

doi:10.3799/dqkx.2017.004

豫西济源盆地中生代泥岩地球化学特征对物源区的指示

杨文涛¹, 杜远生²

1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 秦岭造山带印支期造山作用控制着济源盆地的形成与演化, 对盆地中沉积物物源进行研究, 有利于恢复造山带造山—隆升的细节。通过对济源盆地中生代泥岩地球化学的系统分析, 发现样品的 *CIA* (化学风化指数) 校正值得在早—中三叠世、晚三叠世、早—中侏罗世和中侏罗世后期的平均值分别为 68.5、76.4、86.0 和 73.7, 这一演化特征可能反映其经历了古气候控制的化学风化过程。但是三叠纪样品 *CIA* 值明显过低, 可能与源区活动的构造背景相关; *ICV* (成分变异指数) 值显示沉积物具有初次沉积的特征, 反映了源区早期发生过弧—陆碰撞或具备陆缘弧特征的克拉通基底隆升。而早—中侏罗世样品表现为高的 *CIA* 值, *ICV* 值显示沉积物具有再循环特征, 其初次沉积可能发生在弧后盆地中, 后随造山带的隆升, 被剥露再搬运而沉积下来。泥岩物源区构造环境判别结果显示, 沉积物主要来自活动大陆边缘和被动大陆边缘, 且含有较多大陆岛弧 (陆缘弧) 的信息。由此说明, 中生代济源盆地盆缘构造活动经历了由克拉通基底隆升到造山带剥露的过程, 这一过程与秦岭造山带印支期的造山作用密切相关。

关键词: 济源盆地; 沉积物; 物源分析; 中生代; 泥岩; 地球化学; 秦岭造山带。

中图分类号: P588.22

文章编号: 1000-2383(2017)01-0053-15

收稿日期: 2016-07-02

Geochemistry of Mudstones from Mesozoic Jiyuan Basin, West Henan: Implications for Provenance Analysis

Yang Wentao¹, Du Yuansheng²

1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The sedimentary development of the Jiyuan basin was controlled by the Qinling orogenic belt during the Early Mesozoic. Therefore, mountain building and uplift of the Qinling orogenic belt can be evidenced by the sediments from the Jiyuan basin. The Mesozoic mudstones geochemistry has been investigated to determine the provenance of the Jiyuan basin. The average values of corrected *CIA* (chemical weathering index) from the Early-Middle Triassic, Late Triassic and Early-Middle Jurassic samples increase from 68.5 to 76.4, then to 86 successively, but decrease to 73.7 from the late Middle Jurassic samples. The variation of *CIA* might correspond to the changing paleoclimate during the Mesozoic. However, the much lower values of *CIA* from the Triassic samples may be restricted to the active tectonic setting. The values of *ICV* (compositional variation index) reflect that the first cycle sediments are mainly concentrated in the Triassic samples. These sediments may come from the uplifted basement of the North China craton, which should consist of the continental marginal arc and/or arc-continent collision zone. The Early-Middle Jurassic samples showing higher *CIA* may be related with the recycling clastics of the uplifting orogen, whereas first deposition might occur in the back-arc basin. In the tectonic discrimination diagrams, the sediments from Jiyuan basin mainly formed under the active continental margin and the passive continental margin, but contained much more continental island arc materials. Our data support that sediments from the uplifted basement of the North China craton to the denudation of the orogen is most likely related to the Qinling orogenesis during the Indosinian.

Key words: Jiyuan basin; sediment; provenance analysis; Mesozoic; mudstone; geochemistry; Qinling orogenic belt.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41440016); 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (No. 152300410211).

作者简介: 杨文涛 (1984—), 男, 讲师, 博士, 从事沉积地质学研究及相关教学工作. ORCID: 0000-0002-8589-3850. E-Mail: ywtao125@163.com

引用格式: 杨文涛, 杜远生, 2017. 豫西济源盆地中生代泥岩地球化学特征对物源区的指示. 地球科学, 42(1): 53-67.

济源盆地南部紧邻秦岭造山带,西北部接壤太行山脉,它是在晚古生代华北克拉通的基础上继承和发展起来的中生代盆地(图 1a). 中三叠世末期,受秦岭造山带印支期造山作用的影响,济源盆地由克拉通内陆盆地向前陆盆地转变(刘少峰和张国伟, 2008;杨文涛等, 2014),同时,盆地中的沉积物也可能记录了这次构造转折期的细节,是理解秦岭造山带造山与济源盆地形成演化的重要窗口.

物源分析在盆山相互作用研究中扮演重要角色,通过对盆地内碎屑沉积物组成、性质及其内部结构变化的研究,可再现盆地与相邻造山带时空耦合过程(许志琴等, 2008),为盆地沉降与山脉隆升关系、盆地沉积物与山脉剥露过程关系、盆山系统动力学演化等方面提供重要的沉积学依据(刘少峰和张国伟, 2005). 目前,相关工作主要集中于充填特征与构造阶段研究(杨文涛等, 2014)、碎屑锆石年代学与物源研究 (Li and Huang, 2013; Yang *et al.*, 2014b)、沉积地球化学及构造背景研究上(李明龙等, 2014),这些工作所涉及的地层不全,也存在认识上的局限性. 因此,本文系统采集了济源盆地中生界泥岩的地球化学信息,在判定物源区构造活动状态及沉积物形成构造背景的基础上,确定了济源盆地中生代沉积物来源,以提高对济源盆地与秦岭造山带盆山系统演化的认识.

1 地质背景

三叠纪早期,济源属于华北大型内陆克拉通型盆地的一部分(郝奕玮等, 2014). 中三叠世末期,秦岭造山带碰撞造山,于北秦岭子母沟—军马河一带自南向北发生逆冲作用,控制了北秦岭北缘晚三叠世前陆盆地的沉降和充填. 早侏罗世,华北南缘后陆褶皱逆冲带初始形成,在豫西及大别山北缘沿秦岭北界断裂南支发生逆冲推覆,控制了义马地区侏罗纪前渊沉降与沉积(刘少峰和张国伟, 2008),义马与济源两地被认为在中侏罗世之前为一个统一的沉积盆地(吴贤涛, 1985;杨文涛等, 2014),且该盆地与西部的鄂尔多斯盆地是连通的(赵俊峰等, 2010;Liu *et al.*, 2013). 中侏罗世之后,太行山的隆升成为控制盆地演化的新动力(Wang and Li, 2008),济源盆地可能已经从大鄂尔多斯盆地分离出来,并由前陆盆地向山前/山间盆地转换(杨文涛等, 2014).

济源盆地中生界发育较为完整且连续(图 1b),包含了下三叠统刘家沟组、和尚沟组,整体表现为炎热气候条件下的红色砂岩及泥岩组合,刘家沟组有明显河流相沉积的二元结构,而和尚沟组大套泥岩为浅湖相沉积(图 2)(胡斌等, 2009). 中三叠统二马营组、油房庄组的岩性特征为灰黄色、黄绿色砂岩与紫红色、黄绿色泥岩的组合,整体上表现为河流相沉积,但在油房庄组上段出现了短暂的湖泊相(图 2)

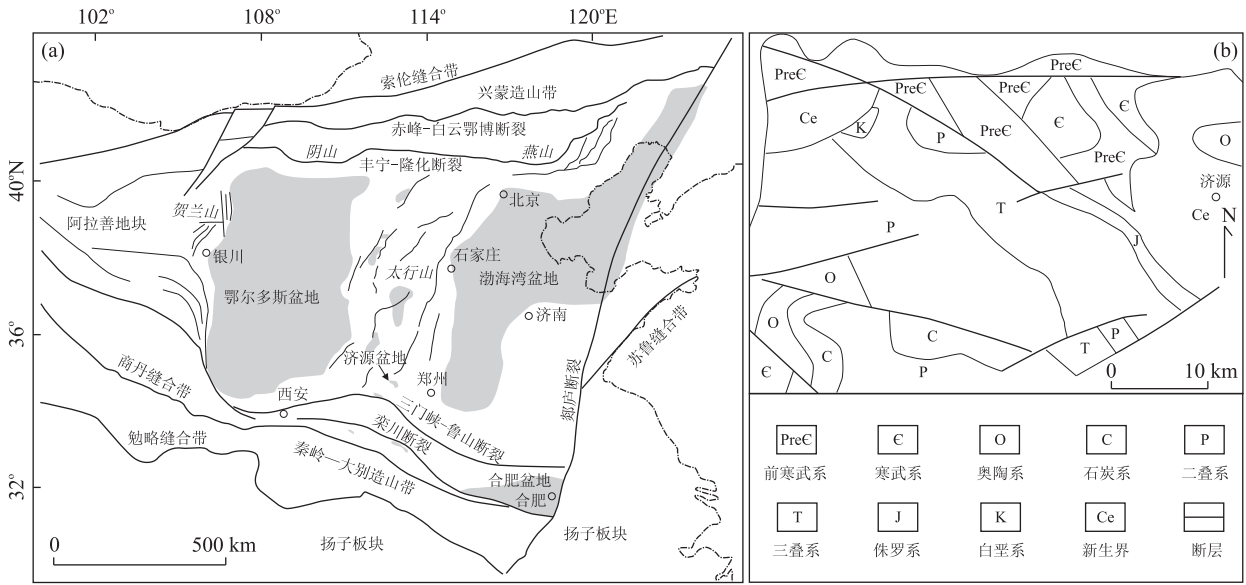


图 1 华北克拉通及邻区构造纲要图及济源盆地位置(a),济源地区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic sketch of the North China Craton and its adjacent regions (a), geological sketch of the Jiyuan basin (b)

图 a 据 Liu *et al.* (2013)略修改

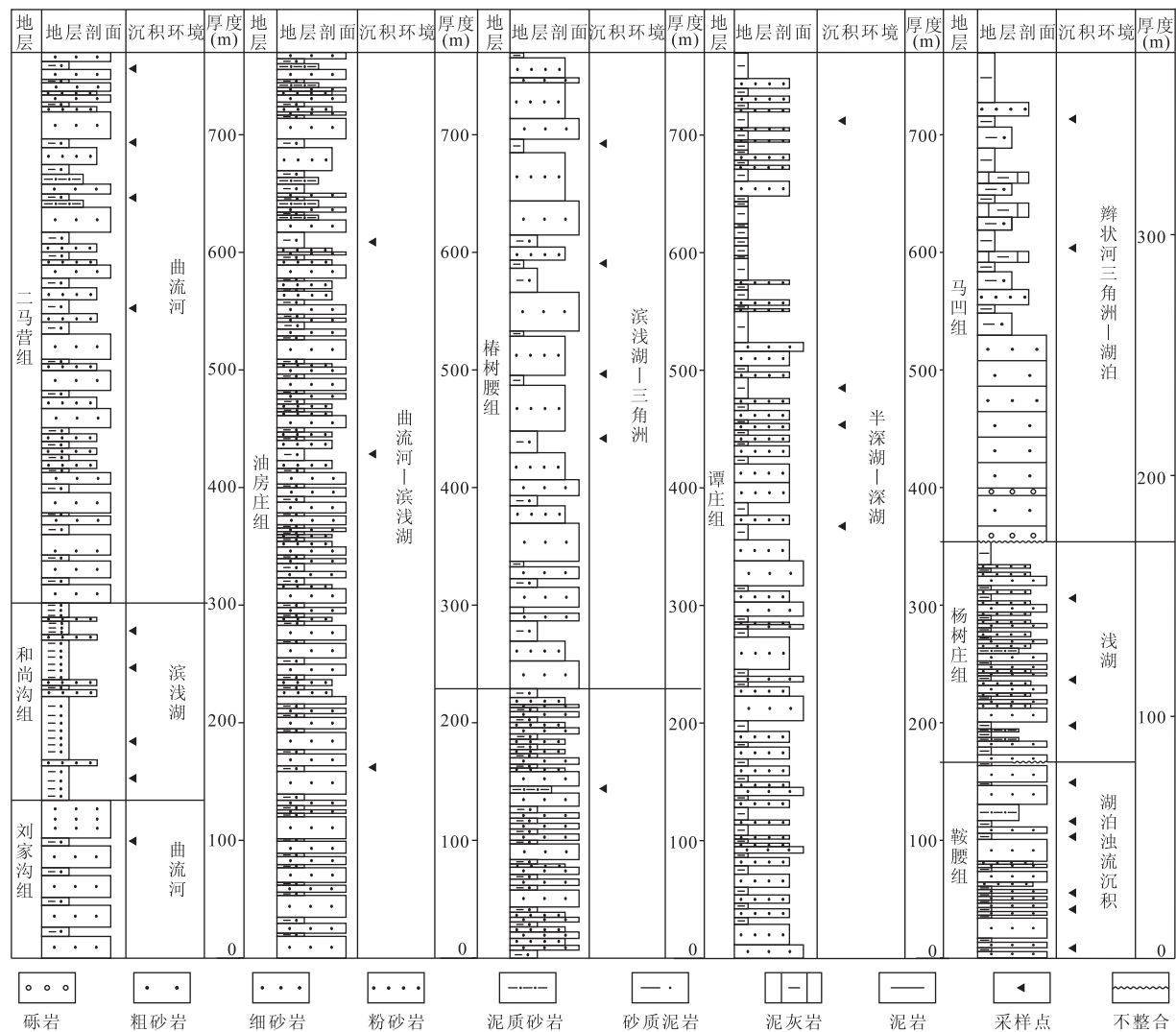


图 2 济源盆地中生代地层柱状简图

Fig. 2 Measured section from the Mesozoic Jiyuan basin

(齐永安等,2007;Wang *et al.* , 2014). 上三叠统椿树腰组、谭庄组主要为潮湿气候条件下沉积的灰黄色、黄绿色细砂岩、粉砂岩与灰绿色、黄绿色泥岩组合. 椿树腰组及谭庄组的下段主要为滨浅湖相及河流三角洲相沉积,而在谭庄组的上段出现了深湖相沉积(图 2)(张国成等,2005). 下侏罗统鞍腰组是一套含浊流沉积的湖相地层,岩性主要为灰黄色块状细砂岩及灰绿色薄层细砂岩、粉砂岩与钙质泥岩互层(图 2)(吴贤涛,1985;Buatois *et al.* , 1996). 中侏罗统杨树庄组为一套浅湖相夹少量滨湖相沉积,其岩性由灰绿、灰黄色细砂岩、粉砂岩、砂质泥岩和泥岩组成(图 2). 上覆马凹组下部以紫红色厚层状细砾岩、灰白色含砾粗砂岩与粗粒砂岩为主;上部以黄绿色、紫红色泥岩为主,夹黄绿色细砂岩、粉砂岩、灰白色泥灰岩等(李明龙等,2014),沉积环境以辫状河

三角洲及湖泊相为主.

2 泥岩地球化学特征

下三叠统刘家沟组及和尚沟组泥岩样品来自于济源王屋山剖面(共 5 个),中三叠统二马营组、油房庄组、上三叠统椿树腰组及中侏罗统马凹组样品采集于济源承留镇至小浪底沿山公路剖面(共 14 个),上三叠统谭庄组、下侏罗统鞍腰组及中侏罗统杨树庄组样品采集于济源承留镇三皇村剖面(共 13 个). 主量元素在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室采用 X 荧光光谱分析,获得数据见表 1,微量元素和稀土元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 ICP-MS 仪器测试,获得数据见表 2、表 3.

表 1 济源盆地中生代泥岩主量元素分析结果(%)

Table 1 The major elements (%) of the Mesozoic sediments from the Jiyuan basin

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	CIA	CIA _{corr}	ICV
Tl-h2	62.93	0.59	10.38	3.35	0.08	2.92	7.73	1.76	1.36	0.12	9.13	58.8	59.8	1.71
Th-h4	53.17	0.71	13.66	6.24	0.10	2.96	8.75	1.12	2.96	0.17	10.45	66.4	72.9	1.67
Th-h3	54.64	0.62	11.23	4.80	0.10	2.41	11.02	1.33	2.30	0.12	11.71	62.0	66.8	2.01
Th-h2	53.42	0.62	11.23	4.80	0.08	2.33	11.81	1.14	2.30	0.13	12.49	64.3	69.5	2.06
Th-h1	56.25	0.64	10.96	4.62	0.10	2.47	10.49	1.48	2.15	0.13	10.97	60.3	64.3	2.00
Te-h4	53.50	0.74	16.19	7.70	0.06	3.79	4.57	1.31	4.13	0.22	8.10	64.8	73.1	1.38
Te-h3	56.40	0.88	17.13	8.67	0.05	3.89	1.52	1.98	4.30	0.26	5.14	63.0	70.4	1.24
Te-h2	58.62	0.73	15.22	6.74	0.07	3.22	3.83	2.70	3.48	0.23	5.45	54.6	58.8	1.36
Te-h1	56.39	0.77	15.72	7.53	0.08	3.55	3.92	2.21	4.00	0.21	5.88	57.5	63.6	1.40
Ty-h4	53.19	0.76	17.27	7.33	0.05	3.58	4.17	1.02	3.36	0.20	9.42	71.2	77.3	1.17
Ty-h3	56.40	0.77	16.27	6.96	0.04	3.38	3.60	1.60	3.28	0.21	7.73	64.8	70.0	1.21
Ty-h2	58.74	0.73	16.11	7.20	0.05	3.10	2.81	1.79	3.80	0.24	5.68	61.7	67.9	1.21
Ty-h1	60.06	0.75	16.33	6.69	0.04	2.90	1.63	1.64	3.01	0.25	7.01	66.2	70.7	1.02
Tc-h2	18.20	0.23	5.27	3.35	1.51	0.76	37.08	0.31	1.20	0.11	32.26	69.4	77.4	8.43
Tc-h3	57.50	0.84	17.65	6.83	0.03	2.86	1.71	1.24	3.90	0.23	7.45	68.0	75.1	0.99
Tc-h1	52.30	0.60	13.27	4.75	0.12	2.26	10.35	0.68	2.76	0.13	13.04	71.7	79.0	1.62
Tc-h5	44.05	0.69	12.72	5.06	0.04	1.80	16.14	0.05	2.60	0.13	17.00	81.0	90.6	2.07
Tt-h1	47.06	0.59	5.32	2.13	0.06	3.68	19.38	0.32	1.12	0.10	20.31	70.1	77.1	5.13
Tt-1	47.25	0.66	11.58	4.33	0.07	3.56	13.32	0.30	2.46	0.16	16.08	75.9	84.7	2.13
Tt-2	50.81	0.67	13.65	5.83	0.09	3.63	8.65	0.78	2.65	0.17	12.83	71.4	77.7	1.63
Tt-3	42.89	0.81	12.78	6.23	0.06	5.04	11.96	0.35	3.00	0.16	16.37	74.4	84.6	2.15
Ja-h2	55.18	0.62	7.08	3.43	0.05	3.74	13.02	0.64	1.44	0.11	14.97	65.9	71.4	3.24
Ja-h9	48.44	0.76	14.36	6.27	0.03	2.00	11.47	0.18	3.09	0.14	13.60	78.4	88.3	1.66
Ja-h10	52.50	0.79	17.73	6.89	0.04	2.34	5.80	0.15	3.89	0.15	10.01	79.0	89.4	1.12
Ja-h14	59.11	1.01	20.27	5.67	0.01	1.77	0.71	0.10	4.13	0.14	7.39	80.8	90.3	0.66
Ja-1	52.08	1.02	19.24	7.64	0.03	2.79	3.98	0.19	4.40	0.16	8.09	78.1	89.0	1.04
Ja-2	60.14	1.05	18.69	6.81	0.03	2.01	0.98	0.21	3.38	0.17	6.30	81.1	88.6	0.77
Jy-h1	52.43	0.96	22.40	7.36	0.03	1.94	1.14	0.47	4.08	0.23	9.30	78.9	86.1	0.71
Jy-h2	54.87	1.21	20.81	7.02	0.02	1.81	1.22	0.69	3.80	0.26	8.53	76.5	83.1	0.76
Jy-1	64.14	0.80	16.88	6.24	0.04	1.28	1.10	1.43	2.52	0.23	5.12	72.1	75.5	0.79
Jm-1	38.87	0.51	10.68	4.89	0.14	2.45	19.70	0.37	3.07	0.41	18.72	70.1	82.7	2.91
Jm-2	67.42	0.71	13.52	3.55	0.03	1.79	2.76	1.05	3.33	0.11	5.54	65.7	73.7	0.98

杨文涛等(2014)通过对济源盆地中生代地层、沉积及其充填特征的研究,将盆地中生界划分为 4 个构造层序,体现了济源盆地 4 期不同的演化阶段,分别为:早一中三叠世内陆克拉通型盆地演化阶段,晚三叠世前陆盆地初始形成阶段,早侏罗世一中侏罗世早期前陆盆地发展阶段,中侏罗世晚期山前/山间盆地演化阶段;将泥岩样品按照盆地演化的 4 个阶段进行分类,能够更好地挖掘出其中隐藏的地质信息。

2.1 主量元素特征

泥岩样品中 SiO₂ 含量在早一中三叠世平均值为 56%,晚三叠世降低到 48.84%,早一中侏罗世至中侏罗世晚期持续升高,平均值分别为 54.34%和 65.78%。其中椿树腰组有个样品的 SiO₂ 含量仅为 18.20%,该样品可能含有较高的碳酸盐矿物,其 CaO 含量达到 37.08%,且烧失量也相应地达到了

32.26%。Al₂O₃ 含量在早一中三叠世平均值为 14.44%,随后经历了降低→升高→降低的过程,其平均值分别为 12.42%、17.57%和 15.20%。Fe₂O₃+MgO 含量在早一中三叠世样品中最高,平均值为 9.48%,中侏罗世后期样品中最低,平均值为 6.46%,在晚三叠世及早一中侏罗世样品中,其平均值分别为 7.43%和 8.26%。CaO 含量变化较大,在早一中三叠世样品中,平均值为 5.83%,在晚三叠世样品中达到最大,其平均值为 11.64%,随后依次降低到 4.79%和 1.93%,碳酸盐矿物的来源可能与碳酸盐岩碎屑的输入有关。Na₂O 平均含量由早一中三叠世到晚三叠世再到早一中侏罗世持续降低,分别为 1.62%、0.53%和 0.33%,而在中侏罗世后期升高到 1.24%。K₂O 平均含量在早一中三叠世为 3.11%,之后降低到 2.64%,而在早一中侏罗世又升高到 3.53%,中侏罗世晚期降为 2.93%。

表 2 济源盆地中生代泥岩微量元素分析结果(10⁻⁶)

Table 2 The trace elements (10⁻⁶) of the Mesozoic sediments from the Jiyuan basin

样品编号	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
Tl-h2	8.4	56.1	38.8	20.9	19.0	12.8	54.7	13.6	68.1	105.0	24.9	236.0	13.0	4.4	166.0	6.4	1.0	12.4	14.9	2.9
Th-h1	11.3	76.5	58.0	17.6	28.0	28.8	53.8	13.3	89.7	133.0	24.9	192.0	13.3	4.7	495.0	5.1	1.0	19.3	11.6	2.7
Th-h2	11.1	74.4	54.3	15.8	28.0	29.2	56.0	14.3	99.5	128.0	25.3	170.0	12.9	5.5	227.0	4.6	0.9	18.6	11.6	2.8
Th-h3	11.4	68.6	60.5	16.6	29.3	28.8	56.8	14.0	97.5	134.0	24.4	172.0	13.2	5.4	768.0	4.6	0.9	19.5	10.8	2.4
Th-h4	14.5	95.6	78.6	20.6	39.0	32.1	68.5	17.1	121.0	118.0	28.4	178.0	14.3	6.6	475.0	4.8	1.0	22.7	12.7	2.8
Te-h1	15.1	110.0	88.2	24.1	45.9	44.5	104.0	21.7	156.0	223.0	21.6	125.0	13.5	7.7	537.0	3.4	0.9	32.8	11.7	2.3
Te-h2	13.0	81.7	85.8	21.7	40.0	37.0	88.7	20.9	125.0	276.0	20.1	180.0	13.0	5.2	565.0	4.8	0.8	26.2	10.0	1.9
Te-h3	17.0	111.0	103.0	23.0	51.0	47.1	112.0	24.7	170.0	204.0	21.0	165.0	16.1	8.5	559.0	4.3	1.0	34.8	13.6	2.3
Te-h4	15.2	106.0	80.4	19.0	41.8	42.5	106.0	22.7	171.0	153.0	26.8	130.0	15.0	9.7	396.0	3.5	1.0	33.7	14.0	2.8
Ty-h1	13.2	93.8	79.4	19.2	38.1	47.4	95.0	22.4	109.0	172.0	18.9	208.0	13.9	5.4	744.0	5.3	0.9	28.4	11.5	1.8
Ty-h2	13.3	95.7	73.8	20.7	35.6	37.4	92.8	22.1	150.0	185.0	25.4	155.0	15.0	8.2	666.0	4.2	1.0	30.5	12.7	2.8
Ty-h3	14.1	93.2	71.1	15.5	34.3	45.7	100.0	22.3	126.0	194.0	25.6	150.0	15.7	5.7	576.0	4.0	1.1	29.3	15.4	2.8
Ty-h4	15.2	100.0	73.4	15.2	37.7	51.4	108.0	23.6	130.0	120.0	25.4	121.0	15.8	6.7	522.0	3.3	1.1	27.3	16.4	3.1
Tc-h1	11.5	79.3	52.0	14.4	25.4	27.9	67.8	17.9	112.0	203.0	21.0	166.0	12.7	6.2	451.0	4.4	0.9	16.6	11.9	2.2
Tc-h2	4.9	29.3	23.9	11.6	15.5	12.3	26.3	7.6	53.7	229.0	34.5	50.6	5.1	2.4	179.0	1.4	0.4	6.7	5.2	1.2
Tc-h3	15.5	104.0	88.3	16.7	40.7	50.0	104.0	26.3	161.0	157.0	26.0	195.0	16.5	7.4	796.0	5.2	1.1	25.0	15.3	2.6
Tc-h5	12.7	96.3	65.0	16.0	30.9	30.0	60.8	16.7	105.0	90.1	26.1	144.0	14.3	6.1	369.0	3.8	1.0	15.3	11.8	2.4
Tt-h1	6.2	40.2	24.9	18.5	13.1	6.18	32.3	6.9	43.6	256.0	20.1	287.0	10.4	1.6	164.0	7.3	0.8	10.6	10.1	2.0
Tt-1	9.1	42.9	38.4	14.5	29.0	29.0	63.0	14.6	110.0	193.0	20.4	163.0	14.6	8.4	276.0	4.2	3.0	27.2	14.9	2.0
Tt-2	8.6	50.1	49.2	15.4	29.0	34.8	70.7	15.8	98.6	160.0	19.9	148.0	13.4	7.5	347.0	3.9	1.1	29.6	12.3	2.7
Tt-3	10.1	56.3	47.7	17.0	32.6	36.2	69.2	14.6	111.0	150.0	25.4	177.0	15.6	6.7	315.0	4.6	1.2	25.7	11.6	1.8
Ja-h2	7.8	53.8	34.5	21.7	17.6	9.34	42.2	9.0	55.4	146.0	22.0	277.0	10.9	2.3	199.0	7.0	0.8	11.7	9.7	1.9
Ja-h9	15.1	110.0	65.6	18.5	32.6	33.8	80.8	19.4	140.0	159.0	26.9	159.0	15.4	7.7	420.0	4.3	1.1	19.9	14.2	2.7
Ja-h10	16.6	127.0	77.5	16.0	32.5	32.4	76.1	23.1	172.0	96.7	25.7	153.0	16.0	9.3	524.0	4.2	1.2	15.7	15.6	2.8
Ja-h14	20.6	121.0	105.0	22.4	61.8	31.7	90.6	28.8	182.0	55.3	45.8	236.0	21.3	19.4	696.0	6.3	1.4	9.1	20.3	3.3
Ta-1	12.9	85.0	70.6	17.0	40.1	51.4	89.5	22.2	168.0	112.0	34.9	190.0	19.2	11.2	432.0	4.6	1.5	19.7	16.0	2.8
Ta-2	12.9	70.0	84.6	18.1	52.2	51.9	84.6	20.9	126.0	74.2	37.3	219.0	19.6	11.8	532.0	5.6	1.1	20.8	14.3	3.2
Jy-h2	20.9	147.0	112.0	14.2	33.0	17.6	76.4	30.3	148.0	139.0	42.1	269.0	20.4	9.2	438.0	7.6	1.5	19.1	18.8	5.2
Jy-h1	21.5	158.0	95.2	11.9	34.1	25.7	80.0	32.6	160.0	139.0	42.9	238.0	17.0	9.9	481.0	6.9	1.2	19.5	16.3	4.3
Jy-1	8.2	50.9	40.2	9.7	28.5	29.4	65.2	15.9	75.6	121.0	30.2	202.0	14.0	5.0	364.0	4.8	0.9	21.0	8.8	2.4
Jm-1	6.8	46.1	46.0	16.1	42.8	34.0	64.2	13.2	84.1	312.0	12.5	95.6	11.2	9.7	441.0	2.5	0.7	26.3	9.6	2.8
Jm-2	6.6	55.1	41.6	11.3	30.8	26.4	53.2	14.2	116.6	85.8	18.5	200.0	13.7	11.1	321.0	5.0	0.8	13.5	9.2	1.8

表 3 济源盆地中生代泥岩稀土元素分析结果(10⁻⁶)

Table 3 The rare earth elements (10⁻⁶) of the Mesozoic sediments from the Jiyuan basin

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	La/Yb	(La/Yb) _N	δEu
Tl-h2	38.3	73.2	8.5	32.1	5.9	1.0	5.5	0.8	4.6	0.9	2.5	0.3	2.2	0.3	176.1	9.3	17.3	11.7	0.5
Th-h1	33.5	69.7	8.0	30.6	6.1	1.2	5.5	0.8	4.6	0.9	2.4	0.3	2.3	0.4	166.3	8.7	14.6	9.8	0.6
Th-h2	31.5	64.4	7.6	28.8	5.7	1.1	5.2	0.8	4.7	0.9	2.6	0.4	2.3	0.3	156.2	8.1	13.5	9.1	0.6
Th-h3	30.6	65.4	7.5	29.2	5.7	1.3	5.2	0.8	4.5	0.9	2.4	0.3	2.3	0.3	156.3	8.4	13.5	9.1	0.7
Th-h4	40.7	76.8	8.8	33.8	6.6	1.3	6.1	0.9	5.3	1.0	2.8	0.4	2.7	0.4	187.5	8.6	15.4	10.4	0.6
Te-h1	42.2	79.5	9.0	34.0	6.0	1.3	5.3	0.7	4.0	0.8	2.2	0.3	2.1	0.3	187.7	11.0	19.9	13.4	0.7
Te-h2	43.4	79.8	9.3	34.6	5.9	1.3	5.0	0.7	3.8	0.7	2.1	0.3	2.1	0.3	189.3	11.6	20.9	14.1	0.7
Te-h3	43.6	85.4	9.7	35.7	6.3	1.4	5.1	0.8	4.1	0.8	2.3	0.4	2.4	0.4	198.1	11.3	17.9	12.1	0.7
Te-h4	47.1	86.3	10.2	38.3	7.0	1.4	6.0	0.9	4.8	0.9	2.7	0.4	2.4	0.4	208.7	10.3	19.4	13.1	0.6
Ty-h1	41.9	77.7	10.0	37.9	6.6	1.4	5.0	0.7	3.4	0.7	2.1	0.3	2.1	0.3	190.1	12.0	19.9	13.4	0.7
Ty-h2	46.6	86.4	10.0	38.7	7.1	1.5	6.0	0.9	4.7	0.9	2.5	0.4	2.3	0.4	208.2	10.6	20.4	13.7	0.7
Ty-h3	41.9	68.6	9.1	34.4	6.4	1.4	5.7	0.9	4.7	0.9	2.6	0.4	2.4	0.4	179.7	9.1	17.8	12.0	0.7
Ty-h4	44.8	68.8	9.6	36.0	6.6	1.4	5.7	0.9	4.7	0.9	2.6	0.4	2.4	0.4	185.0	9.4	18.9	12.7	0.7
Tc-h1	31.0	62.1	7.1	26.5	4.9	1.0	4.4	0.7	3.5	0.8	2.1	0.3	2.1	0.3	146.8	9.4	15.0	10.1	0.7
Tc-h2	72.9	46.9	11.1	38.7	6.1	1.0	5.5	0.8	4.7	0.9	2.4	0.3	1.8	0.3	193.5	10.5	39.6	26.7	0.5
Tc-h3	33.2	60.7	8.7	33.6	6.4	1.4	5.5	0.8	4.5	0.9	2.7	0.4	2.8	0.4	162.0	8.0	12.0	8.1	0.7
Tc-h5	33.6	68.0	7.9	29.7	5.6	1.1	5.3	0.8	4.6	0.9	2.6	0.4	2.5	0.4	163.4	8.3	13.3	9.0	0.6
Tt-h1	32.7	65.0	7.6	27.9	5.1	0.8	4.5	0.7	3.5	0.7	1.9	0.3	1.8	0.3	152.6	10.3	18.1	12.2	0.5
Tt-1	35.7	75.4	8.9	36.0	5.9	1.1	5.8	0.8	4.7	0.8	2.4	0.3	2.3	0.4	180.5	9.3	15.8	10.7	0.6
Tt-2	34.2	74.8	8.9	35.7	6.1	1.2	5.6	0.8	4.7	0.8	2.6	0.4	2.5	0.4	178.7	9.0	13.6	9.2	0.6
Tt-3	38.2	83.2	9.8	40.3	6.8	1.4	6.9	0.9	5.9	1.1	3.2	0.5	3.1	0.5	201.7	8.2	12.4	8.4	0.6
Ja-h2	31.1	63.9	7.4	28.1	5.3	0.9	4.7	0.7	3.9	0.8	2.2	0.3	2.0	0.3	151.7	9.2	15.5	10.4	0.6
Ja-h9	33.2	66.8	7.9	29.5	5.7	1.1	5.2	0.8	4.8	1.0	2.8	0.4	2.8	0.4	162.4	7.9	12.0	8.1	0.6
Ja-h10	39.4	72.3	8.2	30.5	5.6	1.1	5.1	0.8	4.6	0.9	2.8	0.4	2.8	0.4	174.9	8.8	14.0	9.4	0.6
Ja-h14	57.0	99.5	11.6	42.8	7.6	1.5	7.0	1.1	6.9	1.4	4.2	0.6	4.1	0.6	246.0	8.5	13.9	9.4	0.6
Ja-1	50.4	110.0	12.7	51.4	8.5	1.8	8.5	1.2	8.0	1.5	4.6	0.7	4.4	0.8	264.4	7.9	11.5	7.7	0.6
Ja-2	51.8	119.0	13.8	56.9	10.1	2.2	9.8	1.4	8.5	1.6	4.6	0.7	4.2	0.6	285.0	8.1	12.2	8.2	0.7
Jy-h2	71.6	125.0	13.0	44.7	6.9	1.3	6.5	1.0	6.0	1.3	4.3	0.7	4.6	0.7	287.6	10.4	15.5	10.4	0.6
Jy-h1	59.5	105.0	11.6	42.1	6.9	1.4	6.5	1.0	6.4	1.4	4.2	0.7	4.4	0.7	251.8	9.0	13.5	9.1	0.6
Jy-1	39.5	93.6	11.2	47.1	8.2	1.8	7.8	1.1	7.0	1.3	3.8	0.5	3.5	0.7	227.0	7.9	11.4	7.7	0.7
Jm-1	24.3	49.5	6.0	23.5	3.8	0.8	3.7	0.5	2.8	0.5	1.5	0.2	1.5	0.3	118.8	9.8	16.6	11.2	0.7
Jm-2	30.8	70.6	8.4	34.4	6.0	1.2	5.5	0.8	4.7	0.9	2.5	0.4	2.4	0.4	168.9	8.7	12.8	8.7	0.6

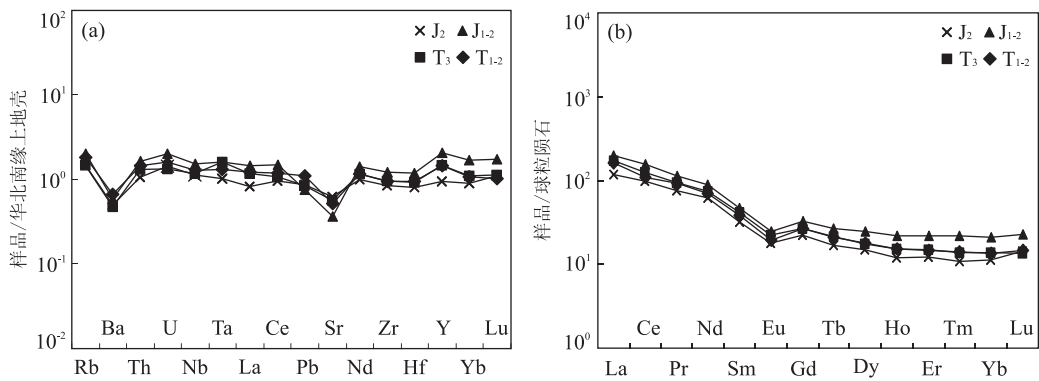


图 3 济源盆地中生代泥岩微量元素华北南缘上地壳标准化图(a)和稀土元素球粒陨石标准化图(b)

Fig. 3 Southern North China upper crust-normalized spider diagram (a) of the Mesozoic sediments from Jiyuan basin, and Chondrite-normalized REE patterns (b) of the Mesozoic sediments from Jiyuan basin

2.2 微量元素特征

将 4 个阶段样品微量元素的平均值用华北克拉通南缘上地壳元素含量(Gao *et al.*, 1998)进行标准化处理(图 3a), 4 个阶段样品的 Ba 和 Sr 均出现明显亏损,而在早一中三叠世、晚三叠世和早一中侏罗世样品中 Y 元素出现轻微富集,特别是早一中侏罗世样品, Yb 和 Lu 含量也明显增高,其他微量元素总体上分布平坦。

在图 3b 中, 4 个阶段的样品均表现出轻稀土(LREE)富集,重稀土(HREE)平坦的配分模式,且具有明显的 Eu 负异常。ΣREE 含量在早一中三叠世的平均值为 184×10^{-6} ,晚三叠世时,有降低的趋势,平均值为 172×10^{-6} ,虽然早一中侏罗世该值升高到 228×10^{-6} ,但表现出两个极端:其中 3 个样品集中在 $152 \times 10^{-6} \sim 175 \times 10^{-6}$,另外 6 个样品分布于 $228 \times 10^{-6} \sim 288 \times 10^{-6}$,到中侏罗世晚期,ΣREE 平均值又降到 144×10^{-6} 。LREE/HREE 比值在早一中三叠世和中侏罗世后期样品中较高,平均值分别为 9.88 和 9.94,在晚三叠世和早一中侏罗世样品中较低,平均值分别为 9.13 和 8.94。Eu/Eu* 平均值变化不明显,总体在 0.61~0.67,低值(0.61 和 0.62)出现在晚三叠世和早一中侏罗世样品中。(La/Yb)_N 平均值从早一中三叠世到早一中侏罗世逐渐降低,分别为 11.89、9.65 和 8.94,在中侏罗世晚期样品中又升高到 9.94。

3 讨论

3.1 化学风化作用与源区构造活动

Nesbitt and Young(1982)提出可用细碎屑岩的化学风化指数(CIA)来定量评价源区岩石遭受化

学风化的强度, $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$, 式中均为摩尔百分含量, CaO* 按照 McLennan(1993)的方法计算。CIA 值越高,源区岩石化学风化作用越强烈, CIA 值接近 50, 则源区岩石基本未遭受化学风化。

济源盆地中生代泥岩样品的 CIA 值具有明显的演化趋势(表 3)。早一中三叠世样品的 CIA 值为 55~71, 平均值为 62.7, 之后持续升高, 晚三叠世样品的 CIA 值为 68~81, 平均值为 72.8, 早一中侏罗世样品的 CIA 值为 66~81, 平均值达到 76.8, 而中侏罗世晚期样品的 CIA 值有降低的趋势, 为 66~70, 平均值为 67.9。该值可以在图 4a 上反映出来, 不同阶段样品投点显示与正常风化趋势线(平行于 A-CN 轴)略有偏移, 反映了 K 的富集, Panahi *et al.* (2000)提出 K 的校正方法: $K_2O_{corr} = [m \cdot A + m \cdot (C^* + N)] / (1 - m)$, 其中 A, C*, N, K 分别为 Al_2O_3 , CaO*, Na_2O , K_2O 的摩尔量, 而 $m = K / (A + C^* + N + K)$ 则是根据母岩的成分计算(笔者认为原岩与华北南缘上地壳相当)。经校正后, CIA_{corr} 值有所增高(表 3), 同时剔除可能会导致 CIA 值出现较大误差的样品(CaO 含量大于 10%), 得出早一中三叠世、晚三叠世、早一中侏罗世和中侏罗世晚期样品的 CIA_{corr} 平均值分别为 68.5、76.4、86.0 和 73.7, 表明除了早一中侏罗世样品外, 沉积物经历的化学风化作用并不强烈(CIA 普遍 < 80), 属中等风化强度范围(60~80, Fedo *et al.*, 1995; 李双应等, 2014; 李乐等, 2015)。

邵菁清和杨守业(2012)对长江流域悬浮物粒度与 CIA 值的相关性研究表明, 水动力分选可以影响河流悬浮物 CIA 值的变化: 粒度越细, 粘土组分相对富集, CIA 值越高。来自济源盆地中生代的样品

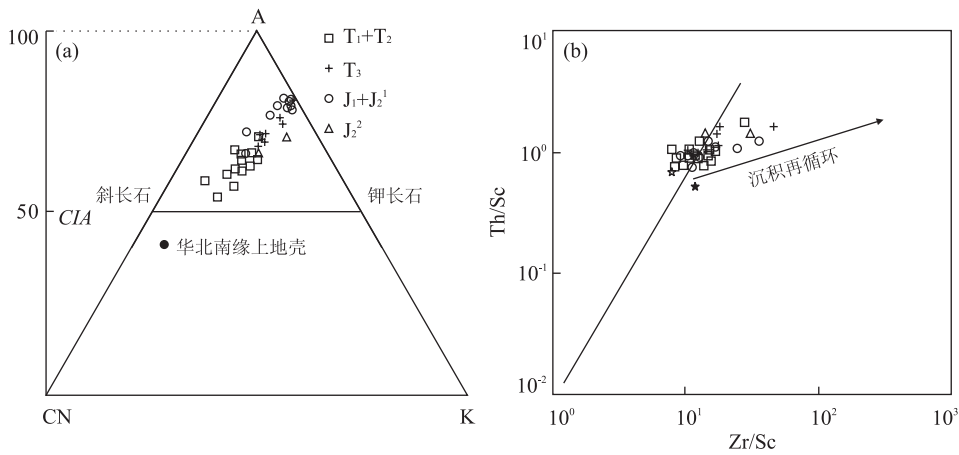


图 4 济源盆地中生代泥岩 A-CN-K 图解(a)和济源盆地中生代泥岩 Th/Sc-Zr/Sc 图解(b)

Fig. 4 A-CN-K diagram (a) of the Mesozoic sediments from Jiyuan basin, and Th/Sc-Zr/Sc diagram (b) of the Mesozoic sediments from Jiyuan basin

华北南缘上地壳数据来自 Gao *et al.* (1998)

均属泥岩,粒径较细且变化不大,因此可以用 Al/Si 值来反映沉积物颗粒大小(Bouchez *et al.* , 2011),4 个阶段样品的 Al/Si 平均值分别为 0.29、0.29、0.36 和 0.27,其比值没有太大差别,说明 CIA 值受沉积物粒度的影响非常弱。

沉积物的再循环使粘土矿物比例增加,从而使 CIA 值得到累积(田洋等,2015),样品的 CIA 值可能是沉积时期与早期风化作用的综合体现(Yang *et al.* , 2016). Cox *et al.* (1995)提出成分变异指数(ICV)来判断沉积物是否经历了再循环, $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$ (式中均为质量百分含量),当 ICV 值 >1 时,沉积物可被认为是初次沉积于构造活动的地区,当 ICV 值 <1 时,沉积物可能经历了再循环,形成于构造平静环境中,也可能是第一次循环的沉积物经历了强烈的化学风化作用(Cox *et al.* , 1995;田洋等,2015). 来自济源盆地早—中三叠世样品的 ICV 值为 1.02~2.06,平均值为 1.50,晚三叠世样品的 ICV 值为 0.99~8.43,平均值为 3.02,早—中侏罗世样品的 ICV 值为 0.66~3.24,平均值为 1.20,其中早侏罗世 1 个样品的 ICV 值达到了 3.24,如果去掉的话,则平均值为 0.94,低值(0.66~0.79)从早侏罗世样品中开始出现,中侏罗世晚期样品的 ICV 值为 0.98~2.91,平均值为 1.95. ICV 值显示济源盆地三叠纪的沉积物以初次沉积为主,最大值出现在晚三叠世,是构造活动增强的体现,早—中侏罗世的沉积物可能经历了再循环,该特征在图 4b 上也能够反映出来(McLennan *et*

al. , 1993). 但从整体来看,ICV 与 CIA 并没有明显的负相关关系,沉积物的再循环不是影响 CIA 值的主要因素。

温暖湿润的气候有利于化学风化作用的进行, CIA 值较高;相反,寒冷干燥的气候条件下, CIA 值较低(Nesbitt and Young, 1982; Yang *et al.* , 2014a). Royer *et al.* (2004)提出在二叠纪—三叠纪界线附近,地球表面温度大概升高了 6~8 °C,导致全球变暖,使得高纬度地区土壤的风化速率快速增加(Retallack, 1999). 这种炎热的气候可能持续到早三叠世,该时期大量的红色碎屑岩层被认为是炎热干旱气候条件的标志(Retallack *et al.* , 1996);王自强(1989)通过植物化石组合的研究,也认为华北早三叠世为极度干旱的气候. 中三叠世开始该地区逐渐多雨而潮湿,被认为处于半干旱一半潮湿的温暖气候之中(Preto *et al.* , 2010). 晚三叠世,受强烈季风环流的影响,雨水进一步增加(Simms and Ruffell, 1989; Colombi and Parrish, 2008),气候变得温暖而潮湿,在济源盆地上三叠统中出现了大量煤线及薄的煤层(张国成等,2005). 早—中侏罗世古气温经历了快速攀升到急剧降低的过程,早侏罗世持续温暖潮湿,在义马地区义马组形成了巨厚煤层,但到了中侏罗世,气候骤然变得寒冷,古海水温度可能降低了 10~15 °C(Dromart *et al.* , 2003; Dera *et al.* , 2011). 因此,在中侏罗世之前,古气候条件(降雨量的增加和较高的温度)是逐步有利于化学风化作用的进行,使得 CIA 值升高. 但是与华北南缘二叠纪温暖湿润气候背景下山西组、石盒子组的泥岩

样品进行比较($CIA > 80$, Yang *et al.*, 2014a), 济源盆地三叠纪泥岩具有明显过低的 CIA 值. 这一特征也可以反映在古地理位置上, 华北板块三叠纪时期, 位于纬度 $18 \sim 31^\circ$ 之间(杨振宇等, 1998), 属热带—亚热带地区. Nesbitt *et al.* (1997) 认为在热带—亚热带地区通常会发生强烈的化学风化作用, CIA 值介于 $80 \sim 100$. 因此, 必须有能够降低济源盆地三叠纪泥岩 CIA 值的机制.

构造活动是控制 CIA 值变化的另一个重要因素, 被动构造背景往往具有更强烈的风化作用 (McLennan *et al.*, 1990), 使得 CIA 值较高. 反之, 过低的 CIA 值反映了济源盆地三叠纪沉积物物源应来自于活动的构造背景. 虽然早—中侏罗世沉积物的 CIA_{corr} 值介于 $80 \sim 100$, 满足气候控制的风化作用, 但是其 ICV 值和 $Th/Sc-Zr/Sc$ 图解显示沉积物具有再循环的特征. Yang *et al.* (2014b) 对济源盆地砂岩骨架成分的统计认为, 晚三叠世后期开始, 沉积物来自于再旋回造山带源区, 且碎屑锆石年龄数据显示为秦岭造山带的物源, 所以, 早—中侏罗世样品高的 CIA 值, 也可能与活动的构造背景相关, 是造山带沉积物再循环的结果.

3.2 泥岩构造环境分析

Roser and Korsch (1986) 提出了 K_2O/Na_2O-SiO_2 构造环境判别图解, 该图解存在碳酸盐的影响, 导致 SiO_2 含量降低, 在消除 CaO 和挥发分所占的质量分数后, 将主量元素氧化物总量回算为 100% (图 5). 在校正后的图解中, 早—中三叠世及晚三叠世部分样品落在活动大陆边缘区域, 早—中侏罗世、中侏罗世晚期样品主要落在被动的大陆边缘区域. 该图能够清楚地显示出 K_2O/Na_2O 值随构

造活动增强(被动大陆边缘→活动大陆边缘→岛弧)而降低, 实际上反映的是沉积物成熟度的降低.

Bhatia (1985) 总结了不同构造背景下杂砂岩的 REE 组成参数特征(表 4). 与砂岩相比, 泥岩样品具有较高的稀土元素总量 (Condie, 1991), 许中杰等 (2013) 把泥岩样品的 REE 特征值除以 1.2, 得到同期相当于杂砂岩的校正值, 用以对比 Bhatia (1985) 总结的不同构造环境下稀土元素的特征值. 本文在进行对比的时候, 只校正了 La、Ce 和 ΣREE 的含量, 因为 LREE/HREE、La/Yb、 $(La/Yb)_N$ 和 Eu/Eu^* 本就是以比值的形式出现的. 笔者经对比发现, 早—中三叠世、晚三叠世样品中 La、Ce 和 ΣREE 含量处在大陆岛弧和活动大陆边缘构造背景下的特征值之间. 早—中侏罗世样品中 Ce 和 ΣREE 含量与活动大陆边缘接近. 中侏罗世晚期, La、Ce 和 ΣREE 含量具有大陆岛弧的特征. Eu/Eu^* 介于大陆岛弧和活动大陆边缘之间, 低值出现在晚三叠世、早—中侏罗世样品中, 与活动大陆边缘接近. LREE/HREE、La/Yb 和 $(La/Yb)_N$ 值整体偏高, 但具有一定的演化特征, 低值出现在早—中侏罗世样品中, 位于活动大陆边缘与被动大陆边缘之间. 该值反映了轻重稀土的分异情况, 从大洋岛弧到大陆岛弧到活动大陆边缘再到被动大陆边缘, LREE 越来越富集, 其比值增大. 因此, 早—中侏罗世样品可能来自更活跃的构造背景, 而早—中三叠世样品较高的值可能与上隆基底的花岗岩剥蚀有关, 或者反映了克拉通背景下沉积物的加入. Bhatia and Crook (1986) 建立了 La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10 和 Th-Co-Zr/10 构造环境判别图解, 本文样品总体上表现一致, 落入活动大陆边缘与大陆岛弧区域(图 6). 考虑到被动大陆边

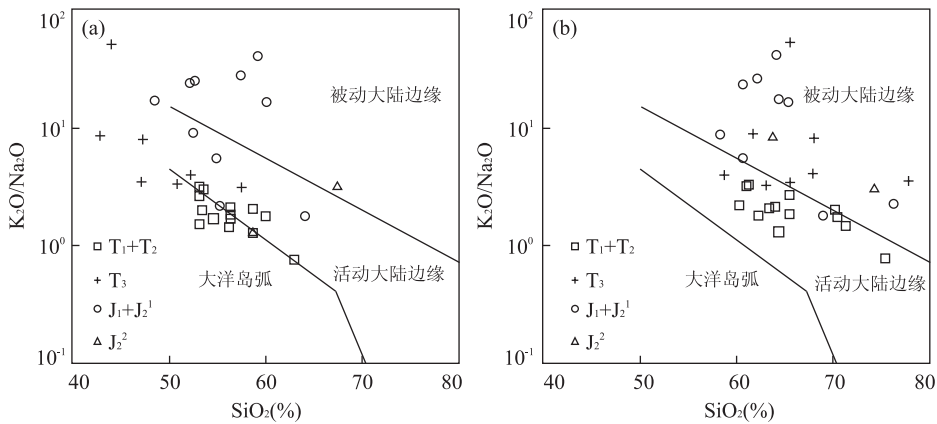


图 5 济源盆地中生代泥岩物源区 K_2O/Na_2O-SiO_2 构造环境判别

Fig. 5 K_2O/Na_2O-SiO_2 diagram of the Mesozoic sediments from Jiyuan basin
a. SiO_2 校正前; b. SiO_2 校正后

表 4 4 阶段样品与不同构造环境杂砂岩稀土元素特征参数的对比

Table 4 Compared the REE values of four stages with the data from different tectonic settings

构造背景	La	Ce	Σ REE	LREE/HREE	La/Yb	(La/Yb) _N	Eu/Eu*
大洋岛弧	8±1.7	19±3.7	58±10	3.8±0.9	4.2±1.3	2.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	27±4.5	59±8.2	146±20	7.7±1.7	11±3.6	7.5±2.5	0.79±0.13
活动大陆边缘	37	78	186	9.1	12.5	8.5	0.60
被动大陆边缘	39	85	210	8.5	15.9	10.8	0.56
T ₁₊₂	41	34*	76	63*	184	153*	9.88
T ₃	39	33*	67	56*	172	143*	9.13
J ₁₋₂	48	40*	95	79*	228	190*	8.63
J ₂	28	23*	60	50*	144	120*	9.26

注:大洋、大陆岛弧以及活动、被动大陆边缘数据据 Bhatia(1985);其他为本文值,其中*为校正值。

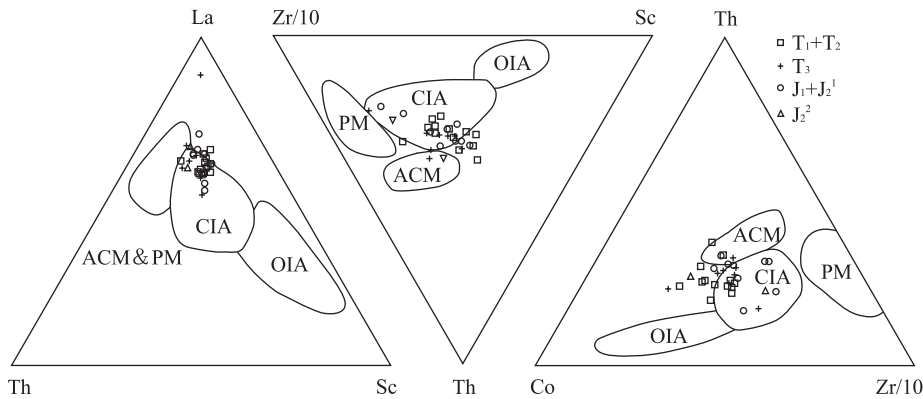


图 6 济源盆地中生代泥岩 La-Th-Sc (a)、Th-Sc-Zr/10 (b) 及 Th-Co-Zr/10 (c) 构造环境判别

Fig. 6 La-Th-Sc (a), Th-Sc-Zr/10 (b) and Th-Co-Zr/10 (c) diagrams of the Mesozoic sediments from Jiyuan basin

OIA. 大洋岛弧; CIA. 大陆岛弧; ACM. 活动大陆边缘; PM. 被动大陆边缘

缘沉积物也可以包含较多大陆岛弧的信息(田洋等, 2015),其判别结果可以与图 5 进行对比,反映了济源盆地中生代泥岩物源区形成于大陆岛弧、活动大陆边缘及被动大陆边缘的构造背景中。

3.3 物源区分析

沉积物由源区搬运到盆地过程中,一些元素相对稳定,能够指示源区组成(Bhatia, 1985; Bhatia and Crook, 1986),如果沉积物经历了再循环,则它们指示了初次沉积时源区的组成。从济源盆地中生代泥岩的构造环境判别结果来看,早一中三叠世、晚三叠世样品具有初次沉积的特征,沉积物主要来自于活动大陆边缘。活动大陆边缘沉积物可以来自上隆基底的花岗岩、花岗片麻岩和硅铝质火山岩以及陆缘弧(方国庆和刘德良, 2000),这与中三叠世砂岩骨架成分统计结果落入克拉通基底隆升区一致(Yang *et al.*, 2014b)。由于济源盆地位于华北克拉通内部,能够提供来自被动大陆边缘环境中的沉积物,但正常的大陆岛弧物质不可能越过弧后盆地进入到济源盆地内;一种情况可能是大陆岛弧与陆缘弧不易区分,另外一种情况可能是早期的大陆岛弧

已经拼贴到克拉通边缘上,即发生过弧—陆碰撞,后随克拉通基地的隆升一起向济源盆地提供碎屑物。早一中侏罗世样品具有再循环的特征,它们不能够直接反映盆地边缘的构造环境,有可能是造山带在隆升过程中早期沉积物被剥露进入再循环的结果。因此,能够向济源盆地提供沉积物的源区必须满足以下两点:(1)三叠纪时,华北克拉通基地发生隆升,且盆地边缘具备陆缘弧或早期发生过弧—陆碰撞的特征;另外,样品的 ICV 值在晚三叠世达到最大,也可能显示了克拉通基底的加剧隆升。(2)至少在早侏罗世时,盆地边缘造山带已经形成。

对晚古生代碎屑锆石年代学及 Hf 同位素的研究结果表明,华北北部内蒙古隆起是华北克拉通的重要物源区(Li *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2014)。在古亚洲洋向华北板块之下俯冲的背景下,华北北缘成为安第斯型活动大陆边缘,而位于华北克拉通与兴蒙造山带之间的内蒙古隆起则成为了陆缘弧(Xiao *et al.*, 2003)。马收先等(2014)在华北北部早一中三叠世粗粒碎屑岩层中,发现大量花岗质砾石,说明华北克拉通北缘基底已经出露。结合内蒙古

隆起此时整体处于隆升状态(张拴宏等,2007;马收先等,2014),说明其满足构造侵蚀增强而导致CIA值降低,该早一中三叠世砂岩骨架颗粒成分统计结果也与Yang *et al.* (2014b)统计结果一致。另外,下一中三叠统在整个华北地区都是可以对比的。因此,内蒙古隆起有可能为济源盆地下一中三叠统提供碎屑物(Li *et al.*, 2010),但不会是上三叠统一中侏罗统的主要源区,其原因是:(1)晚三叠世济源盆地沉积沉降中心向南迁移(杨文涛等,2014);(2)上三叠统砂岩骨架颗粒成分统计显示沉积物来自再旋回造山带源区,不再由克拉通基底提供,且砂岩中出现了882~738 Ma碎屑锆石(Yang *et al.*, 2014b),内蒙古隆起和兴蒙造山带内是缺乏这段年龄记录的(陈岳龙等,2012);(3)泥岩的ICV值表明,晚三叠世边缘构造活动要强于早一中三叠世,这一特征更符合秦岭造山带在晚三叠世的造山活动;(4)早一中侏罗世沉积物地球化学特征显示其具有明显再循环的特征,除了新元古代的碎屑锆石外,还出现了400~500 Ma的年龄峰值(Yang *et al.*, 2014b);即使内蒙古隆起能够在早一中三叠世时期向济源盆地提供碎屑物,但其碎屑组成是存在差异的。马收先等(2011)报道了华北地块北缘上石炭统一中三叠统来自内蒙古隆起的碎屑锆石年龄组成,发现早三叠世刘家沟组晚古生代碎屑锆石年龄峰值为325~290 Ma,而济源盆地中三叠世油房庄组缺乏这段年龄的碎屑锆石,其峰值为250~270 Ma(Yang *et al.*, 2014b)。因此,必须考虑华北南部秦岭造山带对济源盆地沉积物的贡献。

秦岭造山带主体是由扬子、秦岭及华北3个板块分别沿勉略、商丹两条缝合带汇聚拼合而成(张国伟等,1995),其中商丹洋盆的扩张至少发生在晚前寒武纪,至寒武纪晚期开始向华北板块俯冲,导致洋盆的封闭和弧-陆碰撞(Yu *et al.*, 2016);而勉略洋盆的孕育、发展和形成是在晚古生代,其向秦岭微板块之下俯冲的时限发生在二叠纪一中三叠世之间(Dong *et al.*, 2011, 2015; Zhou *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Yan *et al.*, 2016),形成了华北板块南缘活动大陆边缘的构造环境(Wang *et al.*, 2015)。早一中三叠世时,秦岭造山带处在板块俯冲的阶段,这可能会引起华北克拉通南缘基底的隆升;之后的造山作用,也会使济源盆地三叠统之上的沉积物出现再循环的特征。因此,秦岭造山带可能是济源盆地的重要物源区。早一中侏罗世具有再循环特征的沉积物物源初次沉积应该在弧后盆地中,结合

秦岭造山带的构造演化史(Dong *et al.*, 2011, 2015; Dong and Santosh, 2016),它们可能来自于二郎坪弧后盆地沉积物的再循环,体现了泥岩物源地球化学特征具有构造背景的继承性(李双应等, 2004),这也与早一中侏罗世沉积物中保存有大量400~500 Ma的碎屑锆石一致(Yang *et al.*, 2014b)。

4 结论

(1)CIA值可能会受到沉积分选、沉积物的再循环、古气候、构造活动的影响,其中气候变化控制着济源盆地中生代泥岩CIA值的总体走势,而源区活动的构造背景从整体上降低了CIA值,特别是在晚三叠世时期,样品的ICV值可能显示了盆地边缘构造活动的加剧,沉积物的再循环可能对侏罗系CIA值的增高产生了影响。

(2)泥岩源区的构造环境判别结果显示,济源盆地中生代泥岩物源区主要形成在活动大陆边缘和被动大陆边缘构造背景中,同时亦包含有大陆岛弧的信息。其中三叠系沉积物具有初次沉积的特征,可能来自盆地边缘基底的隆升、陆缘弧或早期发生过弧-陆碰撞的源区;侏罗系沉积物具有再循环的特征,可能是造山带在隆升过程中早期沉积物被剥露的结果。

(3)华北克拉通基底和秦岭造山带是济源盆地的重要物源区,特别是在侏罗纪时期,来自秦岭造山带的物质供应非常明显,体现了盆地南缘由克拉通基底的隆升到秦岭造山带剥露的构造演化过程。

References

- Bhatia, M. R., 1985. Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control. *Sedimentary Geology*, 45(1-2): 97-113. doi:10.1016/0037-0738(85)90025-9
- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193. doi:10.1007/BF00375292
- Bouchez, J., Gaillardet, J., France-Lanord, C., et al., 2011. Grain Size Control of River Suspended Sediment Geochemistry: Clues from Amazon River Depth Profiles. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(3): 428-452. doi:10.1029/2010GC003380

- Buatois, L. A., Mángano, M. G., Wu, X. T., et al., 1996. Trace Fossils from Jurassic Lacustrine Turbidites of the Anyao Formation (Central China) and Their Environmental and Evolutionary Significance. *Ichnos*, 5 (4): 287—303. doi:10.1080/10420949609380137
- Chen, Y. L., Li, D. P., Wang, Z., et al., 2012. History of Formation and Evolution on the Crust around the Ordos Basin: Evidences from U-Pb Dating and Hf Isotopic Composition of Zircons. *Earth Science Frontiers*, 19 (3): 147—166 (in Chinese with English abstract).
- Colombi, C. E., Parrish, J. T., 2008. Late Triassic Environmental Evolution in Southwestern Pangea: Plant Taphonomy of the Ischigualasto Formation. *Palaios*, 23(12): 778—795. doi:10.2110/palo.2007.p07—101r
- Condie, K. C., 1991. Another Look at Rare Earth Elements in Shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 (9): 2527—2531. doi:10.1016/0016—7037(91)90370—K
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919—2940. doi:10.1016/0016—7037(95)00185—9
- Dera, G., Brigaud, B., Monna, F., et al., 2011. Climatic Ups and Downs in a Disturbed Jurassic World. *Geology*, 39 (3): 215—218. doi:10.1130/G31579.1
- Dong, Y. P., Santosh, M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29 (1): 1—40. doi:10.1016/j.gr.2015.06.009
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Neubauer, F., et al., 2011. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41 (3): 213—237. doi:10.1016/j.jseae.2011.03.002
- Dong, Y. P., Zhang, X. N., Liu, X. M., et al., 2015. Propagation Tectonics and Multiple Accretionary Processes of the Qinling Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 84—98. doi:10.1016/j.jseae.2014.10.007
- Dromart, G., Garcia, J. P., Picard, S., et al., 2003. Ice Age at the Middle-Late Jurassic Transition? *Earth and Planetary Science Letters*, 213 (3—4): 205—220. doi:10.1016/s0012—821x(03)00287—5
- Fang, G. Q., Liu, D. L., 2000. Chemical Compositions of Flysch Graywackes and Plate Tectonics. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20 (3): 105—112 (in Chinese with English abstract).
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23 (10): 921—924. doi:10.1130/0091—7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1998. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (11): 1959—1975. doi:10.1016/S0016—7037(98)00121—5
- Hao, Y. W., Luo, M. S., Xu, Z. L., et al., 2014. Division of Sedimentary Basins and Its Tectonic Evolution in North China from Neoproterozoic to Mesozoic. *Earth Science*, 39(8): 1230—1242 (in Chinese with English abstract).
- Hu, B., Yang, W. T., Song, H. B., et al., 2009. Trace Fossils and Ichnofabrics in the Heshanggou Formation of Lacustrine Deposits, Jiyuan Area, Henan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(4): 573—582 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Y., He, B., Xu, Y. G., et al., 2010. U-Pb and Hf Isotope Analyses of Detrital Zircons from Late Paleozoic Sediments: Insights into Interactions of the North China Craton with Surrounding Plates. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5): 335—346. doi:10.1016/j.jseae.2010.05.002
- Li, H. Y., Huang, X. L., 2013. Constraints on the Paleogeographic Evolution of the North China Craton during the Late Triassic-Jurassic. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70—71: 308—320. doi:10.1016/j.jseae.2013.03.028
- Li, L., Yao, G. Q., Liu, Y. H., et al., 2015. Major and Trace Elements Geochemistry and Geological Implications of Dolomite-Bearing Mudstones in Lower Part of Shahejie Formation in Tanggu Area, Eastern China. *Earth Science*, 40(9): 1480—1496 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. L., Zheng, D. S., Dai, G. Z., et al., 2014. Geochemical Characteristics of the Jurassic Argillaceous Rocks of the Jiyuan Basin, West Henan and the Implications for Environments and Provenances. *Acta Geologica Sinica*, 88 (2): 228—238 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Y., Li, R. W., Yue, S. C., et al., 2004. Geochemistry of Mesozoic Detrital Rocks and Its Constraints on Provenance in Feixi Area, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 667—676 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Y., Yang, D. D., Wang, S., et al., 2014. Characteristics of Petrology, Geochemistry, Heavy Minerals and Isotope Chronology of Upper Carboniferous Detrital Rocks in the Middle Segment of South Tianshan and Con-

- straints to the Provenance and Tectonic Evolution. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 167—184 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Zhang, G. W., 2005. Fundamental Ideas, Contents and Methods in Study of Basin and Mountain Relationships. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 101—111 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Zhang, G. W., 2008. Evolution and Geodynamics of Basin-Mountain System in East Qinling-Dabieshan and Its Adjacent Regions, China. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 1943—1960 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Su, S., Zhang, G. W., 2013. Early Mesozoic Basin Development in North China: Indications of Cratonic Deformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 221—236. doi: 10. 1016/j. jseas. 2012. 09. 011
- Ma, S. X., Meng, Q. R., Qu, Y. Q., 2011. A Study of Detrital Zircons of Late Carboniferous-Middle Triassic Strata in the Northern Margin of North China Block and Its Geological Implication. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1485—1500 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S. X., Meng, Q. R., Wu, G. L., et al., 2014. Late Paleozoic Exhumation of the Inner Mongolia Paleo-Uplift: Evidences from Sedimentary Records. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1771—1789 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., 1993. Weathering and Global Denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295—303. doi: 10. 1086/648222
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. *GSA Special Papers*, 284: 21—40. doi: 10. 1130/SPE284—p21
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., McCulloch, M. T., et al., 1990. Geochemical and Nd-Sr Isotopic Composition of Deep-Sea Turbidites: Crustal Evolution and Plate Tectonic Associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7): 2015—2050. doi: 10. 1016/0016—7037(90) 90269—Q
- Nesbitt, H. W., Fedo, C. M., Young, G. M., 1997. Quartz and Feldspar Stability, Steady and Non-Steady-State Weathering, and Petrogenesis of Siliclastic Sands and Muds. *Journal of Geology*, 105(2): 173—192. doi: 10. 1086/515908
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715—717. doi: 10. 1038/299715a0
- Panahi, A., Young, G. M., Rainbird, R. H., 2000. Behavior of Major and Trace Elements (Including REE) during Paleoproterozoic Pedogenesis and Diagenetic Alteration of an Archean Granite near Ville Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199—2220. doi: 10. 1016/S0016—7037(99)00420—2
- Preto, N., Kustatscher, E., Wignall, P. B., 2010. Triassic Climates-State of the Art and Perspectives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 290(1—4): 1—10. doi: 10. 1016/j. palaeo. 2010. 03. 015
- Qi, Y. A., Hu, B., Zhang, G. C., et al., 2007. Ichnofabrics and Their Environmental Interpretation from Middle Triassic Youfangzhuang Formation, Jiyuan Region, Western Henan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(3): 372—379 (in Chinese with English abstract).
- Retallack, G. J., Veevers, J. J., Morante, R., 1996. Global Coal Gap between Permian-Triassic Extinction and Middle Triassic Recovery of Peat-Forming Plants. *GSA Bulletin*, 108: 195—207. doi: 10. 1130/0016—7606(1996)108<0195:GCGBPT>2. 3. CO;2
- Retallack, G. J., 1999. Postapocalyptic Greenhouse Paleoclimate Revealed by Earliest Triassic Paleosols in the Sydney Basin, Australia. *GSA Bulletin*, 111(1): 52—70. doi: 10. 1130/0016—7606(1999)111<0052:PGPRBE>2. 3. CO;2
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635—650. doi: 10. 1086/629071
- Royer, D. L., Berner, R. A., Montañez, I. P., et al., 2004. CO₂ as a Primary Driver of Phanerozoic Climate. *GSA Today*, 14(3): 4—10. doi: 10. 1130/1052—5173(2004) 014<4:CAAPDO>2. 0. CO;2
- Shao, J. Q., Yang, S. Y., 2012. Does Chemical Index of Alteration (CIA) Reflect Silicate Weathering and Monsoonal Climate in the Changjiang River Basin? *Chinese Science Bulletin*, 57(11): 933—942 (in Chinese).
- Simms, M. J., Ruffell, A. H., 1989. Synchronicity of Climatic Change and Extinctions in the Late Triassic. *Geology*, 17(3): 265. doi: 10. 1130/0091—7613(1989) 017<0265:soccae>2. 3. co;2
- Tian, Y., Zhao, X. M., Wang, L. Z., et al., 2015. Geochemistry of Clastic Rocks from the Triassic Xujiahe Formation, Lichuan Area, Southwestern Hubei: Implications for Weathering, Provenance and Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 261—272 (in Chinese with English abstract).

- Wang, M., Qi, Y. A., Li, D., et al., 2014. Ichnofabrics and Their Environmental Interpretation from the Fluvial Deposits of the Middle Triassic Youfangzhuang Formation in Western Henan, Central China. *Journal of Earth Science*, 25(4): 648–661. doi:10.1007/s12583-014-0454-2
- Wang, Q. F., Deng, J., Liu, X. F., et al., 2015. Provenance of Late Carboniferous Bauxite Deposits in the North China Craton: New Constraints on Marginal Arc Construction and Accretion Processes. *Gondwana Research*, 38: 86–98. doi:10.1016/j.gr.2015.10.015
- Wang, Y., Li, H. M., 2008. Initial Formation and Mesozoic Tectonic Exhumation of an Intracontinental Tectonic Belt of the Northern Part of the Taihang Mountain Belt, Eastern Asia. *Journal of Geology*, 116(2): 155–172. doi:10.1086/529153
- Wang, Z. Q., 1989. Permian Gigantic Palaeobotanical Events in North China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 28(3): 314–343 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. T., 1985. Trace Fossils and Their Environmental Significance in Non-marine Turbidite Deposits from Jiyuan-Yima Basin, Western Henan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(3): 23–31, 137–138 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 8-1–8-20. doi:10.1029/2002TC001484
- Xu, Z. J., Cheng, R. H., Wang, L. L., et al., 2013. Mineralogical and Element Geochemical Characteristics of the Late Triassic-Middle Jurassic Sedimentary Rocks in Southwestern Fujian Province: Constraints on Changes of Basin Tectonic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2913–2924 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Li, T. D., Ji, S. C., et al., 2008. Advances and Prospective of Continental Dynamics: Theory and Application. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1433–1444 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Fu, C. L., Wang, Z. Q., et al., 2016. Late Paleozoic Subduction-Accretion along the Southern Margin of the North Qinling Terrane, Central China: Evidence from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Wuguan Complex. *Gondwana Research*, 30: 97–111. doi:10.1016/j.gr.2015.05.005
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2014a. Global Continental Weathering Trends across the Early Permian Glacial to Postglacial Transition: Correlating High- and Low-Paleolatitude Sedimentary Records. *Geology*, 42(10): 835–838. doi:10.1130/G35892.1
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2016. Reconstructing Early Permian Tropical Climates from Chemical Weathering Indices. *GSA Bulletin*, 128(5–6): 739–751. doi:10.1130/B31371.1
- Yang, W. T., Wang, M., Du, Y. S., 2014. The Depositional Characteristics from Mesozoic Jiyuan Basin with Its Response to the Uplift of Qinling Orogen and Taihang Mountains. *Geological Review*, 60(2): 260–274 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. T., Yang, J. H., Wang, X. F., et al., 2014b. Uplift-Denudation History of the Qinling Orogen: Constrained from the Detrital-Zircon U-Pb Geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 89: 54–65. doi:10.1016/j.jseas.2014.03.025
- Yang, Z. Y., Ma, X. H., Huang, B. C., et al., 1998. Apparent Polar Wander Path and Tectonic Movement of the North China Block in Phanerozoic. *Science in China (Series D)*, 48(Suppl.): 44–56 (in Chinese).
- Yu, H., Zhang, H. F., Li, X. H., et al., 2016. Tectonic Evolution of the North Qinling Orogen from Subduction to Collision and Exhumation: Evidence from Zircons in Metamorphic Rocks of the Qinling Group. *Gondwana Research*, 30: 65–78. doi:10.1016/j.gr.2015.07.003
- Zhang, G. C., Zeng, Y. F., Buatois, L. A., et al., 2005. Lacustrine Deposits and Associated Trace Fossils in the Upper Part of the Tanzhuang Formation (T₂₋₃), Jiyuan Basin, Henan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 100–107 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Meng, Q. R., Lai, S. C., 1995. Structure and Tectonics of the Qinling Orogenic Belt. *Science in China (Series B)*, 25(9): 994–1003 (in Chinese).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, J., et al., 2007. Emplacement Depths of the Late Paleozoic-Mesozoic Granitoid Intrusions from the Northern North China Block and Their Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 625–638 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. F., Liu, C. Y., Liang, J. W., et al., 2010. Restoration of the Original Sedimentary Boundary of the Middle Jurassic Zhiluo Formation-Anding Formation in the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 553–569 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. J., Mao, S. D., Chen, Y. J., et al., 2015. U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopes of Detrital Zircons from the Southern Qinling Orogen: Implications for Precambrian to Phanerozoic Tectonics in Central China. *Gondwana Research*, 35: 323–337. doi:10.1016/j.gr.2015.06.003

Zhu, X. Q., Zhu, W. B., Ge, R. F., et al., 2014. Late Paleozoic Provenance Shift in the South-Central North China Craton; Implications for Tectonic Evolution and Crustal Growth. *Gondwana Research*, 25(1): 383–400. doi: 10.1016/j. gr. 2013. 04. 009

附中文参考文献

- 陈岳龙, 李大鹏, 王忠, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地周缘地壳形成与演化历史: 来自锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素组成的证据. *地学前缘*, 19(3): 147–166.
- 方国庆, 刘德良, 2000. 复理石杂砂岩的化学组成与板块构造. *沉积与特提斯地质*, 20(3): 105–112.
- 郝奕玮, 骆满生, 徐增连, 等, 2014. 华北陆块新元古代—中生代沉积盆地划分及其构造演化. *地球科学*, 39(8): 1230–1242.
- 胡斌, 杨文涛, 宋慧波, 等, 2009. 豫西济源地区早三叠世和尚沟组湖相遗迹化石及遗迹组构. *沉积学报*, 27(4): 573–582.
- 李乐, 姚光庆, 刘永河, 等, 2015. 塘沽地区沙河街组下部含云质泥岩主微量元素地球化学特征及地质意义. *地球科学*, 40(9): 1480–1496.
- 李明龙, 郑德顺, 戴光忠, 等, 2014. 豫西济源盆地侏罗系泥质岩地球化学特征及其环境和物源示踪. *地质学报*, 88(2): 228–238.
- 李双应, 李任伟, 岳书仓, 等, 2004. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约. *岩石学报*, 20(3): 667–676.
- 李双应, 杨栋栋, 王松等, 2014. 南天山中段上石炭统碎屑岩岩石学、地球化学、重矿物和锆石年代学特征及其对物源区、构造演化的约束. *地质学报*, 88(2): 167–184.
- 刘少峰, 张国伟, 2005. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法. *地学前缘*, 12(3): 101–111.
- 刘少峰, 张国伟, 2008. 东秦岭—大别山及邻区盆—山系统演化与动力学. *地质通报*, 27(12): 1943–1960.
- 马收先, 孟庆任, 曲永强, 2011. 华北地块北缘上石炭统一—三叠统碎屑锆石研究及其地质意义. *地质通报*, 30(10): 1485–1500.
- 马收先, 孟庆任, 武国利, 等, 2014. 内蒙古隆起晚古生代构造隆升的沉积记录. *地质学报*, 88(10): 1771–1789.
- 齐永安, 胡斌, 张国成, 等, 2007. 豫西济源地区中三叠世油房庄组遗迹组构及其环境解释. *沉积学报*, 25(3): 372–379.
- 邵菁清, 杨守业, 2012. 化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候? *科学通报*, 57(11): 933–942.
- 田洋, 赵小明, 王令占, 等, 2015. 鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示. *岩石学报*, 31(1): 261–272.
- 王自强, 1989. 华北二叠纪大型古植物事件. *古生物学报*, 28(3): 314–343.
- 吴贤涛, 1985. 豫西济源—义马盆地浊流沉积中的痕迹化石及其环境意义. *沉积学报*, 3(3): 23–31, 137–138.
- 许中杰, 程日辉, 王嘹亮, 等, 2013. 闽西南地区晚三叠—中侏罗世沉积岩矿物和元素地球化学特征: 对盆地构造背景转变的约束. *岩石学报*, 29(8): 2913–2924.
- 许志琴, 李廷栋, 嵇少丞, 等, 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来—理论与应用. *岩石学报*, 24(7): 1433–1444.
- 杨文涛, 王敏, 杜远生, 2014. 中生代济源盆地沉积充填特征及其对秦岭、太行山隆升作用的响应. *地质论评*, 60(2): 260–274.
- 杨振宇, 马醒华, 黄宝春, 等, 1998. 华北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(S1): 44–56.
- 张国成, 曾玉凤, Buatois, L. A., 等, 2005. 济源盆地谭庄组(T_{2-3})上段湖相沉积及遗迹化石特征. *沉积学报*, 23(1): 100–107.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪, 1995. 秦岭造山带的结构构造. *中国科学(B辑)*, 25(9): 994–1003.
- 张拴宏, 赵越, 刘健, 等, 2007. 华北地块北缘晚古生代—中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义. *岩石学报*, 23(3): 625–638.
- 赵俊峰, 刘池洋, 梁积伟, 等, 2010. 鄂尔多斯盆地直罗组—安定组沉积期原始边界恢复. *地质学报*, 84(4): 553–569.