

文章编号: 1000-0550(2010)04-0671-05

华北克拉通南部古元古界熊耳群中海绿石的发现 及其地质意义^①

徐勇航¹ 赵太平² 陈伟²

(1. 国家海洋局第三海洋研究所 海洋与海岸地质环境开放实验室 福建厦门 361005;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室 广州 510640)

摘要 海绿石是一种富钾、富铁的含水层状铝硅酸盐矿物,一般形成于慢速、弱还原、较深水的环境中,在沉积学领域常被作为指示海相的矿物。华北克拉通南部熊耳—中条拗拉谷中广泛发育的古元古界熊耳群,是华北克拉通结晶基底形成后规模最大、涉及范围最广的火山活动产物。该群以火山熔岩占绝对优势,沉积岩和火山碎屑岩主要分布在大古石组及马家河组,仅占地层总厚度的 4.3%。晋南垣曲地区的马家河组砂岩中发现原生的海绿石,为探讨熊耳群火山岩的形成环境提供依据。分析显示,熊耳群中的海绿石大部分 K_2O 含量大于 8%,具有高成熟度海绿石的特点。发育海绿石砂岩的古元古地层和岩相学特征,反映其形成于高能的浅海环境,明显不同于现代海绿石的形成环境。华北克拉通南部在熊耳群早期就开始有海侵事件,随着熊耳—中条拗拉谷的发育,海侵作用增强。马家河组中原生海绿石的存在直接地指示了晋南地区在熊耳群晚期为海相环境。

关键词 华北克拉通 熊耳群 海绿石 沉积环境

第一作者简介 徐勇航 男 1980 年出生 博士 助理研究员 地球化学

通讯作者 赵太平 男 1963 年出生 研究员 岩石学 E-mail: tpzhao@gig.ac.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

海绿石是一种富钾、富铁的含水层状铝硅酸盐矿物,以其特殊的暗绿色或墨绿色与围岩形成明显的反差。海绿石较为广泛地分布在海相沉积岩和现代沉积物之中,是一种典型的自生矿物^[1],一直以来认为其主要形成于一个慢速、弱还原、较深水的环境^[2,3],特别是氧化钾含量大于 7% 的海绿石矿物代表了具有地质意义的沉积间断^[1]。因此,海绿石特别是原生海绿石就成为指示较深水的海相沉积作用的标志之一^[4,5,6]。然而,最近 Chafetz and Reid 研究美国西南部寒武系—奥陶系中的原生海绿石,认为这些海绿石形成于非常浅的环境(小于 10 m),是一种高能、高沉降速率的环境^[7]。梅冥相等研究天津蓟县剖面中元古界铁岭组第二段灰岩中的原生海绿石,也认为其形成于高能浅海环境^[8]。这表明,在漫长的地质历史演变过程中海绿石产出的多样性特点。

1 海绿石的产出背景

古元古代末(1.85 ~ 1.70 Ga),华北克拉通以伸

展—裂解作用为主,在其南部发育的熊耳—中条拗拉谷^[9,10]中广泛发育了熊耳群火山岩(图 1A),是华北克拉通结晶基底形成后规模最大、涉及范围最广的火山活动产物。熊耳群(1.80 ~ 1.75 Ga^[11])自下而上分为四个组:大古石组、许山组、鸡蛋坪组和马家河组;岩性以火山岩熔岩为主,沉积岩仅占地层总厚度的 4.3%,且主要分布于底部的大古石组和上部的马家河组中,而许山组及鸡蛋坪组中仅在局部层段有少量出露^[12,13]。

前人对熊耳群火山岩做了较多的工作^[11,13~15],而对熊耳群沉积岩的研究工作较少。最近,徐勇航等对熊耳群底部的大古石组碎屑岩的研究,认为大古石组以陆相沉积(河流相和湖泊相)为主,但中后期伴有海侵作用^[16]。对熊耳群沉积夹层中的硅质岩研究也表明了,在古元古代末,华北克拉通南部遭受海水入侵,豫南有些地区已经处于海相环境,而晋南垣曲有些地区处于海陆交互环境^[17]。为了更充分认识熊耳群形成的古地理环境,笔者对熊耳群顶部沉积岩夹层较发育的马家河组进行了研究。

^①国家自然科学基金项目(批准号:40672058)和国家基础研究发展计划(973 项目)(编号:2006CB403502)联合资助。
收稿日期:2009-04-20; 收修稿日期:2009-09-11

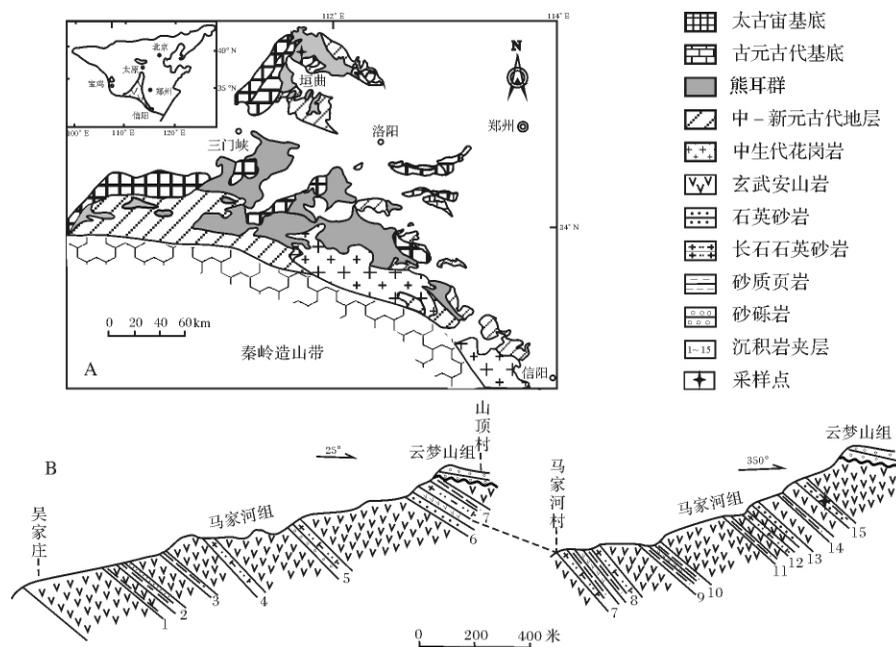


图1 熊耳群分布及马家河组剖面图

Fig. 1 The distribution of the Xiong'er Group and section of Majiahe Formation

马家河组的沉积岩夹层层数多,累积厚度最大,不同地区发育程度有差异。在山西垣曲县吴家庄—马家河村一带,沉积岩夹层数为15层,累积厚度可达318 m,占该组总厚度的16% (图1B)。沉积岩夹层由长石石英砂岩、砂质页岩夹黄绿色砂岩及薄层泥岩组成,并呈韵律性变化;砂岩中保留沉积构造有板状交错层理,部分层面发育龟裂纹^[12]。在马家河组顶部第15层的砂岩中发现有少量的海绿石矿物(图1B),并夹有一薄层铁质鲕状灰岩。本文将讨论马家河组中海绿石的层位及组分特征,为研究熊耳群形成的古地理环境提供依据。

2 海绿石的特征

熊耳群中的海绿石主要发育于马家河组最顶部灰色石英砂岩中。从图2中可以看出,砂岩中的石英分选差,磨圆度差,说明是快速堆积作用形成的。海绿石主要是团粒状和不规则状,分布于砂质颗粒间,在单偏光下颜色为黑绿色、浅绿色。而近于圆形或椭圆形的海绿石,边缘与其它颗粒有清晰的接触边界,它们是凝胶状海绿石物质通过絮凝作用沉淀形成的^[1]。海绿石可由黑云母海解作用蚀变转化而成^[18],由黑云母海解而成的海绿石,往往因海解不彻底而残留黑云母条带,并在海绿石矿物中呈现残余的云母解理。熊耳群部分海绿石中原黑云母解理较清晰,海绿石旁边连着丝带状黑云母条(图2B),证明为

原生海绿石。海绿石周围有黑色的黄铁矿晶体,可能代表了古元古代晚期浅海处于弱还原的特点。

海绿石质矿物是经历了早期的溶蚀作用和晚期的成岩作用的产物^[2,3]。钾含量是海绿石成熟度的指标^[3],由此可将海绿石分为:①贫钾的初生海绿石(K_2O 含量2%~4%);②低成熟海绿石(K_2O 含量小于4%~6%);③成熟的海绿石(K_2O 含量小于6%~8%);④高成熟的海绿石(K_2O 含量大于8%)。本文利用中国科学院广州地球化学研究所的JOEL JXA-8100型电子探针对熊耳群的海绿石进行化学成分分析,分析结果见表1。

熊耳群海绿石大部分 K_2O 含量大于8%,为高成熟海绿石,仅样品xy-105-3的 K_2O 含量较小(3.44%),为初生海绿石,但都明显高于现代海绿石的 K_2O 平均含量(3.28%)^[9]。 Al_2O_3 含量为13.08%~21.64%,明显高于13%,表明海绿石受到后期蚀变作用的影响^[20]。海绿石的 FeO_T 含量一般为6.04%~11.82%,个别如xy-105-3的含量很高(18.77%),但总体低于现代海绿石 FeO_T 含量均值(25%)。在早期成岩过程中,海绿石晶格中的铁为铝所置换,并从沉积物的间隙水中不断吸取钾,导致了海绿石随着成岩作用的进行,其 Al_2O_3 与 K_2O 的含量增加,而 FeO_T 的含量减少^[21]。Amorosi研究表明,初生到低成熟阶段的海绿石($K_2O < 6%$) FeO_T 含量与

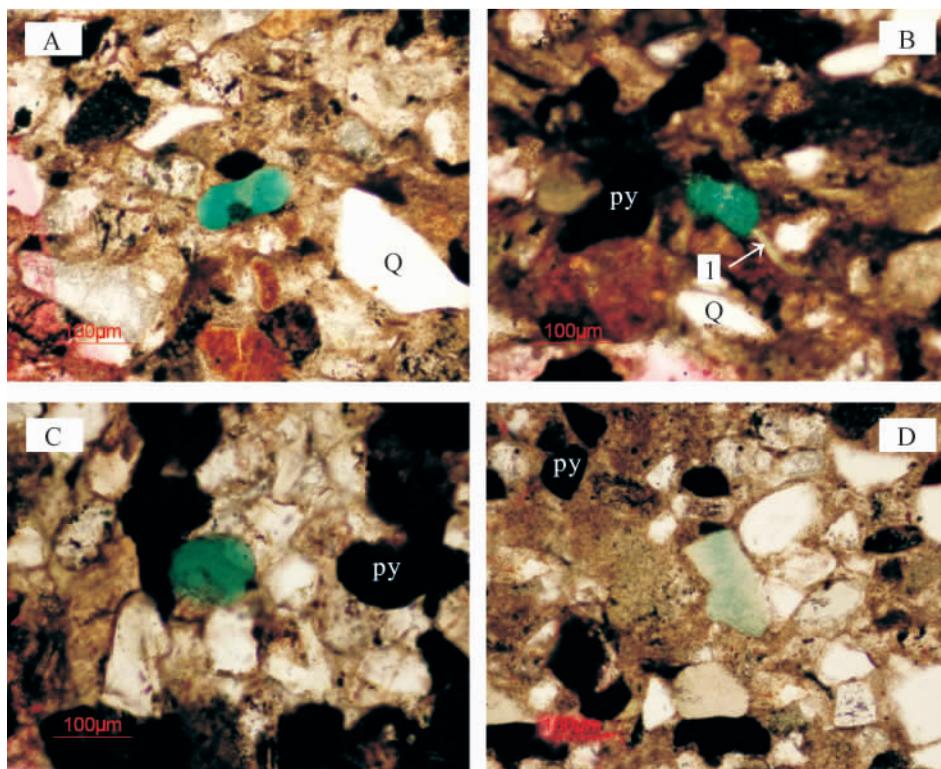


图2 熊耳群马家河组砂岩中的海绿石显微单偏光照片

照片中墨绿色和浅绿色的为海绿石, I 代表丝带状黑云母条; Q - 石英; py - 黄铁矿

Fig. 2 Plane-polarized light photomicrographs of glauconitic in sandstone from Majiahe Formation

表1 海绿石主要化学组成(%)

Table 1 Major composition of glauconite(%)

化学成分	xy-105-1	xy-105-2	xy-105-3	xy-105-4	xy-105-5	xy-106-1	xy-107-1	xy-107-2	现代 ^[21]	东海古近系 ^[22]
SiO ₂	55.13	56.39	47.76	55.56	55.97	54.87	55.88	55.86	44.20	50.96
TiO ₂	0.05	0.02	0.04	0.04	0.06	0.00	0.06	0.07	0.16	0.12
K ₂ O	8.72	9.02	3.44	9.14	9.71	7.81	9.27	9.04	3.28	8.09
FeO _T	9.18	6.04	18.77	9.23	10.45	8.39	11.82	10.08	25.07	15.10
Al ₂ O ₃	17.01	21.64	15.05	17.23	16.81	19.10	13.08	15.96	5.08	10.71
Na ₂ O	0.13	0.04	0.15	0.08	0.06	0.08	0.10	0.09	0.43	0.45
MnO	0.01	0.01	0.11	0.02	0.04	0.06	0.04	0.06	0.07	0.05
MgO	4.85	4.24	10.10	4.28	4.61	4.65	5.41	4.71	5.84	4.20
CaO	0.37	0.31	0.37	0.31	0.28	1.05	0.42	0.46	2.43	0.19

K₂O 有明显的正相关, 而到成熟阶段的海绿石 (K₂O > 6%) FeO_T 含量与 K₂O 含量呈负相关^[3]。熊耳群初生海绿石 (xy-105-3) FeO_T 含量很高 (18.77%), K₂O 含量低 (3.44%); 而高成熟的海绿石 FeO_T 含量相对较低 (6.04% ~ 11.82%), 而 K₂O 含量均大于 8%。类似于东海古近系成熟海绿石的特征 (表 1), 反映了不同阶段海绿石中元素的差异。

3 地质意义

现代的海绿石主要形成于陆架边缘和大陆斜坡

的上部, 水深为 50 ~ 500 m, 一般在 100 ~ 200 m 的环境, 是一个沉积缓慢的环境^[2, 3], 其成熟度越高则代表所经历的沉积间断越长。因此, 海绿石特别是原生海绿石就成为“慢速、弱还原、较深水环境”的指相矿物。在浅海沉积中常常被作为“凝缩段”及其相关沉积的识别标志之一^[4-6]。然而, 最近有些学者研究表明海绿石也可以形成于非常浅的环境 (小于 10 m), 代表了一种高能、高沉降速率的环境^[7, 8]。

华北克拉通南部古元古界熊耳群中的海绿石, 大部分 K₂O 含量大于 8%, 显示高成熟海绿石的特点。

部分海绿石中原黑云母解理较清晰(图2B、D),可见到海绿石旁边连着丝带状黑云母条(图2B),证明为原生海绿石。发育有海绿石层位的砂岩中的石英分选差,磨圆度差(图2),反映的是一种高能的、快速堆积的环境。该层中夹有一薄层铁质鲕状灰岩,以及砂岩中保留沉积构造有板状交错层理,部分层面发育龟裂纹^[12],也说明是一个很浅的环境。因此,熊耳群海绿石形成于高能浅海环境,而非较深水的、慢速堆积的环境。熊耳群海绿石与现代沉积中的海绿石存在较大的差异(表1),可能代表了古元古代末期的正常浅海还处于含氧量不够充分的弱还原状态,表明了漫长的地质历史演变过程中海绿石产出的多样性特点。

熊耳群角度不整合于太古宙和古元古代结晶基底之上,是华北克拉通结晶基底形成后规模最大、涉及范围最广的岩浆活动产物^[13]。熊耳群底部的大古石组中,华北克拉通南部就开始有海侵事件^[16]。随着熊耳-中条拗拉谷的发育,华北克拉通南部遭受了较强的海侵作用,豫南有些地区已经处于海相环境,但在晋南垣曲有些地区处于海陆交互环境,局部地区还处于陆相环境^[17]。到熊耳群晚期,华北克拉通南部的海侵作用更强烈,晋南垣曲地区已是海相环境,在马家河组顶部发育有形成于浅海相的海绿石。到中、新元古代时,华北陆块南部大部分被海水淹没,并在熊耳群之上形成一套典型被动大陆边缘的陆源碎屑岩、碳酸盐岩及冰碛岩建造(汝阳群和官道口群)^[23]。

参考文献(References)

- Ordin G S, Matter A. De glauconiarum origine [J]. *Sedimentology*, 1981, 28: 611-641
- Amorosi A. Glaucony and sequence stratigraphy: a conceptual framework of distribution in siliclastic sequences [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65: 419-425
- Amorosi A. Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 109: 135-153
- 葛铭, 孟祥化, 陈荣坤, 等. 海绿石质凝缩层及克拉通盆地层序地层划分对比的关键: 华北寒武系凝缩层的特征和意义 [J]. *沉积学报*, 1995, 13(4): 1-15 [Ge Ming, Meng Xianghua, Chen Rongkun, et al. Glauconitic condensed sections (CS): The key to correlation of sequence stratigraphy in the craton basin-characteristics and implication of the Cambrian condensed section of North China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(4): 1-15]
- Kitamura A. Glaucony and carbonate grains as indicators of the condensed section: Omma Formation, Japan [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 122: 151-163
- Roussel D, Leclerc S, Clauer N, et al. Age and origin of Albian glauconites and associated clay minerals inferred from a detailed geochemical analysis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74: 631-642
- Chafetz H S, Reid A. Syndepositional shallow-water precipitation of glauconitic minerals [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 136: 29-42
- 梅冥相, 杨锋杰, 高金汉, 等. 中元古代晚期浅海高能沉积环境中的海绿石: 以天津蓟县剖面铁岭组为例 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 146-158 [Mei Mingxiang, Yang Fengjie, Gao Jinhan, et al. Glauconites formed in the high-energy shallow-marine environment of the late Mesoproterozoic: a case study from Tieling Formation at Jixian section in Tianjin, North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 146-158]
- Lu S N, Yang C L, Li H K, et al. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2002, 5: 123-131
- Hou G T, Li J H, Liu Y L. The late Paleoproterozoic extension event: aulacogens and dyke swarms in the North China Craton [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(2): 201-208
- 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 191-206 [Zhao Taiping, Xu Yonghang, Zhai Mingguo. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the Southern part of the North China Craton: a review [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(2): 191-206]
- 赵太平, 原振雷, 关保德. 豫晋陕熊耳群沉积岩夹层特征与沉积环境 [J]. *河南地质*, 1998, 16(4): 261-272 [Zhao Taiping, Yuan Zhenlei, Guan Baode. The characteristics and sedimentary environment of sedimentary interbeds of Xiong'er Group distributed in the juncture of Henan-Shanxi-Shaanxi provinces [J]. *Henan Geology*, 1998, 16(4): 261-272]
- Zhao T P, Zhou M F, Zhai M G, et al. Palaeoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group in the North China Craton: Implications for the break-up of Columbia [J]. *International Geology Review*, 2002, 44: 336-351
- 孙枢, 张国伟, 陈志明. 华北断块南部前寒武纪地质演化 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985, 90-149 [Sun Su, Zhang Guowei, Chen Zhiming (ed). *Geological Evolution of the Precambrian Crust in the South North China Block* [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1985, 90-149]
- 陈衍景, 富士谷, 强立志. 熊耳群和西阳河群的构造背景 [J]. *地质论评*, 1992, 38: 325-333 [Chen Yanjin, Fu Shigu, Qiang Lizhi. The tectonic environment for the formation of the Xiong'er Group and the Xiyanghe Group [J]. *Geological Review*, 1992, 38(4): 325-333]
- 徐勇航, 赵太平, 张玉修, 等. 华北陆块南部古元古代熊耳群大古石组碎屑岩的地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2008, 54(3): 316-326 [Xu Yonghang, Zhao Taiping, Zhang Yuxiu, et al. Geochemical characteristics and geological significances of the Dagushi Formation siliclastic rocks, the Paleoproterozoic Xiong'er Group from the Southern North China Craton [J]. *Geological Review*, 2008, 54

- (3): 316-326]
- 17 徐勇航, 赵太平, 胡俊良, 等. 华北陆块南部古元古代熊耳群硅质岩地球化学特征及其沉积环境 [J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 602-609 [Xu Yonghang, Zhao Taiping, Hu Juliang, *et al.* Geochemical characteristics and sedimentary environments of cherts from the Palaeoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China block [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 602-609]
- 18 凌小惠. 贵州二叠纪地层中海绿石矿物的发现及其地质意义 [J]. 矿物岩石, 1985, 3(5): 96-107 [Ling Xiaohui. The discovery and its geological significance of the glauconite in Permian strata in Guizhou Province [J]. *Minerals and Rocks*, 1985, 3(5): 96-107]
- 19 陈丽蓉, 时英民, 申顺喜, 等. 闽南-台湾浅滩大陆架海绿石的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1982, 13(1): 35-47 [Chen Lirong, Shi Yingming, Shen Shunxi, *et al.* Glauconite in the sediments off the southern Fujian Province coast to the continental shelf of Taiwan province [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1982, 13(1): 35-47]
- 20 Ireland B J, Curtis C D, Whiteman J A. Compositional variation with-
in some glauconites and illites and implication for their stability and origins [J]. *Sedimentology*, 1983, 30: 769-786
- 21 Chen L R. Evolution of authigenic glauconite in early diagenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(18): 1550-1553
- 22 武法东, 陆永潮, 陈平, 等. 东海西湖凹陷渐新统花港组海绿石的发现及其意义 [J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 158-161 [Wu Fandong, Lu Yongchao, Chen Ping, *et al.* The discovery and significance of glauconitic in the Huagong Formation of the Oligocene, Xihu depression, East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3): 158-161]
- 23 周洪瑞, 王自强. 华北大陆南缘中-新元古代大陆边缘性质及构造古地理演化 [J]. 现代地质, 1999, 13(3): 261-267 [Zhou Hongrui, Wang Ziqiang. Feature and tectono-paleogeography evolution of the southern margin of the North China continent in Mesoproterozoic and Neoproterozoic era [J]. *Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geoscience*, 1999, 13(3): 261-267]

The Discovery and Geological Significance of Glauconites from the Palaeoproterozoic Xiong'er Group in the Southern Part of the North China Craton

XU Yong-hang¹ ZHAO Tai-ping² CHEN Wei²

(1. Open Laboratory of Ocean & Coast Environmental Geology, Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Xiamen, Fujian 361005; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

Abstract Glauconite is a kind of hydrous layered aluminium silicate mineral, which is commonly referred to as a marine facies indicative mineral. Numerous studies have demonstrated that glauconites minerals usually form in modern oceans with high depths and slowly sedimentary rates. The Palaeoproterozoic Xiong'er Group, widely occurring in the Xiong'er-Zhongtiao aulacogen in the southern margin of the North China craton, represents the most intensive magmatism after the formation of the crystalline basement of the North China craton. The Xiong'er Group is occupied by volcanic lavas as well as minor sedimentary rocks and volcanic clastic rocks (4.3% in thickness). The sedimentary rocks occur as interbeds in the Dagushi and Majiahe Formations of the Xiong'er Group. Glauconites were discovered in the sandstone from the Majiahe Formation, which gives us a opportunity to elucidate the formation environment of the Xiong'er Group. Sedimentological and petrographic studies indicate that the glauconites have high content of K₂O (> 8%), showing that these glauconites belong to the high-evolved glauconites. The characteristics of glauconites from the Majiahe Formation reflect that they formed in a high-energy shallow sedimentary environment, not in a environment with a slowly sedimentary rate. Shortly after the extension of the Xiong'er-Zhongtiao aulacogen, transgression was northward in the Palaeoproterozoic era. At the early stage of the Xiong'er Group, the southern part of Henan province was in a marine environment, whereas the northern part is still in a continental environment. At the later stage, the southern area of Shanxi province was in the marine environment, as indicated by the discoveries of glauconites in the Majiahe Formation.

Key words North China Craton; Xiong'er Group; glauconite; sedimentary environment