蓟县中、新元古界的成岩作用

——源于矿物学的数据

王河锦^{1,2)},陈梦瑶¹⁾,安佳丽¹⁾,王冠玉¹⁾,晏玉¹⁾

1) 北京大学地球与空间科学学院,北京,100871; 2) 教育部造山带与地壳演化重点实验室,北京,100871

内容提要:本文运用系列黏土矿物学和碳酸盐结构占位的方法研究了蓟县中、新元古界剖面出露的碎屑岩和 碳酸盐岩。这些方法包括了伊利石结晶度、绿泥石结晶度、黏土矿物组合、粒度分布、多型、有序度、Mg/Ca离子占 位以及地质温压计。结果表明:伊利石结晶度 Kübler 指数范围为 0.37°~1.37°Δ2θ,绿泥石结晶度 Árkai 指数范围 为 0.31°~2.40°Δ2θ,以及 1Ma 的多型,一致指示本区处于晚期成岩作用影响范围,仅非常有限局部达到了初始变 质的状态;黏土矿物组合主要是伊利石、伊蒙混层、绿蒙混层和高岭石;粒度分布范围为 8~24 nm,其上界(23~24 nm)达到了 NEWMOD 计算的理论成岩带/近变质带界限,与结晶度数据一致,也表明了本区处于晚期成岩阶段。 白云石有序度的数据表明,本区碳酸盐岩白云石的有序度值范围为 0.19~0.99,可分为 4 个带:甚低级有序带、低 级有序带、中级有序带、高级有序带。与川东石炭-二叠系碳酸盐岩相比,中低级有序带有一定的油气前景。本区 由西向东,由甚低级有序带变化到高级有序带,白云石有序度升高。估计的成岩作用温度为 183~200±20℃,压力 为 330 MPa,古地热梯度为 17~21℃/km。

关键词:蓟县;前寒武系;成岩作用演化;黏土矿物组合;结晶度;有序度;地质温压计

蓟县中、新元古界剖面是我国北方中、新元古界 的标准剖面,我国学者从 20 世纪 30 年代起就开始 了对其的研究(Kao et al., 1934),迄今为止已取得 了大量的成果。除了建立了中、新元古界的地层层 序,划分出系、组外,在生物地层学(Cao Ruiji et al., 1981; Xing Yusheng, 1989)、区域地层学 (Wang Yuelun, 1980; Chen Jinbiao, 1983)、层序 地层学(Gao Linzhi et al., 1996; Mei Mingxiang et al., 2000)和同位素年代地层学(Lu Songnian et al., 1991; Gao Linzhi et al., 2009; Li Huaikun et al., 2014; Guo Wenlin et al., 2019)领域获得了重 要成果,还在沉积学(Zhao Zhen, 1982, 1988; Song Tianrui et al., 1991; Ren Chuanzhen et al., 2019)、地球化学(Li Chao et al., 2002)、古地磁学 (Wu Huaichun et al., 2005)、岩石学(Liu Bo et al., 2004; Xie Guwei et al., 2005; Mei Mingxiang et al., 2009; Wang Dehai et al., 2009; Zhong Yan et al., 2011; Yang Yunxiang et al., 2011; Liu Hejuan et al., 2013; Zhao Yue et al., 2019)和矿 物学(Li Mingrong et al., 1996; Wu Huaichun et al., 2005; Meng Xiaoqing, 2006; Chen Tao et al., 2007a, 2007b, 2008; Mei Mingxiang et al., 2008; Zhou Xiqiang et al., 2009; Zhu Xiangkun et al., 2013; Mei Chaojia, 2018)等领域取得了一系 列成果。

然而,对蓟县中、新元古界岩石的成岩作用强度 及成岩演化阶段的划分不甚清楚,没有系统的数据 与资料。Liu Bo et al. (2004)研究了岩石结构与沉 积环境,火山物质对沉积作用的影响;Xie Guwei et al. (2005)讨论了洪水庄组顶部铁质风化壳的假整 合关系;Mei Mingxiang et al. (2009)讨论了串岭沟 组粉砂岩墙与微生物席相关系;Wang Dehai et al. (2009)讨论了高于庄组亮晶灰岩、原生微亮晶构造 的发育环境;Zhong Yan et al. (2011)质疑常沟村组 底部砂岩为海侵"河流相";Yang Yunxiang et al. (2011)讨论了高于庄组沉积岩系与沉积环境地质意

作者简介:王河锦,男,1958年生。教授,博士生导师,主要从事黏土矿物和成岩-变质演化研究。E-mail:hjwang@pku.edu.en。

 引用本文:王河锦,陈梦瑶,安佳丽,王冠玉,晏玉. 2021. 蓟县中、新元古界的成岩作用——源于矿物学的数据. 地质学报,95(5):1469 ~1480, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021033.
 Wang Hejing, Chen Mengyao, An Jiali, Wang Guanyu, Yan Yu. 2021. Diagenesis of the Meso-Neoproterozoic in Jixian section, Tianjin, China——data from mineralogy. Acta Geologica Sinica, 95(5):1469~1480.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41872048)资助的成果。

收稿日期:2020-05-11;改回日期:2020-09-27;网络发表日期:2020-11-27;责任编辑:黄敏。

义;Liu Hejuan et al. (2013)对砂脉构造和臼齿构造 与环境成因关系进行了讨论;Zhao Yue et al. (2019)讨论了燧石条带形成的原因。

本文运用伊利石结晶度及绿泥石结晶度、层状 硅酸盐多型、绿泥石地质温度计、白云石有序度等成 岩阶段指标参数分析研究了蓟县剖面中、新元古界 碎屑岩和碳酸盐岩的成岩演化特征,为该剖面提供 了成岩作用新的资料。

1 地质背景与样品采集

蓟县剖面位于华北地台燕辽区。一般认为经 "吕梁运动"华北克拉通形成结晶基底,其后发育稳 定的沉积盖层,在沉积-火山作用下形成系列沉积-火山建造。而蓟县剖面的火山岩不甚发育,保留了 近 1800 Ma 年以来形成的碎屑-碳酸盐岩沉积记录。 根据同位素年代学资料,其中缺失 1200~1000 Ma 年沉积记录(Qiao Xiufu et al., 2007; Gao Linzhi et al.,2007)。蓟县剖面中长城纪地层厚度近 3000 m (The Bureau of Geology and Mineral Resources of Tianjin City,1992),由下而上包括常州沟组、串岭 沟组、团山子组和大红峪组。常州沟组岩性主要为 石英砂岩、长石石英砂岩和岩屑石英砂岩及少量薄 层粉砂岩,底部为砾岩;串岭沟组岩性主要为页岩、 粉砂质页岩及白云质细砂岩;团山子组岩性主要为 白云岩、泥晶白云岩及少量粉砂岩及页岩,在其上部 层位局部夹少量火山岩夹层;大红峪组岩性主要由 富钾粗面岩、富钾玄武岩、角砾状白云岩、石英砂岩 及长石石英砂岩等组成。蓟县纪地层厚度大于 6100 m (The Bureau of Geology and Mineral Resources of Tianjin City, 1992), 由下而上包括高 于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组。高 于庄组岩性主要为:白云岩、白云质灰岩,底部为石 英砂岩、含叠层石。杨庄组岩性主要为:红色和灰白 色白云岩,底部为砾岩和含砾砂岩。雾迷山组岩性 主要为:白云岩、白云质灰岩、粉砂质白云岩、叠层石 白云岩和燧石白云岩。洪水庄组岩性主要为:页岩, 夹白云岩、粉砂岩,页岩中含铁质结核。铁岭组岩性 主要为石英砂岩、海绿石粉砂岩、页岩、灰岩、叠层石 灰岩、白云岩。青白口纪地层厚度近 400 m (The Bureau of Geology and Mineral Resources of Tianjin City, 1992), 由下而上包括下马岭组和景儿 峪组。下马岭组岩性主要为:粉砂质页岩、粉砂岩和 细砂岩。景儿峪组岩性主要为砂岩、页岩、砾岩及海 绿石砂岩和泥质、白云质灰岩。

为了研究原生矿物随沉积-成岩的演化,主要对 富含黏土矿物的岩石样品进行采集,同时由于本区 存在大量的白云岩,也对白云岩样品进行了采集。 选择出露条件好的页岩、泥岩、泥灰岩、粉砂质页岩 和富泥质的夹层采集新鲜的岩石标本以及白云岩样 品,共 73 件。蓟县地质图、采样位置和伊利石结晶 度分带见图 1。

2 实验方法与条件

对采集的72个富含黏土质的岩石样品(泥岩、 页岩、泥灰岩等)及白云岩样品先破碎,用锤碎至 0.5~1 cm 直径大小,用 DF-4 锤式碎样机碎样约< 30 s。采用 Stoke 沉积法富集 < 2 μm 颗粒,并用 LXJ-64-1 离心机去除悬浮液中的液体。沉淀法备 制定向黏土片,密度>3 mg/cm²,室温条件下自然 干燥,并在60℃条件下进行乙二醇膨胀实验,根据 样品所含黏土矿物情况进行 375℃和 550℃的加热。 加热所用马弗炉温度误差±2℃。实验仪器为高精 度数字化衍射仪 X'Pert Pro MPD,测量条件为:电 压 40 kV, 电流 40 mA, Cu 靶, 1/2°发射狭缝, 5.5 mm 接收狭缝,0.04°Soller 狭逢,扫描步长为 0.017° 2θ,扫描时间 20 s,X'Celerator 探测器。用于矿物 物相和多型鉴定的扫描范围为 4~60°20,用于绿泥 石地质温度计的测试范围为 $4 \sim 70^{\circ} 2\theta$, 定向片伊利 石结晶度和绿泥石结晶度测试范围 4~36°20。伊利 石粒度大小由 MudMaster 软件(Eberl et al., 1996) 按照 NEWMOD 模式计算。白云石有序度的测试 以(015)和(110)衍射峰面积比值确定(Goldsmith et al., 1958)。白云石 CaCO₃ 摩尔分数由(104)面 网间距按照 Deffeyes et al. (1965)公式计算得出。

3 结果

岩石的主要矿物为石英、伊利石、高岭石、蒙脱 石、伊蒙混层、海绿石、白云石以及绿泥石、绿蒙混 层、长石、方解石、赤铁矿、重晶石等。<2 μm 粒级 矿物组合主要为伊利石、伊利石与伊蒙混层、伊利石 与高岭石的组合,伊利石与绿泥石的组合很少(见图 2)。样品的地层、岩性、矿物组合、伊利石结晶度、绿 泥石结晶度、结构多型、粒度分布参数、白云石有序 度、CaCO₃ 含量、估计的温度及采样位置信息见表 1。

4 讨论

4.1 黏土矿物组合

以上结果表明,黏土矿物的组合(<2 µm 粒级





Fig. 1 Geological map of Jixian (after Chen Jinbiao et al. , 1980; Ma Lifang, 2002), sample location and distribution of illite crystallinity Kübler index

Q一第四系; ∈ f一寒武系府君山组; Pt₃¹j 一新元古界青白口系景儿 峪组; 中元古界: Pt₂²x 一待建系下马岭组; Pt₂²t 一蓟县系铁岭组; Pt₂²h 一蓟县系洪水庄组; Pt₂²w 一蓟县系雾迷山组; Pt₂²y 一蓟县系杨 庄组; Pt₂²g 一蓟县系高于庄组; Pt₂¹d 一长城系大红峪组; Pt₂¹t 一长城 系团山子组; Pt₂¹ch 一长城系串岭沟组; Pt₂¹c 一长城系常州村组; Ar 一太古字; γ_{n}^{1} 一印支期斑状二长花岗岩

Q—Quaternary; $\in f$ —Fujunshan Formation of Cambrian System; of Pt¹₃*j*—Jingeryu Formation Qingbaikou System of Neoproterozoic; Mesoproterozoic: Pt²₂x-Xiamaling Formation; Pt²₂t-Tieling Formation of Jixian System; Pt²₂h-Hongshuizhuang Formation of Jixian System; Pt²₂w—Wumishan Formation of Jixian System; Pt²₂y—Yangzhuang Formation of Jixian System; Pt²₂g— Gaoyuzhuang Formation of Jixian System; Pt¹₂d—Dahongyu Formation of Changcheng System; Pt2t-Tuanshanzi Formation of Changcheng System; Pt¹₂ch-Chuanlinggou Formation of Changcheng System; Pt¹₂c-Changzhoucun Formation of Changcheng System; Ar-Archaic; $\gamma \eta_5^1$ —Indo-Sinian porphyritic monzonite granite

矿物组合)主要为伊利石、伊利石+伊蒙混层、伊利 石+伊蒙混层+绿蒙混层、伊利石+伊蒙混层+高



图 2 蓟县中、新元古界伊蒙混层 I/S 和绿蒙混层 C/S 的 自然干燥(AD)、乙二醇膨胀(EG)和加热(H375:375℃, H550:550℃)样品的 X 射线衍射图

 $\label{eq:Fig.2} Fig. 2 \quad X\mbox{-ray diffraction patterns of illite/smectite (I/S)} and chlorite/smectite (C/S) mixed-layer phases in air-dried$

(AD), ethylene glycolated (EG), and heated at $375^{\circ}C$ (H375), 550 $^{\circ}C$ (H550) of Meso-Neoproterozoic

samples in Jixian

(a) 一根据混层面网 d 值, HW-296 号样品中含有伊蒙混层 I/S,其中 I 在 I/S 中占 83%,其 Reichweite 混层类型 R>1;(b) 一样品 JX-7 中含有伊蒙混层 I/S 和绿蒙混层 C/S。其中,绿蒙混层中 C 在 C/S 中含量占 53%,其 Reichweite 混层类型为无序类型 R=0,而伊蒙混 层中 I 在 I/S 中占 82%,其 Reichweite 混层类型 R>1(Moore et al., 1997); I一伊利石;S一蒙脱石;Ch一绿泥石

(a)—XRD pattern of sample HW-296, derived from $d_{I(001)/S(002)}$ the I content in I/S is 83% and its Reichweite mixed-layer type R>1; (b)—XRD pattern of sample JX-7, derived from $d_{Ch(002)/S(002)}$ the C content in C/S is 53% and its Reichweite mixed-layer type R=0, and derived from $d_{I(001)/S(002)}$ the I content in I/S is 82% and its Reichweite mixed-layer type R>1 (Moore et al., 1997); I—illite; S—smectite; Ch—chlorite

岭石的组合,伊利石与绿泥石的组合很少。这些组合反映了成岩阶段的特征和温带沉积环境条件 (Chen Tao et al.,2005)。

4.2 伊利石结晶度与绿泥石结晶度

伊利石结晶度是反映由成岩作用到变质作用演

Tahla 1	表 1 蓟 tratum	县中新元古界 lithology mir	早地层、岩性、矿物 seral assemblance	组合、伊利石结 illite_crustallin	吉晶度(KI itv Kübler)、绿泥石 · indev ([结晶度(KI) かり	ÁI)、多型 orite crys	型、粒度、 fallinitv	公布参 Árkei i	数、有序 mdev (í)	度、碳酸钙含	i量、形成温/ mean dom·	度及样品位置资 sin size size na	f 料 rsmeter (∞)
frequency [parameter	r (β^2), dolom	nite ordering degre	(δ) index (δ) , m	ole% of (CaCO ₃ , f	ormation	tempera	ture and	localiti	es of Me	so-Neoproter	ozoic sample	an size, size pa s in Jixian, Tia	njin, China
样号	地层	者性	非黏土矿物	黏土矿物	KI (°Δ2 <i>θ</i>)	ÁΙ (°Δ2θ)	多型	粒度 (nm)	粒度分: a	有参数	白云石有 序度 ô	CaCO3 含量 (mole%)	形成温度 (°C)	东经	北纬
HW-292	Ar									2				117°30.900′	40°13.083'
HW-293	$\operatorname{Pt}_2^1 c$	富泥质砂岩	ø	1, 1/S	0.479		$1\mathrm{M}$	24	3.07	0.20				$117^{\circ}30.683'$	40°13.033'
HW-294	$\operatorname{Pt}_2^1 c$	富泥质砂岩	Q, Fds, Hem?	1,1/S,C/S?	0.435		$1\mathrm{M}$	23	3.03	0.22				$117^{\circ}30.000'$	40°12.133'
HW-295	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	砂质页岩	ø	1, C/S, 1/S, Ch	0.778	1.890		17	2.73	0.28				$117^{\circ}29.833'$	40°11.950'
HW-296	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	Q	1,1/S	1.201			14	2.50	0.31				$117^{\circ}29.133'$	$40^{\circ}11.033'$
HW-297	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	Ø	1, 1/S	1.023			14	2.54	0.30				$117^{\circ}28.800'$	40°10.750'
HW-298	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	砂质页岩	Q,Cc,Pl	1,1/S	0.606			13	2.46	0.37			_	117°28. 617'	$40^{\circ}10.683'$
HW-299	$\operatorname{Pt}_2^1 d$	页岩	Q, Fds, Hem	I	0.418			16	2.64	0.33			_	$117^{\circ}27.683'$	$40^{\circ}10.183'$
HW-300	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	砂质白云岩	Q, Do, Fds, Hem								0.56	51.8		117°25. 317'	40°11.383'
HW-301	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	视质白云岩	$\mathrm{Q},\mathrm{Fds},\mathrm{Do}$	1, C/S, 1/S	0.734			13	2.40	0.42	0.56	51.5		117°25. 133′	$40^{\circ}11.183'$
HW-302	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	页岩	$\mathrm{Q},\mathrm{Fds},\mathrm{Do}$	1, C/S, 1/S	0.687			11	2.23	0.54	0.73	50.6	100	$117^{\circ}25.000'$	$40^{\circ}10.917'$
HW-303	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	砂质页岩	Q, D_0	I, Talc, I/S	0.896			10	2.05	0.60	0.64	51.5	$180 \sim 200$	$117^{\circ}24.650'$	$40^{\circ}10.400'$
HW-304	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	砂质页岩	Q,Do	I, I/S, Talc, C/S	1.366			15	2.53	0.33	0.69	52.0		$117^{\circ}24.417'$	40°9.567'
HW-305	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	视质白云岩	$\mathrm{Q},\mathrm{Do},\mathrm{Bar}$	1,1/S,C/S	1.298			13	2.38	0.38	0.56	52.2		$117^{\circ}24.650'$	40°7.750'
HW-306	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	硅质白云岩	Q,Do											$117^{\circ}24.417'$	40°7.350'
HW-307	$\operatorname{Pt}_2^2 w$	砂质白云岩	Q, Do, Cc, Pl								0.70	52.1	180 - 200	117°23. 867′	40°6.817'
HW-308	${ m Pt}_2^2 h$	页岩	\mathbf{Q}, Fds	1,1/S	0.814			15	2.59	0.30				117°23. 383′	40°6.700'
HW-309	${ m Pt}_2^2 h$	砂质页岩	$\mathrm{Q},\mathrm{Fds},\mathrm{Do}$	Ι	0.532			11	2.22	0.52	0.31	85.7		$117^{\circ}22.791'$	40°6.700'
HW-310	${ m Pt}_2^2 h$	砂质页岩	${\rm Q,Fds,Ank}$	1,1/S										117°23. 133′	$40^{\circ}6.217'$
HW-311	$\mathrm{Pt}_2^2 h$	页岩	Q,Cc,Ank	1,1/S				6	1.93	0.71	0.19	57.7		117°23. 550′	40°5.350'
HW-312	$\operatorname{Pt}_2^2 t$	祝灰岩	Cc, Q, Ank	Ch,I				10	2.15	0.50				117°23. 833′	40°5.217'
HW-313	$\operatorname{Pt}_2^2 t$	页岩	\mathbf{Q}, Fds	1,1/S,C/S	0.785			15	2.54	0.34				117°23. 717′	40°5.000'
HW-314	$\mathrm{Pt}_2^2 t$	页岩	\mathbf{Q}, Fds	Kao, 1, 1/S	0.839			17	2.67	0.29				$117^{\circ}24.117'$	40°4.567'
HW-315	$\operatorname{Pt}_2^2 t$	祝灰岩	Cc,Q	I				11	2.26	0.46				117°23. 543'	$40^{\circ}4.011'$
HW-316	$\operatorname{Pt}_2^2 t$	页岩	\mathbf{Q}, Fds	I, I/S, Kao	0.987			15	2.57	0.31				117°23. 529′	$40^{\circ}3.990'$
HW-317	$\mathrm{Pt}_2^2 t$	砂质泥岩	\mathbf{Q}, Fds	I/S, Kao	1.097			12	2.34	0.35				$117^{\circ}23.472'$	40°3.973'
HW-318	$\mathrm{Pt}_2^2 h$	砂质泥岩	$Q, \mathrm{Fds}, \mathrm{Pl}, \mathrm{Cc}, \mathrm{Do}$	I,I/S,Kao	1.022			13	2.43	0.30		57.0		$117^{\circ}23.472'$	40°3.973'
HW-319	$\operatorname{Pt}_2^2 h$	砂质泥岩	Q, Fds, Pl	I,I/S,Kao	0.933			15	2.54	0.32				117°23. 366′	40°3.903'
HW-383	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	Q.Pl.	1,1/S	0.503		$1\mathrm{M}$							$117^{\circ}31.063'$	$40^{\circ}10.717'$
JX-1	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	Q	1,1/S	0.915		$1 \mathrm{M}_{\mathrm{d}}$	17	2.73	0.23				117°28. 702′	40°10.789′
JX^{-2}	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	砂岩	Q											117°30.048′	$40^{\circ}11.941'$
JX-3	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	Q	1,1/S	0.836			18	2.78	0.26				117°29.687′	$40^{\circ}11.726'$
JX-4	$\mathrm{Pt}_2^2 h$	页岩	$\mathrm{Q},\mathrm{Do},\mathrm{Cc},\mathrm{Fds}$	1,1/S	0.725			15	2.53	0.35				117°23. 380′	40°6.703'
JX-5	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	Q	1,1/S	0.905		$1 \mathrm{M}_{\mathrm{d}}$	17	2.71	0.28				117°28. 700′	40°10.787'
J X-6	$\operatorname{Pt}_2^1 ch$	页岩	ø	1,1/S	0.915		$1 \mathrm{M}_{\mathrm{d}}$	16	2.68	0.25				117°28. 703′	$40^{\circ}10.790'$
JX^{-7}	$\operatorname{Pt}^1_2 ch$	页岩	Q	1,1/S,C/S	0.641	2.400		19	2.78	0.28				117°28. 865′	$40^{\circ}10.881'$

续表 1	北纬	40°10.884'	$40^{\circ}11.051'$	$40^{\circ}11.175'$	$40^{\circ}11.404'$	$40^{\circ}11.548'$	40°11.567′	40°11.628′	$40^{\circ}11.650'$	40°11.753′	$40^{\circ}11.863'$	$40^{\circ}10.486'$	40°10.705'	40°10.829′	40°10.956'	$40^{\circ}11.008'$	40°11.075'	$40^{\circ}10.117'$	$40^{\circ}9.331'$	$40^{\circ}8.802'$	40°8. 299'	40°6.507'	40°5.105'	$40^{\circ}3.982'$	$40^{\circ}3.191'$	40°3. 368'	40°4.453'	$40^{\circ}5.163'$	$40^{\circ}5.621'$	$40^{\circ}6.114'$	$40^{\circ}6.299'$	$40^{\circ}7.016'$	40°8. 258'	$40^{\circ}8.031'$	$40^{\circ}7.383'$	40°7.064'	$40^{\circ}6.492'$	40°4.864'
	东经	117°28.867'	117°29.153'	117°29. 264′	117°29.453'	117°29.400′	$117^{\circ}29.421'$	117°29.438'	117°29.456'	117°29.673′	117°30.045′	117°31. 309′	117°31.491'	117°31. 338′	117°31.440'	117°31.452′	117°31.534'	117°30.350'	117°29.727'	117°29.423'	117°29.485′	117°29.681′	117°29.487'	117°27.763′	$117^{\circ}21.640'$	$117^{\circ}22.104'$	$117^{\circ}26.690'$	117°27.051'	117°27.057′	$117^{\circ}26.526'$	$117^{\circ}26.371'$	117°25.067′	117°24.941'	$117^{\circ}25.610'$	$117^{\circ}26.951'$	117°28. 056′	117°29.693′	117°29.276′
	形成温度													·		183																						
	CaCO ₃ 含量	(mole 20)																		53.1	50.9		51.7	53.4	51.7			51.8	51.6	51.8	51.8	50.9	52.1	52.0	52.1	51.7	53.7	51.3
	自云石有 宮座 2	げ及り																		0.65	0.97		0.65	0.91	0.64			0.75	0.91	0.74	0.54	0.77	0.58	0.58	0.58	0.80		0.99
	·布参数 22	β ⁻ 0.25	0.30	0.24	0.28	0.44	0.48	0.24	0.25	0.33	0.26	0.24	0.25	0.27	0.27	0.23	0.22	0.54	0.48	0.73		0.75			0.52		0.35		0.60		0.65		0.62	0.66	0.62	0.43	0.70	
	粒度分	α 2.82	2.63	2.74	2.72	2.30	2.26	2.73	2.82	2.65	2.78	2.81	2.84	2.66	2.75	2.84	2.87	2.18	2.29	1.81		1.99			2.24		2.46		2.11		2.06		2.09	2.01	2.05	2.37	2.02	
	粒度 ("")	19	16	17	17	12	11	17	19	17	18	19	19	16	18	19	20	11	12	~		10			12		13		10		10		10	10	10	13	10	
	多型											$1 \mathrm{M}_{\mathrm{d}}$				-	-								-			_	-			-	-			-		
	ÁI (° ^ ? A)	2.111	0.694	1.700			0.542						0.390		0.458	0.576						0.830			0.312											0.408	0.742	
	KI ÁI $(\circ^{2} \wedge 2B)$ $(\circ^{2} \wedge 2B)$	0.691 2.111	0.922 0.694	0. 820 1. 700	0.837	0.710	0.471 0.542	0.901	0.755	0.700	0.701	0.823	0.739 0.390	0.914	0. 797 0. 458	0.760 0.576	0.771	0.368	0.569	0.803		0. 549 0. 830			0.520 0.312		0.818		0.524		0.507		0.682	0.516	0.824	1.134 0.408	0.428 0.742	
	新土矿物 KI ÁI 新土矿物 (° ^{3,2,9}) (° ^{3,2,9})	I, I/S, C/S 0. 691 2. 111	I,I/S,C/S 0. 922 0. 694	I, I/S, C/S 0.820 1.700	I, I/S 0. 837	I, I/S, C/S 0. 710	I, Ch, C/S, I/S 0. 471 0. 542	I, I/S, C/S 0. 901	I, I/S, C/S 0. 755	I, I/S, C/S 0. 700	I,I/S,C/S 0. 701	I,I/S 0.823	I, I/S, Ch 0. 739 0. 390	I, I/S, Ch, C/S 0. 914	I, I/S, Ch 0. 797 0. 458	I, I/S, Ch, C/S 0. 760 0. 576	I,I/S,Kao 0.771	I 0.368	I,Ch 0.569	I/S, I, C/S 0. 803		I/S, I, C/S 0. 549 0. 830			I/S,I,Ch,Talc 0.520 0.312	Talc	I, I/S, Ch 0. 818		I,Ch 0.524		I, I/S, Ch, S 0. 507		I, I/S, C/S 0. 682	I,I/S,S? 0.516	I , I /S,S? 0.824	I, I/S, Ch 1. 134 0. 408	I, I/S, C/S 0. 428 0. 742	
	非黏土矿物 黏土矿物 K1 Á1 ***********************************	Q I,I/S,C/S 0.691 2.111	Q I.1/S,C/S 0.922 0.694	Q.Pl I.I/S.C/S 0.820 1.700	Q,Pl I,1/S 0.837	Q,Pl I,I/S,C/S 0.710	Q,Pl I,Ch,C/S,I/S 0.471 0.542	Q,Pl I,I/S,C/S 0.901	Q.Pl I.I/S.C/S 0.755	Q,Pl I,I/S,C/S 0.700	Q,Pl I,I/S,C/S 0.701	Q,Pl I,I/S 0.823	Q,Pl I,I/S,Ch 0.739 0.390	Q,Pl I,I/S,Ch,C/S 0.914	Q,Do,Pl I,I/S,Ch 0.797 0.458	Q,Pl,Do [1,1/S,Ch,C/S] 0.760 0.576	Q,Pl I,I/S,Kao 0.771	Fds, Q, Do I 0. 368	Fds, Q, Do I, Ch 0. 569	Do,Q,Cc I/S,I,C/S 0.803	Do,Q	Cc I/S,I,C/S 0. 549 0. 830	Do,Q	Do,Q	Do, Q [I/S,I,Ch,Talc] 0.520 0.312	Cc, Do Talc	Q,Do I,I/S,Ch 0.818	Do	Do, Q I, Ch 0. 524	Q, Do	Do, Q I, I/S, Ch, S 0. 507	Do,Q	Do, Q 1,1/S,C/S 0.682	Do, Q $I, I/S, S? 0.516$	Do, Q I, I/S, S? 0.824	Do, Q I, I/S, Ch 1. 134 0. 408	Do, Q 1,1/S,C/S 0.428 0.742	Do,Q
	岩性 非黏土矿物 黏土矿物 KI ÁI (*220) (*220)	页岩 Q I,I/S,C/S 0.691 2.111	页岩 Q I,I/S,C/S 0.922 0.694	页岩 Q.Pl I.1/S.C/S 0.820 1.700	页岩 Q,Pl I,1/S 0.837	页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.710	页岩 Q,Pl I,Ch,C/S,I/S 0.471 0.542	页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.901	页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.755	页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.700	页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.701	页岩 Q,Pl I,I/S 0.823	页岩 Q,Pl I,I/S,Ch 0.739 0.390	页岩 Q,Pl I,I/S,Ch,C/S 0.914	页岩 Q,Do,Pl I,I/S,Ch 0.797 0.458	页岩 Q,Pl,Do I,I/S,Ch,C/S 0.760 0.576	页岩 Q,Pl I,I/S,Kao 0.771	砂质页岩 Fds,Q,Do I 0.368	泥质白云岩 Fds,Q,Do I,Ch 0.569	泥质白云岩 Do,Q,Cc I/S,I,C/S 0.803	自云岩 Do,Q	派者 Cc I/S,1,C/S 0.549 0.830	自云岩 Do,Q	自云岩 Do,Q	派岩白云岩 Do,Q I/S,I,Ch,Talc 0.520 0.312	自云岩 Cc,Do Talc	泥质白云岩 Q,Do I,I/S,Ch 0.818	自运者 Do	泥质白云岩 Do,Q I,Ch 0.524	自云岩 Q,Do	泥质白云岩 Do,Q I,I/S,Ch,S 0.507	自云岩 Do,Q	白云质泥岩 Do,Q I,I/S,C/S 0.682	自云质泥岩 Do,Q 1,1/S,S? 0.516	自云质泥岩 Do,Q 1,1/S,S? 0.824	自云质泥岩 Do,Q I,I/S,Ch 1.134 0.408	自云质泥岩 Do,Q I,I/S,C/S 0.428 0.742	自云岩 Do,Q
	地层 岩性 非黏土矿物 黏土矿物 KI ÁI	Ph ¹ ₂ ch 页岩 Q I,I/S,C/S 0.691 2.111	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q I,I/S,C/S 0.922 0.694	Pt ¹ ₂ dh 页岩 Q.Pl I.1/S.C/S 0.820 1.700	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl I,I/S 0.837	Pt ^j _c ch 页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.710	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl I,Ch,C/S,I/S 0.471 0.542	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl 1,1/S,C/S 0.901	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.755	Pt ¹ ₂ dh 页岩 Q,Pl I,I/S,C/S 0.700	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl 1,1/S,C/S 0.701	Pt ¹ ₂ dh 页岩 Q,Pl I,1/S 0.823	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl I,I/S,Ch 0.739 0.390	Pt ¹ ₂ dh 页岩 Q,Pl 1,1/S,Ch,C/S 0.914	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Do,Pl I,I/S,Ch 0.797 0.458	Pt ¹ ₂ <i>ch</i> 页岩 Q,P1,Do 1,1/S,Ch,C/S 0.760 0.576	Pt ¹ ₂ ch 页岩 Q,Pl I,I/S,Kao 0.771	Pt ¹ ₂ d 砂质页岩 Fds, Q, Do I 0.368	Pt ¹ ₂ g 混质白云岩 Fds, Q, Do I, Ch 0. 569	Pt ¹ ₂ g 泥质自云岩 Do,Q,Cc I/S,I,C/S 0.803	Pt ¹ ₂ g 自云岩 Do,Q	Pt ² ₂ y 混岩 Cc I/S,1,C/S 0.549 0.830	$Pt_2^2 w$ 自云岩 Do,Q	Pt ² ₂ w 自云岩 Do,Q	Pt ² ₂ w 泥岩白云岩 Do,Q I/S,I,Ch,Talc 0.520 0.312	Pt ² ₂ 由云岩 Cc,Do Talc	Pt ² ₂ t 视质白云岩 Q,Do I,I/S,Ch 0.818	$Pt_2^2 w$ 白로붐 Do	Pt ² ₂ w 泥质白云岩 Do,Q I,Ch 0.524	$Pt_2^2 w$ 自云岩 Q,Do	Pt ² ₂ w 视质白云岩 Do,Q 1,1/S,Ch,S 0.507	$Pt_2^2 w$ 白로움 Do,Q	Pt ² ₂ y 自云质泥岩 Do,Q I,I/S,C/S 0.682	Pt ² ₂ y 自云质泥岩 Do,Q I,I/S,S? 0.516	Pt ² ₂ 自云质泥岩 Do,Q I,I/S,S? 0.824	Pt ² ₂ y 自云质泥岩 Do, Q I, I/S, Ch I. 134 0.408	Pt ² ₂ y 自云质泥岩 Do,Q I,I/S,C/S 0.428 0.742	Pt ² ₂ w 自云岩 Do,Q

化的一个重要定量标志(Frey, 1987)。目前,国际 上使用最广泛的测量伊利石结晶度的指数是 Kübler 指数(Kübler, 1964)。本文即采用 Kübler 指数(KI),也即伊利石 1 nm 衍射峰的半高宽来描 述伊利石结晶度,使用 Kisch(1991,2004)标样进 行伊利石结晶度 Kübler 指数的校正。校正后的伊 利石结晶度数据可进行国际对比,其近变质带的界 线为 0.42°~0.25° $\Delta 2\theta$,伊利石结晶度大于 0.42° $\Delta 2\theta$ 表明岩石处于成岩阶段,小于 0.25° $\Delta 2\theta$ 表明岩 石处于浅变质阶段。蓟县剖面富含泥质岩石的伊利 石结晶度 Kübler 指数(KI)变化范围在 0.37°~ 1.37° $\Delta 2\theta$ 之间,仅两个样品 KI<0.42° $\Delta 2\theta$,其他 KI 全部大于 0.42° $\Delta 2\theta$ (图 3)。表明蓟县剖面的中、新 元古界(成岩年龄约1800 Ma)依然处于成岩作用阶 段,是我国北方(最?)古老的沉积岩。

除伊利石外,绿泥石结晶度也常作为另一指标 描述自生矿物所经历的地质作用过程。同样的,随 着地质作用的增强,绿泥石结晶度也会变好,其 Árkai(1991)指数(ÁI)也会变小。因此,其与伊利 石结晶度 KI 指数的关系是一个被期盼的数据。本 区绿泥石产出不多,且多与蒙脱石的混层 C/S 伴 生,故其与伊利石结晶度 KI 指数的关系被掩盖(干 扰)。图 4 表明二者关系为发散状。本区绿泥石结 晶度 AI 指数变化范围为:0.31°~2.40° $\Delta 2\theta$ 。不论 按照 Wang Hejing et al. (2012)近变质带的界限 (0.24°~0.31° $\Delta 2\theta$),还是按照 Árkai(1991)提出的 近变质带界限(0.25°~0.32° $\Delta 2\theta$)都表明本区刚好 处于成岩带/近变质带边界,尚未进入变质作用阶 段。这与伊利石结晶度的数据完全一致。

4.3 KI 与粒度大小

自生矿物颗粒在形成和长大的过程中,通常 会经历成核一成芽一形成小晶体到长成大晶体的 过程,在这一过程中,成核时的颗粒会非常多,而 最终长成大颗粒很少。这一现象称为Ostwald 成 熟效应。而矿物的结晶度会随着晶体的长大变得 越来越好。因而,矿物颗粒粒度的大小,也可描述 矿物的生长过程。图5描述了KI与粒度大小的 关系。图5中,圈内范围数据(大多数)显示二者为 负相关关系,即随着粒度的增大,结晶度指数KI变 小,这是二者应有的关系。描述了随着地质作用的 增强,结晶度变好,结晶颗粒经历Ostwald 效应增大 的生长过程(Eberl et al., 1990)。然而,图5中圈 外的数据没有呈现这种变化规律,主要是伊蒙混层 的干扰引起 KI 偏大(粒度变小)造成的(数据点



图 3 蓟县中、新元古界伊利石结晶度 Kübler 指数 KI 分布图 Fig. 3 Distribution map of illite crystallinity Kübler index

KI of Meso-Neoproterozoic samples in Jixian 除了大红峪组 2 个 KI 值< $0.42^{\circ}\Delta 2\theta(0.418 \ \pi \ 0.367)$ 外,大多数 KI 值介于 $1.00^{\circ}\sim 0.42^{\circ}\Delta 2\theta$ 之间(指示晚期成岩阶段)。零星散布 有 5 处 KI> $1.00^{\circ}\Delta 2\theta$ (指示早期成岩阶段,Frey, 1999)。表明早 期成岩阶段就要结束(点状 KI> $1.00^{\circ}\Delta 2\theta$),而初始变质作用即将 开始(2 个 KI 值< $0.42^{\circ}\Delta 2\theta$),总体处于晚期成岩作用阶段

Most KIs fall in the range of $1.00^{\circ} \sim 0.42^{\circ} \Delta 2\theta$ indicating a late diagenetic stage; five isolated KI>1.00° $\Delta 2\theta$ clarifying the ending of early diagenetic stage and two KI<0.42° $\Delta 2\theta$ (0.418 and 0.367) from Dahongyu Formation showing a very beginning stage of incipient anchimetamorphism (Frey, 1999). All of them reach a general conclusion of late diagenetic stage

产生沿箭头方向移动)。另外, MudMaster 软件 (Eberl et al., 1996)在计算粒度大小时,需要进行 翻转(Flipping)处理,对于固定狭缝衍射(效果)数 据也可产生一定程度的 KI 增大(粒度变小)的影响 (亦产生沿箭头方向移动)。这是由模型计算因素造 成数据的非正常(圈外)分布的另外一个原因。由圈 内数据得到的 Ostwald 效应(Eberl et al., 1990)相 应图见图 6。

随着成岩作用的增强,KI值由 1.298°(HW-305)到 0.933°(HW-319)到 0.700°(JX-6)到 0.435°





结晶度 KI 指数的关系



△2θ(HW-294),最好平均粒度(best mean domain size)由 10 nm 增大到 23 nm, 而频数(近似于颗粒 数)由 7.22%降低到 4.56%,呈现出伊利石等自生 黏土矿物经历了 Ostwald 成熟效应。根据 NEWMOD 模型(Revnolds, 1985)计算, 伊利石结 晶度 KI 指数的近变质带界限 0.25°~0.42°Δ2θ 对 应的近变质带粒度大小为 23~40 nm(Wang Hejing et al., 2018),本区最大粒度为 23~24 nm,与近变 质带/成岩带的边界粒度值一致,而本区最小 KI= 0.42°和 0.37°Δ2θ 完全与近变质带/成岩带边界的 KI 值(0.42° $\Delta 2\theta$)对应,一致表明了蓟县元古宇沉积 岩石处于成岩作用晚期并刚开始进入近变质作用的 范畴。与湘中北"江南古陆"元古宇碎屑岩所经历的 Ostwald 成熟效应(Wang Hejing et al., 2004)比 较,湘中北碎屑岩之 KI=0.71°Δ2θ 所对应的频率高 达17%,是本区的近3倍(本区仅为5.8%频率,KI



图 6 蓟县中、新元古界伊利石 Ostwald 成熟效应 Fig. 6 Ostwald ripening of illite of Meso-Neoproterozoic samples in Jixian

DS-颗粒大小; FQ-频率; 由 KI=1.298°→0.933°→0.700°→ 0.435° $\Delta 2\theta$, 伊利石衍射颗粒大小从 10 nm→13 nm→15 nm→23 nm,同时相应粒度的出现频率由 7.22%降低至 6.48%到 5.80%到 4.56%

DS—Domain size; FQ—frequency; From KI = 1.298° via 0.933° via 0.700° to 0.435° $\Delta 2\theta$, illite domain size increases from 10 nm to 13 nm to 15 nm to 23 nm while frequency decreases from 7.22% down to 6.48% to 5.80% to 4.56%, describing an Ostwald ripening

=0.7°Δ2θ),说明本区碎屑岩中自生黏土矿物颗粒 所经历的 Ostwald 成熟效应高于湘中北"江南古陆" 自生黏土矿物颗粒所经历的成熟效应,或矿物颗粒 的结晶速率高于"江南古陆"。这反映出了二者在元 古宙时期不同的构造热状态。

4.4 多型

Frey (1987)总结前人的研究成果,指出云母 1M_d 多型是成岩作用的类型,而 2M₁ 多型是变质作 用条件下产生的类型。根据 Chen Tao et al. (2007b) 的资料,串岭沟组页岩中伊利石的多型为典型的 1M_d 多型,指示所属岩石处于成岩作用的影响。

4.5 白云石有序度δ指数的变化与意义

通常由沉积到成岩作用的变化,原生白云石在 结构上 Mg²⁺离子替代 Ca²⁺离子的占位可由完全无 序变化到完全有序,白云石有序度指数δ值可由0 变化到1。本区测得白云石有序度指数δ变化范围 为0.19~0.99,按照0.40/0.60/0.80 界线可划分 为甚低级、低级、中级和高级有序四个区域。由图7 可看出,本区由西部向东部δ值总体变化由0.19 到 0.99 增高,反映成岩作用强度增强。

白云石有序度在沉积环境和石油地质研究中都 有很好的应用。如 Mg²⁺离子的来源和白云化流体 进入碳酸盐岩沉积物的过程可为白云石的形成提供







按照 0.40/0.60/0.80 界线可划分为甚低级、低级、中级和高级有序 四个区域。灰白色小圆代表 δ =19(相对圆直径=19),黑色大圆代 表 δ =99(相对圆直径=99),其他不同大小灰度圆代表不同 δ 数值 (相对圆直径= δ 数值)

Four δ zones can be classified as very low-grade, low-grade, middlegrade and high-grade ones by δ =0. 4/0. 6/0. 8. Circles in different white-black degrees and diameters show corresponding δ values, e. g. white circle with relative diameter = 19 represents δ =19 while black circle with relative diameter=99 indicates δ =99

条件,即可为成岩演化和沉积环境分析提供重要的 数据。对于硫酸盐类矿物,在富含 Mg^{2+} 离子和 $[CO_3]^{2-}$ 离子的白云化流体进入后,可逐渐脱去 $[SO_4]^{2-}$ 离子形成白云石。在此过程中,四面体酸 根 $[SO_4]^{2-}$ 转变为三角平面酸根 $[CO_3]^{2-}$ 产生晶格 的收缩,促使岩石(包括地层)产生裂缝,从而可为油 气的运移提供通道,也为油气的储藏提供有用的空 间。本区白云石 δ 值形成 4 个有序带,主要分布为 中一低级有序区(δ =0.4~0.8),其中 71%的 δ 值 根据本区少数砂质泥页岩和泥质碳酸盐岩中所 获得的 KI 与δ值数据,KI 与δ的变化关系反映在 图 8 中。图 8 表明,二者关系变化很大。KI 值大的 δ并不小,而 KI 值小的,δ有较大的变化。说明碎屑 岩系统中存在碳酸盐组分和碳酸盐系统存在碎屑岩 组分时往往会发生相互干扰,使得二者数据没有像 单一系统或单一体系那样呈现有规律的变化。



 图 8 蓟县中、新元古界伊利石结晶度 KI 指数 与白云石有序度指数 δ 关系图
 Fig. 8 Relation between KI and ∂ of Meso-Neoproterozoic samples in Jixian

本区样品中白云石 CaCO₃ 的摩尔含量多数在 50.3%~53.4%之间,而对应的 δ 值为 0.54~ 0.99。2个低 δ 值对应较高(58%)和高(86%)的 CaCO₃摩尔含量(图 9)。总体上呈现出有序度低对



与 $CaCO_3$ 含量的变化关系 Fig. 9 Relation between $CaCO_3$ content and δ of dolomite of Meso-Neoproterozoic samples in Jixian 应高 CaCO₃摩尔含量的正常关系。

4.6 温度与压力的估计

1999 年 Battaglia 提出了绿泥石 *d*₍₀₀₁) 地质温度 计。由校正的 *d*₍₀₀₁) 和 *d*₍₀₆₀) 值按照相应的温度计算 公式即可估计绿泥石的形成温度。本文根据石英 (211) 衍 射 峰 对 *d*₍₀₀₁) 和 *d*₍₀₆₀) 进行校正,按照 Battaglia 公式(Fig. 4, $R^2 = 0.89$)计算得到绿泥石 的形成温度为 183 ± 20 °C(详见表 2)。

此外,白云(石)岩 MgCO₃ 摩尔含量约 49.7% ~46.6%(CaCO₃ 摩尔含量为 50.3%~53.4%),与 Montes-Hernandez et al. (2014)的实验数据(Fig. 5)对 比也表明其形成温度约在 180~200℃之间。

表 2 绿泥石 d ₍₀₀₁₎ (Å) 地质温度计测试	与计算数据
--	-------

Table 2Chlorite $d_{(001)}$ (Å)	geothermometer data
---------------------------------	---------------------

$d_{Q(211)-meas}$	$d_{ m Ch(060)-meas}$	У	$d_{ m Ch(001)-meas}$	$d_{ m Ch(002)-meas}$	$d_{ m Ch(001)-average}$	T(°C)
1.54167	1.54320		14.21090	7.09024		
d _{Q(211)} -ICDD:33-1161	$d_{ m Ch(060)-correct}$		$d_{ m Ch(001)-correct}$	$d_{ m Ch(002)-correct}$		
1.54153	1.54306	1.30654	14.21076	7.10143	14.19569	183.31

注:meas一测试;correct一校正;ICDD一国际衍射数据中心;33-1161一衍射数据编号;Q一石英;Ch一绿泥石;y一Battaglia 计算判别。

地层学与构造地质学研究表明,元古宙本区没 有经历大规模的地壳运动,仅发生了数次升降运动, 地层处于水平状态。岩石所经受的压力主要为埋藏 (深度)而产生的。根据蓟县元古宙地层厚度 9500 m,按照正常深度与压力的关系,蓟县新元古界地层 压力约为 330 MPa。由此推算出的古地热梯度为 17~21℃/km。这表明本区元古宇的地热梯度是明 显低于正常平均地热梯度 25℃/km 的。

5 结论

蓟县前寒武系碎屑岩和碳酸盐岩主要经历了沉 积到晚期成岩阶段,成岩作用温度在183~200℃左 右,压力约330 MPa,古地热梯度为17~21℃/km; 典型的黏土矿物组合为伊利石、海绿石、伊蒙混层、 高岭石,反映古环境条件为温带环境。白云石有序 度δ由西向东总体增大,显示成岩作用趋向增强。2 个 KI<0.42°Δ2θ,表明本区仅局部受到轻微(近)变 质作用的影响。

References

- Árkai P. 1991. Chlorite crystallinity—an empirical-approach and correlation with illite crystallinity, coal rank and mineral facies as exemplified by Paleozoic and Mesozoic rocks of northeast Hungary. Journal of Metamorphic Geology, 9: 723~734.
- Battaglia S. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite. Clays and Clay Minerals, 47:54~63.
- Cao Ruiji, Zao Wenjie. 1981. Sequence of Precambrian stromatolite assemblages in North China. Acta Palaeontologica Sinica, 20 (6):508~517 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jinbiao. 1983. A preliminary study on the geological evolution of Sino-Korea Paraplatform during middle to terminal Proterozoic. Geological Review, 29(1):1~8 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jinbiao, Zhang Huimin, Zhu Shixing, Zhao Zhen, Wang Zhengang. 1980. Study of the Sinian suberathem in Jixian County. In: Wang Yuelun, ed. The Sinian Suberathem in China. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 56~114

(in Chinese with English abstract).

- Chen Tao, Wang Hejin, Zhang Zhuqing, Wang Huan. 2005. An approach to paleoclimate-reconstruction by clay minerals. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 41(2): 309~316 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tao, Wang Hejing. 2007a. Microstructure characteristics of illite from Chuanlinggou Formation of Changcheng System in Jixian County, Tianjin City. Science in China-Series D: Earth Sciences, 50(10): 1452~1458.
- Chen Tao, Wang Hejing. 2007b. Determination of layer stacking microstructures and intralayer transition of illite polytypes by high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM). American Mineralogist, 92: 926~932.
- Chen Tao, Wang Hejing. 2008. Mix-layer clay minerals from Chuanlinggou formation of Changcheng System in Jixian County, Tianjin City. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 33(5): 716 ~ 722 (in Chinese with English abstract).
- Deffeyes K S, Lucia F J, Weyl P K. 1965. Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporite waters on Bonarie, Netherlands Anties. Special Publication of the Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, 13: 71~88.
- Eberl D D, Drits V, Srodon J, Nuesch R. 1996. MudMaster: a program for calculating crystallite size distributions and strain from the shapes of X-ray diffraction peaks. U. S. Geological Survey Open File Report, 96~171.
- Eberl D D, Srodon J, Kralik M, Taylor B E, Peterman Z E. 1990. Ostwald ripening of clays and metamorphic minerals. Science, $248:474{\sim}477.$
- Frey M, Robinson D. 1999. Low grade metamorphism. Oxford: Blackwell Sciences Ltd, UK.
- Frey M. 1987. Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In: Frey M, ed. Low Temperature Metamorphism. London, UK: Blackie, 9~58.
- Gao Linzhi, Zhang Yuxiu, Wang Chengshu, Tian Shugang, Peng Yang, Liu Youyuan, Dong Dazhong, He Huaixiang, Lei Baotong. 1996. Meso- and Neoproterozoic sequence stratigraphy in Jixian. Regional Geology of China, 15(1): 64~ 74.
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, Zhou Hongrui, Wang Ziqiang. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan System in North China. Geological Bulletin of China, 26(3): 249 ~ 255 (in Chinese with English abstract).
- Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Liu Pengju, Ding Xiaozhong, Wang Ziqiang, Zhang Yanjie. 2009. Recognition of Meso- and Neoproterozoic Stratigraphic Framework in North and South China. Acta Geoscience Sinica, 30(4): 433~446 (in Chinese with English abstract).

- Goldsmith J R, Graff D R. 1958. Structural and compositional variations in some natural dolomites. Journal of Geology, 66: 678~693.
- Guo Wenlin, Su Wenbo, Zhang Jian, Li Huimin, Zhou Hongying, Li Huaikun, Ettensohn F R, Huff W D. 2019. Zircon U-Pb dating and Hf isotopes of K-bentonites from the Tieling Formation in a new exposure of the Jixian Section, Tianjin, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 35(8): 2433~ 2454 (in Chinese with English abstract).
- ICDD. 2005. International center for diffraction database, version 2005.
- Kao C S, Xsiung Y H, Kao P. 1934. Preliminary notes on Sinian stratigraphy of North China. Bulletin of the Geological Society of China, 13: 243~289.
- Kisch H J. 1991. Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. Journal of Metamorphic Geology, 9: 665~670.
- Kisch H J, Arkai P, Brime C. 2004. On the calibration of the illiteKubler index (illite "crystallinity"). Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 84: 323 ~331.
- Kübler B. 1964. Les argiles, indicateurs de metamorphisme. Rev. Institut Fransic Pétrole, 19: 1093~1112.
- Li Chao, Peng Pingan, Sheng Guoying, Fu Jiapeng, Yan Yuzhong. 2002. A carbon isotopic biogeochemical study of Meso- to Neoproterozoic sediments from the Jixian Section, North China. Acta Geologica Sinica, 76(4): 433~440 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun, Tian Hui, Yang Ligong, Huff W D, Ettensohn F R. 2014. The first precise age constraints on the Jixian System of the Meso- to Neoproterozoic Standard Section of China: SHRIMP zircon U-Pb dating of bentonites from the Wumishan and Tieling Formations in the Jixian Section, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 30 (10): 2999 ~ 1312 (in Chinese with English abstract).
- Li Mingrong, Wang Songshan, Qiu Ji. 1996. The ages of glauconites from Tieling and Jingeryu Formations, Beijing-Tianjin area. Acta Petrologica Sinica, 12(3). $416 \sim 423$ (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Zhang Xiulian. 2004. Petrology of Yangzhuang Formation and its geological significance, Middle Proterozoic Jixian System from Jixian, Tianjin, North China. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 40 (4): 601 ~ 610 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hejuan, Sun Xiaoling, Wang Dehai. 2013. Discussion on genesis of some sedimentary structures from Precambrain: taking Jixian section in Tianjin as an example. Journal of Earth Sciences and Environment, 35(3): 44~54 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huimin. 1991. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanic of Dahongyu Formation, Changcheng System in Jixian. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 22: 137~146 (in Chinese with English abstract).
- Ma Lifang. 2002. Geological Atlas of China. Beijing: Geological Publishing House, 119 \sim 124 (in Chinese with English abstract).
- Mei Chaojia. 2018. Glauconitization and pyritization of stromatolites: a case of the Mesoproterozoic Tieling Formation at Jixian section, Tianjin, North China. Journal of Palaeogeography, 20(3): 453~464 (in Chinese with English abstract).
- Mei Mingxiang, Yang Fengjie, Gao Jinhan, Meng Qingfen. 2008. 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. Earth Science Frontiers, 15(4): $146 \sim 158$ (in Chinese with English abstract).

- Mei Mingxiang, Gao Jinhan, Meng Qingfen, Liu Zhirong. 2009. Microbialmat-related silty dykes of the Precambrian: an example from the Paleoproterozoic Chuanlinggou Formation at Jixian section in Tianjin. Journal of Palaeogeography, 11(1): 37~50 (in Chinese with English abstract).
- Mei Mingxiang, Zhou Hongrui, Do Benming, Luo Zhiqing. 2000. Meso- and Neoproterozoic sedimentary sequences in Jixian, Tianjin, northern China: division of the first-order sequences of the Cambrian strata (1800~600 Ma) and their correlation with the Phanerozoic strata. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 20(4): 47~59 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiaoqing. 2006. Geological characteristics and significance of glauconites in stromatolite rock-reef of Mesoproterozoic Tieling Formation in Jixian County. Northernwestern Geology, 39(3): 112~116 (in Chinese with English abstract).
- Montes-Hernandez G, Findling N, Renard F, Auzende A-L. 2014. Precipitation of ordered dolomite via simultaneous dissolution of calcite and magnesite: new experimental insights into an old precipitation enigma. Crystal Growth & Design, 14: 671 \sim 677.
- Moore D M, Reynolds Jr R C. 1997. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. New York: Oxford University Press, UK.
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Zhang Chuanheng. 2007. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino-Korean Plate. Geological Bulletin of China, 26(5): 503~509 (in Chinese with English abstract).
- Ren Chuanzhen, Chu Runjian, Wu Huaichun, Fang Qiang. 2019. Milankovitch Cycles of the Precambrian Hongshuizhuang-Tieling Formations at Jixian Section in Tianjin. Geoscience, 33 (5): 979~989 (in Chinese with English abstract).
- Reynolds Jr R C. 1985. NEWMOD -A Computer Program for the Calculation of Onedimensional Diffraction Patterns of Mixed Layered Clays. 8 Brook Dr, Hanover (release 2017).
- Song Tianrui, Zhao Zhen, Wang Changyao, Yang Huining, Liu Zhongqiu, Xu Xiangguan. 1991. Proterozoic Rocks in North China. Beijing: Beijing Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).
- The Bureau of Geology and Mineral Resources of Tianjin City. 1992. Regional Geology of Tianjin City, China. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Dehai, Meng Xianghua, Guo Feng, Ren Guoxuan, Ge Ming. 2009. Discussion on the sedimentary environment and origin of the microsparite carbonates of Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Jixian area, Tianjin, China. Journal of Jilin University (Earth Science edition), 39(6): $1023 \sim 1030$ (in Chinese with English abstract).
- Wang Hejing, Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing. 2004. Anchimetamorphism of the Neoproterozoic and the Lower Paleozoic along the profile of Yuanguping in western Hunan Province, China. Acta Geologica Sinica (English edition), 78: $170 \sim 176$.
- Wang Hejing, Ma Yongsheng, Zhou Jian, Xu Tingjing. 2012. Diagenesis and very low grade metamorphism in a 7012 m-deep well Hongcan 1, eastern Tibetan plateau. Swiss Journalof Geosciences, 105: 249~261.
- Wang Hejing, Rahn M, Zhou Jian. 2018. Tectonothermal evolution of the Triassic flysch in the Bayan Har Orogen, Tibetan plateau. Tectonophysics, 723: 277~287.
- Wang Yuelun. 1980. The Sinian Suberathem in China. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 102~208 (in Chinese with English abstract).
- Wu Huaichun, Zhang Shihong, Li Zhengxiang, Li Haiyan, Dong Jin. 2005. New paleomagnetic results from the Yangzhuang Formation of the Jixian System, North China, and tectonic implications. Chinese Science Bulletin, 50(14): 1483~1489 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guwei, Zhou Chuanming. 2005. Geological singnificance of

siliceous cemented limonitic sandstone at the bottom of the Tieling Formation in Jixian, Tianjin. Journal of Stratigraphy, 29(S1): $450 \sim 453$ (in Chinese with English abstract).

- Xing Yusheng. 1989. The Upper-Precambrian in China. Beijing: Geological Publishing House, 69~101.
- Yang Yunxiang, Guo Feng, Yang Youyun. 2011. Sedimentary rocks of Gaoyuzhuang Formation of Mesoproterozoic in Jixian County and its geological significance. Northerwestern Geology, 44(2): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Li Yanhe, Fan Chengfu, Hu Bing, Gao Jianfei. 2019. Formation mechanism of chert bands in the Mesoproterozoic Jixian section: evidence from boron isotopes and silico isotopes. Acta Geologica Sinica, 93(8): 2055 ~ 2067 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Li, Wan Maoxia, Peng Ying. 2004. Dolomite sequentiality and its application to petroleum geology. Natural Gas Exploration & Development, 27 (4): 64 ~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen. 1982. On sedimentary carbonatite of the Sinian suberathem in Jixian County. Bulletin of Tianjin Institute of Geology & Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, (3): 71~81 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen. 1988. A sedimentary modal of the tidal flat of the epicontinental sea. Acta Sedimentologica Sinica, 6(2): $68 \sim 76$ (in Chinese with English abstract).
- Zhong Yan, Zhao Liangdong, Chen Liuqin, Mei Mingxiang. 2011. New understanding of "fluvial facies" deposition of the early transgression period of Mesoproterozoic: an example from Jixian section in Tianjin. Journal of Palaeogeography, 13(1): 21~29 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiqiang, Li Nan, Liang Guangsheng, Li Lin, Tang Dongjie, Fu Xingmei. 2009. Sedimentary significance of the autochthonous glauconite in stromatolitic limestones of the Mesoproterozoic Tieling Formation in Jixian, Tianjin, North China. Geological Bulletin of China, 28(7): 985 ~ 990 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiangkun, Zhang Kan, Zhang Feifei, Gao Zhaofu, Dong Aiguo, Bao Chuang, Guo Yueling, Yan Bing, Liu Hui. 2013. Discovery of siderite concretes in Xiamaling Formation, Jixian Section. Geological Review, 59(5): 816~822 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 曹瑞骥,赵文杰. 1981. 华北区前寒武纪叠层石组合序列.古生物学报,20(6): 508~517.
- 曾理, 万茂霞, 彭英. 2004. 白云石有序度及其在石油地质中的应用. 天然气勘探与开发, 27(4): 64~72.
- 陈晋镳,张惠民,朱士兴,赵震,王振刚. 1980. 蓟县震旦亚界的研 究.见:王曰伦主编.中国震旦亚界研究.天津:天津科学技术 出版社,56~114.
- 陈晋镳. 1983. 中朝准地台中末元古代地质演化的初步探讨. 地质 论评, 29(1): 1~8.
- 陈涛,王河锦,张祖青,王欢. 2005. 浅谈利用黏土矿物重建古气候. 北京大学学报(自然科学版),41(2):309~316.
- 陈涛,王河锦. 2007.天津蓟县长城系串岭沟组伊利石微结构特征. 中国科学(D辑),37(7):894~899.
- 陈涛,王河锦.2008.天津蓟县长城系串岭沟组混层黏土矿物.地 球科学——中国地质大学学报,33(5):716~722.
- 高林志,张传恒,刘鹏举,丁孝忠,王自强,张彦杰.2009.华北一 江南地区中、新元古代地层格架的再认识.地球学报,30(4): 433~446.
- 高林志,张传恒,史晓颖,周洪瑞,王自强.2007. 华北青白口系下 马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年.地质通报,26(3):249 ~255.
- 高振西,熊永先,高平.1934.中国北方震旦系.中国地质学会会志,13:243~289.
- 郭文琳,苏文博,张健,李惠民,周红英,李怀坤,Ettensohn F R,

Huff W D. 2019. 天津蓟县铁岭组新剖面钾质斑脱岩锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素研究. 岩石学报, 35(8): 2433~2454.

- 解古巍,周传明. 2005. 蓟县铁岭组底部硅质褐铁矿屑砂岩的地质 意义. 地层学杂志,29(增刊):450~453.
- 李超,彭平安,盛国英,傅家澎,阎玉忠.2002. 蓟县剖面中一新元 古代沉积物的稳定碳同位素生物地球化学研究.地质学报,76 (4):433~440.
- 李怀坤,苏文博,周红英,相振群,田辉,杨立公,Huff W D, Ettensohn F R. 2014.中一新元古界标准剖面蓟县系首获高精 度年龄制约——蓟县剖面雾迷山组和铁岭组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年研究.岩石学报,30(10);2999 ~1312.
- 李明荣, 王松山, 裘冀. 1996. 京津地区铁岭组、景儿峪组海绿石 ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar年龄. 岩石学报, 12(3): 416~423.
- 刘波,张秀莲.2004.天津蓟县中元古界蓟县系杨庄组岩石特征及 其地质意义.北京大学学报(自然科学版),40(4):601~610.
- 刘贺娟,孙晓岭,王德海. 2013. 对前寒武纪一些沉积构造成因的 思考:以天津蓟县剖面为例. 地球科学与环境学报,35(3):44 ~54.
- 陆松年,李惠民.1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb法准确定年.中国地质科学院院报,22:137~146.
- 马丽芳. 2002. 中国地质图册. 北京: 地质出版社, 119~124.
- 梅朝佳. 2018. 叠层石中的海绿石化和黄铁矿化: 以天津蓟县中元 古界铁岭组为例. 古地理学报, 20(3): 453~464.
- 梅冥相,周洪瑞,杜本明,罗志清.2000.天津蓟县中、新元古代沉积层序的初步研究——前寒武纪(1800~600 Ma)一级层序划分及其与显生宙的一致性.沉积与特提斯地质,20(4):47~59.
- 梅冥相,高金汉,孟庆芬,刘智荣.2009.前寒武纪与微生物席相关 的粉砂岩岩墙——以天津蓟县古元古界串岭沟组为例.古地理 学报,11(1):37~50.
- 梅冥相,杨锋杰,高金汉,孟庆芬.2008.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.地学前缘, 15(4):146~158.
- 孟晓庆. 2006. 天津蓟县剖面中元古界铁岭组叠层石岩礁中海绿石 的产出特征及地质意义. 西北地质, 39(3): 112~116.
- 乔秀夫,高林志,张传恒.2007.中朝板块中、新元古界年代地层柱 与构造环境新思考.地质通报,26(5):503~509.
- 任传真,褚润健,吴怀春,房强.2019.天津蓟县剖面前寒武系洪水 庄组一铁岭组米兰科维奇旋回.现代地质,33(5):979~989.
- 宋天锐,赵震,王长尧,杨慧宁,刘仲秋,须湘宫. 1991. 华北元古 宙沉积岩. 北京:北京科学技术出版社.
- 天津市地质矿产局. 1992. 天津市区域地质志,北京:地质出版社.
- 王德海,孟祥化,郭峰,任国选,葛铭.2009.天津蓟县高于庄组微 亮晶(MT)碳酸盐岩的沉积环境及成因探讨.吉林大学学报(地 球科学版),39(6):1023~1030.
- 王曰伦. 1980. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 102 ~208.
- 吴怀春,张世红,李正祥,李海燕,董进.2005. 华北地台蓟县系杨 庄组古地磁新结果及其大地构造意义.科学通报,50(13): 1370~1376.
- 邢裕盛. 1989. 中国的上前寒武系. 北京: 地质出版社, 69~101.
- 杨云祥,郭峰,杨友运.2011. 蓟县中元古界高于庄组沉积岩系及 地质意义.西北地质,44(2):1~7.
- 赵悦,李延河,范昌福,胡斌,高建飞. 2019. 华北蓟县中元古界剖面中燧石条带的形成机制——硼硅同位素证据.地质学报,93 (8): 2055~2067.
- 赵震. 1982. 蓟县震旦亚界雾迷山组碳酸盐岩沉积. 天津地质矿产研究所所刊,(3):71~81.
- 赵震. 1988. 一个陆表海的湖坪沉积模式. 沉积学报, 6(2): 68 ~76.
- 钟焱,赵亮东,陈留勤,梅冥相. 2011. 对华北中元古代海侵初期 "河流相"沉积的重新认识:以天津蓟县剖面为例. 古地理学 报,13(1):21~29.
- 周锡强,李楠,梁光胜,李林,汤冬杰,付星梅. 2009. 天津蓟县中

辉. 2013. 蓟县中元古界下马岭组中菱铁矿的发现及其意义. 地质论评, 59(5): 816~822.

Diagenesis of the Meso-Neoproterozoic in Jixian section, Tianjin, China ——data from mineralogy

WANG Hejing $^{*1,2)}$, CHEN Mengyao¹⁾, AN Jiali¹⁾, WANG Guanyu¹⁾, YAN Yu¹⁾

1) School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2) Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, Ministry of Education, Beijing 100871, China

 $*\ Corresponding\ author:\ hjwang@pku.edu.cn$

Abstract

Clay mineralogical and mineral structural occupying analyses were applied to the clastic rocks and carbonates of Meso-Neoproterozoic in Jixian section, Tianjin, China. These analyses include illite crystallinity, chlorite crystallinity, clay mineral assemblages, particle size distribution, polytype, ordering degree, Mg/Ca ratio in dolomite structure and geothermo-geobarometer. The results demonstrate that illite crystallinity Kübler index ranges from 0. 37° to 1. 37° $\Delta 2\theta$ while chlorite crystallinity Árkai index from 0. 31° to 2. 40° $\Delta 2\theta$, gathering with 1M_d polytype, uniformly indicating the late diagenetic stage encountered with these clastic rocks except two data falling in the incipient anchimetamorphic realm. The major clay mineral assemblages are illite, illite/smectite mixed-layer, chlorite/smectite mixed-layer phases and kaolinite, reflecting a certain paleo-environmental condition. The upper limit 24 nm of "Best mean particle size" from the range 8 to 24 nm well agrees with the size 23 nm of the anchizone/diagenetic zone boundary converted from NewMod with Kübler index 0. $42^{\circ}\Delta 2\theta$. It also explains clearly the late diagenetic stage. The range of dolomite ordering degree is from 0. 19 to 0. 99. This range can be classified into four grades: very low-, low-, middle- and high-grade ordering zones. Compared with the situation of carbonates of Carboniferous-Permian in eastern Sichuan, the low- to middle-grade ordering zones have an appropriate prospecting for petroleum and gas. From the west to the east, dolomite ordering degree increases generally from 0.19 to 0.99. The estimated diagenetic conditions are 180 to 200 ± 20 °C and 330 MPa pressure, and result in a paleo-geothermal gradient of $17 \sim 21 \,^{\circ}{
m C}/{
m km}$.

Key words: Jixian County; Precambrian; evolution of diagenesis; assemblages of clay minerals; crystallinities; ordering degree; geothermo-geobarometry