

华北元古界的沉积演变和成矿背景问题

黎 彤

(北京科技大学)

内容提要:元古代是一个重要成矿期。又是全球成矿背景发生根本性变化的时期。华北元古界中有丰富的矿产资源。它们的形成除受全球背景制约外,还受局部条件所影响。因此,呈现出区域成矿特殊性。全球性成矿背景发生转变的时期,在华北古陆主要表现在吕梁运动(1850Ma)前后。

主题词:华北古陆 元古界 沉积演变 岩石化学 成矿背景

元古代是地质历史上的一个重要成矿期。在世界的元古界中,蕴藏着丰富的矿产资源,其中有大型和超大型矿床。历来为地质学界所瞩目。

华北是我国太古界和元古界最发育的地区。在华北的元古界中,有丰富的金属和非金属矿产,也有大型和超大型矿床。但其成矿作用具有区域特殊性。它除受全球成矿背景制约外,还受局部成矿条件所影响。

本文试图结合华北元古代的大地构造和矿产分布特征,探讨其与沉积演变和成矿背景有关的若干问题,供讨论参考。

一、华北元古界的地质特征和沉积速率

华北元古代的历史长达20亿年。据王鸿桢等(1985)划分,早元古代(26—18.5亿年)历时7.5亿年;中元古代(18.5—8.5亿年)历时10亿年;晚元古代(8.5—6亿年)历时2.5亿年。按照大地构造观点,下元古界属华北地台的褶皱基底;中上元古界属华北地台的沉积盖层^[1]。

1. 褶皱基底:华北的早元古代分为五台期(26—23亿年)和滹沱期(23—18.5亿年)^①。

五台系形成于阜平运动之后,它不整合覆盖在太古界之上。厚7080m。主要由绿片岩、角闪片岩、片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩、千枚岩和变质粉砂岩组成。内含条带状含铁建造,碳酸盐岩很少见。原岩主要是细碧角斑岩建造。沉积环境为优地槽。

滹沱系形成于五台运动之后。它不整合覆盖在五台系之上。厚9483m。为一套浅变质的沉积岩系。主要由板岩、千枚岩、变质砂岩、白云岩和硅质灰岩组成,其间夹少量变玄武岩。沉积环境为冒地槽^[2,3]。

① 有人认为五台期属太古代晚期;也有人认为五台期分属晚太古代和早元古代(详见文献[3])

强烈的吕梁运动使五台系和滹沱系成为褶皱带。它们与太古界的结晶岩系共同构成华北地台的基底。

华北下元古界的沉积演变主要表现在：1) 沉积环境从优地槽演变为冒地槽；2) 沉积物质从以中基性火山沉积岩为主变为以正常陆源沉积为主；3) 平均沉积速率从每百万年23.6m降至21.1m；4) 岩石化学从 $\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{MgO} \simeq \text{CaO}$ 演变为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{FeO}$ 、 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{CaO} > \text{MgO}$ ；5) 碳酸盐沉积有明显增多的趋势，除大理岩外尚有白云岩。

2. 沉积盖层：华北的中元古代分为长城期（18.5—17亿年）、南口期（17—14亿年）和蓟县期（14—10亿年）。以蓟县剖面为典型。

长城系形成于吕梁运动之后。它不整合覆盖在古老变质杂岩之上。厚2266m。主要由滨浅海相的碎屑岩和泥质岩组成。内含鲕状赤铁矿沉积矿床。

南口系厚2076m。多为硅质和锰质白云岩。是华北古陆上第一次的广海碳酸盐沉积。内含沉积锰矿层。

蓟县系厚4507m。主要由泥质、硅质和藻礁白云岩组成。其上部有粉砂岩和铁锰质页岩。在铁岭组的白云岩中也有沉积锰矿层。

由此可知，华北的中元古界是一个由海水进退造成的巨型沉积旋回。在蓟县期末，华北古陆整体抬升，遭受剥蚀。据于荣炳等^[4]研究，沉积间断可能达50Ma之久。

华北晚元古代分为青白口期（10—8.5亿年）和震旦纪（8.5—6亿年）。青白口系分布较局限，厚仅371m。以滨浅海相碎屑岩为主，上部有较多泥灰岩。震旦系仅发育于华北古陆东缘海中，平均厚1176m。主要由石英砂岩、粉砂岩、页岩、白云岩和泥灰岩组成。含微古植物群和多种叠层石。属陆表海沉积。

青白口期末，发生晋宁运动。在燕山地区，寒武系不整合覆盖在青白口系之上，缺少震旦系。因此，常将长城系至青白口系归属为晋宁构造阶段，而将震旦系归属于加里东构造阶段^[1,5]。

表1 各纪地层主要岩类质量比值^①

Table 1. Ratios of major rocks in strata of various systems

地 层	碎屑-粘土岩/ 碳酸盐岩	页岩/砂岩	石灰岩/白云岩
震旦系	2.3	1.5	2.7
青白口系	3.2	1.5	2.0
蓟县系	0.5	0.6	0.5
南口系	0.6	1.0	0.3
长城系	4.3	0.6	1.5

① 统计的基础资料参阅梅致文硕士论文（1988）

表2 各纪地层的平均沉积速率

Table 2. Average sedimentation rate of strata of various systems

地 层	沉积总质量 (地克) ^①	沉积时间 ^② (Ma)	平均沉积速率	
			(万吨/年)	比 值
震旦系	6.5	250	260	1.0
青白口系	5.8	150	390	1.5
蓟县系	20.0	400	500	1.9
南口系	41.0	300	1370	5.3
长城系	40.0	150	2670	10.3

① 1地克 = $1 \times 10^{14}\text{t}$ ；质量据梅致文（1988）硕士论文稍加修改

② 沉积时间按各期时间间隔计算

综上所述, 华北中上元古界各纪地层的主要岩类质量比值如表 1 所示。

表 1 说明, 长城系、青白口系和震旦系均以碎屑-粘土岩为主, 而且灰岩多于白云岩。但长城系的砂岩多于页岩, 有别于青白口系和震旦系; 南口系和蓟县系则以碳酸盐岩为主, 而且白云岩多于石灰岩。但蓟县系的砂岩多于页岩, 与南口系稍有区别。

华北中、晚元古代各纪地层的平均沉积速率如表 2 所示。很明显, 从长城系至震旦系沉积速率依次下降。震旦系的沉积速率仅为长城系的十分之一。这种演变规律, 可能是华北古陆日趋稳定的一种反映。

二、华北元古界的化学演变特征

在研究华北陆壳岩石化学模型的大量资料基础上, 求得华北元古界各纪地层的平均化学成分(表 3)。为了便于对比, 表中各组份的含量总和已换算为 100%。

表 3 清楚地显示出, 五台系具有显然不同于其它各系的化学特征。例如, 同其它各系比较, 它具有最高 Al_2O_3 、 Na_2O 、 TiO_2 和 MnO 含量以及最低的 CaO 、 K_2O 和 CO_2 含量。同时, 它以 $\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 以及 $\text{MgO} \approx \text{CaO}$ 等特征而有别于其它各系。

表 3 华北元古代各纪地层的平均化学成分 (wt%)

Table 3. Average chemical composition of various Proterozoic strata in North China (wt%)

成 分	五 台 系	滦 沱 系	长 城 系	南 口 系	蓟 县 系	青 白 口 系	震 旦 系
SiO_2	58.41	42.39	62.70	35.18	33.97	55.35	51.57
TiO_2	0.69	0.30	0.26	0.16	0.13	0.32	0.30
Al_2O_3	15.56	7.32	8.50	4.80	3.97	9.70	9.09
Fe_2O_3	2.40	2.56	2.75	1.89	1.70	2.97	2.82
FeO	5.72	1.31	1.69	1.20	1.16	1.46	1.37
MnO	0.10	0.08	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
MgO	4.46	8.35	2.94	9.76	9.03	3.40	3.57
CaO	4.62	13.70	8.11	20.02	22.30	10.79	13.38
Na_2O	2.98	0.72	0.34	0.31	0.29	0.39	0.33
K_2O	1.17	2.35	3.55	2.02	1.72	3.90	3.65
H_2O^+	2.19	1.27	1.32	0.86	0.70	1.48	1.39
P_2O_5	0.17	0.20	0.10	0.06	0.06	0.10	0.09
CO_2	1.53	19.45	7.72	23.72	24.95	10.11	12.41
总 和	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

从表 3 还可以看出, 分别在下、中、上元古界内, 从五台系至滦沱系, 从长城系至蓟县系, 以及从青白口系至震旦系, SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Na_2O 和 TiO_2 含量均有降低的趋向。而 MgO 、 CaO 和 CO_2 含量则有增加的趋向。

表 4 列出华北元古界及其上、中、下三部分的平均化学成分。以显示其演变特征。

表 4 说明: 1) 下元古界具有最高的 Al_2O_3 、 FeO 和 Na_2O 含量; 中元古界具有最高的 MgO 、 CaO 和 CO_2 含量; 上元古界具有最高的 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 K_2O 含量。三者的成分差别是显

然的；2）从中元古界至上元古界的沉积盖层中，除MgO、CaO和CO₂含量减少外，其余组分均增加；3）无论是整个元古界或其上、中、下三部分，均呈现CaO>MgO、K₂O>Na₂O和TiO₂>MnO的化学特征；4）从下元古界至上元古界，Fe₂O₃/FeO、CaO/MgO、K₂O/Na₂O和TiO₂/MnO的含量比值均呈递增的趋势。这四种含量比值的演变规律是十分明显的。下元古界的四种含量比值均低于整个元古界的平均比值，反映了华北古陆褶皱基底的化学特征；中、上元古界的四种含量比值均高于整个元古界的平均比值，则反映了华北古陆沉积盖层的化学特征。

同华北沉积层的平均化学成分对比（表5），华北元古界的化学成分具有SiO₂、Al₂O₃和K₂O较低和FeO、MgO和Na₂O较高的特征。表中附中国沉积圈、华北陆壳和中国陆壳的平均化学成分，以供比较。

表4 华北元古界的平均化学成分（wt%）

Table 4. Average chemical composition of Proterozoic strata in North China

成 分	下元古界	中元古界	上元古界	元古界
SiO ₂	49.28	41.72	52.48	46.98
TiO ₂	0.47	0.17	0.31	0.36
Al ₂ O ₃	10.86	5.34	9.24	8.95
Fe ₂ O ₃	2.49	2.02	2.86	2.36
FeO	3.21	1.31	1.39	2.48
MnO	0.09	0.02	0.03	0.06
MgO	6.68	7.62	3.53	6.80
CaO	9.80	18.09	12.76	12.72
Na ₂ O	1.69	0.31	0.34	1.16
K ₂ O	1.84	2.26	3.71	2.09
H ₂ O ⁺	1.67	0.89	1.41	1.40
P ₂ O	0.18	0.07	0.09	0.14
CO ₂	11.74	20.18	11.85	14.50
总 和	100.00	100.00	100.00	100.00
Fe ₂ O ₃ /FeO	0.78	1.54	2.06	0.95
CaO/MgO	1.47	2.37	3.60	1.87
K ₂ O/Na ₂ O	1.09	7.29	10.91	1.80
TiO ₂ /MnO	5.22	8.50	10.33	6.00

表5 华北元古界化学成分的对比（wt%）

Table 5. Comparison in chemical composition between North China Proterozoic and some other sedimentary units.

成 分	华北元古界	华北沉积层 ^①	中国沉积圈 ^②	华北陆壳 ^①	中国陆壳 ^②
SiO ₂	46.98	50.66	57.61	57.30	57.77
TiO ₂	0.36	0.35	0.44	0.64	1.10
Al ₂ O ₃	8.95	9.32	9.61	14.17	14.22
Fe ₂ O ₃	2.36	2.46	2.37	2.70	2.90
FeO	2.48	1.33	2.13	5.03	3.92
MnO	0.06	0.05	0.03	0.12	0.10
MgO	6.80	4.35	2.27	4.75	3.57
CaO	12.72	12.80	10.43	6.98	6.04
Na ₂ O	1.16	0.85	0.30	3.05	3.19
K ₂ O	2.09	2.45	2.00	2.17	2.82
H ₂ O ⁺	1.40	2.56	2.96	1.18	1.91
P ₂ O ₅	0.14	0.30	0.16	0.24	0.44
CO ₂	14.50	12.52	9.69	1.67	2.02
总 和	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

① 引自黎彤等（1989）华北陆壳岩石化学模型和元素丰度研究报告（国家自然科学基金资助项目）

② 引自文献〔6〕383页表3-19

三、华北元古界外生成矿背景的演变

在元古代长达20亿年的发展过程中,地球的大气圈、水圈、岩石圈和生物圈均发生过重大的演变。例如,大气圈从还原性质演变为氧化性质、海水从酸性演变为碱性、大陆地壳的加厚和扩大以及岩石化学从基性演变为中酸性、海洋生物从他养生物演变为能够进行光合作用的自养生物等等。这些外生成矿背景的演变具有全球性,而且其演变趋势是不可逆的。

但是,这并不意味着成矿背景没有区域特征。同国外类似的典型地区相比,华北元古代的成矿作用就有许多特点。例如,国外的条带状含铁建造(BIF)主要形成于早元古代。而华北的同类建造却主要形成于太古代,到了早元古已接近尾声。又如,华北元古界缺少像国外那样标准的绿岩带,也缺少与标准绿岩带有关的成矿区。世界著名的南非兰德型金铀砾岩超大型矿床,在华北元古代的底砾岩层中至今尚未找到。而在华北的元古界中却蕴藏着超大型的菱铁矿矿床和稀土-铌-铁矿床。可见华北元古代的成矿作用有其区域特殊性。它除了受到全球性演变因素的制约外,还受到区域性的局部条件的影响。

华北元古界的矿床类型较多,成因也较复杂。与沉积演变有密切关系的有沉积矿床或火山沉积矿床,沉积变质矿床或火山沉积变质矿床。其中有些矿床还有后来的热液叠加,成为具有复合成因的矿床。仅以铁矿床为例,就有条带状含铁建造,鲕状赤铁矿矿床,赤铁矿-菱铁矿矿床,稀土-铌-铁矿床,硼镁铁矿-稀土矿床等等。对沉积演变具有特殊意义的矿床类型演变,就是条带状含铁建造成矿作用的消失和鲕状赤铁矿矿床的出现。

条带状含铁建造(BIF)又称磁铁矿石岩,在我国素称鞍山式铁矿。这类矿床广泛分布于世界各大陆。其成矿期介于35—17亿年之间。我国鞍山地区和冀东地区的大型或超大型鞍山式铁矿,均产在太古代^[7,8]。早元古代的鞍山式铁矿仅见于五台系,属中型铁矿床。可见这类铁矿床在华北地区结束于23亿年前的五台运动,此后未再出现。

鲕状赤铁矿矿床又称宣龙式铁矿。它产在中元古代长城系的串岭沟组中。赤铁矿矿石呈鲕状和肾状结构。形成于燕辽海湾的潮坪环境。在吕梁运动之前,未见有这类赤铁矿沉积矿床出现过。

因此,鞍山式铁矿的消失和宣龙式铁矿的出现,标志着华北古陆的外生成矿作用发生了重大的变化。例如,沉积盆地从地槽演变为陆表海、沉积物来源从海底火山喷发物为主演变为陆源风化产物为主、沉积作用从远岸的胶体化学沉积演变为近岸的生物化学沉积、沉积条件从还原相演变为氧化相、成矿机制从Fe与Si交互共沉淀演变为两者各自分离沉淀等等。

再以碳酸盐矿床为例。华北元古代的碳酸盐岩沉积,具有Ca-Ca、Mg-Ca的演变系列。即在五台期只有少量大理岩出现。到了滹沱期和长城期,除了石灰岩外,尚有较多的白云岩出现。白云岩的沉积在南口系和蓟县系达到了高潮。到了晚元古代,主要的碳酸盐岩沉积又是石灰岩和泥灰岩。在白云岩和白云质灰岩最发育的中元古代,形成了菱铁矿、菱铁矿和菱锰矿的独立矿床。可见当时大气中的CO₂大量溶解于海洋中,最后以碳酸盐沉积方式退出大气-海洋系统而进入地壳。

中元古代大量的Ca、Mg、Fe和Mn碳酸盐沉积,说明当时海水已从酸性演变为碱性,并具有较高的盐度。就当时的大气圈来说,它已经不再是太古代的CO₂-N₂型,也不是现代的

N_2-O_2 型,而是过渡性的 $N_2-CO_2-O_2$ 型。元古代(尤其是中元古代)的成岩成矿作用,正是在这种特殊的大气-海洋条件下沉积生成的。而海洋是当时大气氧的主要供应者。

至于沉积盆地是氧化环境抑或是还原环境,则需视当时当地的成矿条件而定。例如,在沉积铁矿床和沉积锰矿床中,常见氧化物相和碳酸盐相的矿物共生组合,如原生赤铁矿-菱铁矿组合、原生赤铁矿-磁铁矿-菱铁矿组合以及水锰矿-菱锰矿组合等等。说明这种沉积环境的变化是具有区域性或局部性特征的。

红层是大气氧化作用的地质标志。因为红层的形成,是大陆岩石遭受大气氧化作用的产物。世界上最古老的红层可追索至25亿年(如印度)^[9]。大致相当于华北元古代的开始。世界上广泛出现红层的时期大约在18—20亿年之间。相当于华北早元古代过渡到中元古代的时期。因此,在长城期的陆表海中形成宣龙式铁矿,是与全球成矿背景的演变趋势一致的。

总之,通过上述对华北元古代各纪地层的演变规律分析,获得如下几点认识:

1. 早元古代的大气圈,从太古代以来的 CO_2-N_2 型演变为 $N_2-CO_2-O_2$ 型,直至晚元古代再从 $N_2-CO_2-O_2$ 型演变为 $N_2-O_2-CO_2$ 型。到了显生宙以后,大量 CO_2 继续消耗于海洋的碳酸盐沉积,并消耗于产生游离氧(O_2)的光合作用,尤其是陆生高等植物的光合作用。最终演变为现代的 N_2-O_2 型大气圈。

2. 自太古代海洋生物出现以来,海水的氯度、盐度和酸碱度的变化,就不能超过生物可能适应的范围。生物对环境适应性的改变是缓慢的,渐变的;海水化学环境的改变,也应当是缓慢地渐变的。据标准海水平均变化速率推算,元古代海水的氯度($Cl\%$)为18.3—19.2,盐度($S\%$)为32—34.5,酸碱度(pH)为6.3—7.8。均已接近现代海水的水平。海水从酸性($pH < 7$)演变为碱性($pH > 7$)的转折期,是在早元古代末和中元古代初。即刚好在华北古陆发生吕梁运动前后。

3. 当研究某一地区元古代矿产的成矿背景和成矿机理时,除了要考虑全球成矿背景演变的特殊性外,还需考虑本地区的具体成矿条件。因为在全球背景上,海水的盐度和酸碱度会因局部海域或沉积盆地的封闭或半封闭性,以及离岸远近而变化,陆源沉积物质会因地而异,沉积作用的氧化还原条件会因海水深浅或有机质多少而改变等等。因此,掌握区域成矿规律是至关重要的。只有在大量矿床的时空分布规律基础上,才能通过矿床学来探讨地球演变历史^[10]。

值得指出的是,华北元古代的成矿背景问题,尤其是大型和超大型矿床的特殊成矿背景问题,无论是全球性或区域性的,目前还研究得很不够,有许多问题还不清楚。本文仅将问题提出来,谈点粗浅体会,目的是想藉此抛砖引玉,促进这方面的深入研究,这也是当代矿床地质学和矿床地球化学的一个崭新研究方向。

参 考 文 献

- 【1】 王鸿楦主编 1985 中国古地理图集 地图出版社
- 【2】 张秋生等 1984 中国早前寒武纪地质及成矿作用 吉林人民出版社
- 【3】 白瑾主编 1986 五台山早寒武纪地质 天津科技出版社
- 【4】 于荣炳等 1984 燕山地区晚前寒武纪同位素地质年代学的研究 天津地质矿产研究所刊 第11号 第1—24页
- 【5】 范德廉等 1977 蓟县等地震旦地层沉积地球化学(I) 地球化学 第2期 第105—122页 (II) 第3期 第161—172页

- 〔6〕 黎彤、倪守斌 1990 地球和地壳的化学元素丰度 地质出版社
- 〔7〕 孙大中主编 1984 冀东早前寒武纪地质 天津科技出版社
- 〔8〕 黎彤 1977 鞍山式铁矿的成矿地球化学背景问题 地质与勘探 第5期 第4—11页
- 〔9〕 黎彤 1977 前寒武纪游离氧的生成和大气氧的积累 地质与勘探 第7期 第6—11页
- 〔10〕 宋叔和 1990 国外矿床地质学的一些发展趋势 矿床地质 第9卷 第2期 第183—190页

SEDIMENTARY EVOLUTION AND MINEROGENIC BACKGROUND OF PROTEROZOIC ERA IN NORTH CHINA

Li Tong

(University of Science and Technology, Beijing)

Abstract

Proterozoic is an important minerogenic epoch and also a turning period of the global minerogenic background in geological history.

In North China, lots of mineral resources occurred in Proterozoic, and their minerogenic processes were controlled by both the global background and the regional or local conditions. The analytical results of the sedimentation evolution, the chemical characteristics, and the types of mineral deposits all point to the conclusion that in North China the abruptly turning point of the global minerogenic background of Proterozoic might have mainly occurred just before and after Luliang orogeny (1850Ma). To cite two examples: during that time, the chemical composition of the atmosphere changed from $\text{CO}_2\text{-N}_2$ type to $\text{N}_2\text{-CO}_2\text{-O}_2$ type, and the pH of the sea water changed from acidic to alkaline.

(上接70页 continued from p.70)

It might be considered that the ore-forming process of the Bayan Obo deposit was of polyphases, but the major metallization took place in middle Proterozoic. The ore-forming material was brought upward in the form of volcanic exhalation from the mantle and then through sedimentation formed ore deposit which was genetically of alkalic rock-carbonatite rock type. In Caledonian period, with the intrusion of carbonate veins, small amounts of ore-forming material might have been brought upward from the depth and led to extensive metasomatism. In Hercynian period, with the intrusion of granite from the south, the ore deposit was transformed and the metasomatism was further developed, nevertheless, little ore-forming material was brought into the orebody from the depth or the outside at that time.