



内蒙古中-东部兴蒙造山带古生代沉积记录: 对物源特征及中亚造山带构造演化的指示

李大鹏^{①②}, 陈岳龙^①, 王忠^③, 林宇^①, 周建^④

① 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

② 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

③ 内蒙古地质调查院, 呼和浩特 010010;

④ 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 102849

E-mail: ldpzhuanrong@163.com

2011-07-21 收稿, 2011-10-12 接受

国家自然科学基金(40973010)、中央高校基本科研业务费专项资金(2011YYL012)和内蒙古自治区国土资源厅“内蒙古自治区区域成矿规律及重要矿产成矿预测”项目(05-6-YS2)资助

摘要 兴蒙造山带为中亚造山带东段, 其标志着华北板块与西伯利亚板块的界线。区域上广泛发育的古生代沉积地层可能蕴含着关于板块拼合及造山带演化的关键信息。奥陶纪-二叠纪碎屑沉积岩岩相学研究表明这些岩石主要为杂砂岩和长石砂岩, 以较低的成熟度, 较差的分选以及较高的岩屑含量为特征。古生代样品物源主要由新生的壳源物质充当。兴蒙造山带碎屑沉积岩 Nd 模式年龄分布于新元古代及中元古代晚期, 范围与华北板块明显不同; 而其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值演化则与兴蒙造山带内部岩浆岩类演化特征类似, 表明其物源可能主要源于兴蒙造山带内。碎屑沉积岩物源主要由带有增生特征岩类混合少量再循环端员组分构成; 岩性上受长英质, 部分熔融镁铁质及镁铁质岩类三端员控制。岩石学上, 碎屑沉积岩平均成分相当于三端员依 53:41:5 贡献比例进行混合。沉积环境在二叠纪发生变化, 从岛弧过渡为造山带, 并于三叠纪前完成碰撞。这一解释与该区最终碰撞时间为二叠纪末期至三叠纪的论断相一致。

关键词

碎屑沉积岩
兴蒙造山带
Nd 同位素
物源
构造演化

陆缘碎屑沉积岩保存了大陆地壳含量, 构造演化及增生历史的重要信息。碎屑沉积岩的化学组成及不同类型的相对丰度能有效用于限定其物源^[1-3]及沉积盆地构造环境恢复^[4-7]。砂岩碎屑矿物含量能够提供关于盆地构造环境, 沉积及相关物源信息^[6,7]。因为稀土元素在风化过程中的活动性有限, 碎屑沉积岩的 Sm-Nd 同位素组成可作为识别源区暴露遭受剥蚀上地壳平均组成的有效工具^[8]。这些数据揭示了源于幔源新生物质与壳源再循环物质的相对贡献^[9-11]。与地球化学数据相结合, 碎屑沉积岩的 Sm-Nd 同位素有助于识别不同岩性物源及地壳增生期次^[12-14]。

兴蒙造山带为中亚造山带的东段, 其标志着华北

板块和西伯利亚板块的界限。最近的研究表明华北板块与西伯利亚板块之间洋盆的历史可回溯至中元古代^[15]。然而, 长期以来, 华北板块与西伯利亚板块在该区的最终拼合位置及拼合时间却极富争议^[16-23]。

近年来, 对中亚造山带中各种沉积成因岩石的(原岩)物源分析均开展了大量的工作, 例如兴蒙造山带东端松辽地块南部呼兰群中泥质片岩^[24], 内蒙古锡林浩特杂岩中的黑云斜长片麻岩^[25,26]以及中国阿尔泰山地区早古生代碎屑沉积岩^[27]。而对内蒙古地区华北地台北缘渣尔泰群石英英岩^[28]和乌拉山群孔兹岩系^[29]也开展了类似的工作。内蒙古中-东部地区兴蒙造山带内部广泛存在着显生宙沉积地层^[30], 这些沉积地层可能蕴含着关于板块拼合及造山带演化的关

英文版见: Li D P, Chen Y L, Wang Z, et al. Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. Chin Sci Bull, 2012, 57: 776-785, doi: 10.1007/s11434-011-4867-3

键信息;而长期以来,从未对这些沉积岩进行过详细的沉积物来源及沉积物源区构造-热演化的讨论.本文对内蒙古中-东部地区奥陶纪至二叠纪不同位置碎屑沉积岩的全岩地球化学及 Sm-Nd 同位素组成进行研究,藉此探讨该区物源特征及该造山带构造演化历史.

1 区域地质背景

兴蒙造山带从南向北可分为3个主要部分:南方造山带,索伦缝合带和北方造山带(图 1).南方造山带的主要构造单元包括白乃庙岛弧和鄂尔多斯俯冲增生杂岩带.中奥陶世-早志留世白乃庙岛弧与华北板块相接,主要有钙碱性和拉斑性玄武岩及少量长英质容颜及花岗岩侵入体组成^[31].鄂尔多斯俯冲增生杂岩位于白乃庙岛弧以北,可进一步细分为一条未变形的蛇绿岩带,一套岛弧杂岩,一个糜棱岩化的超高压俯冲杂岩^[22].索伦-林西缝合带以索伦-林西二叠纪-早三叠世(约 299~246 Ma)蛇绿岩为标志.这条缝合带标志着中亚造山带在内蒙古地区演化的结

束^[22].北方造山带由南向北包括锡林浩特变质杂岩,二道井俯冲增生杂岩和宝力道岩套.锡林浩特变质杂岩主要由变质程度达到角闪岩相^[22,32]的片岩、副片麻岩、正片麻岩、角闪岩及超镁铁质岩^[26]组成.锡林浩特西南俯冲增生杂岩作为混杂岩,在北方造山带中部从二道井向洪格尔延伸约 150 km^[33].宝力道岩套在石炭纪侵位^[26,34],主要由辉长闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩组成.贺根山增生杂岩位于锡林浩特以北,与南蒙古国微陆块乌利亚斯太陆缘相接,其辉长岩及镁铁质岩墙侵入时间为 298 Ma^[35].

2 样品岩性

从内蒙古中-东部兴蒙造山带奥陶纪-二叠纪地层中采集了 18 件碎屑沉积岩(图 1,表 1).这些岩石呈黑色至灰色,结构不成熟,分选较差(图 2).按照 9 件代表性样品岩石薄片点统计(每个样品约统计 500 点),除 2 件二叠纪细粒砂岩岩屑含量分别为 4%和 6%以外,其余样品均占较大比例(32%~52%).石英碎屑,包含单晶石英,多晶石英和燧石,占岩石总体

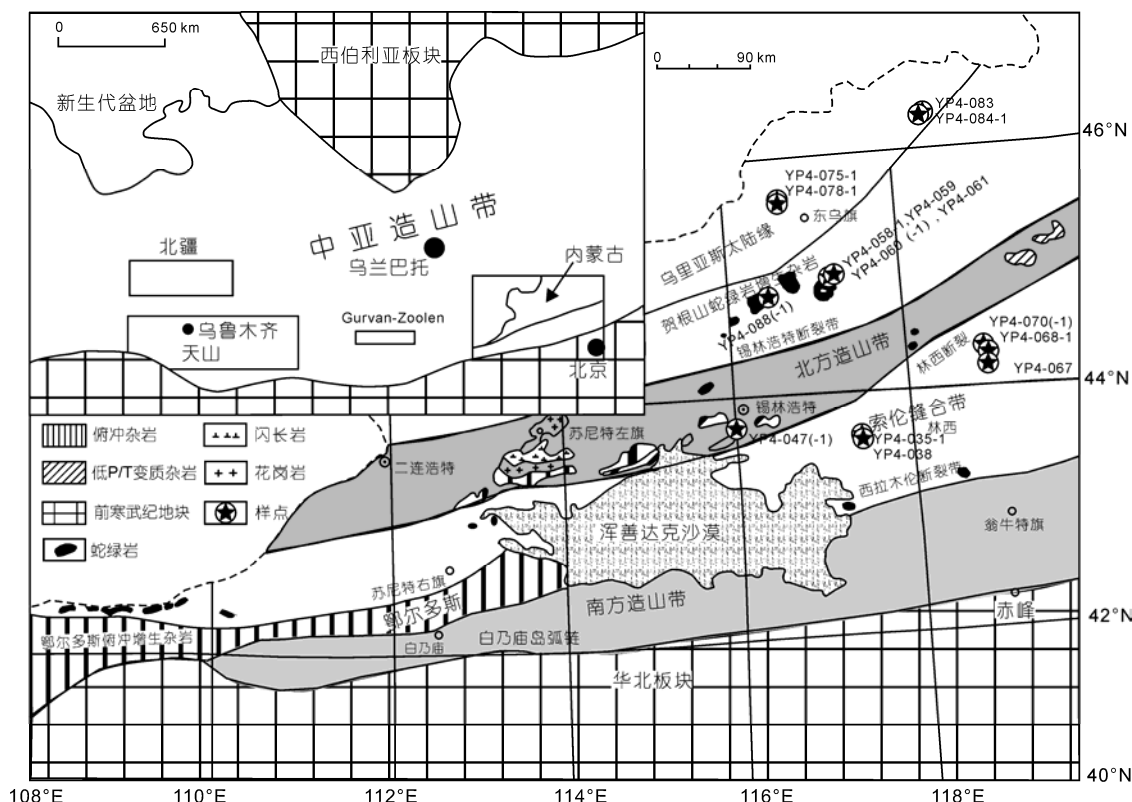


图 1 地质略图及采样点分布

据文献[22]修编

表 1 内蒙古中-东部碎屑沉积岩样品坐标及时代、岩性

样品号	层位及组名/岩性	经度	纬度
YP4-035-1	下二叠统于家北沟组/长石砂岩	117°26.972'E	43°16.746'N
YP4-038-1	下二叠统哲斯组/杂砂岩	117°24.857'E	43°37.554'N
YP4-047-1	下二叠统哲斯组/中粗粒杂砂岩	116°02.699'E	43°43.460'N
YP4-058-1	石炭-二叠纪本巴图组/细粒杂砂岩	117°17.751'E	45°01.699'N
YP4-059	石炭-二叠纪本巴图组/粉砂岩	117°18.019'E	45°00.401'N
YP4-060	石炭-二叠纪本巴图组/粉砂岩	117°11.716'E	45°00.052'N
YP4-060-1	石炭-二叠纪本巴图组/中细粒杂砂岩	117°11.716'E	45°00.052'N
YP4-061	石炭-二叠纪本巴图组/细粒杂砂岩	117°11.716'E	45°00.052'N
YP4-067	中二叠统哲斯组/粉砂岩	119°06.426'E	44°15.709'N
YP4-068-1	二叠纪大石寨/粉砂岩	119°06.042'E	44°17.911'N
YP4-070	二叠纪寿山组/细砂岩	119°02.745'E	44°20.690'N
YP4-070-1	二叠纪寿山组/粉砂岩	119°02.745'E	44°20.690'N
YP4-075-1	志留纪泥鳅河组/中粗粒长石砂岩	116°38.072'E	45°38.279'N
YP4-076-1	志留纪泥鳅河组/中粗粒长石砂岩	116°38.224'E	45°38.105'N
YP4-083	奥陶纪多宝山组/中粗粒杂砂岩	118°22.872'E	46°10.366'N
YP4-084-1	志留纪卧都河组/中粗粒长石砂岩	118°22.734'E	46°09.981'N
YP4-088	二叠纪葛根敖包组/杂砂岩	116°26.388'E	44°51.798'N
YP4-088-1	二叠纪葛根敖包组/细粒杂砂岩	116°26.388'E	44°51.798'N

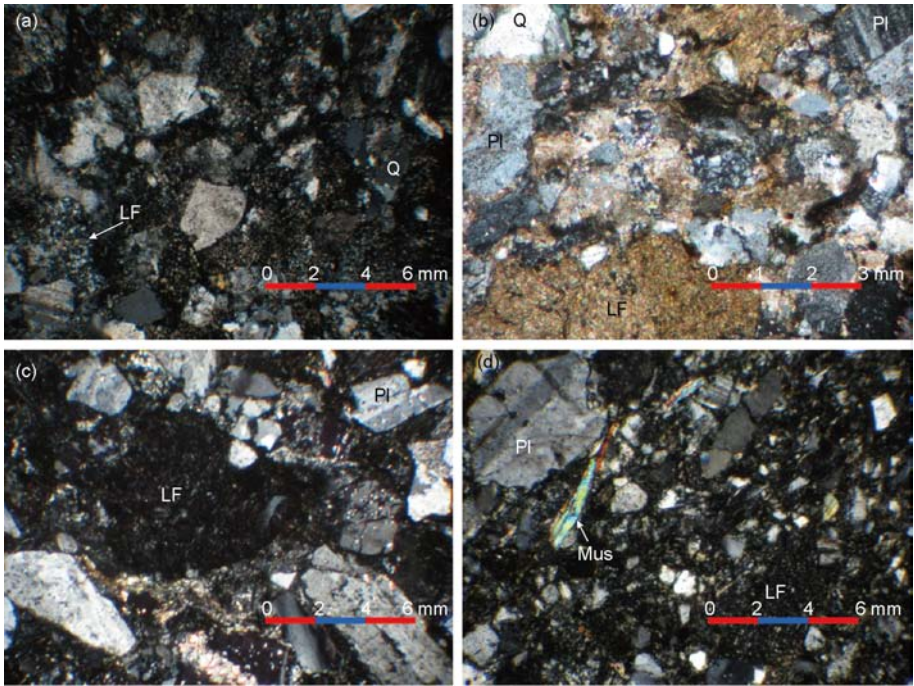


图 2 兴蒙造山带砂岩的岩石学特征

(a) 石炭-二叠纪砂岩(YP4-058-1); (b) 石炭-二叠纪砂岩(YP4-060-1); (c) 泥盆纪砂岩(YP4-087-1); (d) 志留纪砂岩(YP4-084-1). Q, 石英; Pl, 斜长石; Mus, 白云母; LF, 岩屑. 所有照片均为正交偏光下拍摄. 这些砂岩以较低成熟度, 较低分选和大量的岩屑组分为特征

含量的 15%~60%. 长石以斜长石为主, 含量约 5%~38%. 此外, 薄片中还可见少量的白云母、黑云母、方解石及钛铁氧化物等副矿物, 各薄片基质及胶结物多为泥质或微晶次闪石及黑云母类变质矿物组

成, 含量约占总体积的 5%~20%.

3 分析方法

样品在分析前进行显微镜矿物组成与结构观察,

挑选未蚀变、风化的样品做进一步分析. 适合分析的全岩样品手工粗碎至 1~2 cm, 选出大约 100 g, 用无污染刚玉碎样机粉碎至 200 目, 以备主量、微量元素与 Sm-Nd 同位素组成分析. 主量元素在核工业北京地质研究院由 X 射线荧光光谱分析, 其中二价铁由化学滴定法测定, 准确度与精密度优于 5%. 微量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 由带钢套的聚四氟乙烯密封溶样罐溶解样品后在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(VG PO II)上进行含量测定, 分析精度优于 8%.

4 件砂岩样品和 3 件互层的板岩样品的 Sm-Nd 同

位素测量在中国科学院地质与地球物理研究所完成. Nd 同位素数据应用 Jahn 等人^[36]方法获得. 应用 7 个接受杯的 Finnigan MAT-262 动态模式进行分析. Nd 同位素质谱分析的分馏校正标准化至 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$, 标样 JMC 和 BCR21 测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(平均)分别为 $0.511937 \pm 10(2\sigma)$, $0.512594 \pm 10(2\sigma)$.

4 结果

内蒙古中-东部兴蒙造山带碎屑沉积岩全岩主量元素组成见表 2. 据 Pettijohn 等人^[37]对砂岩进行化学分类表明, 样品以杂砂岩和长石砂岩为主(图 3(a)).

表 2 内蒙古中-东部显生宙碎屑沉积岩岩石化学(wt%)与微量元素($\mu\text{g/g}$)^{a)}

样品号	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	Sc	Zr	Th	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
D.L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.01	0.01	0.04	0.07	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
YP4-035-1	64.9	0.8	16.4	5.2	0.1	1.4	0.7	1.1	3.3	0.2	5.9	11	228	14	40	83.3	9.5	37	7.0	1.2	6.0	1.0	5.5	1.2	3.2	0.5	3.2	0.5
YP4-038-1	73.3	0.6	13.5	4.3	0.1	0.9	1.4	2.0	1.8	0.1	2.1	9.0	191	9.7	45	85.9	11	41	8.1	1.5	6.9	1.0	6.0	1.2	3.4	0.5	3.4	0.5
YP4-047-1	70.4	0.5	14.1	4.0	0.0	1.1	0.7	1.8	2.6	0.1	4.4	7.0	198	7.2	20	41.9	5.5	20	4.2	0.9	3.5	0.6	3.5	0.8	2.2	0.3	2.3	0.4
YP4-058-1	67.4	0.6	14.3	4.8	0.1	1.9	3.5	3.5	2.2	0.1	1.6	6.0	156	5.3	14	30.2	4.2	16	3.9	1.0	3.0	0.5	3.2	0.7	2.1	0.3	2.2	0.4
YP4-059	67.1	0.8	14.5	5.8	0.0	1.6	0.9	1.4	2.3	0.1	5.2	11	256	11	33	66.9	8.8	34	8.2	1.2	7.2	1.2	7.4	1.6	4.4	0.7	4.4	0.7
YP4-060	69.7	0.6	13.1	4.0	0.0	1.9	0.7	1.9	2.8	0.1	4.8	11	168	9.6	29	53.4	7.3	26	5.4	1.0	5.1	0.8	4.9	1.0	3.0	0.5	3.0	0.5
YP4-060-1	68.0	0.8	13.6	6.6	0.1	2.3	1.0	3.3	0.9	0.2	3.2	9.0	157	4.4	18	40.6	4.8	18	4.2	1.1	3.8	0.6	3.7	0.8	2.1	0.3	2.1	0.3
YP4-061	51.1	0.5	12.7	3.9	0.4	1.3	12.8	4.9	1.4	0.1	11	10	138	4.8	18	34.9	4.2	16	3.4	0.9	3.3	0.5	3.2	0.7	2.0	0.3	2.2	0.3
YP4-067	68.8	0.5	13.4	3.5	0.1	2.1	4.7	3.5	2.2	0.1	1.0	12	225	8.3	29	56.4	6.7	24	5.1	1.1	4.5	0.7	4.1	0.9	2.5	0.4	2.5	0.4
YP4-068-1	54.8	0.6	19.1	7.9	0.2	3.9	9.0	3.3	0.2	0.3	0.7	28	48	1.3	7.7	18.0	2.4	11	3.0	0.8	3.3	0.6	3.8	0.8	2.2	0.3	2.2	0.3
YP4-070	73.2	0.6	14.2	3.1	0.0	0.5	0.4	2.4	2.4	0.2	2.6	11	198	9.7	34	66.4	8.6	29	5.7	1.2	5.2	0.8	4.9	1.0	2.9	0.4	2.8	0.4
YP4-070-1	71.1	0.7	15.5	3.6	0.1	0.5	0.5	1.9	3.0	0.2	2.7	9.0	209	11	32	67.9	8.4	31	6.2	1.2	6.1	0.9	5.6	1.2	3.2	0.5	3.2	0.5
YP4-075-1	70.9	0.6	11.7	4.6	0.1	1.5	1.9	1.9	3.3	0.1	3.3	16	115	5.1	10	22.6	2.9	11	2.9	0.8	2.4	0.4	2.3	0.5	1.3	0.2	1.4	0.2
YP4-076-1	63.6	0.6	17.1	5.1	0.1	1.7	3.9	1.4	2.6	0.1	3.8	13	174	6.4	24	53.7	7.0	27	6.3	1.6	5.6	0.9	5.4	1.2	3.3	0.5	3.3	0.5
YP4-083	63.6	0.6	15.2	8.4	0.1	2.0	0.5	3.5	1.2	0.2	4.3	12	120	3.8	9.7	22.3	2.7	10	2.4	0.6	2.1	0.4	2.2	0.5	1.4	0.2	1.5	0.2
YP4-084-1	61.9	1.0	16.5	7.3	0.1	2.7	0.6	1.3	2.5	0.2	5.7	22	183	8.3	33	67.7	8.4	31	6.3	1.5	5.7	0.9	5.3	1.1	3.0	0.5	3.1	0.5
YP4-088	65.8	0.5	11.8	6.4	0.1	2.2	3.6	4.8	0.1	0.1	4.5	15	54	0.9	6.4	15.2	2.1	9.8	3.0	0.9	3.6	0.6	4.3	0.9	2.8	0.4	2.9	0.5
YP4-088-1	63.7	0.5	11.9	5.1	0.2	1.7	5.2	6.0	0.1	0.1	5.2	13	122	3.1	14	32.1	4.4	18	4.6	1.1	4.6	0.9	5.8	1.3	3.8	0.6	4.1	0.7

a) D.L.代表溶液微量元素检出限(ng/mL); “-”主量元素分析检出限未提供

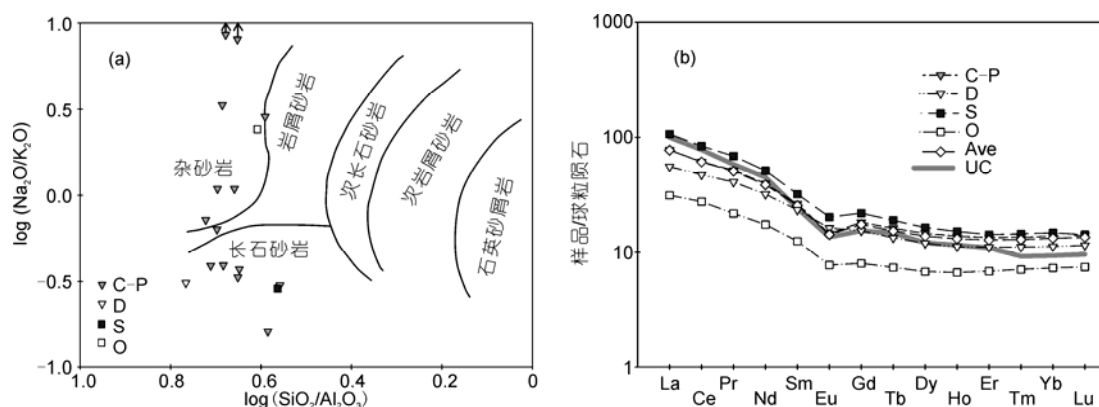


图 3 兴蒙造山带碎屑沉积岩地球化学特征

(a) Pettijohn 等人^[37]基于 $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 对 $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ 不同时代砂岩化学分类; (b) 沉积岩球粒陨石标准化 REE 配分曲线随沉积时代演化趋势. 球粒陨石标准化数值来自文献^[39], 上地壳数据来自文献^[38]

各时代样品轻重稀土分馏均较低, 平均(La/Yb)_N 为 5.84, 低于全球平均地壳水平(10.47^[38])(图 3(b)), 暗示了从奥陶纪至二叠纪, 相对不成熟的壳源物质为沉积主体. 奥陶纪、泥盆纪、石炭-二叠纪稀土总量范围为 57~128 μg/g(表 3). 这些值和所有样品平均值均低于全球平均上地壳水平(148 μg/g)^[38], 表明了这些时代均以新生壳源物质为物源主体. 志留纪稀土总量为 168 μg/g. 这一值相对高于全球地壳平均水平, 表明志留纪物源以再循环物质为主或物源区经历了极端的岩浆分异. 这些岩石显示了变化的负 Eu 异常. 最弱的负 Eu 异常存在于泥盆纪样品中(Eu/Eu* = 0.84), 最强的负 Eu 异常存在于石炭-二叠纪样品中(Eu/Eu* = 0.65)(表 3).

7 件古生代砂岩或互层产出的泥质岩石进行 Sm-Nd 同位素结果见表 4. 内蒙古地区 7 件古生代砂岩或板岩 Nd 模式年龄分布于 0.51~1.19 Ga.

5 讨论

5.1 物源区组成

兴蒙造山带碎屑沉积岩具有较低的成熟度及分选, 且具有较多的岩屑组分(图 2), 反映其近源沉积成岩的特征. 而邻区华北板块 Nd 模式年龄以太古宙为主, 与兴蒙造山带碎屑沉积岩 Nd 模式年龄明显不同. 因此, 碎屑沉积岩中即便存在华北板块贡献, 其也不作为物源主体. 沉积岩所有样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(初始 ϵ_{Nd} 值)投图于兴蒙造山带 17 件实测岩浆岩样品以及 Hong 等人^[41]样品所构成的兴蒙造山带岩浆岩演化区内(图 4(b))除了志留纪和二叠纪样品外, 其余碎屑沉积岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值投图于 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的主要演化区, 表明这些岩浆岩为可能的碎屑沉积岩物源.

碎屑沉积岩的这些特征, 结合其 Nd 同位素(图 4)

表 3 兴蒙造山带不同时代碎屑沉积岩 REE 含量(μg/g)^{a)}

元素	CI	UC	C-P	D	S	O	平均值
La	0.31	31	24.1	17.3	33.1	9.7	24
Ce	0.808	63	49.5	38.2	67.7	22.3	49.3
Pr	0.122	7.1	6.31	4.98	8.39	2.66	6.2
Nd	0.6	27	23.7	19.2	30.8	10.5	23.1
Sm	0.195	4.7	5.14	4.56	6.25	2.44	4.99
Eu	0.0735	1	1.07	1.2	1.49	0.57	1.05
Gd	0.259	4	4.73	4	5.68	2.08	4.52
Tb	0.0474	0.7	0.77	0.64	0.9	0.35	0.73
Dy	0.322	3.9	4.7	3.86	5.29	2.19	4.46
Ho	0.0718	0.83	0.99	0.81	1.09	0.48	0.94
Er	0.21	2.3	2.82	2.33	2.99	1.44	2.69
Tm	0.0324	0.3	0.44	0.36	0.47	0.23	0.42
Yb	0.209	1.96	2.9	2.35	3.09	1.53	2.78
Lu	0.0322	0.31	0.45	0.37	0.46	0.24	0.44
Eu/Eu*		0.69	0.65	0.84	0.75	0.75	0.67
ΣREE		148	128	100	168	57	126

a) 兴蒙造山带不同时代平均值基于表 2 数据计算. CI 数据引自文献[39]; UC 代表上地壳, 数据源自文献[38]; Ave 代表所有分析样品的平均含量; ΣREE 代表总稀土含量

表明, 兴蒙造山带古生代岩浆岩和变质岩为碎屑沉积岩直接物源. 因此, 对古生代碎屑沉积岩以及内蒙古中-东部兴蒙造山带前中生代沉积岩和变质岩的 Na₂O/K₂O 比值对总稀土含量进行投图(图 5(a)), 以便进一步限定源区物质组成^[42].

所有碎屑沉积岩分布范围基本上可由兴蒙造山带前中生代岩浆岩和变质岩类组成的三角形范围所限定, 可知古生代沉积岩的化学组成由兴蒙造山带前中生代岩浆岩和变质岩类控制. 所形成的三角形 3 个顶点代表了为碎屑沉积岩提供物源的 3 个不同类型的端员组分. 其中一个端员具高 Na₂O/K₂O 比值和低总稀土含量(端员 MF), 该端员主要由超镁铁质岩石(橄榄岩捕虏体)组成, 因此应代表镁铁质端员. 其

表 4 内蒙古中-东部兴蒙造山带砂岩及互层板岩的 Sm-Nd 同位素组成^{a)}

样品号	岩性	地层年龄(Ma)	Sm(μg/g)	Nd(μg/g)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	f _{Sm/Nd}	T _{DM}	T _{2DM}
YP4-035	板岩	270	7.1231	36.3858	0.118419	0.512480	12	-0.40	1.07	1.07
YP4-058-1	细砂岩	260	2.4420	10.7112	0.137912	0.512799	12	-0.30	0.71	0.56
YP4-060-1	细砂粉砂岩	300	1.6044	9.5957	0.101140	0.512508	13	-0.49	0.87	1.02
YP4-061	细砂岩	254	3.3044	15.7842	0.126563	0.512761	13	-0.36	0.68	0.62
YP4-076-1	板岩	360	7.0749	26.8142	0.159603	0.512828	5	-0.19	0.91	0.51
YP4-084	薄层状板岩	420	6.5699	33.1684	0.119751	0.512416	19	-0.39	1.19	1.17
YP4-083-1	泥质板岩	445	3.6849	15.6660	0.142202	0.512681	15	-0.28	1.00	0.75

a) Nd 模式年龄(T_{DM} 和 T_{2DM})依据文献[40]计算

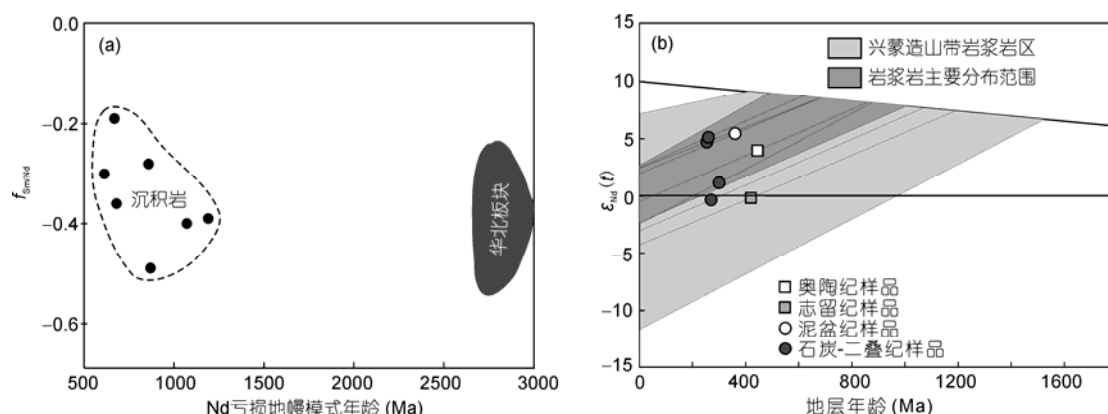


图 4 内蒙古中-东部碎屑沉积岩 Nd 同位素特征

(a) 不同时代沉积岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随时间演化趋势; (b) 古生代沉积岩 Nd 同位素模式年龄分布. 华北板块 Nd 同位素分布位置据文献[24]改编; 兴蒙造山带火成岩及其集中分布范围部分来自于文献[41]

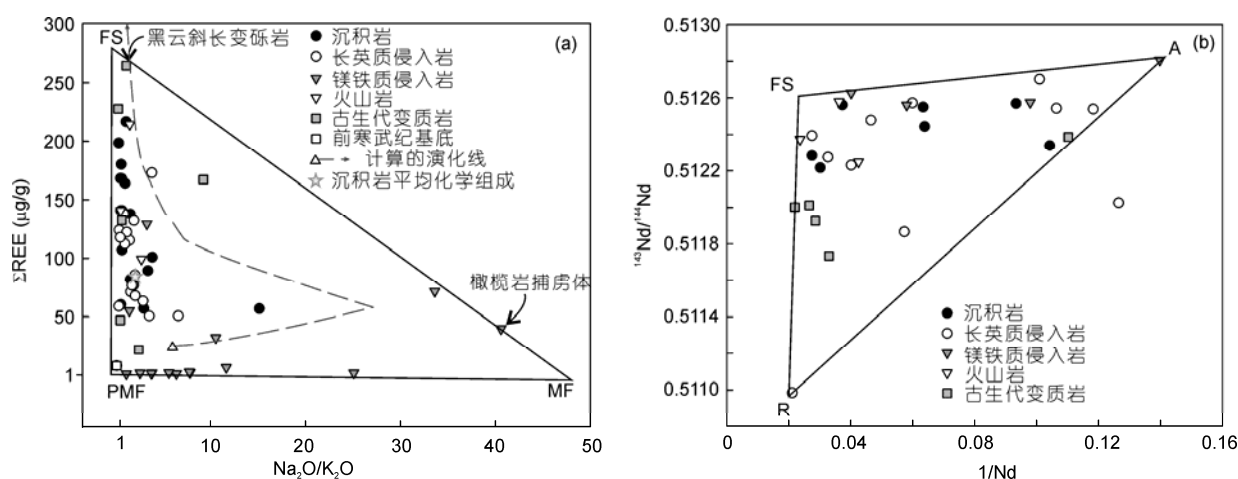


图 5 内蒙古中-东部碎屑沉积岩物质来源^[42]

(a) 稀土总量与 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值图解, 其中 MF 为镁铁质端员, PMF 为部分熔融镁铁质端员, FS 为长英质端员; (b) Nd 同位素组成与 Nd 含量关系图解, 其中 A 为增生端员, OC 为再循环古老地壳端员, FS 为长英质端员. (a)中演化线为 MELTs 软件计算的橄榄岩包体在 MOHO 面附近经 30%部分熔融后在上地壳分离结晶至约 75%时熔体相 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值随稀土总量协变关系. 可见其与部分镁铁质-超镁铁质侵入岩及部分中酸性侵入岩体及相应的喷发岩相类似, 表明这些岩石可能由类似源岩经上述路径成岩. 经计算, 若形成区域上碎屑沉积岩平均化学成分, FS, MF 和 PMF 三端员对其沉积贡献比例应为约 53:5:41

余两个端员组分较为复杂; 为了进一步确定这些端员含义, 根据已确定镁铁质端员组分化学成分, 应用 MELTs 软件^[43-45]进行岩浆演化模拟以观察岩浆作用过程对主微量元素变化的影响. 具体地, 假设这一橄榄岩包体化学成分所代表的镁铁质-超镁铁质岩石在 MOHO 面附近发生平衡部分熔融, 当熔体成分约为 30%时, 发生熔体-残余分离^[46]. 生成的熔体从地壳深部向上迁移并最终在上地壳约 8 km 处形成岩浆房并发生分离结晶作用^[47].

在这一系列岩浆演化过程中 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值和总稀土含量的变化见图 5(a). 在演化末期, 当最终分离

结晶后残余岩浆约 75%时, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值可减少至原橄榄岩初始 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值的 2.6%; 稀土总量及 Nd 含量最大分别可富集至原岩的 8.65 和 8.34 倍. 那么图 5(a)中一系列低总稀土含量, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值不同的镁铁质岩石可能为基性程度不同的镁铁质或超镁铁质岩石经部分熔融演化形成. 因此, 低 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值及低总稀土含量的端员应代表部分熔融的镁铁质岩石. 而经过一系列演化过程, 岩浆最终将演化至长英质; 因此, 低 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值, 高总稀土含量的端员可由长英质岩浆岩或以之为主要物源的沉积-变质岩类, 如图 5(a)中黑云斜长变砾岩. 经计算,

若形成区域上碎屑沉积岩平均化学成分, 长英质、镁铁质及部分熔融的镁铁质端员对其沉积贡献比例应为约 53:41:5. 超镁铁质岩石仅提供少量的碎屑成分, 这与镁铁质端员(如橄榄岩等)在区域上所占比例极低的地质事实相一致.

理论上证明, 如果一物质是两端员混合的产物, 其不同比例的混合产物将在同位素比值与相应的元素含量的倒数确定的两个端员间形成线性关系^[48]. 按照 MELTs 计算, Nd 元素含量在部分熔融及分离结晶等岩浆演化过程中将发生富集. 将 31 件实测的不同类型岩石 Nd 同位素组成对 Nd 含量进行投图(图 5(b)), 结果表明内蒙古中-东部各时代碎屑沉积岩都可以由以高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值、低 Nd 含量的基性-超基性侵入岩(以及少数经短期地壳滞留循环形成的中-酸性岩浆岩类及变质岩类)为代表的增生端员(A); 以低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值、高 Nd 含量古老地壳重熔型中酸性侵入岩为代表的再循环端员(R)和以高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值、高 Nd 含量的长英质端员(FS)之间的混合加以解释. 由于长英质端员与增生端员 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值相差不大, 可认为碎屑沉积岩物源主要由这些带有增生特征岩类混合少量再循环端员组分构成(图 5(b)).

5.2 沉积区构造演化

对内蒙古中-东部地区不同时代出露的 9 件代表性岩石薄片进行矿物颗粒含量统计并投图于砂岩矿物构造判别图解(图 6). 志留纪、泥盆纪样品均投图

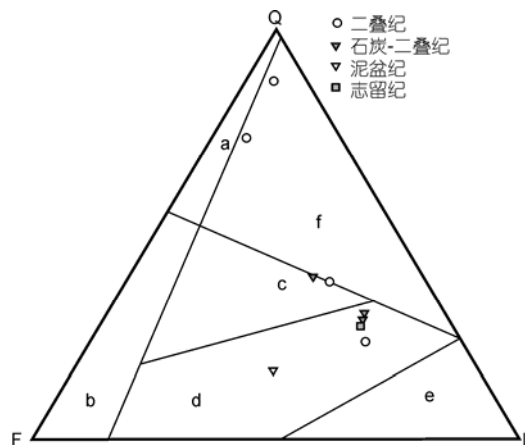


图 6 内蒙古中-东部碎屑沉积岩 Q-F-L 图解

a, 克拉通内部; b, 基底抬升; c, 割裂弧; d, 过渡型岛弧; e, 未割裂弧; f, 再循环造山带

于过渡型岛弧中, 石炭-二叠纪样品投图于过渡弧及割裂弧环境. 二叠纪样品则部分位于造山带环境, 根据区域构造演化^[22,23]可能代表其沉积于弧前区^[49]. 这表明, 志留纪至石炭纪内蒙古中-东部砂岩地层长期处于岩浆弧区的沉积环境中, 二叠纪砂岩沉积区构造环境从岩浆弧向造山带转化. 这一观点也与区域上志留纪-二叠纪碎屑沉积岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素结果一致^[50]. 内蒙古中-东部地区砂岩样品具有高的岩屑含量, 这亦指示了岛弧增生沉积特征.

碎屑沉积岩地球化学特征也用于恢复构造背景^[4,5,51]. 最新研究表明, 应用已知构造环境的新生代沉积物进行验证, 6 个常用的主量元素构造判

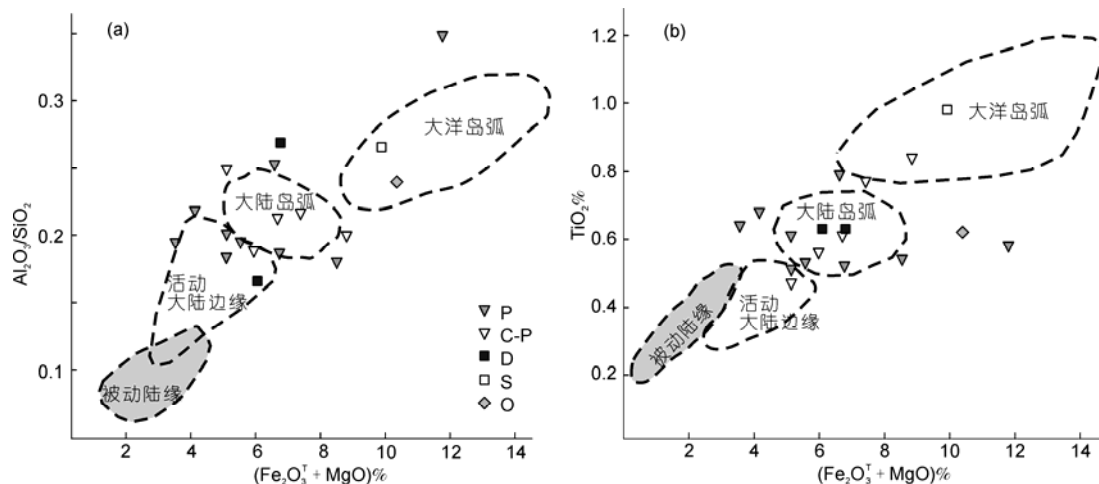


图 7 内蒙古中-东部碎屑沉积岩主量元素沉积环境判别图

(a) $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO})$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$; (b) $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO})$ vs. TiO_2 . 据文献[4]修编

别图均带有较低的成功率^[52];此外,在应用于古老沉积盆地时,也存在类似的报道^[53,54]。然而,大量继续应用这些图解进行构造判别的研究却明显获得了成功(如, Osae 等人^[55], Dokuz 和 Tanyolu^[56])。在主量和微量元素构造判别图中,兴蒙造山带大部分古生代沉积岩投图于活动的构造环境(图 7~9),表明从奥陶纪至志留纪存在连续的增生过程。这一解释与由矿物统计得出的结论一致,并表明西伯利亚板块和华北板块在古生代末期完成最终碰撞^[22,23,28]。

6 结论

通过对内蒙古中-东部地区出露的奥陶纪-二叠纪碎屑沉积岩岩相学、地球化学及 Nd 同位素含量的系统研究获得了物源区特征及区域构造演化信息。内蒙古中-东部地区兴蒙造山带内不同时代碎屑沉积岩以杂砂岩和长石砂岩为主。这些岩石以较低的成熟度,较差的分选以及较高的岩屑含量为特征。古生代样品物源主要由新增生的壳源物质充当。Nd 模式年龄分布于新元古代及中元古代晚期,分布范围与华北板块明显不同;而其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值演化则与兴蒙造山带内部岩浆岩类演化特征类似,表明其物源可能主要源于兴蒙造山带内。碎屑沉积岩物源主要由带有

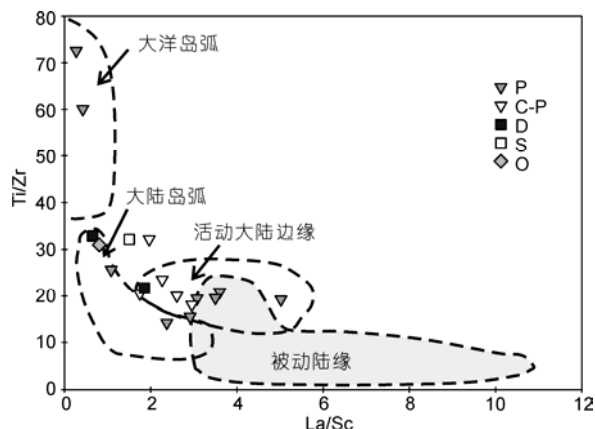


图 8 内蒙古中-东部碎屑沉积岩 La/Sc-Ti/Zr 沉积环境判别图解
据文献[5,57]修编

增生特征岩类混合少量再循环端员组分构成。在岩性上,沉积物源主要受长英质、部分熔融镁铁质及镁铁质岩类三端员控制,其总体平均成分相当于三端员依 53:41:5 贡献比例进行混合。沉积环境于二叠纪开始从岛弧向造山带转换,因此最终碰撞时限应早于三叠纪。这一解释与最终碰撞时间为二叠纪末期-三叠纪(Xiao 等人^[22,23]和 Li 等人^[28])观点一致。

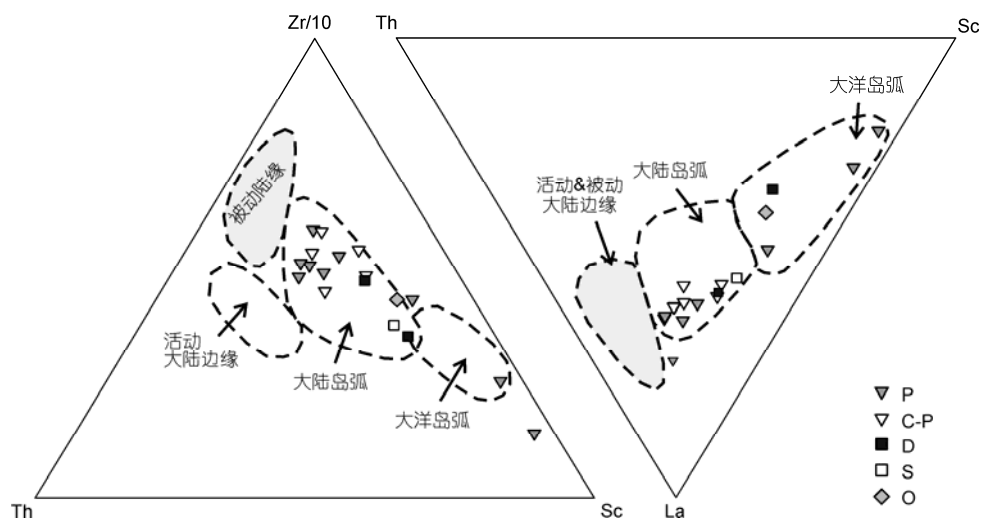


图 9 内蒙古中-东部碎屑沉积岩 Sc-Th-Zr/10 与 Sc-Th-La 沉积环境判别图解
据文献[5]修编

致谢

作者对加州理工大学 Paul Asimow 博士对 MELTs 算法的帮助深表感谢;对中国地质大学(北京)罗照华教授提供该区的参考资料以及董如春女士对碎屑矿物鉴定提供的帮助深表谢意。

参考文献

- 1 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985. 1–312
- 2 Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem Geol*, 1988, 67: 119–139
- 3 McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 1153–1177
- 4 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J Geol*, 1983, 91: 611–627
- 5 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 181–193
- 6 Dickinson W R. Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. *J Sediment Petrol*, 1970, 40: 695–707
- 7 Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol Soc Amer Bull*, 1983, 94: 222–235
- 8 Goldstein S J, Jacobsen S B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: Implications for crustal evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 249–265
- 9 Barovich K M, Foden J. A Neoproterozoic flood basalt province in southerncentral Australia: Geochemical and Nd isotope evidence from basin fill. *Precambrian Res*, 2000, 100: 213–234
- 10 McLennan S M. The roles of provenance and sedimentary processes in the geochemistry of sedimentary rocks. In: Lentz D R, ed. *Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments*. St. John's, New foundland: Geological Association of Canada, 2003. 7–38
- 11 Patchett P J. Provenance and crust-mantle evolution studies based on radiogenic isotopes in sedimentary rocks. In: Lentz D R, ed. *Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments*. St. John's, New foundland: Geological Association of Canada, 2003. 69–77
- 12 Chen Y L, Li D P, Zhou J, et al. U-Pb ages of zircons in western Qinlingshan, China, and their tectonic implications. *Earth Sci Front*, 2008, 15: 88–107
- 13 Chen Y L, Li D P, Zhou J, et al. U-Pb dating, geochemistry, and tectonic implications of the Songpan-Ganzi block and the Longmen Shan, China. *Geochem J*, 2009, 43: 77–99
- 14 Howard K E, Hand M, Barovich K M, et al. Detrital zircon ages: Improving interpretation via Nd and Hf isotopic data. *Chem Geol*, 2009, 262: 277–292
- 15 Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, et al. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 199: 311–325
- 16 Zhang Y P, Tang K D. Pre-Jurassic tectonic evolution of intercontinental region and the suture zone between the North China and Siberian platforms. *J Southeast Asian Earth Sci*, 1989, 3: 47–55
- 17 Tang K D. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean craton. *Tectonics*, 1990, 9: 249–260
- 18 Guo S Z. Timing of convergence process of Sino-Korean plate and Siberian plate inferred from biostratigraphic evidences. In: Ishii K, Liu X Y, Ichikawa K, et al, eds. *Pre-Jurassic Geology of Inner Mongolia, China*, China-Japan Cooperative Group. Osaka: Osaka University, 1991. 113–125
- 19 Wang Q, Liu X Y. Paleoplate tectonics between Cathaysia and Angaraland in Inner Mongolia of China. *Tectonics*, 1986, 5: 1073–1088
- 20 Huang B H. Biogeography of Late Paleozoic Floras of northeastern China. In: Ishii K, Liu X Y, Ichikawa K, eds. *Pre-Jurassic Geology of Inner Mongolia, China*, China-Japan Cooperative Group. Osaka: Osaka University, 1991. 159–174
- 21 Nozaka T, Liu Y. Petrology of the Hegenshan ophiolite and its implications for the tectonic evolution of northern China. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 202: 89–104
- 22 Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 2003, 22: 1069–1089
- 23 Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamics evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny. *Int J Earth Sci*, 2009, 98: 1189–1217
- 24 Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, et al. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China. *J Asian Earth Sci*, 2007, 30: 542–556
- 25 施光海, 刘敦一, 张福勤, 等. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及意义. *科学通报*, 2003, 48: 2187–2192
- 26 Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments. *J Asian Earth Sci*, 2009, 34: 245–257
- 27 Long X P, Sun M, Yuan C, et al. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the Early Paleozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 2007, 26: TC5015, doi: 10.1029/2007TC002128
- 28 Li Q L, Chen F K, Guo J H, et al. Zircon ages and Nd-Hf isotopic composition of the Zhaertai Group (Inner Mongolia): Evidence for early Proterozoic evolution of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2007, 30: 573–590

- 29 Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Wulashan khondalites: Constraints on the evolution of the Ordos Terrane, Western Block of the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 241: 581–593
- 30 李国文, 李庆富, 姜万德, 等. 全国地层多重对比研究: 内蒙古自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996
- 31 胡晓, 许传诗, 牛树银. 华北地台北缘早古生代大陆边缘演化. 北京: 北京大学出版社, 1990
- 32 赵光, 朱永峰, 张勇. 内蒙古锡林郭勒杂岩岩石学特征及其编制作用的 P-T 条件. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21: 40–48
- 33 Xu B, Charvet J, Zhang F. 2001. Primary study on petrology and geochronology of blueschists in Sunitezuoqi, northern Inner Mongolia. *J Geol*, 2001, 46: 6–14
- 34 Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 2000, 328: 157–182
- 35 Miao L C, Wang F, Liu D Y, et al. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *J Asian Earth Sci*, 2008, 32: 348–370
- 36 Jahn B M, Cornichet J, Cong B L, et al. Ultrahigh- ϵ_{Nd} eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chem Geol*, 1996, 127: 61–79
- 37 Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone. New York: Springer-Verlag, 1972. 1–130
- 38 Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental Crust. In: Holland H D, Turnekian K K, eds. *The Crust Vol. 3 Treatise on Geochemistry*. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. 1–64
- 39 Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984. 63–114
- 40 Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, et al. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 523–545
- 41 Hong D W, Zhang J S, Wang T, et al. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 2004, 23: 799–813
- 42 Chen Y L, Liu F, Zhang H F, et al. Elemental and Sm-Nd isotopic geochemistry on detrital sedimentary rocks in the Ganzi-Songpan block and Longmen Mountains. *Front Earth Sci*, 2007, 1: 60–68
- 43 Ghiorsio M S, Sack R O. Chemical mass-transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the Interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated-temperatures and pressures. *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 119: 197–212
- 44 Asimow P D, Ghiorsio M S. Algorithmic modifications extending MELTs to calculate subsolidus phase relations. *Amer Mineral*, 1998, 83: 1127–1132
- 45 Smith P M, Asimow P D. Adibat_1ph: A new public front-end to the MELTs, pMELTS, and pHMELTS models. *Geochem Geophys Geosys*, 2004, 6: Q02004, doi: 10.1029/2004GC000816
- 46 Thompson A B. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths. In: Castro A, Fernández C, Vigneresse J L, eds. *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. London: The Geological Society Publishing House, 1999. 1–7
- 47 Li D P, Chen Y L, Chen L M, et al. Zircon LA-ICPMS study and petrogenesis simulation of Dahuabei pluton in the Wulashan area, Inner Mongolia. *Prog Natural Sci*, 2009, 19: 1727–1737
- 48 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹, 等. 同位素地质年代学与地球化学. 北京: 地质出版社, 2005. 1–441
- 49 Marsaglia K M, Ingersoll R V. Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: A reassessment of magmatic-arc provenance. *Geol Soc Am Bull*, 1992, 104: 1637–1649
- 50 Li D P, Chen Y L, Wang Z, et al. Detrital zircon U-Pb ages, Hf isotopes and tectonic implications for Palaeozoic sedimentary rocks from the Xing-Meng orogenic belt, Middle-East part of Inner Mongolia, China. *Geol J*, 2011, 46, doi: 10.1002/gj.1257
- 51 Li R W, Wan Y S, Cheng Z Y, et al. Provenance of Jurassic sediments in the Hefei Basin, East Central China and the contribution of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie Shan. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 231: 279–294
- 52 Armstrong-Altrin J S, Verma S P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sediment Geol*, 2005, 177: 115–129
- 53 Van de Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Trans R Soc Edinb Earth Sci*, 1985, 76: 411–449
- 54 Shao L, Statterger K, Carbe-Schoenberg C-D. Sandstone petrology and geochemistry of the Turban Basin (NW China): Implications for the tectonic evolution of a continental basin. *J Sediment Res*, 2001, 71: 37–49
- 55 Osae S, Asiedu D K, Banoeng-Yakubo B, et al. Provenance and tectonic setting of Late Proterozoic Buem sandstones of southeastern Ghana: Evidence from geochemistry and detrital modes. *J Afr Earth Sci*, 2006, 44: 85–96
- 56 Dokuz A, Tanyolu E. Geochemical constraints on provenance, mineral sorting and subaerial weathering of Lower Jurassic and Upper Cretaceous clastic rocks of the eastern Pontides, Yusufeli (Artvin), NE Turkey. *Turk J Earth Sci*, 2006, 15: 181–209
- 57 Bahlburg H. The geochemistry and provenance of Ordovician turbidites in the Argentine Puna. In: Pankhurst R J, Rapela C W, eds. *The Proterozoic margin of Gondwana*. London: The Geological Society Publishing House, 1998. 127–142