

太古宙—元古宙过渡分界及成矿动力体制转换

邓 军^{1,2}, 孙忠实³, 王建平¹, 王庆飞¹, 王喜臣¹, 燕长海¹

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061)

摘要: 太古宙与元古宙之间分界时限较窄、测年数据偏新和混乱, 极大遏制了地球早期基础地质的深入研究. 通过太古宙与元古宙分界标志和过渡标志的确定, 将太古代—元古代间动力体制转换类型划分为4种: 挤压体制向扩张体制转换; 垂直运动与水平运动间转换; 水平主压应力场转换; 地幔柱体制向板块构造体制转换. 太古代与元古代间动力体制转换产物主要为真核生物、放射性元素、岩浆、矿产, 各自形成时限可达 $(3\sim 5)\times 10^8$ a. 太古宙与元古宙之间分界不应以单一年代划分, 而是一个渐变过渡的界线, 可初步确定在2.20~2.80 Ga之间. 太古宙—元古宙界线的划分应与地球动力学和构造体制等重大事件相联系, 此研究为探求早期深部成矿作用带来新的启迪.

关键词: 太古宙—元古宙; 过渡分界; 成矿动力; 体制转换.

中图分类号: P541; P61 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)01-0087-010

作者简介: 邓军(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 构造地质学和矿床学专业, 主要从事区域构造、成矿流体及成矿动力学的教学和科研工作.

0 引言

太古宙—元古宙分界是全球地壳构造运动史上一次重大的变革时期, 二者分界时限的确定直接影响对早期地壳演化的认识和成矿地质背景的判别^[1~4]. 成矿动力体制涉及全球板块构造类型对多种成矿作用的制约关系, 二者对应关系的确定直接影响对矿床成因的探求和靶区的选定, 因而太古宙—元古宙分界和成矿与动力体制关系一直受世人关注. 目前, 研究的焦点主要集中在2个方面: 一是二者分界时限太窄, 主要以单一年代(如2.50 Ga或2.60 Ga)划分, 而且许多测年数据难以统一. 如从吉林省南部古老变质岩系测年数据^[5,6]统计表明, 上壳岩系多数为2.00~1.40 Ga, 少数为2.40~1.70 Ga, 2.511 Ga, 2.831 Ga, 3.00~3.405 Ga; 高级区花岗质岩石多数为2.00~1.60 Ga, 少数为2.40~2.60 Ga; 花岗岩绿岩带为2.48~2.585 Ga. 这些测定的岩石年龄使太古宙与元古宙之间分界时

限与许多地质事件难以吻合, 而且在对金、铁矿床建立模式等方面造成认识和应用上的混乱; 二是多注重成矿与单一动力体制间对应关系, 而对不同动力体制间转换、转换类型和产物等进行更深入性地研究不够, 造成年龄数据在空间的分布规律和反映过渡性成矿构造环境的地质事件等未予以重视^[7~14]. 为此, 本文通过太古宙—元古宙过渡分界及成矿动力体制转换的研究, 对上述主要地质问题予以探讨.

1 太古宙—元古宙分界时限确定标志

基性岩脉及其上覆裂谷大陆边缘沉积建造是划分太古宙—元古宙界线的主要标志. 单颗粒锆石、斜锆石 U—Pb 年龄测定结果显示, 基性岩浆侵位的地质年代主要集中于2.50~2.40 Ga^[15~18], 并以加拿大 Superior 区的 Gatachewan 基性岩墙群最为典型, 已成为制约太古宙—元古宙界线重要的构造—热事件. 太古宙末期(2.50~2.40 Ga)在北美、西北欧、印度、津巴布韦、西澳、南极、格陵兰、西伯利亚地台及中国华北均发生大规模的基性岩浆侵位(或喷发)事件^[16,17,19~21], 一般认为它们与大陆裂谷事件

收稿日期: 2002-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40172036); 国家重点基础研究发展规划项目(No. 1999043206); 教育部“科学技术研究重点项目(No. 01037)”、“高等学校骨干教师资助计划”项目.

相关,与地幔柱上涌关系密切^[16,18],同时标志着早期克拉通陆壳增生的基本结束和伸展裂解的开始,并可记录太古宙末期超大陆的裂解过程。

古元古代初期(2.50~2.20 Ga),不同大陆出现各自特色的沉积建造,它们记录了太古宙—元古宙界线附近构造—沉积环境的剧变及全球分布^[22,23]。这一时期特色性的沉积建造包括:(1)含 U—Au 砾岩(2.45 Ga)多见于波罗的地盾、加拿大地盾古元古代初裂谷底部地层;(2)条带状含铁建造在各大陆(巴西、南非、西澳等地)普遍出现 2.45 Ga 的 BIF,它们在古元古代初期的形成达到高峰,主要沉积于太古代克拉通边缘;(3)首次出现冰碛岩系(2.40~2.20 Ga)多覆盖于 BIF 之上,并被碳酸盐覆盖(2.2~2.0 Ga),这一时期冰川记录出现于北美、波罗的地盾、南非、巴西及印度等克拉通陆块^[22,24]。

2 太古宙—元古宙界线过渡标志

2.1 跨时标志

元古宙初期克拉通盖层不整合于太古宙变质基底上。由于太古宙不同的克拉通陆壳生长高峰期与最终稳定的时间存在一定差异,不同大陆的太古宙—元古宙界线具有穿时性。例如南非、西北澳克拉通开始裂解时间较早(2.60~2.40 Ga),早于其他大陆 $2 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8$ a,它们在 2.50 Ga 并未表现出明显的构造变化,而为连续沉积(裂谷建造)^[25]。如北美及波罗的地盾的裂解出现于 2.50 Ga 前后,明显晚于非洲和西澳。表明元古宙初期大陆以相对构造稳定为特点,由太古宙活动到元古宙稳定需经历一段较长时间的演化,这段渐变过渡地质演化的时限可达几亿年^[15]。

2.2 构造标志

构造样式渐变(卵形—弧形—线性)标志实际是由岩浆侵位机制的不同而产生的。太古代 TTG 岩系呈主动底辟侵位,在空间多形成卵形和卵形构造群分布。元古宙岩浆岩活动主要为被动侵位,岩浆沿脆性断裂贯入呈线性分布。太古宙—元古宙之间的岩浆活动主要受拉伸机制控制,拉伸机制又多发生古陆边缘,所以该时段的岩浆岩在空间多呈弧形分布。

太古宙大陆向元古宙初期构造稳定或大陆裂谷演化期间,变形变质温度由高向低、深度由深向浅,依次形成高一中—低不同变形变质强度、连续分布的韧性变形带。显然,构造样式渐变性和韧性变形带

连续性在短时间段内难以形成。

2.3 环境标志

不稳定的太古宙大陆向稳定的元古宙大陆裂谷和被动大陆边缘演化,主要是通过克拉通大规模隆起和剥蚀、陆壳伸展裂解和大型沉积盆地发育等不断转换来实现,其本身则代表较长的时间段。

3 太古宙—元古宙界线过渡实例

3.1 吉林板石沟地质概况

板石沟地区位于吉林省通化县、柳河县和白山市三者交界部位,其中部属华北地台铁岭靖宇隆起中段,龙岗复式背斜核部及其南缘。北侧为龙岗复式背斜北缘和海西地槽区,南侧为古元古代裂谷系。

区内主要由一套太古宙上壳岩系和侵入岩系组成,上壳岩系包括斜长角闪岩、磁铁石英岩和变粒岩等,呈大、小不等包体分布于深成侵入岩系中。深成侵入体主要由早期英云闪长岩和晚期变黑云母钾长花岗岩组成。二者分布面积大(图 1),由次生片麻状和条带状构造展示出卵形和线性相交织的图案,构成 NEE 向龙岗(山脉)克拉通总体构造格架。在北侧分布有夹皮沟花岗—绿岩型受剪切带控制的金矿化,南侧出露板石沟 BIF 型铁矿。

3.2 变质上壳岩系同位素年代测定

上壳岩系和绿岩带除变质作用程度有区别(前者为角闪岩相,后者为绿片岩相)外,二者岩石化学、

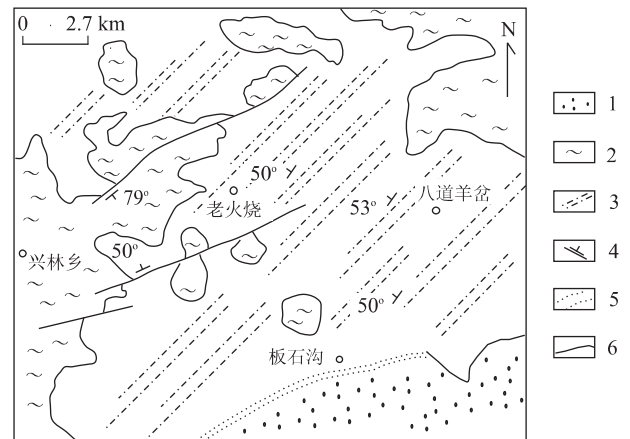


图 1 吉林板石沟地区地质图

Fig. 1 Geology sketch of Banshigou area, Jilin Province
1. 古元古代盖层; 2. 变黑云母钾长花岗岩及角闪—绿片岩相初带;
3. 中粒英云闪长岩角闪岩相线初带; 4. 断裂及产状; 5. 绿片岩相初带; 6. 地质界线

表 1 变质上壳岩系 Sm-Nd 年龄测试与计算结果

Table 1 Sm-Nd age-dating and calculating values in metamorphic supracrustal systems

样品号	样品名称	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$w(^{147}\text{Sm})/$ $w(^{144}\text{Nd})$	$w(^{143}\text{Nd})/$ $w(^{144}\text{Nd})\pm 2\sigma$	t_{CHUR}	t_{CDM10}	t_{DM12}	ϵ_{Nd}
6059-F'6	细粒黑云斜长片麻岩	2.039	11.790	0.104 6	0.511 132±14	2 483	2 802	2 859	-29.4
6059-R3	细粒黑云角闪斜长片麻岩	3.898	19.520	0.120 8	0.511 412±23	2 454	2 834	2 900	-24.0
6059-SJ	细粒黑云斜长片麻岩	1.917	11.947	0.097 0	0.511 002±13	2 493	2 790	2 844	-32.0
4552-H11-1	细粒黑云角闪斜长片麻岩	3.050	14.939	0.123 5	0.511 456±13	2 453	2 845	2 912	-23.1
6059-S1	细粒角闪黑云片岩	4.118	25.122	0.099 1	0.510 856±14	2 771	3 032	3 080	-34.8
2020-2	石榴角闪黑云斜长片麻岩	2.257	11.398	0.119 8	0.511 307±9	2 628	2 972	3 033	-26.0

样品测定单位:北京地质矿产部地质研究所 Sm-Nd 实验室; $\lambda(^{147}\text{Sm})=6.54\times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$.

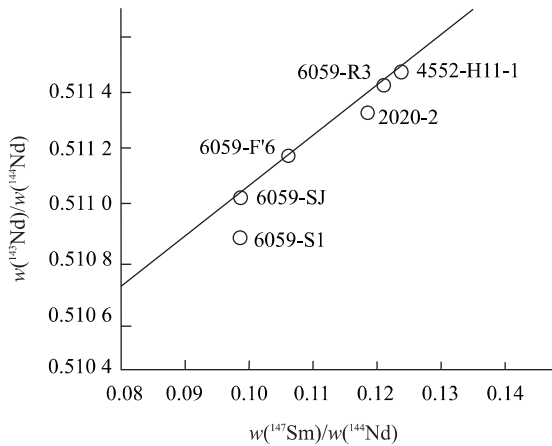


图 2 变质上壳岩系 Sm-Nd 等时线

Fig. 2 Sm-Nd isochronism graph of metamorphic supracrustal systems

稀土元素特征和形成构造环境类同,统称变质上壳岩系。因该岩系遭受多期次变形变质作用,同位素年龄测试采用 Sm-Nd 等时线法,被测试的 6 件样品均取自板石沟铁矿变质上壳岩系,样品岩石新鲜,具典型变质矿物组合及结构构造特征,无蚀变及后期脆性构造破碎现象。相应的测试及计算结果见表 1 和图 2。其中 6059-S1、2020-2 2 点不在线上,其余 4 点形成 1 条等时线, $t=2.605\pm 98 \text{ Ga}$, $I_{\text{Nd}}=0.50933\pm 7(2\sigma)$, $\epsilon_{\text{Nd},t}=+1.5\pm 1.1$ 。计算的模式年龄和等时线年龄值(2.605 Ga)代表本区上壳岩系角闪岩相主期区域变质作用的年龄。

3.3 粗粒黑云长英片麻岩同位素年代测定

英云闪长岩经角闪岩相变质形成中粗粒黑云长英片麻岩,样品取自板石沟西南 11 km 处通化县兴林乡大荒沟西北采石场。年龄测试采用锆石 U-Pb 法,使用质谱计双带源逐层蒸发-沉积法所得 4 组单粒锆石的年龄值分别是 2.557, 2.526, 2.523 和 2.544 Ga,该组年龄值代表黑云长英片麻岩主期区域变质作用时间。测试数据和锆石形态描述见表 2。

3.4 变黑云母钾长花岗岩同位素年代测定

除英云闪长岩外变黑云母钾长花岗岩也是吉南克拉通主要组成,后者侵入前者接触关系清楚。样品取自板石沟西南 11 km 处通化县兴林乡金家沟村北人工采石场,同位素年龄测试采用锆石 U-Pb 法,使用质谱计双带源逐层蒸发-沉积法所得 3 组单粒锆石的年龄值分别是 2.368, 2.373 和 2.398 Ga,该组年龄值可代表测区变黑云母钾长花岗岩形成并遭受区域变质改造的时间。测试数据及锆石形态描述见表 3。

3.5 太古宙—元古宙分界和过渡标志

根据吉林板石沟太古宙岩石形成时代的测定,大致可划分为 4 个年龄段: 2.60 Ga 前阜平旋回上壳岩系形成; 2.60~2.50 Ga 阜平旋回第 1 幕中粗粒英云闪长岩形成; 2.50~2.40 Ga 阜平旋回第 2 幕中粒英云闪长岩形成; 2.40~2.35 Ga 阜平旋回第 3 幕细粒变黑云母钾长花岗岩形成。其中 2.40 Ga 和 2.35 Ga 2 个年龄段未划入元古代,因在 2 个年龄段期间有大量变辉绿岩脉贯入变黑云母钾长花岗岩中,变辉绿岩脉和变黑云母钾长花岗岩同时又被元古代老岭群地层所覆盖,所以 2.40 Ga 和 2.35 Ga 2 个年龄段应视为太古宙—元古宙的分界。该分界具明显过渡性,主要标志有 2 点(图 2): 一是构造样式渐变(卵形—弧形—线性),变黑云母钾长花岗岩属被动侵位弧形分布,与太古代英云闪长岩主动底辟侵位呈卵形构造和元古宙线性构造明显不同; 二是韧性变形序列发育,经 1:5 万地质填图和大比例尺剖面测制^[26],从吉南克拉通中心向边缘依次由 2.60~2.50 Ga 中部地壳角闪岩相韧性变形, 2.50~2.40 Ga 中—浅部地壳角闪绿片岩相韧性变形, 2.40~2.35 Ga 浅部地壳绿片岩相韧性变形和 2.00~1.768 Ga 吕梁旋回晚期老岭群浅—表部地壳韧—脆性变形等不同层次韧性剪切带组成。各自具

表 2 黑云长英片麻岩锆石年龄测定与计算结果

Table 2 Acorite age-dating and calculating values of biotite felsite gneiss

序号	组数	$w(^{208}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$w(^{207}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$w(^{204}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$w(^{207}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$t/\text{Ga}(2\sigma)$	锆石描述
1	6	0.046 92	12	0.162 00	30	0.000 060	8	0.161 78	14	2.557(3)	400×200 μm×1 粒,紫色透明,见长柱状轮廓,晶棱不清,少量裂纹,表面有麻点,无包体
2	5	0.100 20	16	0.165 87	34	0.000 043	9	0.165 32	22		
3	5	0.138 20	45	0.168 54	53	0.000 039	40	0.168 05	59		
4	7	0.180 30	14	0.170 64	22	0.000 036	8	0.170 19	24		
1	6	0.073 62	62	0.164 26	65	0.000 083	11	0.163 21	65	2.526(4)	300×200 μm×2 粒,浅紫色透明,见晶面晶棱裂纹和麻点少无包体
2	4	0.154 40	11	0.167 42	40	0.000 048	27	0.166 82	36		
3	6	0.193 29	48	0.167 30	14	0.000 105	22	0.165 98	29		
1	5	0.117 48	15	0.170 6	9	0.000 72	8	0.161 504	43	2.523(1)	500×200 μm×1 粒,浅紫色半透明,见晶面晶棱,裂纹极少,无包体
2	6	0.143 40	15	0.170 23	47	0.000 437	24	0.164 73	46		
4	6	0.180 80	17	0.169 48	46	0.000 24	24	0.166 47	14		
1	5	0.117 70	38	0.166 64	24	0.000 094	44	0.165 46	25	2.544(2)	400×200 μm×1 粒,浅紫色透明,见晶面晶棱,裂纹极少,无包体
2	6	0.135 70	13	0.167 48	29	0.000 110	15	0.166 10	26		
3	6	0.158 26	31	0.168 98	24	0.000 116	39	0.167 53	17		
4	6	0.195 30	17	0.169 40	21	0.000 060	8	0.168 65	17		
5	7	0.210 80	14	0.169 67	25	0.000 091	53	0.168 53	23		

样品测试单位:中国科学院地质研究所同位素室.

表 3 变黑云母钾长花岗岩锆石年龄测定与计算结果

Table 3 Acorite age-dating and calculating values of metamorphic biotite potash feldspar granite

序号	组数	$w(^{208}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$w(^{207}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$w(^{204}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$w(^{207}\text{Pb})/$ $w(^{206}\text{Pb})$	2σ	$t/\text{Ga}(2\sigma)$	锆石描述
1	6	0.050 89	72	0.153 54	50	0.000 119	11	0.152 01	38	2.369(4)	100×240 μm×3 粒,淡黄色透明
1	6	0.065 00	12	0.155 62	48	0.000 251	40	0.152 41	48	2.373(5)	60×280 μm×7 粒,半透明
1	4	0.108 90	15	0.155 02	69	0.000 589	40	0.147 47	30		100×60 μm×10 粒,紫色不透明
2	6	0.087 16	28	0.156 19	30	0.000 119	41	0.154 67	14	2.398(2)	长柱状轮廓,棱角不清

样品测试单位:中国科学院地质研究所同位素室.

特征性面状构造和显微变形组构,变质作用级别和温度逐渐由高到低,古应力由小到大(20.04~29 MPa),成因机制是早期压扁逐渐过渡到晚期单剪,2.40~2.35 Ga 年龄段明显反映出整个太古代期间由深部地壳向元古宙浅部地壳的系统过渡性变化.

3.6 地壳演化和成矿构造环境过渡性转换

板石沟地区太古宙地壳演化大致可分早、中、晚 3 个阶段,构造环境分为 3 种过渡类型.

(1) 早期不稳定盆地向稳定盆地过渡阶段. 2.60 Ga 以前,本区形成了一套以玄武安山岩和英安岩双峰式火山建造为主的变质上壳岩系. 岩系 TFeO、SiO₂ 含量高和 Al₂O₃、K₂O、Na₂O 含量的不协调性,表明它们的原岩是以富铁贫铝的基性岩石为特征,主要来源于不稳定盆地内硬砂质沉积物. 从火山活动间隙形成极少量含硼的钙镁硅酸盐沉积

物,伴生的方解石和白云石富含 Sr²⁺、Ba²⁺、Mn²⁺, 亏损¹⁸O, Na⁺ 并含有幔源的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 和 $w(^{34}\text{S})/w(^{32}\text{S})$ 比值的分析,太古代的大量海水是从同期玄武质洋壳中提取并逐渐由河水泄入过渡到稳定陆棚,从而体现出板石沟铁矿是阿尔戈马型粗大条带和苏必利尔型细条带的过渡型,其中细条带是阿尔戈马型含铁建造形成的继续^[27].

(2) 中期洋、陆交界部位向大陆边缘转化阶段. 2.50~2.60 Ga 间,先后发生了大规模的深成英云闪长岩浆活动,经变质后又划分为无斑晶中粗粒富钠暗色黑云长英片麻岩和含斑晶中粒高铝浅色黑云长英片麻岩 2 种岩石类型. 依岩石化学和稀土元素特征,前者形成于洋、陆交界部位;后者侵入前者深部导致原始地壳加厚,构成大陆边缘深成侵入体(图 2).

(3) 晚期活动大陆弧逐渐趋向于稳定阶段.

2.30~2.50 Ga 间,区内发生变黑云母钾长花岗岩侵位,通过 Al_2O_3 、 SiO_2 、 FeO 、 MgO 及碱性组分特征综合分析属大陆弧花岗岩类,即大洋板块俯冲作用在大陆壳上所形成的岩浆弧岩石,随之同绿岩一起遭受角闪—绿片岩相韧性变形和绿片岩相韧性脆性变形,金元素迁移、富集形成夹皮沟剪切带型金矿化和中—基性岩脉的贯入等^[28]与整个龙岗陆核不断增厚、抬升并逐渐向稳定刚性地块演化相对应。

4 太古代—元古代间动力体制转换类型

成矿作用的差异与不同构造环境有关,不同构造环境间的过渡主要受控于不同动力体制的转换。

4.1 太古代—元古代间挤压体制向扩张体制转换

新太古代—古元古代间存在微板块运动^[29],其运动总体演化规律是由挤压体制向扩张体制转换。以辽北—吉南地区发育太古代—元古代之间的花岗岩绿岩带为例,根据其地质地球化学特征,绿岩带可划分为清原型和夹皮沟型,其形成的古构造环境分别由初始分散的微块体—微块体相互碰撞—类似现代岛弧的大陆边缘活动带—弧后盆地或大陆边缘裂谷型构造环境组成^[30]。

前述龙岗古陆核南边缘板石沟地区太古宙地壳演化 3 个阶段(2.60 Ga 前,2.50~2.60 Ga 间,2.30~2.50 Ga 间),构造环境的 3 种过渡类型(不稳定盆地向稳定盆地过渡阶段—洋、陆交界部位向大陆边缘转化阶段—活动大陆弧逐渐趋向于稳定阶段)实际上总体代表了挤压体制向扩张体制转换的全过程。该过程所表现出的变质、变形、成矿和元素分布等特征,主要以中浅—浅变质为主,由龙岗古陆核南边缘向北、东北的古陆核部地带(靖宇—白山镇),变黑云母钾长花岗岩的年龄逐渐由 2.35→2.40→2.50→2.60 Ga,变质作用由绿片岩相—角闪岩相至麻粒岩相,阿尔戈马型含铁建造标志极为明显。因此,板石沟地区太古宙构造环境 3 种过渡类型可纳入太古代—元古代间过渡段,与龙岗古陆核北边缘夹皮沟板石沟地区相对应。

4.2 太古代—元古代间垂直运动与水平运动转换

因将太古代—元古代之间界线定得很窄,所以二者时代间垂直运动与水平运动的转换很少有人提及。实际上,各地学者早已从事该方面工作。早在 20

世纪 80 年代末,Haffgan^[31]和 McCulloch^[32]便开始研究早太古代—晚太古代间垂直运动与水平运动机制的转换,20 世纪 90 年代初将其列为重要研究方向^[33],20 世纪 90 年代中期中国华北地台才出现此方面成果^[34],把华北地台太古宙构造体制与地壳生长划分 2 个阶段:2.80 Ga 以前,地壳以幔源物质垂向增生为主;2.80 Ga 以后,地壳物质开始进入地幔变为水平运动为主的构造体制。进入 21 世纪,已有许多成果报道太古宙构造体制转换的时限由 2.80 Ga 逐渐推移到 2.40 Ga^[15]。同时从地质上,有关太古代—元古代间垂直运动与水平运动间动力体制转换的标志已十分清楚,如太古代隆起与元古代拗陷之间的拉伸构造;太古代 TTG 岩系底辟穹形构造减弱、拗陷或裂谷型线型岩浆带发育、岩浆沿拉伸构造层间贯入—层面凹凸不平及变质核杂岩等同时形成;特别是太古代隆起多发育韧性构造岩,元古代拗陷多发育脆性构造岩,二者之间拉伸地带主要由韧—脆性构造岩组成,受侧向生长机制控制。中条山北段中基性岩浆活动实属太古宙—元古宙间陆壳水平侧向增生的产物^[35]。目前,已有众多学者意识到太古代—元古代间垂直运动与水平运动间动力体制转换是早期地壳生长的一种重要机制。

4.3 太古代—元古代间水平主压应力场转换

古地磁学研究剩磁矢量与地球纬度变化关系已证实全球大陆漂移、海底扩张和转换断层的存在,为板块构造的确立奠定了坚实基础。漂移或转动的板块体,使原水平主压应力场发生转换,但这种转换与其他年轻时代不同,主要特征是在水平主压应力场转换的同时伴有地幔和纵向等表示出一定垂向的构造活动。如华北陆台太古宙地幔呈南北方向向陆台俯冲,由于放射性热元素在壳下的不断积累,温度逐渐升高,对流速度减慢,从而使地幔对流方向在晚太古代至早元古代发生转换,由近南北向的挤压俯冲转变为近东西向的壳下地幔上涌,陆台下发生广泛的 TTG 质重熔,并发生了大幅度抬升,这种转换状态持续到古生代末^[36]。又如在塔里木盆地南天山造山带,其构造变形沿走向的变化可通过纵向转换和横向转换来调节。纵向转换使构造变形沿走向保持均一或渐变,横向转换使构造变形沿走向发生突变,沿走向可分出若干变形区,区内变形相对均一,区与区之间则差异较大。纵向构造转换带的产生与应力作用大小、方向、岩石物理性质沿走向的渐变有关。横向构造转换带的发育与沉积层厚度变化、滑脱

层分布范围、造山带对前陆盆地的作用程度和方式有关^[37]。

4.4 太古代—元古代间地幔柱体制向板块构造体制转换

20 世纪 70 年代中期, Sawkins^[38] 就开始运用热点和由热点进一步演化产生的裂谷来说明与超大陆解体有关的早期大陆内部金属矿床, 至 20 世纪 90 年代, Garuya^[39] 提出热幔柱导致超大陆解体, 冷幔柱导致超大陆的聚合, 由冷、热地幔柱发生、发展与演化的动力总体制逐渐转入板块构造体制, 使幔柱构造动力成矿与前寒武纪金属成矿具密切内在成因联系^[40]。

通过对原岩建造、变质作用、 $p-T-t$ 轨迹和 $\epsilon_{Nd,t}$ 值的研究, 提出迁安和怀安为 2 个同时代不同性质的陆壳, 遵化和崇礼为 2 个不同性质的深变质绿岩带, 遵化为裂谷型绿岩带, 崇礼为岛弧型绿岩带, 2.7 Ga 之前受地幔柱活动的影响, 导致上地幔的不均一性和 TH₁ 和 TH₂ 2 类拉斑玄武岩的紧密共存, 2.7 Ga 之后从地幔柱体制向板块体制转化, 造成了西北岛弧型壳事件和板块碰撞变质作用^[41]。

5 太古代—元古代间动力体制转换产物

5.1 真核生物

在五台山元古代溇群豆付村亚群的大石岭组和青石村组发现微古材料 19 属 31 种。其中大直径的微形个体和形态呈三角形、多角形及船形灌类化石属于单细胞的真核浮游生物, 这些真核生物的演化应始于约 2.40 Ga^[42]。该时间正是太古代—元古代过渡期, 动力体制转换与地球新生命开始时间相近。

5.2 岩浆

太古代—元古代间动力体制转换所形成的岩浆事件与其他动力体制形成的岩浆事件类同, 但要强调的是, 太古代—元古代间由动力体制转换所形成的岩浆具有较长的时间段。

泰山地区深成岩浆侵入及变形、变质改造作用表现为 5 个事件: 望府山期深成侵入杂岩形成及改造事件、大众桥期深成岩浆侵入杂岩形成与改造事件、傲徕山期深成岩浆侵入事件、中天门期深成岩浆侵入事件及摩天岭期深成岩浆侵入事件。它们主要形成于晚太古代至早元古代 (2.80~2.30 Ga) 之

间, 可归并为两大演化旋回: 第一旋回包括望府山事件、大众桥事件和傲徕山事件, 旋回以望府山期地壳的建造作用开始, 以傲徕山期地壳的改造作用结束。第二旋回包括中天门事件和摩天岭事件, 此旋回是泰山及至鲁西地壳已克拉通化构造环境下发生的深成岩浆活动及改造过程, 以摩天岭二长花岗岩发育作为克拉通化的最后结束标志。这两大旋回的差异反映了岩石圈和下伏地幔构造、热体制的重大变化, 可以代表太古代与元古代的年代界限^[43]。

5.3 放射性元素

太古代—元古代间动力体制转换所形成的岩浆成分与其他动力体制形成的岩浆成分不同, 花岗岩含多量钾和铀、钍等大量放射性元素, 这是其特色。如吉林夹皮沟太古代—元古代间钾质花岗岩含铀高达 0.05%, 同一构造带还存有世界独特的海沟金(铀)矿床^[44]。

5.4 矿产

随碰撞造山带的深入研究, 印度科拉金矿带、西澳诺斯曼—维卢纳金矿带实属 2 个地体碰撞形成^[45,46] 的认识被提出以来, 人们加强研究区域构造动力背景与金成矿作用间的联系。构造应力场转换与界面成矿是迈向这一联系的关键, 大型 Au、Cu、Zn、Ni、Cr、Fe 等矿床的形成不仅与蛇绿岩、绿岩等基性、超基性碰撞造山带的产物有关, 而且与构造应力场转换有关, 再结合流体进行构造体制转换与流体多层循环成矿动力学的研究, 最后将不同矿种归属一个系统, 探求动力系统转换与成矿作用的关系^[47~49]。动力系统转换成矿从成因、产状、分布等明显区别于沉积变质的太古宙 BIF 型铁矿床, 元古宙层状火成岩侵入体中的 Cr、Ni、Cu、Pb 矿床, 沉积型 Au、U 砂矿床, 块状硫化物型 Cu、Pb、Zn 矿床, 层控 Pb、Zn 矿床^[50]。形成时限介于 2.5~2.0 Ga^[51] 或 2.7~2.0 Ga^[20]。

6 结语

(1) 太古代—元古代间动力体制转换类型主要可分为 4 种: 挤压体制向扩张体制转换; 垂直运动与水平运动间转换; 主压构造应力场纵向、横向转换; 地幔柱体制向板块构造体制转换。无论何种转换类型, 总体演化趋势为由活动向稳定, 或古板块沟、弧、盆系统的交替。(2) 太古宙—元古宙界线主要划分标志是基性岩脉及其上覆裂谷—大陆边缘沉积建造;

过渡界线标志是:转换时代穿时性;构造样式(卵—弧—线性构造)渐变性;形成环境稳定性和不稳定性。(3)太古代—元古代间动力体制转换作用相关的事物主要为真核生物、放射性元素、岩浆、矿产,各自形成时限可达 $3\sim 5\times 10^8$ a。(4)太古宙与元古宙之间分界不应确定在单一年代上(如以2.50 Ga或2.60 Ga为界等),而是一个渐变过渡的界线,界线可宽达2.20~2.80 Ga之间。

总之,太古宙—元古宙界线的划分应与地球动力学、构造体制及地幔活动过程等重大变化相联系。上述将认识为板块构造理论发展、追踪生命起源、探求早期深部成矿作用带来新的启迪。

参考文献:

- [1] 陈晋镡. 中朝准地台中—末元古代地质演化的初步探讨[J]. 地质论评, 1983, 29(1): 1—8.
CHEN J B. A preliminary discussion on geological evolution of Sino-Korea paraplatform during Middle-Late Proterozoic era [J]. Geological Review, 1983, 29(1): 1—8.
- [2] 劳秋元, 索书田, 谭应佳. 中国的元古宙构造[J]. 地质论评, 1983, 29(2): 111—120.
LAO Q Y, SUO S T, TAN Y J. Proterozoic tectonics of China [J]. Geological Review, 1983, 29(2): 111—120.
- [3] 陈衍景, 欧阳自远, 杨秋剑, 等. 关于太古宙—元古宙界线的新认识[J]. 地质论评, 1994, 40(6): 483—488.
CHEN Y J, OUYANG Z Y, YANG Q J, et al. A new understanding on the boundary between Archean and Proterozoic [J]. Geological Review, 1994, 40(6): 483—488.
- [4] 胡学文, 张江满, 权恒. 燕辽地区太古宙与下元古界间不整合面的发现及其意义[J]. 地质论评, 1996, 42(3): 245—250.
HU X W, ZHANG J M, QUAN H. Discovery and its significance of unconformity surface between Archean and Late Proterozoic in Yanliao area [J]. Geological Review, 1996, 42(3): 245—250.
- [5] 刘建民, 戴新义, 陈洪江. 吉林桦甸老金厂地区太古代麻粒岩相变质杂岩的岩石学特征及其时代讨论[J]. 吉林地质, 1983, (1): 1—9.
LIU J M, DAI X Y, CHEN H J. A discussion on petrological feature and age of Archean granulite facies metamorphic complex in Laojinchang area, Huadian, Jilin Province [J]. Jiling Geology, 1983, (1): 1—9.
- [6] 中国科学院地球化学研究所. 稀土元素地球化学专辑[J]. 地质地球化学, 1985, (增刊): 1—3.
Institute of Geochemistry of Chinese Academy of Sciences. Special issue on rare-earth-elements geochemistry [J]. Geology Geochemistry, 1985, (Suppl): 1—3.
- [7] 南广鹏. 满洲里地区元古界的发现及其意义[J]. 地质论评, 1988, 34(4): 384—385.
NAN G P. Discovery and its significance of Proterozoic group in Manzhouli area [J]. Geological Review, 1988, 34(4): 384—385.
- [8] 翟明国, 杨瑞英, 卢文江, 等. 清原太古代花岗岩—绿岩地体的常量元素地球化学证据[J]. 地质论评, 1984, 30(6): 523—534.
ZHAI M G, YANG R Y, LU W J, et al. Evidence from major elements of Archean granite-greenstone belt in Qingyuan [J]. Geological Review, 1984, 30(6): 523—534.
- [9] 刘喜山, 金巍, 李书勋. 内蒙古中部早元古代造山事件中麻粒岩相低压变质作用[J]. 地质学报, 1992, 66(3): 244—268.
LIU X S, JIN W, LI S X. Granulite facies low-pressure metamorphism in early Proterozoic orogenic events of the central part of Inner Mongolia [J]. Acta Geologica Sinica, 1992, 66(3): 244—268.
- [10] 沈保丰, 彭晓亮, 骆辉, 等. 中国太古宙绿岩带[J]. 地质学报, 1993, 67(3): 208—220.
SHEN B F, PENG X L, LUO H, et al. Archean greenstone belts of China [J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(3): 208—220.
- [11] 孙敏, 张立飞, 吴家弘. 早元古代宽甸杂岩的成因: 地球化学证据[J]. 地质学报, 1996, 70(3): 207—222.
SUN M, ZHANG L F, WU J H. Origin of early Proterozoic Kuandian complex—evidence from geochemistry [J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(3): 207—222.
- [12] 刘永江, 李三忠, 杨振升. 华北地台东缘早元古代隆—滑构造模式[J]. 地质论评, 1997, 43(6): 569—576.
LIU Y J, LI S Z, YANG Z S. Early Proterozoic uplift bedding-delamination structural model in the eastern margin of the North China platform [J]. Geological Review, 1997, 43(6): 569—576.
- [13] 徐贵忠, 王艺芬, 余宏全, 等. 华北克拉通西北缘中元古代火山岩特征与成矿作用[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 495—502.
XU G Z, WANG Y F, SHE H Q, et al. Feature of middle Proterozoic volcanic rocks and mineralization in northwestern margin of the North China craton [J]. Geological Review, 1999, 45 (Suppl): 495—502.
- [14] 周世泰. 我国北方太古界绿岩带地层之对比及其中条

- 带状铁矿之赋存规律[J]. 地质论评, 1983, 29(5): 456.
- ZHOU S T. Comparison of Archean strata of greenstone belt in northern part of China and occurrence regularities of banded iron ore deposits in the strata [J]. Geological Review, 1983, 29(5): 456.
- [15] 李江海, 黄雄南, 钱祥麟, 等. 太古宙—元古宙界线研究现状[J]. 高校地质学报, 2001, 7(1): 43—49.
- LI J H, HUANG X N, QIAN X L, et al. Current situation in study on the Archean-Proterozoic boundary [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(1): 43—49.
- [16] Amelin Y V, HeaGan L M, Semenov V S. U-Pb geochronology of layered Gafic intrusions in the eastern Baltic shield: implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting [J]. Precambrian Research, 1995, 75: 31—46.
- [17] Heenan L M, Tarney J. U-Pb baddeleyite ages for the Scourie dyke swarm, Scotland: evidence for two distinct intrusion events [J]. Nature, 1989, 6236: 705—708.
- [18] Ernst R E, Head J W, Parfitt E, et al. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus [J]. Earth-Science Reviews, 1995, 39: 1—58.
- [19] Stubbs H M, Hall R P, Hughes D J, et al. Evidence for a high Mg andesitic parental GagGa to the east and west satellite dykes of the great dyke, Zimbabwe: a comparison with the continental tholeiitic Gashonaland sills [J]. Journal of African Earth Science, 1999, 28: 325—336.
- [20] Snyder G A, Higgins S J, Taylor L A, et al. Archean enriched mantle beneath the Baltic shield: rare-earth element evidence from the Burakovsky layered intrusion, Southern Karelia, Russia [J]. International Geological Review, Bellwether Publishing, Ltd Columbia, 1996, 38(5): 389—404.
- [21] Lobach Z S B, Arestova N A, Chekulaev V P, et al. Geochemical and petrology of 2.40~2.45 Ga agGatic rocks in the north-western Belomorian belt, Fennoscandian shield, Russia [J]. Precambrian Research, 1998, 92: 223—250.
- [22] Eriksson P G, Gazumder R, Sarkar S, et al. The 2.7~2.0 Ga volcano-sedimentary record of Ahica, India and Australia: evidence for global and local changes in sea level and continental freeboard [J]. Precambrian Research, 1999, 97: 269—302.
- [23] Melezhik V A, Fallick A E. A widespread positive $\delta^{13}\text{C}$ anomaly at around 2.33~2.06 Ga on the Fennoscandian shield: a paradox [J]. Terra Nova, 1996, 8: 141—157.
- [24] Bekker A, Karhu J A, Beukes N J. Carbon isotope study of interglacial carbonates in North America and South Africa: implications for the earliest stages of the carbon isotope excursion (abstract) [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(Suppl): 7—8.
- [25] Catuneanu O, Eriksson P G. The sequence stratigraphic concept and the Precambrian rock record: an example from the 2.7~2.1 Ga Transvaal Supergroup, Kaapvaal craton [J]. Precambrian Research, 1999, 97: 215—251.
- [26] 孙忠实, 冯亚民, 杨晓东, 等. 吉南板石沟地区前寒武纪构造韧变序列及地壳演化[J]. 中国区域地质, 1999, 18(4): 383—390.
- SUN Z S, FENG Y M, YANG X D, et al. The Precambrian ductile deformation sequence and crustal evolution in Banshigou, South Jilin [J]. Regional Geology of China, 1999, 18(4): 383—390.
- [27] 彭润民, 翟裕生, 邓军. 内蒙古狼山—渣尔泰山中元古代 SEDEX 型矿带火山活动与成矿的关系[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 1139—1150.
- PENG R M, ZHAI Y S, DENG J. Volcanic action and its relation to mineralization in the Langshan-Zhaertai mountain Middle Proterozoic SEDEX ore belt in Inner Mongolia [J]. Geological Review, 1999, 45(Suppl): 1139—1150.
- [28] 侯贵廷, 张臣, 钱祥麟, 等. 华北克拉通中元古代基性岩墙群形成机制及构造应力场[J]. 地质论评, 1998, 44(3): 309—314.
- HOU G T, ZHANG C, QIAN X L, et al. Forming mechanism of middle Proterozoic basic dike swarm and tectonic stress field in the North China craton [J]. Geological Review, 1998, 44(3): 309—314.
- [29] 李晓波. 地球动力学演化与巨型矿集区的形成. 地学前沿[J]. 1998, 5(增刊): 103—108.
- LI X B. Geodynamics and the formation of giant deposit clusters [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(Suppl): 103—108.
- [30] 李俊建, 沈保丰. 辽北—吉南地区太古宙花岗岩—绿岩带地质地球化学[J]. 地球化学, 1996, 25(5): 458—467.
- LI J J, SHEN B F. Geology and geochemistry of Archean granite-greenstone belts in northern Liaoning Province and southern Jilin Province [J]. Geochemistry, 1996, 25(5): 458—467.

- [31] Haffgan P F. United plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia, *ann rev Earth planet [J]*. *Sci*, 1988, 16: 543—603.
- [32] McCulloch M T. Sm-Nd isotopic constraints on the evolution of Precambrian crust in the Australian continent [A]. In: Kroner A, ed. *Geodynamics series Proterozoic lithosphere evolution [C]*. American Geophysical Union, 1987. 115—130.
- [33] Kroner A. Tectonic evolution in the Archean and Proterozoic [J]. *Tectonophysics*, 1991, 187: 393—410.
- [34] 吴福元,葛文春,孙德有,等. 华北地台太古宙地壳生长机制与构造体制转换[J]. *长春地质学院学报*, 1995, 25(3): 263—267.
WU F Y, GE W C, SUN D Y, et al. Archean crust growth and tectonic regime in the North China platform [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1995, 25(3): 263—267.
- [35] 朱勤文,叶德隆. 中条山北段元古宙岩浆活动与陆壳生长机制[J]. *地质论评*, 1997, 43(3): 257—263.
ZHU Q W, YE D L. The Proterozoic magmatism and crust growth-mechanism in the northern part of the Zhongtiao Mountain [J]. *Geological Review*, 1997, 43(3): 257—263.
- [36] 于万里,张基敏,关广岳,等. 华北陆台早前寒武纪地质演化与地幔对流模式[J]. *东北大学学报*, 1996, 17(4): 348—351.
YU W L, ZHANG J M, GUANG G Y, et al. The geological evolution and mantle convection of the North China Platform in precambrian [J]. *Journal of North-eastern University*, 1996, 17(4): 348—351.
- [37] 张光亚. 塔里木盆地北部构造转换形式及其成因[J]. *现代地质*, 1997, 11(4): 452—460.
ZHANG G Y. Tectonic transfer style and its origin in northern Tarim basin [J]. *Geoscience*, 1997, 11(4): 452—460.
- [38] Sawkins. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments [J]. *Journal of Geology*, 1976, 84(6): 653—671.
- [39] GaruyaGa S. Plume tectonics [J]. *Jour Soc Japan*, 1994, 100: 24—49.
- [40] 侯增谦,李红阳. 初论幔柱构造成矿体系—以三江特提斯成矿域为例[J]. *矿床地质*, 1998, 17(2): 97—113.
HOU Z Q, LI H Y. A tentative discussion on the mantle plume tectonics and metallogenic system as exemplified by the Sanjiang Tethyan metallogenic domain [J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17(2): 97—113.
- [41] 王仁民,陈珍珍,赖兴运. 华北太古宙从地幔柱体制向板块构造体制的转化[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22(3): 315—321.
WANG R M, CHEN Z Z, LAI X Y. Archean geotectonic transition of system from mantle plume to plate tectonics in North China [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(3): 315—321.
- [42] 孙淑芬,朱士兴. 中国五台山滹沱群豆村亚群(约 24×10^8 a) 微古植物新发现[J]. *微体古生物学报*, 1998, 15(3): 286—293.
SUN S F, ZHU S X. Discovery of micropalaeophytes from the Doucun subgroup (about 2 400 Ma), Hutuo Group of Wutai Mountain [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1998, 15(3): 286—293.
- [43] 庄育勋,徐洪林,王新社,等. 泰山地区新太古代—古元古代地壳演化研究的新进展[J]. *中国区域地质*, 1995, 4: 360—366.
ZHUANG Y X, XU H L, WANG X S, et al. New advances in the study on Neoproterozoic-Paleoproterozoic crust evolution in the Taishan area [J]. *Regional Geology of China*, 1995, 4: 360—366.
- [44] 孙忠实,邓军,翟裕生,等. 吉林钾长花岗岩构造背景及铀对大型金矿床的控制[J]. *地球学报*, 1999, 20(2): 163—168.
SUN Z S, DENG J, ZHAI Y S, et al. Structural setting of Kaligranites and control of uranium large gold deposits in Jilin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(2): 163—168.
- [45] 李上森,于华. 矿床地质研究的一些进展与问题[J]. *前寒武纪研究进展*, 1998, 21(2): 1—12.
LI S S, YU H. Progresses and problems in research on mineral deposits [J]. *Progress in Precambrian Research*, 1998, 21(2): 1—12.
- [46] Groves D I. Metallogenic controls on Archaean orogenic gold deposits worldwide and their significance to exploration. *Materials of “Metallogeny, Fuel Resources, and Geodynamics of the North Asian Craton and Framing Orogenic belts” International [M]*. Metallogenic Conference in Irkutsk Russia, 1998. 95—96.
- [47] 邓军,孙忠实,王建平,等. 动力系统转换与金成矿作用[J]. *矿床地质*, 2001, 20(1): 71—77.
DENG J, SUN Z S, WANG J P, et al. Dynamic system transformation and gold ore-forming process [J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(1): 71—77.
- [48] 邓军,吕古贤,杨立强,等. 构造应力场转换与界面成矿[J]. *地球学报*, 1998, 19(3): 244—250.

- DENG J, LÜ G X, YANG L Q, et al. The transformation of tectonic stress field and interfacial metallogensis [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1998, 19(3): 244—250.
- [49] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 构造体制转换与流体多层循环成矿动力学[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2000, 25(4): 397—403.
- DENG J, YANG L Q, SUN Z S, et al. Ore-forming dynamics of tectonic regime transformation and multi-layer fluid circulation [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(4): 397—403.
- [50] 孙忠实, 邓军, 翟裕生, 等. 吉林夹皮沟断带动力系统碰撞、叠加及金矿床形成[J]. *地质与勘探*, 2001, 37(2): 3—27.
- SUN Z S, DENG J, ZHAI Y S, et al. Dynamic system collision, superimposing and gold deposit forming in Jiapigou fault belt, Jilin Province [J]. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(2): 3—27.
- [51] Feybesse J L, Johan V, Triboulet C. The West Central African belt; a model of 2.5~2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution [J]. *Precambrian Research*, 1998, 87(3—4): 161—216.

Demarcating Interval between Archean Group and Proterozoic Group and Ore-Forming Dynamical Transformation

DENG Jun^{1,2}, SUN Zhong-shi³, WANG Jian-ping¹, WANG Qing-fei¹, WANG Xi-chen¹, YAN Chang-hai¹
(1. *Department of Earth Science and Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*;
2. *The Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Exploration (KLLTE), Ministry of Education, Beijing 100083, China*;
3. *Department of Earth Science, Jilin University, Changchun 130026, China*)

Abstract: The narrowness and confusion of demarcating time between Archean and Proterozoic have kept deepening research on the early geology within great limits. Through determination demarcating and transiting criteria, the transformation of geo-dynamics system between Archean and Proterozoic can be divided into four types; transformation from compressional to extensional system, from vertical to horizontal, of principal stress, from mantle plume to plate tectonics. The relatively outcomes which formed within 0.3~0.5 billions year of transformations includes eucaryote, radioelements, magma and ores. The partition between Archean and Proterozoic should have a transiting line, that can be limited in 2.20~2.80 Ga. The partition has close relation with major geological events, and this work brings a new edification to ore-formation in depth.

Key words: Archean-Proterozoic; transiting line; ore-forming dynamics; system transformation.