文章编号：1004—5589（2017）02—0428—13

内蒙古温都尔庙地区白音诺尔一带变质基性火山岩年代学和地球化学研究

李尚启[1]，陈跃军[2]，韩仁道[3]，李森林[1]，石强[1]，吴国学[1]

1. 吉林大学 地球科学学院，长春 130061；
2. 吉林大学 古生物学与地层学研究中心，长春 130026；
3. 中国冶金地质总局三局，太原 030000

摘要：对内蒙古中部温都尔庙地区白音诺尔变质基性火山岩进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学和地球化学研究。结果表明，变质基性火山岩原岩形成于（254.8±6.2）Ma，时代为晚二叠世。地球化学特征研究显示研究区变质基性火山岩属于亚碱性拉斑系列，大离子亲石元素（LILE）Ba、Rb、Sr 强烈亏损，高场强元素（HFSE）Nb、Zr 富集，元素 Eu 为正异常，具有 E-MORB 地球化学特征，岩浆来源于富集的岩石圈地幔，结合地质特征应属于蛇绿岩组成部分，反映该地区在晚二叠世古亚洲洋尚未闭合，其闭合时间可能在早三叠世之后。

关键词：白音诺尔；变质基性火山岩；锆石 U-Pb 年龄；地球化学；蛇绿岩

中图分类号：P597；P595 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2017.02.010

Chronology and geochemistry of meta-basic volcanics of Baiyinnuoer region in Wenduermiao area, Inner Mongolia

LI Shang-qi[1], CHEN Yue-jun[2], HAN Ren-dao[3], LI Sen-lin[1], SHI Qiang[1], WU Guo-xue[1]

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Research Center of Paleontology & Stratigraphy, Jilin University, Changchun 130026, China;
3. No. 3 Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Taiyuan 030000, China

Abstract: LA-ICPMS zircon U-Pb dating and geochemical data of meta-basic volcanics of Baiyinnuoer region from Wenduermiao area in central Inner Mongolia were studied. The results indicate that the meta-basic volcanics formed in (254.8±6.2) Ma, belonging to Late Permian. Meanwhile, geochemical studies show that the meta-basic volcanics belongs to sub-alkaline tholeiitic series. The rocks were obviously depleted in (LILE) Ba, Rb, Sr and rich in (HFSE) Nb and Zr, with positive anomalies of Eu. Geochemistry analysis shows that meta-basic volcanics are very similar to E-MORB, and the magma was derived from enriched lithospheric mantle. Combining with the geology features the rocks should belong to the ophiolite component, which indicates that Paleo-Asian Ocean has not been closed in the Late Permian and the closing time of Paleo-Asian Ocean should be later than the Early Triassic.

Key words: Baiyinnuoer; meta-basic volcanics; zircon U-Pb ages; geochemistry; ophiolite

收稿日期：2016-10-26；**改回日期**：2016-12-10
基金项目：中国地质调查局天津地质调查中心（12120115030401）.
通讯作者：吴国学（1962-），男，教授，主要从事矿产勘查研究工作. E-mail：wuguoxue@163.com

0　引言

温都尔庙地区位于华北地台和西伯利亚地台之间，是一个巨大的增生造山带，在中、新生代，受太平洋板块和西伯利亚板块相互作用，形成了中亚蒙古弧构造域，控制了本区岩浆活动，其地质构造演化极其复杂，岩浆活动频繁[1-5]。关于研究区分布大量变质基性火山岩，近年来众多学者在其岩石成因、岩石地球化学以及年龄等多方面做了大量分析研究[6-11]，为变质基性火山岩形成和演化提供丰富的基础资料。一些学者认为变质基性火山岩为海底喷发的产物，是在早奥陶世古亚洲洋（或古蒙古洋）洋壳俯冲作用下发生的变质[12]；另一些学者认为变质基性岩成因复杂，可能形成于古生代沟-弧-盆体系[13-15]；还有部分学者认为变质基性火山岩形成于中-新元古代华北板块北部火山型被动陆缘[16,17]。初航等人[18]最近的研究认为变质基性火山岩来源复杂，可能形成于晚二叠世—早三叠世扩张有限的陆内洋盆环境。区内变质基性火山岩具有形成年代争议性与成因构造环境复杂性等特征。鉴于此，本文在归纳前人资料和野外实测剖面基础上，对研究区白音诺尔一带广泛分布的温都尔庙群变质基性火山岩系进行了岩石学、锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究，讨论其形成年代、源区特征及其构造背景。

1　地质概况与岩石学特征

温都尔庙群位于内蒙古自治区中部，大地构造属于温都尔庙俯冲-增生杂岩带，索伦缝合带南侧（图 1a），主要出露在温都尔庙—乌兰敖包—图林凯一线以北，布图木吉苏木—阿布盖图以南的区域。研究区内构造复杂，主要发育由温都尔庙古板块俯冲带造成的不同规模韧性剪切带，小到手标本，大到数十公里。断裂构造非常发育，主要以近

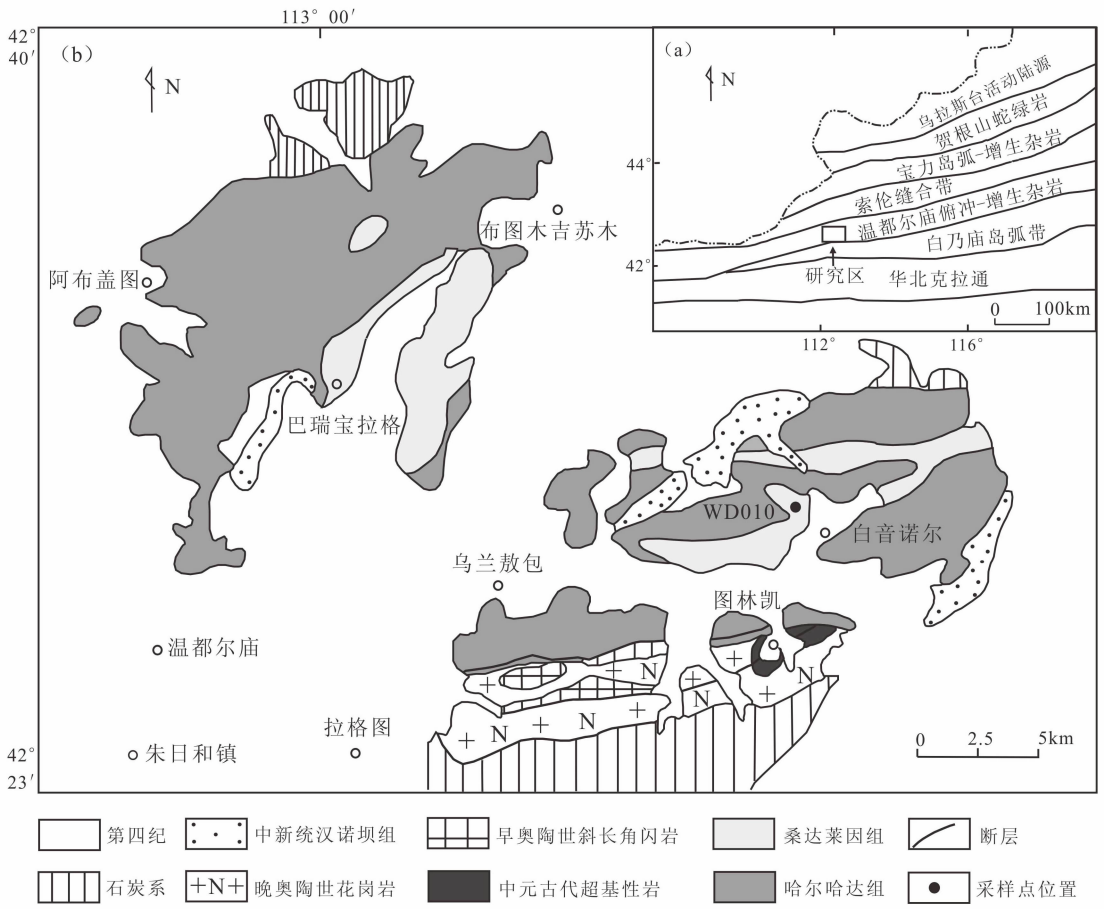


图 1　内蒙古中部大地构造格局图（a）和温都尔庙群地质简图（b）

Fig. 1　Tectonic framework of central section of Mongolia area（a）and geological sketch map of Wenduermiao Group（b）

东西向断裂系为主，其形成时代主要为早古生代（图 1b）。区内褶皱构造变形较发育，至少经历四期褶皱变形，在不同地质阶段、不同构造层次及不同岩石组合中表现出形态复杂的构造样式，绝大部分集中在古生代岩石中，中新生代地层的褶皱构造不发育[19]。

温都尔庙群由一套海相火山浅变质岩组成，是一著名的“哑层”[20]，前人将其划分为南北两带，北带位于二道井增生杂岩带中，出露于研究区内二道井—红格尔一带，南带位于早古生代温都尔庙增生杂岩带中，出露于温都尔庙—图林凯一带[4,21]。研究区温都尔庙群出露面积仅 240 km^2，整体呈东西向展布，多被覆盖在新近系中新统古尔组红土及第四系沉积物之下，局部被中新统汉诺坝组玄武岩覆盖，与石炭系地层、早奥陶世斜长角闪岩以及晚奥陶世花岗岩呈断层接触。温都尔庙群自上而下大体划分为两个岩组，哈尔哈达组由石英岩、绢云石英片岩和绿泥石英片岩夹磁铁石英岩组成；桑达来因组主要由枕状构造的玄武岩、绿片岩、绿泥绿帘片岩及细碧岩组成，局部夹碳酸盐岩透镜体，或被一些辉长岩-辉绿岩墙穿切，上下组呈渐变过渡关系。这一组合反映了该群具有蛇绿岩套的岩石组合特点[15]，显然形成于深海当中。研究区内还发育一定规模的岩浆活动，主要集中在元古界、晚古生界及中、新生界，不同构造位置的侵入岩具不同的成因类型，根据成因可划分为“M”型及“I”型花岗岩。

本文室内分析样品采自出露于温都尔庙地区白音诺尔一带弱变质玄武岩（图 1b），选取了 6 件较新鲜的、风化作用相对较弱的岩石样品进行分析测试。对样品 WD010 进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年分析，对样品 WD010 -1、WD010 -2、WD010 -3、WD010-4、WD010-5 进行了常量元素与微量元素分析。

出露在研究区白音诺尔一带弱变质玄武岩虽然局部发生了绿片岩相变质，但仍几乎保留了原岩的基本特征。样品野外露头为灰绿色、暗绿色弱片理化变质玄武岩，具有变余斑状结构，块状构造（图 2a）。光学显微镜下具有明显变余斑状结构，斑晶为斜长石（20% ~ 30%）、辉石（10% ~ 15%）、角闪石（1% ~5%）以及含少量石英杏仁体（1% ~5%）集合体，基质为隐晶质，但部分基质则已不同程度的变质结晶成绢云母（30% ~ 40%）、绿泥石（5% ~10%）等新矿物，气孔构造、杏仁构造（图 2b）。

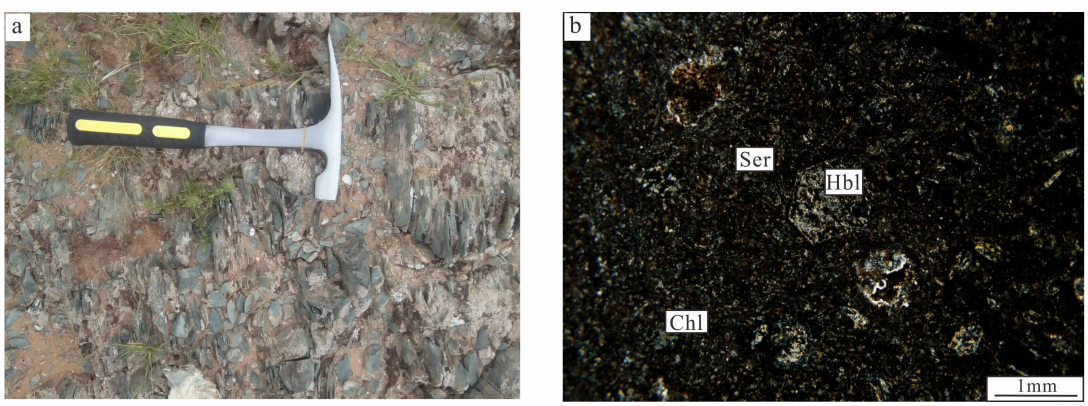


图 2 变质基性火山岩野外照片及镜下显微照片

Fig. 2 Field photographs and microphotographs of meta-basic volcanics

2 分析方法

本文样品的锆石分选在廊坊岩拓地质服务有限公司完成，样品采用人工破碎至 80 ~ 100 目，重液、电磁仪等方法挑选出优势样品，在双目镜下挑选出具有代表性的无裂缝、无包裹体以及无杂质锆石颗粒。样品的制靶在北京凯德正科技有限公司进行，锆石阴极发光 CL 图像采集在北京大学物理学院电镜室的阴极荧光分析系统上完成，U-Pb 测年在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实

验室采用德国相干公司准分子激光 COMPexPro102 上完成，该技术优势在于具有实时、快速、原位的分析以及灵敏度高。实验室采用高纯度氦气作为剥蚀物质的载气，激光剥蚀光束斑直径为 32 μm。实验采用人工合成标准参考物质 NIST SRM610 硅酸盐玻璃进行仪器调整，使用国际 91500 标准锆石作为外标校正。同位素比值数据分析采用 GLITTER 软件进行，采用 Andersen[22] 的 3D 坐标法进行校正扣除普通 Pb 的影响，谐和图解和加权平均年龄计算采用国际标准程序 Isoplot，具体的分析方法处理流程见参考文献［23］。

本次研究对白音诺尔变质基性玄武岩的一件样品 WD010（N42°29.428′，E113°14.038′）进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析，其测年分析数据见表 1，分析数据应用分段校正，成岩年龄是对$^{206}Pb/^{238}U$ 数据进行统计分析。测试分析样品的锆石 CL 图像显示锆石多数呈自形结晶程度较高的短轴-等轴状，锆石粒径为 100 ~ 150 μm，长宽比值多为 2∶1 或 3∶1，振荡环带状不明显，少量锆石颗粒含有残留核，核部残留锆石可见岩浆震荡环带结构（图 3）。

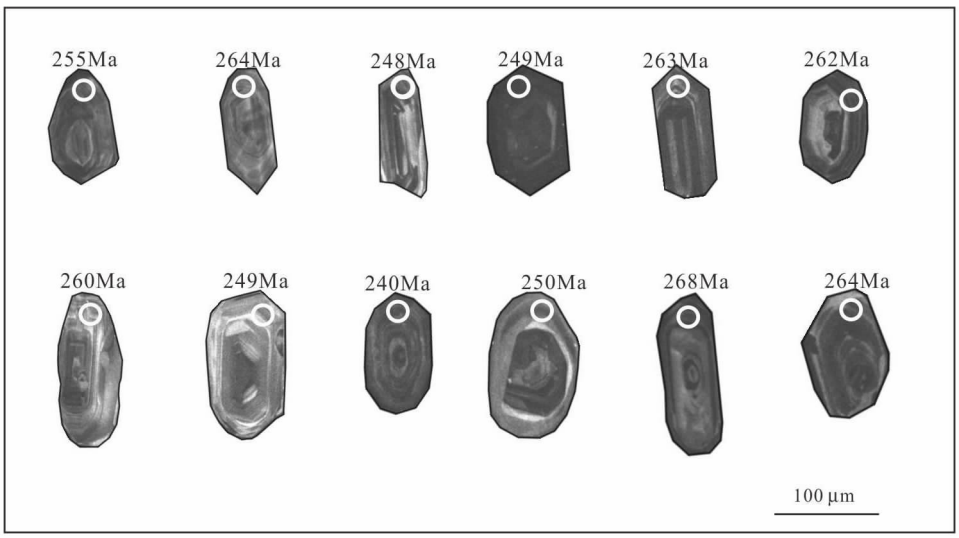


图 3　WD010 样品代表性锆石的阴极发光（CL）图像

Fig. 3　CL images of representative zircons for sample WD010

样品 WD010 共计进行了 21 个测点分析（加权平均时排除 7 个测点），Th/U 比值多集中在 0.41 ~ 1.05，>0.3，具有岩浆锆石特征[24,25]。根据锆石阴极发光图像，21 个测点均位于岩浆锆石生长环带上（图 3），样品所测年龄均在谐和线上及其附近（图 4a），其中除测年数据 WD010（01、05、06、07、14、20）6 个测点年龄明显高于其他测点年龄，为岩浆形成过程捕获锆石，此外 WD010-16 测点年龄值偏低，可能代表后期岩浆热事件的年龄，其余均在 255 Ma ±（图 4b），并组成 240 ~ 271 Ma 年龄集中区，加权平均年龄为（254.8 ± 6.2）Ma（MSWD = 1.6），代表变质原岩成岩年龄。此外，对巴瑞宝拉格附近变质基性火山岩进行了 LA-ICPMS U-Pb 同位素测年研究，其加权平均年龄为（256 ± 6.0）Ma（未发表），应该形成于同一期岩浆作用。

根据分析结果可知，这套变质基性火山岩原岩成岩年龄是晚二叠世。

3　岩石地球化学特征

对 5 件变质基性火山岩样品进行了常量元素、微量元素和稀土元素分析，分析结果见表 2。分析测试工作在吉林大学测试科学实验室完成，主量元素测试采用 XRF 荧光测试法完成，测试误差 < 2%；稀土和微量元素测试采用等离子体质谱（ICP-MS）法，分析精度优于 10%。

3.1　主量元素

变质基性火山岩由于烧失量较高，经烧失量矫

表1 温都尔庙地区变质基性火山岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data for meta-basic volcanics from Wenduermiao region

样品编号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	含量/10^{-6}				$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
WD010-01	20	100	230	0.43	0.058 39	0.001 58	0.552 35	0.014 88	0.068 64	0.000 86	544	37	447	10	428	5
WD010-02	8	90	167	0.54	0.051 92	0.002 62	0.288 98	0.014 34	0.040 38	0.000 63	282	85	258	11	255	4
WD010-03	31	405	597	0.68	0.058 32	0.002 10	0.337 90	0.012 52	0.042 05	0.000 70	541	56	286	10	264	4
WD010-04	26	487	438	1.11	0.052 53	0.001 36	0.283 93	0.007 35	0.039 21	0.000 48	309	37	254	6	248	3
WD010-05	46	512	444	1.15	0.056 29	0.002 08	0.572 44	0.020 84	0.073 77	0.001 02	464	56	460	13	459	6
WD010-06	329	24	868	0.03	0.121 14	0.001 45	5.994 18	0.076 89	0.358 90	0.004 06	1 973	10	1 975	11	1 977	19
WD010-07	127	375	376	1.00	0.096 14	0.001 70	3.013 45	0.054 35	0.227 36	0.002 75	1 551	17	1 411	14	1 321	14
WD010-08	14	185	243	0.76	0.054 92	0.003 46	0.297 71	0.018 38	0.039 32	0.000 71	409	106	265	14	249	4
WD010-09	76	644	1 205	0.53	0.064 11	0.002 89	0.367 54	0.016 24	0.041 58	0.000 65	745	67	308	12	263	4
WD010-10	19	152	354	0.43	0.054 57	0.001 71	0.323 53	0.010 03	0.043 00	0.000 56	395	46	285	8	271	3
WD010-11	12	149	208	0.72	0.052 70	0.002 29	0.302 02	0.012 91	0.041 56	0.000 61	316	70	268	10	262	4
WD010-12	16	172	311	0.55	0.053 71	0.001 67	0.305 12	0.009 44	0.041 20	0.000 54	359	46	270	7	260	3
WD010-13	28	392	541	0.72	0.051 87	0.001 49	0.281 91	0.008 09	0.039 41	0.000 50	280	42	252	6	249	3
WD010-14	23	17	36	0.47	0.166 99	0.003 04	11.107 79	0.206 87	0.482 37	0.006 46	2 528	15	2 532	17	2 538	28
WD010-15	29	480	557	0.86	0.055 39	0.001 84	0.289 83	0.009 53	0.037 95	0.000 51	428	49	258	8	240	3
WD010-16	79	1 714	1 634	1.05	0.053 15	0.001 08	0.248 80	0.005 12	0.033 94	0.000 41	335	26	226	4	215	3
WD010-17	9	114	173	0.66	0.052 32	0.002 17	0.284 93	0.011 65	0.039 49	0.000 57	299	67	255	9	250	4
WD010-18	23	63	478	0.13	0.051 08	0.001 83	0.298 95	0.010 00	0.042 44	0.000 54	245	84	266	8	268	3
WD010-19	8	69	168	0.41	0.052 67	0.002 25	0.275 88	0.011 60	0.037 99	0.000 56	315	69	247	9	240	3
WD010-20	12	222	160	1.39	0.052 67	0.002 05	0.340 93	0.013 08	0.046 94	0.000 67	315	61	298	10	296	4
WD010-21	63	766	1 164	0.66	0.052 99	0.001 08	0.304 85	0.006 31	0.041 73	0.000 50	328	26	270	5	264	3

表 2　温都尔庙地区变质基性火山岩主量（%）、微量、稀土元素（10^{-6}）分析结果

Table 2　Major element (%), trace element and REE results (10^{-6}) for meta-basic volcanics from Wenduermiao region

样品号	WD010-1	WD010-2	WD010-3	WD010-4	WD010-5
SiO_2	44.17	41.39	43.51	40.22	40.49
TiO_2	1.97	1.86	1.94	1.34	1.82
Al_2O_3	15.10	14.34	15.71	12.24	13.88
Fe_2O_3	3.23	4.10	3.97	3.77	5.03
FeO	7.33	5.66	7.10	3.66	5.29
MnO	0.17	0.15	0.16	0.14	0.15
MgO	9.37	6.32	8.77	3.86	4.95
CaO	7.59	11.05	6.22	21.43	14.53
Na_2O	3.31	4.44	4.28	2.69	3.63
K_2O	0.72	0.17	0.37	0.08	0.04
P_2O_5	0.26	0.25	0.25	0.19	0.24
LOI	6.58	10.20	7.76	15.98	10.97
Total	99.81	99.94	100.02	99.59	99.97
La	11.01	8.30	9.60	7.03	7.57
Ce	29.01	22.10	25.24	18.97	20.87
Pr	3.77	3.02	3.23	2.48	2.81
Nd	17.97	14.52	14.78	11.61	13.34
Sm	5.08	4.16	4.15	3.42	3.81
Eu	1.83	1.47	1.47	1.19	1.34
Gd	5.91	4.83	4.72	4.06	4.43
Tb	0.95	0.82	0.78	0.68	0.74
Dy	5.75	4.87	4.68	4.09	4.51
Ho	1.21	1.00	0.98	0.86	0.93
Er	3.46	2.89	2.74	2.44	2.68
Tm	0.51	0.41	0.41	0.38	0.38
Yb	3.06	2.50	2.43	2.14	2.34
Lu	0.46	0.38	0.38	0.34	0.35
ΣREE	89.98	71.26	75.58	59.69	66.09
LREE	68.67	53.57	58.46	44.70	49.74
HREE	21.32	17.69	17.12	14.99	16.35
LREE/HREE	3.22	3.03	3.42	2.98	3.04
δEu	1.02	1.00	1.01	0.97	1.00
Rb	21.29	5.48	7.29	3.43	2.66
Sc	51.54	33.44	29.82	28.56	5.93
Sr	105.80	233.10	165.50	396.00	222.10
Ba	290.20	42.00	50.70	25.89	24.78
Zr	188.50	158.60	164.70	120.60	152.50
Y	41.89	30.76	31.30	28.19	25.43
Hf	3.50	3.07	3.06	2.37	2.88
Nb	14.38	11.87	12.23	8.70	10.88
Ta	0.71	0.61	0.61	0.43	0.54
Th	1.28	0.91	0.93	0.85	0.57
Be	1.16	1.09	1.02	0.64	1.03
Cr	405.00	276.70	280.50	317.70	329.90
Li	51.33	30.14	39.38	20.50	26.21
Co	61.56	47.31	49.31	36.68	43.16
Ni	215.50	156.20	158.00	183.40	182.60
V	315.90	255.80	273.40	212.90	268.10
U	0.40	0.61	0.53	0.65	0.60

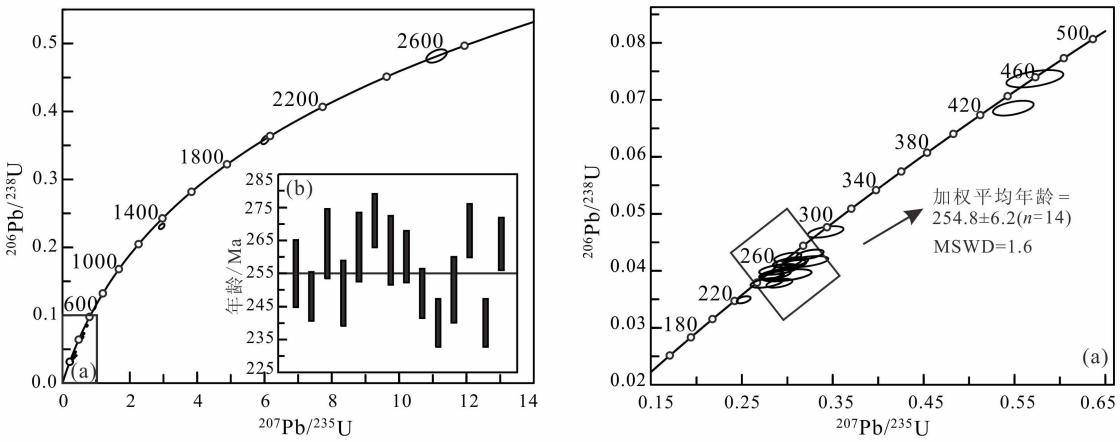


图 4 温都尔庙地区变质基性火山岩中锆石 LA-LCPMS 的 U-Pb 年龄谐和图（a）和加权平均年龄分布图（b）

Fig. 4 Concordia plot (a) and weighted average age distribution (b) of LA-LCPMS U-Pb age of zircon from Wenduermiao regional meta-basic volcanics

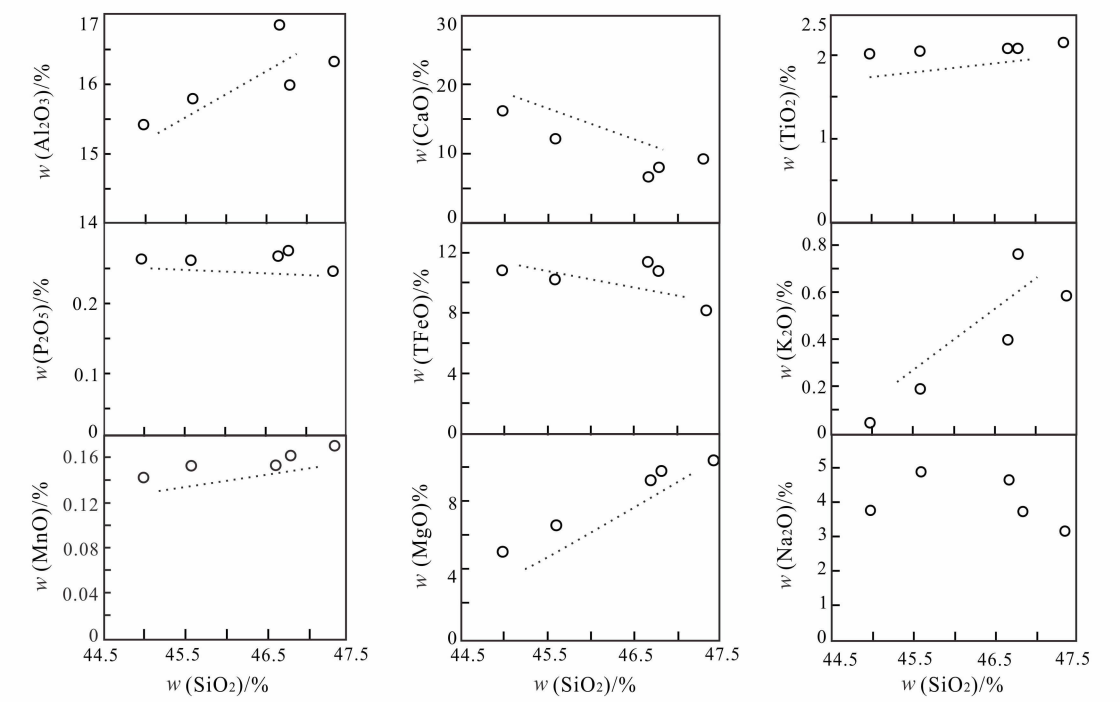


图 5 温都尔庙地区变质基性火山岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of meta-basic volcanics from Wenduermiao region

正以后，SiO_2 含量为 44.97% ~47.34%，平均为 46.27%；Al_2O_3 含量 14.41% ~16.85%，平均为 15.69%，属于高铝玄武系列；TFeO 含量为 8.30% ~11.45%，平均为 10.36%；$Mg^{\#}$介于 0.56 ~ 0.86；CaO 含量 6.67% ~ 25.22%，平均为 13.65%；TiO_2 含量 1.58% ~ 2.09%，平均为 1.96%，接近太平洋中脊玄武岩含量(1.62%)[26]；$Na_2O + K_2O$ 值 3.26% ~5.08%，平均为 4.33%；Na_2O/K_2O 值为 4.60% ~ 90.75%，平均值为 33.33%，岩石贫钾富钠。在 Harker 图解

上（图 5）展示了变质基性火山岩中 Al_2O_3、CaO、MgO、TiO_2、P_2O_5、MnO、Na_2O 和 K_2O 与 SiO_2 的相关关系。Al_2O_3、MgO、TiO_2、MnO、K_2O 与 SiO_2 之间为正相关关系，TFeO、P_2O_5、CaO 与 SiO_2 之间为负相关关系，Na_2O 与 SiO_2 未见其相关关系，这可能暗示 Na_2O 来源不是单一的岩浆源区，样品可能被海水作用发生了钠质交代细碧岩化。本文不采用活泼元素（尤其 Na 元素）进行岩石样品分类。在 $Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ – Nb/Y 图解上（图 6a），样品均落入亚碱性玄武岩区域内。在 SiO_2 – TFeO/MgO 图解（图 6b）上，样品分布在拉斑系列的区域内。

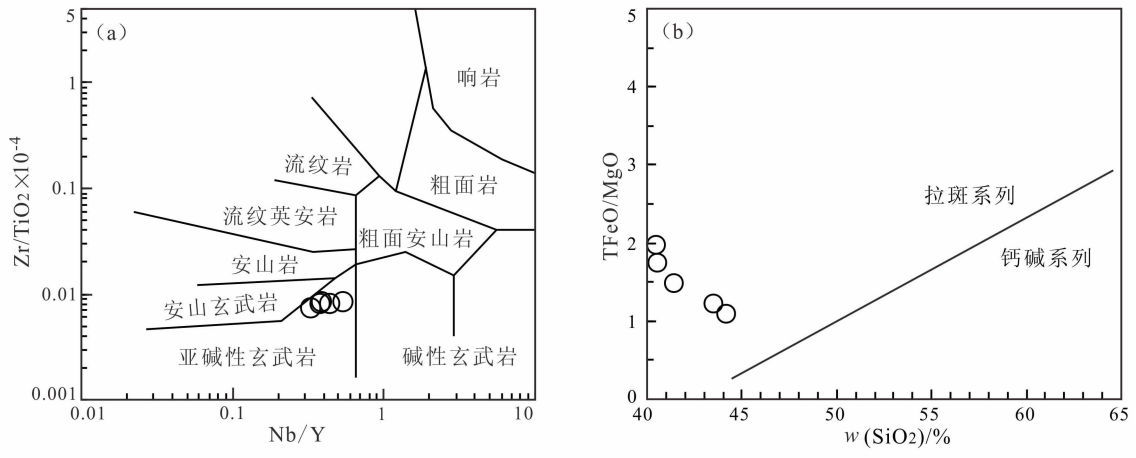


图 6　温都尔庙地区变质基性火山岩 $Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ – Nb/Y 图解（a）和 SiO_2 – TFeO/MgO 图解（b）

Fig. 6　$Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ – Nb/Y (a) diagram and SiO_2 – TFeO/MgO (b) diagram of meta-basic volcanics from Wenduermiao region

3.2　稀土及微量元素特征

温都尔庙地区白音诺尔一带 5 件变质基性火山岩样品稀土元素、微量元素分析结果见表 2，ΣREE 含量在 $59.69 \times 10^{-6} \sim 89.98 \times 10^{-6}$ 之间，平均为 72.52×10^{-6}，稀土元素总量较低；$(La/Yb)_N$ 在 2.32 ~ 2.83 之间，平均为 2.49；LREE/HREE 比值在 2.98 ~ 3.42，平均为 3.14，反应了轻、重稀土之间的分馏程度中等，Eu 属于正异常。由球粒陨石稀土配分曲线可知（图 7a），LREE 为轻度富集，HREE 相对亏损，总体平缓略微向右倾斜，

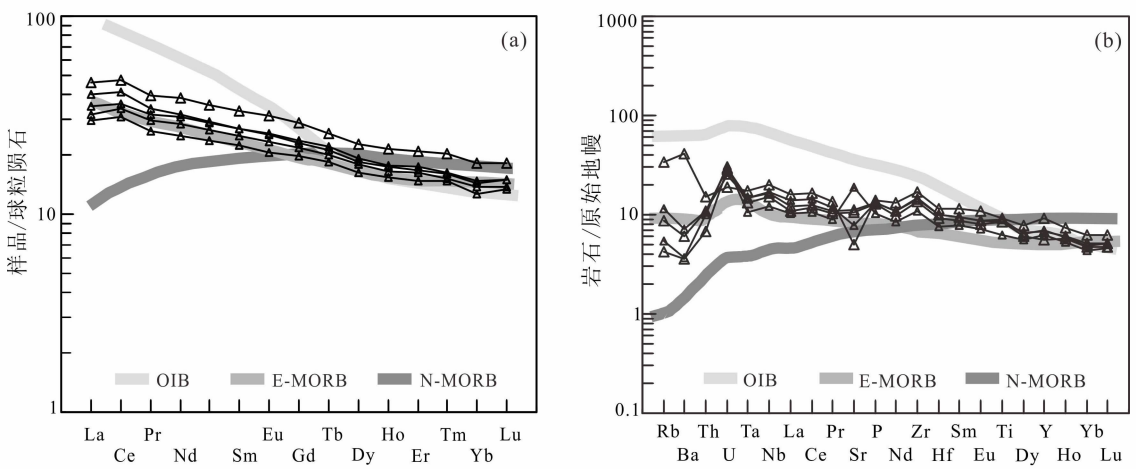
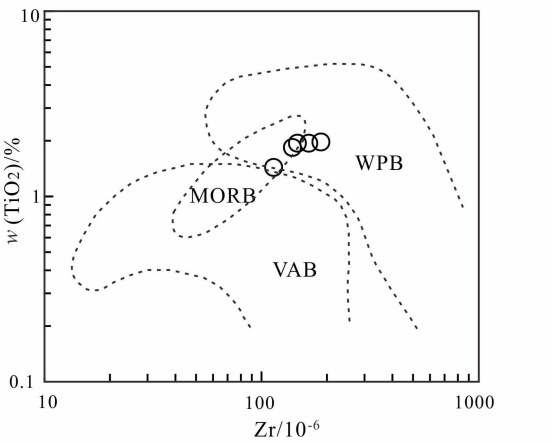


图 7　温都尔庙地区变质基性火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图（a）和微量元素原始地幔标准化蛛网图（b）

Fig. 7　Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element pattern (b) of meta-basic volcanics from Wenduermiao area

与 E-MORB（富集型洋脊玄武岩）相似。样品微量元素原始地幔标准化“蛛网图”中（图 7b），表现出富集型右倾型式曲线特征，且亏损大离子亲石元素（LILE）Ba、Rb、Sr 等，富集高场强元素（HFSE）Nb、Zr，具有富集的岩石圈地幔特征。Hf/Ta = 4.92 ~ 5.36，部分样品含量略微高于 E-MORB（Hf/Ta < 5），在元素 TiO_2 – Zr 图解上（图 8），样品点全部落入 MORB 和 WPB 区域内，因此体现出向板内玄武岩演化趋势。



WPB. 板内玄武岩；VAB. 火山弧玄武岩；MORB. 洋中脊玄武岩

图 8 温都尔庙地区变质基性火山岩 TiO_2 – Zr 图解

Fig. 8 TiO_2 – Zr diagram of meta-basic volcanics from Wenduermiao region

4 讨论

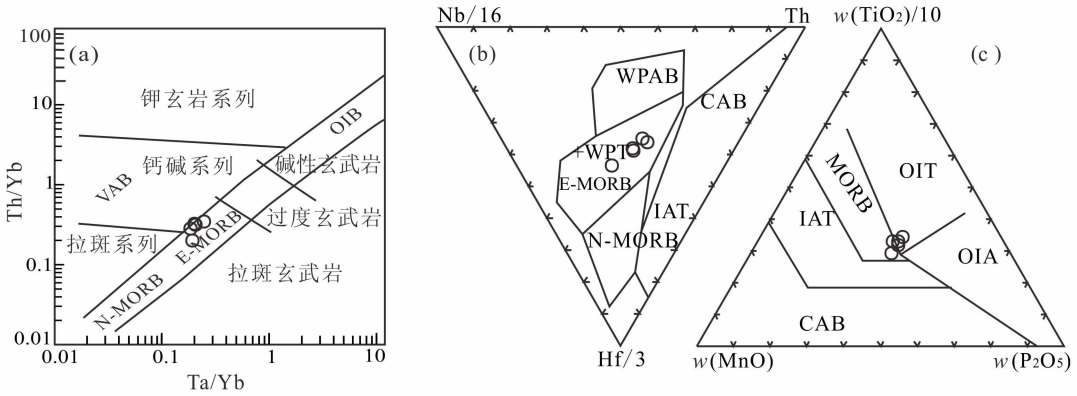
4.1 形成时代

前人对温都尔庙群变质基性火山岩的形成时代一直存在不同的认识，其时代归属存在分歧。王东方[15]通过岩蛇绿岩组合、接触关系、变质作用、古生物以及测年数据分析，认为温都尔庙群可能形成于晚寒武世—中志留世；徐备等人[17]对温都尔庙群火山岩进行 SHRIMP 测年研究，火山岩年龄为（459.6 ± 3.6）Ma；唐克东等人[27]根据温都尔庙群绢云母石英片岩和绿片岩 K-Ar 年龄（463 ~ 473 Ma）以及 Rb-Sr 年龄（435 ± 61 Ma 和 509 ± 40 Ma），认为年龄上限为寒武纪；李承东等人[28]对温都尔庙群中的 1 个变质安山岩和 2 个变质碎屑岩样品进行了测年研究，测得桑达来因组上部变质安山岩年龄为（470 ± 2）Ma，哈尔哈达组两个样品中一个样品的碎屑锆石年龄在 445 ~ 480 Ma 之间，另一个样品测年数据中最年轻的主要集中分布在 424 ~ 438 Ma 之间，证明至少有一部分地层在中志留世期间形成，因此，认为桑达来因组形成于寒武纪—晚奥陶世[28]，哈尔哈达组形成时代为晚奥陶世—中志留世。在研究区东南的那清沟和傲苍沟等地上志留统西别河组覆盖在其上，限定了温都尔庙群应形成于晚志留世之前，显然，根据分析至少可以确定温都尔庙群主体形成时代为寒武纪—中志留世，其形成时间几乎跨越了整个早古生代。本文对温都尔庙地区白音诺尔一带的变质基性火山岩进行锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素测年研究，其变质基性火山岩原岩成岩年龄是在晚二叠世，这与初航等[18]将温都尔庙群变质基性火山岩的成岩年龄限定在晚二叠世—早三叠世的年龄基本吻合。因此，温都尔庙地区确实存在一套晚二叠世的变质基性火山岩。前人资料研究表明，温都尔庙形成时代为早古生代，而本文资料却指示该套变质基性火山岩形成于晚二叠世，暗示本文所研究的变质基性火山岩并不属于温都尔庙群那一部分，建议将该区前人划分的温都尔庙群解体。这与邵济安等人[29]的认识一致，但具体如何划分尚需要进一步研究。

4.2 构造背景

对于温都尔庙地区变质基性火山岩形成的构造背景，前人做过很多研究，目前主要有 3 种观点，第一种认为变质基性火山岩为海底喷发的产物，是在古亚洲洋（或古蒙古洋）洋壳俯冲作用下发生变形变质；第二种观点认为变质基性火山岩成因复杂，包含大洋洋壳、岛弧等；第三种观点认为变质基性火山岩原岩来源复杂，可能形成于扩张规模有限的陆内洋盆。

本文变质基性火山岩是晚二叠世岩浆活动产物，主量元素属于亚碱性拉斑系列，微量元素明显亏损大离子亲石元素（LILE）Ba、Rb、Sr 等，富集高场强元素（HFSE）Nb、Zr，元素 Eu 为正异常。在 Ta/Yb – Th/Yb 判别图解（图 9a）上，样品点全部落于富集的大洋中脊拉斑玄武岩（E-MORB）区域；在微量元素 Hf/3 – Th – Nb/16 图解上（图 9b），样品点全部落入 E-MORB 和 WPT 区域内；在 $TiO_2/10$ – MnO – P_2O_5 图解中（图 9c）上，样品点大部分位于大洋中脊玄武岩，与稀土微量元素显示的结果一致，属于 E-MORB 玄武岩。很多学者研究认为古亚洲洋在泥盆纪闭合，但大量



IAT. 岛弧拉斑玄武岩；OIB. 洋岛玄武岩；MORB. 大洋中脊玄武岩；E/N-MORB. E 型/N 型大洋中脊玄武岩；CAB. 岛弧钙碱性玄武岩；WPT. 板内拉斑玄武岩；WPA. 板内碱性玄武岩；VAB. 火山弧玄武岩；OIT. 洋岛或海山拉斑玄武岩；OIA. 洋岛碱性玄武岩.

图 9　温都尔庙地区变质基性火山岩的构造判别图解

Fig. 9　Tectonic discrimination diagrams of meta-basic volcanics from Wenduermiao region

的证据表明，一直延续到晚古生代—早中生代，例如：在华北板块北缘发育了晚石炭世闪长岩-花岗闪长岩带，是古亚洲洋板块向华北板块俯冲过程中俯冲地壳熔融交代富集型地幔的产物，广泛分布在安第斯型大陆边缘[30]，暗示着在晚石炭世古亚洲洋板块俯冲运动达到了高潮，而不是到达碰撞造山阶段。在哲斯敖包地区厚层生物碎屑灰岩中发现中二叠世丰富腕足、放射虫以及珊瑚化石，代表滨海相、浅海相[31,32,33]；陈斌等人[34]在索伦缝合带苏尼特左旗与俯冲-碰撞有关的岩浆岩进行测年研究，认为索伦缝合带最终闭合时间是在 230 ~ 310 Ma，不同于国内众多学者认为“晚泥盆世闭合”模式。这些地质事实充分证明，在泥盆纪古亚洲洋并没有消失。在温都尔庙群北带发现了蓝片岩，其形成于 280 ~ 380 Ma[35]，结合中国北方三类构造环境中的蓝片岩，认为温都尔庙群属于洋壳俯冲碰撞带的 B 型蓝片岩[36,37]，表明在晚泥盆世到早二叠世洋壳一直处于俯冲削减阶段。本文白音诺尔变质基性火山岩样品分析数据在构造判别图解中部分样品落入 OIT 和 WPT 区域，表明在晚二叠世具有微弱的洋内板块俯冲削减作用。在上二叠统林西组中-下部以海相沉积为主，可见浊流沉积，向上逐渐变为陆相沉积[38]。此外，在西拉木伦断裂带内发育大规模 S 型花岗岩，其形成年代为 229 ~ 237 Ma，为早中生代酸性侵入体，暗示在早三叠世之后残余洋盆最终闭合[21,39]，研究区转为陆表冲击环境。

5　结论

（1）白音诺尔一带的变质基性火山岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年结果表明，成岩时代为（254.8 ± 6.2）Ma，属于晚二叠世，而非前人认为的温都尔庙群桑达来因组，建议将前人划分的温都尔庙群解体。

（2）白音诺尔一带变质基性火山岩属于亚碱性拉斑系列，具有 E-MORB 地球化学特征，岩浆来源于富集的岩石圈地幔。

（3）地质、地球化学特征表明，白音诺尔一带变质基性火山岩应属于蛇绿岩组成部分，反映该地区晚二叠世时古亚洲洋尚未闭合，其闭合时间可能在早三叠世之后。

致谢　样品测试和论文撰写过程中得到了吉林大学杨浩博士热情指导和帮助，在此一并表示感谢！

参考文献：

[1]　王挽琼. 华北板块北缘中段晚古生代构造演化：温都尔庙—集宁火成岩年代学、地球化学的制约：博士学位论文 [D]. 长春：吉林大学，2014.
WANG Wan-qiong. Late Paleozoic tectonic evolution of the central north margin of the North China craton：contraints from zircon U-Pb ages and geochemistry of igneous rocks in Ondor Sum-Jining area：doctor's degree thesis [D]. Changchun：Jilin University，2014.

[2] 傅振洋，杜显峰. 内蒙古温都尔庙蛇绿岩带岩石学及矿物学特征［J］. 矿物岩石地球化学通报，2016，35（2）：264-271.
FU Zhen-yang，DU Xian-feng. Petrological and mineralogical characteristics of the Wenduermiao ophiolite，Inner Mongolia［J］. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry，2016，35（2）：264-271.

[3] 陈崎，仇甘霖，杜玉申，等. 白乃庙—温都尔庙区域构造及华北北缘古板块构造演化［J］. 长春地质学院学报，1992（22）：119-129.
CHEN Qi，CHOU Gan-lin，DU Yu-shen，et al. regional structure and the northern margin of North China ancient plate tectonic evolution of Bainaimiao-Wenduermiao［J］. Journal of Changchun College of Geology，1992（22）：119-129.

[4] 聂凤军，裴荣富，吴良士，等. 内蒙古温都尔庙群变质火山-沉积岩钐-钕同位素研究［J］. 科学通报，1994，39（13）：1211-1214.
NIE Feng-jun，PEI Rong-fu，WU Liang-shi，et al. Sm-Nd isotopic study on metavolcano-sedimentary rocks of Wenduermiao Group，Inner Mongolia，People's Republic of China［J］. Chinese Science Bulletin，1994，39（13）：1211-1214.

[5] 张臣，李茂松，何国琦，等. 内蒙古乌拉乌苏—德言其庙地区角闪岩相变质带 Sm-Nd 同位素等时线年龄及其意义［J］. 地质科学，1996，31（1）：65-70.
ZHANG Chen，LI Mao-song，HE Guo-qi，et al. Age of SM-Nd isochron of amphibolite facies meta-morphic zone and its significance in Wulawusu-Deyanqimiao area of Inner Mongolia［J］. Scientia Geologica Sinica，1996，31（1）：65-70.

[6] 吴泰然，张臣，万基虎. 内蒙古温都尔庙地区温都尔庙群的形成环境和构造意义［J］. 高校地质学报，1998，4（2）：168-176.
WU Tai-ran，ZHANG Chen，WAN Ji-hu. Tectonic settings of Wenduermiao region and its tectonic interpretation in Wenduermiao region，Inner Mongolia［J］. Geological Journal of China Universities，1998，4（2）：168-176.

[7] 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.
LIANG Ri-xuan. The features of ophiolites in the central sector of Inner Mongolia and its geological significance［J］. Regional Geology of China，1994（1）：37-45.

[8] Chen B，Jahn B M，Wilde S，et al. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia，China：petrogenesis and tectonic implications［J］. Tectonophysics，2000，328（1）：157-182.

[9] 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.
LIU Dun-yi，JIAN Ping，ZHANG Qi，et al. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite，Inner Mongolia：evidence for the Early Paleozoic subduction［J］. Acta Geologica Sinica，2003，77（3）：317-327.

[10] 黄金香，赵志丹，张宏飞，等. 内蒙古温都尔庙和巴彦敖包—交其尔蛇绿岩的元素与同位素地球化学：对古亚洲洋东部地幔域特征的限制［J］. 岩石学报，2006，22（12）：2889-2900.
HUANG Jin-xiang，ZHAO Zhi-dan，ZHANG Hong-fei，et al. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Wenduermiao and Bayanaobao-Jiaoqier ophiolites，Inner Mongolia：constraints for the characteristics of the mantle domain of eastern Paleo-Asian Ocean［J］. Acta Petrologica Sinica，2006，22（12）：2889-2900.

[11] 施光海，苗来成，张福勤，等. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义［J］. 科学通报，2004，49（4）：384-389.
SHI Guang-hai，MIAO Lai-cheng，ZHANG Fu-qin，et al. The age and regional tectonic significance of A-type granite in Xilinhot，Inner Mongolia［J］. Chinese Science Bulletin，2004，49（4）：384-389.

[12] 唐克东，颜竹筠，张允平，等. 论温都尔庙群及其构造意义［C］//中国北方板块构造文集 1. 北京：地质出版社，1983：186-208.
TANG Ke-dong，YAN Zhu-jun，ZHANG Yun-ping，et al. On Wenduermiao Group and its tectonic significance［C］// Contributions for the Project of Plate Tectonics in Northern China 1. Beijing：Geological Publishing House，1983：186-208.

[13] 胡晓，许传诗，牛树银. 华北地台北缘早古生代大陆边缘演化［M］. 北京：北京大学出版社，1990：1-185.
HU Xiao，XU Chuan-shi，NIU Shu-yin. Evolution of the early paleozoic continental margin in northern margin of the North China platform［M］. Beijing：Peking University Press，1990：1-185.

[14] 尚庆华. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义［J］. 科学通报，2004，49（24）：2574-2579.
SHANG Qing-hua. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol（Inner Mongolia）and their geological significance to the northern China orogen

[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (24): 2574-2579.

[15] 王东方. 关于温都尔庙群内涵、时代问题的讨论及其在板块会聚带构造发展中的意义 [J]. 地质论评, 1985, 31 (5): 461-468.
WANG Dong-fang. Connotation and assignments of the Wundurmiao Group in Nei Monggol and its significance in the structural development of the plate convergent zone [J]. Geological Review, 1985, 31 (5): 461-468.

[16] 张臣, 吴泰然. 内蒙古温都尔庙群变质基性火山岩 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究 [J]. 地质科学, 1998, 33 (1): 25-30.
ZHANG Chen, WU Tai-ran. Sm-Nd, Rb-Sr isotopic isochron of metamorphic volcanic rochs of Ondor Sum Group, Inner Mongolia [J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33 (1): 25-30.

[17] 徐备, Charcet J, 张福勤. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究 [J]. 地质科学, 2001, 36 (4): 424-434.
XU Bei, Charvet J, ZHANG Fu-qin. Primary study on petrology and geochronology of blueschists in Sunitezuoqi, northern Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36 (4): 424-434.

[18] 初航, 张晋瑞, 魏春景, 等. 内蒙古温都尔庙群变质基性火山岩构造环境及年代新 [J]. 科学通报, 2013, 58 (28/29): 2958-2965.
CHU Hang, ZHANG Jin-rui, WEI Chun-jing, et al. A new interpretation of the tectonic setting and age of metabasia volcanics in the Ondor Sum Group, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (28/29): 2958-2965.

[19] 祁思敬, 胡骁, 丁溥权, 等. 内蒙古板块运动的证据及与地槽演化的关系 [J]. 石家庄经济学院学报, 1979, 20 (3): 1-13.
QI Si-jing, HU Xiao, DING Pu-quan, et al. The Inner Mongolia plate movement proof and its relationship between geosyncline evolution [J]. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 1979, 20 (3): 1-13.

[20] 彭立红. 内蒙古温都尔庙群南带蛇绿岩套的地质时代及其地质意义 [J]. 科学通报, 1984, 29 (2): 104-107.
PENG Li-hong. Geochronological study and tectonic significance of ophiolites in the south of Wenduermiao Group, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 1984, 29 (2): 104-107.

[21] 李益龙, 周汉文, 钟增球, 等. 华北与西伯利亚板块的对接过程：来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据 [J]. 地球科学, 2009, 34 (6): 931-938.
LI Yi-long, ZHOU Han-wen, ZHONG Zeng-qiu, et al. Collision processes of North China and Siberian plates: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb age on deformed granite in Xar Moron suture zone [J]. Earth Science, 2009, 34 (6): 931-938.

[22] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.

[23] Ludwig K R. Users manual for isoplot/Ex Rev. 2.4 [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2001: 56.

[24] 刘琦胜. 滇西高黎贡山南段奥陶纪花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年和地球化学特征 [J]. 岩石学报, 2012, 31 (2): 250-257.
LIU Qi-sheng. SHRIMP zircon U-Pb dating and petrogeochemistry of Ordovician granite bodies in the southern segment of Gaoligong mountain, western of Yunnan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (2): 250-257.

[25] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Journal of Petrology, 2003, 46: 33-78.

[26] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic oceanic basalt: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, 1989, 42: 313-345.

[27] 唐克东. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及其成矿规律 [M]. 北京：北京大学出版社, 1992: 1-264.
TANG Ke-dong. Tectonic evolution and minerogentic regularities of the fold belt along the northern margins of Sino-Korean Plate [M]. Beijing: Peking University Press, 1992: 1-264.

[28] 李承东, 冉皞, 赵利刚, 等. 温都尔庙群锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及构造意义 [J]. 岩石学报, 2012, 28 (11): 3705-3714.
LI Cheng-dong, RAN Hao, ZHAO Li-gang, et al. LA-MC-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Wendouermiao group and its tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (11): 3705-3714.

[29] 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: 1-135.

SHAO Ji-an. Crust evolution in the middle part of the northern margin of Sino-Korean plate [M]. Beijing: Peking University Press, 1991: 1-135.

[30] ZHANG Shuan-hong, ZHAO Yue, SONG Biao, et al. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronnology, petrogenesis, and tectonic implications [J]. Geological Society of America Bulletin, 2009, 121 (1/2): 181-200.

[31] 梅胜旺, 汪玉梅. 内蒙古温都尔庙地区蛇纹石化橄榄岩地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35 (2): 212-222.
MEI Sheng-wang, WANG Yu-mei. Geochemical characteristics of the serpentinized peridotite in the Wenduermiao area, Inner Mongolia, China and their geological significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35 (2): 212-222.

[32] 晨辰, 张志诚, 郭召杰, 等. 内蒙古达茂旗满都拉地区早二叠世基性岩的年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 中国科学 (D辑), 2012, 55 (1): 39-52.
CHEN Chen, ZHANG Zhi-cheng, GUO Zhao-jie, et al. Geochronology, geochemistry, and its geological significance of the Permian Mandula mafic rocks in Damaoqi, Inner Mongolia [J]. Science in China (Ser. D), 2012, 55 (1): 39-52.

[33] 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探 [J]. 岩石学报, 2014, 30 (7): 1841-1857.
XU Bei, ZHAO Pan, BAO Qing-zhong, et al. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing Meng orogenic belt (XMOB) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30 (7): 1841-1857.

[34] 陈斌, 赵国春, Simon W. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义 [J]. 地质论评, 2001, 47 (4): 361-367.
CHEN Bin, ZHAO Guo-chun, Simon W. Subduction and collision related granitoids from sounthern Sconid-zuoqi Inner Mongolia: isotopic ages and tectonic implications [J]. Geological Review, 2001, 47 (4): 361-367.

[35] 陈斌, 马星华, 刘安坤, 等. 锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb 年代学及其对索伦缝合带演化的意义 [J]. 岩石学报, 2009, 25 (12): 3123-3129.
CHEN Bin, MA Xing-hua, LIU An-kun, et al. Zircon U-Pb ages of the Xilinhot metamorphic complex and blueschist, and implications for tectonic evolution of the solonker suture [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (12): 3123-3129.

[36] 沈其韩, 耿元生. 中国蓝片岩带的时空分布、地质特征和成因 [J]. 地质学报, 2012, 86 (9): 1407-1446.
SHEN Qi-han, GENG Yuan-sheng. The tempo-spatial distribution, geological characteristics and genesis of blueschist belts in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (9): 1407-1446.

[37] 高长林, 吉让寿, 秦德余, 等. 论中国北方三类构造环境中的蓝片岩 [J]. 地质论评, 1990, 36 (3): 210-219.
GAO Chang-lin, JI Rang-shou, QIN De-yu, et al. Blueschists in three tectonic environments in northern China [J]. Geological review, 1990, 36 (3): 210-219.

[38] 康健丽, 肖志斌, 王惠初, 等. 内蒙古锡林浩特早石炭世构造环境: 来自变质基性火山岩的年代学和地球化学证据 [J]. 地质学报, 2016, 90 (2): 383-397.
KANG Jian-li, XIAO Zhi-bin, WANG Hui-chu, et al. Late Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: geochronological and geochemical evidence from the meta-basics volcanic of Xilinhot, Inner Mongolia [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90 (2): 383-397.

[39] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束的确定 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (3): 565-582.
LI Jin-yi, GAO Li-ming, SUN Gui-hua, et al. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Monglia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (3): 565-582.