



북중국 유안지아쿤에 분포하는 슈피리어 유형 호상철광상에서 산출되는 자철석을 이용한 광상 형성 환경 해석

문인경¹ · 이인성^{1,*} · 이정진¹ · 정해명¹ · Xiaoyong Yang²

¹서울대학교 지구환경과학부

²School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China

요 약

북중국 산씨 지방에 위치하는 유안지아쿤 철광상은 고원생대(2.38-2.21 Ga)의 유안지아쿤 층에 배태되어 있으며, 안정적인 대륙붕 환경에서 형성된 슈피리어 유형 호상철광상에 포함된다. 유안지아쿤 호상철광상의 광석은 자철석이 풍부한 어두운 색을 띠는 층과 석영이 풍부한 밝은 색의 층이 서로 반복되어 나타난다. 주요 구성 광물들은 자철석과 석영이고 소량의 적철석, 황철석, 각섬석류 등이 함께 수반되어 나타난다. 자철석 입자의 크기는 20-180 μm 이고, 석영의 입자크기는 50-500 μm 이다. 광상에서 산출하는 자철석 입자에 대한 라만 분광분석 결과 자철석 입자의 가장자리에서 적철석의 라만 스펙트럼이 관찰되었고, 이는 유안지아쿤 호상철광상이 형성될 당시 산소분압이 증가했음을 의미한다. 그러나 광석에서 결핍된 음의 Ce 이상치는 유안지아쿤 호상철광상의 형성 당시 산소 분압이 Fe^{2+} 산화에는 영향을 미치지지만 Ce^{3+} 산화에는 영향을 끼치지 못했음을 보여준다. 이와 같은 결과는 이전의 지구화학적 연구결과와 함께 대산화사건과 유안지아쿤 호상철광상의 생성은 밀접한 관련성을 가지고 있음을 지시해 주고 있다.

주요어: 슈피리어 유형, 호상철광상, 자철석, 라만 분광 분석, 대산화사건

Inkyeong Moon, Insung Lee, Jungjin Lee, Haemyeong Jung and Xiaoyong Yang, 2018, Interpretation of formation condition in Superior-type banded iron formation (BIF) of Yuanjiacun in North China Craton using magnetite. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 3, p. 281-291

ABSTRACT: The superior-type Yuanjiacun banded iron formation (BIF) was formed during the Paleoproterozoic (2.38-2.21 Ga) and distributed in the Shanxi Province of the North China Craton. The studied BIF is within the Yuanjiacun Formation of the lower part of the Luliang Group and precipitated along a stable continental shelf. The iron ore of the Yuanjiacun BIF has a layering structure that consists of magnetite-rich dark layers and quartz-rich light layers. The major minerals are magnetite and quartz with subordinate hematite, pyrite, amphibole, etc., varying in grain sizes. The grain size of magnetite is 20-180 μm and that of quartz is 50-500 μm . The main purpose of the study was to clarify the relationship between the timing for the formation of Yuanjiacun BIF and the coeval oxygen fugacity ($f\text{O}_2$) through Raman analysis of magnetite as a representative ore mineral in the BIF. Hematite spectra occurred at the edge of the some magnetite grains, representing change of oxidation level during the BIF formation. In addition, lack of negative Ce anomalies of iron ores from Yuanjiacun BIF indicates that $f\text{O}_2$ during their formation was enough for Fe^{2+} oxidation, but not enough for Ce^{3+} oxidation. Combined with previous geochemical data, the results of this study suggest that the Yuanjiacun BIF has close relationship with Great Oxidation Event.

Key words: Superior-type, Banded Iron Formations (BIFs), magnetite, Raman analysis, Great Oxidation Event (GOE)

(Inkyeong Moon, Insung Lee, Jungjin Lee and Haemyeong Jung, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Xiaoyong Yang, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

* Corresponding author: +82-2-880-6730, E-mail: insung@snu.ac.kr

1. 서 론

호상철광상(Banded Iron Formation)은 지질학적 특징에 따라 전형적으로 호상 구조를 가지는 퇴적물로 정의되고(Klein, 2005), 전세계 철의 주된 공급원이다(Bekker *et al.*, 2010). 호상철광상의 성인 연구는 국내외 지질학자에게 상당히 많은 관심을 받고 있다(Hu *et al.*, 2005; Bekker *et al.*, 2010; Basta *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2014a, 2014b; Yang *et al.*, 2015; Wang and Zhang, 2016; Moon *et al.*, 2017). 호상철광상은 거의 대부분 선캄브리아 시기(Precambrian)에 형성되었고 해수와 높은 온도의 열수 시스템이 혼합되어 형성된다고 알려져 있지만, 아직 그 생성 과정은 명확하게 밝혀지지 않았다(Bekker *et al.*, 2010). 호상철광상 연구는 초기 지구 지각과 대기의 진화, 대기 중 산소 농도의 변화, 광합성 박테리아의 역할 등을 이해하는 데 있어 중요한 정보를 제공한다(Ohmoto, 2003; Trendall, 2009). 초기에 광물은 철 수산화물 형태로 침전이 되고, 이 후 속성 작용을 겪으면서 자철석, 적철석 등으로 변화한다(Posth *et al.*, 2013). 호상철광상에 수반되어 나타나는 철 광석은 주로 석영과 자철석으로 구성되고, 소량의 적철석과 황동석 등을 포함한다. 또한, 철이 풍부한 층과 규소가 풍부한 층이 교대로 나타나는 것이 특징이다. 호상철광상은 형성 시기, 형성 환경, 관련되어 나타나는 암상에 따라서 크게 알고마 유형(Algoma-type)과 슈피리어 유형(Superior-type)으로 구분된다. 알고마 유형 호상철광상은 깊은 바다 환경에서 화산 활동과 밀접한 관련을 가지고 형성되었고, 슈피리어 유형 호상철광상은 상대적으로 안정된 대륙붕에서 형성된다고 일반적으로 알려져 있다(Gross, 1980).

호상철광상은 세계적으로 호주, 남아프리카, 캐나다, 브라질, 중국 등지에 분포하고 있으며, 이 중 중국에서는 거의 대부분 북중국 대륙에 분포하고 있다(Zhai and Windley, 1990; Zhai *et al.*, 1990; Zhang *et al.*, 2011). 북중국 대륙(North China craton)은 아시아에서 가장 오래된 대륙 지각 중 하나로, 복잡한 지각 진화 과정을 거치면서 지구에서 중요한 지질학적 사건들을 기록하고 있다(Bekker *et al.*, 2010). 북중국 산서 지방(Shanxi Province)에 위치한 유안지아쿤 호상철광상은 아시아에서 규모가 가장 큰 노천 채굴 철광상으로 2.3-2.1 Ga에 생성되어 있으며(Yu *et al.*,

1997; Geng *et al.*, 2000; Wan *et al.*, 2000), 화산 활동과의 연관성이 적은 얇은 해양환경에서 형성된 슈피리어 유형에 해당된다. 본 호상철광상이 형성된 시기는 대산화사건(Great Oxidation Event)이 발생한 시기(2.4-2.0 Ga)와 일치한다(Hou *et al.*, 2014; Wang and Zhang, 2016).

호상철광상에 대한 성인 연구는 주로 생성 연대와 생성 과정을 바탕으로 지각 모델을 추론하는 연구가 주로 진행되어왔다(Isley and Abbott, 1999; Huston and Logan, 2004; Bolhar *et al.*, 2005; Basta *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2014; Lan *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2014a, 2014b; Khalil *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2015; Moon *et al.*, 2017). 최근에는 호상철광상에 수반되어 나타나는 대표적인 광석 광물인 자철석의 결정 모양, 입자 크기, 격자 구조와 특징을 이용하여 그 광상의 성인을 이해하는 것으로 연구 영역이 확장되었다(Li *et al.*, 2014a).

이번 연구에서는 라만 분광분석법을 이용하여 유안지아쿤 호상철광상의 자철석 산출 특성을 규명하여 본 광상이 형성된 시기의 주변 환경을 재구성하고, 대산화사건과의 상호연관성을 알아보고자 한다.

2. 지질 및 광상 개요

중국은 세계에서 가장 오래된 지각 지괴로 크게 북중국 대륙괴(North China Craton), 남중국 대륙괴(South China Craton), 태림 대륙괴(Tarim Craton)와 여러 소대륙 대륙괴로 구성된다. 북중국 대륙괴는 후기 시생대부터 고원생대에 걸쳐 형성된 양쯔 지괴(Yangtze Block), 고원생대에 형성된 카타시아 지괴(Cathaysia blocks)로 이루어져 있다. 북중국 대륙괴는 시생대부터 고원생대에 걸쳐 형성된 기반암이 변성 받지 않은 중기 원생대부터 신생대의 암석으로 덮여 있으며, 그 규모가 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 에 달한다(Zhao *et al.*, 2001; Zhao and Zhai, 2013; Zheng *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2014b). 북중국 대륙괴의 기반암은 2.8-2.7 Ga와 2.6-2.5 Ga 기간 동안 형성되었다. 이 지역은 토날라이트-트론제마이트-화강섬록암(tonalite-trondhjemite-granodiorite; TTG), 편마암, 화강암, 혼성암, 각섬암, 녹색 편암, 호상철광상, 석류석 화강암 등으로 구성되어 있다(Hu *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2012). 북중국 대륙괴는 신시생대의 지각 성장과 안정, 고원

생대의 열개 작용, 섭입 작용, 충돌 작용, 후기 원생대 부터 신원생대의 단계적인 열개 작용, 고생대의 조산운동, 중생대의 지각 확장과 같은 일련의 지질학적 진화 과정을 겪었으며, 이러한 지각 진화 과정은 북중국에 분포하는 광상 체계와 밀접한 관련이 있다(Zhai and Santosh, 2013). 중국에 분포되어 있는 대규모의 호상철광상은 대부분 북중국에 많이 분포되어 있고, 연구

지역인 유안지아쿤 호상철광상 역시 북중국에 위치해 있다. 이 지역의 호상철광상은 뤼량(Luliang) 그룹 내 유안지아쿤 층에 위치한다(그림 1).

뤼량 그룹은 녹색 편암상에서 감섬석상의 변성 퇴적암과 호상철광상이 분포되어 있는 층과 화산암으로 구성되어 있으며, 주된 암상은 각섬석, 규장질 편마암, 편암, 호상철광상 및 투섬석-

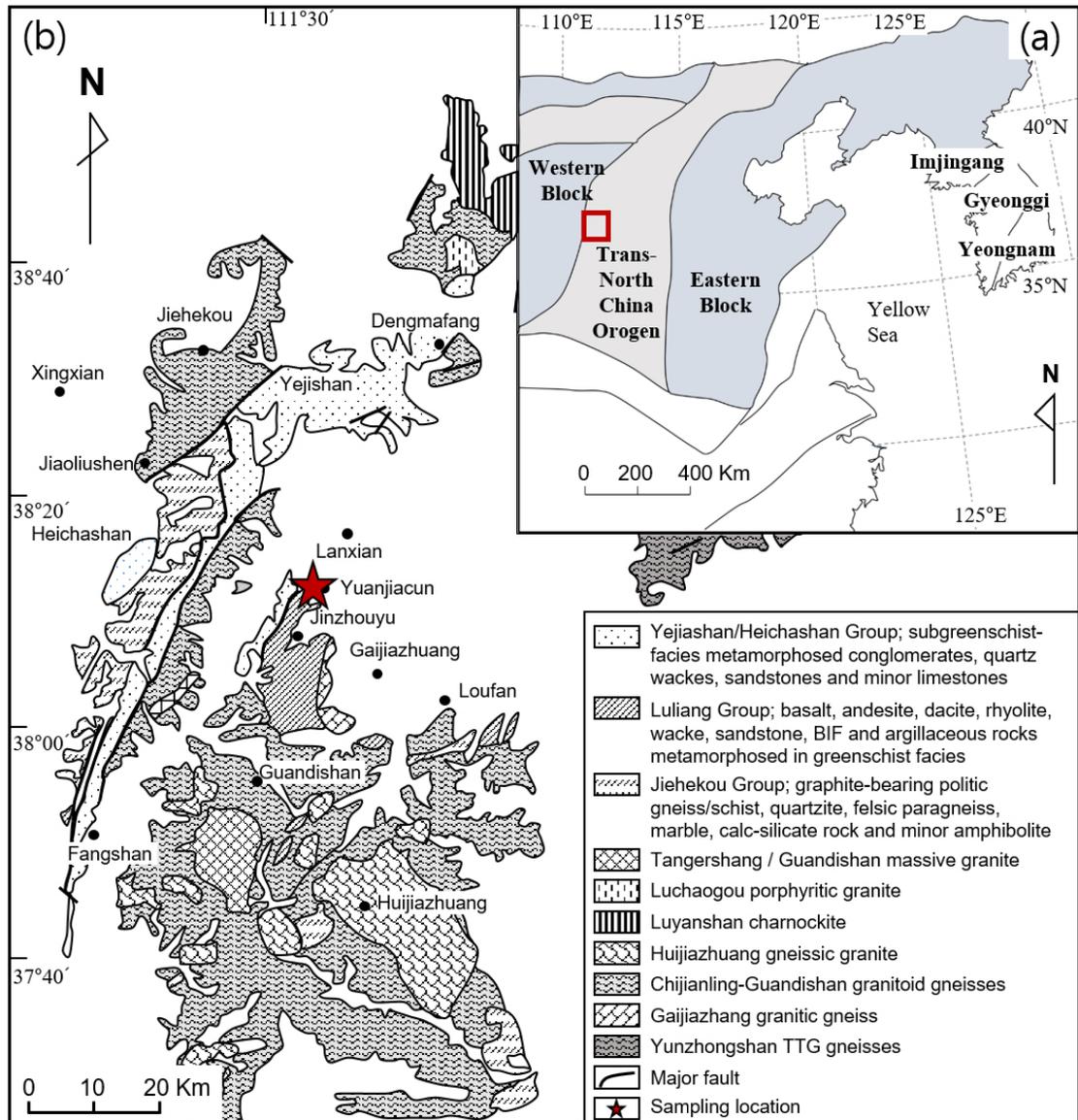


Fig. 1. (a) Tectonic map of the North China Craton (NCC), revised from Zhao *et al.* (2005). Red square indicate location of Yuanjiacun BIF. The Archean to Proterozoic basement are widely distributed in the Eastern and Western Block of NCC. The Trans North China orogen is covered Paleoproterozoic basement. (b) Simplified geological map of the Luliang Complex, modified after Zhao *et al.* (2008).

녹섬석 대리암이다(Wang *et al.*, 2015).

유안지아쿤 층은 녹니석 편암, 견운모-녹니석 천매암, 견운모 편암, 규암 및 소량의 탄소질의 녹니석 편암으로 구성된 변성퇴적암 층서를 보인다(Wang *et al.*,

2015). 이 변성퇴적물은 유안지아쿤 호상철광상에 간헐적으로 삽입되어 나타난다. 유안지아쿤 호상철광상은 저변성도의 녹색편암상 변성작용을 받았고(Hou *et al.*, 2014) 남쪽으로 갈수록 변성 정도가 증가하며

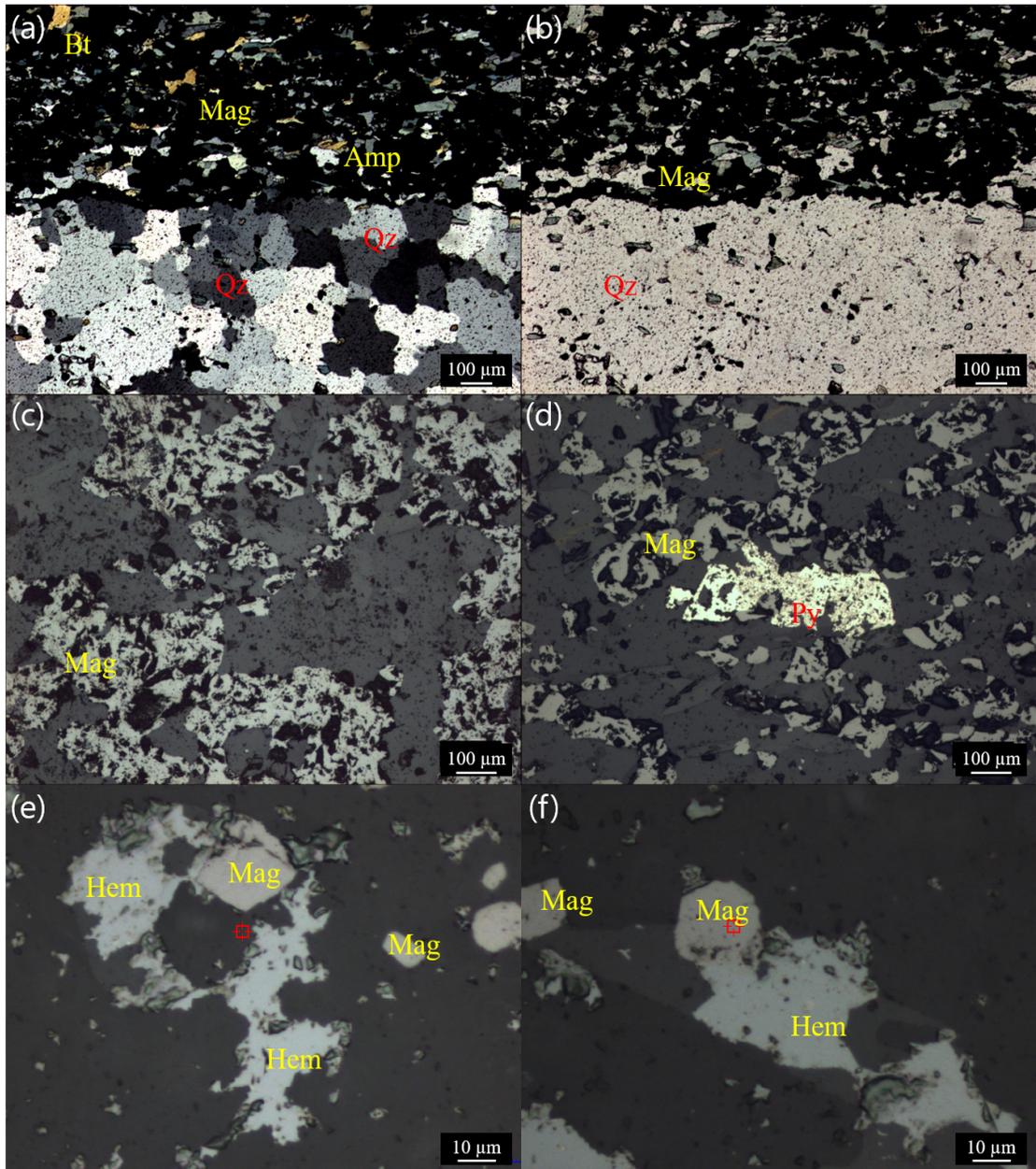


Fig. 2. Yuanjiacun BIF consisting of alternating Fe-rich layer and Si-rich layer (a) under cross polarized light and (b) open polarized light. (Magnetite; Mag, Hematite; Hem, Pyrite; Py, Quartz; Qz, Biotite; Bt, Amphibole; Amp). (c) Magnetite occurred as a representative ore mineral (reflected light) with (d) minor pyrite (reflected light). (e) Magnetite and hematite are identified in the thin section under reflecting microscope of Raman. (f) Magnetite and hematite are simultaneously shown in magnetite.

녹니석-조장석 편암, 견운모-석영 편암, 녹니석 편암 및 각섬암 등으로 다양한 암상이 산출된다(Shen *et al.*, 2010).

3. 연구 방법

자철석의 화학조성을 파악하기 위하여 전자현미분석을 한국 기초과학지원연구원 전주센터에서 실시하였다. 전자현미분석기(Electron Probe Micro-Analyzer; SHIMADZU 1600)의 분석 조건은 15 kV, 20 nA이며, 분석 영역은 직경 1 μ m이다. 광석의 정량 분석은 캐나다 Actlabs (Activation Laboratories)에서 4LITHO 분석 코드를 사용하여 수행하였다. 라만 분광 분석을 위하여 서울대학교 지체구조물리학 연구실의 라만 분광 분석기(Raman Spectrometer; DXR Raman Microscope)를 사용하였다. 레이저 파장은 532 nm, 레이저 파워는 5.0 mw, 빔 크기는 0.7 μ m, 노출 시간은 32초, 배경 노출 시간은 64초의 세팅을 사용하였으며, 99-1,200 cm^{-1} 범위의 라만 시프트를 중심으로 분석이 진행되었다. 광석 광물의 입자 내에서 중심으로부터 가장자리까지 입자 크기에 따라서 3-5개 포인트에서 분석을 실시하였다.

라만 분광법은 시료 표면에 투사된 빛이 다른 진동수를 가지고 비탄성 산란되는 현상인 라만 효과를 이용하여 분자의 화학적인 구성과 구조를 이해하는 방법이다. 탄성 산란에 비해 이동된 정도의 비탄성 산란을 라만 시프트라고 하고 각 광물은 구성 원소 및 분자 구조에 따라 고유의 라만 시프트에서 강한 스펙트럼 밴드를 나타낸다(Lewis and Edwards, 2001). 한편, 같은 자철석 혹은 적철석의 경우에도 강한 스펙트럼 밴드를 나타내는 라만 시프트에 다소 차이가 있을 수 있다. 자철석의 라만 스펙트럼은 300-336 cm^{-1} , 533-570 cm^{-1} , 662-706 cm^{-1} 의 범위로 나타나며, 금속 미량 원소가 포함되는 경우 그 범위의 폭은 더 증가한다(Shabanova and Lazor, 2003). 적철석은 205 cm^{-1} , 224-228 cm^{-1} , 273 cm^{-1} , 288-294 cm^{-1} , 335 cm^{-1} , 408-413 cm^{-1} , 465 cm^{-1} , 580 cm^{-1} , 591 cm^{-1} , 669 cm^{-1} 등의 다양한 라만 시프트를 가진다는 것이 보고되었다(Beattie and Gilson, 1970; Massey *et al.*, 1990; Shim and Duffy, 2002; Murugappan *et al.*, 2014; Drozdov *et al.*, 2016). 이외에 각 광물에 대한 라만 스펙트럼 자료는 RRUFF project (<http://rruff.info/>)를 참고하였다. 라만 시프트의 차이 및 예외적으로 관찰되는 라만 시프트의

원인에는 원자 간 진동에너지 차이, 샘플 내 결함 등이 있다(Shabanova and Lazor, 2003).

4. 결 과

유안지아쿤 호상철광상에서 산출되는 철광석은 주로 자철석과 석영으로 구성되고, 소량의 흑운모, 각섬석, 황철석도 함께 수반되어 나타난다. 자철석과 석영의 입자크기는 각각 20-180 μ m, 50-500 μ m이며, 자철석 부화 층(layer)과 석영 부화 층이 0.01-2 cm의 다양한 두께로 서로 반복 산출하는 호층구조를 갖는다(그림 2a-d). 자철석과 적철석 입자는 그림 2e 에서와 같이 각각 분포 하기도 하지만, 그림 2f 와 같이 자철석 입자의 가장자리에서 적철석이 성장하여 함께 공존하여 나타나기도 한다. 구성 광석 광물은 주로 자철석이며 적철석과 적철석이 성장하여 나타나는 자철석은 비슷한 비율로 나타난다.

전자현미분석결과 자철석은 주로 FeO와 Fe₂O₃로 구성되고, Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO는 1wt.% 미만으로 미량 존재한다. 철 함량은 전자현미분석하에서 FeO^T로 나타난다. 이를 FeO=Fe₂O₃×0.8998에 대해 계산한 다음, FeO와 Fe₂O₃로 분리하여 표기하였다(표 1).

광석의 Ce 이상치와 Pr 이상치는 각각 $Ce/Ce^* = Ce_{PAAS}/(0.5 Pr_{PAAS} + 0.5 La_{PAAS})$ 와 $Pr/Pr^* = Pr_{PAAS}/(0.5 Ce_{PAAS} + 0.5 Nd_{PAAS})$ 를 이용하였고(Bau and Dulski, 1996), 원소 값은 PAAS (Post-Archean Australian Shale) (McLennan, 1989)로 표준화 하였다. Ce 이상치는 0.88-0.93의 값을 보이고, Pr 이상치는 0.98-1.03의 범위를 나타낸다(표 2).

유안지아쿤 호상철광상에서 산출되는 자철석의 경우 545-564 cm^{-1} , 664-680 cm^{-1} 에서(그림 3a, 3b), 적철석의 경우 205-221 cm^{-1} , 265-280 cm^{-1} , 330-358 cm^{-1} , 463-468 cm^{-1} 에서 라만 시프트가 관찰된다(그림 3c, 3d). 자철석 입자에서는 가장자리 부분에서 적철석의 스펙트럼이 나타나기도 한다(그림 3e, 3f).

5. 토 의

5.1 유안지아쿤 호상철광상의 생성과 대산화사건의 연관성

Li *et al.* (2014a)은 북중국의 남동쪽 끝에 위치하

Table 1. EPMA data of the magnetites from Yuanjiacun BIF (wt.%).

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	Total
1	0.00	0.01	0.07	0.17	0.02	0.00	0.03	0.02	0.06	69.60	31.31	101.27
2	0.01	0.00	0.07	0.07	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	69.52	31.27	101.03
3	0.00	0.00	0.06	0.09	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	70.22	31.59	102.00
4	0.02	0.00	0.09	0.12	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	69.60	31.31	101.20
5	0.00	0.01	0.06	0.11	0.01	0.00	0.01	0.04	0.02	70.07	31.52	101.85
6	0.00	0.00	0.07	0.08	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	69.43	31.23	100.87
7	0.01	0.00	0.08	0.05	0.01	0.00	0.01	0.05	0.04	69.32	31.18	100.75
8	0.00	0.00	0.08	0.10	0.05	0.00	0.01	0.06	0.01	69.82	31.41	101.53
9	0.02	0.00	0.03	0.07	0.02	0.00	0.03	0.01	0.00	70.25	31.60	102.03
10	0.00	0.02	0.03	0.07	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	68.76	30.93	99.87
11	0.00	0.06	0.11	0.27	0.03	0.05	0.02	0.02	0.01	69.39	31.22	101.17
12	0.01	0.02	0.05	0.20	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	69.18	31.12	100.61
13	0.00	0.43	0.26	1.48	0.01	0.15	0.12	0.00	0.05	68.17	30.67	101.34
14	0.00	0.01	0.02	0.09	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	69.36	31.20	100.74
15	0.00	0.01	0.03	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	69.28	31.17	100.60
16	0.00	0.00	0.02	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	69.06	31.07	100.25
17	0.01	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	69.51	31.27	100.88
18	0.02	0.02	0.04	0.19	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	69.89	31.44	101.64
19	0.01	0.01	0.01	0.05	0.00	0.00	0.02	0.01	0.04	69.23	31.14	100.52
20	0.00	0.00	0.04	0.07	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	70.08	31.52	101.73
21	0.00	0.00	0.05	0.09	0.00	0.01	0.02	0.00	0.03	68.70	30.90	99.81
22	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	69.52	31.28	100.95
23	0.01	0.00	0.08	0.12	0.00	0.08	0.03	0.01	0.00	68.64	30.88	99.85
24	0.00	0.01	0.04	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	69.95	31.47	101.59
25	0.00	0.03	0.04	0.12	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	69.69	31.35	101.27
26	0.00	0.00	0.03	0.05	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	69.31	31.18	100.58
27	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	68.85	30.97	99.99
Avg.	0.00	0.02	0.06	0.15	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	69.74	31.37	101.42

Avg: Average

Table 2. Pr/Pr* and Ce/Ce* data of the iron ores from Yuanjiacun BIF.

	Pr/Pr*	Ce/Ce*
1	0.98	0.89
2	0.98	0.93
3	1.02	0.88
4	1.03	0.89

고 있는 우양 호상철광상(Wuyang BIF)에 나타나는 자철석에 대해 라만 분광분석연구를 수행한 바 있다. 우양 호상철광상은 후기 시생대에 티산마이아오 층

(Tieshanmiao Formation)에 형성되어 있으며, 암상과 광물 조성을 기준으로 두 가지 유형으로 구분하였다. 하나는 석영과 자철석이 우세하고, 소량의 방해석

이 수반되어 나오는 유형의 호상철광상(quartz-magnetite BIFs: QMB)이고, 다른 하나는 휘석과 석영과 함께 소량의 장석으로 구성된 유형의 호상철광상(pyroxene-magnetite BIFs: PMB)이다. 이러한 특징을 가지는 우양 호상철광상에 수반되어 나타나는 자철석의 가장자리에서 중심부까지 가면서 라만분광분석을 수행하였고, 그 결과 자철석의 가장자리에서 적철석 스펙트럼이 관찰된다고 보고하였다. 이는 자철석 입자 내에

자철석과 적철석이 공존함을 나타냄과 동시에, 자철석의 중심에서 가장자리로 갈수록 산화 정도가 높아짐을 의미한다고 하였다. 또한 자철석 입자의 가장자리 부분에서 나타나는 적철석의 성장이 자철석 입자가 재결정 중에 산화에 의한 영향을 받았음을 입증했다 (Li *et al.*, 2014a).

이번 연구에서는 연구 지역인 유안지아쿤 호상철광상에 나타나는 자철석 입자에 대하여 라만분광분석

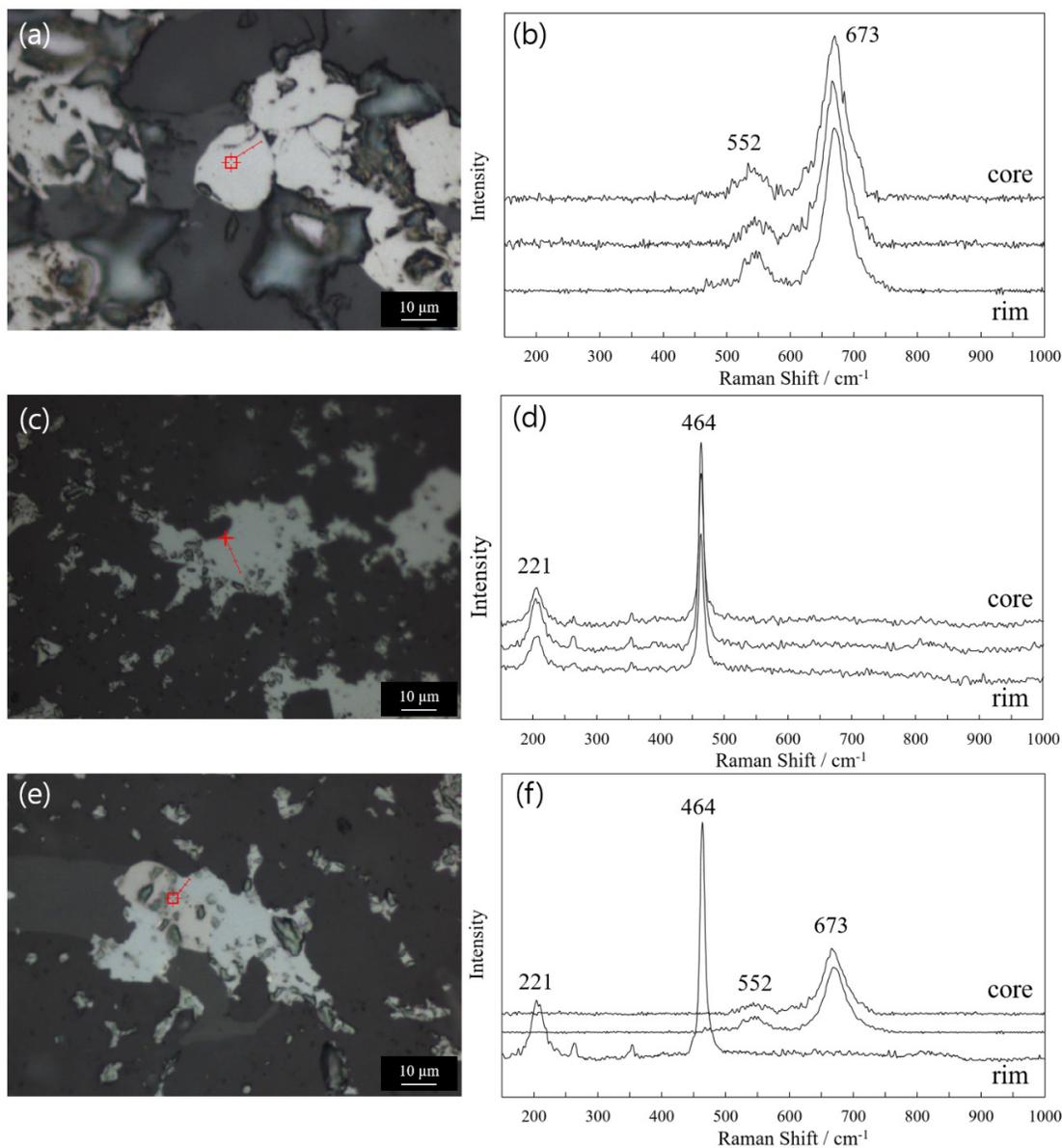


Fig. 3. Raman analysis positions (a, c, e) and Raman spectrum (b, d, f) of the magnetite and hematite from Yuanjiacun BIF.

연구를 수행하였다. 연구 결과 자철석 입자의 가장 자리에서 Li *et al.* (2014a)의 연구결과와 마찬가지로 적철석 스펙트럼이 관찰됨을 확인하였고, 이는 입자의 중심에서 가장자리로 갈수록 산화 정도가 증가함에 따른 것으로 생각된다.

Ce 이상치는 $Ce/Ce^* = Ce_{PAAS} / (0.5 Pr_{PAAS} + 0.5 La_{PAAS})$ 로 계산이 되는데, 이때 해수나 해양퇴적물에서 변칙적으로 나타나는 La 농도의 영향을 받는다. 이러한 요소를 제거하기 위해서 Bau and Dulski (1996)는 변칙적으로 나타나지 않는 Pr과 Nd 이상치를 이용하여 Pr 이상치를 계산하여, $(Ce/Ce^*)_{PAAS}$, $(Pr/Pr^*)_{PAAS}$ 를 이용한 다이어그램을 제시하였다(그림 4). 유안지아쿤 호상철광상의 광석은 모두 IIa 영역에 도시되고, 이는 Ce 이상치가 나타나지 않음을 의미한다. 더 나아가 유안지아쿤 호상철광상이 생성된 고원생대의 해양환경이 현재 해양환경보다 환원환경임을 의미한다(그림 4).

Hou *et al.* (2014)와 Wang and Zhang (2016)은 암석학, 광물학 연구와 함께 희토류 원소, 철, 산소 및 규소 동위원소를 이용하여 유안지아쿤 호상철광상의 성인을 재구성하는 연구를 수행하였다. 연구결과를 종합해보면 유안지아쿤 호상철광상이 형성될 당시의 고해양환경은 전 지구적인 대기 중 산소의 증가 현상(GOE)에 의해 얕은 바다에 점차적으로 산소가 풍부해져, 심해의 환원환경과 심해의 산화환경의 수직적 환경변화가 존재했으며, 해수 내 Fe^{2+} 에서 Fe^{3+} 로의 산화와 그에 따른 침전 작용은 산화-환원 전이대(oxidation-reduction transition zone)에서 발생했다. 유안지아쿤 호상철광상의 형성 시기는 2.3-2.1 Ga로 대산화사건이 일어났던 시기(2.4-2.0 Ga)에 형성되었다고 알려져 있다(Wang and Zhang, 2016). 즉, 유안지아쿤 호상철광상이 형성되는 동안 대산화사건의 영향으로 대기중의 산소 분압(fO_2)이 증가하였고, 이에 산화작용에 따라서 광체에서 산출되는 자철석의

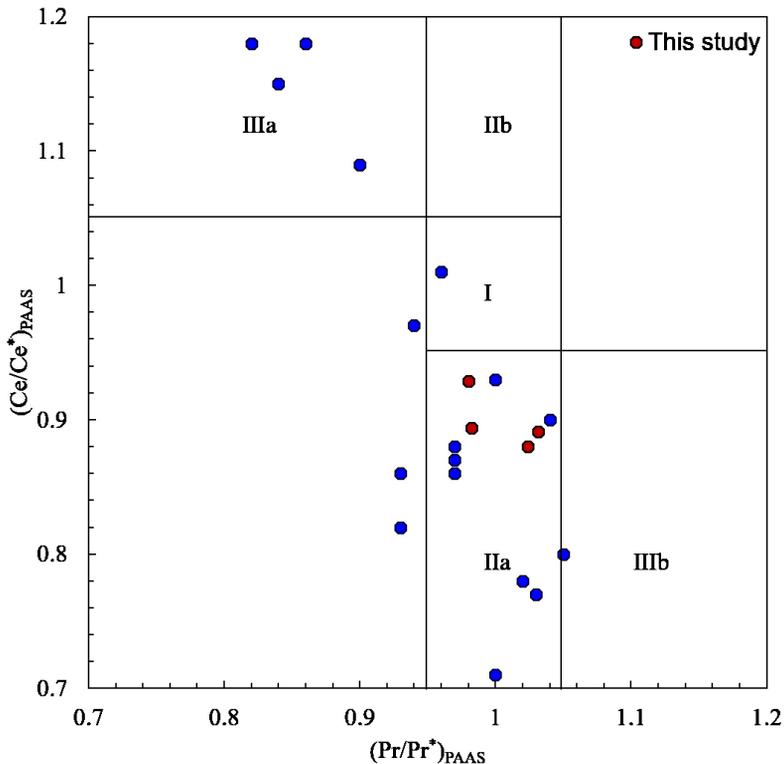


Fig. 4. Ce/Ce^*_{PAAS} versus Pr/Pr^*_{PAAS} discrimination diagram for iron ores of Yuanjiacun BIF. Field I: neither Ce_{PAAS} nor La_{PAAS} anomaly; field IIa: positive La_{PAAS} anomaly, no Ce_{PAAS} anomaly; field IIb: negative La_{PAAS} anomaly, no Ce_{PAAS} anomaly; field IIIa: positive Ce_{PAAS} anomaly; field IIIb: negative Ce_{PAAS} anomaly. Red circles indicate iron ores from this study and blue circles comes from Hou *et al.* (2014) and Wang *et al.* (2014).

가장자리에 적철석이 존재함을 본 연구에서 확인할 수 있었다.

그림 4에 유안지아쿤 호상철광상이 형성될 시기의 전반적인 산화 환경을 이해하기 위해서 본 연구에서 분석된 유안지아쿤 호상철광상의 광석과 Hou *et al.* (2014)과 Wang *et al.* (2014)의 자료를 함께 도시하였다. 그 결과 광석은 I, IIa 및 IIIa 영역에 도시되고, 이는 양의 Ce 이상치를 보이거나 이상치를 나타내지 않음을 의미한다. 일반적으로 현재 산화된 해수에서 뚜렷한 음의 Ce 이상치를 보이고, 산소가 희박한 환경(suboxic)과 산소가 없는 환경(anoxic)에서 음의 이상치는 결핍되어 나타난다(Wang *et al.*, 2014). 따라서 유안지아쿤 호상철광상이 나타내는 Ce 이상치는 광상이 형성된 환경이 환원 환경이 우세한 환경이었음을 의미함과 동시에 심해의 산화, 환원 환경의 수직적 환경변화가 존재했음을 나타낸다. 연구 결과를 종합해 보면 시생대와 원생대 경계에서 유안지아쿤 호상철광상이 형성되던 시기의 산소 분압은 Fe^{2+} 를 Fe^{3+} 로 산화시키기에는 충분할 정도로 증가했지만, Ce^{3+} 가 Ce^{4+} 로 산화되어 Ce^{4+} 가 안정된 상태로 존재하기에는 매우 낮은 환경이었음을 지시한다(Bau and Dulski, 1996). 이번 연구 결과는 유안지아쿤 호상철광상의 생성이 대산화사건과 밀접한 연관을 가지고 있음을 시사하며 이전 연구들에서 제안된 고원생대 대기-해양 환경과도 일치한다.

6. 결론

북중국 산씨 지방에 분포하는 유안지아쿤 호상철광상에서 산출되는 광석과 자철석 입자에 대해 지구 화학 분석을 실시 하였고, 이는 본 연구 광상이 형성될 당시 환경에 대한 정보를 제공해 준다. 자철석의 가장자리에서 관찰된 적철석의 성장은 유안지아쿤 호상철광상이 형성되는 시기 증가한 산소 분압이 Fe^{2+} 를 Fe^{3+} 로 산화시키기에 충분했음을 의미 한다. 그러나 광석에서 결핍된 음의 Ce 이상치는 유안지아쿤 호상철광상이 형성될 때 대산화사건의 영향으로 심해의 환원환경과 심해의 산화환경의 수직적 환경변화가 존재했음을 의미하지만, 증가한 산소 분압이 Ce^{3+} 산화에는 영향을 끼치지 못했음을 보여준다. 이러한 연구 결과로부터 대산화사건(Great Oxidation Event)과 유안지아쿤 호상지아쿤 호상철광상은 밀접한 관

련을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단(과제번호 NRF-2016K2A9A2A06005012)과 서울대학교 BK 21 프로그램의 지원을 받아 진행되었다. 본 연구에 많은 조언을 해주신 서울대학교 자원 지질 연구실원들에게 감사의 뜻을 표한다. 본 논문을 자세히 검토해주시고 유익한 조언을 해주신 김창성 박사님, 유봉철 박사님과 익명의 심사위원께 감사 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- Basta, F.F., Maurice, A.E., Fontboté, L. and Favarger, P.-Y., 2011, Petrology and geochemistry of the banded iron formation (BIF) of Wadi Karim and Um Anab, Eastern Desert, Egypt: implications for the origin of Neoproterozoic BIF. *Precambrian Research*, 187, 277-292.
- Bau, M. and Dulski, P., 1996, Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79, 37-55.
- Beattie, I. and Gilson, T., 1970, The single-crystal Raman spectra of nearly opaque materials. Iron (III) oxide and chromium (III) oxide. *Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical*, 980-986.
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapež, B., Hofmann, A., Konhauser, K.O. and Rouxel, O.J., 2010, Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105, 467-508.
- Bolhar, R., Van Kranendonk, M.J. and Kamber, B.S., 2005, A trace element study of siderite-jasper banded iron formation in the 3.45 Ga Warrawoona Group, Pilbara Craton-formation from hydrothermal fluids and shallow seawater. *Precambrian Research*, 137, 93-114.
- Drozhdov, A.S., Ivanovski, V., Avnir, D. and Vinogradov, V.V., 2016, A universal magnetic ferrofluid: Nanomagnetite stable hydrosol with no added dispersants and at neutral pH. *Journal of colloid and interface science*, 468, 307-312.
- Geng, Y., Wan, Y., Shen, Q., Li, H. and Zhang, R., 2000, Chronological framework of the early Precambrian important events in the Luliang area, Shanxi Province. *ACTA GEOLOGICA SINICA-CHINESE EDITION*-, 74, 223-231 (in Chinese with English abstract).
- Gross, G.A., 1980, A classification of iron formations based on depositional environments. *The Canadian*

- Mineralogist, 18, 215-222.
- Han, C., Xiao, W., Su, B., Chen, Z., Zhang, X., Ao, S., Zhang, J., Zhang, Z., Wan, B. and Song, D., 2014, Neoproterozoic Algoma-type banded iron formations from Eastern Hebei, North China Craton: SHRIMP U-Pb age, origin and tectonic setting. *Precambrian Research*, 251, 212-231.
- Hou, K., Li, Y., Gao, J., Liu, F. and Qin, Y., 2014, Geochemistry and Si-O-Fe isotope constraints on the origin of banded iron formations of the Yuanjiaocun Formation, Lvliang Group, Shanxi, China. *Ore Geology Reviews*, 57, 288-298.
- Hu, H., Niu, S., Wang, B., Sun, A., Xu, C., Li, Y. and Li, M., 2005, Source of fluids in the Longquanzhan gold deposits in the Yishui area, Shandong, China. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Springer, pp. 1539-1542.
- Huston, D.L. and Logan, G.A., 2004, Barite, BIFs and bugs: evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 220, 41-55.
- Isley, A.E. and Abbott, D.H., 1999, Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 104, 15461-15477.
- Khalil, K.I., El-Shazly, A.E. and Lehmann, B., 2015, Late Neoproterozoic banded iron formation (BIF) in the central Eastern Desert of Egypt: Mineralogical and geochemical implications for the origin of the Gebel El Hadid iron ore deposit. *Ore Geology Reviews*, 69, 380-399.
- Klein, C., 2005, Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins. *American Mineralogist*, 90, 1473-1499.
- Lan, T.-G., Fan, H.-R., Santosh, M., Hu, F.-F., Yang, K.-F. and Liu, Y., 2014, U-Pb zircon chronology, geochemistry and isotopes of the Changyi banded iron formation in the eastern Shandong Province: Constraints on BIF genesis and implications for Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56, 472-486.
- Lewis, I.R. and Edwards, H., 2001, *Handbook of Raman spectroscopy: from the research laboratory to the process line*. CRC Press.
- Li, H., Zhai, M., Zhang, L., Yang, Z., Kapsiotis, A., Zhou, Y., He, J., Wang, C. and Liang, J., 2014a, Mineralogical and microfabric characteristics of magnetite in the Wuyang Precambrian BIFs, southern North China Craton: Implications for genesis and depositional processes of the associated BIFs. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94, 267-281.
- Li, H., Zhang, Z., Li, L., Zhang, Z., Chen, J. and Yao, T., 2014b, Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 57, 264-287.
- Massey, M., Baier, U., Merlin, R. and Weber, W., 1990, Effects of pressure and isotopic substitution on the Raman spectrum of α -Fe₂O₃: identification of two-magnon scattering. *Physical Review B*, 41, 7822.
- McLennan, S., 1989, Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21, 169-200.
- Moon, I., Lee, I. and Yang, X., 2017, Geochemical constraints on the genesis of the Algoma-type banded iron formation (BIF) in Yishui County, western Shandong Province, North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 89, 931-945.
- Murugappan, K., Silvester, D.S., Chaudhary, D. and Arrigan, D.W., 2014, Electrochemical Characterization of an Oleyl-coated Magnetite Nanoparticle-Modified Electrode. *ChemElectroChem*, 1, 1211-1218.
- Ohmoto, H., 2003, Nonredox transformations of magnetite-hematite in hydrothermal systems. *Economic Geology*, 98, 157-161.
- Posth, N.R., Köhler, I.D., Swanner, E., Schröder, C., Wellmann, E., Binder, B., Konhauser, K.O., Neumann, U., Berthold, C., Nowak, M. and Kappler, A., 2013, Simulating Precambrian banded iron formation diagenesis. *Chemical Geology*, 362, 66-73.
- RRUFF, 2018, <http://rruff.info/magnetite/display=default/> (March 2, 2018).
- Shebanova, O.N. and Lazor, P., 2003, Raman spectroscopic study of magnetite (FeFe₂O₄): a new assignment for the vibrational spectrum. *Journal of Solid State Chemistry*, 174, 424-430.
- Shen, B., Zhai, A. and Yang, C., 2010, Paleoproterozoic-an important metallogenic epoch in China. *Geological Survey and Research*, 33, 241-256.
- Shim, S.-H. and Duffy, T.S., 2002, Raman spectroscopy of Fe₂O₃ to 62 GPa. *American Mineralogist*, 87, 318-326.
- Sun, X.-H., Zhu, X.-Q., Tang, H.-S., Zhang, Q. and Luo, T.-Y., 2014a, The Gongchangling BIFs from the Anshan-Benxi area, NE China: Petrological-geochemical characteristics and genesis of high-grade iron ores. *Ore Geology Reviews*, 60, 112-125.
- Sun, X.-H., Zhu, X.-Q., Tang, H.-S., Zhang, Q., Luo, T.-Y. and Han, T., 2014b, Protolith reconstruction and geochemical study on the wall rocks of Anshan BIFs, Northeast China: Implications for the provenance and tectonic setting. *Journal of Geochemical Exploration*, 136, 65-75.
- Trendall, A., 2009, The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *Precambrian sedimentary environments: A modern approach to depositional systems*, 33, 33-66.
- Wan, Y., Geng, Y., Shen, Q. and Zhang, R., 2000, Khondalite series-geochronology and geochemistry of the Jiehekou

- Group in Luliang area. ACTA PETROLOGICA SINICA, 16, 49-58 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. and Zhang, L., 2016, A Genetic Link Between Paleoproterozoic Yuanjiacun BIF and the Great Oxidation Event in North China Craton. Main Tectonic Events and Metallogeny of the North China Craton. Springer, pp. 329-356.
- Wang, C., Zhang, L., Dai, Y. and Lan, C., 2015, Geochronological and geochemical constraints on the origin of clastic meta-sedimentary rocks associated with the Yuanjiacun BIF from the Lüliang Complex, North China. Lithos, 212, 231-246.
- Wang, C., Zhang, L., Lan, C. and Dai, Y., 2014, Rare earth element and yttrium compositions of the Paleoproterozoic Yuanjiacun BIF in the Lüliang area and their implications for the Great Oxidation Event (GOE). Science China Earth Sciences, 57, 2469-2485.
- RRUFF, 2018, <http://truff.info/magnetite/display=default/> (March 2, 2018).
- Wu, M., Zhao, G., Sun, M., Yin, C., Li, S. and Tam, P.Y., 2012, Petrology and P-T path of the Yishui mafic granulites: implications for tectonothermal evolution of the Western Shandong Complex in the Eastern Block of the North China Craton. Precambrian Research, 222, 312-324.
- Yang, X.-Q., Zhang, Z.-H., Duan, S.-G. and Zhao, X.-M., 2015, Petrological and geochemical features of the Jingtieshan banded iron formation (BIF): A unique type of BIF from the Northern Qilian Orogenic Belt, NW China. Journal of Asian Earth Sciences, 113, 1218-1234.
- Yu, J., Wang, D., Wang, C. and Li, H., 1997, Ages of the Luliang Group and its main metamorphism in the Luliang Mountains, Shanxi evidence from single grain zircon U9Pb ages. Geological Review, 43, 403-408 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. and Santosh, M., 2013, Metallogeny of the North China Craton: link with secular changes in the evolving Earth. Gondwana Research, 24, 275-297.
- Zhai, M. and Windley, B.F., 1990, The Archaean and early Proterozoic banded iron formations of North China: their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth. Precambrian Research, 48, 267-286.
- Zhai, M., Windley, B.F. and Sills, J.D., 1990, Archaean gneisses, amphibolites and banded iron-formations from the Anshan area of Liaoning Province, NE China: Their geochemistry, metamorphism and petrogenesis. Precambrian Research, 46, 195-216.
- Zhang, X., Zhang, L., Xiang, P., Wan, B. and Pirajno, F., 2011, Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: constraints on the ore-forming age and tectonic setting. Gondwana Research, 20, 137-148.
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S.A. and Sanzhong, L., 2005, Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. Precambrian Research, 136, 177-202.
- Zhao, G., Wilde, S.A., Cawood, P.A. and Sun, M., 2001, Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. Precambrian Research, 107, 45-73.
- Zhao, G., Wilde, S.A., Sun, M., Li, S., Li, X. and Zhang, J., 2008, SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 160, 213-226.
- Zhao, G. and Zhai, M., 2013, Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: review and tectonic implications. Gondwana Research, 23, 1207-1240.
- Zheng, Y.-F., Xiao, W.-J. and Zhao, G., 2013, Introduction to tectonics of China. Gondwana Research, 23, 1189-1206.
- Zhu, M., Dai, Y., Zhang, L., Wang, C. and Liu, L., 2015, Geochronology and geochemistry of the Nanfen iron deposit in the Anshan-Benxi area, North China Craton: Implications for ~2.55 Ga crustal growth and the genesis of high-grade iron ores. Precambrian Research, 260, 23-38.

Received : March 25, 2018

Revised : April 29, 2018

Accepted : May 2, 2018