doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.004

内蒙古满都拉地区蛇绿混杂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对区域构造演化的约束

许立权,肖剑伟,张玉清,呼日乐,张婷婷,马嘉骏
XU Liquan, XIAO Jianwei, ZHANG Yuqin, HU Rile, ZHANG Tingting, MA Jiajun

内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室/内蒙古自治区地质调查院,内蒙古 呼和浩特 010020
Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting/Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, *Inner Mongolia, China*

摘要:对满都拉地区蛇绿混杂岩的基质碎屑岩进行了锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究。岩屑杂砂岩(D18003RZ1)锆石多具岩浆成因特征,U-Pb 年龄分布于 272~2302 Ma 之间,有 282 Ma 和 442.8 Ma 两个峰值年龄;431~456 Ma 锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282661~0.282797,$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 6.4~10.7,T_{DM2} 介于 801~1155 Ma 之间;272~286 Ma 锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282554~0.282768,$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于-1.5~5.9 之间,T_{DM2} 介于 1069~1575 Ma 之间。含粉砂绢云母硅质板岩(DC01TW1)锆石年龄分布在 260~2185 Ma 之间,其锆石有岩浆成因,也有变质成因,主要峰值年龄为 270 Ma,次为 1600 Ma 和 1850 Ma;263~293 Ma 锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282434~0.282805,$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为-6.0~7.1,T_{DM2} 介于 930~1894 Ma 之间。杂砂岩以古生代碎屑锆石为主,少量古中元古代锆石,反映其物源以兴蒙造山带为主,而绢云母硅质板岩以晚古生代和古中元古代为主,反映其物源可能以兴蒙造山带和华北陆块并重。结合 2 种岩性的岩石组成、锆石年龄分布及物源分析,杂砂岩可能形成时代略早,且靠近岛弧,而绢云母硅质板岩形成时代稍晚,其环境更靠近陆块。满都拉地区这套碎屑岩的形成时代可能为晚二叠世,且可能不晚于 256 Ma,形成于俯冲向碰撞转变的构造背景,进一步限定内蒙古中部的古亚洲洋在晚二叠世依然存在,其演化可能一直延续到晚二叠世末。

关键词:内蒙古满都拉地区;蛇绿混杂岩;碎屑锆石 U-Pb 年龄;Lu-Hf 同位素;地质调查工程
中图分类号:P58;P597^{+}.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-2552(2023)02/03-0223-16

Xu L Q, Xiao J W, Zhang Y Q, Hu R L, Zhang T T, Ma J J. Detrital zircons U-Pb age and constraints for regional tectonic evolution of the ophiolitic mélange in Mandula area, Inner Mongolia. ***Geological Bulletin of China*****, 2023, 42(2/3): 223-238**

Abstract: Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope of matrix clastic rocks in the Mandula ophiolitic mélange were studied in this paper. Most of the detrital zircons in greywacks(D18003RZ1) are magmatic crystallization origin. The zircon U-Pb ages range from 272 Ma to 2302 Ma with two peak ages of 282 Ma and 442.8 Ma. The $^{176}Hf/^{177}Hf$ ratios of zircons from 431 Ma to 456 Ma range from 0.282661 to 0.282797. The values of $\varepsilon_{Hf}(t)$ range from 6.4 to 10.7, and T_{DM2} range from 801 Ma to 1155 Ma. The zircon $^{176}Hf/^{177}Hf$ ratios of 272~286 Ma range from 0.282554 to 0.282768. The values of $\varepsilon_{Hf}(t)$ is between − 1.5 and 5.9, and T_{DM2} is between 1069 Ma and 1575 Ma. The zircon ages of the silty sericite bearing siliceous slate(DC01TW1) range from 260 Ma to 2185 Ma. The zircons are magmatic origin and metamorphic origin. The main peak age is 270 Ma, and the secondary peaks are 1600 Ma and 1850 Ma. The zircon $^{176}Hf/^{177}Hf$ ratios of 263 ~ 293 Ma range from 0.282434 to 0.282805. The values of $\varepsilon_{Hf}(t)$ range from −6.0 to 7.1, and T_{DM2} range from 930 Ma to 1894 Ma. The detrital zircons in greywack reflect that the provenance is mainly Xingmeng orogenic belt. Siliceous slate

收稿日期:2021-05-24;**修订日期**:2021-08-27
资助项目:内蒙古自治区自然科学基金项目《内蒙古索伦山蛇绿混杂岩带物质组成与构造背景研究》(编号:2017MS0412)、中国地质调查局项目《中国区域地质志·内蒙古志》(编号:121201130132001)和内蒙古党委组织部项目《内蒙古重要成矿带成矿规律及找矿预测研究》创新人才团队(2015)
作者简介:许立权(1971-),男,博士,正高级工程师,从事区域地质调查、矿产资源评价及相关管理工作。E-mail:980918529@qq.com

are mainly Late Paleozoic detrital zircons and Paleo-Meso Proterozoic detrital zircons, that show the provenance area might be the Xingmeng orogenic belt and the North China block. Combined with the rock composition, zircon age distribution and provenance analysis of the two lithology, the greywacks may have formed a little earlier and close to the island arc, while the sericite siliceous slate formed a little later and its environment is closer to the continental block. The clastic rocks in Mandula area might have formed in the Late Permian and not be later than 256 Ma. They might have formed in the transformation background from subduction to collision, which further limited that the Paleo Asian Ocean in central Inner Mongolia still existed in the Late Permian, and its evolution might have continued to the end of the Late Permian.

Key words: Mandula area, Inner Mongolia; ophiolitic mélange; detrital zircon U-Pb age; Lu-Hf isotope; geological survey engineering

兴蒙造山带是中亚造山带的重要组成部分，位于内蒙古及其以东的广大地区，主要形成于古生代，是古亚洲洋及大陆边缘演化的最终产物（任纪舜等，1980；李双林等，1998；许文良等，2019）（图 1-a）。由于其间断续出露多条蛇绿（混杂）岩带，还夹杂一些古老陆块，使古亚洲洋闭合的时间、位置及其演化过程变得更加复杂。基于对蛇绿岩、区域地层及岩浆岩形成背景认识的不同，兴蒙造山带的形成演化主要有 2 种观点，一是古亚洲洋连续演化并于古生代末（部分研究者认为到中生代初）最终闭合的产物（Xiao et al.，2003；Miao et al.，2007；Jian et al.，2010），二是经历了早古生代古亚洲洋俯冲消减，晚泥盆世两大板块碰撞形成兴蒙造山带，之后又经历了伸展拉张，局部形成小洋盆，并于古生代末—中

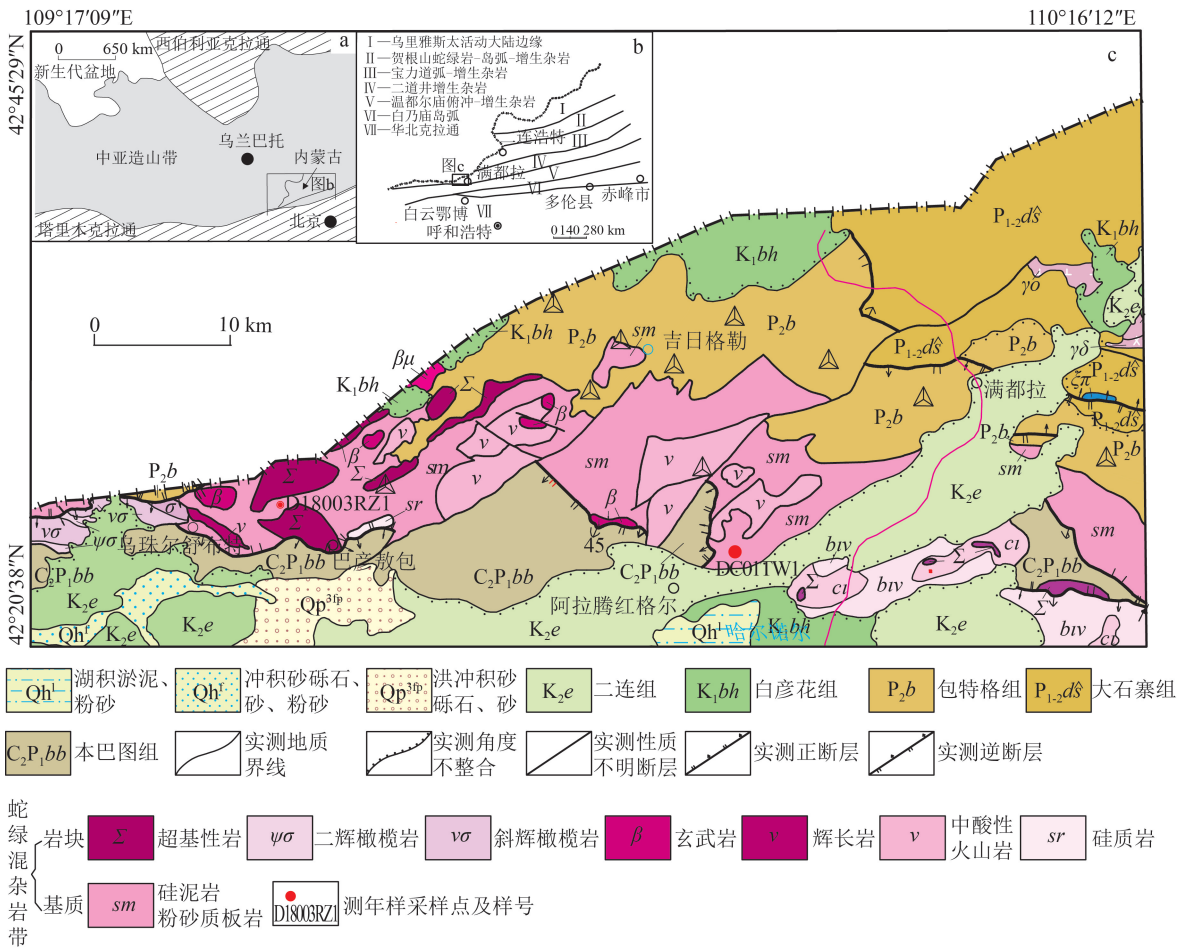

图 1 内蒙古满都拉地区地质简图

Fig. 1 Geological map of Mandula area, Inner Mongolia

a—兴蒙造山带中部在中亚造山带位置；b—内蒙古中部构造单元划分（Xiao et al.，2003）

生代初闭合(邵济安,1991;徐备等,2018)。

满都拉地区蛇绿岩带位于内蒙古中部达茂旗的中蒙边境附近,向西可与索伦山蛇绿岩带相连,是兴蒙造山带中重要的蛇绿岩带之一。近十几年的区域地质填图和科研工作揭示,满都拉—索伦山地区的蛇绿岩带由洋壳残片、外来岩块、深水复理石建造等呈构造堆叠体汇聚在一起,岩块和基质呈网结状构造,是一条蛇绿构造混杂岩带[①②](苏新旭等,2000;付冬,2016)或俯冲增生杂岩带(潘桂棠等,2015)。目前,大部分研究者认为,该蛇绿(混杂)岩带是古亚洲洋最终闭合、华北板块与西伯利亚板块碰撞对接的位置(Xiao et al.,2003;潘桂棠等,2015)。有关蛇绿岩的形成时代已经有较多研究(梁日暄等,1994;陶继雄等,2004;王惠等,2005;Miao et al.,2007;Jian et al.,2010;李尚林等,2012;李钢柱等,2017),但是蛇绿混杂岩带基质的形成时代和物源研究较少。满都拉地区这套碎屑岩的形成时代前人也有不同认识,可以归纳为以下几种:①依据碎屑岩中所含化石,将该套细碎屑岩划归石炭系本巴图组[③④];②依据蛇绿混杂岩带中混入的最新的外来岩块是中二叠世哲斯组碎屑岩块,认为蛇绿构造混杂岩带中混杂堆积的时间为中二叠世中晚期[②];③依据碎屑锆石 U-Pb 年龄将其归为石炭纪(李钢柱等,2017)或中二叠世早期(付冬,2016);④根据碎屑岩中所包裹的蛇绿岩的年龄或硅质岩中所含放射虫的时代,将其归属为早泥盆世[①]、早中二叠世等(王惠等,2005;Miao et al.,2007;李钢柱等,2017;柳志华等,2020)。可见,这套碎屑岩的形成时代还有争议,而其形成时代及其物源区的示踪,对理解古亚洲洋在内蒙古中部的演化具有非常重要的意义。

本次对满都拉地区蛇绿混杂岩带基质碎屑岩进行了碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素研究,对碎屑岩的物源区、形成环境、形成时限等问题进行了探讨,以期为古亚洲洋在内蒙古中部地区的演化历史提供基础资料。

1　地质概况

内蒙古自治区中部地区构造单元划分有多种方案(黄汲清等,1977;内蒙古地质矿产局,1991;Xiao et al.,2003;Jian et al.,2010;Liu et al.,2010;Eizenhöfer et al.,2014;徐备等,2018)。按照 Xiao et al.(2003)的划分方案,由北向南依次划分为乌里雅斯太活动大陆边缘(Uliastai active continental margin)、贺根山蛇绿岩-弧-增生杂岩(Hegenshan ophiolite-arc-accretion complex)、宝力道弧-增生杂岩(Baolidao arc-accretion complex)、二道井增生杂岩(Erdaojing accretion complex)、温都尔庙俯冲增生杂岩(Ondor Sum subduction-accretion complex)、白乃庙岛弧(Bainaimiao arc)和华北克拉通(North China craton)(图 1-b)。研究区位于内蒙古自治区中部达茂旗满都拉地区的中蒙边界附近,构造单元属二道井增生杂岩。

研究区除蛇绿混杂岩带外,主要出露晚古生代及中生代地层。上石炭统—下二叠统本巴图组(C_2P_1bb)以砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩为主,夹少量灰岩和火山岩;中—下二叠统大石寨组($P_{1-2}ds$)主要为火山沉积岩系,由凝灰岩、凝灰质板岩、粉砂质板岩、英安岩、流纹岩等组成;中二叠统包特格组(P_2b)由一套碎屑岩夹灰岩组成;下白垩统白彦花组(K_1bh)、上白垩统二连组(K_2e)主要由碎屑岩组成,白彦花组中夹煤线。第四系为冲洪积和湖积。见少量二叠纪侵入岩(图 1-c)。

满都拉地区蛇绿混杂岩带东西向断续延长约 100 km,宽几千米至约 20 km,向西与索伦山蛇绿岩相连,两侧与古生代地层均为断层接触。混杂岩带由岩块和基质组成,岩块主要为蛇绿岩组合,另见硅质岩、泥盆纪中酸性火山岩、石炭纪本巴图组灰岩碎屑岩、二叠纪大石寨组碎屑岩等外来岩块等(图 1-c)。岩块规模不等,大者几十平方千米,小者仅数平方米。岩块与基质间一般为断层接触,并有挤压破碎现象。混杂岩带整体构造形迹为近东西向,与区域构造线方向基本一致,局部有变化(图版Ⅰ-a、b)。蛇绿岩组合以变质橄榄岩和玄武岩为主,辉长岩、辉绿岩较少,没有见到完整的层序。

蛇绿混杂岩带的基质主要为硅泥质岩、砂泥互层的复理石建造,以及少量火山碎屑岩建造。受强烈的剪切作用改造,基质的构造变形非常强烈,在细碎屑岩中发育密集的板理(图版Ⅰ-a、b)。碎屑岩沉积构造不发育,常见砂岩与板岩互层,砂岩底部偶见的冲刷构造(重荷模)(图版Ⅰ-c)及含有下部泥岩的泥砾(图版Ⅰ-d)。

2　样品特征

样品 D18003RZ1 采自巴彦敖包北部,地理坐标:

图版Ⅰ Plate Ⅰ

a.超基性岩呈岩块分布在粉砂质板岩中(镜头北西西向);b.玄武岩岩块截切了板岩板理(镜头南东东向);c.砂岩与硅泥质岩互层,砂岩具重荷模构造;d.砂岩底部见泥砾;e.粗粒岩屑砂岩外貌(D18003RZ1);f.绢云母硅质板岩外貌(DC01TW1);g.岩屑砂岩显微镜下特征(正交偏光);h.含粉砂绢云母硅质板岩显微镜下特征(正交偏光)

东经 109°30.472′、北纬 42°25.429′,岩性为灰白色粗粒岩屑杂砂岩(图版Ⅰ-e),粗粒砂状结构,块状构造,岩石由砂屑(85%)、填隙物(15%)组成。砂屑粒径以 0.5~1.5 mm 为主,其次为 0.1~0.5 mm,以粗砂为主,分选性较好,多呈次棱角—次圆状,磨圆度一般,颗粒支撑、杂基填隙、孔隙式胶结。砂屑:石英(包括少量硅质岩及微粒石英岩等)30%,长石 15%,岩屑 40%;填隙物:粉砂 10%,绢云母 5%,铁质少量。岩屑主要为变质泥质硅质岩、变质硅质泥质岩、变质粉砂岩、变质泥质粉砂岩、泥质板岩、绢云

母板岩、英安岩、安山岩及少量白云母,其中英安岩、安山岩等火山岩类占岩屑的 20%~30%(图版Ⅰ-g)。该岩石发生轻微变质,局部含砾。结合野外宏观地质特征,(含砾)岩屑杂砂岩可能为斜坡扇水道沉积。

样品 DC01TW1 采自查干敖包东,地理坐标:东经 109°54′16"、北纬 42°24′50",岩性为纹层状含粉砂绢云母硅质板岩(图版Ⅰ-f),显微鳞片变晶结构、隐晶状结构,板状构造。岩石主要由显微鳞片状绢云母、隐晶状硅质和粉砂组成。显微鳞片状绢云母小于 0.05 mm,定向分布,为泥质转变而来;隐晶状硅质小于 0.02 mm;粉砂小于 0.06 mm,星散分布,成分主要为石英。岩石发生轻碎裂,裂隙充填次生碳酸盐。显微鳞片状绢云母 40%,隐晶状硅质 50%,粉砂 10%,裂隙充填次生碳酸盐少量(图版Ⅰ-h)。标本硬度较高。

3　分析方法

3.1　LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

锆石分选在河北廊坊区域地质调查院完成,锆石制靶、照相及 U-Pb 定年工作均在内蒙古自治区地质调查院分析测试中心完成。将分离出的锆石颗粒用环氧树脂固定并抛光,使颗粒露出核部,用浓度 3% 的 HNO_3 清洗样品表面,除去表面的污渍,然后进行透射光和反射光照相,并在 Mono CL4+ 阴极发光装置系统上进行阴极发光(CL)照相。锆石测年在多接收电感耦合等离子体质谱仪 Neptune Plus(MC-ICP-MS)(Thermo Fisher)上进行,采用的激光剥蚀系统为 Geolas HD 准分子激光器(Coherent GmbH),激光剥蚀的束斑直径为 32 μm,能量密度为 10 J/cm^2,频率为 6 Hz,激光剥蚀物质以氦气为载气送入 Neptune Plus,每个分析点的气体背景采集时间为 3 s,信号采集时间为 26 s。锆石标样采用 GJ-1、91500 或 Plešovice 标准锆石。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序和 Isoplot 程序进行分析和作图,采用^{208}Pb 对普通铅进行校正。利用 NIST610 为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。具体测试过程详见 Liu et al.(2010)。

3.2　锆石 Hf 同位素测试

锆石 Hf 同位素测试在内蒙古自治区地质调查院分析测试中心完成。锆石 Lu-Hf 同位素含量及比值分析采用的质谱仪和激光器与 U-Pb 定年设备相同。采用氦气作为实验过程中剥蚀物质载气,激光剥蚀束斑直径采用 32 μm,激光剥蚀时间约为 27 s。详细的分析过程及干扰修正与吴福元等(2007)相同。所有的 Lu-Hf 分析点都位于相同的 CL 域中,且尽可能接近 U-Pb 分析点。

4　分析结果

4.1　锆石 U-Pb 测年

样品 D18003RZ1 的锆石测年数据见表 1,典型锆石 CL 图像见图 2。大部分锆石保留了岩浆结晶锆石原有的长柱状晶体形态及岩浆结晶成因的振荡环带,仅少量锆石边缘具有明显的磨圆,客观上反映了其快速沉积、物源区较近的特点。个别锆石边部发育细窄增生边和残留的晶核结构,呈现锆石在搬运沉积前经历了变质事件或遭受岩浆捕获(反映多期岩浆事件)再沉积锆石的特点。Th/U 值介于 0.28~1.02 之间,多数大于 0.4,说明绝大多数锆石应为岩浆结晶锆石,与 CL 图像分析结果一致。在所分析的 80 粒锆石中,有 76 粒具有谐和、基本谐和(谐和度>90%)的年龄,分布于 130~2302 Ma 之间(大于 1.0 Ga 采用^{207}Pb/^{206}Pb 年龄;小于 1.0 Ga 采用^{206}Pb/^{238}U 年龄),其中 71 粒锆石年龄在 272~482 Ma

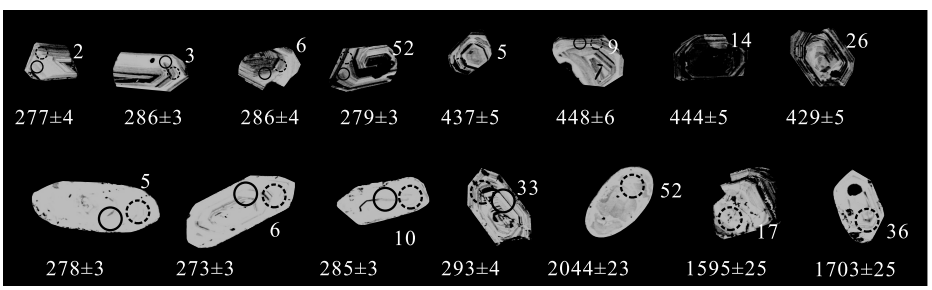

图 2　满都拉地区碎屑岩典型锆石阴极发光(CL)图像(年龄单位为 Ma,虚线为 U-Pb 点位,实线为 Lu-Hf 点位)

Fig. 2　CL images of detrital zircon of clastic rocks in Mandula area

表1 样品D18003RZ1碎屑锆石U-Th-Pb同位素数据

Table 1 Detrital zircon U-Th-Pb data of greywacke of D18003RZ1

样品号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
D18003RZ1.1	14	189	104	0.56	0.07074	0.00088	0.57810	0.01337	0.05922	0.00120	441	5	463	11	575	44
D18003RZ1.2	10	207	141	0.70	0.04391	0.00056	0.31686	0.01188	0.05238	0.00185	277	4	279	10	302	80
D18003RZ1.3	11	222	144	0.67	0.04534	0.00055	0.34232	0.00946	0.05474	0.00139	286	3	299	8	402	57
D18003RZ1.5	18	232	137	0.60	0.07012	0.00085	0.59625	0.01253	0.06169	0.00113	437	5	475	10	663	39
D18003RZ1.6	7	148	86	0.60	0.04542	0.00056	0.36451	0.01367	0.05833	0.00210	286	4	316	12	542	79
D18003RZ1.7	17	227	152	0.69	0.06986	0.00086	0.54833	0.01167	0.05704	0.00107	435	5	444	9	493	41
D18003RZ1.8	24	296	204	0.71	0.07241	0.00091	0.54610	0.01125	0.05473	0.00095	451	6	442	9	401	39
D18003RZ1.9	11	141	98	0.71	0.07205	0.00090	0.53249	0.01489	0.05359	0.00138	448	6	433	12	354	58
D18003RZ1.10	10	134	64	0.49	0.07163	0.00086	0.54987	0.01624	0.05564	0.00153	446	5	445	13	438	61
D18003RZ1.11	10	138	85	0.63	0.06953	0.00085	0.48264	0.01408	0.05047	0.00138	433	5	400	12	217	63
D18003RZ1.12	7	139	100	0.74	0.04489	0.00056	0.31454	0.01324	0.05092	0.00204	283	4	278	12	237	92
D18003RZ1.13	10	133	58	0.44	0.07431	0.00092	0.56115	0.01578	0.05485	0.00142	462	6	452	13	406	58
D18003RZ1.14	28	380	180	0.48	0.07130	0.00087	0.53683	0.00981	0.05470	0.00084	444	5	436	8	400	34
D18003RZ1.15	12	149	72	0.49	0.07617	0.00094	0.59293	0.01497	0.05653	0.00129	473	6	473	12	473	51
D18003RZ1.16	52	194	105	0.56	0.24714	0.00303	3.03166	0.05228	0.08899	0.00122	1424	17	1416	24	1404	26
D18003RZ1.17	28	371	266	0.74	0.06759	0.00082	0.53017	0.01000	0.05693	0.00090	422	5	432	8	489	35
D18003RZ1.18	10	133	87	0.67	0.07048	0.00086	0.56720	0.01698	0.05857	0.00165	439	5	456	14	551	61
D18003RZ1.19	11	140	82	0.60	0.07111	0.00087	0.49305	0.01543	0.05028	0.00149	443	5	407	13	208	69
D18003RZ1.20	8	126	125	1.02	0.05021	0.00060	0.35831	0.01545	0.05176	0.00217	316	4	311	13	275	96
D18003RZ1.21	11	142	118	0.85	0.06880	0.00083	0.54656	0.01520	0.05759	0.00147	429	5	443	12	514	56
D18003RZ1.24	11	147	90	0.63	0.06817	0.00083	0.51028	0.01521	0.05435	0.00152	425	5	419	12	385	63
D18003RZ1.25	20	242	171	0.73	0.07327	0.00091	0.58491	0.01248	0.05774	0.00103	456	6	468	10	520	39
D18003RZ1.26	20	284	122	0.44	0.06888	0.00083	0.51587	0.01042	0.05435	0.00095	429	5	422	9	386	39
D18003RZ1.27	12	166	98	0.61	0.06867	0.00083	0.48155	0.01291	0.05100	0.00127	428	5	399	11	241	58
D18003RZ1.28	10	197	156	0.81	0.04483	0.00057	0.31355	0.01129	0.05055	0.00169	283	4	277	10	220	78
D18003RZ1.29	4	82	49	0.61	0.04313	0.00055	0.32238	0.02466	0.05366	0.00398	272	3	284	22	357	168
D18003RZ1.30	13	175	102	0.60	0.06909	0.00084	0.51715	0.01288	0.05431	0.00122	431	5	423	11	384	50
D18003RZ1.31	36	533	156	0.30	0.06839	0.00081	0.51929	0.00919	0.05514	0.00083	426	5	425	8	418	34
D18003RZ1.32	26	360	97	0.28	0.07255	0.00089	0.54777	0.01056	0.05479	0.00089	451	6	444	9	404	36
D18003RZ1.33	27	363	190	0.54	0.07049	0.00084	0.52514	0.01021	0.05411	0.00092	439	5	429	8	376	38
D18003RZ1.34	46	639	278	0.45	0.06977	0.00083	0.53321	0.00945	0.05540	0.00081	435	5	434	8	429	32
D18003RZ1.35	30	411	158	0.39	0.07117	0.00086	0.54694	0.01025	0.05574	0.00088	443	5	443	8	442	35
D18003RZ1.36	17	216	154	0.73	0.07210	0.00087	0.55910	0.01308	0.05618	0.00116	449	5	451	11	460	46
D18003RZ1.37	17	213	101	0.49	0.07606	0.00092	0.58504	0.01337	0.05576	0.00113	473	6	468	11	443	45
D18003RZ1.38	19	247	183	0.76	0.07084	0.00084	0.49255	0.01115	0.05051	0.00104	441	5	407	9	219	48
D18003RZ1.39	53	716	275	0.39	0.07230	0.00087	0.54584	0.00960	0.05476	0.00078	450	5	442	8	402	32

续表 1

样品号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
D18003RZ1.40	6	128	83	0.67	0.04525	0.00055	0.33260	0.01833	0.05313	0.00286	285	3	292	16	334	122
D18003RZ1.41	17	225	112	0.51	0.07091	0.00086	0.54343	0.01233	0.05566	0.00113	442	5	441	10	439	45
D18003RZ1.42	7	151	101	0.68	0.04350	0.00052	0.30111	0.01343	0.05004	0.00215	274	3	267	12	197	100
D18003RZ1.43	94	192	94	0.50	0.44030	0.00528	8.87600	0.14801	0.14623	0.00194	2352	28	2325	39	2302	23
D18003RZ1.44	13	174	59	0.35	0.07391	0.00089	0.55196	0.01536	0.05412	0.00137	460	6	446	12	376	57
D18003RZ1.45	21	277	174	0.64	0.07026	0.00083	0.53785	0.01204	0.05551	0.00110	438	5	437	10	433	44
D18003RZ1.46	16	213	132	0.64	0.06971	0.00083	0.49303	0.01236	0.05134	0.00118	434	5	407	10	256	53
D18003RZ1.47	11	237	118	0.51	0.04523	0.00055	0.32431	0.01026	0.05202	0.00155	285	3	285	9	286	68
D18003RZ1.48	5	222	161	0.74	0.02035	0.00025	0.13138	0.00919	0.04680	0.00327	130	2	125	9	39	167
D18003RZ1.49	29	402	164	0.42	0.07084	0.00084	0.54729	0.01027	0.05605	0.00089	441	5	443	8	454	35
D18003RZ1.50	22	302	123	0.42	0.06959	0.00083	0.57317	0.01206	0.05998	0.00116	434	5	460	10	603	42
D18003RZ1.51	44	617	226	0.38	0.07043	0.00087	0.56782	0.01046	0.05837	0.00085	439	5	457	8	544	32
D18003RZ1.52	15	330	157	0.49	0.04431	0.00053	0.29938	0.00790	0.04907	0.00120	279	3	266	7	151	57
D18003RZ1.53	37	515	203	0.40	0.07067	0.00085	0.54391	0.00985	0.05580	0.00083	440	5	441	8	444	33
D18003RZ1.54	28	376	161	0.44	0.07324	0.00090	0.56765	0.01118	0.05618	0.00093	456	6	456	9	459	37
D18003RZ1.55	16	198	71	0.37	0.07767	0.00105	0.55449	0.01696	0.05186	0.00138	482	7	448	14	279	61
D18003RZ1.56	22	299	99	0.34	0.07194	0.00086	0.55645	0.01136	0.05609	0.00099	448	5	449	9	456	39
D18003RZ1.57	133	383	161	0.43	0.32418	0.00389	4.99200	0.08325	0.11171	0.00148	1810	22	1818	30	1828	24
D18003RZ1.58	28	105	52	0.51	0.24881	0.00292	3.09672	0.05384	0.09034	0.00131	1432	17	1432	25	1433	28
D18003RZ1.59	23	301	161	0.55	0.07092	0.00085	0.55350	0.01146	0.05665	0.00103	442	5	447	9	478	40
D18003RZ1.60	13	166	83	0.52	0.07178	0.00086	0.56302	0.01563	0.05689	0.00146	447	5	453	13	487	57
D18003RZ1.61	16	336	123	0.37	0.04547	0.00054	0.33146	0.00836	0.05293	0.00125	287	3	291	7	326	53
D18003RZ1.62	12	226	83	0.38	0.05165	0.00061	0.37043	0.01094	0.05197	0.00146	325	4	320	9	284	64
D18003RZ1.63	18	235	88	0.38	0.07348	0.00089	0.56762	0.01393	0.05614	0.00125	457	6	456	11	458	49
D18003RZ1.64	16	205	111	0.56	0.07232	0.00088	0.53581	0.01416	0.05364	0.00127	450	5	436	12	356	53
D18003RZ1.65	13	280	157	0.58	0.04382	0.00053	0.33978	0.00977	0.05632	0.00152	276	3	297	9	465	60
D18003RZ1.66	17	231	110	0.49	0.06938	0.00082	0.53852	0.01295	0.05620	0.00121	432	5	437	11	460	48
D18003RZ1.67	21	458	254	0.57	0.04414	0.00054	0.30832	0.00688	0.05072	0.00100	278	3	273	6	228	45
D18003RZ1.68	13	180	79	0.45	0.07198	0.00088	0.56913	0.01508	0.05744	0.00140	448	5	457	12	508	54
D18003RZ1.69	33	442	197	0.46	0.07254	0.00089	0.55660	0.01045	0.05564	0.00086	451	6	449	8	438	34
D18003RZ1.70	20	248	132	0.55	0.07442	0.00096	0.61544	0.01627	0.05986	0.00136	463	6	487	13	599	49
D18003RZ1.71	13	183	87	0.49	0.06835	0.00083	0.51853	0.01418	0.05519	0.00139	426	5	424	12	420	56
D18003RZ1.73	50	690	232	0.35	0.07192	0.00088	0.54832	0.00988	0.05531	0.00081	448	5	444	8	425	33
D18003RZ1.74	11	142	61	0.44	0.07340	0.00092	0.59423	0.01666	0.05884	0.00150	457	6	474	13	561	56
D18003RZ1.75	15	203	95	0.48	0.06997	0.00082	0.60436	0.01463	0.06267	0.00138	436	5	480	12	697	47
D18003RZ1.76	19	258	129	0.52	0.06843	0.00079	0.55161	0.01154	0.05853	0.00109	427	5	446	9	549	41
D18003RZ1.77	25	318	224	0.72	0.07050	0.00085	0.56659	0.01157	0.05831	0.00103	439	5	456	9	541	39
D18003RZ1.78	24	525	189	0.37	0.04573	0.00057	0.30835	0.00644	0.04898	0.00088	288	4	273	6	147	42
D18003RZ1.79	20	419	146	0.36	0.04645	0.00060	0.32515	0.00857	0.05075	0.00114	293	4	286	8	229	52
D18003RZ1.80	36	483	206	0.44	0.07195	0.00087	0.53356	0.01000	0.05379	0.00084	448	5	434	8	362	35

之间,可进一步划分为2组:①17个年龄在272~325 Ma之间,峰值年龄为280 Ma,年龄加权平均值为282.0±3.1 Ma;②54个年龄分布在422~482 Ma之间,峰值年龄为440 Ma,年龄加权平均值为442.8±3.3 Ma。其余还包括130±2 Ma(n=1)(可能为后期热液交代蚀变成因),1404~1433 Ma(n=2),1828±24 Ma(n=1),2302±23 Ma(n=1)。具谐和、基本谐和同位素组成的锆石表面年龄谐和图及频率图见图3-a~d。最年轻的272 Ma代表其最大沉积年龄。

样品DC01TW1锆石测年数据见表2。锆石呈柱状或粒状,粒径50~200 μm,部分锆石具中等磨圆度,具远距离搬运或再沉积特征,CL图像显示大部分锆石具明显的环带,为岩浆成因,部分锆石内部结构构造不清晰,可能为变质锆石(部分可能与本次CL照相质量有关),还有部分锆石颜色较暗,显示Th、U含量较高(图2)。碎屑锆石共测点70个,其中有效数据及谐和度大于90%的48个,260~296 Ma(n=16),301~353 Ma(n=8),370 Ma(n=1),611 Ma(n=1),832 Ma(n=1),1560~1775 Ma(n=11),1808~2158 Ma(n=10)。锆石年龄小于1.0 Ga的采用$^{206}Pb/^{238}U$年龄,其Th/U值多大于0.35,为岩浆成因锆石;大于1.0 Ga的采用$^{206}Pb/^{207}Pb$年龄,其Th/U值在0.003~1.32之间,有变质成因锆石,也有岩浆成因锆石。主要峰值年龄为270 Ma,次要峰值年龄为1600 Ma和1850 Ma,其中最年轻一组锆石的年龄加权平均值为273.8±5.5 Ma(图3-e、f)。最小的260 Ma代表其最大沉积年龄。

4.2 锆石Hf同位素

样品D18003RZ1,选取年龄在272~482 Ma之间的20颗锆石进行Lu-Hf同位素分析,结果见表3。其中,年龄为431~456 Ma的锆石$^{176}Hf/^{177}Hf$值介于0.282661~0.282797之间,$\varepsilon_{Hf}(t)$值介于6.4~10.7之间,加权平均值为7.3±0.8,亏损地幔Hf模式年龄(T_{DM1})介于724~824 Ma之间,平均地壳两阶段模式年龄(T_{DM2})介于801~1155 Ma之间。年龄为272~286 Ma锆石的$^{176}Hf/^{177}Hf$值介于0.282554~0.282768之间,$\varepsilon_{Hf}(t)$介于-1.5~5.9之间,加权平均值为1.8±0.9,亏损地幔Hf模式年龄(T_{DM1})介于687~979 Ma之间,平均地壳两阶段模式年龄(T_{DM2})介于1069~1575 Ma之间。

样品DC01TW1,同位素年龄在263~293 Ma之间的锆石$^{176}Hf/^{177}Hf$值介于0.282434~0.282805之间,$\varepsilon_{Hf}(t)$值介于-6.0~7.1之间,亏损地幔Hf模式年龄(T_{DM1})介于633~1153 Ma之间,平均地壳两阶段模式年龄(T_{DM2})介于930~1894 Ma之间(表3)。

5 讨 论

5.1 锆石物源

(1)2件样品均有早中二叠世的碎屑锆石年龄,峰值年龄分别为282 Ma(D18003RZ1)和270 Ma(DC01TW1),Th/U值及CL图像均反映其为岩浆成因锆石。2个样品中的早中二叠世锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$可分为2组,一是介于-6.0~2.0之间,其两阶段模式年龄(T_{DM2})介于1296~1894 Ma之间,反映岩浆的源区可能来自古老的陆壳或壳幔混合来源,华北陆块北缘晚古生代火成岩因古老的地壳物质加入,其$\varepsilon_{Hf}(t)$绝大部分为负值,且有较老的二阶段Hf模式年龄(大部分为古元古代—太古宙)(王芳等,2009;谷丛楠,2012;马旭等,2012;Chen et al.,2016;朱俊宾等,2017),因此,样品锆石Hf同位素接近古元古代的两阶段模式年龄,可能与华北陆块古老变质结晶基底无关,而与兴蒙造山带中锡林浩特微陆块有关。二是在4.4~7.1之间,两阶段模式年龄(T_{DM2})介于930~1133 Ma之间,岩浆可能主要来源于新生地壳,是兴蒙造山带显生宙岩浆岩普遍具有的特征。在图4中,前者落在球粒陨石线附近及兴蒙造山带与华北克拉通重叠区域,DC01TW1中的1个样品点落在1.8 Ga地壳演化线附近,后者主要落在兴蒙造山带区。

该年龄可以与内蒙古中部地区兴蒙造山带早中二叠世的岩浆事件对应。白乃庙岛弧与温都尔庙俯冲增生杂岩带出露较少,闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩年龄为267~294 Ma(刘军等,2014;蒋孝君等,2017;高征西等,2019)。二道井增生杂岩以北早中二叠世侵入岩大面积出露,锡林浩特地区闪长岩年龄为275 Ma、花岗闪长岩年龄为288 Ma、晶洞碱长花岗岩年龄为276 Ma,西乌旗二长花岗岩年龄为280~282 Ma(周文孝,2012);苏左旗北部白音乌拉等地碱性花岗岩年龄为277~286 Ma,红格尔-白音乌拉花岗岩年龄为276~298 Ma(洪大卫等,1994;刘翼飞等,2012;石玉若等,2014;张祥信等,2017)。

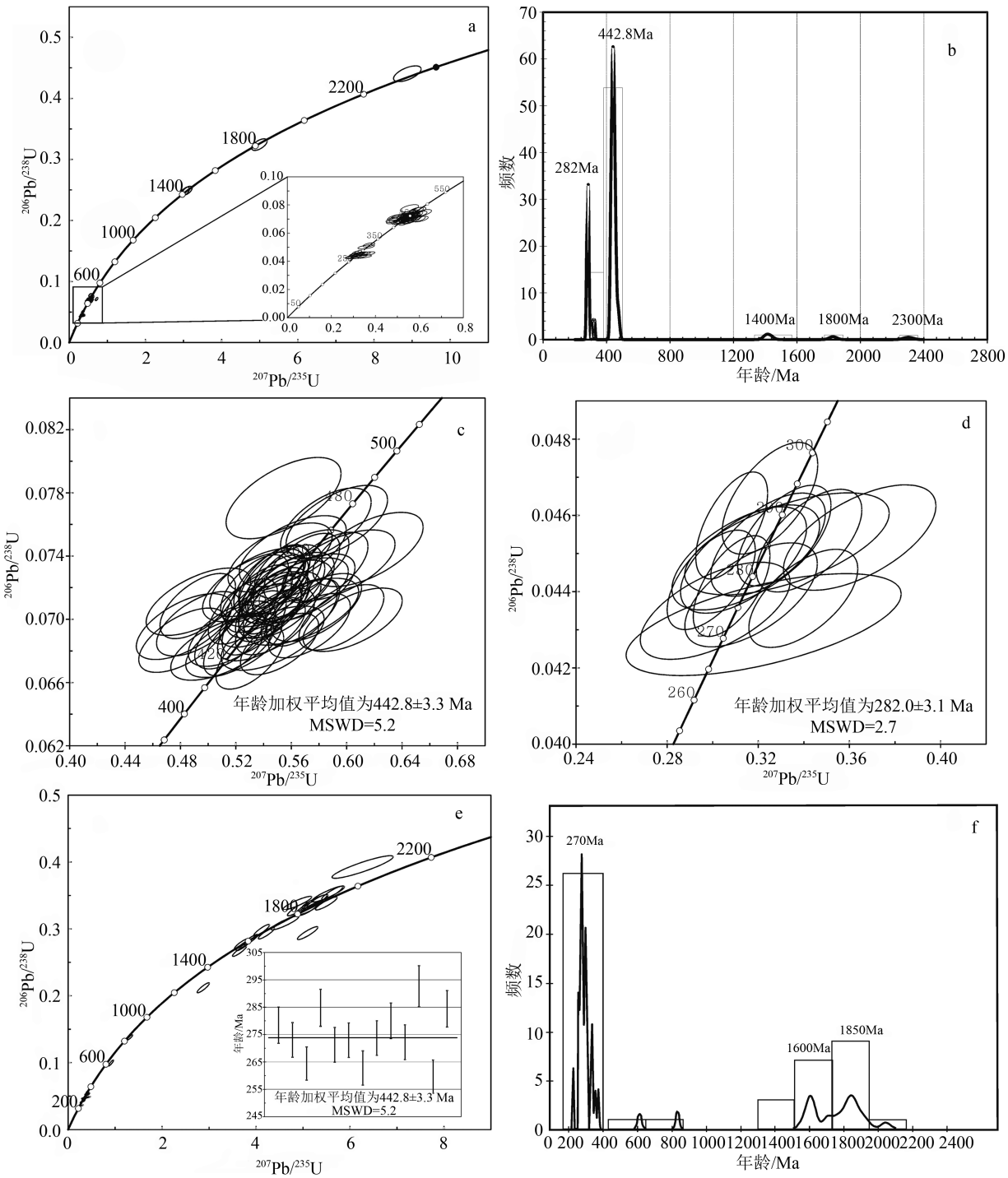

图 3　满都拉地区碎屑锆石年龄谐和图和频率分布图

(a、b 分别为样品 D18003RZ1 碎屑锆石谐和图与频率分布图;c、d 分别为样品 D18003RZ1 碎屑锆石 2 个峰值年龄谐和图;e、f 分别为样品 DC01TW1 碎屑锆石谐和图与频率分布图)

Fig. 3　Concorde age chart and age frequency distribution of detrital zircon in Mandula area

表2 样品DC01TW1碎屑锆石U-Th-Pb同位素数据

Table 2 Detrital zircon U-Th-Pb data of DC01TW1

样品号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
DC01TW1.3	13	33	30	0.932880	0.331132	0.003872	5.157890	0.096436	0.112921	0.001772	1844	22	1846	35	1847	28
DC01TW1.4	8	157	77	0.506234	0.048203	0.000581	0.345992	0.011277	0.052119	0.001591	303	4	302	10	291	70
DC01TW1.5	14	283	185	0.669753	0.044139	0.000524	0.322905	0.007706	0.053173	0.001145	278	3	284	7	336	49
DC01TW1.6	18	419	145	0.353943	0.043263	0.000502	0.314631	0.005971	0.052827	0.000878	273	3	278	5	321	38
DC01TW1.8	52	163	171	1.080519	0.266616	0.003176	3.647780	0.060709	0.099316	0.001333	1524	18	1560	26	1611	25
DC01TW1.9	19	444	183	0.422825	0.041871	0.000482	0.291214	0.005662	0.050470	0.000858	264	3	260	5	217	39
DC01TW1.10	8	164	96	0.598728	0.045169	0.000536	0.348728	0.010902	0.056053	0.001649	285	3	304	9	454	65
DC01TW1.11	13	244	172	0.724571	0.048190	0.000596	0.358599	0.008718	0.054096	0.001196	303	4	311	8	375	50
DC01TW1.12	26	533	411	0.789780	0.042976	0.000504	0.325020	0.006140	0.054785	0.000864	271	3	286	5	403	35
DC01TW1.13	15	46	0.19	0.004268	0.329604	0.004131	4.885521	0.088327	0.107640	0.001581	1836	23	1800	33	1760	27
DC01TW1.14	58	167	174	1.064221	0.283721	0.003252	3.883445	0.063460	0.099314	0.001324	1610	18	1610	26	1611	25
DC01TW1.17	77	327	227	0.712715	0.211875	0.003075	2.877069	0.053663	0.098460	0.001300	1239	18	1376	26	1595	25
DC01TW1.18	12	283	100	0.361858	0.043249	0.000500	0.325651	0.007291	0.054555	0.001086	273	3	286	6	394	45
DC01TW1.19	5	114	80	0.717565	0.041606	0.000494	0.299628	0.013434	0.052233	0.002266	263	3	266	12	296	99
DC01TW1.21	22	57	35	0.625147	0.337927	0.003967	5.496394	0.094534	0.117971	0.001662	1877	22	1900	33	1926	25
DC01TW1.23	8	176	92	0.535832	0.043376	0.000501	0.336350	0.009820	0.056244	0.001546	274	3	294	9	462	61
DC01TW1.24	2	40	45	1.147788	0.047754	0.000620	0.382538	0.038721	0.058972	0.005945	301	4	329	33	566	220
DC01TW1.26	29	80	44	0.566376	0.329714	0.003890	5.128576	0.085900	0.112859	0.001529	1837	22	1841	31	1846	25
DC01TW1.27	42	127	77	0.625425	0.297724	0.003601	4.117572	0.069438	0.100338	0.001345	1680	20	1658	28	1630	25
DC01TW1.28	14	303	156	0.528833	0.044399	0.000513	0.317817	0.006845	0.051946	0.001002	280	3	280	6	283	44
DC01TW1.29	22	196	143	0.746361	0.099499	0.001820	0.913385	0.022032	0.066018	0.001093	611	11	659	16	807	35
DC01TW1.30	5	92	60	0.675284	0.046811	0.000547	0.363166	0.016660	0.056596	0.002530	295	3	315	14	476	99
DC01TW1.32	21	442	284	0.659470	0.043128	0.000503	0.342948	0.007219	0.057891	0.001133	272	3	299	6	526	43
DC01TW1.33	15	277	227	0.840713	0.046451	0.000593	0.329962	0.007778	0.051629	0.001069	293	4	290	7	269	47
DC01TW1.35	6	121	67	0.562145	0.046917	0.000552	0.365227	0.013311	0.056545	0.001989	296	3	316	12	474	78
DC01TW1.36	81	221	258	1.194481	0.293325	0.003455	4.222395	0.070520	0.104365	0.001392	1658	20	1678	28	1703	25
DC01TW1.38	4	74	45	0.626324	0.046766	0.000574	0.347281	0.021142	0.053883	0.003206	295	4	303	18	366	134
DC01TW1.40	6	97	58	0.617057	0.053843	0.000638	0.402469	0.018764	0.053947	0.002361	338	4	343	16	369	99
DC01TW1.41	6	20	2	0.115428	0.308839	0.004207	4.615900	0.120547	0.108521	0.002454	1735	24	1752	46	1775	41
DC01TW1.42	55	151	89	0.604476	0.331172	0.003854	5.044180	0.082890	0.110492	0.001470	1844	21	1827	30	1808	24
DC01TW1.43	7	136	86	0.648264	0.048804	0.000578	0.383676	0.013795	0.056956	0.001935	307	4	330	12	490	75
DC01TW1.44	12	226	285	1.293802	0.041096	0.000481	0.275321	0.008357	0.048551	0.001369	260	3	247	7	126	66
DC01TW1.45	13	231	79	0.353159	0.056322	0.000700	0.406057	0.009553	0.052369	0.001079	353	4	346	8	302	47
DC01TW1.47	21	143	69	0.498591	0.137844	0.001585	1.318193	0.023686	0.069416	0.001069	832	10	854	15	911	32
DC01TW1.50	4	86	91	1.083615	0.035728	0.000434	0.280899	0.018389	0.056864	0.003725	226	3	251	16	486	145
DC01TW1.51	6	17	0	0.003282	0.352097	0.004887	5.534825	0.142626	0.114080	0.002489	1945	27	1906	49	1865	39

续表 2

样品号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
DC01TW1.52	195	664	51	0.078578	0.293560	0.003951	5.099302	0.089392	0.126099	0.001657	1659	22	1836	32	2044	23
DC01TW1.53	41	609	452	0.761021	0.059139	0.000678	0.445439	0.007599	0.054656	0.000778	370	4	374	6	398	32
DC01TW1.54	72	186	80	0.440675	0.353673	0.004107	5.623758	0.091699	0.115370	0.001518	1952	23	1920	31	1886	24
DC01TW1.55	98	289	300	1.064840	0.274925	0.003127	3.722667	0.060253	0.098221	0.001292	1566	18	1576	26	1591	25
DC01TW1.56	30	82	107	1.325305	0.277612	0.003220	3.694617	0.062889	0.096605	0.001367	1579	18	1570	27	1560	27
DC01TW1.58	7	21	0.37	0.340898	0.340898	0.004182	5.254818	0.113789	0.111704	0.002076	1891	23	1862	40	1827	34
DC01TW1.59	6	18	3	0.144534	0.338569	0.004083	4.880976	0.124685	0.104513	0.002420	1880	23	1799	46	1706	43
DC01TW1.61	4	11	0.36	0.033413	0.392469	0.006893	6.269725	0.266563	0.116072	0.004300	2134	37	2014	86	1897	67
DC01TW1.62	36	92	66	0.743241	0.341648	0.003913	5.299891	0.087290	0.112513	0.001519	1895	22	1869	31	1840	24
DC01TW1.65	16	326	221	0.695022	0.045104	0.000527	0.311173	0.006829	0.050032	0.000977	284	3	275	6	196	45
DC01TW1.66	17	298	123	0.422379	0.053259	0.000611	0.429313	0.008756	0.058563	0.001084	334	4	363	7	551	40
DC01TW1.67	14	249	130	0.535801	0.052795	0.000615	0.434507	0.009781	0.059585	0.001185	332	4	366	8	589	43

表 3　满都拉地区碎屑岩碎屑锆石 Lu-Hf 同位素数据

Table 3　Lu-Hf isotopic data of detrital zircon of clastic rock in Mandula area

样品号	样品 U-Pb 年龄/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
D18003RZ1.1	441	0.016668	0.000189	0.000629	0.000010	0.282685	0.000019	−3.1	6.4	795	1101	−0.98
D18003RZ1.2	277	0.041425	0.000836	0.001538	0.000029	0.282607	0.000022	−5.8	0.0	926	1450	−0.95
D18003RZ1.3	286	0.026638	0.000764	0.001045	0.000033	0.282615	0.000020	−5.5	0.5	903	1419	−0.97
D18003RZ1.6	286	0.016620	0.000148	0.000637	0.000002	0.282554	0.000022	−7.7	−1.5	979	1575	−0.98
D18003RZ1.8	451	0.027924	0.000886	0.001059	0.000033	0.282742	0.000021	−1.1	8.5	724	952	−0.97
D18003RZ1.9	448	0.019359	0.000208	0.000818	0.000006	0.282706	0.000020	−2.3	7.3	769	1042	−0.98
D18003RZ1.10	446	0.010791	0.000240	0.000410	0.000006	0.282661	0.000018	−3.9	5.8	824	1155	−0.99
D18003RZ1.12	283	0.021370	0.000118	0.000826	0.000002	0.282750	0.000018	−0.8	5.3	708	1069	−0.98
D18003RZ1.18	439	0.017887	0.000153	0.000683	0.000008	0.282701	0.000021	−2.5	7.0	774	1061	−0.98
D18003RZ1.19	443	0.015412	0.000090	0.000608	0.000006	0.282687	0.000021	−3.0	6.6	792	1094	−0.98
D18003RZ1.25	456	0.018456	0.000311	0.000801	0.000011	0.282797	0.000020	0.9	10.7	642	801	−0.98
D18003RZ1.28	283	0.031535	0.000340	0.001285	0.000011	0.282727	0.000024	−1.6	4.4	749	1133	−0.96
D18003RZ1.29	272	0.013531	0.000413	0.000526	0.000014	0.282591	0.000020	−6.4	−0.5	924	1490	−0.98
D18003RZ1.30	431	0.013242	0.000333	0.000512	0.000010	0.282690	0.000019	−2.9	6.4	786	1094	−0.98
D18003RZ1.33	439	0.025141	0.000882	0.000960	0.000029	0.282725	0.000018	−1.7	7.7	746	1005	−0.97
D18003RZ1.35	443	0.015383	0.000194	0.000558	0.000004	0.282700	0.000020	−2.5	7.1	773	1058	−0.98
D18003RZ1.40	285	0.028353	0.001121	0.001071	0.000034	0.282768	0.000024	−0.1	5.9	687	1022	−0.97
D18003RZ1.42	274	0.019685	0.000109	0.000760	0.000006	0.282741	0.000020	−1.1	4.8	719	1099	−0.98
D18003RZ1.47	285	0.019469	0.000094	0.000765	0.000003	0.282556	0.000020	−7.6	−1.5	978	1570	−0.98
D18003RZ1.52	279	0.024831	0.000317	0.000903	0.000006	0.282618	0.000020	−5.4	0.5	895	1415	−0.97
DC01TW1.5	278	0.020933	0.001258	0.000867	0.000060	0.282434	0.000038	−12.0	−6.0	1153	1894	−0.97
DC01TW1.6	273	0.021175	0.000270	0.000945	0.000008	0.282605	0.000022	−5.9	−0.1	914	1455	−0.97
DC01TW1.9	264	0.027713	0.000265	0.001098	0.000005	0.282670	0.000025	−3.6	2.0	827	1296	−0.97
DC01TW1.10	285	0.026977	0.001386	0.001097	0.000048	0.282657	0.000023	−4.1	2.0	844	1310	−0.97
DC01TW1.12	271	0.047578	0.000370	0.001783	0.000020	0.282784	0.000023	0.4	6.1	678	1000	−0.95
DC01TW1.18	273	0.041334	0.001463	0.001452	0.000046	0.282804	0.000029	1.1	6.9	643	943	−0.96
DC01TW1.19	263	0.015566	0.000059	0.000599	0.000001	0.282745	0.000023	−0.9	4.7	710	1097	−0.98
DC01TW1.23	274	0.016641	0.000204	0.000760	0.000010	0.282622	0.000020	−5.3	0.6	886	1409	−0.98
DC01TW1.28	280	0.019465	0.000124	0.000948	0.000007	0.282805	0.000022	1.2	7.1	633	930	−0.97
DC01TW1.33	293	0.029320	0.000387	0.001319	0.000018	0.282653	0.000021	−4.2	2.0	855	1317	−0.96

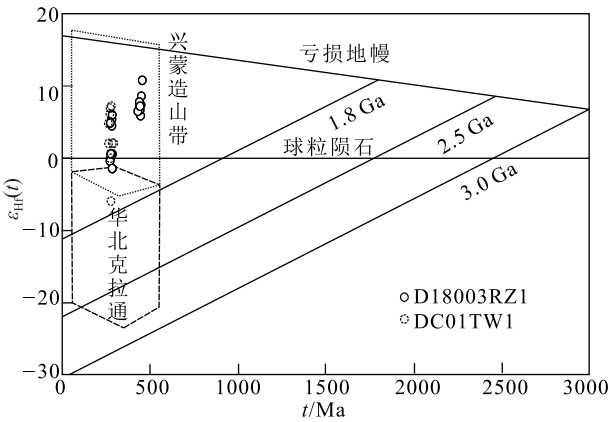

图4 满都拉地区碎屑锆石 t–$\varepsilon_{Hf}(t)$ 图解

(兴蒙造山带及华北克拉通范围据 Chen et al.,2006)

Fig. 4 t–$\varepsilon_{Hf}(t)$ diagram of detrital zircon in Mandula area

另外,区域上分布的大石寨组玄武岩、玄武安山岩同位素年龄为272~281 Ma,流纹岩年龄为271~274 Ma(周文孝,2012;梅可辰等,2015);宝力高庙组玄武安山岩年龄289 Ma、流纹岩年龄为287 Ma(Zhang et al.,2011)。

(2)在D18003RZ1中分布有大量早古生代的锆石年龄422~482 Ma(n=54),占有效点数的76%,峰值为442.8 Ma,亦为岩浆成因锆石。与二道井增生杂岩南北两侧的早古生代岛弧火成岩的形成时代可以对应。南侧白乃庙岛弧西段达茂旗巴特敖包地区闪长岩-花岗闪长岩系列具埃达克岩特征,形成年龄为417~472 Ma(许立权等,2003;张维等,2007;Jian et al.,2010;冯晓曦等,2014);中段白乃庙地区早古生代侵入岩年龄为425~497 Ma(刘敦一等,2003;Miao et al.,2007; Jian et al.,2010),白乃庙组变质火山岩形成年龄为449 Ma(柳长峰等,2014)。北侧宝力道弧增生杂岩带在苏左旗白音宝力道地区中酸性侵入岩中均有不同程度出露,成岩年龄为423~498 Ma(Chen et al.,2000; Jian et al.,2010;石玉若等,2014;唐建洲等,2018);蒙古国索伦山附近花岗闪长岩年龄为454 Ma(石玉若等,2014);锡林浩特地区包尔汗图群火山岩年龄为411 Ma(周文孝,2012)。

锆石年龄431~456 Ma的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于6.4~10.7之间,两阶段模式年龄(T_{DM2})介于801~1155 Ma之间,表明其源区主要是兴蒙造山带。在图4中,样品点全部落在兴蒙造山带区。

(3)2件样品中均有石炭纪锆石年龄,DC01TW1中还有611 Ma、832 Ma两个新元古代年龄。石炭纪火成岩主要分布在二道井增生杂岩带北侧,二连浩特地区石炭纪花岗岩年龄为307~317 Ma(许立权等,2012),苏左旗地区石炭纪侵入岩年龄为309~364 Ma(石玉若等,2014;祝洪臣等,2005;肖中军等,2015),锡林浩特—西乌旗地区石炭纪侵入岩年龄为313~330 Ma(周文孝,2012),宝力高庙组火山岩同位素年龄为307~309 Ma(李可等,2014)。在华北陆块北缘四子王旗地区出露有302~331 Ma的基性岩体(周志广等,2009)。新元古代的锆石可能来自锡林浩特地块或再沉积锆石,锡林浩特变质辉长岩年龄为739 Ma(葛梦春等,2011)。

(4)样品DC01TW1中分布有1600 Ma和1850 Ma两个峰值年龄(1560~2158 Ma,n=23),占有效点数的46%。在D18003RZ1中也有少量1404~1433 Ma(n=2)、1828 Ma(n=1)、2302 Ma(n=1)的锆石年龄。Th/U值和CL图像表明,这些锆石有岩浆成因,也有变质成因。中元古代锆石的可能源区有2个,一是华北陆块,固阳石英正长岩年龄为1702 Ma(王惠初等,2005)、花岗岩年龄为1720 Ma(康健丽等,2020),狼山宝音图片麻状二长花岗岩同位素年龄为1672 Ma(孙立新等,2013a);二是兴蒙造山带,锡林浩特微陆块片麻状花岗岩年龄为1371~1399 Ma、1516 Ma(孙立新等,2013b;2018),南蒙古微陆块片麻状花岗岩年龄为1784 Ma(石玉若等,2014),阿巴嘎旗乌力吉敖包二长花岗岩成岩年龄为1686 Ma,乌兰敖包组碎屑锆石峰值年龄为1696 Ma(苏茂荣等,2020)。古元古代锆石可能主要来源于南侧的华北陆块结晶基底,关于白云鄂博—固阳地区古元古代岩浆锆石、变质锆石及碎屑锆石年龄有大量的文献数据,如王惠初等(2005)、钟长汀(2006)、董春燕等(2012;2021)、马铭株等(2012)、李长海等(2020)及其所引文献,此处不再赘述。

(5)图5是研究区碎屑锆石年龄谱同西拉木伦河两侧造山带中碎屑岩、华北克拉通基底年龄谱的对比。研究区碎屑岩与西拉木伦河两侧造山带碎屑岩有基本一致的古生代阶段的碎屑锆石年龄谱系,反映了兴蒙造山带古生代的岩浆事件,而前寒武纪有明显差异,最主要的是缺少太古宙的碎屑锆石年龄信息,可能说明满都拉-索伦山蛇绿混杂岩带

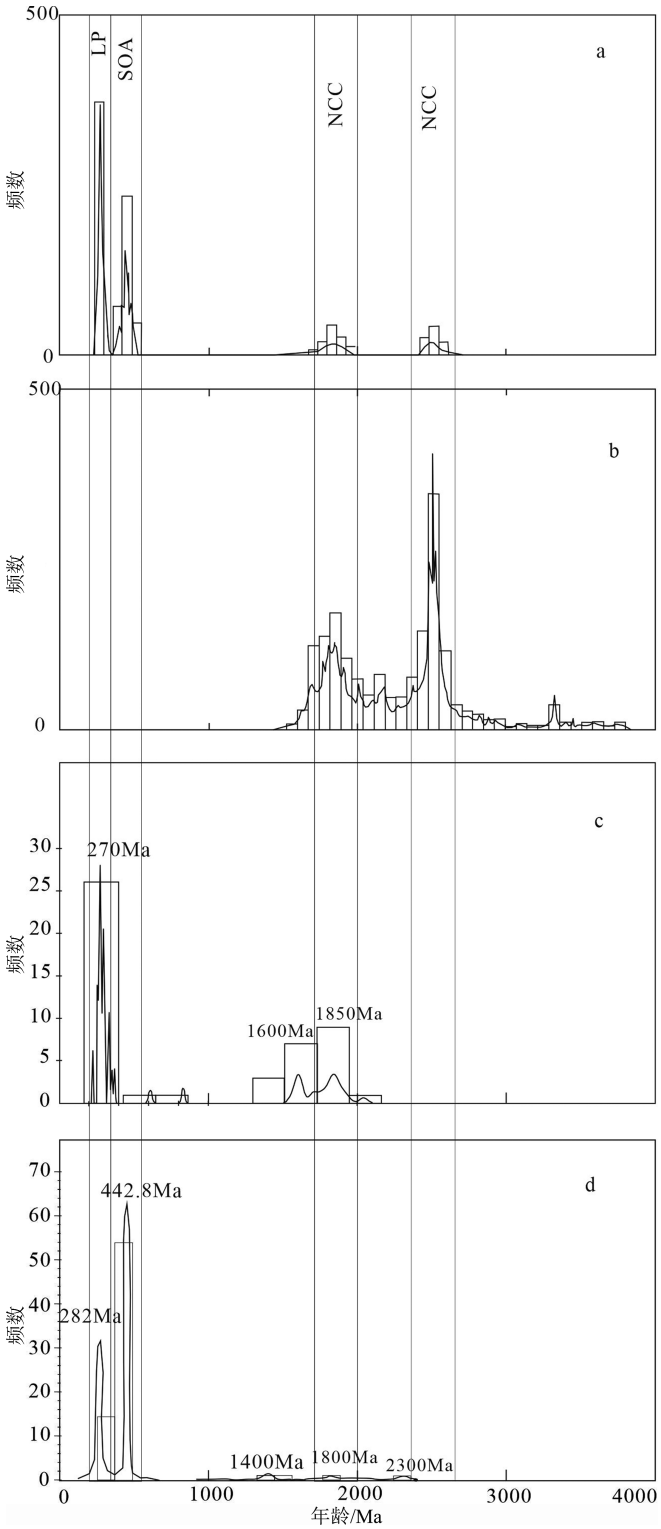

图 5　碎屑锆石年龄谱系对比图

(a 为西拉木伦河两侧造山带,1010 个年龄数据,据 Eizenhofer et al.,2014; b 为华北克拉通,1797 个年龄数据,据 Eizenhofer et al.,2014; c 为样品 DC01TW1;d 为样品 D18003RZ1)

Fig. 5　Comparisions of detrital zircon U-Pb age

NCC—华北克拉通;SOA—南侧增生造山带;LP—晚二叠世

不同于西拉木伦带。

上述分析表明,2 件样品碎屑锆石的物源区有一致性也有差异性。D18003RZ1 以古生代碎屑锆石为主(占比 90%),少量为古中元古代的,其物源主要来自兴蒙造山带及其中的微陆块。而 DC01TW1 以晚古生代(占比 48%)和古中元古代(占比 46%)为主,反映其物源区可能以兴蒙造山带和华北陆块并重,也说明洋盆在中二叠世末(碎屑锆石最小年龄 260 Ma)进一步缩小(或变窄),接受来自两侧的物源供给,但大洋仍然存在。

5.2　碎屑岩形成环境

粗粒岩屑杂砂岩的分选性较好,但磨圆度较差,岩屑占碎屑物总量的 40%,其中火山岩碎屑占岩屑总量的 20%~30%,局部含砾,反映其近源快速沉积特征。碎屑锆石物源以兴蒙造山带古生代火成岩为主。绢云母硅质板岩因含有陆源碎屑-石英粉砂,其可能形成于靠近大陆的边缘海,而非远洋环境,且华北陆块和兴蒙造山带均提供了物源。

碎屑锆石的年龄分布也可以较好地反映沉积环境。当碎屑岩中含有大量与地层形成时代相近的锆石时,地层可能形成于板块汇聚或碰撞环境下的弧前或前陆盆地;当碎屑岩中的锆石年龄大部分大于地层的沉积年龄时,则形成于伸展型盆地(Cawood et al.,2012)。本次研究的 2 个样品的碎屑锆石年龄中,与地层时代相近的和远大于地层沉积年龄的锆石占比相近,可能反映其具有向板块汇聚方向过渡的趋势。

综合岩石的组成、物源及碎屑锆石年龄分布,杂砂岩可能形成时代略早,且靠近岛弧,而绢云母硅质板岩形成时代稍晚,其环境更靠近陆块。

5.3　时　代

前已述及,满都拉地区的这套碎屑岩因包裹有大量的蛇绿岩残片而归为蛇绿混杂岩带或俯冲增生杂岩带,其形成时代有早泥盆世、石炭纪及早中二叠世。

本次在杂砂岩及硅质板岩中获得碎屑锆石最年轻年龄分别为 272 Ma 和 260 Ma,进一步限定其形成的沉积下限可能不早于 272~260 Ma。

对内蒙古中部晚古生代—中生代火成岩的

研究表明,石炭纪—中二叠世(335~267 Ma)为大洋俯冲的岛弧-陆缘弧环境,形成高镁安山岩、前弧玄武岩、O 型埃达克岩、TTG 岩套(Xiao et al.,2003;陶继雄等,2003;许立权,2005;曾俊杰,2009;Jian et al.,2010;赵庆英等,2010;王挽琼等,2013;刘军等,2014;石玉若等,2014;Cai et al.,2020;Li et al.,2020;王帅等,2021);中晚二叠世(268~256 Ma)为俯冲向碰撞转变或碰撞的构造背景,形成高钾钙碱性花岗闪长岩、A 型花岗岩、过铝质石榴子石花岗岩等(章永梅等,2009;柳长峰等,2010;张青伟,2011;王挽琼等,2013);晚二叠世(255~260 Ma)之后为碰撞后伸展背景,形成钙碱性花岗岩类、C 型埃达克岩、A 型花岗岩、钾玄岩等(石玉若等,2007;Jian et al.,2010;罗红玲等,2010;张维等,2010)。

结合火成岩的研究及碎屑锆石 U-Pb 年龄,满都拉地区的这套碎屑岩形成时代可能为晚二叠世,且可能不晚于 256 Ma,是俯冲向碰撞转变的构造背景。也进一步限定了内蒙古中部的古亚洲洋在晚二叠世时依然存在,其演化可能一直持续到晚二叠世末。

6 结 论

(1)内蒙古满都拉地区碎屑岩与西拉木伦河两侧造山带碎屑岩有基本一致的古生代阶段的碎屑锆石年龄谱系,反映了兴蒙造山带古生代的岩浆事件,而前寒武纪有明显差异,最主要的是缺少太古宙的碎屑锆石年龄信息,说明满都拉-索伦山蛇绿混杂岩带可能不同于西拉木伦带。

(2)2 件样品碎屑锆石的物源区有一致性也有差异性。D18003RZ1 以古生代碎屑锆石为主(占比 90%),少量古中元古代,反映其物源以兴蒙造山带为主。DC01TW1 则以晚古生代(占比 48%)和古中元古代(占比 46%)为主,反映其物源区可能以兴蒙造山带和华北陆块并重,也说明洋盆在中二叠世末进一步缩小(或变窄),接受来自两侧的物源供给。

(3)综合岩石的组成、物源及碎屑锆石年龄分布,杂砂岩可能形成时代略早,且靠近岛弧,而绢云母硅质板岩形成时代稍晚,其环境更靠近陆块。

(4)满都拉地区的这套碎屑岩形成时代可能为晚二叠世,且可能不晚于 256 Ma,形成于俯冲向碰撞转变的构造背景,也进一步限定内蒙古中部的古亚洲洋在晚二叠世时依然存在,其演化可能一直延续到晚二叠世末。

注释

①内蒙古自治区地质调查院.1∶25 万满都拉幅区域地质调查[R].2004.

②武警黄金二支队.索伦地区 1∶5 万区调[R].2016.

③内蒙古区调一队.满都拉地区 1∶5 万(K-49-53-A、B、C、D)区调[R].1998.

④内蒙古区调一队,1∶20 万桑根达来幅、查干哈达幅(K-49-XIV.XV)区调报告[R].1980.

参考文献

Cai P R, Wang T, Wang Z Q, et al. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks from eastern Inner Mongolia, NE China: Implications for igneous petrogenesis, tectonic setting, and geodynamic evolution of the south-eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2020, 362/363: 1-14.

Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology, 2012, 40(10): 875-878.

Chen Y, Zhang Z C, Li K, et al. Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Permo-Carboniferous sandstones in central Inner Mongolia, China: Implications for provenance and tectonic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonophysics, 2016, 671: 183-201.

Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting Plaeozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2000, 328: 157-182.

Eizenhöfer P R, Zhao G, Zhang J, et al. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks[J]. Tectonics, 2014, 33: 441-463.

Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. Lithos, 2010, 118: 169-190.

Li Y J, Wang G H, Santosh M, et al. Subduction initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: Evidence from a well preserved intra-oceanic forearc ophiolite fragment in central Inner Mongolia, North China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 535: 116087. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116087.

Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.

Miao L C, Zhang F, Fan W, et al. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt in North China: constraints from geochronology of ophiolites and associated formations[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2007, 280(1): 223-237.

Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia China: Termination of the

central Asian orogenic belt[J].Tectonics,2003,22(6):1069-1086.

Zhang X H,Wilde S A,Zhang H F,et al.Early Permian high-K calc-alkaline volcanic rocks from NW Inner Mongolia, North China: Geochemistry,origin and tectonic implications[J].Journal of Geological Society,2011,168(2):525-543.

董春艳,万渝生,徐仲元,等.华北克拉通大青山地区古元古代晚期孔兹岩系:锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J].科学通报,2012,42(12):1851-1862.

董春艳,马铭株,颉颃强,等.白云鄂博地区早前寒武纪基底岩浆作用和变质作用:锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 LA-MC-ICP-MS Hf 同位素分析[J].岩石学报,2021,37(2):417-432.

冯晓曦,姚书振,王家松,等.内蒙古白乃庙铜钼矿区侵入岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J].地质与勘探,2014,50(2):369-381.

付冬.内蒙古索伦山混杂岩带的厘定:对古亚洲洋晚期俯冲增生过程的启示 [D].中国地质大学博士学位论文,2016:1-89.

高征西,王继春,周路路,等.内蒙古温都尔庙地区早二叠世岛弧型花岗闪长岩的发现:对古亚洲洋闭合的时限约束[J].地球科学,2019,44(10):3178-3192.

葛梦春,周文孝,于洋,等.内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定[J].地学前缘,2011,18(5):182-195.

谷丛楠.内蒙古白乃庙地区锆石年龄和 Hf 同位素特征及其构造意义[D].中国地质大学博士学位论文,2012.

洪大卫,黄怀曾,肖宜君,等.内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J].地质学报,1994,68(3):219-230.

黄汲清,任纪舜,姜春发,等.中国大地构造基本轮廓[J].地质学报,1977,(2):117-135.

蒋孝君,徐仲元,刘正宏,等.内蒙古中部红格尔图地区花岗岩的成因及构造背景-LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学的制约[J].地质通报,2017,35(5):750-765.

康健丽,王惠初,任云伟,等.内蒙古固阳地区白云常合山 A 型花岗岩:年代学、地球化学、Hf 同位素研究及其对 Columbia 超大陆裂解的响应[J].岩石学报,2020,36(8):2431-2446.

李双林,欧阳自远.兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(3):45-54.

李长海,刘正宏,赵庆英,等.内蒙古商都地区白云鄂博群尖山组碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究:对华北克拉通西部陆块北缘前寒武纪地壳演化的制约[J].岩石学报,2020,36(9):2815-2833.

李可,张志诚,冯志硕,等.内蒙古中部巴彦乌拉地区晚石炭世—早二叠世火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J].岩石学报,2014,31(7):2041-2054.

李尚林,王训练,段俊梅,等.内蒙古达茂旗胡吉尔特晚泥盆世蛇绿岩的发现及其地质意义[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(1):18-24.

李钢柱,杨赛红,白宇明,等.内蒙古索伦山蛇绿构造混杂岩中浊积岩系碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[C]//中国古生物地质年会,2015.

李钢柱,王玉净,李成元,等.内蒙古索伦山蛇绿岩带早二叠世放射虫动物群的发现及其地质意义[J].科学通报,2017,62(5):400-406.

梁日暄.内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义[J].中国区域地质,1994,1:37-45.

刘敦一,简平,张旗,等.内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据[J].地质学报,2003,77(3):317-327.

刘军,武广,李铁刚,等.内蒙古镶黄旗哈达庙地区晚古生代中酸性侵入岩的年代学、地球化学、Sr-Nd 同位素组成及其地质意义[J].岩石学报,2014,30(1):95-108.

刘翼飞,聂凤军,江思宏,等.内蒙古苏尼特左旗准苏吉花钼矿床成岩成矿年代学及其地质意义[J].矿床地质,2012,31(1):119-128.

柳长峰,张浩然,於汤森,等.内蒙古中部四子王旗地区北极各岩体锆石定年及其岩石化学特征[J].现代地质,2010,24(1):112-119.

柳长峰,刘文灿,王慧平,等.华北克拉通北缘白乃庙组变质火山岩锆石定年与岩石地球化学特征[J].地质学报,2014,88(7):1273-1287.

柳志华,顾雪祥,章永梅,等.内蒙古索伦山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J].现代地质,2020,34(3):399-417.

罗红玲,吴泰然,赵磊.乌拉特中旗二叠纪 I 型花岗岩类地球化学特征及构造意义[J].北京大学学报(自然科学版),2010,46(50):805-825.

马铭株,万渝生,徐仲元,等.华北克拉通大青山地区古元古代晚期钾长伟晶岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成[J].地质通报,2012,31(6):825-833.

马旭,陈斌,陈家富,等.华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义:岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据[J].中国科学:地球科学,2012,42(12):1830-1850.

梅可辰,李秋根,王宗起,等.内蒙古中部苏尼特左旗大石寨组流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J].地质通报,2015,34(12):2181-2194.

内蒙古地质矿产局.内蒙古区域地质志[M].北京:地质出版社,1991:573-594.

潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等.中国大地构造图说明书(1∶250 万)[M].北京:地质出版社,2015:1-160.

任纪舜,姜春发,张正坤,等.中国大地构造及演化——1∶400 万中国大地构造图简要说明[M].北京:科学出版社,1980:89-104.

邵济安.中朝板块北缘中段地壳演化[M].北京:北京大学出版社,1991:1-136.

石玉若,刘敦一,张旗,等.内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义[J].地质通报,2007,26(2):183-190.

石玉若,刘翠,邓晋福,等.内蒙古中部花岗质岩类年代学格架及该区构造岩浆演化探讨[J].岩石学报,2014,30(11):3155-3171.

苏茂荣,李英雷,刘汇川,等.中亚造山带东段古元古代结晶基底:来自中蒙边境花岗岩和沉积地层的证 据[J].中国地质,2020,47(4):1186-1203.

苏新旭,孟二根,张永清,等.内蒙古达茂旗满都拉地区晚古生代板块活动探讨[J].内蒙古地质,2000,1:17-34.

孙立新,赵凤清,王惠初,等.内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J].地质学报,2013a,87(2):197-207.

孙立新,任邦方,赵凤清,等.内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗质片麻岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J].地质通报,2013b,32(2/3):327-340.

孙立新,任邦方,王树庆,等.内蒙古苏尼特左旗中元古代片麻状花岗岩的成因及大地构造意义[J].地质学报,2018,92(11):2167-2189.

陶继雄,白立兵,宝音乌力吉,等.内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录[J].地质调查与研究,2003,(4):241-249.

陶继雄,苏茂荣,宝音乌力吉,等.内蒙古达尔罕茂明安联合旗满都拉地区索伦山蛇绿混杂岩的特征及构造意义[J].地质通报,2004,23(12):1238-1242.

唐建洲,张志诚,陈彦,等.内蒙古中部苏尼特左旗地区早古生代火成岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其构造意义[J].岩石学报,2018,34(10):2973-2994.

肖中军,王振强,赵春勇,等.内蒙古苏尼特左旗北部阿登锡勒大队一带早石炭世高分异 I 型花岗岩的发现及地质意义[J].地质论评,2015,61(4):777-786.

徐备,王志伟,张立杨,等.兴蒙陆内造山带[J].岩石学报,2018,34(10):2819-2844.

许立权,邓晋福,陈志勇,等.内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义[J].现代地质,2003,17(4):428-434.

许立权.内蒙古白云鄂博—满都拉地区加里东期—华力西期—印支期岩浆岩特征与大地构造演化探讨[D].中国地质大学博士学位论文,2005:1-106.

许立权,鞠文信,刘翠,等.内蒙古二连浩特北部阿仁绍布地区晚石炭世花岗岩 Sr-Yb 分类及其成因[J].地质通报,2012,31(9):1410-1419.

许文良,孙晨阳,唐杰,等.兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J].地球科学,2019,44(5):1620-1646.

王芳,陈福坤,候振辉,等.华北陆块北缘崇礼—赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J].岩石学报,2009,25(11):3057-3074.

王惠,王玉净,陈志勇,等.内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫化石的发现[J].地层学杂志,2005,29(4):368-371.

王惠初,陆松年,赵风清,等.华北克拉通古元古代地质记录及其构造意义[J].地质调查与研究,2005,28(3):129-143.

王帅,李英杰,王金芳,等.内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J].地质通报,2021,40(1):82-94.

王挽琼,徐仲元,刘正宏,等.华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性:来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约[J].岩石学报,2013,29(9):2987-3003.

吴福元,李献华,郑永飞,等.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J].岩石学报,2007,23(2):185-220.

曾俊杰.内蒙古固阳地区晚古生代埃达克花岗岩特征及其地质意义[D].中国地质大学博士学位论文,2009.

张青伟.华北板块北缘中段晚古生代花岗岩类特征及其地质意义[D].吉林大学博士学位论文,2011.

张祥信,魏瑞华,高永丰,等.内蒙古中部红格尔地区二叠纪 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因[J].地球化学,2017,46(6):511-527.

张维,简平,刘敦一,等.内蒙古中部达茂旗地区三叠纪花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和 Hf 同位素特征[J].地质通报,2010,29(7):821-832.

张维.内蒙古达茂旗地区早古生代和早中生代埃达克深成岩 SHRIMP 年代学[D].中国地质科学院博士学位论文,2007.

章永梅,张华锋,刘文灿,等.内蒙古中部四子王旗大庙岩体时代及成因[J].岩石学报,2009,25(12):3165-3181.

赵庆英.内蒙古大青山晚古生代—早中生代花岗岩成因及其形成构造环境[D].吉林大学博士学位论文,2010.

钟长汀.华北克拉通北部中段古元古代花岗岩类地球化学、年代学与构造意义[D].中国地质大学博士学位论文,2006.

周文孝.内蒙古锡林浩特地区古生代岩浆作用的年代学与地球化学研究[D].中国地质大学博士学位论文,2012.

周志广,张华锋,刘还林,等.内蒙中部四子王旗地区基性侵入岩错石锆石定年及其意义[J].岩石学报,2009,25(6):1519-1528.

祝洪臣,庞庆邦.内蒙古中部昌特敖包花岗闪长岩单颗粒锆石 U-Pb 定年[J].地质与勘探,2005,14(1):5-7.

朱俊宾,和政军.兴蒙造山带南缘早—中二叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其构造意义[J].地质通报,2017,36(2/3):358-371.