

华北克拉通北缘早二叠世堆晶岩及其构造意义

邵济安^{1,2}, 田伟^{1,2}, 张吉衡³

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

3. 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 目前对华北克拉通北缘早二叠世基性—超基性岩成因有不同认识, 其中, 一种流行的观点是它们与“安第斯型大陆边缘”的活动有关。通过对冀东地区堆晶岩的研究对这一观点进行了讨论。华北克拉通北缘断续分布了受丰宁—隆化岩石圈断裂控制的早二叠世基性—超基性堆晶岩, 堆晶岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 280~300 Ma。通过岩相学的研究, 确认这是一套由纯橄岩、橄辉岩、辉石岩、角闪岩、辉长岩、闪长岩、斜长岩等不同岩性组成的堆晶岩, 进一步可分为层状堆晶岩和环状堆晶岩, 它们有着明显的堆晶结构。矿物学研究显示堆晶岩中角闪石、辉石、金云母等均具有高镁、高铬的幔源组分特征。不同组分堆晶岩的 Sr/Ba 比值不随熔融程度变化, 具有分离结晶的趋势。相近的稀土配分形式和过渡族元素组成显示了它们的同源性。从本区晚古生代和早中生代堆晶岩的对比中, 结果表明早二叠世这期堆晶岩具有初始裂谷岩浆的特征, 它传递了华北克拉通陆壳从稳定向活动转化的最早信息。从区域角度看, 这期活动有着更大范围的深部动力学背景。

关键词: 华北克拉通北缘; 早二叠世; 堆晶岩; 壳幔过渡带; 伸展背景; 构造。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2015)09-1441-17

收稿日期: 2015-05-18

Early Permian Cumulates in Northern Margin of North China Craton and Their Tectonic Significances

Shao Ji'an^{1,2}, Tian Wei^{1,2}, Zhang Jiheng³

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of the Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3. Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Understanding about genesis of the Early Permian basic-ultrabasic rocks in the northern margin of North China craton are varied, with one of the influential viewpoints suggesting that they are related with activities of “Andes-type continental margin”, which is discussed in this paper based on researches of the cumulates in east Hebei Province. Early Permian basic-ultrabasic cumulates controlled by Fengning-Longhua lithospheric faults are distributed discontinuously in the northern margin of North China craton. The SHRIMP Zircon U-Pb ages from cumulates are 280—300 Ma. Petrographic studies confirm that the complexes consist of a suite of cumulates including dunite, pyroxenite, amphibolite, gabbro, diorite, anorthosite, and so on, which in turn can be further divided into layered and circular ones, both with obvious cumulate texture. Mineralogical studies show that hornblende, pyroxene, and phlogolite in cumulates all are characterized by mantle sourced components of high Mg and high Cr. Sr/Ba ratio of cumulates with different components does not change with their melting degrees, showing that cumulates possess a fractional crystallization trend. Similar REE patterns and transition group elements reveal their consanguinity. Comparison of cumulates of the Late Paleozoic with those of the Early Mesozoic from the concerned area indicates that these Early Permian cumulates have characteristics of an initial-rift magma, which offers the earliest evidence of the transformation from the stable to the active one of continental crust of North China craton. Viewed from broader regions, activities of this period in this area are driven by deeper geodynamics.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41172196)。

作者简介: 邵济安(1940—), 女, 教授, 主要从事构造地质专业研究工作。E-mail: wangcc@tsinghua.edu.cn

引用格式: 邵济安, 田伟, 张吉衡, 2015. 华北克拉通北缘早二叠世堆晶岩及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(9): 1441—1457.

Key words: northern margin of North China craton; Early Permian; cumulate; crust-mantle transition zone; extensional background; tectonics.

20 世纪末,人们在在大洋岩石圈取得基本框架性认识之后,随着新一轮地球系统论研究体系的形成,其关注的重心逐渐转入大陆岩石圈,晚中生代华北克拉通的改造和岩石圈的转型是其中一个重要的关注焦点。

近年来华北克拉通周边早二叠世(约 280 Ma)的构造—岩浆活动引起了国内外学者的关注,包括中亚造山带横贯数千公里的晚古生代—中生代过碱性—碱性长石花岗岩携双峰式火山岩带(Ярмолюк *et al.*, 1981; Jahn *et al.*, 2009);天山—准格尔—塔里木板块北缘石炭纪—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用(夏林圻等, 2006)、塔里木大火成岩省约 280 Ma 的大陆溢流玄武岩喷发(Wei *et al.*, 2014)(图 1)。华北克拉通北缘对早二叠世这期区域性的伸展事件有何关系? 其对华北克拉通的自身演化又有何意义? 这正是本文关注的问题。

1 研究历史和构造背景

20 世纪 80~90 年代,白文吉等(1993)在研究华北北部成矿规律时,指出从丰宁至建平,沿着 41°21'N 分布的大断裂带控制着白云鄂博、大庙、高寺台、团榆树乃至磐石一带镁铁—超镁铁岩体,仅丰

宁—建平一段分布约 280 多个超镁铁质岩块。近年来华北北缘上千公里断续分布的基性—超基性带再次引起人们关注,邵济安等(2015)对其形成构造背景提出了不同的认识。目前研究较多的岩体及同位素年龄有: 辽西朝阳长茂河子辉绿岩墙(287.5 Ma; 李伍平和李献华, 2005); 承德地区高寺台基性—超基性环状堆晶岩(280 Ma; Chen *et al.*, 2009); 丰宁波罗诺的石英闪长岩(296 Ma; 马旭等, 2012); 滦平北李营的球状闪长岩(284 Ma; 马芳等, 2004); 丰宁镶黄旗角闪辉石岩(276 Ma; Zhang, 2009); 北京怀柔喇嘛沟门的角闪辉石岩和辉长闪长岩(288 Ma; 王惠初等, 2007); 内蒙古固阳的高钾钙碱性杂岩: 辉长岩—苏长岩—辉长闪长及其基性岩墙(275~286 Ma; Zhang, 2011); 内蒙西部乌拉特后旗额布图含镍(钴和铜)斜方辉石岩、橄辉岩和橄榄斜方辉石岩(298 Ma; 彭润民等, 2012)。在此基础上,本文确认了大部分岩石均具有堆晶岩的特征,并提供了 7 个 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(表 1),进一步证实这次壳幔岩浆活动的年龄主要集中在早二叠世 280~300 Ma,以 280 Ma 附近为主。准确的定年为华北克拉通北缘早二叠世构造背景研究提供了重要的年代学约束。由于涉及地域广泛,本文仅选择承德—丰宁一带堆晶岩进行讨论。

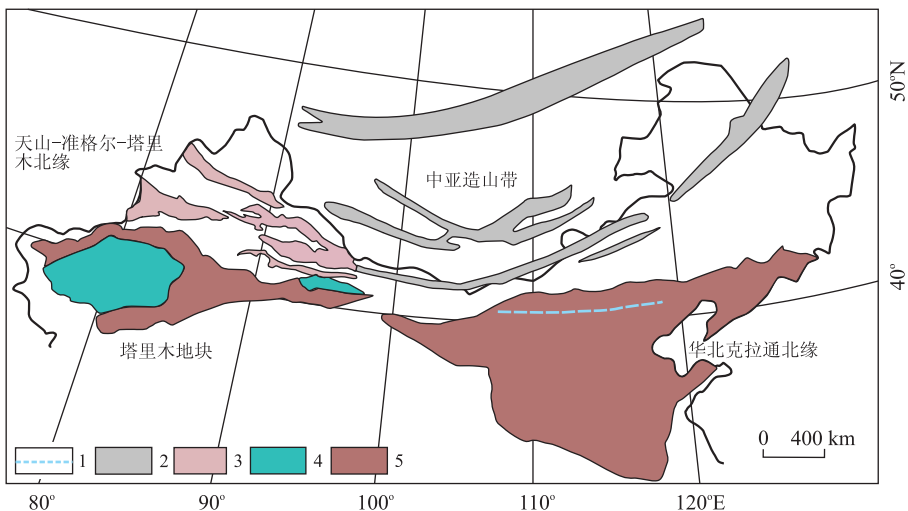


图 1 早二叠世华北克拉通北缘及其邻区构造岩浆带分布

Fig. 1 Distribution of Early Permian tectonomagmatic belt of northern margin of North China Craton and adjacent areas
1. 华北克拉通北缘约 280 Ma 基性—超基性岩带; 2. 中亚造山带晚古生代—中生代过碱性或碱性花岗岩及双峰火山岩带; 3. 天山—准格尔—塔里木板块北缘石炭纪—二叠纪裂谷火山岩带; 4. 塔里木板块约 280 Ma 的大陆溢流玄武岩; 5. 克拉通

表 1 华北克拉通北缘堆晶岩同位素年龄

Table 1 The isotopic dating of zircon of cumulates in the northern margin of North China Craton

样品采集地	岩性及样号	方法	年龄(Ma)	出处
丰宁波罗诺	辉长-辉绿岩(R20)	SHRIMP 锆石 U-Pb	284.5±2.5	本文
丰宁八郎沟	角闪辉石岩(R33)	SHRIMP 锆石 U-Pb	280.8±2.4	本文
丰宁波罗诺	斜长岩(R26)	SHRIMP 锆石 U-Pb	286.5±2.1	本文
滦平石人沟	闪长岩(R17)	SHRIMP 锆石 U-Pb	286.1±2.7	本文
丰宁八郎沟	闪长岩(R30)	SHRIMP 锆石 U-Pb	283.8±2.2	本文
丰宁波罗诺	闪长岩(R28)	SHRIMP 锆石 U-Pb	298.3±2.4	本文
滦平北李营	石英斜长岩(R11)	SHRIMP 锆石 U-Pb	300.7±2.6	本文
承德高寺台	辉长岩墙	SHRIMP 锆石 U-Pb	280	Chen <i>et al.</i> , 2009
滦平北李营	球状闪长岩	单颗粒锆石 SIMS	284	马芳等, 2002
丰宁波罗诺	石英闪长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	296	马旭等, 2012
丰宁镶黄旗	角闪辉长岩	全岩 LA-ICP-MS	276	Zhang <i>et al.</i> , 2009
北京怀柔喇叭沟门	辉长闪长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	288	王惠初等, 2007
内蒙古固阳	辉长-闪长-花岗闪长岩 角闪石	锆石 U-Pb ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	286~279 275	Zhang <i>et al.</i> , 2011
内蒙乌拉特后旗额布图	辉石岩, 橄辉岩	锆石 SHRIMP	294	彭润民等, 2012

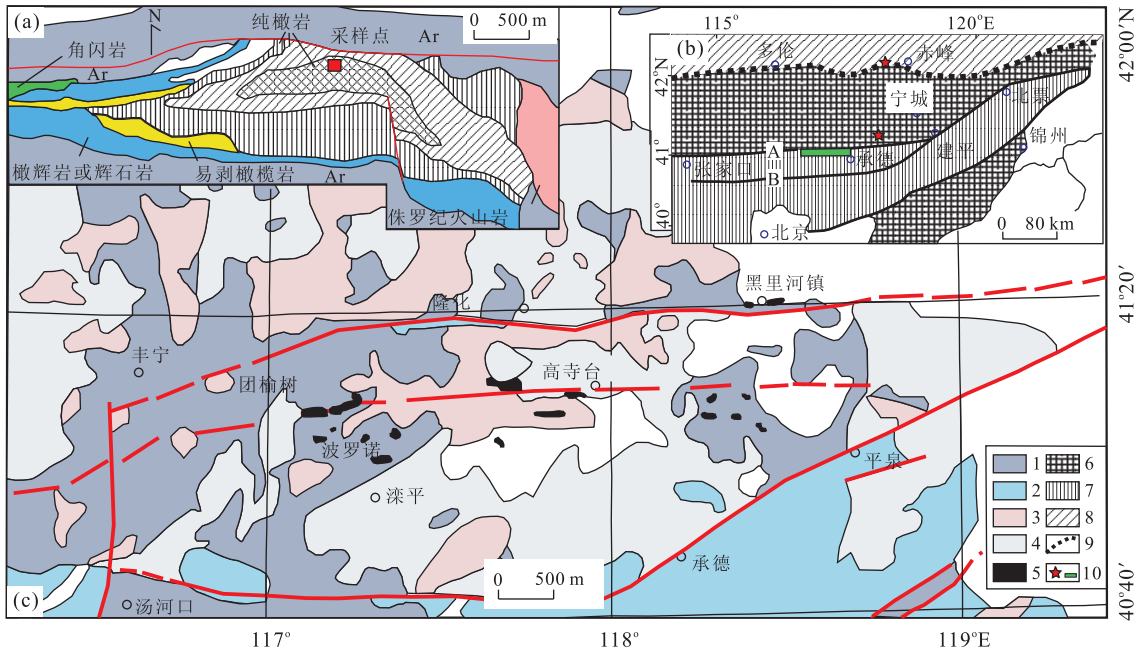


图 2 研究区早二叠世堆晶岩分布的地质简图

Fig. 2 Geological sketch of distributing of Early Permian cumulates in research area

a. 高寺台环状杂岩体简图, 引自 Chen *et al.* (2009); b. 区域构造格架; c. 研究区; 1. 太古界; 2. 中晚元古界; 3. 不同时代花岗岩; 4. 中生界; 5. 超基性-基性杂岩; 6. 新太古代变质基底出露区; 7. 中、新元古代燕辽沉降带; 8. 古生代兴蒙造山带; 9. 黑色点线代表华北克拉通与兴蒙造山带分界线, 黑或红色虚线或实线为断裂或推测断裂; 10. 左为研究区显生宙麻粒岩发现地点, 右为本文研究区; A. 丰宁-隆化-黑里河-北票断裂; B. 赤城-承德-建平断裂带

华北克拉通北缘从河北省的承德-滦平-丰宁-怀柔-一小张家口延至内蒙古西部, 早二叠世基性-超基性岩受到尚义-赤城-丰宁-隆化岩石圈断裂带控制, 具体到本区的基性-超基性堆晶岩(包括闪长质岩石)是受与其平行的娘娘庙-高寺台-红石砬子断裂控制。该断裂以南是建平-承德-赤城断裂, 这 3 条断裂被看作是内蒙古隆起的南缘断

裂(图 2), 是一组与燕辽沉降带分界的岩石圈断裂, 也是控制华北克拉通显生宙以来地壳活动的重要构造, 其北侧所谓的“内蒙地轴”保持了自结晶基底形成以来长期隆起的正向性质(河北省地质矿产局, 1989)。本文对早二叠世堆晶岩的讨论, 可进一步丰富对这一时段华北克拉通演化的认识。

2 有关测试方法及年代学研究

2.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

本文的 7 个 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄是在澳

大利亚国立大学地球科学研究学院 (Research School of Earth Sciences, the Australian National University) 完成的 (图 3). 锆石 U-Th-Pb 同位素分析在澳大利亚国立大学地球科学研究院的

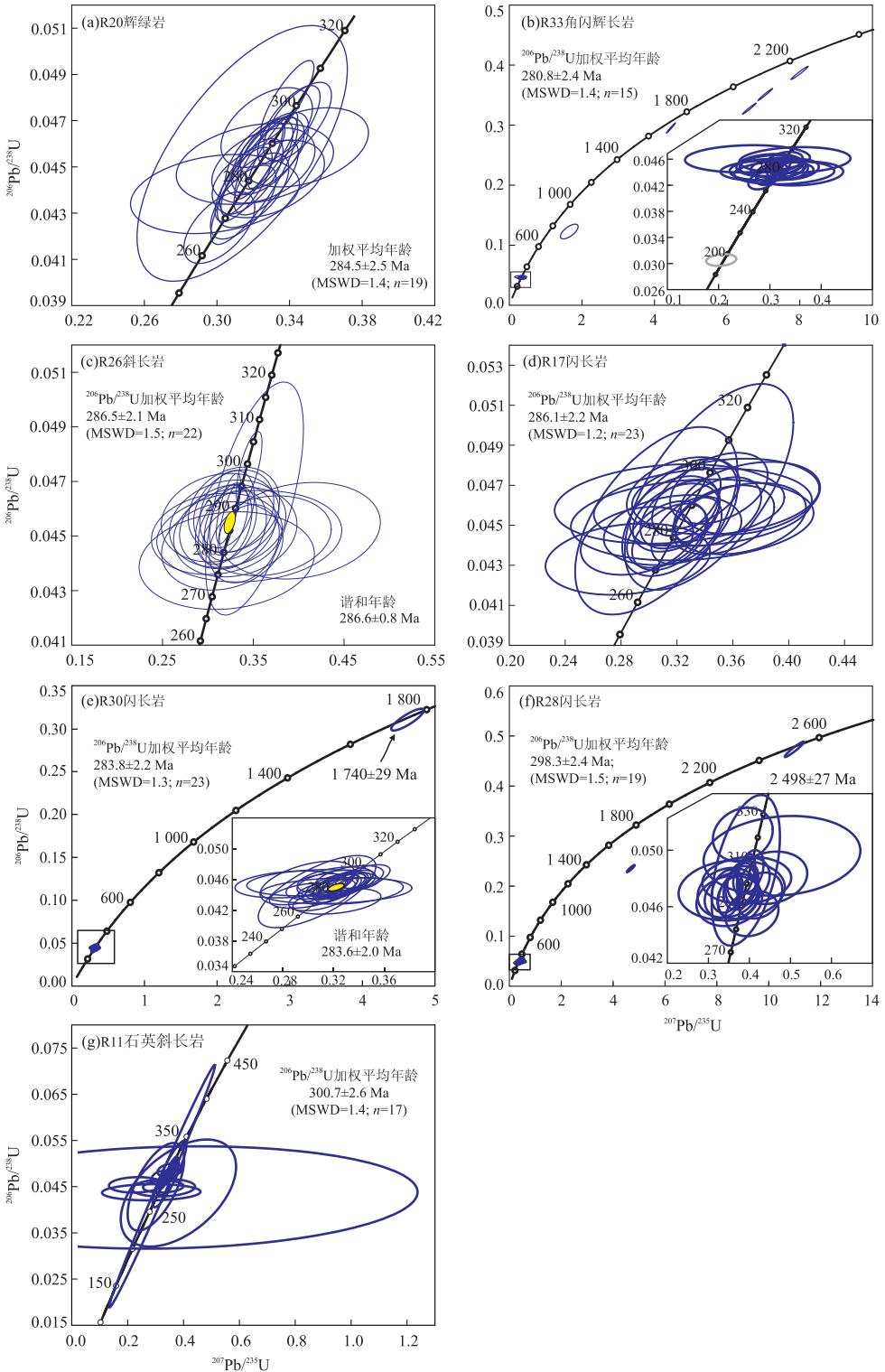


图 3 堆晶岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

Fig. 3 SHRIMP zircon U-Pb dating of the cumulates

SHRIMP RG 型离子探针上完成. 分析流程及仪器参数设定与 Williams (1998) 相同. 测试中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值使用标准锆石 TEMORA 1 (417 Ma) 校正, 而含量则使用标准锆石 SL13 (年龄为 572 Ma, U 含量为 238×10^{-6} , Th/U=0.09) 校正. 普通铅校正采用实测的 ^{204}Pb 校正. 所有的年龄采用 Steiger and Jäger (1977) 建议的 U 和 Th 衰变常数来计算. 原始比值数据使用 SQUID 1.0 和 ISO-PLOT 软件计算年龄 (Ludwig, 2001). 单点分析的比值误差为 1, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄置信度为 95%, 而谐和年龄的误差为 2. SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄见表 1, 原始数据见电子版的附录.

2.2 常量—微量元素及矿物探针分析

常量元素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室测定. 采用 XRF 法分析, 用 0.6 g 样品和 6 g 四硼酸锂制成的玻璃片在 Shimadzu XRF-1500 上测定氧化物的含量, 精度优于 2%~3%. 微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司分析测试中心利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成的, 采用酸溶法, 加入 1 mL 高纯 HNO_3 和 1 mL 高纯 HF, 最后用体积分数为 2% HNO_3 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试. 样品的处理过程、分析精密度和准确度见 Liu *et al.* (2008).

探针分析测定是在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 LA-ICP-MS 实验室完成的. 使用的是日本电子公司 JXA-8100 型新一代全数字化电子探针 X 射线显微分析仪, 测量电压 15 kV, 电流为 10 nA, 束斑 1~2 μm , 采用美国 SPI 公司的 53 种矿物作测定标样. 测定结果见表 2~表 6.

2.3 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素测定在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室完成, 按 Li *et al.* (2012) 所描述的流程进行. 将样品粉末放入泰富龙 (saville) 闷罐中并加入 ^{87}Rb - ^{84}Sr 和 ^{149}Sm - ^{150}Nd 混合稀释剂后使用 $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$ 溶解. Sr、Nd 使用常规的两阶段离子交换树脂分离纯化后在多接收热电质谱仪 (thermo fisher scientific triton plus) 上测定. 实验流程的 Rb-Sr 本底小于 250 pg, Sm-Nd 的本底小于 100 pg. 测试过程中, Sr、Nd 的质量分馏分别使用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 来校正. 国际标准物质 NBS-987 (Sr) 和 JNdi-1 (Nd) 用来监测仪器的状态, 而 BCR-2 则用于监测测试结果的准确度. 在实际测试过程中, NBS-987 的 Sr 同位素比值的测定值为

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710257 \pm 0.000008 (2; n=2)$; JNdi-1 的 Nd 同位素的测定值为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512111 \pm 0.000010 (2)$; 国际标准样品 BCR-2 的实测 Sr、Nd 同位素比值分别为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705005 \pm 0.000011$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512622 \pm 0.000009$, 与实验室之前报道的 TIMS 和 MC-ICP-MS 测试结果一致 (Li *et al.*, 2012).

3 堆晶岩的岩相学特征

3.1 堆晶杂岩的产状特征

在伸展背景下, 上涌的玄武质岩浆添加到壳幔过渡带, 在岩浆房中由于岩浆的重力分异和对流分层作用形成了一系列堆晶岩, 产状上可以有层状和环状两种类型. 本区早二叠世堆晶岩就包括滦平—丰宁的层状堆晶杂岩和承德高寺台的环状堆晶杂岩. 前者以基性、中基性岩为主, 后者以超基性岩为主.

3.1.1 层状堆晶岩 本区的堆晶岩零散出露, 分布在滦平县的北李营、石人沟以及丰宁县的波罗诺、团榆树等地, 大多为不规则岩块被同源、分异晚期的闪长岩所捕获, 其中团榆树的辉石—辉长岩面积最大, 约 27 km^2 . 层状堆晶岩常见有以下 3 个特征:

(1) 由于稳定矿物所占比例、大小或矿物组分的变化, 不同色调、不同粒度的岩层可以显示堆晶岩的层状特征 (图 4a), 形成厘米级的水平韵律层, 有时在辉长岩中可见斜层理 (图 4b) 或粒序层理. 虽然具有层状构造, 但不同组分间互为渐变过渡关系. 含水矿物角闪石的普遍存在是该区堆晶岩的一个标志性特征, 由于角闪石含量不同, 形成含辉石角闪岩、含角闪石的辉石岩或含角闪石的斜长岩, 表明分异作用不彻底.

(2) 层状堆晶岩中局部保留了类似“岩墙”产状的岩石, 例如笔者在波罗诺北采石场所见, 在出露面积较大的角闪岩中, 见到一组近直立产状的岩石 (图 4c), 中心是宽约 30 cm 的黑色角闪辉石岩, 两侧是巨晶结构的斜长角闪岩, 二者接触边界是渐变的, 而斜长角闪岩与外围角闪岩的接触边界是截然变化的. 这是层状堆晶岩中残留的通道相, 反映了柱状岩浆房中的侧壁结晶分异作用 (路凤香和桑隆康, 2002), 或者是 Bhattacharji and Smith (1964) 提到的“流动分异” (flowage differentiation) 作用.

(3) 在层状斜长岩中出现了球状的斜长石, 例如笔者在滦平北李营小苏家沟村北的球状斜长岩中发

表 2 角闪石的电子探针分析结果 (%)

Table 2 The EMOA results of hornblendes (%)

	RP8-1.1	RP8-2.1	RP8-3.4	RP8-4.1	RP8-4.3	RP1-1.1	RP1-1.2	RP1-1.5	RP1-2.3	RP1-2.5	RP6-1.4	RP6-2.2	RP6-2.3	Q131-6	Q112-4	Q112-6	RP10-1
所在岩石	斜长角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	粗粒闪长岩	粗粒闪长岩	粗粒闪长岩	粗粒闪长岩	粗粒闪长岩	球状斜长岩	球状斜长岩	球状斜长岩	柱状角闪石	细粒角闪石	细粒角闪石	寄主岩角闪石
SiO ₂	46.19	42.87	43.69	42.17	43.74	46.35	44.44	44.26	43.68	44.71	43.99	43.50	44.18	44.74	43.25	43.93	43.32
TiO ₂	0.87	2.17	1.89	2.12	1.73	1.37	1.54	1.24	1.50	1.24	1.44	1.38	1.61	1.16	1.07	0.74	0.77
Al ₂ O ₃	11.45	13.29	11.73	13.34	12.15	8.94	10.28	10.27	10.53	10.37	9.86	11.04	9.93	11.24	11.57	10.06	8.87
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.02	0.07	0.10	0.01	0.00	0.01	0.50	0.05	0.00	0.04	0.06	0.00	0.01	0.00	0.07
FeO	10.16	10.12	10.12	9.54	9.58	12.40	12.94	13.38	12.80	13.33	14.54	13.49	14.69	14.04	17.58	15.11	15.21
MnO	0.20	0.19	0.171	0.16	0.17	0.33	0.35	0.27	0.38	0.37	0.39	0.23	0.33	0.33	0.40	0.39	0.46
MgO	14.67	13.50	14.14	14.31	14.93	13.56	13.07	12.22	12.56	12.61	11.80	12.32	11.72	12.80	10.84	12.18	13.76
CaO	11.76	12.10	11.60	11.99	11.92	11.72	11.49	11.97	11.34	11.68	12.53	12.64	12.35	11.88	11.91	12.08	12.49
Na ₂ O	2.00	2.01	2.01	2.08	2.12	1.25	1.95	1.66	1.89	1.87	1.16	1.24	1.19	0.84	0.79	0.70	1.40
K ₂ O	0.22	0.54	0.47	0.53	0.39	0.44	0.45	0.53	0.53	0.40	0.76	1.12	0.89	1.04	1.35	1.25	1.02
Total	98.69	98.28	96.96	97.41	97.91	97.82	97.96	97.31	97.13	98.69	98.13	98.54	98.62	98.07	98.76	96.44	97.13
Si	6.61	6.27	6.49	6.16	6.33	6.61	6.54	6.62	6.50	7.42	6.59	6.47	6.59	6.47	6.33	6.53	6.38
Ti	0.09	0.24	0.21	0.23	0.19	0.09	0.17	0.14	0.17	0.16	0.16	0.16	0.18	0.13	0.12	0.09	0.09
Al	1.93	2.29	2.03	2.30	2.07	1.93	1.78	1.81	1.85	0.27	1.74	1.74	1.75	1.92	1.99	1.76	1.54
Cr	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Fe ³⁺	0.47	0.24	0.45	0.47	0.52	0.47	0.53	0.26	0.50	0.00	0.25	0.25	0.25	0.80	0.91	0.73	0.94
Fe ²⁺	0.75	1.00	0.79	0.70	0.64	0.75	1.07	1.42	1.10	1.85	1.57	1.57	1.58	0.90	1.24	1.15	0.94
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
Mg	3.13	2.94	3.09	3.12	3.22	3.13	2.87	2.72	2.79	3.12	2.64	2.64	2.61	2.76	2.37	2.70	3.03
Ca	1.80	1.90	1.82	1.88	1.85	1.80	1.81	1.92	1.81	2.08	2.01	2.01	1.97	1.84	1.87	1.92	1.98
Na	0.56	0.57	0.57	0.59	0.60	0.56	0.56	0.48	0.55	0.60	0.34	0.34	0.35	0.24	0.22	0.20	0.40
K	0.04	0.10	0.07	0.10	0.07	0.04	0.08	0.10	0.10	0.09	0.15	0.15	0.17	0.19	0.25	0.24	0.19
Total	15.40	15.57	15.47	15.57	15.51	15.40	15.45	15.50	15.45	15.63	15.49	15.50	15.49	15.27	15.34	15.36	15.57
Mg#	0.81	0.75	0.79	0.82	0.83	0.74	0.73	0.66	0.72	0.63	0.63	0.65	0.62	0.75	0.66	0.70	0.73
Si	6.61	6.27	6.41	6.16	6.33	6.61	6.54	6.62	6.50	7.42	6.59	6.47	6.59	6.47	6.33	6.53	6.40
命名	镁角闪	非闪石	镁钙闪	镁绿钙	镁绿钙	镁角闪	镁角闪	镁角闪	镁角闪	浅闪石	镁角闪	镁钙闪	镁角闪	镁钙闪	镁钙闪	镁角闪	镁绿钙

注: 探针分析由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 操作者李小平, 仪器型号: JXA-8100; 分析条件: 加速电压 15 kV; 束流 1×10⁻⁸ A; 束斑 2 μm; 修正方法 PRZ; 标准样品美国 SPI 公司 53 种矿物, 以下探针同此。RP10-1 和 Q 的分析数据引自马芳等(2004)。

表 3 单斜辉石的探针分析结果(%)

Table 3 The EMOA results of clinopyroxenes (%)

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	Wo	En	Fs
RP4. 1	52.58	0.11	3.57	11.92	0.25	16.51	11.65	0.70	0.16	0.39	0.05	97.89	25.36	51.99	21.66
RP4. 2	52.21	0.21	3.74	12.35	0.22	16.48	12.09	0.61	0.27	0.32	0.07	98.56	26.94	51.10	21.95
RP4. 2+	52.18	0.16	3.52	11.90	0.27	16.49	11.81	0.74	0.24	0.34	0.14	97.79	25.67	51.81	21.54
RP4. 3	52.58	0.08	3.76	12.07	0.24	16.68	11.98	0.82	0.16	0.37	0.04	98.79	25.72	51.77	21.50
RP4. 4	51.71	0.13	4.20	12.40	0.24	16.15	11.61	0.84	0.21	0.69	0.01	98.20	26.39	51.09	22.50
RP4. 5	51.21	0.16	4.35	12.42	0.35	16.35	11.69	0.94	0.23	0.58	0.05	98.32	26.33	51.24	22.43
RP4. 6	52.17	0.23	3.84	12.13	0.30	16.59	11.87	0.74	0.16	0.37	0.00	98.40	26.56	51.65	21.79

表 4 长石的探针分析结果(%)

Table 4 The EMOA results of feldspars (%)

样号	RP1-2.2	RP1-2.4	RP8-1.4	RP8-1.5	RP8-2.3	RP6-1.1	RP6-1.2	RP6-1.3	RP6-1.3+	RP6-2.1	RP6-1.5	RP6-2.5
SiO ₂	57.69	56.65	64.67	65.75	46.37	58.23	68.03	46.18	46.07	55.16	54.28	59.19
Al ₂ O ₃	26.41	27.31	22.82	21.98	31.95	25.96	20.19	35.04	36.09	28.32	28.62	25.04
FeO	0.06	0.10	0.07	0.03	2.96	0.12	0.05	2.38	1.86	0.11	0.15	0.20
CaO	8.26	9.06	3.82	2.96	0.03	7.53	0.59	0.02	0.06	10.30	11.00	7.56
Na ₂ O	7.47	6.98	9.66	10.14	0.31	7.13	11.79	0.17	0.23	6.25	5.69	7.79
K ₂ O	0.08	0.08	0.03	0.05	10.86	0.18	0.09	10.09	10.57	0.10	0.16	0.19
An	37.76	41.58	17.90	13.85	0.22	36.48	2.67	0.16	0.43	47.39	51.18	34.55
Ab	61.79	57.79	81.93	85.86	4.16	62.51	96.84	2.44	3.16	52.04	47.91	64.43
Or	0.45	0.45	0.17	0.28	95.62	1.02	0.49	97.40	96.41	0.56	0.90	1.02
命名	中长石	中长石	更长石	更长石	正长石	中长石	钠长石	正长石	正长石	中长石	拉长石	含钡中长

表 5 地幔包体和堆晶岩中金云母组分对比(%)

Table 5 Component comparison of phlogolite in mantle xenoliths and cumulates (%)

金云母赋存状态	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	FeO	Na ₂ O	K ₂ O
高寺台铬铁矿包体中富铬金云母	GST2-2.1	39.40	0.19	15.25	26.39	0.01	0.00	2.13	0.53	10.01
	GST1-3.2	39.26	0.26	15.23	25.80	0.02	0.00	1.40	0.46	9.84
高寺台堆晶含橄辉石岩中金云母	G4-2.2	37.31	2.78	15.61	18.94	0.00	0.05	9.83	0.64	9.33
	G4-2.3	36.63	2.59	15.57	18.54	0.00	0.10	11.00	0.27	9.31

注:探针分析仪器和方法同表 2.

现含放射状或层状的角闪石(图 4d 和 4e),即前人所谓的“球状闪长岩”(马芳等,2004),实际角闪石只占 5%~15%,本文将其统称为斜长岩或含角闪石的斜长岩.有的球壳状含角闪石斜长岩可以出现 2~3 个韵律环带(图 4e).球体构造的中心可以是早期结晶的辉石岩(图 4d)或者捕获的变质岩捕虏体.细长角闪石晶体的垂直环带生长以及多个韵律环带的形成,反映了堆晶岩浆房中在相对稳定的环境下,岩浆存在脉动式供给,导致这种生长过程的重复发生.

3.1.2 环状堆晶岩 高寺台超基性环状杂岩从核部到外围依次出露的是粗粒、中粒、细粒纯橄岩、易剥橄榄岩、橄辉岩或单斜辉石岩、角闪岩,反映岩浆体系的液相线温度向外逐渐降低.环状杂岩的围岩为太古代单塔子群的 TTG 片麻岩(图 2a).在核部

的粗粒纯橄岩所含的铬铁矿球状熔融包裹体中,笔者首次发现了黄长石、石榴石、金云母、菱镁矿、磷灰石等矿物,并对它们代表的 OIB 特征的原始母岩浆及其形成环境作了讨论,认为它们与活动陆缘的弧后拉张无关(未发表).

3.2 堆晶岩的结构特征

堆晶岩的结构特征有以下几点:(1)矿物定向组构是堆晶岩在垂向剖面中常见的特征(图 5a);(2)由于岩浆房中相对稳定的环境,致使矿物得以自由生长,因此形成巨晶矿物,例如角闪石巨晶一般长 1~6 cm,宽 1~3 cm(图 4f 和图 5b),巨晶辉石长可达 1 cm(图 4g),巨晶是幔源岩浆中常见的结构;(3)矿物生长有清楚的世代关系(图 5c 和 5d),晚期形成的矿物往往呈现明显的填隙结构,根据填隙矿物所占的比例可划分正堆晶结构和补堆晶结构,前者

表 6 堆晶岩主量元素分析结果(%)

Table 6 The analytical results of major elements of cumulates (%)

编号	地点	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
G11	高寺台	纯橄岩	34.81	0.01	0.07	7.88	0.12	43.81	0.16	0.00	0.01	0.01	13.27	100.15
BJ6	高寺台	橄辉岩	44.20	0.04	0.61	13.66	0.10	40.46	0.91	0.01	0.04	0.01	10.71	100.00
G4	高寺八家	含橄辉石岩	38.16	1.90	5.93	24.83	0.17	13.00	12.53	0.66	1.29	0.06	0.28	98.81
RP-4	北李营	辉石岩	48.40	0.14	2.87	15.82	0.28	19.05	11.53	0.55	0.18	0.09	0.69	99.59
R12	北李营	巨晶辉石岩	51.28	0.40	7.00	7.55	0.15	15.69	13.30	1.26	0.70	0.06	1.86	99.25
R8	北李营	角闪辉石岩	49.78	1.33	5.75	16.34	0.28	12.07	11.90	0.82	0.42	0.41	0.76	99.87
R21	波罗诺	辉石角闪岩	37.33	2.49	13.62	21.03	0.18	10.26	9.62	1.81	0.84	0.04	1.72	98.94
R36	波罗诺	辉石角闪岩	42.11	1.26	15.63	11.25	0.13	12.51	11.65	2.47	0.32	0.02	1.68	99.03
R16	石人沟	辉石角闪岩	45.08	1.39	12.86	11.79	0.15	13.03	10.58	2.03	0.68	0.04	1.54	99.17
R1	北李营	含斜长石角闪岩	46.59	0.74	7.64	15.01	0.26	15.69	10.08	1.14	0.23	0.09	1.92	99.39
RP-8	北李营	含斜长石角闪岩	47.83	0.87	9.45	10.35	0.16	16.64	10.51	1.89	0.61	0.12	1.24	99.66
R37	团榆树	淡色辉长岩	49.71	0.69	19.88	9.27	0.13	5.25	9.71	3.76	0.19	0.05	0.34	98.99
R33	八郎沟	角闪辉长岩	45.84	0.93	12.79	13.53	0.19	10.60	10.89	1.77	0.66	0.06	1.72	98.98
R20	波罗诺	辉绿-辉长岩	47.57	0.91	19.64	11.44	0.21	3.27	8.28	4.47	1.02	0.68	1.34	98.83
R30	八郎沟	闪长岩	43.87	1.67	19.18	13.91	0.23	4.18	9.88	2.67	1.22	0.94	1.26	99.01
RP-1	北李营	粗粒闪长岩	49.62	0.80	16.71	10.12	0.17	6.58	9.43	3.81	0.75	0.45	1.26	99.69
R4	北李营	辉绿岩	57.72	1.17	16.32	7.12	0.08	2.78	3.46	5.63	2.69	0.44	2.22	99.62
Q238	北李营	辉长岩(捕)	49.00	0.81	15.37	10.41	0.24	8.89	10.69	2.49	0.78	0.25	0.27	99.80
R24	波罗诺	斜长岩	53.27	0.32	20.39	4.64	0.08	1.89	9.74	5.55	0.54	0.34	2.70	99.46
RP-16	石人沟	石英闪长岩	60.33	0.21	25.59	3.20	0.07	1.37	7.21	3.51	0.86	0.20	1.28	100.65
RP-3	北李营	石英闪长岩	58.79	0.44	18.79	5.82	0.11	2.39	5.22	5.72	1.51	0.35	0.56	99.70
RP-9	北李营	闪长质寄主岩	65.76	0.05	21.58	1.51	0.09	0.25	4.11	3.51	1.87	0.18	0.51	99.32

注:Q238 为球状斜长岩核部捕获的辉长岩;Q238 和 RP-9 引自马芳等(2004);其余为中科院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室分析。

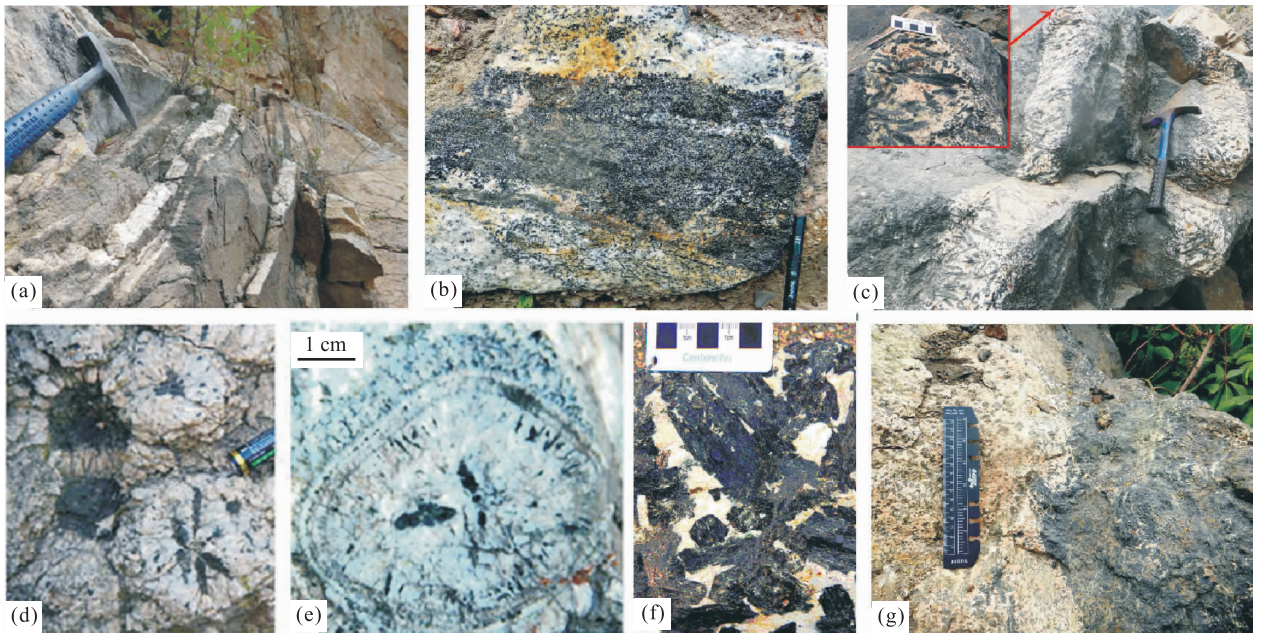


图 4 堆晶岩构造

Fig. 4 The structure of cumulate

a. 堆晶岩层状构造;b. 堆晶斜层理;c. 堆晶岩中残留的通道相;d. 球状斜长石中的放射状角闪石;e. 球状斜长岩的韵律环带;f. 巨晶角闪石;g. 巨晶辉石

早期形成的矿物(或巨晶)边缘往往有明显的反应边和环带结构(图 5e 和 5f),反映早期矿物或巨晶在相

对高压的环境和非常低的冷却速率条件下形成,不活动粒间液体发生不连续分异,因而得以保留环状

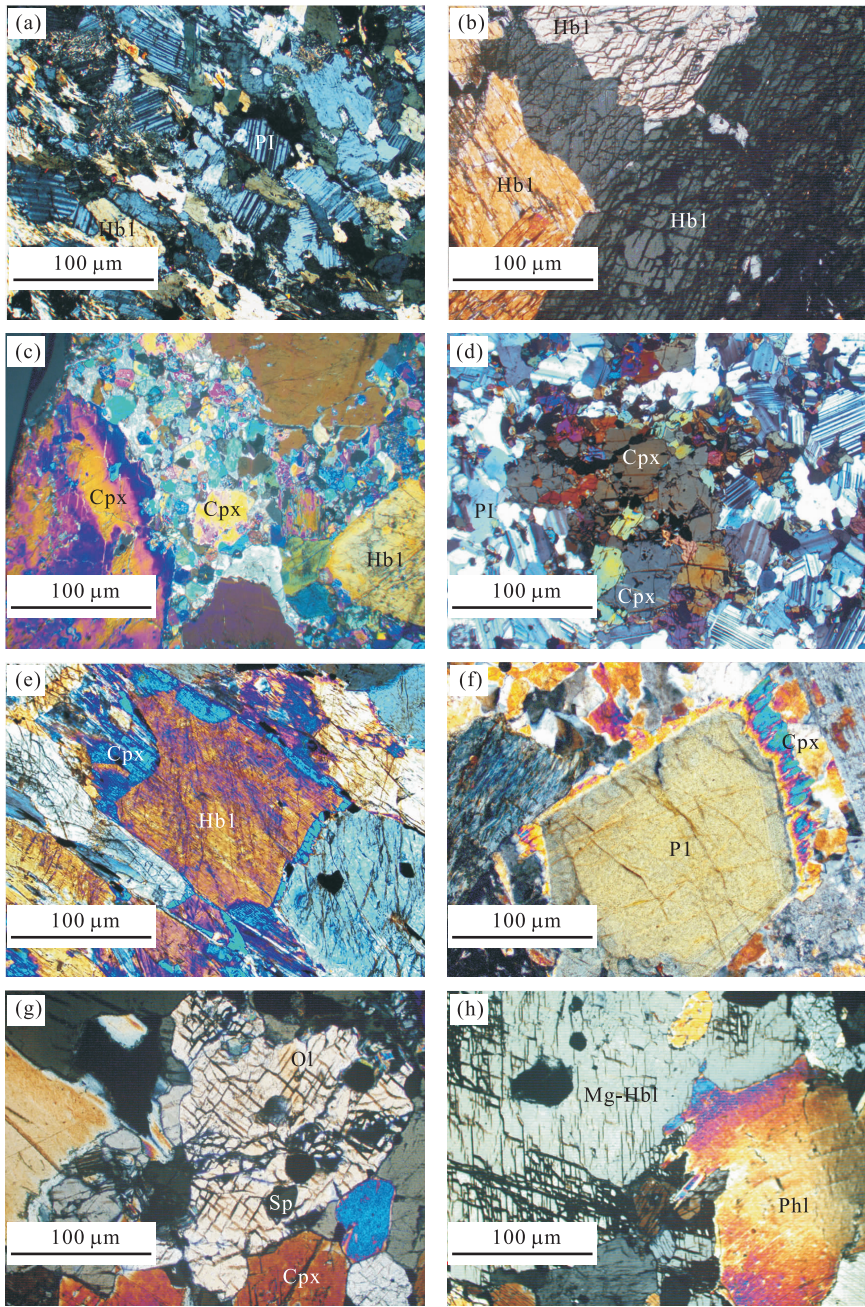


图5 堆晶岩的显微摄影

Fig. 5 The photomicrography of cumulates

a. 闪长岩的定向组构; b. 巨晶角闪石及其边缘锯齿状镶嵌结构; c. 填隙的晚期粒状辉石; d. 斜长岩的包含结构及捕获的早期辉石; e. 反应边结构; f. 矿物的环带结构和反应边结构; g. 尖晶石橄辉岩; h. 金云母和镁角闪石的镶嵌结构; Ol. 橄榄石; Cpx. 单斜辉石; Hbl. 角闪石; Mg-Hbl. 镁角闪石; Sp. 尖晶石; Phl. 金云母; Pl. 斜长石

特征 (Humphreys, 2009); (4) 早、晚期形成矿物之间可以形成嵌晶含长结构; 还有堆晶岩常见的包含结构, 例如自形斜长石晶体之间包裹了小的浑圆状辉石 (图 5d)。

3.3 矿物组合特征

堆晶岩在一些典型矿物 (角闪石和辉石) 组成上也显示了它们共同的幔源特征, 而相对成分变化大

的长石则记录了堆晶岩形成过程中岩浆组分的演变, 而少量赋存在铬铁矿包体中的金云母则保留了岩石圈地幔的某些特征。

3.3.1 角闪石 本区堆晶岩中巨晶角闪石是最常见的标志性矿物 (图 5b), 角闪石大多为黑色, 镜下为褐色或黑色。各类角闪石的 $Al^{VI} < 0.6Al^{IV} + 0.25$, 均为岩浆作用产物。参照国际矿物学会发布的

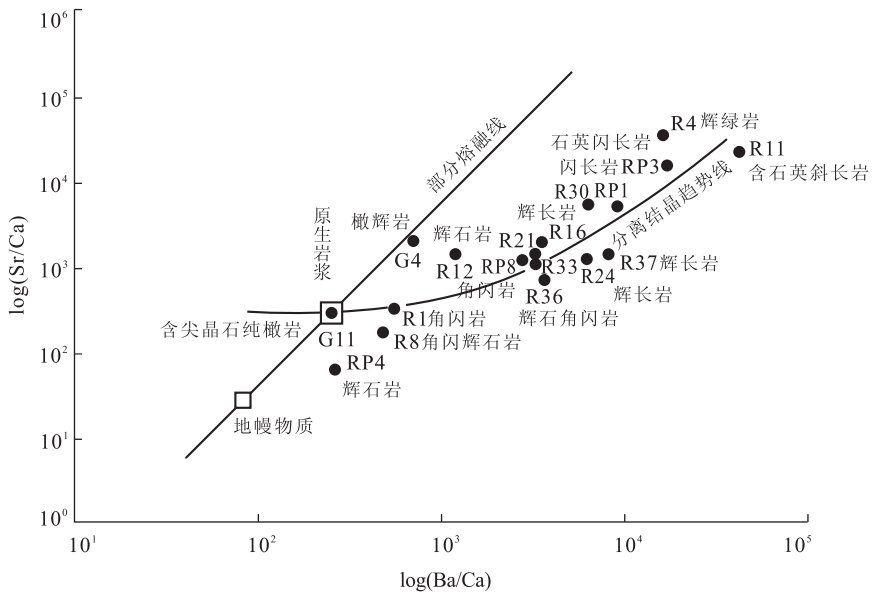


图 7 堆晶岩的 S-B 图解
 Fig. 7 The S-B diagram of cumulates
 据 Onuma(1981)

示了堆晶岩以辉长质岩石为主的组合特征,虽然 R_1-R_2 ($R_1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$; $R_2=6Ca+2Mg+Al$)图所标的岩石名称与岩石的实际名称略有出入,但该图对描述富 Mg、Fe 和 Ca 元素的堆晶岩来说是有意义的。

Onuma *et al.* (1981) 曾利用 $\log(Sr/Ca)-\log(Ba/Ca)$ 图解分辨岩浆的分离结晶趋势和部分熔融趋势,主要依据是分离结晶趋势线的斜率受 Pl/Cpx (Hb)量比的限制,这对于判断本文讨论的堆晶岩成因有重要意义. 在 $\log(Sr/Ca)-\log(Ba/Ca)$ 图解中,本文提供的早二叠世堆晶岩集中在同一分离结晶趋势线附近,说明它们具有同源性(图 7). 图 7 的对数坐标系中对角线表现了 Sr/Ba 比值不随熔融程度变化的特征,可作为部分熔融趋势线. 分离结晶趋势线与部分熔融趋势线相交的点,为原生岩浆的成分点(Onuma *et al.*, 1981),该点与研究区高寺台环状堆晶杂岩核部含尖晶石的粗粒纯橄岩正好重合,因此这部分纯橄岩可以作为近似原始岩浆的代表,沿着该趋势线可以看出从橄辉岩、辉石岩、角闪辉石岩、辉石角闪岩、辉长岩、闪长岩、一直到含石英斜长岩的分离结晶趋势。

4 堆晶岩的元素地球化学特征

堆晶岩是伸展背景下,上涌的玄武质岩浆添加到壳幔过渡带分离结晶的产物,不同组分的堆晶岩

必然会显示其同源的幔源特征,下文将侧重从地球化学角度讨论它们的同源性及分离结晶作用。

4.1 微量元素特征

表 7 中列出了各类堆晶岩的稀土元素,其特点表现如下:(1)稀土总量丰度和轻稀土富集程度变化表明:稀土元素受到橄榄石、单斜辉石、角闪石等矿物结晶分异的影响,如纯橄岩(G11)90%以上由橄榄石组成,REE 约为球粒陨石的 0.03 倍,辉长质岩石 REE 为球粒陨石的 6~20 倍,而分异晚期的辉绿—辉长岩稀土总量则为球粒陨石的 50 倍.(2)不同地点、不同岩性堆晶岩的稀土配分曲线近于平行(图 8a),反映岩浆的同源性;(3)以辉长质为主体堆晶岩的配分型式呈上凸型,在 Pr-Nd 处构成上凸的峰值,反映岩浆中存在过量的单斜辉石,由于单斜辉石富钙致使中稀土浓集. 而斜长岩(R24)和淡色辉长岩(R37)则显示了 Eu 弱正异常,并伴随了部分 Ba 和 Sr 的正异常,反映了斜长石的分离结晶作用。

本区堆晶岩微量元素蛛网图(图 8b)存在一定程度的 Nb 和 Ta 亏损现象,表明在底侵作用背景下,岩浆房中的幔源岩浆在地幔源区或岩浆上升过程中曾发生过明显的壳幔相互作用,造成一些不相容元素的富集;同时也不排除早二叠世的地幔源区具有受交代的富集地幔的特征. 与 Sr 相比,Rb 和 Nd 的含量变化小得多,表明其是同源岩浆分离结晶作用的结果(Cocherie, 1986)。

20 个早二叠世堆晶岩过渡族元素 Cr、Co 和 Ni

表 7 各类堆晶岩的微量元素(10^{-6})

Table 7 The trace elements in all kinds of cumulates (10^{-6})

样品	G11	BJ6*	G4	R12	R8	R36	R1	R37	R20	R30	R24	R21	R33	R16	R4
La	0.023	0.226	2.55	4.98	11.6	3.06	6.43	3.86	34.1	28.8	21.1	6.17	7.27	5.40	30.3
Ce	0.047	0.659	9.22	12.6	33.3	10.6	22.3	8.15	80.3	76.4	43.5	19.6	19.2	17.2	68.7
Pr	0.0031	0.115	1.67	1.90	5.38	2.08	3.99	1.16	10.7	10.9	5.16	3.55	3.03	3.11	8.54
Nd	0.021	0.568	8.80	8.53	27.7	11.9	19.9	5.64	46.7	50.6	20.6	20.1	15.3	16.5	35.2
Sm	0.0032	0.186	2.41	2.11	7.27	3.61	5.02	1.35	9.49	11.2	3.70	5.90	3.93	4.54	6.49
Eu	0.0013	0.041	0.74	0.71	1.81	1.34	1.39	0.91	2.83	2.96	1.39	1.98	1.21	1.62	1.80
Gd	0.0069	0.158	2.21	1.92	7.12	3.78	4.22	1.28	7.64	9.74	2.85	6.00	3.75	4.55	4.57
Tb	0.0010	0.029	0.33	0.31	1.07	0.57	0.63	0.20	1.08	1.43	0.39	0.91	0.57	0.71	0.57
Dy	0.0062	0.129	1.80	1.95	6.26	3.31	3.62	1.22	5.78	7.88	2.09	5.07	3.32	4.10	2.75
Ho	0.0011	0.022	0.33	0.38	1.23	0.67	0.70	0.24	1.10	1.51	0.40	0.97	0.66	0.80	0.45
Er	0.0086	0.056	0.82	1.05	3.25	1.81	1.90	0.69	2.99	4.05	1.07	2.42	1.73	2.14	1.15
Tm	0.0011	0.007	0.10	0.14	0.44	0.25	0.26	0.095	0.43	0.55	0.16	0.33	0.23	0.30	0.15
Yb	0.0089	0.046	0.72	0.89	2.76	1.48	1.70	0.64	2.62	3.34	1.07	1.95	1.48	1.78	0.91
Lu	0.0020	0.008	0.10	0.15	0.43	0.21	0.27	0.095	0.39	0.49	0.16	0.27	0.21	0.24	0.12
ΣREE	0.13	2.31	31.79	37.65	109.55	44.67	72.33	25.54	206.12	209.87	103.66	75.29	61.83	63.03	161.75
Rb	0.074	0.41	27.6	7.00	0.82	0.74	0.47	1.23	16.5	24.1	7.52	6.19	8.24	5.52	36.3
Ba	3.04	2.66	454	353	35.8	149	57.6	242	877	1015	221	261	212	380	2156
Th	0.0074	0.021	0.012	0.18	0.35	0.022	0.092	0.0087	0.86	1.11	3.38	0.65	0.10	0.060	1.37
U	0.0037	0.008	0.0025	0.075	0.11	0.014	0.050	0.0062	0.21	0.35	0.69	0.15	0.066	0.037	0.45
Nb	0.0086	0.07	1.08	2.26	2.54	1.37	3.50	0.20	5.09	10.7	3.65	3.47	2.44	4.30	6.92
Ta	0.0025	0.001	0.049	0.085	0.11	0.056	0.12	0.0100	0.16	0.42	0.21	0.16	0.090	0.15	0.33
Pb	0.066	3.45	2.27	1.34	1.31	0.69	0.84	1.94	4.49	4.46	5.20	1.85	3.00	1.49	4.06
Sr	2.46	2.66	153	282	100	763	98.5	1395	1779	1125	1054	548	615	655	983
Zr	0.17	1.11	16.1	23.0	81.6	21.3	36.7	6.29	53.6	70.1	75.1	34.3	39.5	34.0	159
Y	0.044	0.707	8.30	10.2	33.1	18.0	18.4	6.51	31.9	41.2	11.7	25.1	17.1	21.0	13.0
Sc	2.71	12.2	60.5	62.8	75.2	73.6	45.9	22.6	13.5	23.5	5.37	65.8	57.2	80.6	9.97
V	5.07	19.91	851.	169	265	394	240	252	119	74.7	67.8	756	352	440	128
Cr	3.462	1453.2	40.6	1234	28.8	251	1496	32.5	1.25	3.40	21.1	2.20	88.8	353	21.3
Co	117	103	93.3	49.8	63.8	52.0	70.6	29.5	17.3	25.1	10.5	73.7	52.2	57.4	18.0
Ni	1612	893.5	101	342	63.4	108	450	25.4	1.53	3.26	9.48	4.92	57.9	156	21.0

注:测试者为武汉上谱分析科技有限责任公司史晓丽,各样号所对应的岩石名称见表 6,以上数据均为原始测试数据.

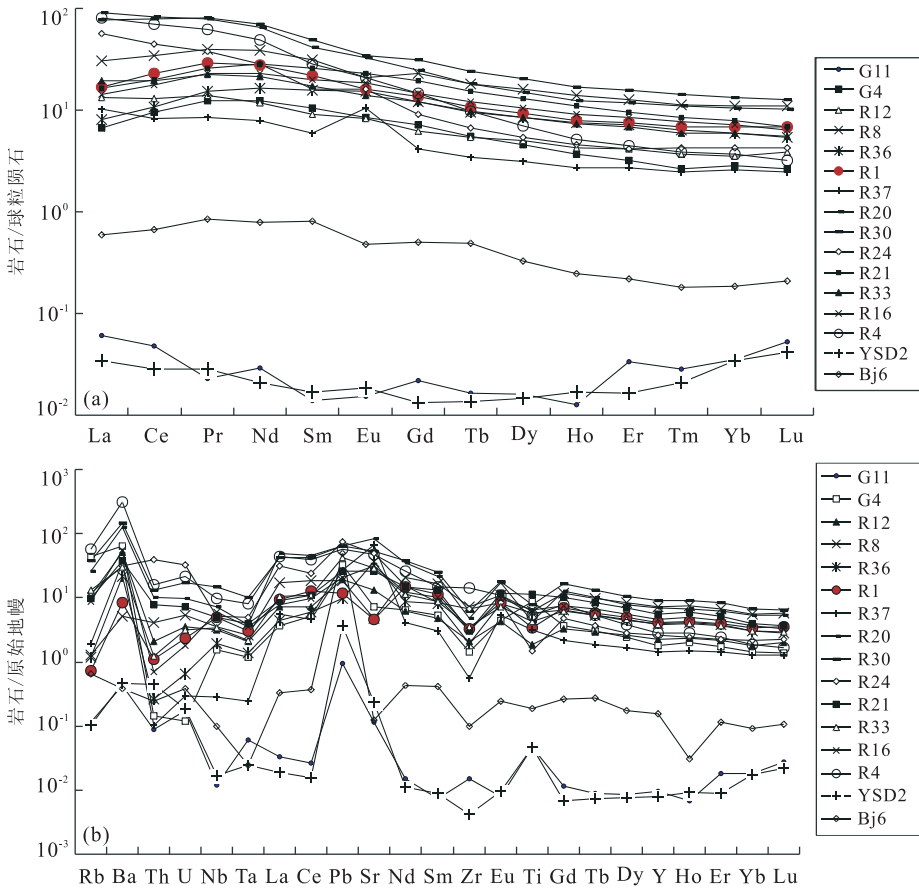


图 8 堆晶岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化的蛛网图(b)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) of cumulates

G11. 纯橄岩; YSD-2. 纯橄岩; BJ6. 橄辉岩; G4. 含铁透辉岩; R12. 辉石岩; R8. 角闪辉石岩; R21. 辉石角闪岩; R36. 辉石角闪岩; R16. 辉石角闪岩; R1. 角闪岩; R37. 辉长岩; R33. 角闪辉长岩; R20. 辉长岩; R4. 辉绿岩; R24. 斜长岩; R30. 闪长岩

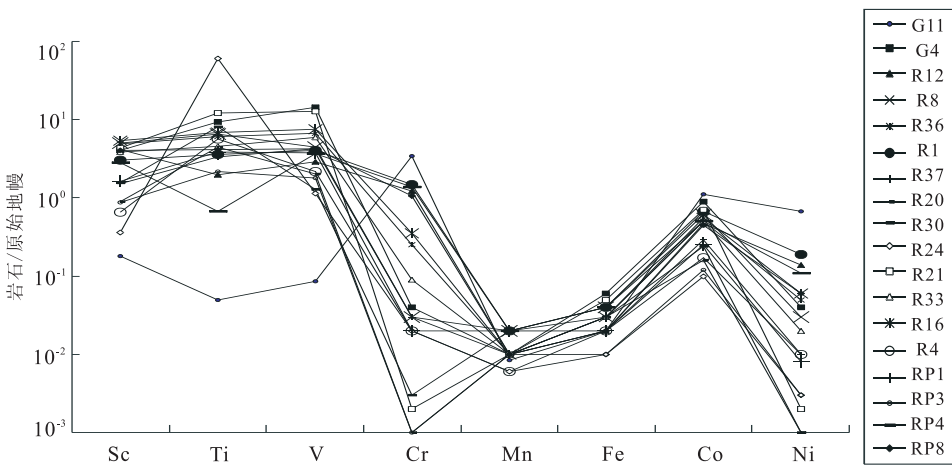


图 9 堆晶岩的过渡族元素原始地幔标准化图

Fig. 9 Primitive mantle-normalized transition group elements diagram of cumulates

的平均值分别为 469×10^{-6} 、 49×10^{-6} 和 197×10^{-6} 。从各类堆晶岩的过渡族元素原始地幔标准化图(图 9)来看,除了不同岩石 Cr 的含量明显区别外,各曲线间大体平行,变化趋势相似。其中 Ti/V

比值平均为 86, 远高于原始地幔值 17 (Condie, 1989), 显示了大陆玄武岩特征。

Th 的亏损往往被作为裂谷初期玄武岩的标志 (Holm, 1985), 大陆拉斑玄武岩的 Th 含量为

表 8 堆晶岩的 Sm-Nd 同位素组成

Table 8 Sm-Nd isotopic composition of cumulates

样号	年龄	岩石	Sr (10^{-6})	Nd (10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/$ ^{86}Sr	$^{87}\text{Sr}/$ ^{86}Sr	2σ	$(^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/$ ^{144}Nd	$^{143}\text{Nd}/$ ^{144}Nd	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
R12	284	巨晶辉石岩	277.10	8.710	0.076 2	0.705 215	15	0.704 91	0.140 6	0.511 828	12	-13.8
R8	284	角闪辉石岩	99.47	29.450	0.032 8	0.705 250	13	0.705 12	0.154 4	0.511 879	13	-13.3
R36	281	辉石角闪岩	748.50	13.490	0.075 7	0.705 569	15	0.705 27	0.179 1	0.511 859	14	-14.6
R37	281	辉长岩	1 457.00	5.875	0.002 5	0.706 504	17	0.706 49	0.142 8	0.511 756	15	-15.3
R20	284	辉绿岩	1 741.00	46.830	0.027 4	0.705 439	15	0.705 33	0.120 6	0.511 904	22	-11.6
R24	286	斜长岩	1 001.00	19.650	0.021 2	0.705 406	13	0.705 32	0.107 4	0.511 901	13	-11.1

注:测试者为中国科学院地质与地球物理研究所同位素室李潮峰,表中年龄为初始比值计算中的参考年龄。

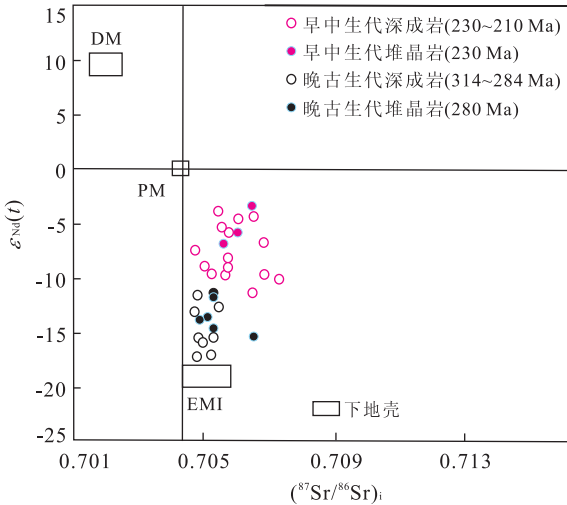


图 10 华北克拉通北缘早二叠世和晚三叠世堆晶岩和深成岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

Fig. 10 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of cumulates and plutonic rocks of the Early Permian and Late Triassic in the northern margin of North China Craton

2.5×10^{-6} (Wood *et al.*, 1979), 本区早二叠世 15 个堆晶岩 Th 的平均为 0.55×10^{-6} , 原始地幔标准化值为 9.8, 十分接近 Holm(1985) 给出的裂谷初期 Th 的原始地幔标准化值 10, 表明早二叠世堆晶岩的岩浆成因环境具有大陆初始裂谷的性质。而本区晚三叠世 27 个堆晶岩 Th 的平均含量为 1.24×10^{-6} (邵济安等, 2007), Th 元素含量的变化也暗示早二叠世的华北克拉通处于从长期稳定转向活动的最初阶段, 可以看作初始裂谷阶段。而晚三叠世伴随底侵作用的伸展活动则进一步加强, 除了堆晶岩外, 还形成了碱性杂岩和火山岩 (牟保磊和阎国翰, 1992; 阎国翰等, 2000; 邵济安等, 2007, 2012; 杨进辉和吴福元, 2009; 邵济安和杨进辉, 2011), 进一步显示了底侵作用对华北克拉通改造的重要性。

4.2 同位素组成

伴随底侵作用在壳幔过渡带形成的堆晶岩, 必然留下壳幔相互作用的印记, 6 个不同岩性堆晶岩

的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均为 -13.3 (表 8), 反映了早二叠世形成堆晶岩的岩浆来自地幔, 并受到地壳物质混染。本区晚三叠世堆晶岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均为 -5.5 (邵济安等, 2007), 二者相比, 同样说明本区晚三叠世幔源物质的贡献更为明显。这一现象同样也反映在深成岩中 (图 10)。这一现象揭示了华北克拉通自身演化的规律, 早二叠世沿岩石圈断裂的构造—岩浆活化可以看作是晚三叠世强烈的壳幔作用和构造体制转折的前兆。由此可见, 早二叠世幔源岩浆的活动有其重要的意义。

5 关于堆晶岩成因的讨论

(1) 岩浆分离结晶作用的确认。堆晶岩是底侵作用的产物, 堆晶岩在壳幔过渡带的岩浆房中经历了岩浆分离结晶作用, 重力分异形成的堆晶结构和同源性是确认堆晶岩的关键性标志, 因此岩相学研究是确定不同组分之间分离结晶作用最重要的基础。层状或者环状堆晶构造、定向的巨晶及其之间的填隙结构都反映了成岩过程独特的伸展环境和它们的同源性, 而微量元素 $\log(\text{Sr}/\text{Ca}) - \log(\text{Ba}/\text{Ca})$ 的相关性则进一步表明了这一点。

(2) 关于岩浆源区特征的讨论。综上所述, 堆晶岩的同位素和微量元素研究表明, 早二叠世受岩石圈断裂控制的堆晶岩岩浆来自上地幔, 并受到地壳物质的混染, 岩浆活动具有初始裂谷的性质。

前文提到高寺台含橄辉石岩和铬铁矿包体中都发现金云母的存在, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -13.3 以及 Nb、Ta 亏损的现象也都表明早二叠世的地幔源区具有受交代的富集地幔特征。同时本文更明确地注意到堆晶岩的岩浆具有明显的壳幔混熔特征: ① 笔者讨论的堆晶岩岩浆来源于地幔部分熔融岩浆, 漫长的成岩作用主要发生在壳幔过渡带或下地壳底部, 受地壳混染是不可避免的; ② 高寺台环状杂岩核部和外环

La/Nb 比值的变化如下:环状杂岩核部纯橄岩的 La/Nb 大于 1 或接近 1,而外环的辉石岩和角闪岩则 La/Nb 小于 1;表明外环岩石在侵位中受到了地壳混染,而核部纯橄岩还保留着原始岩浆的特征(邵济安等,2015)。

(3)关于堆晶岩形成的伸展背景认识.伸展背景可以有多种环境,如地幔柱上涌、大陆克拉通的裂谷带、与板块俯冲活动有关的弧后区等.单纯从一般的岩石学—地球化学特征上判断堆晶岩形成的构造环境是困难的. Tian *et al.* (2011)曾利用铬铁矿地幔熔融包裹体中单斜辉石恢复的原始熔体,La/Nb 大于 1,显示了原始岩浆具有 OIB 的特征,未受到地壳混染.在铬铁矿熔融包裹体中,笔者发现了黄长石,并根据熔体包裹体矿物所限定的母岩浆液相线矿物(石榴石+单斜辉石)组合,指示其寄主矿物只能在约 90 km 深度、大于 2.7 GPa 的压力条件下结晶形成(未发表).这是被捕获的地幔熔融包裹体来源的环境,不代表堆晶岩原始岩浆来源的环境.但是,这一事实至少说明堆晶岩形成与板块俯冲活动或弧后伸展无关,至今也没有关于二叠纪华北克拉通与地幔柱活动直接相关的报道,因此,笔者认为其主要与大陆克拉通裂谷带的活动有关,确切地说,与中—晚元古代华北克拉通化过程中形成的古裂谷带的活化有关.

华北克拉通早二叠世古裂谷带的活化具有区域性的伸展构造演化背景.华北克拉通北缘堆晶岩形成、天山石炭纪—二叠纪裂谷火山岩的喷发、塔里木大火成岩省溢流玄武岩及其中亚造山带数千公里火成岩带的形成绝非偶然,而是有着更深刻的地球动力学背景,全球古磁强度研究表明,石炭纪—二叠纪(320~250 Ma)的超静磁场现象对应了超级地幔柱事件(Courtillot and Besse, 1987).超级地幔柱直接影响的范围有限,但不排除区域上受到伸展作用的影响,然而由于各自基底的差异,对同一深部事件响应的表现形式有所不同.华北古老克拉通内部的岩石圈断裂,不但为早二叠世幔源岩浆底辟体的上涌和岩浆房的形成提供了条件,而且作为一个重要的构造—岩浆活跃带在未来的中生代演化中显示了它的重要性.

References

Bai, W. J., Zhou, M. F., Hu, X. F., et al., 1993. Mafic/Ultramafic Magmatism and Tectonic Evolution of the Northern China Craton. Seismological Press, Beijing,

224—273 (in Chinese).

- Bhattacharji, S., Smith, C. H., 1964. Flowage Differentiation. *Science*, 145 (3628): 150—153. doi: 10. 1126/science. 145. 3628. 150
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, 1989. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Geological Publishing House, Beijing, 567—569 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Suzuki, K., Tian, W., et al., 2009. Geochemistry and Os-Nd-Sr Isotopes of the Gaositai Alaskan-Type Ultramafic Complex from the Northern North China Craton; Implications for Mantle-Crust Interaction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5): 683—702. doi: 10. 1007/s00410—009—0404—7
- Cocherie, A., 1986. Systematic Use of Trace Element Distribution Patterns in logA-logB Diagrams for Plutonic Suites. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 50 (11): 2517—2522. doi: 10. 1016/0016—7037(86)90034—7
- Condie, K. C., 1989. Geochemical Changes in Basalts and Andesites across the Archean-Proterozoic Boundary Identification and Significance. *Lithos*, 23(1—2): 1—18. doi: 10. 1016/0024—4937(89)90020—0
- Courtillot, V., Besse, J., 1987. Magnetic Field Reversals, Polar Wander, and Core-Mantle Coupling. *Science*, 237 (4819): 1140—1147. doi: 10. 1126/science. 237. 4819. 1140
- de la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., et al., 1980. A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks Using R_1 - R_2 Diagram and Major-Element Analyses—Its Relationships with Current Nomenclature. *Chemical Geology*, 29(1—4): 183—210. doi: 10. 1016/0009—2541(80) 90020—0
- Holm, P. E., 1985. The Geochemical Fingerprints of Different Tectonomagmatic Environments Using Hygromagmatophile Element Abundances of Tholeiitic Basalts and Basaltic Andesites. *Chemical Geology*, 51(3—4): 303—323. doi: 10. 1016/0009—2541(85)90139—1
- Humphreys, M. C. S., 2009. Chemical Evolution of Intercumulus Liquid, as Recorded in Plagioclase Overgrowth Rims from the Skaergaard Intrusion. *Journal of Petrology*, 50(1): 127—145. doi: 10. 1093/petrology/egn076
- Jahn, B. M., Litvinovsky, B. A., Zandvilevich, A. N., et al., 2009. Peralkaline Granitoid Magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt; Evolution, Petrogenesis and Tectonic Significance. *Lithos*, 113 (3—4): 521—539. doi: 10. 1016/j. lithos. 2009. 06. 015
- Jiang, C. Y., An, S. Y., 1984. On Chemical Characteristics of

- Calcic Amphiboles from Igneous Rocks and Their Petrogenesis Significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 4(3): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. F., Li X. H., Li Q. L., et al., 2012. Rapid and Precise Determination of Sr and Nd Isotopic Ratios in Geological Samples from the Same Flament Loading by Thermal Ionization Mass Spectrometry Employing a Single-Step Separation Scheme. *Analytica Chimica Acta*, 727: 54–60. doi:10.1016/j.aca.2012.03.040
- Li, W. P., Li, X. H., 2005. Geochemical Characteristics of the Late Paleozoic Diabase Dyke Swarms of Changmaohezi from Western Liaoning, Northeast China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 761–770 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Zong, K., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1–2): 133–153. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.10.016
- Lu, F. X., Sang, L. K., 2002. Petrology. Geological Publishing House, Beijing, 133 (in Chinese).
- Ludwig, K. R., 2001. Users Manual for a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1–59.
- Ma, F., Mu, Z. G., Liu, Y. L., 2004. Geochronology and Geologic Significance of the Orbicular Dioritic Rocks in Luanping, Hebei Province. *Geological Review*, 50(4): 360–364 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X., Chen, B., Chen, J. F., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Age, Geochemical, Sr-Nd Isotopic, and In-Situ Hf Isotopic Data of the Late Carboniferous-Early Permian Plutons in the Northern Margin of the North China Craton. *Science China: Earth Sciences*, 42(12): 1830–1850 (in Chinese).
- Mu, B. L., Yan, G. H., 1992. Geochemistry of Trissic Alkaline or Subalkaline Igneous Complexes in the Yan-Liao Area and Their Significance. *Acta Geologica Sinica*, 66(2): 108–121 (in Chinese with English abstract).
- Onuma, N., Ninomiya, S., Nagasawa, H., 1981. Mineral/Groundmass Partition Coefficients for Nepheline, Melilite, Clinopyroxene and Perovskite in Melilite-Nepheline Basalt, Nyiragongo, Zaire. *Geochemical Journal*, 15(4): 221–228. doi:10.2343/geochemj.15.221
- Peng, R. M., Zhai, Y. S., Wang, S. G., et al., 2012. Characteristics of Zircon SHRIMP Age and Its Significance to Trace-Iron of the Bearing Nichel Minerals Ultramafic Rock Body in Ebutu, Westeen Part of Northern Margin of the North China Platform. *Minerral Deposits*, 31(Suppl.): 595–596 (in Chinese).
- Shao, J. A., Zhang, L. Q., Mu, B. L., et al., 2007. Upwelling of Da Hinggan Mountains and Its Geodynamic Background. Geological Publishing House, Beijing, 24–29 (in Chinese).
- Shao, J. A., Yang, J. H., 2011. The Geological Corridor Recording the Early Mesozoic Crust-Mantle Evolution from Chifeng to Lingyuan. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3525–3534 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., He, G. Q., Tang K. D., 2015. The Evolution of Permian Continental Crust in Northern Part of North China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 47–55 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Zhang, Z., She, H. Q., et al., 2012. The Discovery of Phanerozoic Granulite in Chifeng Area of North Craton and Its Implication. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 188–198 (in Chinese with English abstract).
- Steiger, R. H., Jäger, E., 1977. Subcommission on Geochronology: Convention on the Use of Decay Constants in Geo- and Cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359–362. doi: 10.1016/0012-821x(77)90060-7
- Sun, S. H., Yu, J., 1989. Interpretation of Chemical Composition and Subdivision of Mg-Fe Micas, Part B: The Natural Subdivision of Mg-Fe Micas. *Scientia Geologica Sinica*, 24(2): 176–189 (in Chinese with English abstract).
- Tian, W., Chen, B., Ireland, T. R., et al., 2011. Petrology and Geochemistry of Dunites, Chromitites and Mineral Inclusions from the Gaositai Alaskan-Type Complex, North China Craton: Implications for Mantle Source Characteristics. *Lithos*, 127(1–2): 165–175. doi: 10.1016/j.lithos.2011.08.013
- Wang, H. C., Zhao, F. Q., Li, H. M., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Age of the Dioritic Rocks from Northern Hebei: The Geological Records of Late Paleozoic Magmatic Arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 587–604 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. B., 2001. Hornblende Nomenclature. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(1): 84–100 (in Chinese).
- Wei, X., Xu, Y. G., Feng, Y. X., et al. 2014. Plume-Lithosphere Interaction in the Generation of the Tarim Large Igneous Province, NW China: Geochronological and Geochemical Constraints. *American Journal of Science*, 314(1): 314–356. doi:10.2475/01.2014.09
- Williams, I. S., 1998. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: McKibben, M. A., Shanks, W. C., Ridley, W.

- I., eds., Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. *Rev. Economic Geol.*, 7: 1-35.
- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., 1979. A Re-appraisal of the Use of Trace Elements to Classify and Discriminate between Magma Series Erupted in Different Tectonic Settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45 (2): 326-336.
- Xia, L. Q., Li, X. M., Xia, Z. C., et al., 2006. Carboniferous-Permian Rift-Related Volcanism and Mantle Plume in the Tianshan, Northwestern China. *Northwestern Geology*, 39(1): 1-49 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. H., Mu, B. L., Xu, B. L., et al., 2000. Triassic Alkaline in the Yanliao-Yinshan Area: Their Chronology, Sr, Nd and Pb Isotopic Characteristics and Their Implication. *Science in China (Series D)*, 30(4): 383-387 (in Chinese).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., 2009. Triassic Magmatism and Its Relation to Decratonization in the Eastern North China Craton. *Science in China (Series D)*, 39(7): 910-921 (in Chinese).
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Kröner, A., et al., 2009. Early Permian Plutons from the Northern North China Block: Constraints on Continental Arc Evolution and Convergent Margin Magmatism Related to the Central Asian Orogenic Belt. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1441-1467. doi:10.1007/s00531-008-0368-2
- Zhang, X. H., Mao, Q., Zhang, H. F., et al., 2011. Mafic and Felsic Magma Interaction during the Construction of High-K Calc-Alkaline Plutons within a Metacratonic Passive Margin: The Early Permian Guyang Batholith from the Northern North China Craton. *Lithos*, 125(1-2): 569-591. doi:10.1016/j.lithos.2011.03.008
- Ярмолюк, В. В., Дураите, М. В., Коваленко, В. И. 1981. Возраст Комендим - Щелочно-Оранитных Ассоциации Южной Монголии. *Изв. АН СССР, Сер. Геол.*, 9: 40-48 (in Russian).
- 附中文参考文献**
- 白文吉, 周美付, 胡旭峰, 等, 1993. 华北地块岩石圈构造演化与镁铁-超镁铁杂岩及矿化特征. 北京: 地震出版社, 224-273.
- 河北省地质矿产局, 1989. 河北省-北京市-天津市区域地质. 北京: 地质出版社, 567-569.
- 姜常义, 安三元, 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义. *矿物岩石*, 4(3): 1-9.
- 李伍平, 李献华, 2005. 辽西晚古生代长茂河子辉绿岩墙群的地球化学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(6): 761-770.
- 路凤香, 桑隆康, 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 133.
- 马芳, 穆治国, 刘玉琳, 2004. 河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义. *地质论评*, 50(4): 360-364.
- 马旭, 陈斌, 陈家富, 等, 2012. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义: 岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据. *中国科学: 地球科学*, 42(12): 1830-1850.
- 牟保磊, 阎国翰, 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义. *地质学报*, 66(2): 108-121.
- 彭润民, 翟裕生, 王守光, 等, 2012. 华北地台北缘西段额布图镍矿超镁铁质岩岩体锆石 SHRIMP 年龄特征及其示踪意义. *矿床地质*, 31(增刊): 595-596.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊, 等, 2007. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景. 北京: 地质出版社, 24-29.
- 邵济安, 杨进辉, 2011. 记载了早中生代壳幔演化的赤峰-凌源地质走廊. *岩石学报*, 27(12): 3525-3534.
- 邵济安, 张舟, 余宏全, 等, 2012. 华北克拉通北缘赤峰地区显生宙麻粒岩的发现及其意义. *地学前缘*, 19(3): 188-198.
- 邵济安, 何国琦, 唐克东, 2015. 华北北部二叠纪陆壳演化. *岩石学报*, 31(1): 47-55.
- 孙世华, 于杰, 1989. Mg-Fe 云母化学成分的解释和分类(II) Mg-Fe 云母的自然分类. *地质科学*, 24(2): 176-189.
- 王惠初, 赵凤清, 李惠民, 等, 2007. 冀北闪长质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. *岩石学报*, 23(3): 597-604.
- 王立本, 2001. 角闪石命名法——国际矿物学协会新矿物及矿物命名委员会角闪石专业委员会的报告. *岩石矿物学杂志*, 20(1): 84-100.
- 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等, 2006. 天山石炭-二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱. *西北地质*, 39(1): 1-49.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等, 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. *中国科学(D辑)*, 30(4): 383-387.
- 杨进辉, 吴福元, 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏. *中国科学(D辑)*, 39(7): 910-921.