

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.05.10

引用格式: 仲米山, 吕东霖, 王岐, 等. 大兴安岭中段索伦地区林西组岩石地球化学特征与沉积构造环境[J]. 中国地质调查, 2022, 9(5): 89–96. (Zhong M S, Lv D L, Wang Q, et al. Geochemical characteristics and sedimentary tectonic environment of Linxi Formation in Suolun area of central Greater Khingan Mountains[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5): 89–96.)

大兴安岭中段索伦地区林西组岩石地球化学特征与沉积构造环境

仲米山^{1,2}, 吕东霖³, 王岐², 张化南⁴, 敖光², 吴子杰^{2,5},
杨运来², 王艺龙², 谭超²

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 辽宁省地质勘查院有限责任公司, 辽宁 大连 116100;
3. 辽宁省地矿集团能源地质有限责任公司, 辽宁 沈阳 110013; 4. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032; 5. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 大兴安岭中段林西组是重要的含烃源岩层位, 烃源岩的形成与生烃母质生物活动和埋藏时的古气候、古构造、古环境息息相关。通过岩石地球化学分析可以恢复林西组沉积时期的气候与构造环境, 利用 Sr/Li、Ga 含量、Sr/Ba 值、U/Th 值、 δU 及 Sr/Cu 值, 从古盐度、氧化还原环境、古气候等方面分析了索伦地区林西组的沉积环境, 认为林西组沉积时可能经历了中等—较强风化后的再沉积作用, 总体为淡水—微咸水的氧化环境, 气候温湿; $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 值、 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ 关系以及稀土元素特征表明: 林西组形成于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘, 由早期弧后盆地的海陆过渡相半咸水环境向陆相的淡水环境演变, 有利于有机质的富集和保存, 是寻找烃源岩的有利层位。研究成果可为该区烃源岩勘查提供指导。

关键词: 索伦地区; 林西组; 地球化学特征; 古气候; 沉积环境; 构造环境

中图分类号: TE122.2

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2022)05–0089–08

0 引言

大兴安岭中段索伦地区位于中亚造山带东段, 兴安地块中南部, 该区火山活动强烈, 火成岩的研究程度较高^[1–5], 但沉积岩类的报道较少。二叠系林西组分布广泛, 为索伦地区重要的沉积地层单元。近年来, 前人已在林西官地地区的林西组中发现了烃源岩层^[6–9], 但仅有李福来等^[10]根据盐度、氧化还原环境分析了索伦地区林西组的沉积相与沉积环境, 尚未涉及古气候变化与构造环境。气候和构造环境是控制烃源岩发育状况的重要因素, 并影响着生烃母质生物的生存环境和有机质的保存条件^[11–14]。通过对林西组开展岩石地球化学分析, 本文恢复了林西组沉积时期的古环境与古气

候, 探讨了其沉积期间大地构造环境与烃源岩形成的关系, 以期为该区的烃源岩勘查提供指导。

1 区域地质概况及样品特征

根据《内蒙古自治区岩石地层》^[15]的划分方案, 研究区的晚古生代地层属北疆—兴安地层大区, 兴安地层区, 东乌—呼玛地层分区; 中生代与新生代地层属滨太平洋地层区, 大兴安岭—燕山地层分区, 博克图—二连浩特地层小区^[15](图1(a))。区内的晚古生代和新生代地层共划分为5个组级单位: 二叠系上统林西组为一套浅变质沉积碎屑岩; 侏罗系上统满克头鄂博组为一套爆发间溢流相的酸性火山岩系; 上侏罗统玛尼吐组以发育安山质火山岩为特征; 下白垩统白音高老组

收稿日期: 2021–07–06; 修订日期: 2022–01–25。

基金项目: 中国地质调查局“内蒙古1:5万明水河林场等三幅区域地质矿产调查(编号: 12120114013001)”项目资助。

第一作者简介: 仲米山(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查及构造地质学研究。Email: 278929624@qq.com。

通信作者简介: 吕东霖(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事矿产普查与勘探工作。Email: lvdonglin@163.com。

主要为流纹质火山碎屑岩；下更新统西口组不整合覆于老地层及白垩纪侵入岩之上，岩性组合主要为辉石玄武安山岩与气孔状辉石玄武安山岩。区内侵入岩十分发育，包括晚石炭世中细粒正长花岗岩和早白垩世细粒石英二长闪长岩、中细粒

二长花岗岩、细粒正长花岗岩、中细粒正长花岗岩及中细粒石英碱长正长岩 6 个侵入序列(图 1(b))。区内构造主要以 NE 向和 NW 向断裂为主，其中晚期的 NW 向断裂将早期断裂及地层界线错断，褶皱构造不发育。

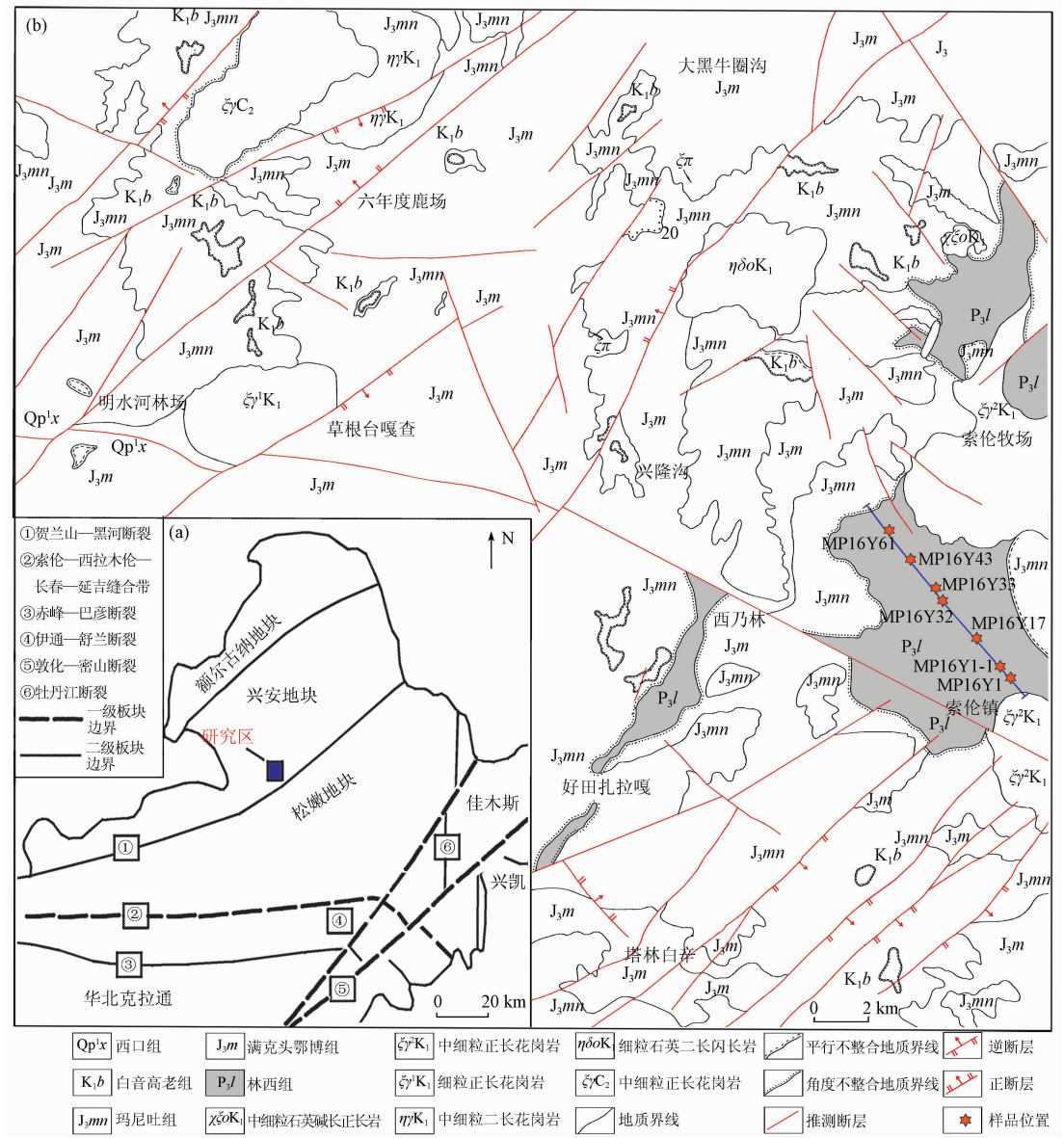


图 1 研究区大地构造位置(a)及地质简图(b)

Fig. 1 Geotectonic location and geological sketch map of the study area

二叠系上统林西组是区内出露最古老的地层，大致沿 NNE 向呈条带状展布于研究区东部(图 1)。下部岩性主要以变质中细粒岩屑长石砂岩为主，夹含碳绢云泥质板岩，底部泥质板岩中碳质含量较高，为可能的烃源岩层位；上部岩性主要为绢云泥质板岩、绢云粉砂质板岩夹少量中细粒岩屑长石砂岩等。林西组原岩为泥质岩、粉砂质泥岩及长石杂

砂岩等，该组多被中生代地层不整合覆盖，未见顶底，叠置厚度为 567~2 914 m(图 2)。

本研究共采集 7 件林西组样品，采样位置如图 1(b)和图 2 所示。样品岩性主要为含碳绢云泥质板岩(图 3(a))、含碳绢云粉砂质板岩(图 3(b))和变质细粒岩屑长石砂岩(图 3(c))，岩石普遍受到区域浅变质作用，发育变余泥质、粉砂质、砂质结构，板状

构造,斜长石绢云母化,石英可见波状消光。原岩由泥质碎屑、粉砂质碎屑及砂质碎屑组成,总体以细碎屑为主,指示沉积环境较稳定。碳质在岩石中不均匀分布或沿板理分布,有机质含量较高。

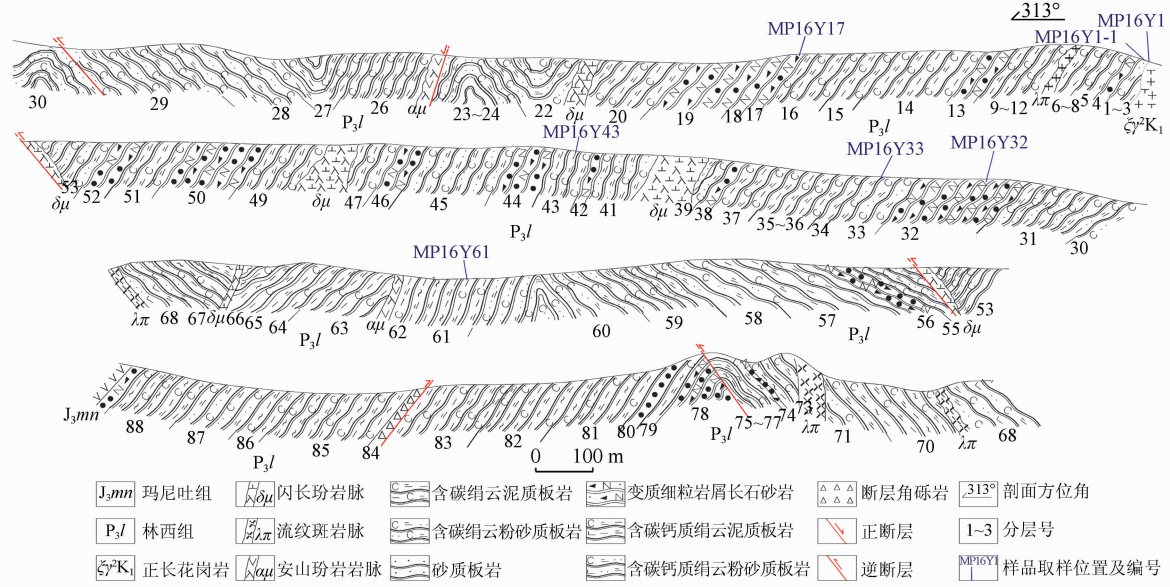


图2 林西组实测剖面图及样品位置

Fig. 2 Measured profiles and sample location of Linxi Formation

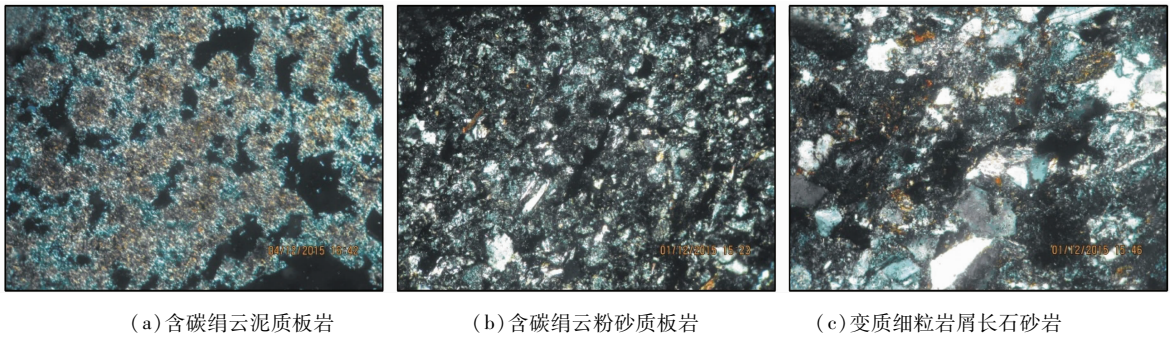


图3 林西组变质岩显微照片

Fig. 3 Micrographs of metamorphism rocks in Linxi Formation

2 分析及测试结果

2.1 分析方法

样品粉碎和测试工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。采用X射线荧光光谱仪进行主量元素测定;采用三酸一水溶矿法,运用电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS(X Serise2)进行微量元素和稀土元素测定,化学溶解方法和微量元素含量分析过程参考Ren等^[16]。使用标准样品AGV-1、BCR-2、BHVO-2与G-2监测溶样和分析过程,测试结果的相对标准偏差<5%。

2.2 主量元素

样品的主量元素含量见表1,其中K₂O/Al₂O₃值为0.14~0.20,平均值0.16,表明原岩中碱性长石含量较少;K₂O/Na₂O值为0.58~2.01,平均值1.02,表明样品中钾与钠的含量相似;MgO/Al₂O₃值为0.06~0.17,平均值0.11,表明碎屑岩中海水组分和陆源组分离散程度较小,沉积-构造环境较为稳定,有利于生物生长和烃源岩形成;ICV值为0.56~0.83,平均值0.65,小于1的ICV值表明其成分成熟度较高,含较多黏土矿物,可能经历了强烈风化后的再沉积作用^[17];CIA值为67.72~76.26,平均值72.41,说明物源区经历了中等化学风化作用^[18]。

表 1 林西组主量元素含量及特征参数

Tab.1 Cotent and characteristic parameters of major elements in Linxi Formation

样品号	岩性	主量元素含量/%											—烧失 量/%	K ₂ O / Al ₂ O ₃	K ₂ O/ Na ₂ O	MgO/ Al ₂ O ₃	ICV	CIA
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅						
MP16Y1	泥质板岩	66.86	0.54	16.38	3.26	1.22	0.05	1.58	0.25	1.61	3.24	0.11	3.32	0.20	2.01	0.10	0.64	76.26
MP16Y1-1	泥质板岩	72.68	0.56	14.40	1.18	1.80	0.03	0.91	0.34	3.41	1.98	0.14	1.45	0.14	0.58	0.06	0.58	71.54
MP16Y17	长石砂岩	71.32	0.58	14.33	0.91	3.02	0.06	1.09	0.29	3.47	2.09	0.15	1.48	0.15	0.60	0.08	0.59	71.01
MP16Y32	长石砂岩	59.18	0.98	17.50	3.37	3.45	0.12	2.36	0.97	4.19	2.62	0.35	2.98	0.15	0.63	0.13	0.83	69.22
MP16Y33	泥质板岩	63.52	0.86	17.03	1.09	4.74	0.04	2.12	0.25	2.28	2.90	0.13	2.86	0.17	1.27	0.12	0.56	75.82
MP16Y43	粉砂质板岩	63.22	0.71	14.12	0.97	5.07	0.16	2.39	2.95	2.18	1.60	0.14	4.47	0.11	0.73	0.17	0.76	67.72
MP16Y61	泥质板岩	65.98	0.65	16.49	2.30	2.41	0.03	1.64	0.25	2.26	2.89	0.09	3.10	0.18	1.28	0.10	0.61	75.33
平均值		66.11	0.70	15.75	1.87	3.10	0.07	1.73	0.76	2.77	2.47	0.16	2.81	0.16	1.02	0.11	0.65	72.41

2.3 微量元素与稀土元素

研究区林西组微量元素、稀土元素含量及特征参数分析结果见表 2,微量元素蛛网图上曲线明显向右倾斜(图 4),显示出大离子亲石元素相对富集、高场强元素相对亏损的特点,其中 Sr、Nb、P、Ti 相对亏损,Rb、K、La、Ce 相对富集。林西组的原岩是以黏土质为主的细碎屑岩,Sr 受斜长石约束,随着斜长石风化分解为黏土矿物而流失,Ti 可能受钛铁矿控制,P 主要受磷灰石控制,Ti 和 P 亏损指示原岩的钛铁矿和磷灰石含量较低。Th、Ce、Zr、Sm、La 为不活泼元

素,它们的相对富集可能与原岩富含这些元素有关。林西组稀土元素配分曲线见图 4。通常认为 REE 作为最不易溶解的微量元素,在低级变质作用、风化作用和热液蚀变作用中可以保持相对的不活泼性,因此变质作用和热液活动对岩石的 ΣREE 没有显著影响。研究区样品中 ΣREE 的平均值(183.41)比陆壳平均含量(167.6)略高,可能是由于原岩中含有较多的黏土成分。稀土配分曲线右倾,均属轻稀土富集型,重稀土相对亏损,表现出负 Eu 异常。

表 2 林西组微量元素与稀土元素含量及特征参数

Tab.2 Cotent and characteristic parameters of trace elements and REE in Linxi Formation

样品号	微量元素含量/10 ⁻⁶													特征参数			
	Li	V	Ni	Cu	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Ti	Th	U	Sr/Ba	V/(V + Ni)	Sr/Cu	
MP16Y1	21.38	62.24	26.68	16.07	14.13	46.00	110.00	143.00	6.84	349.60	0.51	3.51	0.93	0.31	0.70	6.85	
MP16Y1-1	10.22	67.10	18.21	13.83	20.20	57.07	92.71	326.60	13.04	317.75	0.61	5.64	1.51	0.29	0.79	6.70	
MP16Y17	108.23	121.88	9.28	30.58	25.11	98.46	556.83	212.70	7.08	651.36	0.89	3.42	0.68	0.85	0.93	18.21	
MP16Y32	61.44	89.21	59.96	48.34	22.50	106.45	87.84	196.00	11.68	617.44	0.73	7.81	1.43	0.14	0.60	1.82	
MP16Y33	65.05	96.25	57.41	29.65	20.25	75.65	221.61	196.30	10.43	595.82	0.55	6.32	1.73	0.37	0.63	7.47	
MP16Y43	30.96	65.45	23.26	25.27	23.28	124.98	64.04	225.80	14.23	497.26	0.91	11.85	3.34	0.13	0.74	2.53	
MP16Y61	52.93	142.67	91.80	53.01	26.55	114.28	103.17	204.60	14.98	753.25	0.93	8.12	1.58	0.14	0.61	1.95	
平均值	50.03	92.11	40.94	30.96	21.72	88.98	176.60	215.00	11.18	540.35	0.73	6.67	1.60	0.32	0.71	6.50	

样品号	稀土元素含量/10 ⁻⁶															特征参数		
	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	δEu	LREE/HREE La/Yb (La/Yb) _N
MP16Y1	28.2	35.2	82.8	9.89	36.0	7.31	1.34	6.23	0.92	5.30	1.06	3.00	0.50	2.89	0.50	103.65	0.76	6.98
MP16Y1-1	16.7	15.9	35.0	4.49	16.1	3.73	0.86	2.99	0.48	3.00	0.58	1.62	0.28	1.67	0.29	219.63	0.66	8.45
MP16Y17	29.9	39.2	80.9	9.22	32.7	6.36	1.34	5.82	0.83	5.24	1.07	2.94	0.55	3.09	0.54	156.59	0.73	9.2
MP16Y32	18.7	24.3	56.7	7.24	28.8	5.99	1.31	4.69	0.70	3.40	0.63	1.91	0.27	1.61	0.30	166.91	0.61	7.15
MP16Y33	26.7	25.6	57.0	7.01	26.3	6.01	1.10	4.67	0.77	4.85	0.98	2.52	0.44	2.53	0.44	158.37	0.79	7.1
MP16Y43	26.2	25.9	52.4	6.50	24.7	5.08	1.25	4.48	0.70	4.41	0.90	2.36	0.44	2.57	0.47	257.46	0.49	6.41
MP16Y61	47.7	39.1	83.1	10.4	38.9	8.77	1.29	7.08	1.14	8.03	1.63	4.23	0.81	4.62	0.76	221.25	0.59	8.47
平均值	27.7	29.3	64.0	7.8	29.1	6.2	1.2	5.1	0.8	4.9	1.0	2.7	0.5	2.7	0.5	183.41	0.66	7.68

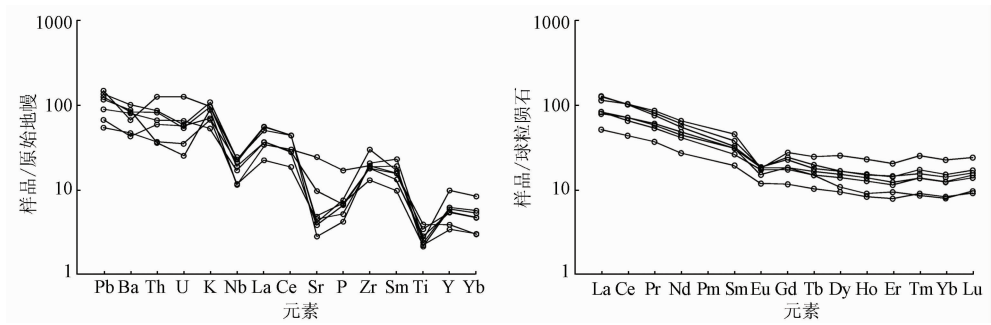


图 4 林西组微量元素原始地幔标准化蛛网图(左)及稀土元素球粒陨石标准化配分模式(右)^[19-20]
Fig.4 Primitive mantle – normalized trace element spider diagram (left) and Chondrite – normalized REE pattern diagram (right) of Linxi Formation^[19-20]

3 讨论

3.1 沉积环境及古气候

微量元素含量作为分析沉积盆地古环境的重要信息被广泛应用^[19-28],其中 Sr、Li、Ga 含量可指示水体盐度的变化,Sr 含量 $(800 \sim 1\,000) \times 10^{-6}$ 、Li 含量 $>150 \times 10^{-6}$ 、Ga 含量 $<8 \times 10^{-6}$,指示海相(盐水)沉积环境;Sr 含量 $(100 \sim 500) \times 10^{-6}$ 、Li 含量 $<90 \times 10^{-6}$ 、Ga 含量 $>17 \times 10^{-6}$,指示陆相(淡水)沉积环境^[24]。研究区除样品 MP16Y17 外,Sr 含量均小于 500×10^{-6} ,Li 含量小于 90×10^{-6} ;除样品 MP16Y1 外,其他样品 Ga 含量均高于 17×10^{-6} 。研究区 Sr、Li、Ga 含量指示林西组总体为淡水—微咸水沉积环境。

Sr/Ba 值可作为水体盐度的判别指标,当 Sr/Ba 值 >1.0 指示海相环境,Sr/Ba 值 <0.6 指示陆相环境,处于 $0.6 \sim 1.0$ 之间为半咸水环境^[25]。研究区除样品 MP16Y17 的 Sr/Ba 值为 0.85,其他样品均小于 0.6,说明林西组沉积时主要为陆相(淡水)环境,仅局部为半咸水环境。林西组的古水体盐度分析显示其环境适宜动植物生长,具有形成烃源岩的物质条件。

V/(V + Ni) 值可用来判断沉积物沉积时的氧化还原环境^[26]。V/(V + Ni) 值 >0.46 指示还原环境,反之指示氧化环境。研究区林西组样品的 V/(V + Ni) 值均大于 0.46,说明林西组沉积于还原环境,有利于有机质的保存。

Sr/Cu 值可反映沉积物沉积时的古气候^[27]。Sr 为喜干型元素,Cu 为喜湿型元素,Sr/Cu 值小于 10 代表湿润气候,反之代表干热气候。除样品 MP16Y17 的 Sr/Cu 值为 18.21,其他样品均小于

10,指示林西组沉积时总体为温湿气候,是藻类及动植物生长的有利条件。

3.2 大地构造环境

沉积建造中岩石的地球化学组分主要受物源区碎屑岩控制,且与构造环境密切相关,因此通过分析沉积岩的化学成分不仅可以确定原岩性质,还可以恢复沉积盆地的构造演化历史。

Jewell 等^[20]提出使用 $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 值指示沉积岩沉积期间的大地构造环境,比值介于 0.1~0.4 指示洋脊海岭环境,介于 0.4~0.7 指示远洋深海环境,介于 0.7~0.9 指示大陆边缘环境,研究区林西组 $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ 值为 0.83~0.94,平均值 0.9,指示林西组可能沉积于大陆边缘环境。

研究区样品的 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ 投图显示多数点落于活动大陆边缘(图 5)^[29]。Bhatia 等^[30]指出从大洋岛弧到大陆岛弧、活动大陆边缘以及被动大陆边缘,La、Ce、 ΣREE 及 La/Yb 值、 $(La/Yb)_N$ 值增加, δEu 降低。从表 4 可以看出,研究区林西组沉积期间整体处于活动大陆边缘与大陆岛弧之间。

扎鲁特地区和松辽盆地外围的地表露头 and 钻孔岩心资料显示,林西组物源区的构造背景主要为

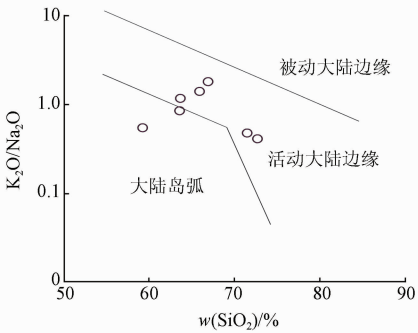


图 5 林西组 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ 图解^[29]
Fig.5 Diagram of $K_2O/Na_2O - SiO_2$ in Linxi Formation^[29]

表 4 林西组原岩形成的构造环境判别^[21]

构造环境	稀土元素含量/ 10^{-6}			特征参数			
	La	Ce	Σ REE	La/Yb	La _N /Yb _N	LREE/ HREE	δ Eu
大洋岛弧	(8 ± 1.7)	(19 ± 3.7)	(52 ± 10)	(4.2 ± 1.3)	(2.8 ± 0.9)	(3.8 ± 0.9)	(1.04 ± 0.11)
大陆岛弧	(27 ± 4.5)	(59 ± 8.2)	(146 ± 20)	(11 ± 3.6)	(7.7 ± 2.5)	(7.7 ± 1.7)	(0.79 ± 0.13)
活动大陆边缘	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.6
被动大陆边缘	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56
林西组(本研究)	29.30	64.00	183.41	11.17	7.53	7.68	0.66

活动大陆边缘和大陆岛弧,前人推测为形成于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘,沉积环境由海陆过渡相逐渐转变为陆相,水体由半咸水逐渐转变为淡水^[31-35],这与本研究的结果基本一致,说明从内蒙古中东部至齐齐哈尔一带,林西组沉积环境基本稳定,均形成于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境。

4 结论

- (1)主量元素含量及比值显示研究区林西组沉积-构造环境较稳定,可能经历了中等-较强风化后的再沉积作用。
- (2)微量元素含量及比值显示研究区林西组总体为淡水-微咸水的还原环境,气候温湿,适合生物活动并有利于有机质的保存。
- (3)研究区林西组的岩石地球化学特征显示其位于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘,为古亚洲洋闭合演化的一部分,在华北板块与西伯利亚板块南北向闭合挤压运动的作用下,陆壳抬升,古环境由早期弧后盆地的海陆过渡相半咸水环境向陆相的淡水环境演化,有利于有机质的富集和保存,是寻找烃源岩的有利层位。

致谢:感谢中国地质调查局的项目资助,感谢项目组其他同事在项目野外工作中给予的帮助,感谢论文审稿人对论文提出的建设性修改意见。

参考文献(References):

[1] 刘俊来, Davis G A, 纪沫, 等. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏:晚中生代伸展构造约束[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 72-81.

Liu J L, Davis G A, Ji M, et al. Crustal detachment and destruction of the North China craton: Constraints from Late Mesozoic extensional structures[J]. Earth Sci Front, 2008, 15(3): 72-81.

[2] 王兴安, 徐仲元, 刘正宏, 等. 大兴安岭中部柴河地区钾长花岗岩的成因及构造背景: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素

年代学的制约[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2647-2655.

Wang X A, Xu Z Y, Liu Z H, et al. Petrogenesis and tectonic setting of the K-feldspar granites in Chaihe area, central Greater Xing'an Range: Constraints from petro-geochemistry and zircon U-Pb isotope chronology[J]. Acta Petrol Sin, 2012, 28(8): 2647-2655.

[3] 施璐, 郑常青, 姚文贵, 等. 大兴安岭中段五岔沟地区蛤蟆沟林场 A 型花岗岩年代学、岩石地球化学及构造背景研究[J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1264-1276.

Shi L, Zheng C Q, Yao W G, et al. Geochronology, petro-geochemistry and tectonic setting of the Hamagou forest farm A-type granites in the Wuchagou Region, Central Great Xinggan Range[J]. Acta Geol Sin, 2013, 87(9): 1264-1276.

[4] 李中会, 李阳, 李睿杰, 等. 满归地区早侏罗世岩浆作用及其地质意义[J]. 中国地质调查, 2020, 7(5): 54-65.

Li Z H, Li Y, Li R J, et al. Magmatic activity and its geological significance in Early Jurassic in Mangui area of Inner Mongolia[J]. Geol Surv China, 2020, 7(5): 54-65.

[5] 李中会, 李睿杰, 李阳, 等. 大兴安岭满归地区变中酸性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中国地质调查, 2020, 7(1): 47-52.

Li Z H, Li R J, Li Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geological significance of the Meta-intermediate-acidic volcanic rocks in Mangui area of Da Hinggan mountains[J]. Geol Surv China, 2020, 7(1): 47-52.

[6] 余和中和, 蔡希源, 韩守华, 等. 松辽盆地石炭-二叠系烃源岩研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(2): 62-66.

Yu H Z, Cai X Y, Han S H, et al. The carboniferous-Permian source rocks in the Songliao Basin[J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2003, 23(2): 62-66.

[7] 张永生, 王延斌, 卢振权, 等. 松辽盆地及外围地区石炭系-二叠系烃源岩的特征[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 214-220.

Zhang Y S, Wang Y B, Lu Z Q, et al. Characteristics of source rock from carboniferous-Permian in Songliao Basin and its peripheral area, northeastern China[J]. Geol Bull China, 2011, 30(2/3): 214-220.

[8] 陈树旺, 丁秋红, 郑月娟, 等. 松辽盆地外围新区、新层系: 油气基础地质调查进展与认识[J]. 地质通报, 2013, 32(8): 1147-1158.

Chen S W, Ding Q H, Zheng Y J, et al. New areas and series of strata on the periphery of Songliao Basin: The progress and recognition based on foundational geological survey for oil and gas resources[J]. Geol Bull China, 2013, 32(8): 1147-1158.

[9] 陈树旺, 张健, 郑月娟, 等. 松辽盆地西部斜坡区上古生界油

- 气地质调查进展与发现[J]. 中国地质调查, 2019, 6(1): 1–9.
- Chen S W, Zhang J, Zheng Y J, et al. Progresses and discoveries of geological survey on oil and gas resources related to the Upper Paleozoic in the western slope of Songliao Basin[J]. Geol Surv China, 2019, 6(1): 1–9.
- [10] 李福来, 曲希玉, 刘立, 等. 内蒙古东北部上二叠统林西组沉积环境[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 265–272.
- Li F L, Qu X Y, Liu L, et al. Sedimentary environment of Upper Permian Linxi Group in Inner Mongolia[J]. Acta Sedimentol Sin, 2009, 27(2): 265–272.
- [11] 易立. 海拉尔盆地牧原凹陷油气勘探前景与有利区带目标优选[J]. 中国地质调查, 2019, 6(4): 104–110.
- Yi L. Petroleum exploration prospects and favorable zone evaluation in Muyuan sag of Hailaer Basin[J]. Geol Surv China, 2019, 6(4): 104–110.
- [12] 姜雪, 刘丽芳, 孙和风, 等. 气候与构造控制下湖相优质烃源岩的差异分布——以渤中凹陷为例[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 165–175.
- Jiang X, Liu L F, Sun H F, et al. Differential distribution of high-quality lacustrine source rocks controlled by climate and tectonics: A case study from Bozhong sag[J]. Acta Petrol Sin, 2019, 40(2): 165–175.
- [13] 李友川. 中国近海湖相优质烃源岩形成的主要控制因素[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 1–9.
- Li Y C. Main controlling factors for the development of high quality Lacustrine hydrocarbon source rocks in offshore China[J]. China Offshore Oil Gas, 2015, 27(3): 1–9.
- [14] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 39–48.
- Zhang S C, Zhang B M, Bian L Z, et al. Development constraints of marine source rocks in China[J]. Earth Sci Front, 2005, 12(3): 39–48.
- [15] 李文国. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1996: 46–52.
- Li W G. Rock Strata in Inner Mongolia[M]. Beijing: Chinese University of Geosciences Press, 1996: 46–52.
- [16] Ren R, Han B F, Xu Z, et al. 2014. When did the subduction first initiate in the southern Paleo-Asian Ocean: New constraints from a Cambrian intra-oceanic Arc System in West Junggar, NW China[J]. Earth Planet Sci Lett, 388: 222–236.
- [17] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the Southwestern United States[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59(14): 2919–2940.
- [18] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715–717.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society Special Publication, 1989: 313–345.
- [20] Jewell P W, Stallard R F. Geochemistry and paleoceanographic setting of central Nevada bedded barites[J]. J Geol, 1991, 99(2): 151–170.
- [21] 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 133–137.
- Sun Z C, Yang F, Zhang Z H, et al. The Sedimentary Environment and Hydrocarbon Generation of the Cenozoic Saline Lakes in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 133–137.
- [22] 同济大学海洋地质系. 海、陆相地层辨认标志[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 171–175.
- Department of Geology, Tongji University. Identification Marks for Marine and Continental Stratigraphy[M]. Beijing: Science Press, 1980: 171–175.
- [23] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1–93.
- Wang Z G, Yu X Y, Zhao Z H. Geochemistry of Rare Earth Elements[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1–93.
- [24] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 63–77.
- Tian J C, Zhang X. Sedimentary Geochemistry[M]. Beijing: Geology Press, Beijing, 2016: 63–77.
- [25] 王益友, 吴萍. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志[J]. 同济大学学报, 1983(4): 79–87.
- Wang Y Y, Wu P. Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang Provinces[J]. J Tongji Univ, 1983(4): 79–87.
- [26] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. Chem Geol, 1992, 99(1–3): 65–82.
- [27] 莱尔曼. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民, 译. 北京: 地质出版社, 1989.
- Lerman A. Chemistry, Geology and Physics of Lakes[M]. Wang S M, trans. Beijing: Geology Press, Beijing, 1989.
- [28] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. Dev Geochem, 1984, 2: 63–114.
- [29] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. J Geol, 1986, 94(5): 635–650.
- [30] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contrib Mineral Petrol, 1986, 92(2): 181–193.
- [31] 张健, 张海华, 陈树旺, 等. 松辽盆地北部上二叠统林西组地球化学特征及地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2020, 50(2): 518–530.
- Zhang J, Zhang H H, Chen S W, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Upper Permian Linxi Formation in Northern Songliao Basin[J]. J Jilin Univ: Earth Sci Ed, 2020, 50(2): 518–530.
- [32] 张海华, 李晓海, 张健, 等. 松辽盆地北部上二叠统林西组古生物年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 568–578.
- Zhang H H, Li X H, Zhang J, et al. Paleochronology, geochemical characteristics, and geological significance of the Upper Permian Linxi Formation in the Northern Songliao Basin[J]. Geoscience,

2021, 35(2):568–578.

- [33] 张健, 李晓海, 郑月娟, 等. 内蒙古扎鲁特地区上二叠统林西组古盐度分析[J]. 地质与资源, 2013, 22(6):471–477.

Zhang J, Li X H, Zheng Y Y, et al. Analysis on the Paleosalinity of upper Permian Linxi formation in Jarud area, inner Mongolia[J]. Geol Resour, 2013, 22(6):471–477.

- [34] 甄甄, 陈树旺, 郑月娟, 等. 内蒙古阿鲁科尔沁旗陶海营子剖面林西组地球化学特征及其对物源–构造背景的制约[J]. 中国地质, 2018, 45(5):1011–1022.

Zhen Z, Chen S W, Zheng Y J, et al. Geochemical Characteristics

of Linxi Formation along Taohaiyingzi section in Ar Horqin Banner, Inner Mongolia, and the constraint on the provenances and the tectonic settings[J]. Geol China, 2018, 45(5):1011–1022.

- [35] 张海华, 张健, 苏飞, 等. 内蒙古阿鲁科尔沁旗林西组泥岩地球化学特征及构造意义[J]. 地质学报, 2019, 93(5):1125–1136.

Zhang H H, Zhang J, Su F, et al. Geochemical characteristics of mudstone from the Late Permian Linxi Formation in Aluke Erqin Qi, Inner Mongolia and its structural significance[J]. Acta Geol Sin, 2019, 93(5):1125–1136.

Geochemical characteristics and sedimentary tectonic environment of Linxi Formation in Suolun area of central Greater Khingan Mountains

ZHONG Mishan^{1,2}, LV Donglin³, WANG Qi², ZHANG Huanan⁴, AO Guang²,
WU Zijie^{2,5}, YANG Yunlai², WANG Yilong², TAN Chao²

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Jilin Changchun 130061, China; 2. Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration Co., Ltd, Liaoning Dalian 116100, China; 3. Liaoning Provincial Geology and Mining Group Energy Geology Co. Ltd, Liaoning Shenyang 110013, China; 4. Liaoning Geological and Mineral Survey Institute Co. Ltd, Liaoning Shenyang 110032, China; 5. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China)

Abstract: The Linxi Formation in central Greater Khingan Mountains is an important hydrocarbon source rocks strata. The formation of hydrocarbon source rocks is closely related to the paleoclimate, palaeostructure and palaeo-environment during the propagation and burial of hydrocarbon generation parent organisms. The climatic tectonic environment of Linxi Formation in sedimentary period can be restored through the geochemical analysis of rock data. Based on the Sr, Li and Ga content, the Sr/Ba ratio, the U/Th ratio and δU method, the Sr/Cu ratio, the authors in this paper have analyzed the sedimentary environment of Linxi Formation from the ancient salinity, redox environment, and the ancient climate. The results show that the Linxi Formation might be formed by resedimentation after middle–strong weathering. The oxidative deposition environment is freshwater–brackish water, and the paleoclimate is warm humid climate. The $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ and $K_2O/Na_2O - SiO_2$ ratios, the content and parameters of rare earth elements were used to indicate the sedimentary environment of Linxi Formation. The results show that the Linxi Formation was formed in the active continental margin tectonic environment near the continental island arc, and the paleoenvironment evolved from the sea–land excessive brackish water to the continental freshwater environment in the early retroarc basin. The Linxi Formation is favorable for enrichment and preservation of organic matter, which is the beneficial horizon for hydrocarbon source rocks. This study can provide guidance for the exploration of hydrocarbon source rocks in this area.

Keywords: Suolun area; Linxi Formation; geochemical characteristics; palaeoclimate; sedimentary environment; tectonic setting

(责任编辑: 魏昊明)