

doi:10.3799/dqkx.2011.015

鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征

邱欣卫¹, 刘池洋¹, 毛光周^{1,2}, 吴柏林¹

1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学含油气盆地研究所, 陕西西安 710069

2. 山东科技大学地质科学与工程学院, 山东青岛 266510

摘要: 鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物分布广泛, 为研究其岩石地球化学特征和形成机制, 通过详细的岩心观察、薄片鉴定、X 荧光光谱分析(XRF)、ICP-MS 分析、扫描电镜(SEM)分析等手段, 对延长组火山灰层进行了细致的岩石地球化学分析。结果表明火山灰沉积物富含晶屑、玻屑等火山物质, 整体蚀变强烈, 可分为凝灰岩和斑脱岩, 以伊利石、伊蒙混层等粘土矿物为主; 主量元素 SiO₂ 含量为 50.29%~79.82%, 富钾, K₂O+Na₂O 在 3.20%~7.88% 之间, SiO₂ 与 Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO 之间存在着明显的负相关关系; Σ REE 在 $(99.82\sim 550.15)\times 10^{-6}$ 之间变化, 总体特征表现为轻稀土富集, 重稀土亏损, 曲线形态整体表现为右倾型, Eu 负异常, δ Eu 为 0.147~0.837, 没有明显的 Ce 异常; 大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Th 呈正异常, 在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解中, 数据点主要落在安山岩—流纹岩之间, 说明火山物质主体来源于中酸性岩。综合岩石地球化学和沉积学分析, 认为延长组火山灰沉积物包括空降型和水携两种形成机制, 大地构造环境判识图解反映了火山灰源于火山弧钙碱性岩浆原区, 与晚三叠世秦岭造山带的演化关系密切。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 延长组; 火山灰沉积物; 凝灰岩; 斑脱岩; 地球化学。

中图分类号: P584

文章编号: 1000-2383(2011)01-0139-12

收稿日期: 2010-05-29

Petrological-Geochemical Characteristics of Volcanic Ash Sediments in Yanchang Formation in Ordos Basin

QIU Xin-wei¹, LIU Chi-yang¹, MAO Guang-zhou^{1,2}, WU Bo-lin¹

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics (Northwest University), Institute of Petroliiferous Basin of Northwest University, Xi'an 710069, China

2. College of Geological Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

Abstract: Volcanic ash sediment is widely distributed in Yanchang Formation in Ordos basin, in order to study lithogeochemistry characteristics and formational mechanism of volcanic ashes sediment, the paper use many analysis methods, such as observe the cores, microscope, XRF, ICP-MS, SEM et al. The results indicate volcanic ash sediment containing much crystal and shard fragments, including tuff and bentonite, the illite and andreattite can be seen under the SEM; SiO₂ content between 50.29%—79.82%, rich potassium, K₂O+Na₂O at 3.20%—7.88%, the negative correlation present in relationship of SiO₂ with Al₂O₃, TFe₂O₃ and MgO; Σ REE=99.82 $\times 10^{-6}$ ~550.15 $\times 10^{-6}$, and rich in LREE, deplete in HREE, the curve rightward incline, Eu negative abnormality and the δ Eu between 0.147—0.837, there is no evidently Ce abnormality, and K, Rb, Ba, Th are of positive abnormality. In the illustration of Nb/Y-Zr/TiO₂, the data dots are mainly located at the zone of andesite-rhyolite, which suggest that the volcanic ash is primary from middle-acid rocks. Lithogeochemistry and sedimentology illustrate the formational mechanisms of volcanic ash include: falling down from air and carried by water. Through the diagram of tectonic setting, the volcanic ash is primary from volcanic arc and calc-alkalic lavas, which is intimately related the evolution of Qinling orogenic belt.

Key words: Ordos basin; Yanchang Formation; volcanic ash sediments; tuff; bentonite; geochemistry.

基金项目: 国家自然科学基金(重大研究计划)重点项目(No. 90814005); 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项项目(No. 2008ZDKG-48); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2003CB214600); 西北大学研究生自主创新资助项目(No. 09YZZ41).

作者简介: 邱欣卫(1982—), 男, 博士, 主要从事盆地动力学与富烃凹陷形成机制方面研究。E-mail: qxweilt@126.com

0 引言

火山灰沉积物的成因机制决定了其空间分布的等时性和广泛性,具有重要的地层对比意义(钟蓉等,1995,1996; Haaland *et al.*, 2000; Desmares *et al.*, 2007). 火山喷发代表了一次关键的地质事件,其产物是事件沉积学的重要研究对象(程日辉等,1997; Gerhard, 2000; 王璞珺和刘万洙,2001). 随着各种同位素定年技术的飞跃发展,火山灰层的精确年龄成为确定这类关键地质事件发生时间的重要依据(Dong *et al.*, 1997; Foreman *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2008b),火山灰年代学这一新学科体系已基本形成(Shane, 2000; Prueher and Rea, 2001; D'Addezio *et al.*, 2006; Bescoby *et al.*, 2008). 同时,火山灰层也是探讨大地构造环境和古气候环境的重要指标,近年来引起了国内外学者的广泛关注(Marfil *et al.*, 1998; Kramer and Rea, 2001; Grevenitz *et al.*, 2003; Hints *et al.*, 2006; Huff, 2008; Aitchison *et al.*, 2008; Su *et al.*, 2008a).

鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组火山灰沉积物与优质烃源岩互层发育,最近报道指出火山物质不仅可能对优质烃源岩的形成具有重要意义(张文正等,2009),而且也对储层特征有影响(左智峰等,2008),但盆地内部并没有明显的火山活动遗迹,周缘及邻区晚三叠世也以侵入岩为主,少有喷出岩的报道. 因此对火山灰层开展深入的岩石学和地球化学研究是探讨晚三叠世盆地与造山带耦合关系的基础,同时对恢复鄂尔多斯盆地晚三叠世的原始面貌有重要意义,也为深入揭示延长组优质烃源岩形成的动力学环境提供依据. 本文通过详细的岩心观察和薄片鉴定、元素地球化学分析、扫描电镜分析等手段,对延长组火山灰层进行了细致的岩石地球化学分析,并探讨其成因机制.

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地为我国大型中生代克拉通内沉积盆地,北以乌兰格尔基岩凸起与河套盆地为界,南越渭北隆起带与渭河盆地相望,东以晋西挠褶带与吕梁隆起呼应,西经冲断构造带与六盘山、银川盆地对峙,轮廓呈矩形,面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1). 广义的鄂尔多斯盆地包括渭河、银川、河套和六盘山等小型中生代盆地,总面积达 $36 \times 10^4 \text{ km}^2$ (刘池洋等,2006).

盆地富含石油、天然气、煤及铀等多种能源矿产,是我国当前重要的能源基地(Liu *et al.*, 2007),也是研究有机-无机相互作用的天然实验室. 上三叠统延长组历来是该区油气勘探的重点层段之一,发育多套有利的生储盖组合配置. 延长组内不同层位均发育有多套且单层厚度不等的火山灰沉积薄层,因其测井特征的独特性和沉积的短时性,可以把其作为地层划分对比的优质标志层(邱欣卫等,2009).

2 样品描述及分析方法

本次研究样品为延长组岩心样品,主要分布于盆地西南部(图 1),岩心中火山灰层颜色多样、鲜艳,以深灰色、灰黄色、灰褐色、灰色为主,少量为浅绿色,夹层单层厚度从 0.3~40.0 cm 不等,累计厚度 0.3~2.5 m,整体分布盆地西南部层数多,累计厚度大,向东北方向有逐渐变薄、层数变少的趋势(邱欣卫等,2009). 火山灰层常见为凝灰质砂、泥岩或砂、泥质凝灰岩,纯火山物质层较少,所以在样品选择过程中尽可能地排除砂泥岩物质的干扰,最大程度地选择火山物质进行分析测试.

常量元素和微量元素测试在大陆动力学国家重点实验室(西北大学)完成,常量元素使用 X 荧光光谱分析仪(XRF)法测定;微量、稀土元素在 Elan6100DRC 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上进行,样品经 BHVO-1、GSR-1 和 AGV-1 国际标样监控,Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Hf、Ta 和 LREE 等元素分析相对误差小于 5%,其他元素相对误差介于 5%~15%之间. 分析结果见表 1.

3 岩石地球化学特征

3.1 岩相学特征

通过对岩心样品的显微镜下综合观察,火山灰沉积物样品明显可以分成两种类型,其一为具有典型凝灰结构、蚀变作用相对较弱的凝灰岩(Tuff). 薄片鉴定表现为以杂基支撑为主,粒度通常小于 2 mm,由玻屑、晶屑和岩屑组成. 晶屑形状从棱角状到椭圆状均有发育,分选有好有差,主要为石英、长石,少量黑云母,石英颗粒常呈粒状,长石多为长条状,长度 0.1~0.3 mm,边缘常蚀变成粘土. 岩屑直径平均在 0.2mm 左右,常为次圆状,少量棱角状

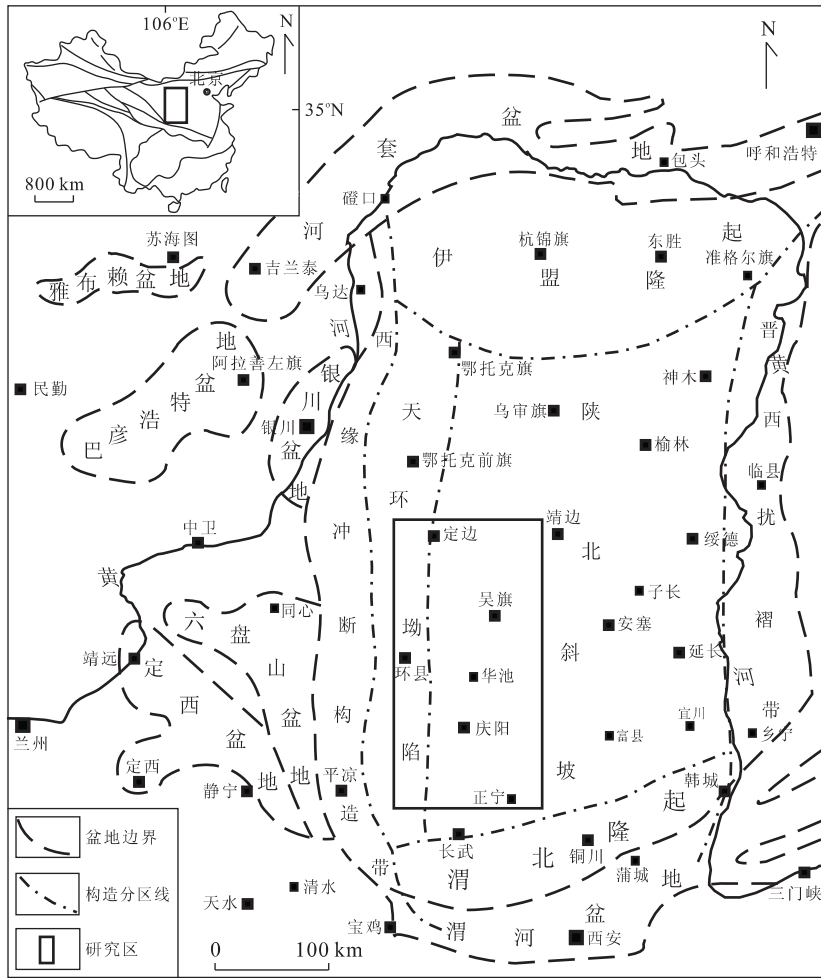


图 1 鄂尔多斯盆地及外围盆地分布(据长庆油田地质志编写组,1992 修改)

Fig. 1 Distribution of Ordos and periphery basins

(图 2a~2d).

另一类火山灰沉积物“三屑”都已发生蚀变,偶见周缘已被蚀变的斑晶,这类岩石称为斑脱岩(Bentonites),因其水解、蚀变严重,性质与凝灰岩迥异,有必要区分研究.所谓斑脱岩是指火山灰从大气中沉降于海洋、湖泊等环境中,由水解、蚀变而成的富含粘土矿物岩石经埋藏、成岩和弱变质作用主要转化为富含伊利石-蒙脱石混层矿物的蚀变岩石,又称为变斑脱岩(Meta-bentonites)(Roberts and Merriman, 1990),因通常钾含量偏高,也称钾质斑脱岩(K-bentonites)(Cullen and Huff, 1986; Huff and Kolata, 1989).盆地内延长组斑脱岩整体蚀变严重,石英、长石棱角模糊,偶见周缘被蚀变的斑晶,具有密度小、强吸附性、遇水迅速膨胀体积变大等特征,较难磨制薄片.从仅有的几个薄片可以看出,斑脱岩整体以粘土矿物为主,偶见的石英晶屑粒度小于 0.5 mm,周缘模糊,已发生蚀变(图 2e, 2f).

火山灰沉积物扫描电镜下以粘土矿物为主,有卷片状伊利石(图 2g)、巢状或蜂窝状伊蒙混层(图 2h)等,也说明火山灰层水解蚀变较强.

3.2 常量元素特征

通过井下岩心详细观察,参考火山灰层独特的测井曲线特征,选择新鲜火山灰沉积物样品 22 件进行主量元素分析测试,24 件进行微量元素分析测试(表 1).

主量元素 SiO_2 含量为 50.29%~79.82%,多数在 53.00%~66.00%之间,以中酸性为主; Al_2O_3 含量为 9.85%~29.67%,多数大于 20%,可能与延长组火山灰层都不同程度的发生蚀变有关; MgO 含量大部分为 1.00%~2.41%,仅两个样品 MgO 含量为 0.24%和 0.48%,低于正常火成岩 3.50%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为 3.20%~7.88%之间,大部分在 4.50%~6.00%之间,表现为高钾; $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为 0.004~0.0457,大多数小于火成岩的上

表 1 延长组火山灰沉积物主量(%)、微量元素(10^{-6})含量

Table 1 Major and trace elements content of volcanic ash sediments in Yanchang Formation

样号	R-02	R-03	R-04	R-05	R-10	N331	N332	N421	N422	N424	X1871	X1872
SiO ₂	54.94	72.50	57.92	50.29	60.52	59.81	56.12	61.93	54.89	58.21	54.06	55.94
TiO ₂	0.93	0.07	0.60	0.32	0.97	0.29	0.17	0.29	0.26	0.59	0.30	0.72
Al ₂ O ₃	24.65	14.90	21.14	29.67	22.14	20.97	26.24	21.79	25.58	20.44	27.59	24.11
TFe ₂ O ₃	3.10	1.73	4.23	2.59	3.46	3.48	2.69	2.46	3.02	3.56	2.46	2.93
MnO	0.03	<0.01	0.04	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	<0.01	0.03	0.01	0.03
MgO	1.70	1.37	1.98	1.69	1.06	1.77	1.46	1.61	1.49	2.05	1.87	1.79
CaO	0.70	0.22	1.28	0.33	0.63	1.02	0.76	0.55	0.66	1.64	0.43	2.48
Na ₂ O	1.93	1.26	2.80	0.82	0.64	0.72	1.15	1.65	1.29	1.38	1.06	2.15
K ₂ O	5.24	2.52	5.08	4.16	3.84	4.00	3.97	3.82	4.34	4.27	4.82	3.6
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.15	0.12	0.03	0.08	0.05	0.14	0.10	0.15	0.06	0.11
LOI	7.11	5.00	4.41	9.69	6.33	7.35	6.99	5.58	7.92	6.94	6.85	5.66
Total	100.36	99.59	99.63	99.69	99.65	99.52	99.61	99.83	99.55	99.26	99.51	99.52
Li	41.30	14.30	16.10	26.80	85.60	10.90	17.60	11.30	14.80	21.90	12.8	14.8
Be	5.69	2.10	3.74	8.08	3.42	4.65	4.43	6.79	6.04	5.29	5.59	3.80
Sc	18.00	4.67	10.20	10.50	12.60	6.97	11.60	5.81	9.36	13.80	11.50	7.82
V	125.00	2.26	56.80	46.50	166.00	19.40	24.20	46.30	35.40	176.00	52.30	46.40
Cr	93.00	1.45	27.30	11.70	97.70	4.78	13.00	6.65	9.68	32.80	26.80	14.30
Co	6.04	6.91	14.40	4.60	15.20	40.50	36.90	13.10	4.11	26.80	12.60	3.19
Ni	31.50	2.42	15.40	7.45	31.50	1.50	8.02	2.94	6.47	16.50	15.80	3.21
Cu	45.00	1.37	23.30	7.85	35.80	8.94	11.00	4.63	12.10	23.60	18.80	13.40
Zn	59.0	49.10	96.20	30.90	58.50	43.50	103.00	66.30	107.00	105.00	143.00	70.60
Ga	35.50	19.80	33.30	27.70	25.50	24.90	29.60	24.50	32.00	26.20	39.30	27.40
Ge	1.62	1.61	1.43	1.25	1.41	1.66	1.21	1.61	1.52	1.94	1.37	1.44
Rb	207.00	109.00	191.00	106.00	140.00	143.00	129.00	153.00	159.00	220.00	146.00	147.00
Sr	431.00	651.00	611.00	184.00	192.00	486.00	219.00	408.00	252.00	300.00	656.00	781.00
Y	27.10	18.80	19.10	13.20	28.90	30.40	20.10	25.10	42.50	34.70	28.10	28.10
Zr	203.00	126.00	232.00	216.00	199.00	240.00	183.00	167.00	323.00	226.00	202.00	320.00
Nb	17.10	18.30	12.20	7.49	17.80	14.50	11.80	13.80	21.80	18.90	16.30	17.20
Cs	12.40	4.62	4.83	11.10	7.31	9.64	10.10	9.30	15.00	13.70	11.30	12.40
Ba	1730.00	634.00	2118.00	744.00	458.00	963.00	1393.00	858.00	895.00	886.00	1424.00	1238.00
Hf	4.98	4.76	5.63	9.76	4.86	7.40	6.97	5.54	10.00	6.56	7.39	9.35
Ta	1.16	2.28	0.74	4.70	1.22	1.95	1.64	2.58	2.68	2.45	1.82	1.90
Pb	28.50	38.20	46.00	77.10	30.00	50.00	58.40	52.30	14.20	15.50	43.20	62.80
Th	16.10	43.80	17.00	57.90	15.80	51.70	22.40	47.40	42.10	34.70	24.80	39.30
U	2.14	8.35	3.19	5.13	3.09	10.10	6.32	9.25	13.40	13.60	7.07	8.29
La	55.20	30.90	62.60	33.70	54.50	57.60	26.60	66.50	64.70	48.50	69.60	74.60
Ce	85.40	67.60	107.00	70.80	95.90	120.00	57.40	120.00	136.00	94.00	157.00	148.00
Pr	9.45	7.59	11.40	7.86	10.20	12.50	6.52	10.90	14.90	10.10	16.90	14.80
Nd	36.30	26.30	40.00	28.00	38.80	45.00	25.50	35.90	55.80	36.80	63.90	51.50
Sm	6.56	5.53	6.24	5.00	7.03	8.17	5.77	5.49	11.10	7.04	12.00	8.94
Eu	1.49	0.29	1.59	0.84	1.46	0.66	1.02	0.88	1.53	1.24	2.20	1.01
Gd	5.81	4.47	5.10	4.04	6.44	6.43	4.72	4.38	9.25	5.87	7.81	6.55
Tb	0.76	0.68	0.61	0.53	0.85	1.03	0.74	0.63	1.46	0.93	0.95	0.94
Dy	4.37	3.98	3.27	2.84	4.84	6.03	4.07	3.72	8.45	5.64	4.77	5.35
Ho	0.93	0.76	0.65	0.58	1.00	1.23	0.77	0.82	1.69	1.21	0.92	1.07
Er	2.56	2.14	1.84	1.71	2.73	3.25	1.88	2.44	4.43	3.47	2.36	2.96
Tm	0.33	0.34	0.26	0.26	0.37	0.47	0.27	0.4	0.65	0.54	0.31	0.44
Yb	2.06	2.80	1.72	1.85	2.44	2.92	1.60	2.78	4.07	3.65	1.83	2.82
Lu	0.30	0.44	0.25	0.28	0.36	0.40	0.22	0.45	0.57	0.56	0.26	0.40
∑REE	211.52	153.82	242.53	158.29	226.92	265.69	137.08	255.29	314.60	219.55	340.81	319.38
LREE/HREE	11.36	8.85	16.70	12.09	10.92	11.21	8.61	15.34	9.29	9.04	16.74	14.56
(La/Yb) _n	18.07	7.44	24.54	12.28	15.06	13.30	11.21	16.13	10.72	8.96	25.64	17.84
δEu	0.72	0.17	0.84	0.55	0.65	0.27	0.58	0.53	0.45	0.57	0.65	0.39
δCe	0.83	1.03	0.90	1.01	0.92	1.03	1.02	0.98	1.02	0.97	1.07	1.01
(La/Sm) _n	5.29	3.51	6.31	4.24	4.88	4.43	2.90	7.62	3.67	4.33	3.65	5.25
(Gd/Lu) _n	2.48	1.30	2.61	1.85	2.29	2.06	2.75	1.25	2.08	1.34	3.85	2.10

续表 1

样号	ZH50	ZH210	MU9	B270	ZH33	ZH361	ZH362	ZH111	ZH112	LI51	R-11	R-12
SiO ₂	65.94	53.57	53.50	55.29	53.01	67.99	55.08	79.82	63.54	68.43	—	—
TiO ₂	0.08	0.44	0.48	0.17	0.78	0.85	0.83	0.09	0.12	0.08	—	—
Al ₂ O ₃	19.95	27.24	25.77	28.07	24.14	18.60	18.82	9.85	10.71	17.15	—	—
TF ₂ O ₃	1.76	2.41	3.95	1.71	3.72	1.88	7.97	0.61	1.49	2.57	—	—
MnO	0.00	0.01	0.02	<0.01	0.05	0.01	0.11	0.02	0.13	0.01	—	—
MgO	1.65	2.15	1.77	1.12	1.72	1.25	2.41	0.24	0.48	1.40	—	—
CaO	0.17	0.61	0.48	0.41	2.93	0.11	1.26	0.37	8.18	0.36	—	—
Na ₂ O	0.49	0.65	0.89	1.06	2.46	0.14	0.14	0.29	0.45	0.37	—	—
K ₂ O	4.23	5.38	3.35	3.40	3.34	3.40	3.06	4.28	3.98	3.28	—	—
P ₂ O ₅	0.02	0.11	0.19	0.07	0.16	0.06	0.19	0.03	0.08	0.02	—	—
LOI	4.90	6.74	9.12	8.62	6.98	5.28	9.64	3.95	10.24	5.85	—	—
Total	99.19	99.31	99.52	99.92	99.29	99.57	99.51	99.55	99.4	99.52	—	—
Li	12.80	11.10	27.20	6.50	35.40	58.10	54.70	54.70	22.80	21.90	75.90	21.40
Be	6.35	8.76	3.31	6.81	3.65	3.75	4.05	2.65	3.54	3.37	3.77	5.62
Sc	6.46	9.28	12.10	4.76	8.21	14.20	20.70	1.84	4.31	5.35	16.10	12.90
V	4.56	29.00	48.80	20.30	46.20	116.00	136.00	8.05	22.20	1.84	130.00	74.80
Cr	6.18	10.20	21.90	3.78	11.40	78.50	94.30	6.52	8.84	9.74	95.30	39.60
Co	5.06	0.87	14.20	4.28	4.24	28.50	18.00	64.90	2.57	23.70	37.70	11.20
Ni	3.18	3.43	10.10	3.47	5.49	33.50	47.8	2.23	5.37	4.20	37.5	15.10
Cu	3.95	10.70	30.70	7.58	16.70	18.50	38.50	3.03	8.06	2.90	35.40	24.30
Zn	70.30	53.90	166.00	102.00	86.90	29.60	66.70	28.50	28.80	51.30	107.00	88.00
Ga	23.50	35.00	27.10	39.30	28.10	25.10	26.00	10.20	12.70	21.40	26.90	46.30
Ge	1.40	1.68	1.79	1.33	1.34	1.93	1.74	1.75	1.36	1.30	1.65	1.91
Rb	162.00	169.00	129.00	113.00	135.00	195.00	155.00	256.00	245.00	107.00	157.00	233.00
Sr	401.00	707.00	149.00	229.00	709.00	71.80	92.60	50.30	494.00	344.00	330.00	482.00
Y	30.40	46.90	22.00	44.50	20.80	29.50	41.30	17.00	35.50	14.10	28.50	35.20
Zr	175.00	323.00	194.00	175.00	283.00	187.00	194.00	64.00	71.80	152.00	373.00	326.00
Nb	27.50	16.00	11.60	9.96	13.40	19.10	16.50	7.99	10.40	21.50	18.00	15.30
Cs	12.30	17.20	7.57	11.70	9.51	12.40	10.00	2.10	2.93	4.56	6.90	7.07
Ba	1 336.00	1 157.00	853.00	763.00	945.00	360.00	426.00	723.00	432.00	943.00	1 701.00	2 018.00
Hf	6.83	9.78	6.50	11.00	7.73	5.29	4.92	2.37	2.44	5.99	8.79	7.67
Ta	2.80	2.39	1.80	3.90	0.91	1.42	1.25	1.77	1.66	2.54	1.19	0.91
Pb	53.70	56.80	9.67	81.10	40.20	31.20	25.00	21.70	18.10	51.00	24.80	49.00
Th	40.40	53.70	19.30	57.80	23.60	19.50	18.30	22.20	23.40	41.20	14.30	18.50
U	8.60	11.60	8.04	16.10	6.31	3.18	5.20	6.51	9.71	9.15	2.63	3.95
La	32.30	99.10	36.10	80.20	52.50	48.40	50.10	22.50	27.30	25.30	65.00	156.70
Ce	71.00	215.00	77.60	174.00	107.00	93.50	101.00	43.70	51.80	59.70	107.00	241.80
Pr	7.64	22.40	8.54	18.60	10.50	9.77	10.80	4.48	5.45	6.72	12.30	26.10
Nd	28.00	79.90	32.20	68.20	35.90	35.40	42.60	15.60	19.70	23.60	46.90	89.80
Sm	6.04	15.70	6.58	14.50	6.22	6.39	8.76	3.04	4.26	5.15	8.52	12.60
Eu	0.28	2.37	0.92	0.80	0.85	1.20	1.74	0.31	0.47	0.23	1.65	2.72
Gd	5.22	11.40	4.92	11.80	4.44	5.21	7.80	2.55	4.32	4.19	7.82	9.26
Tb	0.93	1.54	0.73	1.83	0.65	0.81	1.21	0.42	0.79	0.68	1.04	0.91
Dy	5.75	8.30	4.08	10.20	3.77	4.97	7.12	2.57	5.10	3.76	6.06	4.42
Ho	1.17	1.63	0.82	1.95	0.77	1.07	1.48	0.56	1.11	0.66	1.25	0.8
Er	3.36	4.39	2.24	4.85	2.15	3.03	4.05	1.65	3.15	1.54	3.46	2.28
Tm	0.56	0.63	0.33	0.64	0.32	0.46	0.60	0.27	0.48	0.22	0.47	0.30
Yb	4.17	3.91	2.09	3.70	2.07	3.10	3.90	1.88	3.22	1.50	3.06	2.14
Lu	0.65	0.56	0.31	0.48	0.31	0.46	0.59	0.29	0.48	0.22	0.45	0.32
∑REE	167.07	466.83	177.46	391.75	227.45	213.77	241.75	99.82	127.63	133.47	264.98	550.15
LREE/HREE	6.66	13.43	10.43	10.05	14.71	10.19	8.04	8.80	5.84	9.45	10.22	25.93
(La/Yb) _n	5.22	17.09	11.65	14.61	17.10	10.53	8.66	8.07	5.72	11.37	14.32	49.37
δEu	0.15	0.52	0.47	0.18	0.47	0.62	0.63	0.33	0.33	0.15	0.61	0.74
δCe	1.05	1.06	1.03	1.05	1.04	0.98	1.00	0.99	0.97	1.08	0.85	0.83
(La/Sm) _n	3.36	3.97	3.45	3.48	5.31	4.76	3.60	4.66	4.03	3.09	4.80	7.82
(Gd/Lu) _n	1.03	2.61	2.03	3.15	1.84	1.45	1.69	1.13	1.15	2.44	2.23	3.71

线 0.02; SiO₂/Al₂O₃ 比值为 1.695~8.100, 大部分在 2.0~3.0 之间; Na₂O/K₂O 比值为 0.04~0.73,

反映其粘土矿物含量高, 长石含量低, 成分成熟度高, 也表明火山灰层已发生不同程度蚀变。另外, 总

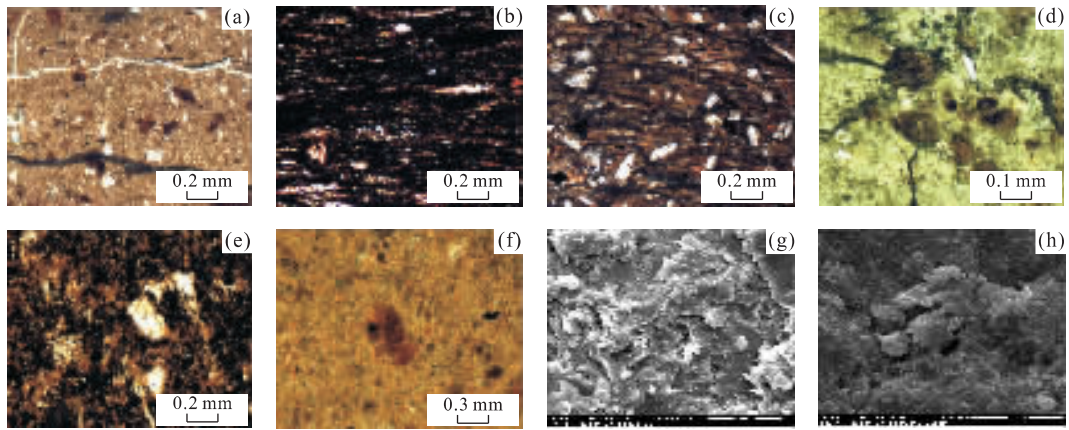


图 2 延长组火山灰沉积物显微镜(a~f)(单偏光)和 SEM(g~h)特征

Fig. 2 Microscope (single polar) and SEM characteristics of volcanic ash sediments in Yanchang Formation

a. 宁 42 井, 长 7,1 556. 2 m; b. 正 11 井, 长 7,926. 1 m; c. 西 187 井, 长 8,2 132. 8 m; d. 庄 50 井, 长 7,1 948. 3 m; e. 庄 210 井, 长 8,1 704. 4 m; f. 庄 80 井, 长 7,2 024. 5 m; g. 胡 148 井, 长 9,2 639. 4 m; h. 镇 44 井, 长 7,2 566. 6 m

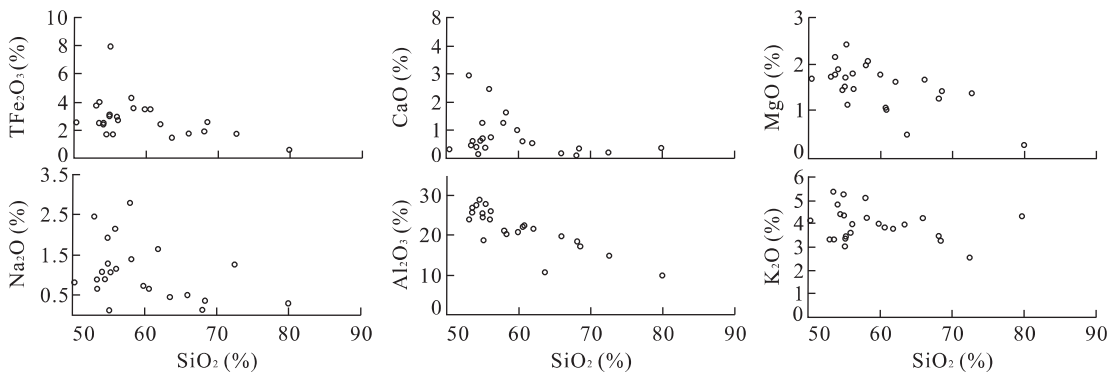


图 3 延长组火山灰沉积物的 SiO_2 - TFe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 K_2O 关系

Fig. 3 SiO_2 - TFe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , Al_2O_3 , K_2O relationship of volcanic ash sediments in Yanchang Formation

铁含量 TFe_2O_3 为 0. 61%~7. 97%，大部分在 1. 50%~3. 00% 之间，相对较低； $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ 为 0. 7~8. 8%，大部分在 1. 6%~4. 0% 之间，这一含量主要是由原岩中的钛铁矿物造成的；烧失量为 3. 95%~10. 24%，大部分在 5. 0%~7. 0% 之间，与火成岩相近。

图 3 给出了火山灰沉积物的 SiO_2 与其他主元素相互关系，发现主元素 SiO_2 与 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 之间存在着明显的负相关关系(图 3)； SiO_2 与 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 间相关关系很低，即不相关或者没有明显的相关关系。

3.3 稀土元素特征

从表 1 中可以看出，火山灰沉积物 $\Sigma \text{REE} = (99. 82 \sim 550. 15) \times 10^{-6}$ ，平均 $240. 16 \times 10^{-6}$ ，高于澳大利亚页岩(PAAS)的平均含量值 $182. 0 \times 10^{-6}$ (McLennan, 1989) 和北美页岩(NASC)的平均含

量值 $173. 2 \times 10^{-6}$ (Haskin *et al.*, 1968)。LREE 相对富集 ($(\text{La}/\text{Sm})_n = 2. 90 \sim 7. 82$ ，平均 4. 52)，LREE/HREE 比值相差较大，在 5. 84~25. 93 之间，平均为 11. 60， $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 值也相差较大，平均为 14. 79。明显的 Eu 负异常 ($\delta \text{Eu} = 0. 147 \sim 0. 837$ ，平均为 0. 48)，Ce 异常不显著。对稀土元素特征用 Sun and McDonough(1989)推荐的原始地幔值标准化，其稀土元素配分图(图 4a)：稀土元素总体特征表现为轻、重稀土分异明显，LREE 相对富集，球粒陨石标准化后呈明显负 Eu 异常的右倾型曲线特征。

3.4 微量元素特征

对微量元素也用 Sun and McDonough(1989)推荐的原始地幔值标准化(表 1, 图 4b)，延长组火山灰沉积物具有如下特征：

(1) 所有样品大离子亲石元素(LILE)Ba 含量为 $(360 \sim 2 118) \times 10^{-6}$ ，平均为 $1 042 \times 10^{-6}$ ，是球

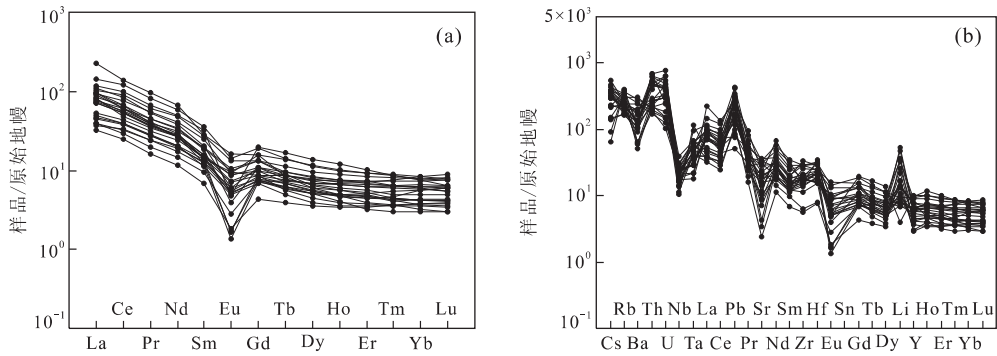


图 4 延长组火山灰沉积物 REE 配分模式(a)和蛛网图(b)

Fig. 4 REE distribution pattern (a) and spider (b) diagrams of volcanic ash sediments in Yanchang Formation

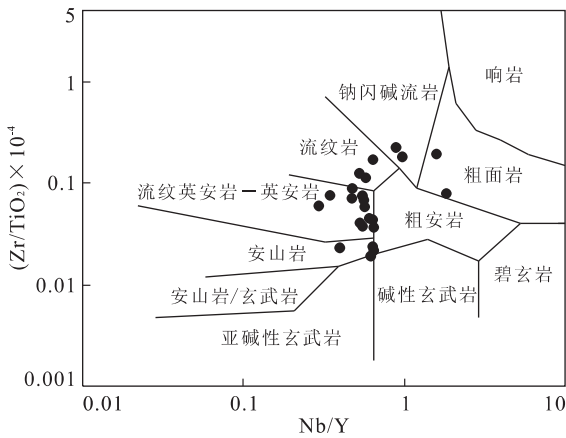


图 5 延长组火山灰沉积物 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解

Fig. 5 Nb/Y-Zr/TiO₂ diagram of volcanic ash sediments in Yanchang Formation

粒陨石的 50~200 倍,与北美页岩相近;Rb 含量为 $(106\sim 256)\times 10^{-6}$,平均为 163×10^{-6} ,是球粒陨石的 200~800 倍,也与北美页岩相近;Th 含量为 $(14.3\sim 57.9)\times 10^{-6}$,平均为 31.9×10^{-6} ,是球粒陨石的 400~2 000 倍,同时也是北美页岩的 5~30 倍,所以球粒陨石标准化蛛网图中在 Th 含量处出现最高峰值,表明火山灰沉积物中 Th 含量富集.而 Sr 含量为 $(50.3\sim 781.0)\times 10^{-6}$,平均为 385×10^{-6} ,球粒陨石标准化蛛网图中,在 Sr 含量处出现波谷,但却高于北美页岩中 Sr 元素的含量,说明其含量总体介于火成岩与沉积岩之间,符合火山碎屑岩为过渡性岩石这一特征.

(2)Co/Ni 值总体在 0.5~1.5 之间,N331、ZH111 异常高值,分别为 27 和 29;Th/U 值在 2.4~11.3 之间,平均为 4.64;Zr/Hf 值在 15.91~42.50 之间,平均为 32.13,与火山灰蚀变的粘土岩的 Zr/Hf 值 32.6 非常接近(张俊明等,1997).

(3)微量元素 Nb、Ta、Th、Hf、Y、Ga、Ti、Cr、

Co、Ni 等在蚀变和表生环境中很稳定,变化范围小,其中,由火山灰蚀变而成的粘土,通常其稳定微量元素 Hf、Nb、Ta、Y、Ga、Th 等元素的丰度值比非火山成因的粘土沉积物高.所测试火山灰沉积物样品基本符合这一特征.

(4)通过延长组火山灰沉积物 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解(图 5),可以看出,数据点主要落在安山岩一流纹岩之间,多数点落入流纹英安岩-英安岩区,说明其来源以中酸性岩为主.

4 岩石成因探讨

4.1 形成机制

通常火山灰物质的搬运、沉积有两种成因机制,包括空降型和水携型.空降型火山沉积物指火山灰在空中通过风力搬运,因风力逐渐减弱而降落形成,具有凝灰结构,发育正粒序层理的岩石,且后期未发生明显再沉积作用,区域上可对比性强;而水携型火山灰沉积物是指空降型火山灰沉积后遭受风化、剥蚀,然后经过水的搬运(或与水作用相关)与砂泥岩一起发生再沉积作用形成的岩石,常发育较多的沉积构造,区域上可对比性弱.

综合调查发现,研究区延长组地层中的火山灰沉积物主体呈层状展布(图 6a),发现火山灰沉积物在镜下具有正粒序层序(张文正等,2009).这些现象说明火山灰可能是在风力作用下较近(或近)距离搬运,在风力逐渐减小的过程中不断降落在湖盆中经湖水的分选作用形成,为空降型火山灰沉积物.因此,火山灰沉积物的厚度分布在平面上应该随风向逐渐变化,这与火山灰沉积物展布具有从西南向东北变薄的特征一致(邱欣卫等,2009).

尽管研究区火山灰沉积物夹层产状多为平缓,

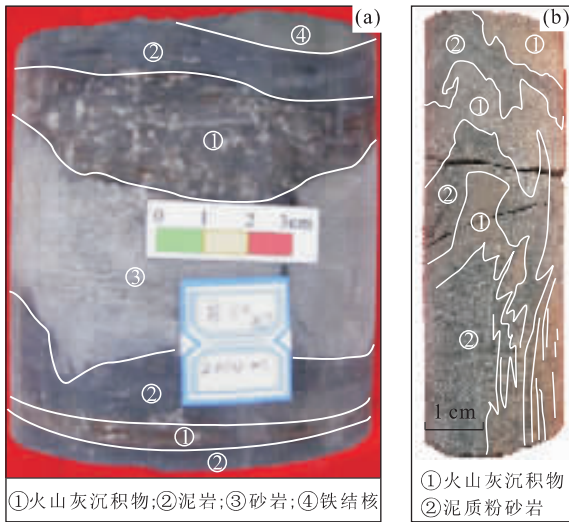


图 6 延长组火山灰沉积物的岩心照片

Fig. 6 Drilling core photos of volcanic ash sediments in Yanchang Formation

但也多处发现同砂岩、泥岩一起发育揉皱或滑塌现象(图 6b),甚至形成包卷层理和交错层理.由于这类火山灰沉积物常与水动力关系密切,也称为水携型火山

灰沉积物.这可能有两种解释:一种是火山灰沉积时构造活动较强烈,发育同沉积构造;另一种是火山灰沉积后在某触发条件和环境下与砂、泥岩一起发生重力滑动,出现滑塌、泥石流、浊积等再沉积作用.

4.2 大地构造环境

Pearce and Cann(1973)最先提出依据化学成分来判别岩浆起源的大地构造背景这一观点,论述了可以利用地球化学方法区别产生于不同大地构造背景的玄武岩,并建立了所谓的构造—岩浆判别图解,而后又发展到对花岗质岩浆的判识(Pearce et al., 1984).在此基础上,又有较多研究者提出了基于化学成分判断岩浆源区大地构造环境的众多图解(Wood, 1980; Mullen, 1983; Cabanis and Lecolle, 1989).

由于研究区延长组火山灰层总体发生了明显蚀变,因此基于活泼元素建立的图解都可能存在一定的多解性,所以尽可能以较稳定元素建立的图解来说明源区构造环境.在 Rb—Y+Nb 图解中(图 7a),火山灰沉积物数据点主要落入火山弧花岗质岩浆区;在 TiO₂-Zr 图解中(图 7b),数据点主要分布于弧岩浆区,少量数据点出图;在 Th/Yb-Nb/Yb 图解

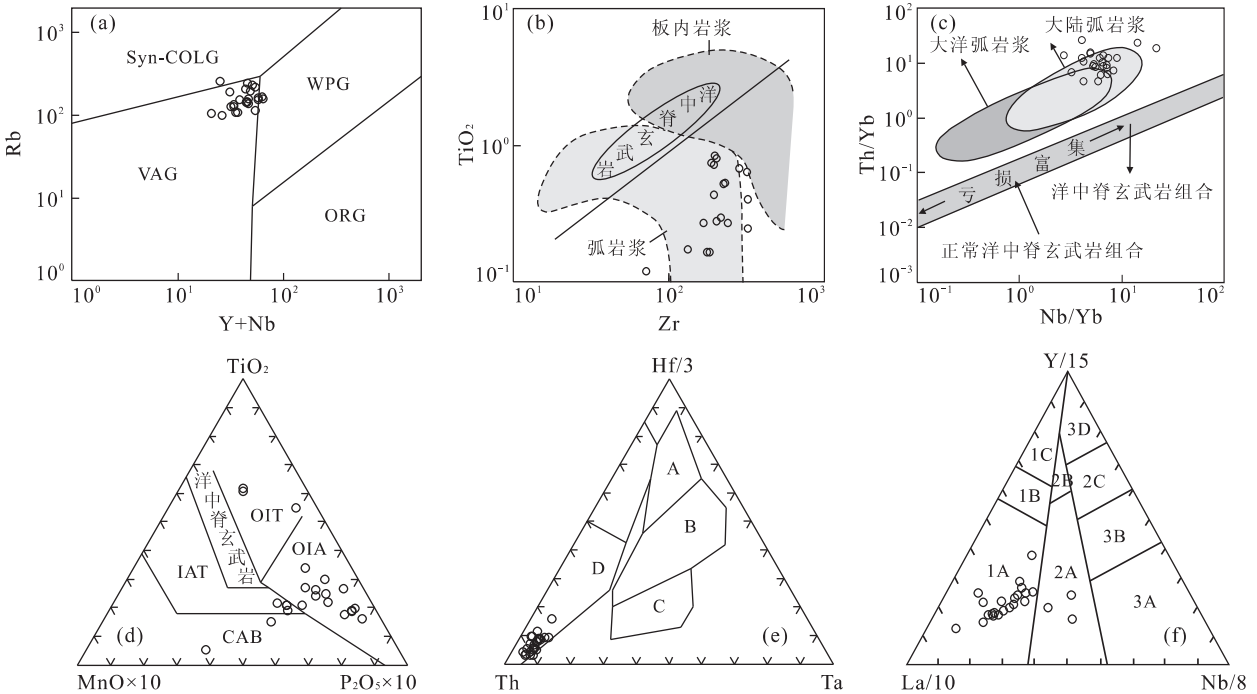


图 7 延长组火山灰沉积物原岩大地构造环境判别图解

Fig. 7 Discrimination diagrams of volcanic ash sediments in Yanchang Formation for tectonic settings

a. 底图据 Pearce et al., 1984, 其中 VAG: 火山弧花岗岩; Syn-COLG: 同碰撞花岗岩; WPG: 板内花岗岩; ORG: 洋脊花岗岩; b. 底图据 Pearce, 1982; c. 底图据 Pearce and Peate, 1995; d. 底图据 Mullen, 1983, 其中 OIT: 大洋拉斑玄武岩; CAB: 岛弧钙碱性玄武岩; IAT: 岛弧拉斑玄武岩; OIA: 大洋岛弧玄武岩; e. 底图据 Wood, 1980, 其中 A 区是 N 型 MORB; B 区为 E 型 MORB 和板内拉斑玄武岩; C 区为碱性板内玄武岩; D 区为火山弧玄武岩; f. 底图据 Cabanis and Lecolle, 1989, 其中 1A 区火山弧钙碱性玄武岩; 1C 区是火山弧拉斑玄武岩; 1B 区是 1A 区与 1C 区间的重叠区域; 2A 区是大陆玄武岩; 2B 区是弧后盆地玄武岩; 3A 区为大陆内裂谷区的碱性玄武岩; 3B 及 3C 区为 E-MORB; 3D 区为 N-MORB

中(图 7c),数据点主要位于大陆弧岩浆区,也有少量数据点出图;在基于主量元素 Ti-Mn-P 的三角图解中(图 7d),数据点主要分布于大洋岛弧安山质岩浆区,但有多点分布于其他区域;在 Hf/3-Th-Ta 三角图解中(图 7e),数据点都落入火山弧玄武岩区,同时 Hf/Th 比值为 0.1~0.6,都小于 3,因此火山灰沉积物主要源于火山弧钙碱性玄武质岩浆区;在 Y/15-La/10-Nb/8 图解中(图 7f),数据点主要位于火山弧钙碱性玄武质岩浆区,少量落在大陆玄武质岩浆区。

从火山灰沉积物数据点的投图结果来看,基于不活泼微量元素的图解都反映了火山灰沉积物源于火山弧或火山弧钙碱性岩浆原区,仅少量数据不谐同;而基于主量元素的 Ti-Mn-P 三角图解原区较不一致,其可信度较低,这可能由于火山灰层水解蚀变强烈,主量元素和少量样品的不活泼微量元素发生了迁移,同时延长组火山灰层普遍较薄,少量样品可能混有上、下砂泥岩,导致了其不谐同性。胡艳华等(2009)综述了全球奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩(火山灰蚀变产物)的数据投图后,认为基于不活泼元素比值 Th/Yb-Nb/Yb 图解和 Hf/3-Th-Ta 三角图解能够消除风化蚀变过程中对元素本身的影响,在火山灰沉积物原岩大地构造环境判别上具有较高的可信度。综上所述,笔者认为延长组火山灰沉积物主要源于火山弧钙碱性岩浆源区。

延长组火山灰层主要发育层段表现为由南西北东向逐渐变薄、层数变少这一展布特征(邱欣卫等,2009),说明火山物质可能来源于盆地南部或西南部。盆地西南部为秦祁造山带,晚三叠世扬子与华北板块主体已经拼接完成,进入陆内造山阶段(张国伟等,2001)。古地磁资料反映了秦岭洋的闭合是先东后西的闭合模式,秦岭造山带西部地区晚三叠世开始闭合,侏罗纪最终定型(朱日祥等,1998),在闭合过程中可能发生了扬子板块向华北板块的俯冲作用,也就可能导致火山喷发作用,形成火山弧,致使火山喷发过程中的火山灰广泛分布于晚三叠世鄂尔多斯湖盆中,而该期正是湖盆鼎盛发育时期,水体相对稳定,因此火山灰得以保存。

5 结论

(1)延长组火山灰沉积物显微镜可观察到晶屑、玻屑等火山物质,整体蚀变强烈,可分为具有典型凝灰结构、蚀变作用相对较轻的凝灰岩和“三屑”均蚀

变,偶见周缘已被蚀变的斑晶,主体以粘土矿物为主的斑脱岩,扫描电镜下火山灰沉积物以伊利石、伊蒙混层等粘土矿物为主。

(2)火山灰沉积物主量元素 SiO_2 含量为 50.29%~79.82%,全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)在 3.20~7.88 之间; $\sum\text{REE}$ 在 $(99.82\sim 550.15)\times 10^{-6}$ 之间变化,REE 总体特征表现为轻稀土富集,重稀土亏损,曲线形态整体表现为右倾型, Eu 负异常, δEu 为 0.147~0.837,没有明显的 Ce 异常现象;大离子亲石元素(LILE) K、Rb、Ba、Th 呈明显正异常,在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解中,数据点主要落在安山岩一流纹岩之间,表明火山灰沉积物来自于中酸性岩。

(3)沉积学分析认为火山灰沉积物的成因包括有空降型和水携型两种机制,大地构造环境判别图说明火山灰沉积物源于火山弧钙碱性岩浆源区,与晚三叠世秦岭造山带的演化关系密切。

References

- Aitchison, J. C., Ali, J. R., Chan, A., et al., 2008. Tectonic implications of felsic tuffs within the Lower Miocene gangrinboche conglomerates, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 287–297. doi: 10.1016/j.jseaes.2008.05.008
- Bescoby, D., Barclay, J., Andrews, J., 2008. Saints and sinners: a tephrochronology for late Antique landscape change in Epirus from the eruptive history of Lipari, Aeolian Islands. *Journal of Archaeological Science*, 35(9): 2574–2579. doi: 10.1016/j.jas.2008.04.013
- Cabanis, B., Lecolle, M., 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination de séries volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Seri. II)*, 309(20): 2023–2029.
- Cheng, R. H., Liu, Z. J., Wang, P. J., 1997. Geological significance of volcanic events in the eastern part of Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 22(1): 57–61 (in Chinese with English abstract).
- Compile Group of Changqing Oilfield Geological History, 1992. Geological history of China petroleum (Volume 12)—Changqing oilfield. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Cullen-Lollis, J., Huff, W. D., 1986. Correlation of Champ-lainian (Middle Ordovician) K-bentonite beds in central Pennsylvania based on chemical fingerprinting. *The Journal of Geology*, 94: 865–874.

- D'Addezio, G., Karner, D. B., Burrato, P., et al., 2006. Tephrochronology in faulted Middle Pleistocene tephra layer in the Val d'Agri area (southern Italy). *Annual of Geophysics*, 49:1029—1040.
- Desmares, D., Grosheny, D., Beaudoin, B., et al., 2007. High resolution stratigraphic record constrained by volcanic ash beds at the Cenomanian—Turonian boundary in the Western Interior basin, USA. *Cretaceous Research*, 28(4):561—582. doi:10.1016/j.cretres.2006.08.009
- Dong, H. L., Hall, C. M., Halliday, A. N., et al., 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ illite dating of Late Caledonian (Acadian) metamorphism and cooling of K-bentonites and slates from the Welsh basin, U. K. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(3—4):337—351. doi:10.1016/S0012—821X(97)00100—3
- Foreman, B. Z., Rogers, R. R., Deino, A. L., et al., 2007. Geochemical characterization of bentonite beds in the two Medicine Formation (Campanian, Montana), including a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age. *Cretaceous Research*, 29(3):373—385. doi:10.1016/j.cretres.2007.07.001
- Gerhard, E., 2000. Sedimentary basins; evolution, facies, and sediment budget. Springer, New York, 291—381.
- Grevenitz, P., Carr, P., Hutton, A., 2003. Origin alteration and geochemical correlation of Late Permian airfall tuffs in coal measures, Sydney basin, Australia. *International Journal of Coal Geology*, 55(1):27—46.
- Haskin, L. A., Haskin, M. A., Frey, F. A., et al., 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earth. In: Ahrens, L. H., ed., Origin and distribution of the elements. Pergamon Press, Oxford, 889—912.
- Haaland, H. J., Furnes, H., Martinsen, O. J., 2000. Paleogene tuffaceous intervals, grane field (Block 25-11), Norwegian North Sea; their depositional, petrographical, geochemical character and regional implications. *Marine and Petroleum Geology*, 17(1):101—118.
- Hints, R., Kirsimäe, K., Somelar, P., et al., 2006. Chloritization of Late ordovician K-bentonites from the northern Baltic Palaeobasin—influence from source material or diagenetic environment. *Sedimentary Geology*, 191(1—2):55—66. doi:10.1016/j.sedgeo.2006.01.004
- Hu, Y. H., Liu, J., Zhou, M. Z., et al., 2009. An overview of Ordovician and Silurian K-bentonites. *Geochimica*, 38(4):393—404 (in Chinese with English abstract).
- Huff, W. D., 2008. Ordovician K-bentonites; issues in interpreting and correlating ancient tephras. *Quaternary International*, 178(1):276—287. doi:10.1016/j.quaint.2007.04.007
- Huff, W. D., Kolata, D. R., 1989. Correlation of K-bentonite beds by chemical fingerprinting using multivariate statistics. In: Cross, T. A., ed., Quantitative Dynamic Stratigraphy. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 567—577.
- Kramer, W., Weatherall, G., Offler, R., 2001. Origin and correlation of tuffs in the Permian Newcastle and Wollombi Coal measures, NSW, Australia, using chemical fingerprinting. *International Journal of Coal Geology*, 47(2):115—135. doi:10.1016/S0166—5162(01)00034—9
- Liu, C. Y., Qiu, X. W., Wu, B. L., et al., 2007. Characteristics and dynamic settings of Central-east Asia multi-energy minerals metallogenetic domain. *Science in China (Ser. D)*, 50(Sup. II):1—18. doi:10.1007/s11430—007—6023—0
- Liu, C. Y., Zhao, H. G., Gui, X. J., et al., 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5):617—638 (in Chinese with English abstract).
- Marfil, R., Hall, A., Garcia, G. S., et al., 1998. Petrology and geochemistry of diagenetically altered tuffaceous rocks from the Middle Triassic of Central Spain. *Journal of Sedimentary Research*, 68(3):391—403.
- McLennan, S. M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin, B. R., McKay, G. A., eds., Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. *Reviews in Mineralogy*, 21:169—200.
- Mullen, E. D., 1983. $\text{MnO}/\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(1):53—62. doi:10.1016/0012—821X(83)90070—5
- Pearce, J. A., 1982. Trace element characteristics of lava from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., Andesites; orogenic andesites and related rocks. Wiley, Chichester, 525—548.
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2):190—200. doi:10.1016/0012—821X(73)90129—5
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 15:956—983. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Pearce, J. A., Peate, D. W., 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review*

- of *Earth and Planetary Sciences*, 23: 251—285. doi: 10.1146/annurev. ea. 23. 050195. 001343
- Prueher, L. M., Rea, D. K., 2001. Tephrochronology of the Kamchatka-Kurile and Aleutian arcs; evidence for volcanic episodocity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106(1—2): 67—84. doi: 10.1016/S0377-0273(00)00266-3
- Qiu, X. W., Liu, C. Y., Li, Y. H., et al., 2009. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang Formation of Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1138—1146 (in Chinese with English abstract).
- Roberts, B., Merriman, R. J., 1990. Cambrian and ordovician metabentonites and their relevance to the origins of associated mudrocks in the northern sector of the Lower Palaeozoic Welsh Marginal basin. *Geological Magazine*, 127(1): 31—43. doi: 10.1017/S001675680001414X
- Shane, P., 2000. Tephrochronology: a New Zealand case study. *Earth-Science Reviews*, 49(1—4): 223—259. doi: 10.1016/S0012-8252(99)00058-6
- Su, W. B., Huff, W. D., Ettensohn, F. R., et al., 2008a. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician—Silurian transition, South China; possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and its implications for the evolution of Gondwana. *Gondwana Research*, 15(1): 111—130. doi: 10.1016/j. gr. 2008. 06. 004
- Su, W. B., Zhang, S. H., Huff, W. D., et al., 2008b. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation; implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China craton. *Gondwana Research*, 14(3): 543—553. doi: 10.1016/j. gr. 2008. 04. 007
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society Special Publication, 42: 313—345. doi: 10.1144/asl. sp. 1989. 042. 01. 19
- Wang, P. J., Liu, W. Z., 2001. Depositional events; introduction, example, application. Jilin Science and Technology Press, Changchun (in Chinese).
- Wood, D. A., 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50(1): 11—30. doi: 10.1016/0012-821X(80)90116-8
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, J. M., Li, G. X., Zhou, C. M., 1997. Deposits of volcanic eruption event from the basal Lower Cambrian phosphatic sequence in eastern Yunnan and their significance. *Journal of Stratigraphy*, 21(2): 91—99, 155 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. Z., Yang, H., Peng, P. A., et al., 2009. The influence of late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos basin. *Geochimica*, 38(6): 573—582 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, R., Sun, S. P., Chen, F., et al., 1995. The discovery of Rhyo-tuffite in the Taiyuan Formation and stratigraphic correlation of the Daqingshan and Datong coalfields. *Acta Geoscientia Sinica*, 3: 291—299 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, R., Sun, S. P., Fu, Z. M., 1996. Volcanic event deposits and stratigraphic correlation of the Late Carboniferous—early Permian in Shandong and adjacent regions. *Acta Geologica Sinica*, 70(2): 142—152 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Yang, Z. Y., Wu, H. N., et al., 1998. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of major blocks of China during the Phanerozoic. *Science in China (Ser. D)*, 28(Suppl. 2): 1—19. doi: 10.1007/BF02984508
- Zuo, Z. F., Qi, Y., Ge, X. R., et al., 2008. Effect of late Triassic volcanic sediment event on hydrocarbon accumulation conditions in Ordos basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 44(3): 12—15 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 长庆油田地质志编写组, 1992. 中国石油地质志(卷十二): 长庆油田. 北京: 石油工业出版社.
- 程日辉, 刘招君, 王璞君, 1997. 松辽盆地东部火山事件的地 质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(1): 57—61.
- 胡艳华, 刘健, 周明忠, 等, 2009. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩 研究评述. *地球化学*, 38(3): 393—404.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造 的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 80(5): 617—638.
- 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰 岩夹层展布特征及其地质意义. *沉积学报*, 17(6): 1138—1146.
- 王璞君, 刘万洙, 单玄龙, 等, 2001. 事件沉积: 导论·实例·

- 应用. 长春:吉林科学技术出版社.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等,2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京:科学出版社.
- 张俊明,李国祥,周传明,1997. 滇东下寒武统含磷岩系底部火山喷发事件沉积及其意义. 地层学杂志,21(2):91—99,155.
- 张文正,杨华,彭平安,等,2009. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩发育的影响. 地球化学,38(6):573—582.
- 钟蓉,孙善平,陈芬,等,1995. 大青山、大同煤田太原组流纹质凝灰岩的发现及地层对比. 地球学报,3:291—299.
- 钟蓉,孙善平,傅泽明,1996. 山东及邻区晚石炭世—早二叠世火山事件沉积及地层对比. 地质学报,70(2):142—152.
- 朱日祥,杨振宇,吴汉宁,等,1998. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. 中国科学(D 辑),28(增刊):1—16.
- 左智峰,戚颖,葛小瑞,等,2008. 鄂尔多斯盆地晚三叠世火山物质对油气成藏条件的影响. 兰州大学学报(自然科学版),44(3):12—15.