05	32.56	2 598.25	28.89	77.47	23.66	3.26
76-2	57 501.44	854.39	56 378.93	19 797.91	14 061.61	484.43	4.59	360.14	278.97	176.94			3 161.22					
76-3	59 160.01	657.89	54 135.56	24 533.53	13 087.24	432.77	1.66	297.37	290.89	208.77			3 201.74					
76-4	56 450.49	605.54	58 549.42	22 645.55	13 143.51	401.87	9.73	716.80	331.69	285.13	99.11	12.09	47.25	2 521.45	44.42	98.62	29.32	2.72
78-1	62 218.59	792.86	58 357.98	24 787.53	15 566.32	464.96	2.11	352.65	309.00	200.66			3 689.52					
78-2	66 023.00	1 251.82	38 017.48	24 466.55	14 560.26	363.74	2.82	448.83	177.20	204.21	86.85	11.33	35.00	4 013.27	23.82	119.83	15.03	2.60
78-3	55 241.60	768.26	44 170.99	23 978.29	15 677.99	373.26	0.92	818.40	237.53	242.76	123.11	11.95	40.75	3 726.03	32.21	91.92	30.98	2.83
78-4	55 592.27	1 233.01	30 112.52	24 552.79	15 471.64	322.47	1.11	1 107.54	153.10	245.90	57.12	11.78	45.26	3 858.59	35.29	109.61	34.82	2.93
79-1	54 717.39	1 032.75	65 307.42	20 005.02	12 458.63	384.04	1.19	1 013.45	285.03	187.46	104.72	9.81	33.63	3 249.72	25.66	76.67	30.42	2.80
79-2	53 799.53	971.63	46 584.41	19 523.29	14 101.06	331.05	0.38	695.01	201.13	213.33	91.13	9.67	36.46	3 283.30	525.61	80.84	21.24	2.45
80-1	236.01	4.95	176 037.75	375.13	69 497.90	170.05	0.24	20.69	53.32	2.09			8.34					
80-2	59 323.20	1 010.61	67 342.15	23 347.54	15 211.03	459.92	0.64	326.89	276.28	208.18	94.89	12.75	37.59	3 632.86	22.11	81.31	10.37	2.33
80-3	63 773.86	954.82	40 135.84	19 992.66	15 197.50	256.16	0.00	800.75	191.22	169.09	88.52	10.35	37.83	3 109.09	26.46	56.13	29.69	3.76
81-1	56 681.63	711.98	71 083.53	20 987.49	14 962.35	406.16	0.19	744.74	299.72	172.61	93.52	10.10	37.71	2 842.89	28.90	57.78	23.89	2.86
81-2	56 935.43	856.51	61 284.29	18 872.45	13 084.17	433.95	1.49	370.85	252.75	184.37			3 338.60					

续表1

样品	Al	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Mo	P	Sr	V	Cr	Co	Ni	Ti	Cu	Zn	Pb	U
82-1	63 208.65	725.78	33 088.18	24 119.31	15 125.80	398.48	0.85	359.10	171.80	216.80	101.12	12.77	33.48	3 407.09	21.57	119.96	10.80	2.60
83-1	58 112.68	942.40	9 792.60	9 754.76	4 392.54	31.67	19.03	227.69	90.82	209.79	96.02	2.92	26.88	3 021.73	9.69	71.58	16.96	10.11
84-1	43 109.77	507.06	4 844.37	26 116.84	8 029.09	1 131.80	1.33	468.94	57.91	171.96	84.92	8.49	36.96	1 765.39	10.40	57.32	6.73	2.64
85-1	43 927.96	346.49	6 069.88	58 916.35	10 838.91	2 083.94	0.32	980.03	52.01	188.22	67.76	14.33	45.61	1 781.74	13.89	64.68	4.35	2.66
87-1	61 972.26	592.21	30 982.40	22 305.71	11 883.75	578.07	1.30	418.44	141.23	237.30	80.65	10.08	42.13	2 735.22	24.07	80.42	10.76	2.84
89-1	76 409.51	651.29	31 199.57	39 816.78	15 021.97	534.94	0.51	431.05	116.67	341.22	130.17	15.23	55.28	3 826.44	41.47	144.24	13.82	3.84
90-1	66 184.84	804.65	63 227.76	29 257.54	17 091.67	903.76	0.95	411.60	279.63	292.72	114.36	18.78	52.54	3 344.50	31.93	130.53	13.36	3.70
91-1	58 859.62	737.08	45 105.99	27 189.14	17 881.54	664.57	0.00	979.94	218.98	265.50	89.17	16.88	60.80	3 282.37	46.94	154.52	30.09	3.83
91-2	72 102.61	620.98	40 704.63	28 151.32	19 596.14	643.86	1.77	418.80	170.92	294.89	125.50	14.17	52.61	3 714.92	41.06	167.37	11.08	3.81
92-1	71 358.78	614.19	49 854.76	26 277.86	18 132.10	734.60	1.70	387.02	207.70	264.69	120.51	14.90	50.21	3 705.36	32.22	131.18	24.13	3.56
93-1	53 663.14	549.16	40 388.09	26 986.94	16 760.33	523.36	0.01	1 073.50	162.62	257.71	127.70	15.63	58.28	3 131.69	46.65	101.23	27.39	3.81
93-2	65 486.26	721.13	39 125.69	27 645.99	14 407.53	499.68	0.91	394.43	171.99	273.45			3 085.42					
94-1	71 812.32	563.59	55 264.39	28 612.82	18 089.83	665.67	0.99	395.21	227.45	288.40	113.53	15.28	51.09	3 425.48	37.65	97.76	85.83	3.62
95-1	54 634.36	825.56	50 174.07	21 201.51	13 215.59	574.42	1.17	357.66	209.82	213.65	110.85	11.10	35.24	2 796.97	22.24	71.79	9.22	3.04
96-1	50 843.49	352.92	106 001.54	20 858.46	16 063.63	1 108.38	1.72	919.19	281.34	209.86	87.68	12.56	46.34	2 402.16	28.57	83.13	24.71	5.44
96-2	53 027.61	356.63	101 835.29	21 138.99	14 219.87	1 036.84	1.20	307.07	276.54	205.96			2 180.76					
97-1	55 159.30	449.73	46 581.49	26 387.24	21 725.80	610.46	0.00	1 024.85	113.40	276.40	115.17	15.80	58.46	3 227.12	60.54	112.34	31.09	4.24
97-2	39 241.06	442.48	43 178.59	34 751.69	13 209.74	736.98	1.39	488.34	171.64	156.48			1 451.44					
97-3	48 345.59	515.02	38 648.38	42 816.58	14 764.29	705.96	0.51	514.73	123.24	200.25	92.95	37.18	53.08	2 446.57	11.82	71.47	8.12	3.10
98-1	57 090.22	387.04	58 014.87	21 600.16	16 982.66	692.24	1.03	329.27	151.40	230.51	86.30	11.39	36.24	2 752.53	22.31	78.38	9.04	2.94
99-1	32 030.56	339.83	119 146.12	11 276.28	10 077.69	709.39	0.10	506.44	252.20	105.14	47.98	5.68	24.40	1 204.77	24.04	93.22	26.81	1.64
99-2	27 184.69	315.72	121 900.16	9 338.35	8 259.89	750.82	0.69	148.21	234.98	83.60			931.79					
100-1	6 770.10	50.50	308 308.71	6 195.89	5 935.22	2 090.84	0.81	703.17	398.92	28.82	30.26	4.65	10.83	291.82	6.63	23.64	30.84	4.18
101-1	35 760.31	355.01	79 418.72	11 095.55	11 350.52	417.54	0.75	799.25	151.65	126.44	119.38	7.99	33.97	1 375.54	24.62	60.67	26.46	1.93
101-2	39 538.18	363.42	81 123.16	13 592.57	9 098.73	449.26	1.63	323.01	154.31	148.96			1 753.42					

续表 1

样品	Al	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Mo	P	Sr	V	Cr	Co	Ni	Ti	Cu	Zn	Pb	U
102-1	2 813.22	26.92	268 198.64	4 232.58	27 313.19	636.10	0.67	37.56	237.83	9.40	22.26	1.32	5.01	70.97	10.36	49.08	4.34	0.43
103-1	4 317.48	28.21	324 713.05	3 535.66	21 507.85	471.90	1.00	81.55	298.35	17.07				136.46				
103-2	8 480.69	56.68	278 286.33	4 858.26	20 035.16	458.63	0.41	240.82	358.28	36.05	31.08	2.56	14.54	371.02	36.29	58.40	26.43	1.16
103-3	2 019.33	31.14	285 574.76	5 339.96	21 895.77	723.55	0.20	59.87	240.47	12.80				96.54				
104-1	16 232.08	1 498.97	195 059.00	6 329.54	9 878.70	381.84	1.04	112.94	254.62	48.61	44.81	2.37	10.37	562.77	26.70	50.43	12.22	0.90
105-1	20 589.66	126.09	229 374.88	8 252.18	27 529.26	448.51	0.00	276.25	286.48	74.71	46.14	3.53	20.25	869.76	14.95	44.83	26.30	1.04
106-1	22 341.54	147.36	202 388.72	9 907.26	28 216.31	556.89	0.51	121.17	200.05	77.58	39.66	7.08	21.03	876.74	10.37	25.93	12.76	1.14
107-1	10 446.32	53.12	195 484.01	4 520.13	16 504.13	338.00	2.45	324.66	272.84	31.88	15.94	2.09	16.61	482.04	17.11	150.28	26.73	1.50
107-2	12 346.11	61.00	275 538.43	5 010.06	7 542.89	421.81	0.48	134.65	279.98	45.75	37.07	3.02	11.93	503.26	50.70	45.83	7.82	0.84
108-1	7 837.58	42.39	254 612.25	5 345.90	24 445.81	597.38	1.92	189.96	230.11	27.53	38.78	2.15	20.10	251.23	50.05	104.89	27.71	1.10
108-2	3 128.77	26.33	262 448.11	4 285.21	36 369.38	1 080.59	0.68	41.48	356.88	12.99				101.74				
111-1	34 765.87	1 537.80	35 589.84	13 485.53	16 873.74	1 696.68	1.29	192.38	119.42	106.63	118.30	5.24	16.90	1 419.81	10.06	42.27	11.45	1.39
112-1	28 304.77	1 896.47	46 260.31	8 167.04	10 039.90	1 022.13	0.73	235.99	123.94	78.38	63.37	3.30	9.14	1 068.04	16.51	24.14	16.62	1.95
112-2	71 835.42	573.95	3 419.12	31 134.68	14 302.92	299.70	0.74	340.65	56.92	306.61				3 286.43				
113-1	88 320.71	745.62	4 536.81	33 174.44	17 440.93	344.40	0.48	387.21	40.09	397.24	151.61	13.83	60.28	4 039.31	80.11	136.43	9.69	3.72
114-1	25 208.55	5 349.92	26 578.95	12 887.44	4 148.49	831.10	1.18	187.22	207.32	87.53	107.20	2.45	11.29	1 305.08	368.25	32.98	8.80	1.03
115-1	49 948.08	1 943.83	17 998.89	28 777.93	13 249.77	948.27	1.55	313.32	133.34	196.27	73.91	7.53	30.30	2 220.69	34.79	71.20	13.51	2.39
115-2	51 882.26	1 767.57	4 346.38	13 929.31	7 601.42	291.67	0.97	188.81	93.31	140.60				1 812.62				
116-1	77 523.56	585.46	5 954.79	38 612.82	15 613.05	373.91	0.83	359.77	73.92	334.07				3 918.09				
116-2	36 122.88	1 596.41	9 121.35	14 869.47	4 421.69	582.90	0.87	159.73	106.30	94.06	124.62	11.48	49.26	1 225.81	20.97	115.07	9.90	3.45
117-1	27 547.03	407.46	1 614.50	3 153.48	1 127.51	74.73	0.78	89.27	41.53	55.59	148.62	1.37	4.89	638.22	7.77	22.45	8.41	0.69
118-1	42 342.84	487.03	5 821.14	15 163.87	6 609.89	366.78	1.20	242.52	64.40	127.32	52.43	5.68	20.96	1 478.58	99.76	63.13	8.85	1.52
119-1	36 438.26	410.26	4 190.80	11 316.75	4 528.78	109.23	1.42	481.58	68.61	109.18	106.16	5.59	17.60	1 268.68	25.18	43.51	9.27	1.46
120-1	27 758.09	386.67	1 985.32	11 443.64	3 581.33	97.15	1.82	169.61	35.31	82.50	157.03	4.22	15.60	1 183.75	7.60	39.53	6.45	1.13
121-1	45 764.40	588.71	2 941.32	17 258.12	6 555.05	149.79	1.16	225.14	44.83	153.92	54.66	6.99	26.55	2 035.03	6.43	46.61	7.57	2.07

续表 1

样品	Al	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Mo	P	Sr	V	Cr	Co	Ni	Ti	Cu	Zn	Pb	U
122-1	48 025.33	601.85	1 858.54	18 505.90	5 438.69	126.88	0.80	169.70	47.27	138.23				1 795.92				
123-1	33 049.74	427.62	13 955.57	14 767.47	9 733.51	258.52	0.91	173.19	55.18	128.93	44.80	5.91	18.48	1 676.33	25.76	37.87	6.85	1.85
124-1	13 568.25	297.00	1 422.04	10 979.86	2 319.56	213.74	1.41	132.48	22.68	53.92	31.89	2.82	8.92	746.24	10.67	30.27	8.86	0.92
125-1	35 045.75	1 557.52	10 024.23	17 363.48	4 988.92	128.26	2.24	1 546.34	73.14	98.45	36.23	6.70	19.91	1 198.62	136.93	49.92	7.19	3.20
125-2	21 951.10	675.46	2 819.16	12 823.45	3 522.35	101.66	0.88	254.69	38.43	72.10				778.41				
125-3	82 439.46	896.26	5 478.86	27 212.28	12 605.86	217.55	1.34	261.53	69.87	261.41				4 083.40				
127-1	43 917.99	532.75	2 515.54	14 944.49	5 763.83	236.63	1.28	211.19	52.45	124.44	116.05	6.73	23.29	1 884.09	8.77	42.68	7.38	1.54
129-1	95 380.96	730.91	2 839.81	36 304.27	15 174.80	347.09	0.89	215.56	67.93	353.48	123.29	18.28	56.96	4 073.50	49.96	109.06	7.68	3.75
130-1	6 945.30	350.99	3 036.85	37 474.79	1 158.21	53.62	2.38	508.78	32.89	85.33	33.85	1.64	5.73	411.69	13.61	17.13	4.03	2.19
130-2	73 839.20	724.93	2 920.21	31 475.62	14 472.81	257.93	0.67	268.17	50.50	269.23				3 907.33				
130-3	8 236.40	797.05	7 591.92	32 250.42	3 659.25	182.15	4.34	1 224.50	74.69	136.78				475.43				
131-1	45 463.72	800.76	1 782.68	23 279.61	11 597.82	176.44	1.07	483.96	36.83	177.42	60.28	10.73	42.47	2 820.29	36.76	73.87	25.99	2.27
132-1	18 573.41	260.40	62 876.95	5 332.66	31 982.94	259.94	0.33	112.74	51.86	47.50	25.49	1.19	4.13	750.30	6.17	14.12	36.54	1.14
133-1	19 994.86	266.12	60 471.77	4 607.20	35 124.70	236.76	0.35	270.60	46.14	44.79	96.94	1.52	13.38	1 001.10	15.68	26.66	24.19	1.08
133-2	5 934.51	59.34	172 391.19	5 923.37	65 845.86	564.51	1.09	22.94	71.66	20.65	31.86	1.66	6.12	168.92	6.14	55.55	14.14	1.42
134-1	4 477.52	54.12	163 086.18	3 480.67	76 899.24	422.71	0.00	50.51	51.82	10.25	20.11	0.84	11.19	178.08	11.00	24.54	28.36	0.34
135-1	9 650.35	868.12	168 924.77	6 155.98	67 028.75	520.92	0.40	43.65	69.11	26.90	65.85	1.54	5.78	407.94	7.84	17.23	14.90	0.48
136-1	5 464.71	47.19	108 038.66	3 099.90	49 593.50	330.46	0.30	28.46	43.57	22.60	37.35	1.40	3.34	207.13	5.72	15.36	7.58	0.98
137-1	12 612.59	312.16	154 657.10	7 152.78	63 113.29	533.89	0.17	70.25	59.25	48.77	21.34	2.50	9.49	502.82	8.60	22.44	13.79	1.41
139-1	18 429.21	3 769.75	100 174.55	4 931.22	49 204.81	355.11	1.01	105.03	96.83	43.03	37.28	1.37	4.64	825.44	5.20	35.09	7.84	1.34
140-1	23 201.78	282.20	47 794.39	5 860.66	28 089.45	190.13	0.79	144.17	34.20	73.19	68.19	2.89	7.17	1 546.64	10.03	20.28	15.70	1.58
141-1	2 148.20	41.50	185 523.00	3 719.97	70 734.62	447.00	1.23	29.15	66.30	14.08	14.60	0.91	4.08	85.09	5.07	26.12	10.40	1.10

注:表格中空白处表示无测试数据。

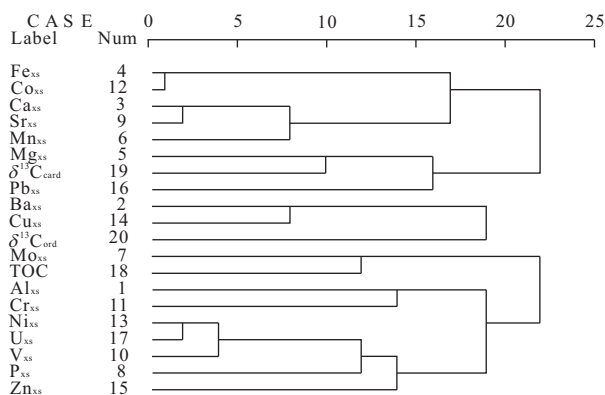


图 2 各元素含量聚类分析结果

Fig.2 Clustering analysis of element contents

第 2 类包括: Al_{xs} 、 Mo_{xs} 、 P_{xs} 、 V_{xs} 、 Cr_{xs} 、 Ni_{xs} 、 Zn_{xs} 、 U_{xs} 及 TOC, 这一类元素主要反映有机质的沉积环境以及有机碳的埋藏效率, 因此这一大类主要与有机质沉积及埋藏、保存条件有关。

第 3 类包括: Ba_{xs} 、 Cu_{xs} 及 $\delta^{13}C_{carb}$, 这一类元素与海水的古生产力有关, 反映了有机质的沉积数量。

3.1.1 有机质富集与元素含量的关系 烃源岩的根本属性是富含有机质, 通常形成于特定的沉积环境。聚类分析反映出某些元素分别与 TOC、 $\delta^{13}C_{carb}$ 及 $\delta^{13}C_{org}$ 各自聚成一类, 因此这些元素也能够反映烃源岩的沉积环境以及烃源岩的基本属性。其中, 总有机碳含量 (TOC) 常反映烃源岩中有机质的含量, 而碳同位素 (包括无机碳同位素 ($\delta^{13}C_{carb}$) 和有机碳同位素 ($\delta^{13}C_{org}$)) 则反映烃源岩中有机质的来源及有机质的沉积环境 (黄俊华等, 2007)。结合前文提到的元素示踪烃源岩沉积环境的原理, 拟建立 TOC、 $\delta^{13}C_{carb}$ 及 $\delta^{13}C_{org}$ 分别与元素含量之间的关系式。

利用校正后的生源元素 (Ba_{xs} 、 Fe_{xs} 、 Mn_{xs} 、 Mo_{xs} 、 P_{xs} 、 Sr_{xs} 、 V_{xs} 、 Cr_{xs} 、 Co_{xs} 、 Ni_{xs} 、 Cu_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Pb_{xs} 及 U_{xs}) 与实测的 TOC、 $\delta^{13}C_{carb}$ 及 $\delta^{13}C_{org}$ 分别进行多元逐步回归及相关分析, 优选出与烃源岩的属性密切相关的微量元素, 可得到 3 个多元线性回归方程:

$$TOC(\%) = 0.151U_{xs} - 0.015Ni_{xs} + 0.01Sr_{xs} + 0.002V_{xs} - 0.000358Mn_{xs} - 0.05, \quad (1)$$

$$\delta^{13}C_{carb}(\text{PDB}) = -0.868U_{xs} - 0.001Ba_{xs} - 0.0000632Fe_{xs} + 0.616, \quad (2)$$

$$\delta^{13}C_{org}(\text{PDB}) = -0.17U_{xs} - 0.02Zn_{xs} - 28.279, \quad (3)$$

从公式中可以看出, 影响生物生长的营养元素 Ba_{xs} 、 Mn_{xs} 和 Fe_{xs} , 海水盐度 Sr_{xs} 及影响有机质保存条件的 U_{xs} 、 V_{xs} 、 Ni_{xs} 及 Zn_{xs} 都被选入用来评价有机质的

丰度、沉积和保存环境。

然而, 作为反映海洋古生产力及有机质埋藏效率的 Mo_{xs} 却没有出现。初步分析是因为 Mo_{xs} 和 U_{xs} 都与 TOC 显著相关, 相关系数分别为 0.936 和 0.948, 而 Mo_{xs} 、 U_{xs} 两元素之间的相关性也很高, 相关系数高达 0.978。由于对 TOC 而言, Mo_{xs} 、 U_{xs} 二者不能同时作为独立变量, 故而与 TOC 回归分析的结果中只能出现其中一种元素, 这里只出现了 U_{xs} 。

3.1.2 元素地球化学判别公式 在上述分析过程中选入了与有机质变化所密切相关的 9 个元素, 包括 Mo_{xs} 、 U_{xs} 、 Fe_{xs} 、 Mn_{xs} 、 V_{xs} 、 Ni_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Sr_{xs} 及 Ba_{xs} 。利用 SPSS 软件用主成分法进行主因子分析, 提取公共因子, 得到初始特征值和载荷矩阵。为了更好地找出公共因子的地质意义, 运用加入 Kaiser 常态化的方差最大旋转法, 得到特征值接近 1.0 的 4 个因子。这 4 个因子的贡献率分别为 28.987%、24.924%、15.287% 及 11.553%, 共解释了原始变量总方差的 80.752%, 基本上可以反映这 9 个元素的信息。

根据旋转后的因子载荷矩阵表 (表 2), 可分析各个主因子所代表的实际含义。主因子 1 涵盖了 Mo_{xs} 、 U_{xs} 、 Fe_{xs} 和 Mn_{xs} 这 4 种元素, 反映有机质的埋藏条件及赋存环境; 主因子 2 包括 V_{xs} 、 Ni_{xs} 和 Zn_{xs} , 与水体的氧化还原条件有关; 主因子 3 中 Sr_{xs} 是被证实的与海水的古盐度及古气候有关的元素, 可以用来反映生物生长时期古海洋的环境; 主因子 4 中 Ba_{xs} 反映古海洋的生产力, 可以看出这 4 个主因子涵盖了海洋的古生产力 (生物死亡后输入的有机质), 及影响有机质沉积、埋藏环境的因素。

根据因子得分系数矩阵 (表 3), 可以分别建立这 4 个主因子的计算公式, 即:

$$F1 = 0.348Mo_{xs} + 0.346U_{xs} - 0.399Fe_{xs} - 0.156Mn_{xs} + 0.159Sr_{xs} - 0.128Ni_{xs} + 0.032Ba_{xs} - 0.004V_{xs} + 0.078Zn_{xs}, \quad (4)$$

$$F2 = 0.449Ni_{xs} + 0.350V_{xs} + 0.333Zn_{xs} + 0.148Fe_{xs} + 0.011Ba_{xs} + 0.086Mn_{xs} + 0.047Mo_{xs} + 0.056U_{xs} + 0.014Sr_{xs}, \quad (5)$$

$$F3 = 0.763Sr_{xs} + 0.365Zn_{xs} + 0.272Mn_{xs} - 0.222Fe_{xs} + 0.019Ba_{xs} + 0.072Mo_{xs} - 0.167V_{xs} - 0.067Ni_{xs} + 0.083U_{xs}, \quad (6)$$

$$F4 = 0.855Ba_{xs} + 0.187Fe_{xs} + 0.328Mn_{xs} + 0.184Mo_{xs} + 0.082V_{xs} + 0.048Ni_{xs} - 0.166Zn_{xs} + 0.177U_{xs} - 0.013Sr_{xs}. \quad (7)$$

在各公共因子的基础上, 结合不同因子的方差

表 2 旋转后的因子载荷矩阵
Table 2 Rotated component matrix

	主因子旋转载荷			
	1	2	3	4
Mo _{xs}	0.863	0.212	-0.183	0.168
U _{xs}	0.855	0.229	-0.169	0.159
Fe _{xs}	-0.809	0.171	-0.023	0.183
Mn _{xs}	-0.597	-0.002	0.482	0.338
Ni _{xs}	-0.081	0.957	-0.098	-0.027
V _{xs}	0.277	0.810	-0.309	0.019
Zn _{xs}	0.074	0.725	0.357	-0.230
Sr _{xs}	-0.181	-0.077	0.921	-0.010
Ba _{xs}	0.032	-0.121	0.013	0.886

注:提取方法:主成分分析法;旋转方法:加入 Kaiser 常态化的方差最大旋转。

表 3 因子得分系数矩阵
Table 3 Component score coefficient matrix

	主因子			
	1	2	3	4
Ba _{xs}	0.032	0.011	0.019	0.855
Fe _{xs}	-0.399	0.148	-0.222	0.187
Mn _{xs}	-0.156	0.086	0.272	0.328
Mo _{xs}	0.348	0.047	0.072	0.184
V _{xs}	-0.004	0.350	-0.167	0.082
Ni _{xs}	-0.128	0.449	-0.067	0.048
Zn _{xs}	0.078	0.333	0.365	-0.166
U _{xs}	0.346	0.056	0.083	0.177
Sr _{xs}	0.159	0.014	0.763	-0.013

贡献率,可以得到一个计算各个样品综合得分 F 的计算公式,即:

$$F = (28.987F_1 + 24.924F_2 + 15.287F_3 + 11.553F_4) / 80.752. \quad (8)$$

该综合得分 F 涵盖了岩石中有机质形成、沉积及埋藏过程中微量元素的总体信息,能够反映有机质的分布、聚集以及烃源岩的形成条件.因此,可以用来评价烃源岩.综合得分 F 值越高,越有利于烃源岩的形成.

3.3 烃源岩元素地球化学评价结果

将杨坝剖面计算得到的综合因子得分与实测的 TOC 进行统计,分析后发现:按照传统烃源岩的分类来看,属于非烃源岩(TOC 处于 0~0.2%之间)共有 40 个样品,综合因子 F 最大值为 0.713,最小值为 -0.072 1,平均值为 -0.08;属于差烃源岩(TOC 处于 0.4%~0.6%之间)共有 6 个样品,综合因子 F 平均值为 0.06,其中最大、最小值分别为 0.488 和 -0.091;属于一般烃源岩(TOC 处于 0.6%~1.0%之间)共有 1 个样品,其综合因子 F 为 0.229;属于优质烃源岩(TOC>1.0%)的样品有 7 个,综合因子

F 处于 -0.067~1.914 之间,其平均值为 1.048.从非烃源岩—差烃源岩—一般烃源岩—优质烃源岩,综合因子 F 平均值逐渐增高,说明运用综合因子公式来划分烃源岩的优劣具有一定的可行性.

4 结果

将杨坝剖面计算得到的综合因子 F 与实测的 TOC 比较后发现(图 3):

(1)下寒武统筇竹寺组的下部样品在评价过程中,综合因子得分高(处于 1~2 之间),反映在这个层位有机质的数量多,且能够较好地沉积并保存,具备有利于烃源岩发育的条件,而此处的高 TOC 值也证实了这一点.

(2)筇竹寺组顶部、仙女洞组及阎王碛组底部这些层段实测 TOC 较低,处于 0.03%~0.29%之间,未达到传统烃源岩评价下限,但是综合因子得分处于 0~1 之间,分析该层段有机质数量中等,有机质保存条件一般,属于一般烃源岩.

(3)阎王碛组中、上部及石龙洞组综合因子得分低,基本处于 0 以下,有机质数量少,埋藏条件差,有机质易氧化或被水体搬运,造成其损失很多.这种条件不利于烃源岩的形成,评价其属于非烃源岩,对应这个层位的 TOC,可以看出其残余有机碳含量极低,基本上都小于 0.1%,在传统意义上也属于非烃源岩.

5 结论

(1)运用元素地球化学方法从烃源岩形成的环境、条件入手,来评价我国高演化的海相烃源岩,解决了传统指标在高演化地层中失效的难题.该方法利用无机参数性质稳定,能够反映古海洋原始地化特征的原理,选取受烃源岩基本属性约束的元素,采用聚类分析、回归分析及因子分析等多种多元统计分析方法,提出量化评价高演化海相烃源岩的判别公式.

(2)将此方法应用于南江杨坝剖面下寒武统地层后发现,筇竹寺组的下部综合因子得分较高,其有机质沉积数量多,且保存条件优越,具备优质烃源岩发育的条件;筇竹寺组顶部、仙女洞组及阎王碛组底部综合因子得分处于 0~1 之间,可发育一般烃源岩;阎王碛组中、上部及石龙洞组综合因子得分低,

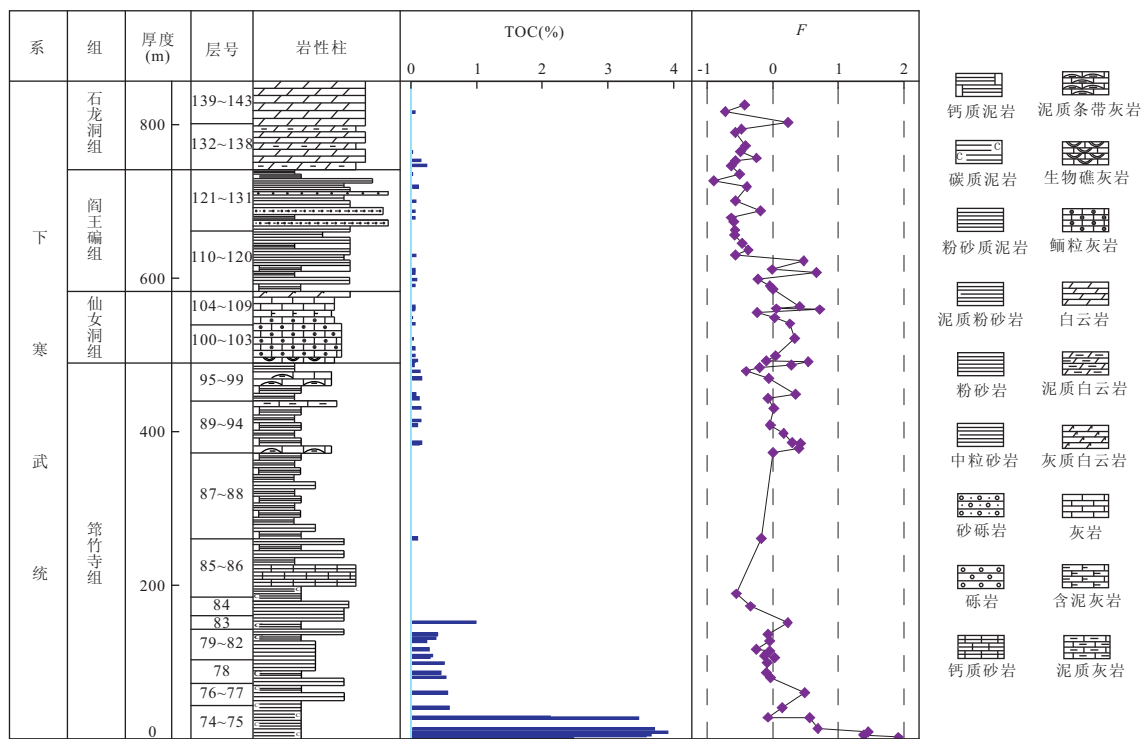


图 3 杨坝剖面因子分析综合得分及与 TOC 对照

Fig.3 General factor scores and total organic carbon (TOC) from Yangba section

多处于 0 以下,有机质数量少,不利于烃源岩的发育。

(3)对研究区的应用结果分析后发现,元素地球化学评价方法与传统的元素地球化学评价方法的评价结果存在着差异,但这正预示着其能够对高演化海相烃源岩的评价做出重要的补充。

References

- Alberdi-Genolet, M., Toceo, R., 1999. Trace Metals and Organic Geochemistry of the Machiques Member (Aptian-Albian) and La Luna Formation (Cenomanian-Campanian), Venezuela. *Chemical Geology*, 160: 19–38. doi:10.1016/S0009-2541(99)00044-3
- Bailey, S. W., Hornbeck, J. W., Priscoll, C. T., et al., 1996. Calcium Inputs and Transport in a Base Poor Forest Ecosystem as Interpreted by Sr Isotopes. *Water Resource Res.*, 32: 707–719. doi: 10.1029/95WR03642
- Cao, T. T., Xu, S. H., Wang, Y., et al., 2011. Geobiological Conditions for the Formation of the Lower Cambrian Source Rocks in Yangba Area of Nanjiang County in the Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 32(1): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H., Xie, X. N., Li, H. J., et al., 2010. Evaluation of the Permian Marine Hydrocarbon Source Rocks at Shangsi

Section in Sichuan Province Using Multi-proxies of Paleoproductivity and Paleoedox. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 324–333 (in Chinese with English abstract).

- Chen, Y. J., Deng, J., Hu, G. X., 1996. Environmental Constraints on the Trace Element Contents and Distribution Patterns in Sediment. *Geology and Geochemistry*, (3): 97–105 (in Chinese).
- Clavert, S. E., 1987. Oceanographic Controls on the Accumulation of Organic Matter in Marine Sediments. In: Brook, J., Fleet, A. J., eds., *Marine Petroleum Source Rock*. Blackwell Scientific Press, London. doi: 10.1144/GSL.SP.1987.026.01.08
- Hu, X. M., Wang, C. S., Li, X. H., 2001. Stable Carbon Isotope Response to Oceanic Anoxic Events. *Journal of Chengdu University of Technology*, 28(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. H., Luo, G. M., Bai, X., et al., 2007. The Organic Fraction of the Total Carbon Burial Flux Deduced from Carbon Isotopes across the Permo-Triassic Boundary at Meishan, Zhejiang Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 767–773 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. J., Wang, C. S., Wang, Y. L., 2005. Progress in the Study of Proxies of Paleocean Productivity. *Earth Sci-*

- ence *Frontiers*, 12(2):163—170 (in Chinese with English abstract).
- Jones, B.J., Manning, A.C., 1994. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 111(1—4): 111—129. doi:10.1016/0009—2541(94)90085—X
- Kuyppers, M.M., Pancost, R.D., Jaap, S., et al., 1999. A Large and Abrupt Fall in Atmospheric CO₂ Concentration during Cretaceous Times. *Nature*, 399: 342—345. doi: 10.1038/20659
- Li, H.J., Xie, X.N., Huang, J.H., et al., 2012. Main Factors Controlling the Formation of Excellent Marine Source Rocks in Permian Maokou Formation of Northwest Sichuan, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 171—180 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.L., Liu, Y.H., Lin, G., et al., 2006. REE Geochemical Characteristics and Geological Significance of Mudstones from Neogene, Nanpu Sag, Bohai Basin. *Geoscience*, 20(3): 449—456 (in Chinese with English abstract).
- Meyers, S. R., Sageman, B. B., Lyons, T. W., 2005. Organic Carbon Burial Rate and the Molybdenum Proxy: Theoretical Framework and Application to Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event 2. *Paleoceanography*, 20:2002—2020. doi: 10.1029/2004PA001068
- Mi, W.T., Wang, X.L., Feng, Z.Q., et al., 2012. Carbon Isotope Characteristics and the Implication for the Ancient Ocean Evolution of Doushantuo Formation in Weng'an, Guizhou, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 39(3): 396—304 (in Chinese with English abstract).
- Miller, E.K., Blum, J.D., Friedland, A.J., 1993. Determination of Soil Exchangeable-Cation Loss and Weathering Rates Using Sr Isotope. *Nature*, 362: 438—441. doi: 10.1038/362438a0
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: It's Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Press, United States, 25—30. doi: 10.1002/gj.3350210116
- Tenger, Liu, W.H., Xu, Y.C., et al., 2004. The Discussion on Anoxic Environments and Its Geochemical Identifying Indices. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 365—372 (in Chinese with English abstract).
- Tenger, Liu, W.H., Xu, Y.C., et al., 2005a. Correlative Study on Parameters of Inorganic Geochemistry and Hydrocarbon Source Rocks Formative Environment. *Advance in Earth Science*, 20(2): 193—200 (in Chinese with English abstract).
- Tenger, Liu, W.H., Xu, Y.C., et al., 2005b. Study on Relation between Inorganic Parameters in Marine Deposits and Developmental Environment of Hydrocarbon Source Rocks: Taking Ordos Basin as an Example. *Oil & Gas Geology*, 26(4): 411—421. (in Chinese with English abstract).
- Tenger, Liu, W.H., Xu, Y.C., et al., 2006. Geochemistry Identification of High-Maturity Marine Carbonate Source Rock—An Example from Ordos Basin. *Science in China (Series D)*, 36(2): 167—176 (in Chinese).
- Wang, D.R., 2000. *The Geochemistry Character of Stable Isotopes of Oil & Gas*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, S.C., Yin, H.F., Xie, X.N., et al., 2007. On the Geobiological Evaluation of Hydrocarbon Source Rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 727—740 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S.H., Mei, L.F., Yuan, C.P., et al., 2007. Types, Evolution and Pool-Controlling Significance of Pool Fluid Sources in Superimposed Basins: A Case Study from Paleozoic and Mesozoic in South China. *Journal of China University of Geosciences*, 18(1): 49—59.
- Zhang, S.C., Wang, R.L., Jin, Z.J., 2006. The Relationship Between the Cambrian-Ordovician High-TOC Source Rock Development and Palaeoenvironment Variations in the Tarim Basin, Western China: Carbon and Oxygen Isotope Evidence. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 459—466 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.G., 2005. Prospection of Petroleum Geochemistry. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(5): 484—489.
- Zhao, Z.H., 1997. *The Trace Element Geochemical Principle*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhou, L., Zhang, H.Q., Wang, J., et al., 2008. Assessment on Redox Conditions and Organic Burial of Siliciferous Sediments at the Latest Permian Dalong Formation in Shangsi, Sichuan, South China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 496—506. doi: 10.1016/S1002—0705(08)60055—2

附中文参考文献

- 曹婷婷, 徐思煌, 王约, 等, 2011. 四川盆地南江杨坝地区下寒武统烃源岩形成的地球生物学条件. 石油与天然气地质, 32(1): 11—16.