

文章编号: 1000-0550(2009) 02-0265-08

内蒙古东北部上二叠统林西组沉积环境^①

李福来 曲希玉 刘立 杨德明 王德海 赵国祥

(吉林大学地球科学学院 长春 130061)

摘要 在前人研究的基础上,应用地球化学方法,对内蒙古东北地区上二叠统林西组的沉积环境进行了研究。林西组的岩性为灰黑色泥岩、粉砂质泥岩、页岩,灰色泥质粉砂岩、细砂岩。通过常量元素、微量元素和稀土元素的分析,发现林西组砂泥岩样品整体具有高 SiO_2 、 Al_2O_3 、V、Zr、Ba 低 P_2O_5 、Mn、CaO、Cd 的特点;通过沉积环境判别指标的分析,确定林西组为开阔的淡水环境,主要为陆相沉积体系,在其沉积初期为海陆交互环境。同时根据沉积构造和岩性组合,将林西组进一步划分为滨浅湖、半深湖—深湖的湖泊沉积体系和三角洲前缘、前三角洲的三角洲沉积体系。

关键词 上二叠统 林西组 陆相 沉积环境

第一作者简介 李福来 男 1978 年出生 博士研究生 储层与沉积学 E-mail: fukilil1984@yahoo.com.cn

中图分类号 P512.2 TE121.3 **文献标识码** A

中国东北地区晚古生代主体为海相沉积^[1-4],其中早石炭世海侵面积广泛,海生动物繁盛,存在佳木斯、额尔古纳古陆和松辽海盆,松辽海盆属于滨浅海环境^[2,3];晚石炭世海侵范围略有缩小,佳木斯、额尔古纳古陆依然存在,松辽海盆面积变小,发育岩性为陆相或海陆交互相碎屑岩和中酸性火山岩的松辽东、西冲积平原^[3]。早中二叠世东北地区海水面积进一步扩大,存在额尔古纳和佳木斯古陆,发育松辽海盆,主要为浅海相环境;在晚二叠世全区上升隆起,海水退出,主要发育古陆和陆相湖泊沉积^[2,4]。目前关于中国东北地区晚古生代主体的沉积环境,国内外学者已达成一致,但关于具体层位的沉积环境还存在一定的分歧。如林西组,在内蒙古地质志^[5]的论述中提到,该组含淡水瓣鳃类和植物化石;黄本宏^[1]认为林西组为陆相沉积;朱如凯等^[4]认为林西组的岩性为黑灰色砂岩、板岩,产淡水双壳类和植物,为浅湖相沉积;而余和中^[2]却认为林西组早期为海相地层,晚期为海陆交互的碎屑岩。那么林西组到底是陆相湖泊,还是海陆交互相,或者是两者均有呢?针对上二叠统林西组的沉积环境,本文进行了地球化学分析,通过常量元素、微量元素以及稀土元素的研究,确定了林西组的沉积环境。

1 地质背景

上二叠统林西组主要分布于内蒙古天山—兴安

地层区的大兴安岭地层分区和西乌珠穆沁旗地层分区,该区位于天山—兴安地槽褶皱区,斜跨大兴安岭中华力西褶皱带与内蒙晚华力西褶皱带两个二级构造单元,处于阿尔山复背斜南东翼与乌兰浩特复向斜北西翼两个三级构造单元上。属西伯利亚古板块大陆边缘向南增生部分。晚二叠世以前,区内属地槽型沉积建造。林西组的建组剖面位于林西县官地剖面,主要由一套黑色板岩、粉砂岩、砂岩组成,含丰富的淡水瓣鳃类和植物化石,在不同地区曾被称为索伦组、包尔敖包组和陶海营子组,根据岩性和生物群特征,统称为林西组^[5]。

2 实验样品与测试方法

研究中为了进行沉积环境的地球化学分析,在索伦地区共采集 14 块样品,采样地点位于索伦北 2 km 处(图 1),地理坐标为东经 $121^{\circ} 14' 27.5''$,北纬 $46^{\circ} 37' 48.4''$,包括 3 块细砂岩样品、1 块粉砂岩样品、9 块泥岩样品和 1 块页岩样品。样品在野外实测剖面上的分布位置见(图 2),剖面岩性主要灰黑色泥岩、粉砂质泥岩、页岩,灰色泥质粉砂岩、细砂岩,夹花岗岩斑岩、闪长玢岩,发育菱铁矿结核、水平层理。

对索伦地区的 14 块样品采用 X 荧光进行常量元素分析;采用三酸—水溶矿法,运用电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS(安捷伦 7500a)进行微量元素和稀土元素的测定,测试结果的相对标准偏差 $< 5\%$,测

①中国石油化工股份有限公司《中国东北地区油气勘探新领域基础地质研究》项目(编号:GO800-06)。收稿日期:2008-05-06 收修改稿日期:2008-07-21

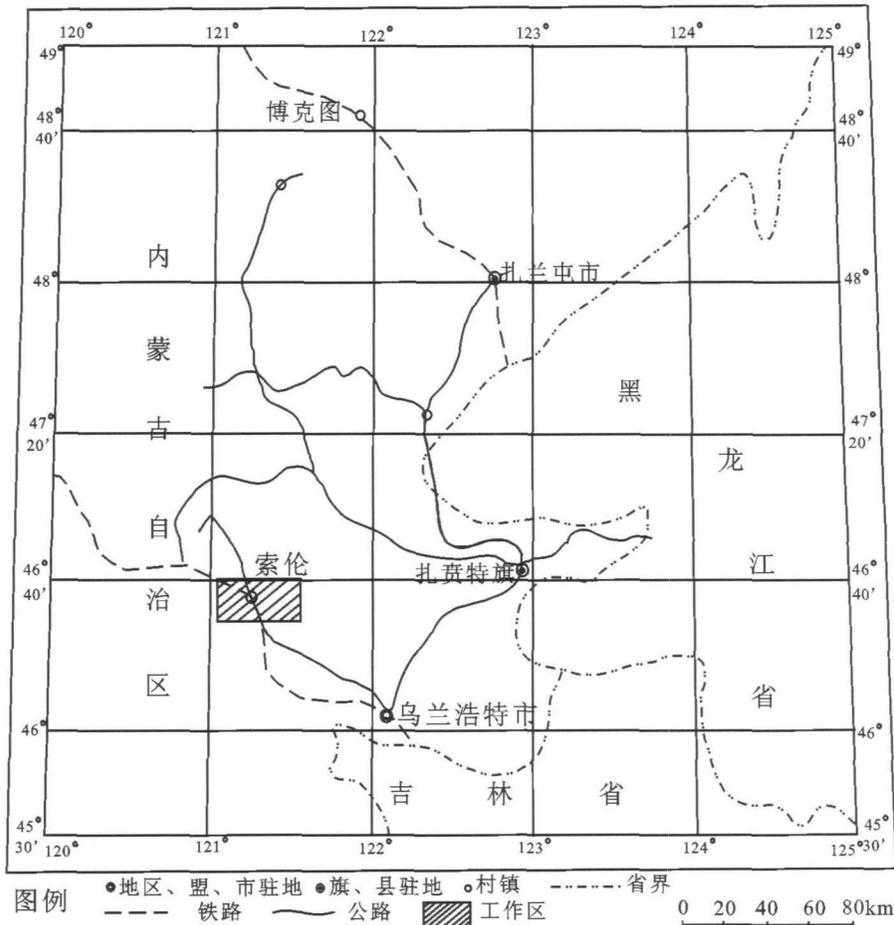


图 1 工作区地理位置图

Fig 1 The location map of the study area

试单位为吉林大学测试科学实验中心。

3 常量元素分析

索伦地区林西组的常量元素除样品 P₃₀₋₁ 外, 其余样品的元素特征基本一致(表 1)。样品 P₃₀₋₁ 具有硅、铝、钾、钠含量相对低, 三价铁、磷、锰、钙、镁含量相对高的特点, 其他样品具有高硅、铝, 低磷、低锰、低钙的特点。在样品 P₃₀₋₁ 中 Al₂O₃ 的含量仅为 6.46%, 其他样品的 Al₂O₃ 的含量为 13.88% ~ 18.47%; 样品 P₃₀₋₁ 中 Fe₂O₃ 的含量高达 20.23%, 其他样品的 Fe₂O₃ 含量最高仅为 6.06%。样品 P₃₀₋₁ 的磷、锰、钙、镁含量相对其他样品同样偏高, 其中 P₂O₅ 的含量为 3.5%, 其他样品最高为 0.42%; CaO 含量为 5.14%, 其他样品最高为 1.27%。

ICV 指数可以用来确定沉积物的成分成熟度^[6], 成分成熟度低的泥质岩石含有较高比例的非粘土硅

酸盐矿物, 或者富含蒙脱石、绢云母等粘土矿物, 具有较高的 ICV 值; 相反, 含非粘土硅酸盐矿物少或高岭石矿物占优势的泥质岩, 其 ICV 值低。ICV 指数的公式为: $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$ 。泥质岩样品的 ICV 指数为 0.61 ~ 0.81, 平均为 0.74, 表明其成分成熟度较高。CIA 指数可以确定源区的化学风化程度, 目前被广泛用于确定源区的风化特征^[7]。CIA 指数的公式为: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$ 。样品的 CIA 指数为 54.75 ~ 77.33, 平均为 73.10, 整体在 80 以下^[8], 表明源区经历了中等化学风化作用。

常量元素中的 SO₂ / Al₂O₃ 比值为 3.55 ~ 8.45, K₂O / Na₂O 比值为 0.35 ~ 1.82, 主体 > 1, 表明样品中钾含量大于钠含量; K₂O / Al₂O₃ 比值为 0.02 ~ 0.20, 所有比值均小于 0.4, 说明母岩中只含有少量的碱性长石^[6]。

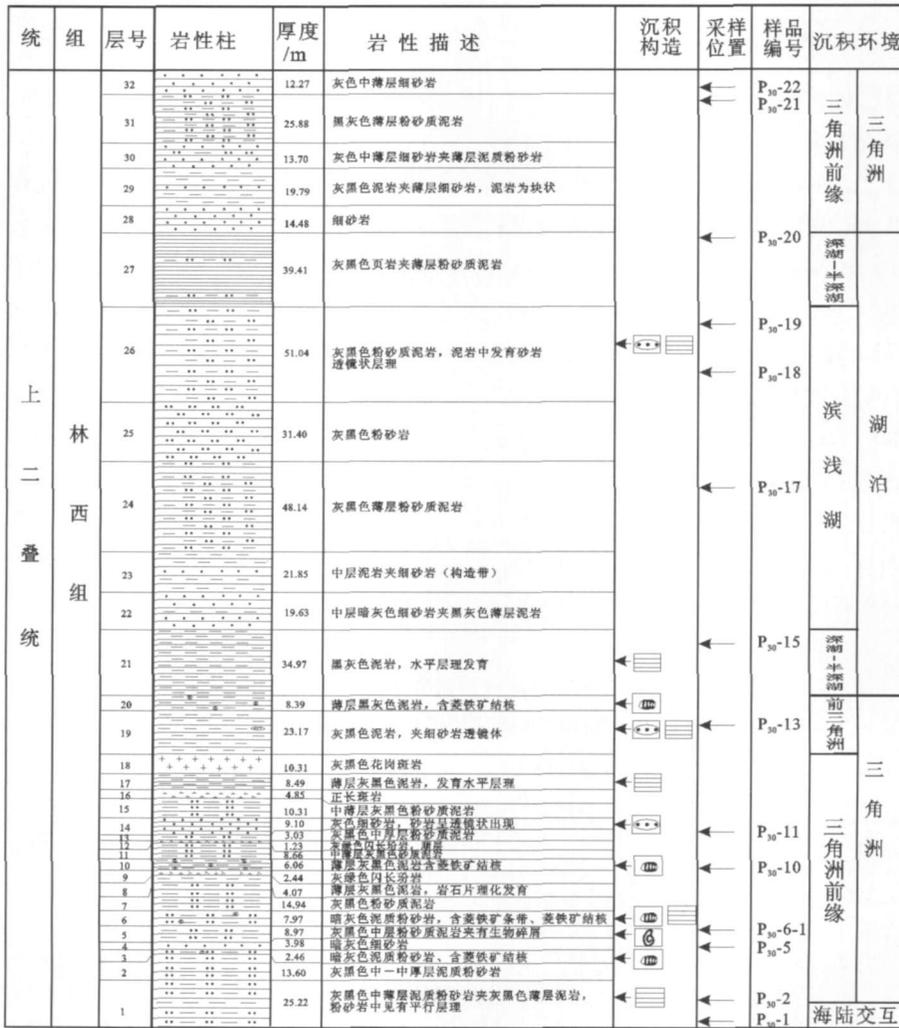


图 2 内蒙古索伦地区上二叠统林西组岩性柱状图

Fig. 2 Column of Upper Permian Linxi Group in Inner Mongolia Solonker larea

表 1 索伦地区上二叠统林西组常量元素分析数据 (%)

Table 1 Constant element analysis chart (%) of Upper Permian Linxi Group in Solonker area

样	岩	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	TiO ₂ / %	Fe ₂ O ₃ / %	P ₂ O ₅ / %	MnO/ %	CaO/ %	MgO/ %	K ₂ O/ %	Na ₂ O/ %	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	K ₂ O/ Na ₂ O	K ₂ O/ Al ₂ O ₃	ICV	CIA
P ₃₀ -1	粉砂岩	54.58	6.46	0.24	20.23	3.50	0.21	5.14	2.95	0.12	0.08	8.45	1.50	0.02	4.45	54.75
P ₃₀ -2	泥岩	65.48	18.47	0.48	3.87	0.30	0.05	0.24	1.12	3.55	1.95	3.55	1.82	0.19	0.61	76.29
P ₃₀ -5	细砂岩	69.90	13.88	0.44	4.95	0.20	0.08	1.27	1.36	1.27	3.66	5.04	0.35	0.09	0.93	69.12
P ₃₀ -6-1	泥岩	64.60	17.42	0.60	6.06	0.30	0.04	0.54	1.57	2.87	2.51	3.71	1.14	0.16	0.81	74.64
P ₃₀ -10	泥岩	71.84	13.68	0.36	4.62	0.35	0.06	0.26	0.67	2.03	2.33	5.25	0.87	0.15	0.75	74.75
P ₃₀ -11	细砂岩	71.10	15.62	0.40	3.02	0.35	0.07	0.41	0.81	1.60	3.27	4.55	0.49	0.10	0.61	74.74
P ₃₀ -13	泥岩	64.66	16.87	0.70	5.49	0.40	0.04	0.28	1.34	3.38	2.33	3.83	1.45	0.20	0.80	73.80
P ₃₀ -15	泥岩	64.44	17.65	0.70	4.94	0.40	0.06	0.40	1.07	2.94	1.91	3.65	1.54	0.17	0.68	77.07
P ₃₀ -17	泥岩	65.76	16.42	0.64	5.15	0.40	0.04	0.30	1.27	2.96	2.20	4.00	1.35	0.18	0.76	75.05
P ₃₀ -18	泥岩	65.84	16.21	0.60	5.56	0.42	0.05	0.31	1.32	2.92	2.27	4.06	1.29	0.18	0.80	74.67
P ₃₀ -19	泥岩	65.60	16.41	0.60	4.82	0.38	0.10	0.95	0.93	2.67	2.20	4.00	1.21	0.16	0.74	73.82
P ₃₀ -20	页岩	64.78	17.74	0.50	5.01	0.30	0.06	0.23	1.44	3.26	1.71	3.65	1.91	0.18	0.68	77.33
P ₃₀ -21	泥岩	64.95	17.19	0.60	5.66	0.38	0.06	0.28	1.34	3.20	2.14	3.78	1.50	0.19	0.77	75.36
P ₃₀ -22	细砂岩	69.68	16.07	0.44	3.05	0.40	0.07	0.45	0.59	2.18	3.63	4.34	0.60	0.14	0.64	71.97

注: 测试单位为吉林大学测试科学实验中心

4 微量及稀土元素分析

索伦地区林西组的微量及稀土元素除样品 P₃₀₋₁ 外,其余样品的元素特征相近(表 2 3)。样品 P₃₀₋₁ 的微量元素具有高 Li Zn Sr 低 R Ba 的特点,其他样品具有高 V Zr Ba 低 Cd 的特点。样品 P₃₀₋₁ 的 Li Zn Sr 分别为 102.20 × 10⁻⁶、140.70 × 10⁻⁶和 301.90 × 10⁻⁶,其他样品这些元素的最大值仅为 44.00 × 10⁻⁶、79.70 × 10⁻⁶、217.20 × 10⁻⁶;样品 P₃₀₋₁ 的 Ba 含量仅为 49.63 × 10⁻⁶,其他样品的 Ba 含量均在 300.00 × 10⁻⁶ 以上,最高达 833.80 × 10⁻⁶。样品 P₃₀₋₁ 的稀土元素较其他样品,除个别元素外整体较高。

稀土元素中的 La_n/Y_b_n 比值,可作为轻重稀土元素分馏程度的判别标志^[8],索伦地区林西组的 La_n/Y_b_n 为 4.019~7.358 平均值为 6.379 表明轻重稀土

元素的分馏程度较高。轻稀土元素的 La_n/Sm_n 为 2.849~3.700 重稀土元素的 Gd_n/Y_b_n 为 1.230~1.724 表明轻稀土元素的分馏程度高,重稀土元素的分馏程度低;样品 P₃₀₋₁ 的 La_n/Sm_n 为 0.727, Gd_n/Y_b_n 为 4.483 其轻重稀土元素的分馏程度与其它样品相反,其轻稀土元素的分馏程度低,重稀土元素的分馏程度高,稀土元素的这些特征表明物源区的原始物质是长英质的。从样品的稀土元素配分模式图和平均大陆上地壳(UCC)标准化图解(图 3)中可以看出,样品 P₃₀₋₁ 与其它样品存在明显的差异性。在图 3A 中呈现轻稀土元素富集,重稀土元素亏损和明显的 Eu 异常,整体均呈“V”字型,而 P₃₀₋₁ 样品呈倒“V”字形;在图 3B 中轻重稀土分配大致相同,曲线平缓,重稀土较轻稀土相对富集, P₃₀₋₁ 样品同样呈倒“V”字形。

表 2 索伦地区上二叠统林西组微量元素分析数据 (× 10⁻⁶)

Table 2 Trace element analysis chart (× 10⁻⁶) of Upper Permian Linxi Group in Sobnker area

样号	P ₃₀₋₁	P ₃₀₋₂	P ₃₀₋₅	P ₃₀₋₆₋₁	P ₃₀₋₁₀	P ₃₀₋₁₁	P ₃₀₋₁₃	P ₃₀₋₁₅	P ₃₀₋₁₇	P ₃₀₋₁₈	P ₃₀₋₁₉	P ₃₀₋₂₀	P ₃₀₋₂₁	P ₃₀₋₂₂	平均值
岩性	粉砂岩	泥岩	细砂岩	泥岩	泥岩	细砂岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	页岩	泥岩	细砂岩	
Li	102.20	23.78	41.37	44.00	27.15	23.84	32.50	22.99	25.64	28.46	18.41	30.11	30.54	15.30	33.31
B	7.43	58.62	24.46	47.71	30.61	32.84	44.45	55.08	50.17	51.64	46.58	58.35	55.23	34.21	42.67
Sc	6.12	16.08	8.33	17.54	7.27	8.68	14.01	13.09	13.47	13.00	10.03	14.11	15.33	8.13	11.80
V	44.60	116.50	70.72	139.00	48.43	60.98	94.79	91.42	90.56	88.05	68.08	92.88	114.50	55.92	84.03
Cr	18.92	57.60	96.75	100.70	30.62	48.02	51.03	55.22	49.41	50.11	45.29	45.44	53.42	28.70	52.23
Co	9.56	9.00	10.04	16.05	9.46	9.36	8.08	10.75	8.53	11.14	9.05	7.92	10.33	8.30	9.83
Ni	21.89	31.65	36.64	60.99	14.13	18.97	23.82	27.96	23.33	26.00	20.50	23.25	27.24	14.41	26.48
Cu	28.05	32.50	19.49	38.69	16.04	12.95	20.53	25.86	24.15	26.52	17.45	27.19	28.37	9.10	23.35
Zn	140.70	70.91	52.79	72.66	35.82	62.54	57.31	79.70	64.33	76.26	60.53	78.73	79.15	59.69	70.79
Ga	15.64	25.37	13.52	21.62	15.16	18.07	21.82	20.30	19.14	20.11	16.57	22.46	23.13	16.99	19.28
As	6.26	17.21	8.47	5.36	49.31	9.46	5.25	11.64	3.43	7.11	5.31	5.06	6.01	11.36	10.80
Rb	6.57	142.10	45.99	103.80	84.91	71.84	133.50	119.60	105.80	110.60	95.76	133.60	136.40	72.23	97.34
Sr	301.90	75.83	217.20	93.17	99.30	162.70	84.89	83.86	76.73	85.63	83.70	64.68	84.54	114.40	116.32
Y	44.34	37.93	16.89	25.83	17.65	23.24	33.01	33.34	32.61	32.05	27.99	39.28	33.97	22.14	30.02
Zr	82.72	265.70	167.20	223.60	177.20	280.20	244.80	262.90	227.00	234.30	225.90	233.40	253.50	199.40	219.84
Nb	5.12	14.86	8.55	14.15	11.34	14.12	15.29	15.09	13.62	14.55	13.00	15.74	15.29	11.10	12.99
Mo	1.41	0.51	0.92	0.79	4.19	2.06	1.34	1.25	1.38	0.97	1.57	0.78	0.75	1.08	1.36
Cd	0.05	0.09	0.07	0.05	0.10	0.05	0.08	0.13	0.05	0.10	0.15	0.06	0.04	0.07	0.08
Ba	49.63	833.80	286.00	663.80	433.90	383.90	574.40	495.30	419.30	485.00	435.00	581.20	673.70	474.40	484.95
Hf	2.30	7.67	4.52	6.04	5.06	7.56	6.91	7.32	6.43	6.66	6.27	6.89	7.12	5.55	6.16
Ta	0.32	0.96	0.53	1.06	0.82	1.06	1.03	0.95	0.89	0.99	0.82	0.98	0.97	0.71	0.86
Pb	28.54	25.15	8.44	14.71	34.31	21.04	28.06	22.29	16.16	20.86	16.82	23.97	19.44	14.56	21.03
Th	4.74	15.38	5.26	9.55	8.82	11.15	12.78	12.74	11.62	12.40	10.57	14.12	13.50	9.14	10.84
U	2.07	3.76	2.33	2.08	2.94	3.18	3.58	3.24	3.06	3.11	2.87	3.33	3.32	2.62	2.96
相当硼	447.53	119.3	139.15	120.11	108.94	148.29	95.015	135.36	122.46	127.77	126.05	129.32	124.7	113.38	146.96
Sr/Ba	6.08	0.09	0.76	0.14	0.23	0.42	0.15	0.17	0.18	0.18	0.19	0.11	0.13	0.24	0.65
B/Ga	0.48	2.31	1.81	2.21	2.02	1.82	2.04	2.71	2.62	2.57	2.81	2.60	2.39	2.01	2.17
V/(V+Ni)	0.67	0.79	0.66	0.70	0.77	0.76	0.80	0.77	0.80	0.77	0.77	0.80	0.81	0.80	0.76

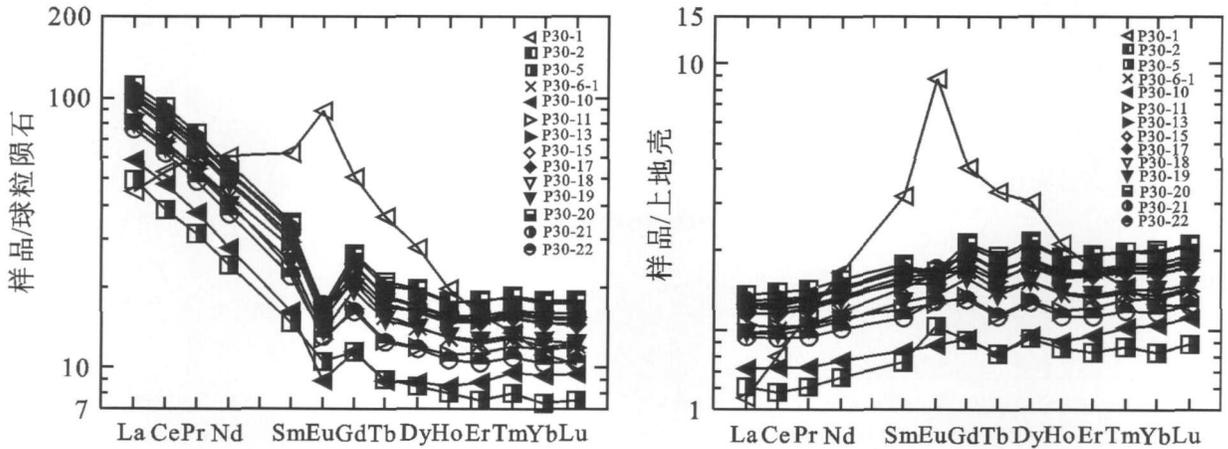
注:测试单位为吉林大学测试科学实验中心

表 3 索伦地区上二叠统林西组稀土元素分析数据 ($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth element analysis ($\times 10^{-6}$) of Upper Permian Linxi Group in Solonker area

样号	P ₃₀ -1	P ₃₀ -2	P ₃₀ -5	P ₃₀ -6-1	P ₃₀ -10	P ₃₀ -11	P ₃₀ -13	P ₃₀ -15	P ₃₀ -17	P ₃₀ -18	P ₃₀ -19	P ₃₀ -20	P ₃₀ -21	P ₃₀ -22
岩性	粉砂岩	泥岩	细砂岩	泥岩	泥岩	细砂岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	页岩	泥岩	细砂岩
La	16.63	40.87	18.27	29.30	21.51	31.76	36.68	37.31	34.67	34.96	29.49	37.29	38.94	28.19
Ce	51.21	89.07	36.96	64.53	46.05	65.70	77.47	79.38	74.29	74.67	62.28	81.87	84.09	59.92
Pr	8.34	10.13	4.31	7.50	5.16	7.52	8.92	9.29	8.62	8.58	7.22	9.33	9.58	6.73
Nd	43.18	40.34	17.16	30.51	19.89	29.12	34.92	37.24	34.74	34.21	28.54	37.57	38.02	26.36
Sm	14.38	7.99	3.40	6.47	3.76	5.40	6.75	7.49	7.18	6.91	5.75	7.85	7.56	5.05
Eu	7.74	1.34	0.92	1.44	0.78	1.12	1.32	1.46	1.43	1.41	1.19	1.47	1.51	1.14
Gd	15.50	7.94	3.50	6.41	3.52	5.10	6.57	7.37	7.47	6.91	5.99	8.12	7.40	4.98
Tb	2.11	1.18	0.52	0.91	0.52	0.73	0.98	1.07	1.08	1.01	0.87	1.22	1.07	0.72
Dy	10.65	7.37	3.26	5.40	3.34	4.54	6.19	6.43	6.48	6.11	5.40	7.53	6.51	4.50
Ho	1.68	1.50	0.68	1.10	0.72	0.95	1.29	1.32	1.30	1.26	1.11	1.51	1.34	0.91
Er	3.95	4.43	1.89	3.07	2.19	2.81	3.78	3.79	3.72	3.70	3.14	4.42	3.92	2.61
Tm	0.48	0.65	0.29	0.46	0.34	0.43	0.58	0.56	0.55	0.54	0.47	0.66	0.59	0.39
Yb	2.79	4.33	1.82	3.00	2.31	2.91	3.83	3.78	3.65	3.65	3.13	4.43	3.98	2.59
Lu	0.39	0.66	0.29	0.46	0.36	0.45	0.59	0.58	0.55	0.55	0.47	0.68	0.61	0.40
La _n /Yb _n	4.019	6.364	6.768	6.585	6.278	7.358	6.457	6.655	6.404	6.457	6.352	5.675	6.596	7.338
La _n /Sm _n	0.727	3.218	3.38	2.849	3.599	3.7	3.418	3.133	3.037	3.182	3.226	2.988	3.24	3.511
Gd _n /Yb _n	4.483	1.48	1.552	1.724	1.23	1.414	1.384	1.573	1.651	1.528	1.544	1.479	1.5	1.552

注: 测试单位为吉林大学测试科学实验中心



(A) 一稀土元素配分模式图

(B) 一平均大陆上地壳(UCC)标准化图解

图 3 索伦地区林西组样品稀土元素配分模式图及平均大陆上地壳(UCC)标准化图解

Fig. 3 Chondrite-normalized REE diagrams and UCC-normalized REE diagrams of Linxi Group in Solonker area

5 沉积环境分析

微量元素中的硼 (B) 含量^[9-11, 18, 19]、相当硼含量^[9]、锶 (Sr) 含量^[12]、锶钡比 (Sr/Ba)^[13-16]、硼铍比 (B/Ga)^[17-19] 等指标是古盐度的良好判别指标, 可作为判别沉积环境的依据; 铷钾比 (Rb/K)^[20] 可作为判断水体开阔、闭塞的标志; 钒与钒、镍之和的比值 (V/(V+N))^[21] 和 Ce/Ce*^[22] 比值可作为判断氧化—还原环境的标准。研究中根据不同判别方法的判断标准, 结合常量元素和微量稀土元素的分析数据 (表

4), 对索伦地区林西组样品所处的沉积环境进行判断。

硼元素对沉积环境及各种地质作用具有明显的指示意义, 常用来指示古盐度, 一般在海相环境下, 硼含量为 $80 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$, 淡水环境中硼含量 $< 60 \times 10^{-6}$ 。研究区硼含量最高值为 58.62×10^{-6} , 最小值为 7.43×10^{-6} , 平均值为 42.67×10^{-6} , 说明林西组地层形成于淡水环境。

相当硼含量为相当于 K₂O 含量为 5% 时的硼含量, 用其判别古盐度, 当相当硼含量 $< 200 \times 10^{-6}$ 时,

属于低盐度环境; 当相当硼含量为 $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 时, 属于半咸水; 当相当硼含量为 $> 300 \times 10^{-6}$ 时, 属于海水环境。林西组的相当硼含量为 $95.02 \times 10^{-6} \sim 447.53 \times 10^{-6}$, 平均为 146.96×10^{-6} , 整体在 200×10^{-6} 以下(表 2), 仅样品 P₃₀₋₁ 在 200×10^{-6} 以上, 为 447.53×10^{-6} , 说明林西组属于低盐度环境, 仅样品 P₃₀₋₁ 属于海水环境。

表 4 索伦地区上二叠统林西组沉积环境判别数据表
Table 4 Datasheet for distinguishing sedimentary environment of Upper Permian Linxi Group in Sobnker area

判别方法	判别标准 ^[9-22]		测试数据	判别结果
	范围	沉积环境		
B/10 ⁻⁶	80~125	海相	7.43-58.62	淡水环境
	<60	淡水环境	42.67(14)	
	>400	超盐度		
相当 B/10 ⁻⁶	300~400	正常海水	95.02-447.53	低盐度
	200~300	半咸水	146.96(14)	
	<200	低盐度		
Sr/10 ⁻⁶	800~1000	咸水环境	64.68-301.90	淡水环境
	100~300	淡水环境	116.32(14)	
Sr/BA	>1	海相	0.09-6.08	陆相
	<1	陆相	0.65(14)	
B/Ga	>4.5	海相		陆相
	3.3~4.5	过渡环境	0.48-2.81	
Rb/K	>2	闭塞环境	0.0033-0.0055	开阔环境
	<2	开阔环境	0.004(14)	
V/(V+N _i)	>0.46	还原环境	0.66-0.81	还原环境
	<0.46	氧化环境	0.76(14)	
Ce/Ce*	>1	还原环境	1.002-1.056	还原环境
	<0.95	氧化环境	1.038(14)	

注: (7.43-58.62)/42.67(14) = (最小值-最大值)/平均值(样品数)

锶含量也可以定性地判别沉积介质的古盐度, 锶元素在咸水中含量为 $800 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$, 在淡水中的含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 。林西组的锶含量为 $64.68 \times 10^{-6} \sim 301.90 \times 10^{-6}$, 平均值为 116.32×10^{-6} , 整体在 300×10^{-6} 以下(表 2), 仅样品 P₃₀₋₁ 在 300×10^{-6} 以上, 为 301.90×10^{-6} , 说明林西组属于淡水环境, 样品 P₃₀₋₁ 属于半咸水偏淡水环境。

锶钡比和硼镓比同样是古盐度的良好判别指标, 用其可以判断海陆相环境。当 Sr/Ba > 1 时, 为海相环境; 当 Sr/Ba < 1 时, 为陆相环境。当 B/Ga > 4.5 时, 属于海相环境; 当 B/Ga 为 3.3~4.5 时, 属于过渡环境; B/Ga < 3.3 时, 属于陆相环境。林西组的 Sr/Ba 为 0.09~6.08 平均为 0.65, 整体 < 1, 仅样品

P₃₀₋₁ 的 Sr/Ba > 1, 为 6.08 因此, 林西组整体属于陆相环境, 样品 P₃₀₋₁ 属于海相环境。林西组的 B/Ga 为 0.48~2.81, 平均为 2.17, 整体 < 3.3 说明林西组属于陆相环境。

铷钾比可判断水体的开阔程度, 当 Rb/K > 2 时, 属于闭塞环境; 当 Rb/K < 2 时, 属于开阔环境。林西组的 Rb/K 比值均小于 2 说明林西组属于开阔环境。

V/(V+N_i) 可判断沉积环境的含氧量, 当 V/(V+N_i) > 0.46 时, 属于还原环境; 当 V/(V+N_i) < 0.46 时, 属于氧化环境。林西组的 V/(V+N_i) 为 0.66~0.81, 平均为 0.76 属于还原环境。

Ce/Ce* 比值 (Ce/Ce* = Ce_n / (La_n × Pr_n)^{1/2}) 能灵敏地反映沉积环境的氧化还原条件, 当 Ce/Ce* > 1 为正异常, 表示还原环境; 当 Ce/Ce* < 0.95 时表示氧化环境^[22]。林西组样品的 Ce/Ce* 值全部大于 1, 正异常明显, 与微量元素方法判断一致, 说明该区当时处于还原条件。

综上所述, 林西组以灰黑色的泥质岩系为主, 整体为陆相沉积, 进而划分为三角洲和湖泊沉积组合。但值得注意的是, P₃₀₋₁ 样品的古盐度偏高, 沉积环境判别为海相, 由于 P₃₀₋₁ 样品位于林西组的最底部, 说明林西组初期有海水进入, 该样品的磷、锰、钙、镁含量偏高即是海水进入的直接证据。因此, 林西组整体为开阔的陆相沉积体系, 在其沉积初期为海陆交互环境。

同时根据沉积构造和岩性组合, 将林西组的湖泊沉积体系进一步划分为滨浅湖亚相、半深湖—深湖亚相, 三角洲沉积体系划分为三角洲前缘和前三角洲亚相(图 2)。其中三角洲前缘亚相主要以灰色细砂岩和薄层灰黑色泥质粉砂岩岩系为主, 位于 2~18、28~32 层, 发育水平层理、菱铁矿结核, 在剖面第 2 层沉积中见有页岩—泥岩—泥质粉砂岩—粉砂岩的反韵律现象。前三角洲亚相以灰黑色泥岩和薄层灰黑色泥岩为主, 位于 19、20 层, 夹有细砂岩透镜体, 发育水平层理。滨浅湖亚相主要以暗灰色中层细砂岩、灰黑色粉砂质泥岩和泥岩为主, 位于 22~26 层, 发育砂岩透镜状层理。半深湖—深湖亚相以黑灰色泥岩、页岩为主夹灰黑色薄层粉砂质泥岩, 处于还原环境, 厚度相对较大, 位于 21、27 层, 水平层理发育。

在三角洲沉积体系中, 三角洲前缘和前三角洲的轻重稀土分馏程度存在明显差别, 重稀土元素的 Gd_n/Yb_n (分馏程度) 值越小, 重稀土越富集, 前三角洲地区重稀土元素的分馏程度最高^[22]; 从三角洲前

缘亚相至前三角洲亚相, 微量元素 Sr/Ba 比值逐渐增大; 微量元素 Mn/Fe 比值越小, 显示水体越浅^[23]。研究区前三角样品洲的 Gd_n / Yb_n 值最小, 仅为 1.384。从三角洲前缘亚相至前三角洲亚相 Sr/Ba 比值整体增大; 前三角洲的 Mn/Fe 比值 0.023 均大于三角洲前缘的 Mn/Fe 比值。

在湖相沉积体系中, 常量元素 Mn 和微量元素 B 的含量随水深增加而增高^[24], 研究区由滨浅湖亚相至半深湖亚相, 对应的 Mn 含量为 0.04~0.10, B 含量为 46.58~58.35。另外, 轻稀土元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm) 同样随水深增加而增高, 由滨浅湖亚相至半深湖亚相逐渐增高。

6 结论

(1) 林西组的岩性为灰黑色泥岩、粉砂质泥岩、页岩, 灰色泥质粉砂岩、细砂岩。该组砂泥岩样品整体具有高 SO_2 、 Al_2O_3 、V、Zr、Ba 低 P_2O_5 、Mn、CaO、Cd 的特点。

(2) 林西组以灰黑色的泥质岩系为主, 整体为开阔的淡水湖泊和三角洲沉积体系, 在其沉积初期为海陆交互环境。

(3) 根据沉积构造、岩性组合及样品的地化特征, 将林西组的湖泊沉积体系进一步划分为滨浅湖、半深湖—深湖亚相, 三角洲沉积体系划分为三角洲前缘和前三角洲亚相。

参考文献 (References)

- 1 黄本宏. 东北北部石炭—二叠纪陆相地层及古地理概况 [J]. 地质论评, 1982, 28(5): 395-401 [Huang Benhong. Permian-Carboniferous terrestrial deposits and paleogeographic features in the northern part of northeast China [J]. Geographical Review, 1982, 28(5): 395-401]
- 2 余和中. 松辽盆地及周边石炭纪—二叠纪岩相古地理 [J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(4): 70-83 [Yu Hezhong. Sedimentary facies and paleogeography of the Songliao Basin and its peripheral areas during Carboniferous-Permian time [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21(4): 70-83]
- 3 朱如凯, 许怀先, 邓胜徽, 等. 中国北方地区石炭纪岩相古地理 [J]. 古地理学报, 2007, 9(1): 13-24 [Zhu Rukai, Xu Huaixian, Deng Shenghui, et al. Lithofacies paleogeography of the Carboniferous in northern China [J]. Journal of Paleogeography, 2007, 9(1): 13-24]
- 4 朱如凯, 许怀先, 邓胜徽, 等. 中国北方地区二叠纪岩相古地理 [J]. 古地理学报, 2007, 9(2): 133-142 [Zhu Rukai, Xu Huaixian, Deng Shenghui, et al. Lithofacies paleogeography of the Permian in northern China [J]. Journal of Paleogeography, 2007, 9(2): 133-142]
- 5 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京:

- 地质出版社, 1991: 210-215 [Geology and Minerals Department in Inner Mongolia Autonomous Regions. Regional Geology in Inner Mongolia Autonomous Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 210-215]
- 6 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]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 2919-2940
- 7 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299: 715-717
- 8 阚泽忠, 梁斌, 王全伟, 等. 广元恐龙化石埋藏地沙溪庙组地球化学特征及对物源区和古风化作用的指示 [J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1023-1029 [Kan Zhezong, Liang Bin, Wang Quanwei, et al. Geochemistry of the Shaximiao Formation in a dinosaur fossil site Guangyuan, Sichuan, and its implications for the source area and paleoweathering [J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1023-1029]
- 9 Walker C T. Evaluation of boron as a palaeosalinity indicator and its application to offshore prospects [J]. AAPG Bulletin, 1968, 55: 571-778
- 10 Harder H. Boron content of sediment as a tool in facies analysis [J]. Sedimentary Geology, 1970, 4(2): 153-175
- 11 Couch E L. Calculation of palaeosalinities from boron and clay mineral data [J]. AAPG Bulletin, 1971, 55: 1829-1837
- 12 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25 [Zheng Rongcai, Liu Meiqing. Study on Paleosalinity of Chang 6 Oil Reservoir set in Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25]
- 13 史忠生, 陈开远, 史军, 等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析 [J]. 断块油气田, 2003, 10(2): 12-16 [Shi Zhongsheng, Chen Kaiyuan, Shi Jun, et al. Feasibility analysis of the application of the ratio of strontium to barium on the identifying sedimentary environment [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(2): 12-16]
- 14 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 Zhencheng, Yang Fan, Zhang Zhihuan, et al. The Sedimentary Environment and Oil and Gas Production of Salt Lake in Cenozoic, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 133-137]
- 15 同济大学地质系. 海陆相地层辨认标志 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 171-175 [Geology Department of Tongji University. The Distinguishing Symbol of Marine and Terrestrial Facies [M]. Beijing: Science Press, 1980: 171-175]
- 16 经雅丽, 张克信, 林启祥, 等. 浙江长兴煤山下三叠统和龙山组、南陵湖组沉积地球化学特征与古环境意义 [J]. 地质科技情报, 2005, 24(1): 35-40 [Jing Yali, Zhang Kexin, Lin Qixiang, et al. Sedimentary geochemistry characteristics and paleoenvironmental meaning of Hebningshan Formation and Nanlinghu Formation in Meishan Changxing County, Zhejiang Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(1): 35-40]
- 17 Degens E T, Williams E G, Keith M L. Environmental studies of Carboniferous sediments (Part 1): Geochemical criteria for differentiating

- marine and fresh-water shales[J]. AAPG Bulletin, 1957, 41: 2427-2455
- 18 吴少波. 博格达山前凹陷上二叠统乌拉泊组沉积相及沉积模式[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 333-339 [Wu Shaobo. Sedimentary facies and depositional model of Wulabo Formation, Upper Permian Series in Bogeda Piedmont Depression, Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 333-339]
- 19 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 202-210 [Ye Liming, Qi Tianjun, Peng Haiyan. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in Eastern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 202-210]
- 20 席胜利, 郑聪斌, 李振宏. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 2004, 6(2): 196-206 [Xi Shengli, Zheng Congbin, Li Zhenhong. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the western margin of Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 196-206]
- 21 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(2): 55-58 [Wang Zhengming. Geochemical indicators for diagnosing anoxic sedimentary environment [J]. Acta Geologica Geoscientifica, 2003, 12(2): 55-58]
- 22 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 Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. REE Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989, 1-93]
- 23 王化爱, 张建忠, 张宇, 等. 陆相断陷盆地三角洲地层划分与对比——以济阳拗陷东营三角洲为例[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(3): 1-3 [Wang Huaai, Zhang Jianzhong, Zhang Yu, et al. Stratigraphic classification and correlation on delta in terrestrial rift basins: taking Dongying delta in Jiyang Depression as example [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2004, 11(3): 1-3]
- 24 伊海生, 林金辉, 赵西西, 等. 西藏高原沱沱河盆地渐新世—中新世湖相碳酸盐岩稀土元素地球化学特征与正锕异常成因初探[J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 1-10 [Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhao Xixi, et al. Geochemistry of rare earth elements and origin of positive europium anomaly in Miocene-Oligocene lacustrine carbonates from Tuotuohe Basin of Tibetan Plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 1-10]

Sedimentary Environment on Upper Permian Linxi Group in Inner Mongolia

LIFu-lai QU Xiyu LIU Li YANG Deming WANG De-hai ZHAO Guo-xiang
(College of Geosciences, Jilin University, Changchun 130061)

Abstract In this paper, on the basis of previous studies using geochemical method, the research was done on the Upper Permian sedimentary environment Linxi Group in northeast Inner Mongolia. The lithology in Linxi Group was black mudstone, silty mudstone, shale, gray muddy siltstone, and fine-grained sandstone. By analyzing the constant element, trace element and rare earth elements, it was found that the entire sand-mudstone sample had high SiO_2 , Al_2O_3 , V, Zr, Ba and low P_2O_5 , Mn, CaO, Cd character. Through analyzing the discriminant index of the sedimentary environment, open fresh water was identified in Linxi Formation, mainly is the corresponding terrestrial facies and belongs to marine-continental alternating environment during the initial stage of deposition. Based on the sedimentary structure and lithologic association, Linxi Formation can be divided into lacustrine and delta facies, and the lacustrine can be subdivided into coastal-shallow lacustrine and semi-deep and deep lakes, the delta facies includes delta front and prodelta.

Key words Upper Permian, Linxi Group, continental facies, sedimentary environment