

doi:10.3799/dqkx.2017.075

# 山东铁铜沟橄榄岩的水含量:华北克拉通 早白垩世富水岩石圈的分布

夏群科<sup>1,2</sup>,程徽<sup>1</sup>,刘佳<sup>1,2</sup>

1.中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026

2.浙江大学地球科学学院,浙江杭州 310027

**摘要:**已有研究表明,华北克拉通东部的山东费县岩石圈地幔在克拉通破坏峰期(早白垩世)时是高度富水的,其中橄榄石的 $H_2O$ 含量 $>180\times 10^{-6}$ ;而同期克拉通西部的太行山符山地区岩石圈地幔具有贫水特征,其中橄榄石的 $H_2O$ 含量为 $\sim 10\times 10^{-6}$ .这表明西向俯冲的古太平洋板块造成了华北东部早白垩世岩石圈地幔的富水特征,为克拉通破坏提供了力学前提.为了解古太平洋板块俯冲的影响范围,对介于费县和符山之间的山东铁铜沟地区早白垩世高镁闪长岩中的橄榄岩捕虏体进行了含水性分析,橄榄石的原始 $H_2O$ 含量( $6\times 10^{-6}\sim 24\times 10^{-6}$ ,平均值为 $(15\pm 7)\times 10^{-6}$ )与符山地区相当,暗示太平洋板块俯冲造成的岩石圈富水效应可能仅局限在华北最东部,这和最东部地区克拉通破坏程度最高是一致的.

**关键词:**水含量;橄榄岩;早白垩世;铁铜沟;克拉通破坏;岩石学;地球化学.

中图分类号: P584;P595

文章编号: 1000-2383(2017)06-0853-09

收稿日期: 2017-05-10

## The Distribution of the Early Cretaceous Hydrous Lithospheric Mantle in the North China Craton: Constraints from Water Content in Peridotites of Tietonggou

Xia Qunke<sup>1,2</sup>, Cheng Hui<sup>1</sup>, Liu Jia<sup>1,2</sup>

1.School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2.School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract:** Previous studies show that the Early Cretaceous lithospheric mantle beneath Feixian (Shandong Province) in the eastern part of the North China Craton (NCC) was highly hydrous ( $>1000\times 10^{-6}$ ,  $H_2O$  wt.), in which the  $H_2O$  content of olivine was  $>180\times 10^{-6}$ . Meanwhile the Early Cretaceous lithospheric mantle beneath Fushan (Shanxi Province) in the western part of the NCC was relatively dry, in which the  $H_2O$  content of olivine was  $\sim 10\times 10^{-6}$ . This contrast demonstrates that the hydration of the Early Cretaceous lithospheric mantle of eastern NCC was probably due to the westward subduction of the Pacific plate, and this high water content had significantly reduced the viscosity of the lithospheric mantle and provided a prerequisite for the destruction of the NCC. To explore the distribution of hydrous lithospheric mantle in the NCC, we measured the  $H_2O$  content of the peridotite xenoliths hosted by the Early Cretaceous high-magnesium diorites of Tietonggou (Shandong Province) that is located between Feixian and Fushan. The  $H_2O$  content of olivine in the Tietonggou peridotites is  $(6-24)\times 10^{-6}$  (average  $(15\pm 7)\times 10^{-6}$ ) and comparable with that of the Fushan olivine, suggesting that the Early Cretaceous hydrous lithospheric mantle caused by the westward subduction of the Pacific plate was likely limited to the most eastern part of the NCC.

**Key words:** water content; peridotite; Early Cretaceous; Tietonggou; destruction of NCC; petrology; geochemistry.

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41472057).

作者简介:夏群科(1972-),男,教授,从事地幔岩石地球化学和地球内部挥发分研究. ORCID:0000-0003-1256-7568. E-mail: qkxia@zju.edu.cn

引用格式:夏群科,程徽,刘佳,等,2017.山东铁铜沟橄榄岩的水含量:华北克拉通早白垩世富水岩石圈的分布.地球科学,42(6):853-861.

## 0 引言

稳定的克拉通能够被破坏的前提是其岩石圈强度的降低,而岩石圈的水化是造成强度降低的最有效途径之一(Dixon *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2008; Peslier *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011).华北克拉通中生代经历了破坏,尤以东部表现得最强烈,其峰期在早白垩世(Menzies *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2012).Xia *et al.* (2013)对山东费县早白垩世岩石圈地幔来源高镁玄武岩的研究表明,当时华北东部岩石圈地幔的水含量 $>1\ 000 \times 10^{-6}$  (根据矿物含量和矿物间水的分配系数反演得出其中橄榄石的水含量 $>180 \times 10^{-6}$ ,水含量表示为  $H_2O$  的重量分数,下同),远高于软流圈地幔( $\sim 50 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ ; Hirschmann, 2005),是强烈水化的,造成水化的过程应该是海洋板块俯冲.而华北中部太行山符山地区高镁闪长岩中橄榄岩捕虏体的全岩水含量为 $\sim 40 \times 10^{-6}$  (其中橄榄石的水含量为 $\sim 10 \times 10^{-6}$ ; Liu and Xia, 2014),低于软流圈地幔,落在典型克拉通的水含量范围之内(Lee *et al.*, 2011).这暗示西向俯冲的古太平洋板块造成了华北东部早白垩世岩石圈地幔的富水特征,为克拉通破坏提供了力学前提.很显然,费县和符山的工作给出的只是东西两个点上的信息,而只有华北早白垩世岩石圈地幔水含量的区域分布特征得到了清楚的认识,我们才能对华北克拉通破坏的动力因素提供较为确切的制约.

基于以上考虑,本文对介于费县和符山之间的山东铁铜沟地区高镁闪长岩中的橄榄岩捕虏体进行了含水量的分析,为探讨华北中生代岩石圈的水化范围提供新的制约.

## 1 地质背景和样品

铁铜沟岩体位于鲁西莱芜盆地的东南侧,北纬 $36^{\circ}05'$ 、东经 $117^{\circ}52'$ ,介于费县和符山之间(图1).岩体出露面积约 $7\text{ km}^2$ ,是一个早白垩世中基性侵入杂岩体,以辉石闪长岩为主.岩体呈环带状分布,中心为辉长岩,向外过渡为辉石闪长岩和角闪闪长岩.铁铜沟岩体含有丰富的深源捕虏体(许文良等, 2003),皆产于闪长岩中,多呈椭球形,常发育角闪石反应边和烘烤边.捕虏体主要为纯橄岩( $>50\%$ )和方辉橄岩(约 $30\%$ ),含少量辉石岩(斜方辉石岩、二辉石岩和透辉岩各约占 $5\%$ )和少量的二辉橄

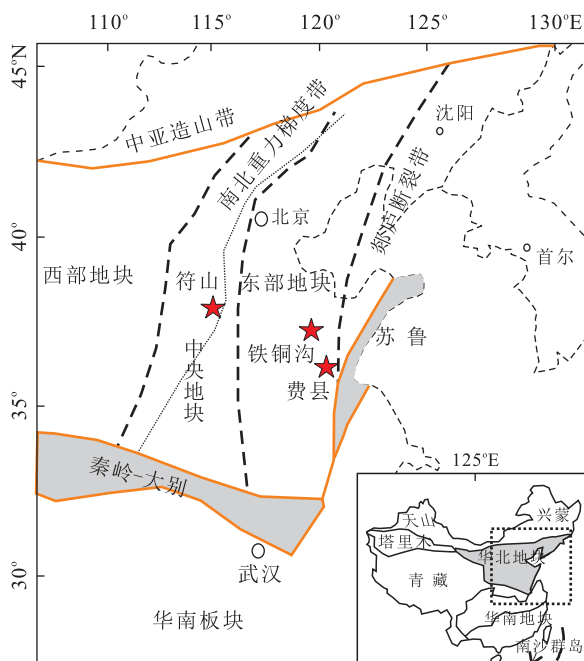


图 1 华北早白垩世岩石圈地幔样品地点

Fig. 1 Localities of the Early Cretaceous lithospheric mantle samples in the North China Craton

岩(许文良等, 2003).

本文的样品(标记为 TTG)包括 9 个纯橄岩和 1 个单斜辉石岩,呈圆状或椭圆状,一般直径为 $1.5 \sim 2.0\text{ cm}$ ,为板状结构和粒状变晶结构.捕虏体中 $90\%$ 以上为橄榄石,含少量铬铁矿.单斜辉石岩(TTG17)中含有少量橄榄石.所有样品中橄榄石颗粒均较小,粒径普遍小于 $2 \sim 3\text{ mm}$ .铬铁矿分布不均匀,位于橄榄石颗粒中或粒间.样品虽然都有不同程度的蚀变,但是仍然可见新鲜的橄榄石颗粒;样品 TTG17 内部可见新鲜的单斜辉石颗粒,但只在靠近寄主闪长岩的位置才有新鲜的橄榄石颗粒.

## 2 分析方法

### 2.1 水含量分析

矿物水含量的红外光谱分析在中国科技大学地球和空间科学学院的显微红外光谱实验室完成.将样品(捕虏体和围岩一起)切割成长约 $2 \sim 4\text{ cm}$ 、宽约 $1 \sim 2\text{ cm}$ 的小块,双面抛光,厚度控制在 $0.15\text{ mm}$ 左右.这样的厚度范围小于单个晶体的粒径,可保证红外光谱分析时探测的是单晶,同时又远远大于常规岩石薄片的厚度,可以在红外光谱分析时获得较强的信号.在制样过程中薄片表面残余有大量的树脂,故在进行红外光谱分析前先将样品放入丙酮中

表 1 铁铜沟纯橄岩和辉石岩中矿物的化学成分和水含量

Table 1 Chemical composition and H<sub>2</sub>O content of minerals in Tietonggou peridotites and pyroxenite

样品号	分析点	位置	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>	H <sub>2</sub> O(10 <sup>-6</sup> )
TTG1	1-1	靠近寄主岩	39.62	41.81	0.00	0.05	17.95	0.06	0.25	0.02	0.19	99.96	80.7	13
	1-2		39.21	42.14	0.00	0.03	17.26	0.03	0.27	0.02	0.25	99.22	81.5	26
	1-3		39.45	41.92	0.03	0.12	17.73	0.05	0.18	0.00	0.27	99.75	81.0	28
	1-4		39.35	41.68	0.02	0.04	17.90	0.04	0.23	0.02	0.28	99.57	80.7	9
	1-5		39.34	42.30	0.00	0.03	17.23	0.03	0.22	0.00	0.26	99.42	81.5	9
	平均值	39.39	41.97	0.01	0.06	17.61	0.04	0.23	0.01	0.25	99.58	81.1	17	
	SD	0.13	0.22	0.01	0.03	0.31	0.01	0.03	0.01	0.03	0.26	0.4	9	
	1-6	样品内部	39.70	44.53	0.00	0.06	14.29	0.05	0.19	0.03	0.27	99.12	84.9	7
	1-7		40.36	45.24	0.00	0.02	12.54	0.01	0.16	0.00	0.28	98.61	86.7	13
	1-8		40.91	47.06	0.01	0.05	11.53	0.08	0.16	0.00	0.21	99.99	88.0	12
1-9	40.17		46.92	0.02	0.05	11.66	0.06	0.13	0.01	0.32	99.34	87.9	10	
1-10	40.18		45.05	0.00	0.04	13.51	0.00	0.22	0.02	0.24	99.27	85.7	13	
平均值	40.26	45.76	0.01	0.04	12.70	0.04	0.17	0.01	0.26	99.27	86.6	11		
SD	0.39	1.03	0.01	0.01	1.06	0.03	0.03	0.01	0.04	0.44	1.4	2		
TTG1'	1'-1	靠近寄主岩	39.17	41.51	0.01	0.02	17.94	0.03	0.26	0.02	0.25	99.21	80.6	n.d.
	1'-2		39.65	41.76	0.00	0.03	17.86	0.03	0.25	0.00	0.26	99.84	80.8	9
	1'-3		39.51	41.95	0.00	0.04	17.31	0.02	0.22	0.00	0.28	99.33	81.4	12
	1'-4		39.10	42.16	0.00	0.03	17.29	0.00	0.29	0.00	0.22	99.09	81.4	14
	平均值		39.36	41.85	0.00	0.03	17.60	0.02	0.26	0.01	0.25	99.37	81.1	12
	SD	0.23	0.24	0.01	0.01	0.30	0.01	0.02	0.01	0.02	0.29	0.4	6	
	1'-5	样品内部	39.64	44.83	0.00	0.04	14.25	0.00	0.22	0.01	0.25	99.23	85.0	17
	1'-6		39.91	46.24	0.00	0.03	12.17	0.00	0.19	0.01	0.25	98.81	87.2	19
	1'-7		40.42	46.28	0.01	0.03	11.81	0.01	0.15	0.00	0.25	98.95	87.6	20
	1'-8		39.94	46.07	0.00	0.03	11.80	0.02	0.18	0.01	0.33	98.37	87.5	6
1'-9	39.88		46.58	0.00	0.02	11.76	0.00	0.16	0.05	0.34	98.77	87.7	18	
1'-10	40.15	46.86	0.00	0.03	11.63	0.01	0.15	0.01	0.27	99.11	87.9	14		
平均值	39.99	46.14	0.00	0.03	12.24	0.01	0.17	0.01	0.28	98.87	87.2	16		
SD	0.24	0.64	0.00	0.01	0.91	0.01	0.03	0.01	0.04	0.28	1.1	5		
TTG4	4-1	靠近寄主岩	38.36	39.79	0.00	0.03	20.53	0.00	0.24	0.01	0.26	99.22	77.7	6
	4-2		38.33	40.08	0.00	0.03	20.08	0.02	0.23	0.02	0.22	99.01	78.2	9
	4-3		38.36	40.42	0.00	0.04	19.51	0.03	0.24	0.02	0.20	98.82	78.9	22
	4-4		38.55	39.15	0.01	0.03	20.65	0.03	0.25	0.03	0.19	98.88	77.3	8
	4-5		38.64	39.40	0.00	0.02	20.67	0.00	0.33	0.00	0.22	99.27	77.4	18
	4-6		38.06	39.60	0.00	0.02	20.80	0.00	0.25	0.00	0.25	98.98	77.4	9
	4-7		38.19	39.81	0.00	0.04	20.09	0.01	0.24	0.00	0.26	98.63	78.1	10
	4-8		38.71	40.42	0.00	0.02	19.34	0.00	0.27	0.03	0.27	99.05	79.0	18
	4-9		38.71	40.34	0.00	0.04	19.68	0.02	0.30	0.00	0.26	99.35	78.7	18
	4-10		38.16	39.72	0.02	0.04	20.69	0.02	0.28	0.01	0.23	99.16	77.6	7
平均值	38.41	39.87	0.00	0.03	20.20	0.01	0.26	0.01	0.23	99.03	78.0	12		
SD	0.22	0.41	0.01	0.01	0.51	0.01	0.03	0.01	0.03	0.21	0.6	6		
TTG6	6-1	靠近寄主岩	38.86	42.37	0.00	0.06	17.46	0.00	0.24	0.01	0.30	99.30	81.4	12
	6-2		39.02	41.61	0.02	0.01	17.83	0.01	0.28	0.00	0.27	99.04	80.8	24
	6-3		39.54	43.86	0.02	0.03	15.40	0.04	0.18	0.01	0.19	99.27	83.7	20
	6-5		39.90	43.59	0.01	0.05	15.39	0.14	0.25	0.00	0.35	99.67	83.6	10
	6-9		39.79	44.09	0.00	0.04	15.66	0.04	0.15	0.00	0.28	100.05	83.5	n.d.
	6-10	39.23	42.31	0.01	0.02	17.44	0.04	0.25	0.00	0.28	99.57	81.4	21	
	平均值	39.39	42.97	0.01	0.04	16.53	0.04	0.23	0.00	0.28	99.49	82.4	18	
	SD	0.38	0.92	0.01	0.02	1.06	0.05	0.04	0.01	0.05	0.33	1.3	9	
	6-4	样品内部	39.44	45.22	0.00	0.04	13.72	0.00	0.25	0.04	0.26	98.96	85.6	14
	6-6		40.03	46.98	0.00	0.05	11.59	0.03	0.16	0.00	0.30	99.13	87.9	20
6-7	39.69		44.34	0.00	0.01	14.70	0.00	0.19	0.00	0.28	99.20	84.4	24	
6-8	40.71		46.90	0.01	0.06	12.11	0.05	0.17	0.00	0.38	0.39	87.5	39	
平均值	39.97		45.86	0.00	0.04	13.03	0.02	0.19	0.01	0.30	74.42	86.4	24	
SD	0.48	1.12	0.00	0.02	1.24	0.02	0.04	0.02	0.05	42.74	1.6	11		

续表 1

样品号	分析点	位置	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>	H <sub>2</sub> O(10 <sup>-6</sup> )
TTG8	8-1	靠近寄主岩	39.36	41.48	0.00	0.04	17.81	0.02	0.26	0.00	0.21	99.19	80.7	n.d.
	8-2		39.32	41.67	0.01	0.05	17.81	0.08	0.25	0.00	0.24	99.44	80.8	9
	8-3		38.94	39.85	0.02	0.02	20.49	0.06	0.23	0.01	0.21	99.82	77.8	18
	8-4		38.14	38.41	0.00	0.04	22.99	0.00	0.31	0.00	0.20	100.09	75.0	2
	8-5		38.72	39.86	0.00	0.02	19.98	0.00	0.28	0.00	0.29	99.15	78.2	15
	平均值	38.90	40.25	0.01	0.03	19.82	0.03	0.26	0.00	0.23	99.54	78.5	11	
	SD	0.45	1.20	0.00	0.01	1.93	0.03	0.03	0.00	0.03	0.37	2.4	8	
	8-6	样品内部	39.57	44.14	0.00	0.02	14.64	0.04	0.20	0.01	0.28	98.89	84.4	16
	8-7		40.23	45.35	0.00	0.03	13.51	0.03	0.22	0.00	0.30	99.66	85.8	20
	8-8		40.19	46.39	0.01	0.06	12.44	0.03	0.21	0.00	0.25	99.57	87.0	13
8-9	40.08		46.84	0.00	0.05	11.57	0.01	0.17	0.04	0.26	99.03	87.9	15	
8-10	40.83		46.53	0.01	0.04	11.81	0.03	0.18	0.01	0.32	99.74	87.6	21	
平均值	40.18	45.85	0.00	0.04	12.79	0.03	0.19	0.01	0.28	99.38	86.6	17		
SD	0.40	0.99	0.00	0.01	1.14	0.01	0.02	0.02	0.03	0.35	1.4	3		
TTG9	9-1	靠近寄主岩	38.61	38.41	0.01	0.01	22.71	0.01	0.28	0.00	0.23	100.28	75.3	5
	9-2		37.96	37.94	0.01	0.03	22.48	0.03	0.32	0.03	0.28	99.06	75.2	15
	9-3		38.39	38.35	0.01	0.00	22.62	0.01	0.29	0.00	0.31	99.97	75.3	7
	9-4		38.13	38.43	0.02	0.01	22.07	0.00	0.29	0.00	0.25	99.20	75.8	12
	9-5		38.14	36.84	0.00	0.03	23.77	0.00	0.34	0.00	0.24	99.35	73.6	18
	9-6		38.37	38.03	0.02	0.03	22.72	0.00	0.28	0.02	0.16	99.62	75.1	17
	9-7		39.65	42.31	0.02	0.03	17.54	0.04	0.23	0.02	0.32	100.16	81.3	9
	9-8		39.53	42.76	0.01	0.03	17.11	0.03	0.23	0.00	0.30	99.99	81.8	9
	9-9		39.26	42.20	0.03	0.00	18.14	0.01	0.24	0.03	0.27	100.17	80.7	15
	9-10		39.35	40.89	0.00	0.01	19.51	0.03	0.28	0.00	0.26	100.33	79.0	n.d.
平均值	38.74	39.62	0.01	0.02	20.87	0.01	0.28	0.01	0.26	99.81	77.3	12		
SD	0.61	2.07	0.01	0.01	2.38	0.01	0.03	0.01	0.04	0.44	3.1	6		
TTG12	12-1	样品内部	40.36	46.16	0.01	0.04	13.15	0.01	0.17	0.00	0.33	100.22	86.3	17
	12-2		40.19	46.30	0.00	0.03	12.77	0.01	0.17	0.00	0.35	99.82	86.7	17
	12-3		40.11	45.93	0.00	0.04	13.00	0.00	0.16	0.00	0.25	99.49	86.4	13
	平均值		40.22	46.13	0.00	0.04	12.97	0.01	0.17	0.00	0.31	99.84	86.5	16
	SD		0.10	0.15	0.00	0.01	0.16	0.01	0.01	0.00	0.04	0.30	0.2	2
	12-4		39.09	40.28	0.01	0.03	19.25	0.00	0.25	0.00	0.26	99.16	79.0	16
	12-5		38.82	40.50	0.01	0.05	19.75	0.03	0.30	0.00	0.22	99.68	78.7	9
	12-6		40.12	43.98	0.01	0.04	14.98	0.03	0.20	0.00	0.24	99.61	84.1	19
	12-7		39.61	43.72	0.00	0.04	15.48	0.15	0.19	0.02	0.29	99.50	83.6	18
	12-8		40.02	44.25	0.01	0.03	15.19	0.00	0.19	0.04	0.34	100.06	84.0	15
12-9	39.43	43.84	0.00	0.04	16.00	0.04	0.23	0.03	0.32	99.93	83.1	8		
12-10	39.31	43.34	0.00	0.06	16.49	0.00	0.24	0.00	0.22	99.65	82.6	13		
平均值	39.49	42.85	0.01	0.04	16.73	0.04	0.23	0.01	0.27	99.66	82.1	14		
SD	0.44	1.57	0.01	0.01	1.81	0.05	0.04	0.02	0.05	0.27	2.3	4		
TTG15	15-1	靠近寄主岩	38.79	42.24	0.00	0.04	17.41	0.00	0.18	0.04	0.29	99.01	81.4	n.d.
	15-2		39.13	42.12	0.01	0.04	17.77	0.00	0.19	0.00	0.36	99.61	81.0	7
	15-3		39.27	41.71	0.01	0.01	17.71	0.05	0.17	0.00	0.26	99.20	80.9	13
	15-4		39.35	42.41	0.04	0.04	17.21	0.02	0.23	0.00	0.29	99.58	81.6	7
	平均值		39.14	42.12	0.01	0.03	17.53	0.02	0.19	0.01	0.30	99.35	81.2	9
	SD		0.21	0.26	0.01	0.01	0.23	0.02	0.02	0.02	0.03	0.26	0.3	5
	15-5		样品内部	40.04	43.56	0.00	0.01	16.56	0.00	0.21	0.00	0.31	100.68	82.6
15-6	39.73	43.36		0.00	0.04	16.08	0.01	0.20	0.00	0.34	99.76	82.9	6	
平均值	39.89	43.46		0.00	0.02	16.32	0.01	0.21	0.00	0.32	100.22	82.7	6	
SD	0.15	0.10	0.00	0.01	0.24	0.01	0.00	0.00	0.02	0.46	0.3	1		
TTG16	16-1	样品内部	39.73	46.12	0.00	0.04	11.95	0.02	0.20	0.03	0.23	98.32	87.4	16
	16-2		40.65	46.69	0.00	0.07	11.41	0.04	0.12	0.02	0.24	99.25	88.0	35
	16-3		40.72	46.58	0.00	0.03	11.57	0.00	0.12	0.02	0.26	99.29	87.9	22
	16-8		40.62	47.37	0.00	0.05	11.10	0.01	0.16	0.01	0.34	99.66	88.5	18

续表 1

样品号	分析点	位置	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>	H <sub>2</sub> O(10 <sup>-6</sup> )
TTG16	16-9	样品内部	40.32	47.67	0.02	0.04	10.91	0.00	0.16	0.01	0.34	99.47	88.7	22
	16-10		40.06	45.40	0.00	0.04	13.23	0.00	0.14	0.00	0.24	99.11	86.1	18
	16-11		41.02	47.27	0.00	0.06	10.70	0.03	0.16	0.00	0.30	99.53	88.8	8
	16-12		40.45	47.20	0.00	0.03	11.07	0.00	0.11	0.01	0.29	99.16	88.5	22
	平均值		40.45	46.79	0.00	0.04	11.49	0.01	0.15	0.01	0.28	99.22	88.0	20
	SD	0.38	0.70	0.00	0.01	0.75	0.01	0.03	0.01	0.04	0.38	0.9	8	
	16-4	靠近寄主岩	39.75	44.12	0.00	0.04	14.96	0.00	0.16	0.00	0.30	99.33	84.1	29
	16-5		40.10	44.51	0.00	0.06	14.69	0.00	0.18	0.01	0.18	99.73	84.5	15
	16-6		39.73	44.63	0.00	0.02	14.14	0.02	0.22	0.01	0.22	98.99	85.0	11
	16-7		40.24	44.98	0.00	0.01	13.86	0.03	0.16	0.01	0.20	99.49	85.4	n.d.
平均值	39.95		44.56	0.00	0.03	14.41	0.01	0.18	0.01	0.23	99.38	84.8	18	
SD	0.22	0.31	0.00	0.02	0.44	0.01	0.03	0.00	0.04	0.27	0.6	10		
TTG17	17-1		52.58	16.51	1.94	21.48	5.65	0.45	0.11	0.18	0.00	98.90	84.0	205
	17-2		53.10	16.30	1.48	22.52	5.27	0.31	0.11	0.13	0.00	99.22	84.8	134
	17-3		37.82	37.27	0.00	0.03	23.39	0.04	0.24	0.01	0.15	98.96	74.1	19
	平均值		52.84	16.41	1.71	22.00	5.46	0.38	0.11	0.15	0.00	99.06	84.4	169
	SD		0.26	0.11	0.23	0.52	0.19	0.07	0.00	0.02	0.00	0.16	0.5	50

注:(1)除样品 TTG17 为辉石岩外,其余均为纯橄岩;(2)除 TTG17 中的 17-1 和 17-2 为单斜辉石外,其余颗粒均为橄橄榄石;(2)SD 为标准偏差(standard deviation),n.d.表示未测;(3) $Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Mg + Fe)$ ,原子数计算对于橄橄榄石基于 4 个氧原子,对于辉石基于 6 个氧原子;(4)第 4~13 列数值的单位为%。

浸泡至少 24 h,再用无水乙醇和蒸馏水反复清洗,然后将样品薄片置于玻璃器皿中放入烘箱,干燥 6 h 以上以除去样品表面和裂隙中的吸附水.分析使用带 Continuum 显微镜的 Nicolet 5700 红外光谱仪,探测器为液氮冷却的 MCT-A,使用非偏振光.测试过程中一直使用干空气吹扫红外主机和红外显微镜.样品及空白的扫描次数均为 128 次,分辨率为 4~8 cm<sup>-1</sup>.为保证较高的信噪比,一般情况下分析区域设置为 50 μm × 50 μm,少数颗粒较小的情况下为 25 μm × 25 μm.分析区域均位于单个颗粒内部,避开颗粒内部可见的微小包裹体和裂隙.光谱的收集和处理使用 Thermo Nicolet 公司提供的 OMNIC 7.1a 软件.光谱的收集过程中约 6 min 进行一次 H<sub>2</sub>O 校正,扣除空气中的水分影响.对所有样品中新鲜的橄橄榄石颗粒均进行了分析,TTG17 中两颗新鲜的单斜辉石也进行了分析.

橄橄榄石和辉石水含量的计算采用修正后的 Beer-Lambert 定律,

$$C = A / (I \times t),$$

式中,C 代表所测矿物中的 H<sub>2</sub>O 含量(10<sup>-6</sup>),A 为基线校正后 OH 吸收峰的积分吸收面积(cm<sup>-1</sup>),I 为对应的红外吸收系数((10<sup>-6</sup>)<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>),t 为样品的厚度(cm).橄橄榄石和辉石的基线校正范围均为 3 000~3 700 cm<sup>-1</sup>,公式中 A 为该区间积分吸收面积的 3 倍(Kovács *et al.*, 2008).吸收系数取值上,单斜辉石为 7.09(Bell *et al.*, 1995),橄橄榄石为 0.188

(Bell *et al.*, 2003).

## 2.2 矿物化学组成分析

橄橄榄石和辉石的化学组成测试在中国科技大学地球和空间科学学院的电子探针实验室进行,使用 Shimadzu EMPA1600 型电子探针.实验直接使用进行红外光谱分析后的薄片,这样就保证了水含量和化学成分的测定在同一颗粒同一区域内.分析条件为 15 kV 电压和 20 nA 电流,<5 μm 束斑.实验用天然和合成的样品为标样,数据采用 ZAF 校正.每个矿物颗粒测定 3~5 个分析点.除了辉石中的 Na<sub>2</sub>O 含量的误差可能达到 15%~20%,其他元素的误差均<5%.颗粒内部化学组成均一,表 1 列出的数据均是每个颗粒的多点平均值.

## 3 结果

从电子探针的分析结果来看(表 1),铁铜沟的橄橄榄石可以分为两组,一组位于样品内部,Mg<sup>#</sup>(= 100 × Mg / (Mg + Fe),下同)高;另一组靠近寄主闪长岩,Mg<sup>#</sup>值明显降低,很显然是和闪长岩反应造成的.例如,样品 TTG1 中样品内部 5 个颗粒的 Mg<sup>#</sup>值为 86.6 ± 1.4(1SD,下同),而靠近寄主岩的 5 个颗粒的 Mg<sup>#</sup>值为 81.1 ± 0.4(图 2);样品 TTG16 中样品内部 8 个颗粒的 Mg<sup>#</sup>值为 88.0 ± 0.9,而靠近寄主岩的 4 个颗粒的 Mg<sup>#</sup>值为 84.8 ± 0.6(图 2).

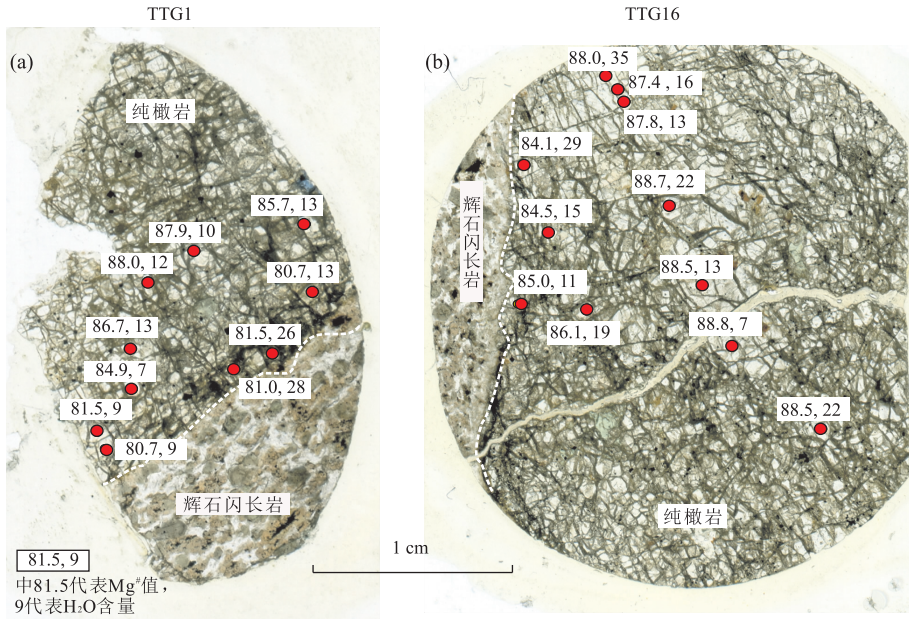


图 2 代表性的铁铜沟纯橄岩样品及分析颗粒的  $Mg^\#$  值和  $H_2O$  含量

Fig.2  $Mg^\#$  values and  $H_2O$  contents of olivines in two representative peridotite xenoliths hosted by diorites of Tietonggou

所有样品内部颗粒平均  $Mg^\#$  值范围为 86.4~88.8, 而靠近寄主岩的颗粒平均值范围为 74.1~84.8(表 1)。样品 TTG17 靠近寄主中的内部有 2 颗新鲜单斜辉石可供分析, 该样品中仅供分析的 1 颗新鲜橄榄石颗粒靠近寄主闪长岩, 2 个单斜辉石的  $Mg^\#$  为 84.0~84.8, 明显高于靠近寄主岩的橄榄石  $Mg^\#$  值(74.1)。

在红外谱图上(图 3), 所有的铁铜沟橄榄石都以  $3575\text{ cm}^{-1}$  和  $3525\text{ cm}^{-1}$  为主要 OH 吸收峰, 这些都是天然地幔橄榄石特征的结构 OH 吸收峰 (Bell and Rossman, 1992; Berry *et al.*, 2005; Matveev *et al.*, 2005; Grant *et al.*, 2007; Gose *et al.*, 2010)。TTG17 中 2 颗单斜辉石的 4 组 OH 吸收峰为  $\sim 3355\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 3450\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 3550\text{ cm}^{-1}$  和  $\sim 3630\text{ cm}^{-1}$ , 也都是典型地幔单斜辉石的结构 OH 吸收峰 (Bell and Rossman, 1992; Grant *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2010, 2017)。

由于橄榄岩包体中矿物的颗粒不大, 无法制成定向薄片进行偏振红外分析, 所以只能采用多颗粒非偏振分析后取平均值的方法来获取水含量, 这个方法的分析误差取决于分析的颗粒数目,  $>10$  个颗粒的平均值才能够保证  $<10\%$  的误差 (Kovács *et al.*, 2008)。对于铁铜沟样品来说, 无论是靠近寄主闪长岩的还是位于橄榄岩捕掳体内部的橄榄石和单斜辉石, 可供红外分析的新鲜颗粒都不到 10 个, 在 2~10 之间, 因此, 水含量的误差为  $20\% \sim 30\%$  (Kovács *et al.*, 2008)。

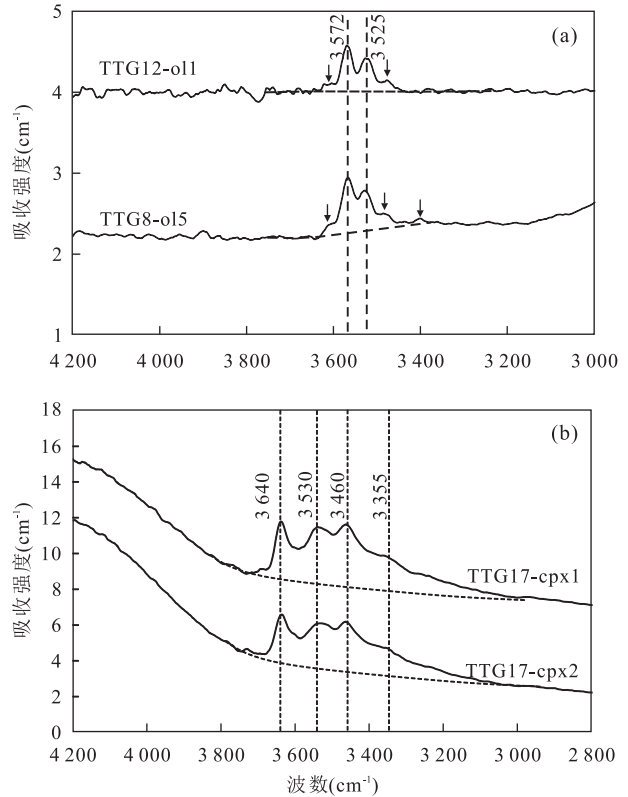


图 3 代表性橄榄石和单斜辉石的红外光谱图

Fig.3 Representative IR (infrared radiation) spectra of olivines and clinopyroxenes

虚线标出的是基线以及 OH 峰位, 谱图标准化至 1 cm 厚度; 箭头所指的小峰是由于干涉引起的干扰峰

对于同一捕虏体样品来说,样品内部和靠近寄主岩的橄榄石  $H_2O$  含量在误差范围内没有明显差异。例如,样品 TTG1 中样品内部 5 个颗粒的  $H_2O$  含量为  $(11 \pm 2) \times 10^{-6}$ , 而靠近寄主岩的 5 个颗粒的  $H_2O$  含量为  $(17 \pm 9) \times 10^{-6}$  (图 2); 样品 TTG16 中样品内部 8 个颗粒的  $H_2O$  含量为  $(20 \pm 8) \times 10^{-6}$ , 而靠近寄主岩的 4 个颗粒的  $H_2O$  含量为  $(18 \pm 10) \times 10^{-6}$  (图 2)。所有样品内部颗粒平均  $H_2O$  含量范围为  $(6 \sim 24) \times 10^{-6}$ , 而靠近寄主岩的颗粒平均值为  $(8 \sim 21) \times 10^{-6}$  (表 1), 所有颗粒  $H_2O$  含量的平均值为  $(15 \pm 7) \times 10^{-6}$ 。对于 TTG17 中的 1 颗橄榄石和 2 颗单斜辉石来说, 虽然两者的  $Mg^{\#}$  存在明显差异 (74.1 vs. 84.8 和 84.0), 但是单斜辉石和橄榄石之间的  $H_2O$  含量比值 (7~11) 落在实验限定的上地幔条件下的分配系数范围之内 (10~30 之间, 多为 ~10; Kovács *et al.*, 2012)。

## 4 讨论

### 4.1 橄榄岩捕虏体的成因

学者们对于华北东部晚中生代中基性杂岩体中橄榄岩捕虏体的成因, 有岩石圈地幔直接样品 (Chen and Zhou, 2005; Xu *et al.*, 2008, 2010) 和堆晶体或古老蛇绿岩 (张瑾等, 2005) 两种观点。以下几点使得我们倾向于认为本文样品为岩石圈地幔样品:

(1) 本文橄榄岩均没有明显的堆晶结构 (图 2); (2) 未受寄主岩反应的橄榄石具有高的  $Mg^{\#}$  值 (约 87~89); (3) 大量观察表明, 正常地幔橄榄岩中的橄榄石以  $3572\text{ cm}^{-1}$  和  $3525\text{ cm}^{-1}$  为 OH 特征吸收峰 (与 Ti 引起的缺陷关联), 有时出现  $\sim 3420\text{ cm}^{-1}$  和  $\sim 3620\text{ cm}^{-1}$  的峰 (与 Si 空位关联); 而富 Fe 的堆晶橄榄石多出现与 Fe 引起的缺陷相关的  $< 3400\text{ cm}^{-1}$  的 OH 吸收峰 (Bell and Rossman, 1992; Berry *et al.*, 2005; Matveev *et al.*, 2005; Grant *et al.*, 2007; Gose *et al.*, 2010)。我们分析的所有铁铜沟橄榄石都只出现  $> 3400\text{ cm}^{-1}$  的 OH 吸收峰, 并以  $3575\text{ cm}^{-1}$  和  $3525\text{ cm}^{-1}$  两组为主 (图 3)。

### 4.2 橄榄石的原始水含量

交代作用是岩石圈地幔内普遍发生的过程, 许多橄榄岩捕虏体都清晰地记录了这一过程 (Downes, 2001)。Chen and Zhou (2005) 对莱芜的捕虏体进行了系统的岩相学观察和主量元素、微量元素以及 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析, 指出这些捕虏体经历了复杂的交代作用, 包括早期的富 K(Ca) 熔体

的交代和后期的富 Si(Na) 熔体的交代, 其中后期交代作用和早白垩世高 Mg 闪长岩的形成有关, 这一期的交代熔体应该是来自于俯冲板块的。Yang *et al.* (2012) 对 4 个铁铜沟纯橄岩捕虏体中的锆石进行了详细的 SHRIMP U-Pb 定年,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄有 5 组: 131~145 Ma, 151~164 Ma, 261~280 Ma, 434~452 Ma 和 500~516 Ma, 分别对应于华北克拉通东部不同时期的岩浆事件, 这一结果也表明华北克拉通东部岩石圈自早古生代以来经历了多期次不同程度熔体的改造, 以中生代晚期改造最为强烈。很显然, 本文样品也经历了交代过程, 样品中普遍出现角闪石等含水交代矿物以及低  $Mg^{\#}$  值的橄榄石就是交代作用的结果。那么, 橄榄石的原始水含量在交代过程中会如何受到影响呢?

如果本文样品经历的是 Chen and Zhou (2005) 所提出的富 K(Ca) 和 Si(Na) 的熔体交代, 那么由于熔体的氧化性质, 受交代的橄榄石中的  $\text{Fe}^{3+}$  会增加, 如果此时水含量也受到影响的话, 那么就on应该出现在  $3200 \sim 3400\text{ cm}^{-1}$  的 OH 吸收峰 (Matveev *et al.*, 2005; Gose *et al.*, 2010), 而这在铁铜沟样品中并没有观察到。Schmädicke *et al.* (2013) 对来自德国、澳大利亚、蒙古和尼日利亚的橄榄岩捕虏体分析后指出, 含角闪石的橄榄岩中的橄榄石如果受到了交代影响, 那么会出现  $3200 \sim 3300\text{ cm}^{-1}$  的 OH 吸收峰, 铁铜沟的样品虽然普遍出现角闪石, 但是橄榄石并没有这个峰。另外, 与寄主闪长岩接近和接触的橄榄石虽然具有相对于捕虏体内部橄榄石明显低的  $Mg^{\#}$  值, 但两者之间并没有表现明显的水含量差异 (图 2)。再者, 样品 TTG17 中的橄榄石  $Mg^{\#}$  值 (74.1) 虽然明显低于共存的单斜辉石的  $Mg^{\#}$  值 (约 84.0), 但是两者之间水含量的比值 (7~11) 落在实验限定的上地幔条件下的分配系数范围之内 (10~30 之间, 多为 ~10; Kovács *et al.*, 2012), 表明平衡并没有被打破。因此, 铁铜沟的橄榄岩虽然普遍经历了交代作用, 但是橄榄石的原始水含量可能还是得以保存了。前人对浙江建德、安徽天长和法国中央地体的橄榄岩捕虏体的研究表明, 这些地区的地幔交代作用也没有影响橄榄岩矿物的原始水含量 (Hao *et al.*, 2014, 2016; Denis *et al.*, 2015)。

当然, 也有工作 (对南非 Kaapvaal 克拉通和西伯利亚克拉通橄榄岩捕虏体的研究) 指出, 交代熔体的确会增加橄榄岩矿物的水含量 (Peslier *et al.*, 2012; Doucet *et al.*, 2014)。但是, 即使铁铜沟的橄榄石原始水含量受到了交代作用的影响, 也是升高了,

这种情况下本文给出的含水量代表了上限值。

### 4.3 早白垩世华北富水岩石圈分布范围

需要指出的是,铁铜沟的样品多为纯橄岩,而符山的多为二辉橄榄岩,因此,虽然两者中橄榄石的水含量大致相当,但是符山样品的总水含量( $\sim 40 \times 10^{-6}$ ; Liu and Xia, 2014)还是要高于铁铜沟( $15 \pm 7 \times 10^{-6}$ ),虽然它们都要远远低于费县( $> 1\,000 \times 10^{-6}$ ; Xia *et al.*, 2013)。由于橄榄石相对于辉石来说易于变形,是控制岩石圈地幔黏滞度的主要因素(Yamamoto *et al.*, 2008; Proietti *et al.*, 2016),因此铁铜沟和符山两地的岩石圈地幔黏滞度应不存在大的差异。

这样看来,华北克拉通岩石圈地幔强度最弱化的地区可能仅局限在最东部,这和华北岩石圈地幔显著减薄主要发生在最东部这一事实吻合(Menzies *et al.*, 2007),同时也表明太平洋板块俯冲的影响可能并没有波及华北克拉通内部。当然,这个推测还需要更多的华北早白垩世岩石圈地幔样品的数据的验证。

致谢:感谢 3 位审稿人的建设性意见。

## References

- Bell, D. R., Ihinger, P. D., Rossman, G. R., 1995. Quantitative and Analysis of Trace OH in Garnet and Pyroxenes. *Am. Mineral.*, 80(5-6): 465-474.
- Bell, D. R., Rossman, G. R., 1992. Water in Earth's Mantle: The Role of Nominally Anhydrous Minerals. *Science*, 255(5050): 1391-1397.
- Bell, D. R., Rossman, G. R., Maldener, J., et al., 2003. Hydroxide in Olivine: A Quantitative Determination of the Absolute Amount and Calibration of the IR Spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2): 998-1003. doi:10.1029/2001JB000679
- Berry, A. J., Hermann, J., O'Neill, H. S. C., et al., 2005. Fingerprinting the Water Site in Mantle Olivine. *Geology*, 33(11): 869-872. doi:10.1130/G21759.1
- Chen, L. H., Zhou, X. H., 2005. Subduction-Related Metasomatism in the Thinning Lithosphere: Evidence from a Composite Dunite-Orthopyroxenite Xenolith Entrained in Mesozoic Laiwu High-Mg Diorite, North China Craton. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6(6): 453-468. doi:10.1029/2005GC000938
- Denis, C. M. M., Alard, O., Demouchy, S., 2015. Water Content and Hydrogen Behavior during Metasomatism in the Uppermost Mantle beneath Ray Pic Volcano (Massif Central, France). *Lithos*, 237: 256-274.
- Dixon, J. E., Dixon, T. H., Bell, D. R., 2004. Lateral Variation in Upper Mantle Viscosity: Role of Water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222(2): 451-467.
- Doucet, L. S., Peslier, A. H., Ionov, D., 2014. High Water Contents in the Siberian Cratonic Mantle Linked to Metasomatism: An FTIR Study of Udachnaya Peridotite Xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 137: 159-187.
- Downes, H., 2001. Formation and Modification of the Shallow Sub-Continental Lithospheric Mantle: A Review of Geochemical Evidence from Ultramafic Xenolith Suites and Tectonically Emplaced Ultramafic Massifs of Western and Central Europe. *J. Petrol.*, 42(1): 233-250.
- Gose, J., Schmädicke, E., Markowitz, M., et al., 2010. OH Point Defects in Olivine from Pakistan. *Mineral. Petrol.*, 99(1): 105-111.
- Grant, K., Ingrin, J., Lorand, J. P., et al., 2007. Water Partitioning between Mantle Minerals from Peridotite Xenoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 154(1): 15-34.
- Hao, Y. T., Xia, Q. K., Li, Q. W., et al., 2014. Partial Melting Control of Water Contents in the Cenozoic Lithospheric Mantle of the Cathaysia Block of South China. *Chem. Geol.*, 380: 7-19.
- Hao, Y. T., Xia, Q. K., Tian, Z. Z., et al., 2016. Mantle Metasomatism did not Modify the Water Content of the Peridotite Xenoliths from the Tianchang Basalts of Eastern China. *Lithos*, 260: 315-327.
- Hirschmann, M. M., 2005. Water, Melting, and the Deep Earth H<sub>2</sub>O Cycle. *Annu. Earth Planet. Sci.*, 2334(34): 629-653.
- Kovács, I., Green, D. H., Rosenthal, A., et al., 2012. An Experimental Study of Water in Nominally Anhydrous Minerals in the Upper Mantle near the Water-Saturated Solidus. *J. Petrol.*, 53(10): 2067-2093.
- Kovács, I., Hermann, J., O'Neill, H. S. C., et al., 2008. Quantitative Absorbance Spectroscopy with Unpolarized Light, Part II. Experimental Evaluation and Development of a Protocol for Quantitative Analysis of Mineral IR Spectra. *Am. Mineral.*, 93(5-6): 765-778. doi:10.2138/am.2008.2657
- Lee, C. T., Luffi, P., Chin, E. J., 2011. Building and Destroying Continental Mantle. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 39(39): 59-90.
- Li, Z. X. A., Lee, C. T., Peslier, A. H., et al., 2008. Water Contents in Mantle Xenoliths from the Colorado Plateau and Vicinity: Implications for the Mantle Rheology and Hydration-Induced Thinning of Continental Lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 113(B9): B09210. doi:10.1029/2007JB005540
- Liu, S. C., Xia, Q. K., 2014. Water Content in the Early Creta-



- ceous Lithospheric Mantle beneath the South-Central Taihang Mountains; Implications for the Destruction of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 59 (13): 1362–1365.
- Matveev, A., Portnyagin, M., Ballhaus, C., et al., 2005. FTIR Spectrum of Phenocryst Olivine as an Indicator of Silica Saturation in Magmas. *J. Petrol.*, 46(3): 603–614.
- Menzies, M. A., Xu, Y. G., Zhang, H. F., et al., 2007. Integration of Geology, Geophysics and Geochemistry: A Key to Understanding the North China Craton. *Lithos*, 96: 1–21.
- Peslier, A. H., Woodland, A. B., Bell, D. R., et al., 2010. Olivine Water Contents in the Continental Lithosphere and the Longevity of Cratons. *Nature*, 467(7311): 78–81.
- Peslier, A. H., Woodland, A. B., Bell, D. R., et al., 2012. Metasomatic Control of Water Contents in the Kaapvaal Cratonic Mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 97 (97): 213–246.
- Proietti, A., Bystricky, M., Guignard, J., et al., 2016. Effect of Pressure on the Strength of Olivine at Room Temperature. *Phys. Earth Planet Inter.*, 259: 34–44.
- Schmädicke, E., Gose, J., Witt-Eickschen, G., et al., 2013. Olivine from Spinel Peridotite Xenoliths: Hydroxyl Incorporation and Mineral Composition. *Am. Mineral.*, 98 (10): 1870–1880.
- Xia, Q. K., Hao, Y. T., Li, P., et al., 2010. Low Water Content of the Cenozoic Lithospheric Mantle beneath the Eastern Part of the North China Craton. *J. Geophys. Res.*, 115(B7): 1–22. doi: 10.1029/2009JB006694
- Xia, Q. K., Liu, J., Kovács, I., et al., 2017. Water in the Upper Mantle and Deep Crust of Eastern China: Concentration, Distribution and Implications. *National Science Review*. doi: 10.1093/nsr/nwx016
- Xia, Q. K., Liu, J., Liu, S. C., et al., 2013. High Water Content in Mesozoic Primitive Basalts of the North China Craton and Implications for the Destruction of Cratonic Mantle Lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 361(1): 85–97.
- Xu, W. L., Hergt, J. M., Gao, S., et al., 2008. Interaction of Adakitic Melt-Peridotite: Implications for the High-Mg<sup>#</sup> Signature of Mesozoic Adakitic Rocks in the Eastern North China Craton. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 265 (1–2): 123–137.
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, Q. H., et al., 2003. Petrology and Geochemistry of Two Types of Mantle-Derived Xenoliths in Mesozoic Diorite from Western Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 623–636 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Yang, D. B., Gao, S., et al., 2010. Geochemistry of Peridotite Xenoliths in Early Cretaceous High-Mg<sup>#</sup> Diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The Nature of Mesozoic Lithospheric Mantle and Constraints on Lithospheric Thinning. *Chem. Geol.*, 270(1–4): 257–273.
- Yamamoto, J., Ando, J., Kagi, H., et al., 2008. In Situ Strength Measurements on Natural Upper-Mantle Minerals. *Phys. Chem. Minerals*, 35: 249–257. doi: 10.1007/s00269-008-0218-6
- Yang, D. B., Xu, W. L., Gao, S., et al., 2012. Repeated Modification of Lithospheric Mantle in the Eastern North China Craton: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Dunite Xenoliths in Western Shandong. *Chinese Science Bulletin*, 57(6): 651–659.
- Zhang, J., Zhang, H. F., Ying, J. F., et al., 2005. Are the Peridotitic Xenoliths Entrained in Late Mesozoic Intermediate-Mafic Intrusive Complexes on the North China Craton the Direct Samples of Lithospheric Mantle? *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1559–1568 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Sci. China: Earth Sci.*, 55(10): 1565–1587.

#### 附中文参考文献

- 许文良, 王冬艳, 王清海, 等, 2003. 鲁西中生代闪长岩中两类幔源捕虏体的岩石学和地球化学. *岩石学报*, 19(4): 623–636.
- 张瑾, 张宏福, 英基丰, 等, 2005. 华北晚中生代中基性侵入体中橄榄岩捕虏体是岩石圈地幔直接样品? *岩石学报*, 21(6): 1559–1568.