陕西耀县上奥陶统桃曲坡组下部钾质斑脱岩 U-Pb 年龄的首次报道

王振涛¹⁾,周洪瑞²⁾,王训练²⁾,景秀春²⁾,马伯永³⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京,100037;
 2)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京,100083;3)中国地质调查局,北京,100037

内容提要:华北克拉通上奥陶统的发现和地质时代的确定一直颇受重视。前人通过对华北奥陶系顶部地层中 牙形石和笔石记录的核实,将耀县桃曲坡组的顶限定在笔石 Diplacanthograptus spiniferus 带结束的位置(凯迪 阶下部),该位置代表了华北奥陶系的最高层位。而《中国地层表》(2014)将桃曲坡组的底置于艾家山阶和钱塘江 阶分界处附近,后者略高于上述笔石生物带结束的位置,可见分歧是明显的,亟需来自绝对年龄资料的约束。笔者 在耀县桃曲坡组下部发现了一层斑脱岩,地球化学数据揭示了其富钾质特征(K₂O>Na₂O),K₂O含量(3.81%)接 近鄂尔多斯盆地南缘奥陶系 17 个斑脱岩样品的平均值(4.75%)。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年表明其就位年龄为 453.7±3.3 Ma(MSWD = 0.25),考虑到采样层位接近桃曲坡组的底界,认为桃曲坡组的底可置于 454 Ma(桑比 阶晚期)。这与前人在周缘地区上奥陶统斑脱岩获得的年龄在误差范围内一致,表明本文获得的年龄是可信的。 因此,《中国地层表》(2014)中桃曲坡组的底界需要适当下移。

关键词:华北克拉通;奥陶系;桃曲坡组;钾质斑脱岩;锆石;LA-ICP-MS

地层是地质历史发展的真实记录,地层中保存 了大量地质发展进程中的重要信息(Wang Zejiu et al.,2014)。地层学作为奠基性重要基础学科,对区 域地质调查、矿产资源勘查、地质环境评价以至国土 灾害监测都必不可少(Wang Zejiu et al., 2006)。近 年来,由于与油气关系密切(Yang Hua et al., 2010, 2011,2013; Liu Quanyou et al., 2012; Jin Qiang et al.,2013),鄂尔多斯盆地奥陶系受到了石油工业界 的空前重视。然而,目前学术界对鄂尔多斯盆地奥 陶系的地层划分和对比仍然存在分歧(Sun Zhaocai et al. ,2002;Guo Yanru et al. ,2012;Li Wenhou et al.,2012)。鄂尔多斯盆地及周缘奥陶系早期的地 层划分与对比主要是通过古生物等传统手段建立起 来的(An Taixiang et al., 1983; An Taixiang et al., 1990; Ge Meiyu et al., 1990; Zheng Zhaochang et al.,1991)。近年来,随着对华北克拉通奥陶系发育 的多套凝灰岩(斑脱岩)夹层中锆石 U-Pb 年龄的相 继报道(Chen Cheng et al., 2012; Wu Sujuan et al., 2014; Wang Zhentao et al., 2015a), 极大促进了 华北奥陶系的划分及其在全球范围内的对比。

华北克拉通西、南缘奥陶系斑脱岩广布(Wang Zhentao et al., 2015a, 2015b), 为奥陶系建立以精 确可靠的锆石 U-Pb 年龄为基础的时间框架奠定了 物质基础。同时,华北地台区奥陶系是一套含壳相 动物群和牙形石的浅海白云质灰岩和灰岩地层,在 华北地台西南缘还发育笔石化石(图1),笔石和牙 形石的配合对于确定地层时代更为有利(Chen Xu et al.,2014)。如果再配套绝对年龄的约束,则华北 克拉通尤其是其西南缘奥陶系抑或其某些层位的时 代归属、划分和对比将更加令人信服。Chen Xu et al. (2014) 通过对华北地区及其边缘带奥陶系顶部 地层中牙形石和笔石记录的核实,确定不同地带奥 陶系的顶面应不高于笔石 Diplacanthograptus spiniferus 带(凯迪阶下部)。据此,将耀县桃曲坡 组的顶限定在上述笔石 D. spiniferus 带结束的位 置(~449.73 Ma),但是未约束桃曲坡组底界的沉 积时代(Chen Xu et al., 2014;图 2)。然而,《中国地 层表》(2014)将桃曲坡组的顶置于赫南特阶的底界

注:本文为国家重点研发计划(编号 2017YFC0602704)和国家重大基础研究计划"973 项目"(编号 2011CB403001)资助的成果。 收稿日期;2016-03-29;改回日期;2016-11-18;责任编辑;黄敏。

作者简介:王振涛,男,1986年出生。博士,助理研究员。主要从事沉积学与大地构造学研究。通讯地址:100037,北京市西城区百万庄大街26号,中国地质科学院矿产资源研究所;Email: wangz@cags.ac.cn;gibson_wong@foxmail.com。

(~445.6 Ma),底置于上奥陶统艾家山阶与钱塘江 阶的分界处,略高于笔石 D. *spiniferus* 带结束的 位置(Chen Xu et al.,2014;图 2)。可见对桃曲坡组 的沉积时代是有分歧的。

An Taixiang et al. (1983)曾在华北地台区建立 了牙形石带,但其中许多是地区性的属、种,给华北 地台与波罗的海地区和北美洲等地区的达瑞威尔阶 和桑比阶的牙形石对比带来了不少困难(Chen Xu et al.,2014)。因此,如果能配套地层的绝对年龄, 不但可以厘定地层的沉积时代,澄清长久以来的分 歧,也为区域地层和地区性的生物带的全球对比、构 造演化提供了时间标尺。通过详细的野外研究,笔 者首次在耀县地区桃曲坡组底部发现了1层凝灰岩 (钾质斑脱岩)夹层。由于其中保存性质稳定的斑晶 矿物一锆石,因而可以对锆石进行 U-Pb 测年以获 得凝灰岩的就位(沉积)年龄。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地西、南缘处于北祁连造山带、秦岭 一大别造山带与华北板块交互作用的地区。北祁连 和北秦岭造山带在早古生代它们经历了相似的洋陆 转化过程(Xu Xueyi et al., 2008), 于奥陶纪发育了 汇聚板块边缘的沟-弧-盆体系(Feng Yimin, 1997; Xu Zhiqin et al., 2006; Yan Quanren et al., 2009; Song et al., 2013)。鄂尔多斯盆地西、南缘由 早奥陶世的被动大陆边缘演化为中一晚奥陶世具 沟、弧、盆构造体系中的主动大陆边缘背景(Feng Yimin and He Shiping, 1995; Li Wenhou et al., 1997; Jia Zhenyuan et al., 1997; Song Shuguang, 2009),并诱发了多期火山喷发事件,在盆地西南缘 奥陶系形成多套斑脱岩夹层(Wang Zhentao et al., 2015a, 2015b)。华北克拉通在古生代早期处于稳 定的克拉通盆地发育阶段,其台地区和西、南部台缘 区沉积特征和沉积环境分异明显(Shi Xiaoying et al.,1999)。在晚奥陶世,鄂尔多斯盆地的西缘和南 缘为L形的边缘海,盆地南缘为末端变陡的继承性 碳酸盐缓坡沉积环境(Dong Zhaoxiong et al., 2002; Hou Fanghao et al., 2003).

华北地台区地台内普遍缺失上奥陶统宝塔阶至 下石炭统,而在地台西部鄂尔多斯盆地边缘地区保 存着较好的上奥陶统。陕西耀县地区处于华北地台 的西南缘(图1),向南紧邻秦岭一大别造山带。研 究剖面(耀县桃曲坡剖面)位于陕西省铜川市桃曲坡 水库南侧,剖面的起点坐标为 34°59′14.69″N,108° 54'10.61"E。该剖面由下部的耀县组和桃曲坡组组成,前者主要发育厚层灰岩,后者岩性以中一薄层灰岩为主。为了便于和前人对该剖面分层和生物化石带的对比,本文的野外分层参考了An Taixiang and Zheng Zhaochang(1990)的方案。采样层位位于桃曲坡组下部第9层,距离该组的底部约5m,之间为中薄层灰岩(图3)。



图 1 华北晚奥陶世牙形石及笔石产地 (Chen Xu et al., 2014)

Fig. 1 Distribution of Late Ordovician conodont and graptolite fossils in the North China (after Chen Xu et al, 2014)

1- 内蒙古鄂尔多斯; 2- 吉林辉南; 3- 辽宁本溪; 4- 河北唐山; 5- 河南铜冶; 6- 河北邢台; 7- 山东博山; 8- 山东蓬莱; 9- 河 南安阳; 10- 河南鹤壁; 11- 河南博爱; 12- 山东泗水; 13- 山 东蒙阴; 14- 安徽淮北; 15- 江苏徐州; 16- 陕西陇县; 17- 陕 西耀县- 泾阳

1—Ordos, Inner Mongolia; 2—Huinan, Jilin; 3—Benxi, Liaoning; 4—Tangshan, Hebei; 5—Tongye, Henan; 6— Xingtai, Hebei; 7—Boshan, Shandong; 8—Penglai, Shandong; 9—Anyang, Henan; 10—Hebi, Henan; 11—Boai, Henan; 12— Sishui, Shandong; 13—Mengyin, Shandong; 14—Huaibei, Anhui; 15—Xuzhou, Jiangsu; 16—Longxian, Shaanxi; 17— Yaoxian-Jingyang, Shaanxi

2 样品采集与测试方法

由于斑脱岩较软而疏松,露头表层易于风化及 遭受外界碎屑物质混染,因而在样品采集过程中首 先挖掘至凝灰岩的新鲜位置,而后采集新鲜凝灰岩 样品 10 kg 左右。对采集的斑脱岩样品进行了全岩 主量、微量和稀土元素分析,该过程在河北省区域地 质矿产调查研究所完成。其中,主量元素通过 X 射 线荧光光谱(XRF)分析获得,微量和稀土元素通过 电感耦合等离子体(ICP)分析获得。

锆石分选工作由河北省区域地质矿产调查研究 所实验室完成。将新鲜的样品破碎到适当大小(一





图 3 陕西耀县桃曲坡剖面地层综合柱状图(层号、牙形石生物带和岩性描述据 An Taixiang et al. (1990)) Fig. 3 Synthetical stratum histogram of the Taoqupo section located at Yaoxian county, Shaanxi Province (layer number, Conodonts and petrographic description are after An Taixiang et al., 1990)

般为 80~100 目)、淘洗,然后通过人工重砂、电磁分 选从上述样品中分选出锆石,然后在双目镜下随机 挑选出锆石颗粒。将挑出的锆石随机选取一定数量 在玻璃板上排列粘牢,使用环氧树脂固定凝结,经打 磨抛光处理制成靶样,再进行透射、反射光和阴极发 光(CL)照相以观察锆石的表面及内部结构。锆石 晶体的 CL 图像拍照由北京锆年领航科技有限公司 完成,透射和反射光显微照相在中国地质大学(北 京)科学研究院激光等离子体质谱实验室完成。

根据锆石反射、透射图像和 CL 图像所揭示的 锆石晶体裂隙、包体、环带等内部结构特征,反复对 比以选择合适的激光剥蚀点位进行 U-Pb 同位素年 龄测定。定年分析尽量选择岩浆成因特征明显的 锆石区域,以期较好地限定岩浆喷发时限。锆石的 表 1 陕西耀县上奥陶统桃曲坡组斑脱岩样品的主量(%)和微量元素含量(10⁻⁶)

Table 1 The result of major element composition (%) and trace element composition ($\times 10^{-6}$) of the K-bentonite

sample collected from the Upper Ordovician Taoqupo Formation in the Yaoxian, Shaanxi Province

样品号	SiO ₂	Al_2O_3	TiO ₂	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P_2O_5	La	Ce
TQP-9	54.31	23.74	0.79	1.91	0.26	1.77	3.10	3.81	0.11	0.008	0.141	69.08	130.9
样晶号	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
TQP-9	15.33	51.80	7.96	1.03	7.37	1.31	9.61	2.15	6.28	1.27	7.86	1.64	48.83
样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Со	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr
TQP-9	236.4	2.71	14.67	73.6	17.6	6.5	30.0	19.3	62.7	31.35	129.8	288.8	418.9
样品号	Nb	Mo	In	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
TQP-9	20.74	0.43	0.07	20.07	124.2	10.64	1.28	1.47	0.45	16.1	0.78	27.38	6.45
样品号	Nb	Mo	In	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
TQP-9	20.74	0.43	0.07	20.07	124.2	10.64	1.28	1.47	0.45	16.1	0.78	27.38	6.45

LA-ICP-MS U-Pb 测年实验在中国地质大学(北京) 科学研究院激光等离子体质谱实验室按标准流程完成。所使用的仪器及其参数见 Xie Chaoming et al. (2014)。采用 Glitter 4.4 软件对同位素比值及元 素含量计算进行处理(ver4.0, Macquarie University),用 ISOPLOT 程序进行锆石加权平均 年龄计算及谐和图的绘制。

3 结果

3.1 斑脱岩的化学成分

地球化学结果(表 1)表明,斑脱岩样品具有较高的 SiO₂(54.31%),表明钾质斑脱岩的源岩为中 性岩浆。K₂O含量为 3.81%,略低于 Chen Cheng et al. (2012)和 Wang Zhentao et al. (2015a)报道的 鄂尔多斯盆地南缘的 17 个斑脱岩的 K₂O 平均含量 (4.75%)。所有样品均为 K₂O>Na₂O,显示了其富 钾质特征。原岩恢复及形成构造环境分析(图 4)表 明,桃曲坡组的斑脱岩样品的原始岩浆为高钾亚碱 性粗面岩。Th/Yb-Nb/Yb 图解(图 4)显示本文研 究的样品落入了大陆弧岩浆区域,结合当时的区域 构造特征,可能表征了当时秦岭洋向华北俯冲形成 的岛弧火山喷发事件。

3.2 锆石特征及其年龄

阴极发光图像(图 5)分析表明,该样品中锆石 颗粒的内部岩浆生长振荡环带发育较好,有的有清 晰的核幔边界,有的锆石颗粒没有明显的核。对样 品靶中的 289 颗锆石进行了形态学分析,以透明的 自形或半自形柱状晶体为主,少量呈等轴状,宽长比 介于1:1~1:3.3之间,具有少量的搬运磨蚀迹 象,个别锆石颗粒裂隙和包体发育,晶体长轴长度为 56~185 μm。

对样品中的 44 个锆石颗粒进行了 44 个分析点的 U-Pb 同位素年龄分析(表 2)。所分析的锆石 U

含量为 40.45×10⁻⁶~274.88×10⁻⁶,Th/U 比值在 0.67~1.50 之间。在²⁰⁷ Pb/²³⁵ U-²⁰⁶ Pb /²³⁸ U 图解 上,数据投点落在谐和线上或其附近(图 6)。根据 桃曲坡组生物地层的大致约束(图 2),剔除掉了一 些²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 表面谐和年龄值明显偏大(469~491 Ma)和偏小(423~442 Ma)的数据。其余的 31 个数 据用于加权平均计算的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄介于 445 ± 12~463 ±8 Ma 之间,其加权平均年龄为 453.7± 3.3 Ma(MSWD = 0.25),这一年龄代表该层钾质 斑脱岩的就位(沉积)年龄。

4 讨论

对华北克拉通南缘陕西富平赵老峪剖面赵老峪 组凝灰岩夹层进行精确的 SHRIMP 锆石 U-Pb 同 位素测年,获得了 453.2±6.9 Ma 的年龄结果,据 此认为赵老峪组为华北克拉通奥陶系最年轻的地层 (Wu Sujuan et al., 2014)。这与 Chen Cheng et al. (2012)在泾阳西陵沟剖面的金栗山组中一下部地层 中获得的产出层位较高的一个钾质斑脱岩样品 (XLG-124.5)的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 451.5± 4.9 Ma 相近,也接近 Wang Zhentao et al. (2015a) 在泾阳西岭沟剖面和平凉银洞官庄剖面平凉组某 些斑脱岩夹层获得的年龄接近(譬如:454±4 Ma, 452±5 Ma,450.6±0.5 Ma,LA-ICP-MS法)。同 时,本文报道的陕西耀县桃曲坡剖面桃曲坡组底 部获得的斑脱岩样品 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 453.7±3.3 Ma,与上述两个数据在误差范围内一 致。这三个数据的一致表明华北地台奥陶系的最高层 位除了生物地层提供的证据以外,也得到了可信的绝 对年龄的确认。同时,本文报道的年龄略大于 ChenXu et al. (2014)对桃曲坡组顶部时限的研究 (接近 449.73 Ma),说明本文的数据符合地层的展布规



Fig. 4 The protolith and tectonic environment discrimination diagrams of bentonite samples from the Upper Ordovician Taoqupo Formation and surround area in the Yaoxian, Shaanxi Province (adapted from Wang Zhentao et al., 2015a, and for details of each diagram see Wang Zhentao et al., 2015a)

表 2 陕西耀县上奥陶统桃曲坡组斑脱岩样品 TQP-9 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素及年龄分析结果

Table 2 U-Pb isotopic ratios and ages of zircons from Upper Ordovician bentonite sample of the

Taoqupo Formation in the Yaoxian County, Shaanxi Province

	含量(10-6)			同位素原子比率						表面年龄(Ma)						
测点	DL	TT	Th/U	$^{206} \mathrm{Pb}/^{238} \mathrm{U}$		$^{207} \mathrm{Pb}/^{235} \mathrm{U}$		$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		$^{207} \mathrm{Pb}/^{235} \mathrm{U}$		$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$		谐和
	ΓD	0		测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	度
TQP-9-01	4.80	56.21	0.83	0.0723	0.0014	0.5586	0.0470	0.0560	0.0048	450	8	451	31	453	155	100
TQP-9-02	7.03	77.43	0.92	0.0742	0.0013	0.5770	0.0307	0.0564	0.0031	462	8	463	20	467	86	100
TQP-9-03	7.69	86.88	1.14	0.0717	0.0013	0.5942	0.0309	0.0601	0.0032	446	8	474	20	608	81	94
T Q P-9-04	5.29	60.99	0.81	0.0721	0.0014	0.5513	0.0418	0.0555	0.0043	449	8	446	27	431	135	101
T Q P-9-05	6.61	75.13	0.97	0.0724	0.0014	0.5543	0.0434	0.0555	0.0044	451	8	448	28	433	141	101
TQP-9-06	21.10	227.58	1.12	0.0729	0.0012	0.5689	0.0226	0.0566	0.0023	453	7	457	15	477	59	99
TQP-9-07	12.75	138.25	0.95	0.0755	0.0014	0.5914	0.0387	0.0568	0.0038	469	8	472	25	484	112	99
TQP-9-08	9.86	109.50	1.01	0.0725	0.0016	0.5588	0.0564	0.0559	0.0057	451	10	451	37	448	187	100
TQP-9-09	5.02	56.85	0.86	0.0726	0.0019	0.5671	0.0912	0.0567	0.0092	452	12	456	59	479	309	99
TQP-9-10	17.09	203.77	0.86	0.0696	0.0012	0.5336	0.0315	0.0556	0.0033	434	7	434	21	437	100	100
TQP-9-11	8.62	95.39	0.82	0.0754	0.0017	0.5911	0.0566	0.0568	0.0055	469	10	472	36	485	174	99
TQP-9-12	10.10	112.37	1.03	0.0729	0.0017	0.5644	0.0673	0.0561	0.0068	454	10	454	44	458	226	100
TQP-9-13	23.52	245.99	1.08	0.0765	0.0015	0.6024	0.0355	0.0571	0.0034	475	9	479	22	494	96	99
TQP-9-14	19.16	187.37	1.21	0.0791	0.0015	0.6285	0.0456	0.0576	0.0042	491	9	495	28	514	127	99
TQP-9-15	14.47	163.68	0.88	0.0738	0.0014	0.5674	0.0473	0.0558	0.0047	459	9	456	31	444	152	101
TQP-9-16	6.45	77.33	0.90	0.0699	0.0017	0.5314	0.0724	0.0551	0.0076	436	10	433	48	417	262	101
TQP-9-17	6.38	73.30	0.86	0.0730	0.0016	0.5675	0.0481	0.0564	0.0049	454	9	456	31	467	150	100
TQP-9-18	11.81	132.28	0.91	0.0744	0.0013	0.5728	0.0358	0.0558	0.0035	463	8	460	23	444	108	101
TQP-9-19	9.50	108.60	0.85	0.0735	0.0014	0.5714	0.0460	0.0564	0.0046	457	8	459	30	468	145	100
TQP-9-20	6.99	78.74	0.77	0.0734	0.0018	0.5618	0.1124	0.0555	0.0112	457	11	453	73	431	373	101
TQP-9-21	5.87	68.29	1.17	0.0715	0.0020	0.5489	0.1180	0.0557	0.0120	445	12	444	77	440	391	100
TQP-9-22	3.54	40.45	0.70	0.0737	0.0026	0.5675	0.2122	0.0558	0.0209	459	16	456	137	444	642	101
TQP-9-23	6.36	72.94	0.89	0.0731	0.0016	0.5662	0.0610	0.0561	0.0061	455	9	456	40	458	204	100
TQP-9-24	7.72	85.43	1.00	0.0724	0.0015	0.5589	0.0466	0.0560	0.0047	450	9	451	30	452	150	100
TQP-9-25	4.80	56.24	0.82	0.0733	0.0015	0.5675	0.0474	0.0562	0.0048	456	9	456	31	459	150	100
TQP-9-26	22.47	274.88	0.67	0.0699	0.0013	0.5359	0.0400	0.0556	0.0043	435	8	436	26	438	177	100
TQP-9-27	23.95	247.98	1.32	0.0731	0.0013	0.6059	0.0400	0.0601	0.0040	455	8	481	25	608	112	95
TQP-9-28	5.07	59.03	0.84	0.0743	0.0021	0.5780	0.1485	0.0564	0.0146	462	13	463	90	467	452	100
TOP 0 20	0.71 6.01	84 00	1.07	0.0720	0.0022	0.5567	0.1210	0.0558	0.0137	402	10	401	102	444	400	100
TOP 0 21	0.91	04.99	1.07	0.0001	0.0020	0.5169	0.1219	0.0555	0.0151	420	14	424	00	443	417	100
TOP 0 22	1.47	150 85	1 01	0.0729	0.0023	0.5529	0.1510	0.0550	0.0152	400	0	447	199	415	474	101
TOP 0 22	10.61	216 21	1.01	0.0727	0.0013	0.5058	0.0740	0.0505	0.0074	432	9	400	24	470	177	100
TOP-0-34	16 20	181 40	1.19	0.0700	0.0014	0. 3410	0.0568	0.0330	0.0000	439	0 0	356	41	430 	214	110
TOP-0-35	6 24	70 55	0.86	0.0073	0.0014	0.4194	0.0308	0.0431	0.0001	457	11	458	72	164	214	100
TOP-9-36	24 48	264 28	1 45	0.0735	0.0013	0.5336	0.0365	0.0556	0.0110	13/	8	134	24	435	110	100
TOP-9-37	6 51	76 91	0.91	0.0709	0.0013	0.5459	0.0586	0.0558	0.0061	442	11	442	38	446	196	100
TOP-0-38	12 13	136 72	0.01	0.0722	0.0010	0.5565	0.0363	0.0559	0.0001	110	8	110	24	450	110	100
TOP-9-39	5 01	60.57	0.88	0.0678	0.0020	0.5211	0.0768	0.0558	0.0083	423	12	426	51	442	278	99
TQP-9-40	6.39	71.69	0.91	0.0743	0.0018	0. 5771	0.0768	0.0563	0.0076	462	11	463	49	465	255	100
TQP-9-41	8.29	94.39	1.02	0.0721	0.0017	0.5517	0.0494	0.0555	0.0051	449	10	446	32	432	160	101
TQP-9-42	7.20	82.83	0.94	0.0721	0.0016	0.5562	0.0552	0.0560	0.0056	449	10	449	36	451	183	100
TQP-9-43	10.93	126.11	0.92	0.0727	0.0015	0.5621	0.0428	0.0560	0.0044	453	9	453	28	454	133	100
TQP-9-44	7.21	80.98	0.95	0.0729	0.0017	0.6042	0.0534	0.0601	0.0054	454	10	480	34	607	152	100
- UL V IT		00.00	0.00			J. J. 1012			3.0001	1 101	- · ·	100			100	100

备注:误差为 1σ; Pb 为锆石中全铅含量;同位素比率已采用²⁰⁸ Pb 校正法进行了普通铅校正;表面年龄谐和度计算公式为:t_{206/238} /t_{207/235} ×100。

律。虽然《中国地层表》将桃曲坡组的顶部置于中国 年代地层中的赫南特阶和钱塘江阶的分界处(445.6 Ma),但本文报道的年龄数据还不能对桃曲坡组的 顶的确切时限给出判据,只能对该组的底给出相对 严格的约束。

笔石 Diplacanthograptus spiniferus 带代表



图 5 样品中具有代表性的锆石阴极发光图像(圆圈代表测点位置,具体描述见正文)

Fig. 5 Representative CL images of zircons from the Bentonite sample TQP-9 from the

Taoqupo Formation in Taoqupo section, Yaoxian County, Shaanxi Province





了陕西陇县和耀县奥陶系的最高层位(陈旭等, 2014)。《中国地层表》将桃曲坡组的底置于笔石 Dicellograptus complanatus 带开始的位置,略高于 笔石 Diplacanthograptus spiniferus 带(Chen Xu et al.,2014),其时限小于 449.73 Ma,意即《中国地 层表》认为桃曲坡组的底高于 Chen Xu et al. (2014)确认的该组的顶,二者并无重叠的部分。 足见现在对于桃曲坡组的时限存在较大分歧,仅 仅根据生物带尚不能弥合分析,亟需绝对年龄的 约束。本文在桃曲坡组下部(距该组底部 5 m)获 得的斑脱岩样品 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 453.7 ±3.3 Ma,表明了桃曲坡组的沉积时代始于桑比期 晚期,并非《中国地层表》认为的桃曲坡组始于艾家 山期结束的时限位置。因此,Chen Xu et al.(2014) 的结论是合理的。

5 结论

(1)在陕西耀县桃曲坡剖面桃曲坡组接近底部 首次发现一层斑脱岩,主量元素结果显示,SiO₂和 K₂O含量较高,且K₂O含量大于Na₂O,属钾质斑 脱岩,其原始岩浆为高钾亚碱性粗面岩。

(2)本文的测年结果与前人在鄂尔多斯盆地南 缘奧陶系斑脱岩中获得的年龄是一致的,可能代表 了同期火山事件,它们在区域上是可以对比的。

(3)斑脱岩中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 测年结 果为 453.7±3.3 Ma,考虑到斑脱岩的层位和灰岩 沉积速率相对较快,认为耀县桃曲坡剖面桃曲坡组 底界年龄可置于 454 Ma。据此将桃曲坡组的沉积 时代厘定为桑比期晚期一凯迪阶,《中国地层表》 (2014)中桃曲坡组的位置应适当下移。 **致谢:**河北省廊坊区域地质调查研究所实验室 帮助完成了锆石单矿物分选工作,锆石 U-Pb 测年 得到中国地质大学(北京)激光烧蚀等离子质谱实验 室苏梨老师和相关实验室人员的热情帮助,在此聊 表谢忱!

References

- An Taixiang, Zhang Fang, Xiang Weida, et al. 1983. The conodonts of North China and the adjacent regions. Beijing: Science Press, 1~223 (in Chinese).
- An Taixiang, and Zheng Zhaochang. 1990. The conodonts of the marginal areas around the Ordos Basin, North China. Beijing: Science Press, 1~219 (in Chinese with English abstract).
- Chen Cheng, Shi Xiaoying, Pei Yunpeng, Wang Xinqiang. 2012. K-Bentonites from the Jinsushan Formation of Late Ordovician, Southern Ordos Basin: SHRIMP dating and tectonic environment. Geoscience, 26(2): 205~219 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xu, Bergström S M, Zhang Yuandong, Wang Zhihao. 2014. A regional tectonic event of Katian (Late Ordovician) age across three major blocks of China. Chinese Science Bulletin, 59(1): 59~65.
- Dong Zhaoxiong, Zhao Jingsong, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, Zheng Congbin, Zhang Guisong, Wu Yi. 2002. Sedimentary model of distally steepening ramp of Ordovician in southern Ordos basin. Journal of Southwest Petroleum Institute, 24 (1), 50∼52 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, and He Shiping. 1995. Basic characteristics of tectonics in the Qilian Mountains and its neighbourings- On genetic environments of Early Paleozoic marine volcanic. Northwest Geoscience, 1 (1): $92 \sim 103$ (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin. 1997. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, Vhina: History, presence and prospect. Advance in Earth Sciences, 12(4): $5 \sim 12$ (in Chinese with English abstract).
- Ge Meiyu, Zheng Zhaochang, Li Yuzhen. 1990. The Ordovician and Silurian graptolite stratum and graptolite fauna in Ningxia and its neighboring regions. Nanjing: Nanjing University Press, 1 ~190 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yanru, Zhao Zhenyu, Fu Jinhua, Xu Wanglin, Shi Xiaoying, Sun Liuyi, Gao Jianrong, Zhang Yanling, Zhang Yueqiao, Liu Junbang, Liu Hong. 2012. Sequence lithofacies paleogeography of the Ordovician in Ordos Basin, China. Acta Petrolei Sinica, 33(S2): 95~109 (in Chinese with English abstract).
- Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Dong Zhaoxiong, Zhao Jingsong, Lu Shuxiu, Wu Yi, Chen Yana. 2003. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 21(1); $106 \sim 112$ (in Chinese with

English abstract).

- Jia Zhenyuan, Cai Hua, Cai Zhongxian, Qin Yujuan. 1997. Sequence stratigraphy and sea level change of the Ordovician in the southern margin of Ordos region. Earth Science, 22(5): 48~60 (in Chinese with English abstract).
- Jin Qiang, Huang Zhi, Li Weizhen, Bao Hongping, Sun Liuyi, Shan Chengcheng. 2013. Sedimentary models of Ordovician source rocks in Ordos Basin and their hydrocarbon generation potential. Acta Geologica Sinica, 87(3): 393~402(in Chinese with English abstract).
- Li Wenhou, Chen Qiang, Li Zhichao, Wang Ruogu, Wang Yan, Ma Yao. 2012. Lithofacies palaeogeography of the Early Paleozoic in Ordos area. Journal of Palaeogeography, 14(1): 85~100 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenhou, Mei Zhichao, Chen Jingwei, Lu Huanyong. 1997. Genetic environment of Ordovician radiolarian cherts and volcanic tuffs in Weibei, Shaanxi Province. Regional Geology of China, 16(4): 87~92 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xiaoying, Chen Jianqiang, Mei Shilong. 1999. Ordovician sequence successions on Sino ~ Korea platform and their correlation. Earth Science, 24(6):573~580 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, Xia Xiaohong. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. Gondwana Research, 23: 1378~1401.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, Zhang Guibin. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP ~ UHP belts. Acta Petroligica Sinica, 25(9): 2067~2077.
- Sun Zhaocai, and Hu Xianmu. 2002. View on the correlation and demarcation of the Ordoician series in the southwestern margin region of Ordos Basin and the significance of petroleum exploration in Central~Western part of China. Marine Origin Petroleum Geology, 7(4): 41~58 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zejiu, Huang Zhigao, Yao Jianxin, Ma Xiulan. 2014. Characteristics and Main Progress of The Stratigraphic Chart of China and Directions. Acta Geoscientica Sinica, 35(3): 271 \sim 276 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zejiu, and Huang Zhigao. 2006. Significant Progress Made in China Regional Chronostratigraphic Research. Geological Review, 52(6): 747~756(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, Jing Xiuchun, Zhang Yongsheng. 2015a. Volcanic event records at the southwestern Ordos Basin: The message from geochemical and zircon U~Pb geochronology of K~bentonites from Pingliang Formation, Shaanxi and Gansu region. Acta Petrologica Sinica, 31(9): 2633~2654.
- Wang Zhentao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, Jing Xiuchun, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan. 2015b. Ordovician Geological Events Group in the West and South Ordos Basin.

Acta Gelogica Sinica, 89(11): $1990 \sim 2004$ (in Chinese with English abstract).

- Wu Sujuan, Li Zhenhong, Hu Jianmin, Gong Wangbin. 2014. Confirmation of Ordovician sediments in south margin of Ordos Basin by SHRIMP U~Pb zircon dating of volcanic tuff interlayers and its significance. Geological Review, 60(4): 903~912 (in Chinese with English abstract).
- Xie Chaoming, Li Cai, Su Li, Wu Yanwang, Xie Yaowu. 2014. Pan ~ African and early Paleozoic tectonothermal events in the Nyainrong microcontinent: Constraints from geochronology and geochemistry. Science China: Earth Sciences, 44: 414 ~428.
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, Zhang Erpeng, Chen Junlu, Sun Jiming. 2008. Tectonic framework of North Qinling Mountain and North Qilian Mountain conjunction area in Early Paleozoic: A study of the evidences from strata and tectonic~magmatic events. Northwestern Geology, 41(1): 1 ~21 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Yao Jianxin. 2006. The Early Palaeozoic terrene framework and the formation of the High~ Pressure (HP) and Ultra ~ High Pressure (UHP) metamorphic belts at the Central Orogenic Belt (COB). Acta Geologica Sinica, 80 (12): 1793 ~ 1806 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Tao, Zhang Hongyuan, Xiang Zhongjin, Jiang Chunfa, Gao Lianda. 2009. Timing of the Transformation from Seafloor Spreading on the South Margin of the North China Block to Subduction within the North Qinling Orogenic Belt. Acta Geologica Sinica, 83 (11): 1565~1583 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Fu Jinhua, Bao Hongping. 2010. Sedimentary characteristics and gas accumulation potential along margin of Ordovician trough in western and southern parts of Ordos. Marine Origin Petroleum Geology, 15(2): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng. 2011. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 32(5): 733 ~ 740 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Liu Xinshe, Zhang Daofeng. 2013. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin and advances in gas exploration. Natural Gas Industry, 33(5): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zhaochang, and Li Yuzhen. 1991. The new advances in the study of the Ordovician system in Helanshan area. Geoscience, 6 (5): 119 ~ 137 (in Chinese with English abstract).

参考文献

安太庠,张放,向维达. 1983. 华北及邻区牙形石. 北京:科学出版 社,1~223.

- 安太庠,郑昭昌.1990.鄂尔多斯盆地周缘的牙形石.北京:科学出版社,1~219.
- 陈诚,史晓颖,裴云鹏,王新强.2012.鄂尔多斯盆地南缘晚奥陶世 钾质斑脱岩~SHRIMP测年及其成因环境.现代地质,26(2): 205~219.
- 陈旭, Bergström S M, 张元动, 王志浩. 2014. 中国三大块体晚奥 陶世凯迪早期区域构造事件. 科学通报, 59(1): 59~65.
- 董兆雄,赵敬松,方少仙,侯方浩,郑聪斌,章贵松,吴诒. 2002. 鄂尔多斯盆地南部奥陶纪末端变陡缓坡沉积模式.西南石油学 院学报,24(1):50~52.
- 冯益民,何世平.1995.祁连山及其邻区大地构造基本特征——兼 论早古生代海相火山岩的成因环境.西北地质科学,1(1):92 ~103.
- 冯益民. 1997. 祁连造山带研究概况——历史、现状及展望. 地球科 学进展, 12(4): 5~12.
- 葛梅钰,郑昭昌,李玉珍. 1990. 宁夏及其邻近地区奥陶纪、志留纪 笔石地层及笔石群. 南京:南京大学出版社,1~190.
- 郭彦如,赵振宇,付金华,徐旺林,史晓颖,孙六一,高建荣,张延 玲,张月巧,刘俊榜,刘虹. 2012.鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩 相古地理.石油学报,33(增刊2):95~109.
- 侯方浩,方少仙,董兆雄,赵敬松,卢蜀秀,吴诒,陈娅娜. 2003. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发特征. 沉积 学报,21(1):106~112.
- 贾振远,蔡华,蔡忠贤,秦玉娟. 1997. 鄂尔多斯地区南缘奥陶纪层 序地层及海平面变化. 地球科学, 22(5):48~60.
- 解超明, 李才, 苏犁, 吴彦旺, 谢尧武. 2014. 藏北聂荣微陆块泛 非一早古生代构造热事件: 年代学与地球化学制约. 中国科 学: 地球科学, 44: 414~428.
- 金强,黄志,李维振,包洪平,孙六一,单程程.2013.鄂尔多斯盆 地奧陶系烃源岩发育模式和天然气生成潜力.地质学报,87 (3):393~402.
- 李文厚,陈强,李智超,王若谷,王妍,马瑶. 2012. 鄂尔多斯地区 早古生代岩相古地理. 古地理学报,14(1):85~100
- 李文厚,梅志超,陈景维,卢焕勇. 1997. 陕西渭北奥陶系放射虫硅 质岩与火山凝灰岩的成因环境.中国区域地质,16(4):87 ~92.
- 刘全有,金之钧,王毅,韩品龙,陶冶,王起琮,任站利,李文厚. 2012. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究. 岩石 学报,28(3):847~858.
- 史晓颖,陈建强,梅仕龙.1999.中朝地台奥陶系层序地层序列及 其对比.地球科学,24(6):573~580.
- 宋述光,牛耀龄,张立飞,张贵宾.2009.大陆造山运动:从大洋俯 冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为 例.岩石学报,25(9):2067~2077.
- 孙肇才,胡显穆.2002.鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系的对比划分意 见及其对中西部油气勘探的意义.海相油气地质,7(4):41 ~58.
- 王泽九,黄枝高,姚建新,马秀兰.2014.中国地层表及说明书的特 点与主要进展.地球学报,35(3):271~276.
- 王泽九,黄枝高.2006.中国区域年代地层研究取得重要进展.地 质论评,52(6):747~756.
- 王振涛,周洪瑞,王训练,景秀春,张永生. 2015a. 鄂尔多斯盆地

西南缘奥陶纪火山活动记录:来自陕甘地区平凉组钾质斑脱岩 地球化学和锆石年代学的信息. 岩石学报,31(9):2633 ~2654.

- 王振涛,周洪瑞,王训练,景秀春,张永生,邢恩袁. 2015b.鄂尔多 斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群耦合作用.地质学报,89 (11):1990~2004.
- 吴素娟,李振宏,胡健民,公王斌.2014.鄂尔多斯盆地南缘赵老峪 剖面奧陶系凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.地 质论评,60(4):903~912.
- 徐学义,何世平,王洪亮,张二朋,陈隽璐,孙吉明. 2008. 早古生 代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约 束.西北地质,41(1):1~21.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,姚建新.2006.中央造山带早古生代地体 构架与高压/超高压变质带的形成.地质学报,80(12):1793

 $\sim \! 1806.$

- 闫全人,王宗起,闫臻,王涛,张宏远,向忠金,姜春发,高联达. 2009.从华北陆块南缘大洋扩张到北秦岭造山带板块俯冲的转 换时限.地质学报,83(11):1565~1583.
- 杨华,付金华,包洪平.2010.鄂尔多斯地区西部和南部奥陶纪海 槽边缘沉积特征与天然气成藏潜力分析.海相油气地质,15 (2):1~13.
- 杨华,付金华,魏新善,任军峰. 2011. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳 酸盐岩天然气勘探领域. 石油学报,32(5):733~740.
- 杨华,刘新社,张道锋.2013.鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩 天然气成藏主控因素及勘探进展.天然气工业,33(5):1~12.
- 郑昭昌,李玉珍. 1991. 贺兰山奥陶系研究的新进展. 现代地质, 6 (5): 119~137.

First Report on Zircon U-Pb Geochronology of K-bentonites from the Lower Part of the Upper Ordovician Taoqupo Formation in Yaoxian, Shaanxi

WANG Zhentao¹⁾, ZHOU Hongrui²⁾, WANG Xunlian²⁾, JING Xiuchun²⁾, MA Boyong³⁾

1) MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments,

Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037;

2) School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;

3) China Geological Survey, Beijing, 100037

Abstract

Discovery of the Upper Ordovician in the North China Craton and determination of its geological time has received considerable concerns. By verifying the previous records of conodont and graptolite in the top part of the Ordovician carbonate sequences at different localities, this study defined top of the Taoqupo Formation in Yaoxian County within the closure position (449.73 Ma, the early Katian) of graptolite Diplacanthograptus spiniferus Biozone. This position represents the highest sequence of the Orvocician in North China. However, The Stratigraphic Chart of China (2014) placed the top of the Taoqupo Formation around the division line between Qiantangjiangian and Hirnantian Stages (445.6 Ma), with the latter slightly higher than the end position of the graptolite biozone. The difference is evident and needs absolute age data. This study found one layer of bentonite at the lower part (about 5m to the bottom) of the Taoqupo Formation in Yaoxian. Geochemical data of bentonite samples reveal that they are potassium-rich feature (K_2O) with K_2O content of 3.81% close to the average value (4.75%) of 17 Ordovician bentonite samples from the southern margin of the Ordos Basin. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating shows that the bentonite bed emplaced at 453.7 \pm 3.3 Ma (MSWD = 0.25). Considering sampling sequences and relatively quick sedimentary rate of the limestone, it can be concluded that the bottom of the Taoqupo Formation is at 454 Ma (late Sandbian Stage). The age obtained in this paper is consistent with the previously obtained data, with deviation within the error range, indicating that the age in this paper is credible. Therefore, the bottom boundary of the Taoqupo Formation in The Stratigraphic Chart of China (2014) should shift downward appropriately.

Key words: North China Craton; Ordovician; Taoqupo Formation; K-bentonite; zircon; LA-ICP-MS