中国科学: 地球科学 2016 年 第 46 卷 第 4 期: 454 ~ 472
SCIENTIA SINICA Terrae earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述 地球内部水专题

中国东部大陆岩石圈地幔及幔源岩浆岩水含量和氢同位素组成

徐峥*, 龚冰, 赵子福

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
* E-mail: zxu85@ustc.edu.cn

收稿日期: 2015-09-09; 接受日期: 2015-12-03; 网络版发表日期: 2016-03-24
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2015CB856100)、国家自然科学基金项目(批准号: 41303005, 41590620)和中央高校基本科研业务费专项资金项目资助

摘要 中国东部华北陆块和华南陆块的地幔包体单矿物和全岩水含量变化很大, 总体低于全球其他克拉通和非克拉通岩石圈地幔包体单矿物和全岩水含量. 然而, 具有新生岩石圈地幔来源的莒南橄榄岩包体单矿物和全岩水含量总体高于其他中国东部岩石圈地幔包体, 指示中国东部新生岩石圈地幔的初始水含量并不低. 地幔包体中单矿物水含量与 $Mg^{\#}$之间无明显相关关系, 其中的辉石缺乏水扩散环带, 因此地幔包体的低水含量与包体随玄武岩岩浆上升过程的水扩散丢失无关. 大陆岩石圈地幔底部受到热软流圈地幔烘烤有可能会造成水的扩散丢失, 但是熔体提取也可能是引起低水含量的原因之一. 通过斑晶水含量计算得到的中国东部中生代和新生代玄武岩初始熔体水含量均高于正常洋中脊玄武岩. 中生代玄武岩初始熔体水含量与岛弧玄武岩类似, 而新生代玄武岩初始熔体水含量则与洋岛玄武岩和弧后盆地玄武岩类似(部分地区与岛弧玄武岩类似). 这些结果表明, 大陆玄武岩地幔源区相对富水, 指示其地幔源区曾经受到深俯冲地壳脱水所形成的富水流体/含水熔体的交代, 使其水含量升高. 中国东部新生代幔源巨晶、包体矿物和玄武岩斑晶的氢同位素组成变化也很大, 反映中国东部新生代岩石圈地幔氢同位素组成高度不均一. 新生代岩石圈地幔具有高于亏损地幔的水含量和偏离亏损地幔值的氢同位素组成, 反映其受到过俯冲太平洋板片部分熔融所产生熔体的交代. 俯冲大洋板片脱水熔融产生的富水流体和含水熔体对大陆岩石圈地幔底部的交代导致其水含量增加, 引起底部岩石黏滞度降低, 进而导致岩石强度的降低, 使其容易被构造侵蚀乃至拆沉. 因此, 大洋俯冲隧道中的壳幔相互作用是克拉通岩石圈减薄的重要诱因.

关键词 中国东部, 大陆玄武岩, 岩石圈地幔, 水, 氢同位素

中文引用格式: 徐峥, 龚冰, 赵子福. 2016. 中国东部大陆岩石圈地幔及幔源岩浆岩水含量和氢同位素组成. 中国科学: 地球科学, 46: 454–472, doi: 10.1360/N072015-00248
英文引用格式: Xu Z, Gong B, Zhao Z F. 2016. The water content and hydrogen isotope composition of continental lithospheric mantle and mantle-derived mafic igneous rocks in eastern China. Science China Earth Sciences, 59: 910–926, doi: 10.1007/s11430-015-5247-7

© 2016《中国科学》杂志社 www.scichina.com

1 引言

水是在硅酸盐地球各个圈层中无处不在的组分, 在俯冲带岩浆作用中起到至关重要的作用(Grove等, 2012; Zheng和Hermann, 2014). 水是流体活动性元素(如大离子亲石元素LILE)的良好载体, 它可以通过板片俯冲和随后在俯冲隧道内发生的板片-地幔相互作用过程从地壳进入地幔(郑永飞等, 2015). 因此, 水是地壳向地幔进行元素传递的重要介质之一(Zheng和Hermann, 2014). 水相对于地幔岩石中的常见造岩矿物如橄榄石和辉石具有高度不相容性质(例如Aubaud等, 2004), 在地幔部分熔融作用中表现出与强不相容元素相似的特性, 因此地幔岩石水含量可以用作衡量地幔性质的关键指标. 地幔水含量一方面受到熔体提取的影响, 另一方面还受到含水熔体交代的影响(例如Peslier等, 2010). 因此在实际工作中必须确定地幔岩石水含量的变化主要由部分熔融控制还是由熔体交代控制, 然后才能用水含量的变化推测地幔性质及其经历的过程. 由于地幔中水的加入不仅会改变其岩石学和地球化学性质, 而且会改变其地球物理性质(例如熔点和黏滞度降低、电导率升高等), 因此地幔水含量和分布的研究对于认识地幔的物理化学性质至关重要.

岩石/矿物中水的氢同位素组成与流体活动和去气作用等息息相关. 大洋板块俯冲过程中流体的释放伴随着氢同位素分馏(Shaw等, 2008, 2012), 具有不同氢同位素组成的流体和脱水残余物与地幔之间的相互作用会导致地幔氢同位素组成的改变. 实际上, 地幔中氢同位素组成的变化与俯冲带过程具有密切的关系.

由于俯冲板片之上地幔楔的水化有可能导致华北克拉通减薄乃至破坏, 大陆岩石圈地幔水含量虽时间的变化也称为华北克拉通破坏研究的重要选题之一. 与华北克拉通相对应的华南陆块则相对年轻(Zheng等, 2013). 对玄武岩携带的橄榄岩包体的矿物岩石学研究表明, 华北东部岩石圈地幔在中生代之前为难熔的典型克拉通地幔(Zheng等, 2001, 2004, 2006, 2007, 2015; Ying等, 2006; Chu等, 2009; Zhang H F等, 2001, 2008; Zhang J等, 2011; Liu等, 2012a), 而中生代则转变为富集、易熔地幔(Xu X等, 1996, 2000; Xu Y G等, 2002; Yu J H等, 2003, 2006; Yu Y等, 2011; Zheng等, 2005, 2006; Tang等, 2008, 2011; Chu等, 2009; 夏群科等, 2010; Xiao等, 2010; Liu等, 2012b; Princivalle等, 2014). 在这个构造转变过程中水发挥了什么样的作用, 一直是科学界高度关注的问题.

本文总结了中国东部岩石圈地幔包体以及玄武岩单矿物和全岩水含量数据, 试图描绘中国东部岩石圈地幔及玄武岩初始熔体含水量的全景, 并且与玄武岩单矿物氢同位素数据相结合, 试图阐述板块俯冲过程对中国东部岩石圈地幔的影响.

2 地幔水含量

2.1 地幔橄榄岩包体水含量

对中国东部大陆岩石圈地幔的水含量认识主要来自于玄武岩中的地幔包体. 这些包体主要为尖晶石二辉橄榄岩和尖晶石方辉橄榄岩, 亦有少量尖晶石纯橄岩、尖晶石易剥橄榄岩、尖晶石和石榴石二辉石岩以及石榴石二辉橄榄岩. 华北陆块地幔包体中橄榄石水含量最低, 为0~35ppm; 单斜辉石水含量变化很大, 为1~970ppm, 大部分集中在15~800ppm; 斜方辉石水含量为1~346ppm, 大部分为20~300ppm; 全岩水含量为1~245ppm, 大部分为10~200 ppm(Yang等, 2008; Hao等, 2012; 杨贵才等, 2012; Xia等, 2010, 2013a, 2013b; 刘少辰和夏群科, 2014; Wang等, 2014; Li等, 2015; 赵起超等, 2015). 华南陆块地幔包体中橄榄石水含量也是最低, 为0~41ppm; 单斜辉石水含量变化较小, 为51~746ppm; 斜方辉石水含量为9~329ppm, 全岩水含量为8~245ppm(夏群科等, 2000a; Yang等, 2008; Bonadiman等, 2009; Xia等, 2010; 王蓉和张保民, 2011; Yu等, 2011; Hao等, 2014; Wang等, 2014). 华北陆块地幔包体中无论单斜辉石、斜方辉石还是全岩, 其水含量总体上与华南陆块地幔包体相似, 但橄榄石水含量低于华南陆块地幔包体(图1). 不过若不考虑中生代地幔包体, 华南新生代地幔包体水含量稍高于华北新生代地幔包体. 华北陆块和华南陆块地幔包体单矿物和全岩的水含量总体均低于已报道的世界克拉通岩石圈地幔和非克拉通岩石圈地幔单矿物和全岩的水含量(图1). 华北陆块大部分地区地幔包体具有较低的水含量, 这既可以是受到软流圈地幔热烘烤的结果(Xia等, 2010, 2013a), 也可以是熔体提取所致. 部分地区(如昌乐北岩)地幔包

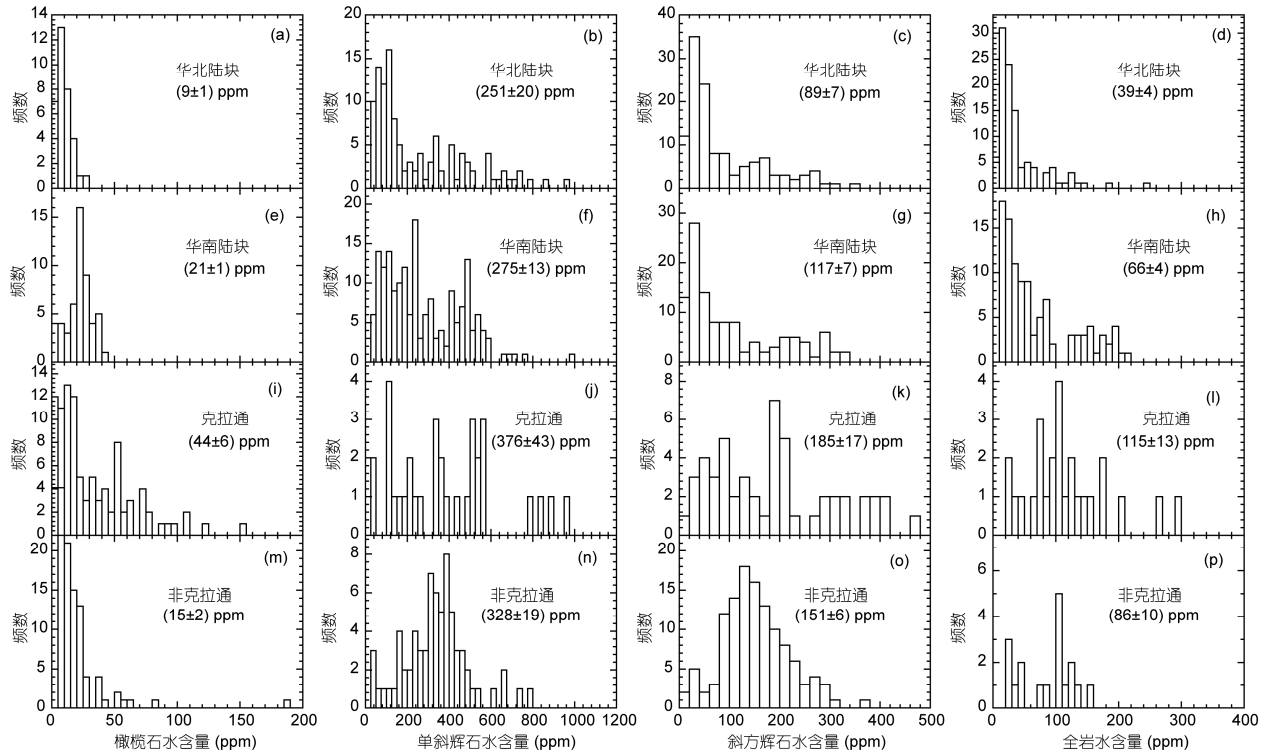


图 1　中国东部岩石圈地幔包体与文献报道的全球其他地区克拉通和非克拉通地幔包体矿物和全岩水含量

数据来源: 华北陆块(Yang 等, 2008; Hao 等, 2012; 杨贵才等, 2012; Xia 等, 2010, 2013a, 2013b; 刘少辰和夏群科, 2014; Wang 等, 2014; Li 等, 2015; 赵起超等, 2015); 华南陆块(夏群科等, 2000a, 2010; Yang 等, 2008; Bonadiman 等, 2009; Xia 等, 2010; 王蓉和张保民, 2011; Yu 等, 2011; Hao 等, 2014; Wang 等, 2014); 克拉通(Bell 和 Rossman, 1992; Kurosawa 等, 1997; Kent 和 Rossman, 2002; Grant 等, 2007; Li 等, 2008; Peslier 等, 2008, 2010; Baptiste 等, 2012; Doucet 等, 2014; Hui 等, 2015); 非克拉通(Kurosawa 等, 1997; Peslier 等, 2002; Mosenfelder 等, 2006; Peslier 和 Luhr, 2006; Grant 等, 2007; Bonadiman 等, 2009; Gose 等, 2009; Denis 等, 2013; Schmädicke 等, 2013; Warren 和 Hauri, 2014; Demouchy 等, 2015; Hesse 等, 2015; Peslier 和 Bizimis, 2015; Peslier 等, 2015)

体具有较高的水含量, 同时具有较低的初始$^{87}Sr/^{86}Sr$比值, Hao等(2012)将其解释为新生岩石圈地幔, 但是这并不排除经历过熔体提取作用.

总体上华北陆块和华南陆块内部不同地区内地幔包体的水含量并无太大差别, 但不同时代玄武岩中的地幔包体在水含量上有所差异. 华北陆块费县中生代玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩包体的单斜辉石水含量为670~970ppm(Xia等, 2013a); 莒南中生代玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩包体的单斜辉石水含量为466~746ppm, 斜方辉石水含量为187~304ppm(杨贵才等, 2012), 均明显高于绝大部分新生代玄武岩中地幔包体的单斜辉石和斜方辉石水含量(表1). 地幔包体中的橄榄石在随玄武岩岩浆上升时会发生水的扩散丢失, 即使岩浆上升的足够快(例如数小时内由60~70km上升至地表)也不可避免(Demouchy等, 2006). 不过单斜辉石和斜方辉石相对于橄榄石更容易保存其初始水含量(Peslier等, 2002; Grant等, 2007; Gose等, 2009), 且对中国东部地幔包体的研究也表明辉石缺乏水扩散环带(Xia等, 2010, 2013a; Hao等, 2012), 表明辉石可能保存了初始水含量. 因此, 地幔包体在随岩浆上升时发生的水扩散丢失不能解释其辉石水含量低的现象. 据此前人认为, 地幔包体水含量低的原因为岩石圈地幔底部受到上涌软流圈地幔的热烘烤所致(Yang等, 2008; Xia等, 2010, 2013a; Hao等, 2012; Li等, 2015).

在莒南玄武岩中单斜辉石含量较高的二辉橄榄岩包体中, 单斜辉石显示出轻稀土相对于重稀土弱亏损的特征, 表明其未受到明显的熔体交代作用; 结合其全岩具有较低的$Mg^{\#}$, 表明这类地幔包体可能来自新生岩石圈地幔(Ying等, 2006). 由此可见, 新生

表 1　中国东部幔源矿物和地幔包体全岩结构水含量

地点	岩石类型	结构水含量(ppm)					参考文献
		橄榄石	单斜辉石	斜方辉石	斜长石	全岩	
中生代地幔包体							
费县	尖晶石二辉橄榄岩		670~970				Xia等(2013b)
莒南	尖晶石二辉橄榄岩	6~15	466~746	187~304		81~245	杨贵才等(2012)
宁远	尖晶石二辉橄榄岩		147~461	40~126		35~102	夏群科等(2010)
胶州	尖晶石二辉橄榄岩		103~311	30~141			Li等(2015)
青岛	尖晶石二辉橄榄岩		580~728	266~346			Li等(2015)
新生代地幔包体							
汪清	尖晶石二辉橄榄岩		34~403	13~89		8~61	赵起超等(2015)
龙岗	尖晶石二辉橄榄岩		48~464	28~104		12~92	赵起超等(2015)
汉诺坝	尖晶石二辉橄榄岩	1~15	50~355	20~130		10~89	Yang等(2008), Wang等(2014)
鹤壁	尖晶石方辉橄榄岩	1	626	31~96		6~32	Xia等(2010), Wang等(2014)
	尖晶石二辉橄榄岩		181	86		41	Xia等(2010)
繁峙	尖晶石二辉橄榄岩		74~116	18~32		13~28	Xia等(2013a)
阳原	尖晶石二辉橄榄岩	8~13	255~654	121~225			Hao等(2012), Wang等(2014)
	尖晶石方辉橄榄岩		258~336	129~136			Hao等(2012)
符山	尖晶石方辉橄榄岩	2~6	259~328	123~156		20~23	刘少辰和夏群科(2014)
	尖晶石二辉橄榄岩	1~22	216~404	159~188		36~64	刘少辰和夏群科(2014)
栖霞	尖晶石二辉橄榄岩		70~158	32~59		16~50	Xia等(2010)
蓬莱	尖晶石二辉橄榄岩		27~59	8~25		6~14	Xia等(2010)
昌乐	尖晶石二辉橄榄岩		30~453	14~114		6~56	Xia等(2010), Hao等(2012)
	尖晶石易剥橄榄岩			35~60			Hao等(2012)
女山	尖晶石二辉橄榄岩	0~35	5~355	5~140		0~85	夏群科等(2000a), Yang等(2008), Wang等(2014)
	尖晶石方辉橄榄岩	5		15		5	Yang等(2008)
盘石山	尖晶石二辉橄榄岩		64~183	16~50		15~52	夏群科等(2000a), Bonadiman等(2009)
练山	尖晶石二辉橄榄岩		37~102	13~45		1~28	Bonadiman等(2009)
方山	尖晶石二辉橄榄岩		41~177	21~74		16~50	Xia等(2010)
建德	尖晶石二辉橄榄岩		415~589	181~329		95~216	Hao等(2014)
	尖晶石方辉橄榄岩		388~402	163~230		85~86	Hao等(2014)
明溪	尖晶石二辉橄榄岩	0~38	51~451	9~140		8~78	王蓉和张保民(2011), Yu等(2011)
	尖晶石方辉橄榄岩	25~41	118~488	90~150		42~78	Yu等(2011)
	石榴石二辉橄榄岩	24~29	318~400	153~164		86~89	Yu等(2011)
牛头山	尖晶石二辉橄榄岩	14~26	114~334	57~93		38~78	Yu等(2011)
	尖晶石方辉橄榄岩	25		83		45	Yu等(2011)
	尖晶石纯橄岩	23				22	Yu等(2011)
麒麟	尖晶石方辉橄榄岩	17~23	245~307	144~177		51~78	Yu等(2011)
	尖晶石二辉橄榄岩	24	354	190		94	Yu等(2011)
安远	尖晶石二辉橄榄岩	20~26	201~324	103~133		60~90	Yu等(2011)
	尖晶石方辉橄榄岩	17~38	271~356	136~213		61~84	Yu等(2011)
	尖晶石纯橄岩	30				28	Yu等(2011)
雷州半岛	尖晶石二辉橄榄岩		183~981	82~571		48~168	王蓉和张保民(2011)
文昌	尖晶石二辉橄榄岩		73~586	61~170		21~111	王蓉和张保民(2011)
中生代玄武岩斑晶							
费县			216~797				Xia等(2013b)
新生代玄武岩斑晶							
昌乐-临朐			62~913				Xu等(2014)
双辽			49~977				Chen等(2015)
昔阳-平定			0~43				Liu等(2015)
左权			0~165		5~57		Liu等(2015)
繁峙			16~104				Liu等(2015)

岩石圈地幔具有较高的原始水含量, 而新生代岩石圈地幔包体水含量偏低的情况表明其可能经历了热烘烤事件(水从矿物中扩散丢失)或者熔体提取(水被熔体带走). 但是, 总体上中国东部地幔包体中矿物水含量与$Mg^{\#}$之间无明显相关关系(图2), 一般将其解释为缺乏熔体提取效应. 在地幔橄榄岩部分熔融过程中, H_2O是高度不相容元素, 而MgO是高度相容元素, 两者在熔体与残留体之间的配分系数存在巨大反差, 因此熔体提取应该导致地幔包体矿物在水含量与$Mg^{\#}$之间出现负相关性. 然而, 在交代成因地幔辉石岩部分熔融过程中, H_2O和MgO在熔体与残留体之间的配分系数差别显著降低, 熔体提取可能成为地幔包体水含量较低的主要原因. 因此, 在陆下岩石圈地幔部分熔融过程中, 软流圈地幔热烘烤可能与熔体提取作用是相辅相成的.

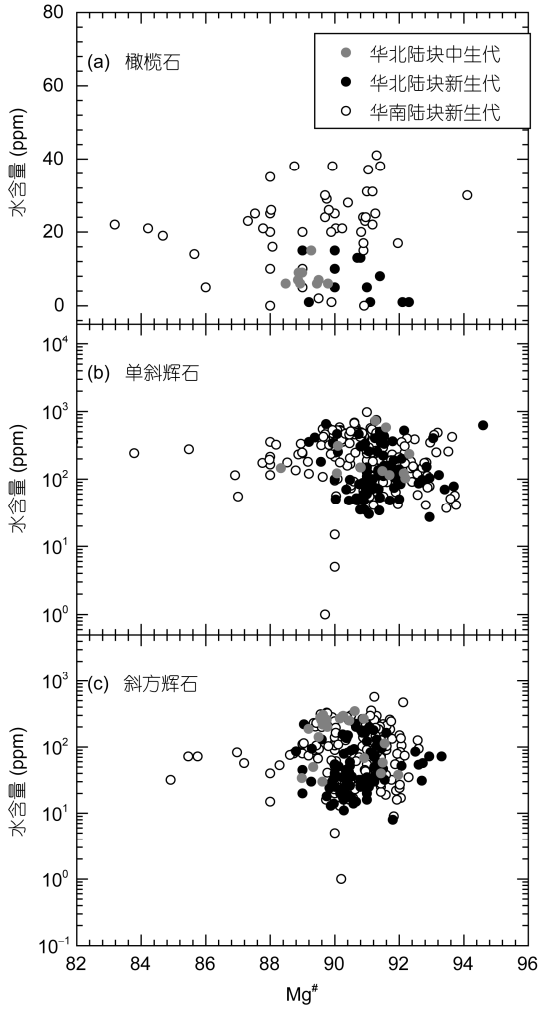


图 2　中国东部岩石圈地幔包体单矿物水含量 vs. $Mg^{\#}$

数据来源同图 1

另一方面, 方辉橄榄岩样品的单斜辉石水含量为118~626ppm, 斜方辉石水含量为15~230ppm, 全岩水含量为5~86ppm(Yang等, 2008; Xia等, 2010; Yu等, 2011; Hao等, 2012, 2014; 刘少辰和夏群科, 2014; Wang等, 2014). 二辉橄榄岩中单斜辉石水含量为1~355ppm, 斜方辉石水含量为1~130ppm, 全岩水含量为1~89ppm(夏群科等, 2000a; Bonadiman等, 2009; Yang等, 2008; Xia等, 2010, 2013a; Yu等, 2011; Hao等, 2012, 2014; 杨贵才等, 2012; 刘少辰和夏群科, 2014; Wang等, 2014; 赵起超等, 2015). 不仅总体上方辉橄榄岩和二辉橄榄岩矿物和全岩水含量相近, 同一地区内同时出现的方辉橄榄岩水含量与二辉橄榄岩也相近. 例如明溪新生代玄武岩中方辉橄榄岩包体单斜辉石、斜方辉石和全岩水含量分别为118~488ppm(大多低于172 ppm)、90~150和42~78ppm, 二辉橄榄岩包体单斜辉石、斜方辉石和全岩水含量分别为58~451ppm(大多高于200ppm)、38~164和12~89ppm (Yu等, 2011). 两者斜方辉石和全岩水含量相近, 前者单斜辉石含量低于后者. 虽然方辉橄榄岩单矿物$Mg^{\#}$总体上高于二辉橄榄岩, 但两者相近的水含量可能反映3种可能性: (1) 玄武岩包体中的方辉橄榄岩与二辉橄榄岩没有成因联系, 即方辉橄榄岩不是共生的二辉橄榄岩部分熔融的残留体, 而是另一种含水量更高的地幔岩石的部分熔融残留体; (2) 两种橄榄岩间的水经过长时间扩散, 水含量逐渐接近; (3) 方辉橄榄岩是二辉橄榄岩经历熔体提取后的残余, 但随后经历了含水熔体/富水流体的交代, 使得水含量升高. 中国东部方辉橄榄岩包体中单斜辉石普遍出现轻稀土较重稀土富集的现象, 表明方辉橄榄岩在形成后经历过熔体交代作用(Zheng等, 2001, 2005). 因此第3种解释可能更合理.

大部分地幔包体样品中橄榄石的水含量低于检测限(~1ppm), 但同一样品中的辉石能检测出相当数量的水. 由于在同等温压条件下氢在橄榄石中的扩散速率大于在辉石中的扩散速率或与之相当(Mackwell和Kohlstedt, 1990; Ingrin等, 1995; Hercule和Ingrin, 1999; Woods等, 2000; Demouchy和Mackwell, 2003, 2006), 并且平衡状态下橄榄石中的水含量相比单斜辉石要低一个数量级左右(Aubaud等, 2004; Hirschmann

等, 2005; Grant等, 2007; Tenner等, 2009; Kovács等, 2012), 因此橄榄石中的水会先于辉石通过扩散丢失殆尽, 所以橄榄石未检出水可能归因于高温下水的扩散丢失(Xia等, 2013a). 在橄榄石和单斜辉石同时检测出水的样品中, 汉诺坝、女山、明溪、安远、牛头山和麒麟等地的橄榄岩包体$D^{Cpx/Ol}$=4~21, 大部分在9~15(图3a, Yang等, 2008; Yu等, 2011). 这与实验得出的$D^{Cpx/Ol}$=9~22(Aubaud等, 2004; Hirschmann等, 2005; Grant等, 2007; Tenner等, 2009; Kovács等, 2012)相吻合, 表明这些地区包体橄榄岩中橄榄石与单斜辉石水含量上达到了平衡. 阳原、浮山和莒南等地的地幔包体以及汉诺坝和女山的个别地幔包体样品$D^{Cpx/Ol}$>38(杨贵才等, 2012; 刘少辰和夏群科, 2014; Wang等, 2014), 其中个别样品单斜辉石水含量比橄榄石高两个数量级以上. 这表明橄榄石中的水可能发生了扩散丢失, 导致其水含量偏低. 类似的, 世界上其他地区地幔橄榄岩包体样品也几乎都表现出实测橄榄石水含量低于按分配系数计算出的橄榄石水含量的情况, 说明矿物扩散丢失水的情况在世界上很常见.

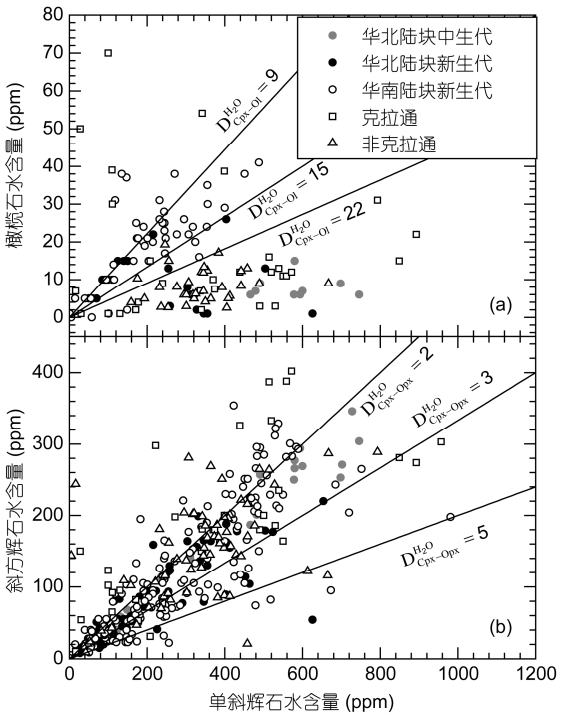


图 3　中国东部岩石圈地幔包体橄榄石和斜方辉石水含量 vs.单斜辉石水含量

数据来源同图 1

与橄榄石不同, 斜方辉石与单斜辉石水含量呈明显正相关关系, 且$D^{Cpx/Opx}$=1~8, 大部分样品在2~5(夏群科等, 2000a; Bonadiman等, 2009; Yang等, 2008; Xia等, 2010, 2013a; 王蓉和张保民, 2011; Yu等, 2011; Hao等, 2012, 2014; 杨贵才等, 2012; 刘少辰和夏群科, 2014; Wang等, 2014; 赵起超等, 2015), 与世界其他地区地幔包体表现出的性质一致(图3(b)). 这也与实验得出的$D^{Cpx/Opx}$=1~3(Aubaud等, 2004; Hauri等, 2006; Tenner等, 2009; Kovács等, 2012)接近, 表明单斜辉石和斜方辉石之间水基本上达到了平衡. 个别样品$D^{Cpx/Opx}$高于5(夏群科等, 2000a; Bonadiman等, 2009; 王蓉和张保民, 2011; Hao等, 2012; 赵起超等, 2015). 前人通过实验得出, 当X_{Fe}>0.3(即$Mg^{\#}$<97)时, 氢在斜方辉石中的扩散速率低于在单斜辉石中的扩散速率(Ingrin等, 1995; Hercule和Ingrin, 1999; Woods等, 2000; Stalder和Skogby, 2003, 2007; Stalder和Behrens, 2006; Stalder等, 2007; Sundvall等, 2009). 不过中国东部地幔包体辉石X_{Fe}(绝大多数大于0.7, 夏群科等, 2000a; Bonadiman等, 2009; 王蓉和张保民, 2011; Hao等, 2012; Wang等, 2014; 赵起超等, 2015)均大于实验中辉石的X_{Fe}(小于0.7, Ingrin等, 1995; Hercule和Ingrin, 1999; Woods等, 2000; Stalder和Skogby, 2003, 2007; Stalder和Behrens, 2006; Stalder等, 2007; Sundvall等, 2009), 而氢在辉石中的扩散速率随X_{Fe}的增大而增大的定量关系尚未确定, 因此华北克拉通地幔包体中单斜辉石和斜方辉石之间氢扩散系数的相对大小尚不能确定, 继而$D^{Cpx/Opx}$高的现象也尚不清楚是否归因于氢在斜方辉石中的扩散速率高于单斜辉石. 另外$D^{Cpx/Opx}$还可能随压力升高而增大(Kovács等, 2012), 但尚无证据表明中国东部地幔包体$D^{Cpx/Opx}$与平衡压力正相关. 而且实验中最大压力4GPa下的$D^{Cpx/Opx}$为3.5(Kovács等, 2012), 而中国东部地幔包体的平衡压力普遍低于3GPa(例如Zheng等, 2015), 如果没有其他因素影响$D^{cpx/opx}$, 那么平衡压力的增加似乎只能解释$D^{cpx/opx}$<~3时的情况, $D^{cpx/opx}$>~3的情况则可能不能单纯由$D^{cpx/opx}$和平衡压力的正相关来解释.

值得注意的是, 华北陆块岩石圈地幔包体单斜辉石水含量与$(La/Yb)_n$呈较明显的正相关关系(图4a). 这可由地幔经历壳源含水熔体交代来解释. 这些单

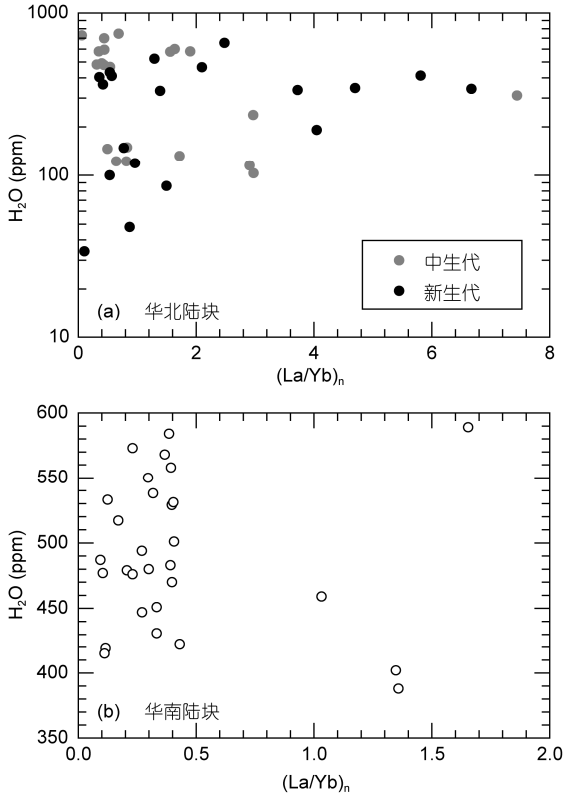


图 4 中国东部岩石圈地幔包体单斜辉石水含量 vs.$(La/Yb)_n$

数据来源同图 1

斜辉石的$(La/Yb)_n$大多较高(>1.0), 显示出轻稀土相对富集, 反映橄榄岩受到过含水熔体的交代. 倘若熔体水含量高于地幔橄榄岩, 那么被这种含水熔体交代的地幔橄榄岩便会同时表现出$(La/Yb)_n$和水含量的升高, 并反映到单斜辉石中. 因此华北陆块岩石圈地幔应当经历了壳源含水熔体-橄榄岩反应. 与此相反, 华南建德岩石圈地幔包体单斜辉石的$(La/Yb)_n$大多较低(<1.0), 并且与水含量之间无明显的相关性(图4b); 只有少量单斜辉石表现出轻稀土富集, 说明源区地幔曾经受到过含水熔体的交代. 另一方面, 由于Ba比Nb的流体活动性强(Kogiso等, 1997), 流体中富含Ba而亏损Nb, 造成Ba/Nb较高. 被这种高Ba/Nb流体交代的地幔橄榄岩便会表现出水和Ba/Nb同时升高的情况. 然而建德地幔包体中单斜辉石的水含量与Ba/Nb比值之间也未显示出正相关关系(图5), 指示橄榄岩包体水含量变化可能与其地幔源区受到富水流体的交代无关.

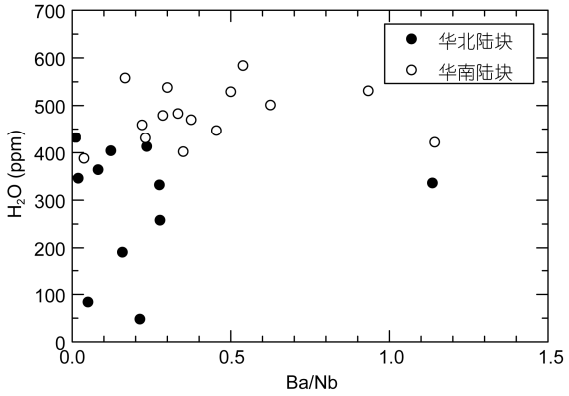


图 5 中国东部新生代岩石圈地幔包体单斜辉石水含量 vs. Ba/Nb

数据来源同图 1

2.2 玄武岩及其地幔源区水含量

玄武岩是地幔部分熔融的产物. 与其他不相容元素类似, 我们可以测定/推算玄武岩初始熔体的水含量, 假定该初始熔体产生时地幔源区的残留矿物组成和熔融比例, 通过推算得出地幔源区的水含量. 由于玄武岩分布的区域大于地幔包体出现的区域, 因此通过玄武岩推算地幔水含量能在更大范围内反映地幔的水含量分布情况.

确定玄武岩初始熔体的水含量最直接的方法就是通过离子探针(SIMS)测定矿物中熔体包裹体的水含量. 如果熔体在分离结晶之前未经历明显去气或者同化混染作用, 则最早结晶矿物(通常是$Mg^{\#}$最高的橄榄石)中的熔体包裹体即代表玄武岩初始熔体. 另一种方法是对$Mg^{\#}$最高的玄武岩斑晶进行傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析确定其水含量, 通过矿物-熔体间分配系数计算出与矿物平衡的岩浆水含量即可近似推测出玄武岩初始熔体的水含量.

相对于众多的地幔包体矿物水含量数据, 中国东部玄武岩斑晶水含量数据相对较少. Xia等(2013b)对华北陆块费县玄武岩中单斜辉石斑晶进行了FTIR结构水含量分析, 测得其结构水含量为216~797ppm. 根据$Mg^{\#}$最高的单斜辉石水含量所计算出的玄武岩初始熔体水含量为(3.4±0.7)wt.%, 考虑到FTIR测定误差以及单斜辉石与熔体之间水分配系数计算误差, 费县玄武岩初始熔体水仍然远高于洋中脊玄武岩(MORB)的水含量0.1~0.3wt.%和洋岛玄武岩(OIB)的水含量0.3~1.0wt.%(Dixon等, 1988, 1997; Michael,

1988, 1995; Sobolev和Chaussidon, 1996; Wallace和Anderson, 1998; Nichols等, 2002; Danyushevsky等, 2000; Dixon和Clague, 2001; Saal等, 2002; Simons等, 2002; Asimow等, 2004), 稍高于弧后盆地玄武岩(BABB)的水含量0.2~2.0wt.%(Hochstaedter等, 1990; Danyushevsky等, 1993; Stolper和Newman, 1994), 与岛弧玄武岩水含量2.0~8.0wt.%(Dobson等, 1995; Sisson和Layne, 1993; Wallace, 2005)相当. 根据初始熔体水含量, 假定地幔部分熔融程度为5~15%, 计算出的地幔源区的水含量最低为1000ppm. 这远高于MORB源区水含量50~200ppm(Dixon等, 1988; Michael, 1988, 1995; Jambon, 1994; Sobolev和Chaussidon, 1996; Saal等, 2002; Simons等, 2002; Asimow等, 2004; Green等, 2010), 与OIB源区水含量最高值一样(Dixon等, 1997, 2002; Jamtveit等, 2001; Hauri, 2002; Nichols等, 2002; Seaman等, 2004; Tenner等, 2012). 这些相似性和差别说明, 中生代玄武岩地幔源区很可能比OIB源区水含量高, 并与岛弧玄武岩源区一样富水.

Xu等(2014)对华北陆块东南部昌乐-临朐新生代玄武岩单斜辉石斑晶矿物进行了FTIR结构水含量分析, 测得其水含量为62~913ppm. 根据$Mg^{\#}$最高的单斜辉石斑晶计算得出的玄武岩初始熔体水含量为0.5 wt.%. Chen等(2015)测得华北陆块东北部双辽地区新生代玄武岩单斜辉石斑晶水含量为49~977ppm. 据此计算得出玄武岩初始熔体水含量为0.9~3.1wt.%. Liu等(2015)测得太行山昔阳-平定、左权和繁峙地区新生代玄武岩单斜辉石斑晶水含量分别为0~143、0~165和16~104ppm, 他们还测得玄武岩中斜长石斑晶水含量为5~57ppm. 由此可计算出上述三个地区玄武岩初始熔体的水含量分别为0.2~0.3、1.1和0.5~0.9wt.%. 综合上述结果可见, 中国东部大部分新生代玄武岩初始熔体的水含量高于MORB, 低于岛弧玄武岩, 与BABB和OIB相近; 部分双辽新生代玄武岩初始熔体水含量甚至落于岛弧玄武岩范围内. 根据这些初始熔体水含量可以估计出, 新生代玄武岩地幔源区水含量为119~4913ppm. 除部分双辽样品地幔源区水含量高于BABB和OIB源区, 与岛弧玄武岩源区相近外, 新生代玄武岩地幔源区水含量总体明显高于MORB源区, 与BABB和OIB源区相近. 这为这些新生代玄武岩地幔源区不是MORB型地幔, 而是受到熔体交代的新生岩石圈地幔的结论(Zhang等, 2009; Wang等, 2011; Xu Z等, 2012)提供了有力证据.

中国东部新生代玄武岩具有相对亏损的Sr-Nd同位素组成(Zhou和Armstrong, 1982; Zhou等1988; Zou等, 2000; Zhang等, 2002), 与正常软流圈地幔部分熔融所形成的洋中脊玄武岩(MORB)非常相似. 由于这个原因, 前人一般认为中国东部新生代玄武岩的源区是软流圈地幔. 地震层析成像显示, 俯冲的西太平洋板片停滞在地幔转换带, 由此衍生的地壳组分交代上覆软流圈地幔有可能成为中国东部新生代玄武岩的地幔源区(例如Xu Y G等, 2012; Sakuyama等, 2013; Xu, 2014). 但是, 如果是在地幔过渡带之上的软流圈地幔受到俯冲洋壳来源流体的交代而发生部分熔融, 根据实验岩石学资料在这样一个非常高压条件下产生的熔体将是超镁铁质而不是镁铁质的(例如 Inoue, 1994; Kawamoto 和 Holloway, 1997; Kawamoto, 2004). 这与我们看到的大陆玄武岩成分不符. 此外, 这个推测忽视了中国东部新生代玄武岩与洋中脊玄武岩(MORB)在在微量元素组成上的巨大差异. 在微量元素分布型式上, 洋中脊玄武岩以亏损熔体活动性不相容元素LILE和LREE为特点(Hofmann, 1988), 指示其源区软流圈地幔也亏损这些熔体活动性不相容元素(Salters和Stracke, 2004; Workman和Hart, 2005); 中国东部新生代玄武岩则以富集LILE和LREE为特点(Zou等, 2000; Xu Z等, 2012), 指示其地幔源区至少不亏损这些熔体活动性不相容元素. 岛弧玄武岩同样以富集这些熔体活动性不相容元素LILE和LREE为特点(Hawkesworth 等, 1993; Spandler和Pirard, 2013), 一般将其归因于俯冲洋壳衍生流体/熔体对上覆地幔楔的交代作用(McCulloch和Gamble, 1991; Stern, 2002). 俯冲地壳在弧后深度的低程度部分熔融的确能够产生这种富集熔体活动性不相容元素LILE和LREE的含水熔体, 当这种熔体以小的比例与软流圈成因地幔楔橄榄岩发生反应时, 所形成辉石岩将总体上保留软流圈地幔亏损Sr-Nd同位素组成的特点, 但是在微量元素组成上则相对富集熔体活动性不相容元素LILE和LREE(Zheng, 2012). 我们将由板片熔体交代软流圈成因地幔楔所形成的岩石圈地幔称为新生岩石圈地幔, 由此部分熔融就会产生这些Sr-Nd同位素亏损而熔体活动性不相容微量元素富集的镁铁质熔体(Zhang等, 2009; Wang等, 2011; Xu Z等, 2012). 前人

对新生代玄武岩的地球化学研究认为, 其地幔源区是受到壳源物质交代的软流圈地幔(Zhang等, 2009; Wang等, 2011; Xu Z等, 2012; Xu Y G等, 2012; Sakuyama等, 2013; Xu, 2014), 就是我们所定义的新生岩石圈地幔. 大陆玄武岩地幔源区在水含量上表现出非MORB型地幔源区性质, 指示其源区受到板片来源熔体的交代, 属于新生岩石圈地幔.

与地幔包体的情况类似, 昌乐-临朐新生代玄武岩中橄榄石斑晶水含量也低于检测限(~1ppm), 远低于与单斜辉石平衡所需的水含量(>9ppm). 这可能归因于水在橄榄石中的扩散丢失(Xia等, 2010, 2013a; Hao等, 2012). 类似的, 太行山新生代玄武岩中存在未测出结构水的单斜辉石斑晶, 这些单斜辉石斑晶显示出明显的扩散环带, 因此水的丢失应归因于氢的扩散(Liu等, 2015).

大部分新生代玄武岩中的单斜辉石的水含量随$Mg^{\#}$降低而增加(图6), 这可以由玄武岩浆经历分离结晶作用来解释(Wade等, 2008). 由于水相对名义上无水矿物是不相容的, 且因为岩浆分离结晶时去气作用不明显, 因此经历分离结晶后的岩浆$Mg^{\#}$会降低而水含量会增加, 进而导致从这种演化岩浆中结晶出的单斜辉石$Mg^{\#}$降低而水含量增加. 然而, 在新生代玄武岩样品中却出现部分单斜辉石水含量随$Mg^{\#}$降低而降低的现象, 由此计算出的与单斜辉石斑晶平衡的岩浆水含量也随$Mg^{\#}$降低而降低(Xia等, 2013b; Xu等, 2014; Chen等, 2015; Liu等, 2015). 一方面, 含水矿物如角闪石等的分离结晶可以导致岩浆在$Mg^{\#}$降低的同时水含量降低, 进而引起结晶的单斜辉石在$Mg^{\#}$降低的同时水含量降低. 然而, 由于这些玄武岩中并未出现含水矿物, 因此岩浆和单斜辉石斑晶水含量的降低与含水矿物分离结晶无关. 另一方面, 高温高压实验表明, 碱性玄武质熔体中水的溶解度随压力降低而降低(Lesne等, 2011). 因此, 岩浆在上升过程中由于压力降低导致水的溶解度降低, 有可能经历去气作用. 这也可以使得岩浆水含量降低, 进而使得在已去气岩浆中结晶出的单斜辉石水含量降低. 因此上述新生代玄武岩中部分单斜辉石水含量随$Mg^{\#}$降低而降低的现象或许可以由岩浆上升时的分离结晶作用解释(Xia等, 2013b; Xu等, 2014).

山西左权新生代玄武岩中的单斜辉石斑晶还出现有3种不同的水分布特征: 水分布均一、核部水含量较边部高以及核部水含量较边部低(Liu等, 2015). 对于核部水含量较边部低的单斜辉石, 一般核部$Mg^{\#}$比边部高, 反映了正常结晶分异过程. 对于核部水含量较边部高的单斜辉石, 核部$Mg^{\#}$也比边部高, 可能反映3种过程: (1) 单斜辉石边部结晶时, 岩浆已经经历了去气过程; (2) 单斜辉石边部经历了扩散去气, 而扩散对核部影响较小; (3) 单斜辉石边部结晶前母

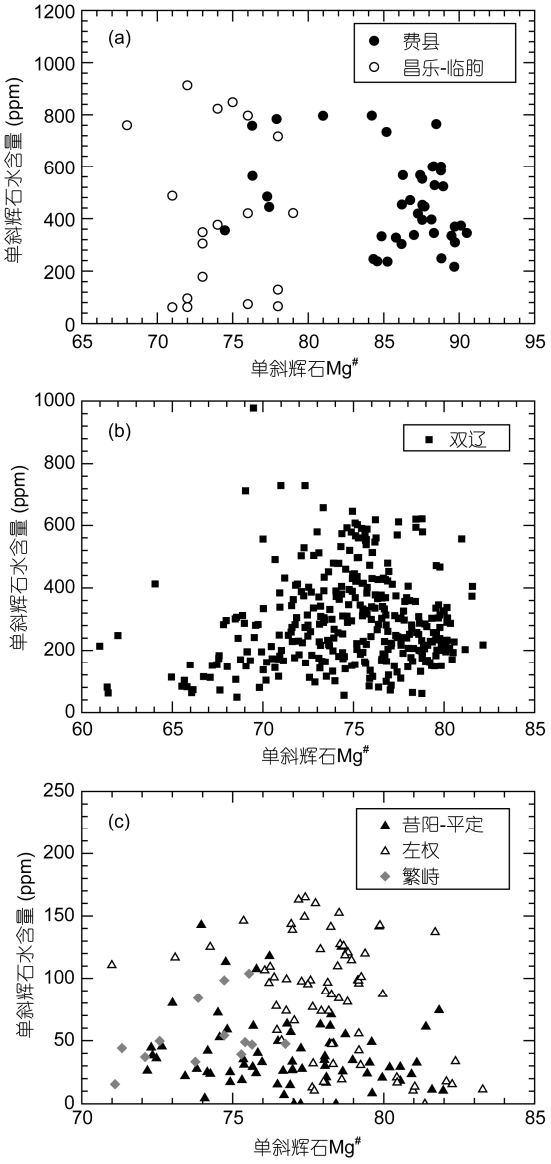


图 6　中国东部大陆玄武岩单斜辉石斑晶水含量 vs.单斜辉石 $Mg^{\#}$

数据来源: 费县玄武岩(Xia 等, 2013b), 昌乐-临朐玄武岩(Xu 等, 2014), 双辽玄武岩(Chen 等, 2015), 昔阳-平定、左权和繁峙玄武岩(Liu 等, 2015)

岩浆中有含水量较低的岩浆混入. Liu等(2015)根据单斜辉石计算出的岩浆最大含水量已经超过实验测得的岩浆水溶解度, 分析发现缺乏不含水的单斜辉石以及单斜辉石并未显示出水的扩散分布特征等, 再加上斑晶氧同位素组成不均一, 认为前两种解释均不适用于左权玄武岩, 而岩浆混合可能是造成核部比边部水含量高的原因. 值得注意的是, 对于核部水含量较边部高的单斜辉石斑晶, 其核部$Mg^{\#}$比核部水含量较边部低的单斜辉石斑晶核部$Mg^{\#}$高, 表明岩浆混合应发生在单斜辉石早期结晶期间. 水分布均一和不均一的单斜辉石斑晶在$Mg^{\#}$上相似, 可能表明岩浆水的均一化尺度有限.

3　地幔氢同位素组成

虽然前人对中国东部地幔包体的水含量有较多报道, 但对幔源矿物水的氢同位素组成报道较少(表2). 女山新生代玄武岩地幔包体中的角闪石δD变化很大, 为−94~46‰(夏群科等, 2000b), 远超出了新鲜MORB的变化范围(−72±10‰, Shilobreeva等, 2011)(图7), 并具有异常高的δD. 由于这些角闪石水含量接近, 因此它们大的氢同位素组成变化反映了地幔小尺度下的氢同位素不均一性. 这种不均一性被认为是由于交代地幔的熔体/流体具有较大的氢同位素组成变化所导致的(夏群科等, 2000b). 由于部分熔融和分离结晶作用均不能导致熔体和残留矿物氢同位素组成的明显变化, 而水蒸气和含氢还原性气体(H_2, H_2S和CH_4等)与熔体之间的氢同位素分馏相对明显(Taylor, 1986; Dobson等, 1989; Horibe和Craig, 1995; Pineau等, 1998), 因此交代地幔的熔体可能经历了明显的去气作用. 假定熔体氢同位素初始值与角闪石最低值相近, 由于水蒸气相对熔体富集D, 这样$\Delta D_{水蒸气-熔体}>0$(Dobson等, 1989; Pineau等, 1998), 逸出的水蒸气和去气后的熔体分别相对于未去气的熔体富集和亏损D. 而含氢还原性气体相对熔体亏损D, 即$\Delta D_{气体-熔体}<0$(Taylor, 1986; Horibe和Craig, 1995), 逸出的流体和去气后的熔体分别相对于未去气的熔体亏损和富集D. 因此, 角闪石异常高的δD值可能是地幔受到发生含氢还原性气体逃逸的熔体交代所致(夏群科等, 2000b). 女山新生代玄武岩中包含的云母巨晶δD变化都非常大, 分别为−203~−23‰(夏群科等, 1999). 该巨晶被认为和寄主玄武岩来自同一地幔源区. 巨晶核部具有较高的δD值−23‰, 可能代表了未与大气降水相互作用的初始云母氢同位素组成. 考虑到高温下云母与水之间0~10‰的氢同位素分馏($\Delta D_{mica\text{-}H_2O}$=−10~0‰), 夏群科等(1999)认为云母巨晶母岩浆的地幔源区δD为−23~−13‰, 高于新鲜MORB代表的亏损地幔值. 这与麒麟玄武岩中角闪石巨晶变化较小的氢同位素组成(δD=−52~−33‰)所反映的母岩浆地幔源区高于亏损地幔的氢同位素组成(δD=~−40~−30‰)一致(夏群科等, 1998). 女山新生代玄武岩中单斜辉石巨晶δD为−111~−45‰ (Xia等, 2004), 排除岩浆去气作用影响后, 单斜辉石巨晶δD初始值为−70~−50‰; 考虑到高温下$\Delta D_{px\text{-}melt}$=~−10‰, 巨晶母岩浆的地幔源区$\delta$D为−60~−40‰(Xia等, 2004), 亦高于亏损地幔值. 汉诺坝新生代玄武岩中单斜辉石巨晶δD变化很大, 为−102~−41‰, 但与水含量之间没有明显相关关系, 反映了其母岩浆氢同位素组成的不均一性. 这种不均一性可能为岩浆上升时经历去气作用所致(夏群科等, 2001), 也可能反映地幔源区氢同位素不均一性.

Xu等(2014)对昌乐-临朐和合肥新生代玄武岩橄榄石和单斜辉石斑晶进行了TC-EA-MS全水和氢同位素分析, 得到两种矿物的δD值范围相近, 分别为−145~−104‰和−110~−94‰. 这些矿物δD与$\delta^{18}O$之间没有明显相关关系, 且δD低于同纬度中国东部大气降水δD值−80~−60‰(张理刚等, 1995), 因此它们并未经

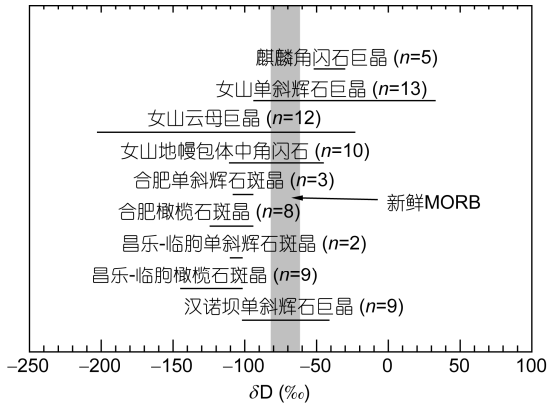


图 7　中国东部幔源矿物氢同位素组成

数据来源: 麒麟角闪石巨晶(夏群科等, 1998), 女山单斜辉石巨晶(Xia 等, 2004), 女山云母巨晶(夏群科等, 1999), 女山地幔包体中角闪石(夏群科等, 2000b), 昌乐-临朐和合肥橄榄石和单斜辉石斑晶(Xu 等, 2014), 新鲜 MORB(Shilobreeva 等, 2011)

表 2　中国东部幔源矿物氢同位素组成

地点	矿物	δD(‰)	参考文献
幔源巨晶			
女山	单斜辉石	−111~−45	Xia等(2004)
	云母	−203~−23	夏群科等(1999)
汉诺坝	单斜辉石	−102~−41	夏群科等(2001)
麒麟	角闪石	−52~−30	夏群科等(1998)
地幔包体			
女山	角闪石	−94~46	夏群科等(2000b)
玄武岩斑晶			
昌乐-临朐	橄榄石	−145~−104	Xu等(2014)
	单斜辉石	−110~−102	Xu等(2014)
合肥	橄榄石	−124~−104	Xu等(2014)
	单斜辉石	−108~−94	Xu等(2014)

历与大气降水之间的氢同位素交换. 排除去气作用影响后, 玄武岩岩浆及地幔源区δD为−108~−94‰, 低于亏损地幔δD值. 上述玄武岩斑晶和幔源巨晶以及地幔包体中矿物所反映的地幔氢同位素组成变化很大, 可以高于、低于或类似亏损地幔δD值. 这反映了中国东部岩石圈地幔氢同位素组成的高度不均一性, 也指示中国东部岩石圈地幔与正常亏损地幔不同, 受到过外来高δD和低δD组分的交代.

4　大洋板片俯冲对地幔水含量及氢同位素组成的影响

4.1　大洋板片俯冲对地幔水含量的影响

大洋板片上部玄武岩和沉积物长期处于海水覆盖之下, 因此洋壳岩石相对富水. 例如, 国际大洋钻探计划(IODP)在东太平洋上的钻孔1256D中的蚀变玄武岩水含量可达0.32~2.14%(Shilobreeva等, 2011). 海水热液也可以渗入至大洋岩石圈地幔, 使地幔橄榄岩蚀变生成蛇纹石绿泥石等矿物. 在板片俯冲时, 这些含水矿物开始分解释放出流体(Schmidt和Poli, 1998; Rüpke等, 2002). 此时俯冲板片中失去的水可达其总含水量的80~90%(Kogiso等, 1997; Dixon等, 2002). 最近研究表明(van Keken等, 2011; Walowski等, 2015), 在热俯冲带(如东太平洋Cascade弧), 俯冲洋壳中诸如粘土矿物之类的低温含水矿物在弧前深度(<60~80km)即开始分解而释放出大量流体, 当板片俯冲至弧下深度(80~150km)时洋壳释放的流体不多, 难以引起大规模的弧岩浆活动. 在冷俯冲带(如西太平洋马里亚纳弧), 俯冲洋壳中的低温含水矿物在弧前深度并不分解脱水, 而是转变为高温含水矿物(如硬柱石、角闪石等), 这些矿物在弧下深度才开始分解释放流体, 结果能够引起大规模的弧岩浆活动. 如果脱水后的板片继续俯冲至大陆岩石圈地幔之下的弧后深度(>150~200km), 就会发生低程度部分熔融, 产生含水熔体. 此时的板片虽然在弧下地幔深度丢失了大部分水, 但其含水量仍大大高于亏损地幔. 因此, 这种俯冲洋壳部分熔融产生的熔体的含水量也大大高于亏损地幔. 另一方面, 在某些冷俯冲带, 洋壳可能直到俯冲至大陆岩石圈地幔底部深度时仅释放出少量水而保留大部分水, 此时洋壳发生脱水部分熔融, 生成含水熔体乃至超临界流体. 另外, 当大洋板片俯冲至弧下或者更深处时, 岩石圈地幔蚀变橄榄岩也会由于绿泥石等的分解发生脱水, 这些水上升至洋壳, 使洋壳水含量升高(van Keken等, 2011), 进而引起洋壳发生部分熔融产生含水熔体或超临界流体. 洋壳来源的熔体或超临界流体交代上覆岩石圈地幔, 会使地幔水含量升高.

除了水的丢失外, 俯冲板片中大量微量元素, 尤其是流体活动性强的大离子亲石元素和轻稀土元素也会进入流体. 这些流体交代地幔楔, 造成地幔楔富水的同时也富集大离子亲石元素和轻稀土元素. 这些特征通过地幔楔熔融传递到弧火山岩中. 如果洋壳在金红石分解深度发生脱水熔融, 所产生的含水熔体或超临界流体就会不亏损甚至富集高场强元素. 由此种熔体/流体交代岩石圈地幔, 在引起地幔富水的同时也富集不相容元素, 但高场强元素不亏损或者富集, 使其具有类似于OIB的微量元素特征. 这些特征通过岩石圈地幔部分熔融传递到板内玄武岩(Ringwood, 1990; Zheng, 2012). 因此, 俯冲板片与上覆地幔的壳幔相互作用不仅造成地幔水含量升高, 而且会造成其地球化学性质的改变. 美国科罗拉多高原属于古老的北美克拉通, 但其中岩石圈地幔包体单斜辉石和全岩水含量均高于软流圈地幔. 例如橄榄岩包体中Fo=91~92的橄榄石, 其结构水含量可达45ppm, 表明橄榄岩包体明显富水. 这与橄榄石高Fo值所暗示的橄榄岩经历过熔体提取过程的推论相

矛盾, 因为水在熔融时倾向于进入熔体, 经历熔体提取的地幔在$Mg^{\#}$升高的同时水含量会降低, 进而使得橄榄石水含量较低. 造成这种情况的原因即为Farallon板块东向俯冲到北美大陆之下, 洋壳在俯冲带释放的流体交代了上覆克拉通岩石圈地幔. Mg和Fe在流体中的含量远低于地幔橄榄岩, 不能明显影响橄榄石的Fo值; 然而水的加入使得橄榄石的水含量明显升高. 这样就会造成橄榄石同时具有高Fo值和水含量的现象. 上述过程被称为"再水化(rehydration)"过程(Li等, 2008). 除了富水流体, 含水熔体或超临界流体也可以成为地幔再水化过程中传递水的介质. 值得注意的是, 由于含水熔体或超临界流体交代地幔时不仅可以提高地幔水含量, 更重要的是会同时造成地幔矿物组成以及主微量元素、放射成因同位素和稳定同位素组成的变化. 因此, 交代后的地幔矿物很可能出现元素比值和同位素组成与水含量的耦合性变化(Zheng, 2012).

虽然对中国东部岩石圈地幔包体的大部分样品研究表明其比较贫水, 但仍有部分地区的地幔包体显示出富水特征. 例如, 莒南二辉橄榄岩包体显示出具有类似于亏损地幔稀土分布型式, 但是具有比较高的水含量, 可能指示这类岩石圈地幔一开始可能并不贫水, 而地幔包体普遍贫水的特征可能反映了中国东部岩石圈地幔普遍经历了水的丢失过程. 另一方面, 对中生代和新生代玄武岩的研究均表明其源区相对富水, 而且比莒南橄榄岩包体代表的岩石圈地幔更富水. 玄武岩全岩研究表明, 上述中生代和新生代玄武岩地幔源区均受到壳源物质交代(Zhang等, 2002; Gao等, 2008; Wang等, 2011; Xu Z等, 2012), 因此水应当源自交代地幔的壳源物质. 这种壳源物质很可能是俯冲板片部分熔融所产生的含水熔体或超临界流体. 它们对地幔的交代不仅改变了岩石圈地幔的元素和同位素特征, 而且使得岩石圈地幔相对富水.

4.2 大洋板片俯冲对地幔氢同位素组成的影响

前人研究报道, 大洋地壳蚀变玄武岩和沉积物的δD值普遍高于新鲜MORB值. 例如, IODP钻孔1256D中的蚀变玄武岩的δD大于−57‰(Shilobreeva等, 2011). 大部分远洋自生沉积物和蛇纹岩的δD为−30±25‰(France-Lanord和Sheppard, 1992; Lécuyer和O'Neil, 1994). 这是由于海水与这些岩石中的含水矿物之间发生低温氢同位素交换所致(Xu等, 2014), 结果俯冲板片的δD应大于亏损地幔值. 当大洋板片在弧下深度发生脱水作用甚至部分熔融时, 水可以与脱水残余岩石之间再次发生氢同位素交换. 实验测得的低压(<1GPa)下含水矿物与水之间的氢同位素分馏普遍小于0‰. 例如250~450℃时, 蛇纹石与水之间的氢同位素分馏值$\Delta D_{蛇纹石-水}$为−32~−20‰ (Chacko等, 1999). 另一方面, 理论计算和实验均表明, 压力升高可以增大矿物与水之间的氢同位素分馏(Driesner, 1997; Horita等, 2002), 使$\Delta D_{矿物-水}$可以增大到>−90‰ (Xu等, 2014). 这样俯冲洋壳释放出的流体δD值就会明显高于亏损地幔值, 从而使得被其交代的弧下地幔楔δD高于亏损地幔值. 例如, 堪察加半岛Kuri火山岩中角闪石和黑云母反映出的岩浆水δD为−40~−25‰(Taran等, 1997); 马里亚纳岛弧火山岩熔体包裹体δD为−55~−25‰(Shaw等, 2008), 均明显高于亏损地幔值, 即可用这个过程解释.

另一方面, 在流体将D从俯冲板片中带走后, 经历了脱水的板片残余岩石即亏损D. 假设未脱水岩石的δD为−50‰, 脱水量占初始水量的90%左右, 流体δD为−40‰左右, 脱水后的俯冲板片δD即会低至−200‰左右(Shaw等, 2008). 如果此时洋壳部分熔融产生的低δD熔体或超临界流体加入到亏损地幔中, 会使地幔δD降低, 进而使得地幔部分熔融产生的玄武岩出现低δD值. 中国东部新生代玄武岩所反映的地幔源区低δD特征即可能继承自脱水俯冲大洋洋壳. 这与从新生代玄武岩全岩元素和同位素特征得出的结论一致, 即其地幔源区含有经历脱水的俯冲太平洋洋壳熔融产生的熔体组分(Zhang等, 2009; Wang等, 2011; Xu Z等, 2012; Xu Y G等, 2012). 女山和麒麟玄武岩中斑晶和幔源巨晶反映出地幔源区δD高于亏损地幔. 这些玄武岩具有典型类似于OIB的微量元素特征, 与岛弧玄武岩不同, 这就排除了俯冲板片释放的高δD流体交代地幔导致δD高的可能. 另一种解释是源区被经历过还原性气体逃逸的熔体所交代. 如夏群科等(2000)所述, 还原性气体的逃逸会使剩余熔体δD升高, 因此原本δD低的脱水俯冲洋壳产生的熔体在经历此类去气作用后会具有δD高的特征. 但去气作用不影响熔体的微量元素组成, 因此被这种高δD熔体交代的岩石圈地幔部分熔融产生的玄武岩便会

具有高δD值和类似OIB的微量元素分布特征.

5 地幔水化和岩石圈减薄

地幔岩石中水含量的升高可以通过增加橄榄石的蠕变速率(Mei和Kohlstedt, 2000)直接降低其黏滞度(Karato和Wu, 1993; Kohlstedt等, 1995; Hirth和Kohlstedt, 1996, 2004; Dixon等, 2004; Li等, 2008; Yang等, 2008; Xia等, 2013b). 例如, Dixon等(2004)根据美国西部的地热梯度计算得出, 橄榄石含水量为50ppm时, 橄榄岩黏滞度约比橄榄石不含水时低一个数量级; 橄榄石达到水饱和时, 橄榄岩黏滞度约为干橄榄岩的1/30. 另一方面, 水含量的升高可以降低地幔岩石的固相线温度(例如Hirose和Kawamoto, 1995), 使得地幔更容易部分熔融, 矿物颗粒间熔体的存在也会使地幔岩石黏滞度降低(Chopra和Paterson, 1984). 因此地幔水含量越高, 其黏滞度就越低, 强度也越低, 更容易遭受上涌软流圈地幔或者俯冲大洋板片等黏滞度较高物质的侵蚀, 从而导致岩石圈地幔减薄. 由此看来, 岩石圈地幔的水化是造成其减薄的重要诱因之一(Humphrey等, 2003; Dixon等, 2004).

前人研究表明, 中国东部华北陆块中生代经历了大规模的减薄, 岩石圈厚度由中生代以前的~200 km减少至~80km(Menzies等, 1993; Griffin等, 1998). 太平洋板片的西向俯冲可能是导致岩石圈地幔减薄的主要动力学因素(Wu 等, 2005; Zhang 等, 2009; 郑永飞和吴福元, 2009; Xu Y G等, 2012; 朱日祥等, 2012). 岩石圈地幔底部在减薄之前应当经历了一定的弱化, 使其更容易与未被弱化的地幔岩石分离拆沉, 造成岩石圈地幔的减薄. 克拉通岩石圈地幔比软流圈地幔黏滞度高(Ji等, 2001), 不利于俯冲板片对其侵蚀. 然而Xia等(2013b)根据Griffin等(1998)提出的华北陆块减薄前岩石圈地幔40mW/m^{2}的热流值计算得到, 岩石圈地幔含水量很低(橄榄石含水量~1ppm, 全岩含水量约5ppm)的情况下, 其黏滞度约为软流圈地幔的4600倍. 然而当岩石圈地幔中橄榄石含水量升高至45ppm(全岩含水量约200ppm)和180ppm(全岩含水量约1000ppm)时, 其黏滞度大幅降低至仅有软流圈地幔的10倍和1倍左右. 假设中生代岩石圈地幔水含量与中生代玄武岩源区水含量相近(~1000ppm), 再加上俯冲板片熔融产生的熔体交代地幔, 造成其橄榄石含量降低以及软流圈地幔的烘烤, 岩石圈地幔底部强度会产生大幅度的降低, 随后俯冲太平洋板片对岩石圈地幔底部的剪切侵蚀造成地幔碎片不断被剥离, 从而导致岩石圈减薄(图8). 类似的, 北美怀俄明克拉通中科罗拉多高原岩石圈地幔因为受到俯冲Farallon板块析出的富水流体的交代, 其黏滞度可以降低至不含水岩石圈地幔黏滞度的约10%(Li等, 2008), 最终导致该处岩石圈厚度由>150km(Riter和Smith, 1996; Smith, 2000; Lee等, 2001; West等, 2004)减少至120~150km(West等, 2004).

6 结论

中国东部中生代和新生代岩石圈地幔包体含水量变化非常大, 不过总体上均低于世界上其他地区克拉通和非克拉通地幔含水量. 相对贫水的地幔包体可能既反映了上涌软流圈地幔对岩石圈地幔底部进行热烘烤造成的水的扩散丢失, 也反映了熔体提取对残留地幔岩石水含量的影响. 中国东部中生代和新生代玄武岩地幔源区水都高于新生地幔包体水含量. 由于这些岩石的地幔源区都是由俯冲地壳组分交代地幔形成的, 因此源区高的水含量应当归因于地壳组分的交代. 由玄武岩斑晶和幔源巨晶氢同位素组成推测出的中国东部岩石圈地幔氢同位素组成变化也非常大, 但均偏离亏损地幔值, 反映了岩石圈地幔氢同位素的高度不均一性. 西向俯冲到中国东部大陆之下的太平洋板片与大陆岩石圈地幔之间的相互作用不仅直接导致华北克拉通岩石圈地幔下部拆沉, 而且板片部分熔融所衍生的含水熔体交代古老和新生岩石圈地幔是导致地幔富水及氢同位素

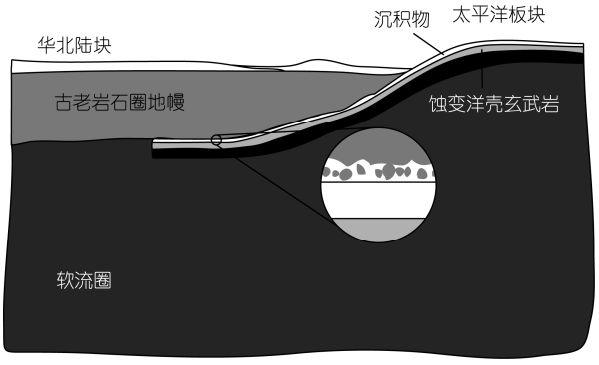


图 8 俯冲太平洋板片对华北陆块岩石圈地幔的侵蚀示意图

组成偏离亏损地幔值的主要原因. 地幔岩石水含量的升高可以引起岩石圈地幔黏滞度的大幅降低, 进而导致其强度的弱化, 这有利于俯冲板片或者上涌软流圈地幔对其侵蚀, 进而造成岩石圈减薄.

致谢 感谢南京大学杨晓志教授和另一位匿名审稿专家提出的建设性意见和建议.

参考文献

刘少辰, 夏群科. 2014. 太行山中南段早白垩世岩石圈地幔的水含量: 对华北陆块破坏的动力因素的制约. 科学通报, 59: 1280–1283

王蓉, 张保民. 2011. 华南地区新生代玄武岩中橄榄岩包体的含水性. 中国科学: 地球科学, 41: 832–844

夏群科, 陈道公, Deloule E, 支霞臣. 1998. 广东麒麟幔源角闪石巨晶的氢同位素组成及其指示意义. 科学通报, 43: 2214–2217

夏群科, 陈道公, Deloule E, 支霞臣. 1999. 幔源云母巨晶氢同位素组成的微尺度不均一性: 离子探针研究. 中国科学D辑: 地球科学, 29: 62–67

夏群科, 陈道公, 郭立鹤, 支霞臣, 吴元宝, 程昊. 2000a. 女山和盘石山橄榄岩包体中的水: 红外光谱研究. 地质科学, 35: 219–225

夏群科, 陈道公, Deloule E, 支霞臣, 程昊, 吴元保. 2000b. 异常的地幔氢同位素组成和极端的微尺度不均一性: 女山角闪石的离子探针分析. 科学通报, 45: 2327–2332

夏群科, 潘尤杰, 陈道公, Deloule E, 支霞臣, 程昊, 吴元保. 2001. 汉诺坝幔源单斜辉石巨晶氢同位素组成的离子探针分析: 微尺度不均一性. 岩石学报, 17: 7–10

夏群科, 邢凌波, 冯敏, 刘少辰, 杨晓志, 郝艳涛. 2010. 湖南宁远早侏罗世玄武岩中橄榄岩包体的含水性和元素地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 29: 113–124

杨贵才, 杨晓志, 郝艳涛, 夏群科. 2012. 大陆下地壳和岩石圈地幔含水性的差异——山东莒南玄武岩中深源包体的初步观察. 岩石矿物学杂志, 31: 691–700

赵起超, 夏群科, 刘少辰, 陈欢, 冯敏. 2015. 吉林汪清和龙岗新生代岩石圈地幔的含水性和元素地球化学特征. 地学前缘, 22: 360–373

张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 于桂香. 1995. 水-岩交换体系氢同位素动力分馏. 矿物岩石地球化学通讯, 15: 3–6

郑永飞, 吴福元. 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报, 54: 1945–1949

郑永飞, 陈伊翔, 戴立群, 赵子福. 2015. 发展板块构造理论: 从洋壳俯冲带到碰撞造山带. 中国科学: 地球科学, 45: 711–735

朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135–1159

Asimow P D, Dixon J E, Langmuir C H. 2004. A hydrous melting and fractionation model for mid-ocean ridge basalts: Application to the mid-atlantic ridge near the Azores. Geochem Geophy Geosy, 5: Q01E16

Aubaud C, Pineau F, Jambon A, Javoy M. 2004. Kinetic disequilibrium of C, He, Ar and carbon isotopes during degassing of mid-ocean ridge basalts. Earth Planet Sci Lett, 222: 391–406

Baptiste V, Tommasi A, Demouchy S. 2012. Deformation and hydration of the lithospheric mantle beneath the Kaapvaal craton, South Africa. Lithos, 149: 31–50

Bell D R, Rossman G R. 1992. Water in Earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals. Science, 255: 1391–1397

Bonadiman C, Hao Y T, Coltorti M, Dallai L, Faccini B, Huang Y, Xia Q K. 2009. Water contents of pyroxenes in intraplate lithospheric mantle. Eur J Mineral, 21: 637–647

Chacko T, Riciputi R, Cole R, Horita J. 1999. A new technique for determining equilibrium hydrogen isotope fractionation factors using the ion microprobe: Application to the epidote-water system. Geochim Cosmochim Acta, 63: 1–10

Chen H, Xia Q K, Ingrin J, Jia Z B, Feng M. 2015. Changing recycled oceanic components in the mantle source of the Shuangliao Cenozoic basalts, NE China: New constraints from water content. Tectonophysics, 650: 113–123

Chopra P N, Paterson M S. 1984. The role of water in the deformation of dunite. J Geophys Res, 89: 7861–7876

Chu Z Y, Wu F Y, Walker R J, Rudnick R L, Pitcher L, Puchtel I S, Yang Y H, Wilde S A. 2009. Temporal evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China craton. J Petrol, 50: 1857–1898

Danyushevsky L V, Eggins S M, Falloon T J, Christie D M. 2000. H_2O abundance in depleted to moderately enriched mid-ocean ridge magmas; Part I: Incompatible behaviour, implications for mantle storage, and origin of regional variations. J Petrol, 41: 1329–1364

Danyushevsky L V, Falloon T J, Sobolev A V, Crawford A J, Carroll M, Price R C. 1993. The H_2O content of basalt glasses from Southwest Pacific back-arc basins. Earth Planet Sci Lett, 117: 347–362

Demouchy S, Ishikawa A, Tommasi A, Alard O, Keshav S. 2015. Characterization of hydration in the mantle lithosphere: Peridotite xenoliths from the Ontong Java Plateau as an example. Lithos, 212–215: 189–201

Demouchy S, Jacobsen S D, Gaillard F, Stern C R. 2006. Rapid magma ascent recorded by water diffusion profiles in mantle olivine. Geology, 34: 429–432

Demouchy S, Mackwell S. 2003. Water diffusion in synthetic iron-free forsterite. Phys Chem Miner, 30: 486–494

Demouchy S, Mackwell S. 2006. Mechanisms of hydrogen incorporation and diffusion in iron-bearing olivine. Phys Chem Miner, 33: 347–355

Denis C M M, Demouchy S, Shaw C S J. 2013. Evidence of dehydration in peridotites from Eifel volcanic field and estimates

of the rate of magma ascent. J Volcanol Geoth Res, 258: 85–99

Dixon J E, Clague D A. 2001. Volatiles in basaltic glasses from Loihi Seamount, Hawaii: Evidence for a relatively dry plume component. J Petrol, 42: 627–654

Dixon J E, Clague D A, Wallace P, Poreda R. 1997. Volatiles in alkalic basalts form the North Arch volcanic field, Hawaii: Extensive degassing of deep submarine-erupted alkalic series lavas. J Petrol, 38: 911–939

Dixon J E, Dixon T H, Bell D R, Malservisi R. 2004. Lateral variation in upper mantle viscosity: Role of water. Earth Planet Sci Lett, 222: 451–467

Dixon J E, Leist L, Langmuir C, Schilling J G. 2002. Recycled dehydrated lithosphere observed in plume-influenced mid-ocean-ridge basalt. Nature, 420: 385–389

Dixon J E, Stolper E, Delaney J R. 1988. Infrared spectroscopic measurements of CO_2 and H_2O in Juan de Fuca Ridge basaltic glasses. Earth Planet Sci Lett, 90: 87–104

Dobson P, Skogby H, Rossman G. 1995. Water in boninite glass and coexisting orthopyroxene: Concentration and partitioning. Contrib Mineral Petrol, 118: 414–419

Dobson P F, Epstein S, Stolper E M. 1989. Hydrogen isotope fractionation between coexisting vapor and silicate glasses and melts at low pressure. Geochim Cosmochim Acta, 53: 2723–2730

Doucet L S, Peslier A H, Ionov D A, Brandon A D, Golovin A V, Goncharov A G, Ashchepkov I V. 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

Driesner T. 1997. The effect of pressure on deuterium-hydrogen fractionation in high-temperature water. Science, 277: 791–794

France-Lanord C, Sheppard S M F. 1992. Hydrogen isotope composition of porewaters and interlayer water in sediments from the central western Pacific, Leg 129. Proce Ocean Drilling Program-Sci Results, 129: 295–302

Gao S, Rudnick R L, Xu W L, Yuan H L, Liu Y S, Walker R J, Puchtel I S, Liu X, Huang H, Wang X R, Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China craton. Earth Planet Sci Lett, 270: 41–53

Gose J, Schmädicke E, Beran A. 2009. Water in enstatite from mid-atlantic ridge peridotite: Evidence for the water content of suboceanic mantle? Geology, 37: 543–546

Grant K, Ingrin J, Lorand J, Dumas P. 2007. Water partitioning between mantle minerals from peridotite xenoliths. Contrib Mineral Petrol, 154: 15–34

Green D H, Hibberson W O, Kovacs I, Rosenthal A. 2010. Water and its influence on the lithosphere-asthenosphere boundary. Nature, 467: 448–451

Griffin W L, Zhang A D, O'Reilly S Y, Ryan C G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M F, Chung S L, Lo C H, Lee T Y, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Wiley. 107–126

Grove T L, Till C B, Krawczynski M J. 2012. The role of H_2O in subduction zone magmatism. Annu Rev Earth Planet Sci, 40: 413–439

Hao Y T, Xia Q K, Liu S C, Feng M, Zhang Y P. 2012. Recognizing juvenile and relict lithospheric mantle beneath the North China craton: Combined analysis of H_2O, major and trace elements and Sr~Nd isotope compositions of clinopyroxenes. Lithos, 149: 136–145

Hao Y, Xia Q, Li Q, Chen H, Feng M. 2014. Partial melting control of water contents in the Cenozoic lithospheric mantle of the Cathaysia block of South China. Chem Geol, 380: 7–19

Hauri E. 2002. SIMS analysis of volatiles in silicate glasses, 2: Isotopes and abundances in Hawaiian melt inclusions. Chem Geol, 183: 115–141

Hauri E H, Gaetani G A, Green T H. 2006. Partitioning of water during melting of the Earth's upper mantle at H_2O-undersaturated conditions. Earth Planet Sci Lett, 248: 715–734

Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, McDermott F. 1993. Mantle and Slab Contributions in ARC Magmas. Annu Rev Earth Planet Sci, 21: 175–204

Hercule S, Ingrin J. 1999. Hydrogen in diopside; diffusion, kinetics of extraction-incorporation, and solubility. Am Mineral, 84: 1577–1587

Hesse K T, Gose J, Stalder R, Schmädicke E. 2015. Water in orthopyroxene from abyssal spinel peridotites of the East Pacific Rise(ODP Leg 147: Hess Deep). Lithos, 232: 23-34

Hirose K, Kawamoto T. 1995. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 GPa: The effect of H_2O on the genesis of basaltic magmas. Earth Planet Sci Lett, 133: 463–473

Hirschmann M M, Aubaud C, Withers A C. 2005. Storage capacity of H_2O in nominally anhydrous minerals in the upper mantle. Earth Planet Sci Lett, 236: 167–181

Hirth G, Kohlstedt D. 2004. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists. In: Eiler J, ed, Inside the Subduction Factory. Wiley. 83–105

Hirth G, Kohlstedt D L. 1996. Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 144: 93–108

Hochstaedter A G, Gill J B, Kusakabe M, Newman S, Pringle M, Taylor B, Fryer P. 1990. Volcanism in the Sumisu Rift .1. Major element, volatile, and stable isotope geochemistry. Earth Planet Sci Lett, 100: 179–194

Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. Earth Planet Sci Lett, 90: 297–314

Horibe Y, Craig H. 1995. D/H fractionation in the system methane-hydrogen-water. Geochim Cosmochim Acta, 59: 5209–5217

Horita J, Cole D R, Polyakov V B, Driesner T. 2002. Experimental and theoretical study of pressure effects on hydrogen isotope

fractionation in the system brucite-water at elevated temperatures. Geochim Cosmochim Acta, 66: 3769–3788

Hui H, Peslier A H, Rudnick R L, Simonetti A, Neal C R. 2015. Plume-cratonic lithosphere interaction recorded by water and other trace elements in peridotite xenoliths from the Labait volcano, Tanzania. Geochem Geophy Geosy, 16: 1687–1710

Humphreys E, Hessler E, Dueker K, Farmer G L, Erslev E, Atwater T. 2003. How Laramide-Age hydration of North American lithosphere by the farallon slab controlled subsequent activity in the Western United States. Int Geol Rev, 45: 575–595

Ingrin J, Hercule S, Charton T. 1995. Diffusion of hydrogen in diopside: Results of dehydration experiments. J Geophys Res, 100: 15489–15499

Inoue T. 1994. Effect of water on melting phase relations and melt composition in the system Mg_2SiO_4-$MgSiO_3$-H_2O up to 15 GPa. Phys Earth Planet Inter, 85: 237–263.

Jambon A. 1994. Earth degassing and large-scale geochemical cycling of volatile elements. Rev Mineral Geochem, 30: 479–517

Jamtveit B, Brooker R, Brooks K, Larsen L M, Pedersen T. 2001. The water content of olivines from the North Atlantic Volcanic Province. Earth Planet Sci Lett, 186: 401–415

Ji S, Wang Z, Wirth R. 2001. Bulk flow strength of forsterite~enstatite composites as a function of forsterite content. Tectonophysics, 341: 69–93

Karato S I, Wu P. 1993. Rheology of the upper mantle: A synthesis. Science, 260: 771–778

Kawamoto T, Holloway J R. 1997. Melting temperature and partial melt chemistry of H_2O-saturated mantle peridotite to 11 gigapascal. Science, 276: 240–243

Kawamoto T. 2004. Hydrous phase stability and partial melt chemistry of H_2O-saturated KLB-1 peridotite up to the uppermost lower mantle conditions. Phys Earth Planet Inter, 143–144: 387–395

Kent A J R, Rossman G R. 2002. Hydrogen, lithium, and boron in mantle-derived olivine: The role of coupled substitutions. Am Mineral, 87: 1432–1436

Kogiso T, Tatsumi Y, Nakano S. 1997. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. Earth Planet Sci Lett, 148: 193–205

Kohlstedt D L, Evans B, Mackwell S J. 1995. Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments. J Geophys Res, 100: 17587–17602

Kovács I, Green D H, Rosenthal A, Hermann J, O'neill H S C, Hibberson W O, Udvardi B. 2012. An experimental study of water in nominally anhydrous minerals in the upper mantle near the water-saturated solidus. J Petrol, 53: 2067–2093

Kurosawa M, Yurimoto H, Sueno S. 1997. Patterns in the hydrogen and trace element compositions of mantle olivines. Phys Chem Miner, 24: 385–395

Lécuyer C, O'Neil J R. 1994. Stable isotope compositions of fluid inclusions in biogenic carbonates. Geochim Cosmochim Acta, 58: 353–363

Lee C T, Yin Q, Rudnick R L, Jacobsen S B. 2001. Preservation of ancient and fertile lithospheric mantle beneath the southwestern United States. Nature, 411: 69–73

Lesne P, Scaillet B, Pichavant M, Iacono-Marziano G, Beny J M. 2011. The H_2O solubility of alkali basaltic melts: An experimental study. Contrib Mineral Petrol, 162: 133–151

Li P, Xia Q K, Deloule E, Chen H, Gu X Y, Feng M. 2015. Temporal variation of H_2O content in the lithospheric mantle beneath the eastern North China craton: Implications for the destruction of cratons. Gondwana Res, 28: 276–287

Li Z X A, Lee C T A, Peslier A H, Lenardic A, Mackwell S J. 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: B09210

Liu C Z, Liu Z C, Wu F Y, Chu Z Y. 2012a. Mesozoic accretion of juvenile sub-continental lithospheric mantle beneath South China and its implications: Geochemical and Re-Os isotopic results from Ningyuan mantle xenoliths. Chem Geol, 291: 186–198

Liu C Z, Wu F Y, Sun J, Chu Z Y, Qiu Z L. 2012b. The Xinchang peridotite xenoliths reveal mantle replacement and accretion in southeastern China. Lithos, 150: 171–187

Liu J, Xia Q K, Deloule E, Ingrin J, Chen H, Feng M. 2015. Water content and Oxygen isotopic composition of Alkali basalts from the Taihang Mountains, China: Recycled oceanic components in the mantle source. J Petrol, 56: 681–702

Mackwell S J, Kohlstedt D L. 1990. Diffusion of hydrogen in olivine: Implications for water in the mantle. J Geophys Res, 95: 5079–5088

McCulloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. Earth Planet Sci Lett, 102: 358–374

Mei S, Kohlstedt D L. 2000. Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates: 2. Dislocation creep regime. J Geophys Res, 105: 21471–21481

Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. Geol Soc Am Spec Pap, 76: 71–78

Michael P. 1995. Regionally distinctive sources of depleted MORB: Evidence from trace elements and H_2O. Earth Planet Sci Lett, 131: 301–320

Michael P J. 1988. The concentration, behavior and storage of H_2O in the suboceanic upper mantle: Implications for mantle metasomatism. Geochim Cosmochim Acta, 52: 555–566

Mosenfelder J L, Sharp T G, Asimow P D, Rossman G R. 2006. Hydrogen incorporation in natural mantle olivines. Earth's Deep Water Cycle. Wiley. 45–56

Nichols A R L, Carroll M R, Höskuldsson Á. 2002. Is the Iceland hot spot also wet? Evidence from the water contents of undegassed submarine and subglacial pillow basalts. Earth Planet Sci Lett, 202: 77–87

Peslier A H, Bizimis M. 2015. Water in Hawaiian peridotite minerals: A case for a dry metasomatized oceanic mantle lithosphere. Geochem Geophy Geosy, 16: 1211–1232

Peslier A H, Bizimis M, Matney M. 2015. Water disequilibrium in olivines from Hawaiian peridotites: Recent metasomatism, H diffusion and magma ascent rates. Geochim Cosmochim Acta, 154: 98–117

Peslier A H, Luhr J F. 2006. Hydrogen loss from olivines in mantle xenoliths from Simcoe (USA) and Mexico: Mafic alkalic magma ascent rates and water budget of the sub-continental lithosphere. Earth Planet Sci Lett, 242: 302–319

Peslier A H, Luhr J F, Post J. 2002. Low water contents in pyroxenes from spinel-peridotites of the oxidized, sub-arc mantle wedge. Earth Planet Sci Lett, 201: 69–86

Peslier A H, Woodland A B, Bell D R, Lazarov M. 2010. Olivine water contents in the continental lithosphere and the longevity of cratons. Nature, 467: 78–81

Peslier A H, Woodland A B, Wolff J A. 2008. Fast kimberlite ascent rates estimated from hydrogen diffusion profiles in xenolithic mantle olivines from southern Africa. Geochim Cosmochim Acta, 72: 2711–2722

Pineau F, Shilobreeva S, Kadik A, Javoy M. 1998. Water solubility and D/H fractionation in the system basaltic andesite-H_2O at 1250°C and between 0.5 and 3 kbars. Chem Geol, 147: 173–184

Princivalle F, De Min A, Lenaz D, Scarbolo M, Zanetti A. 2014. Ultramafic xenoliths from Damaping(Hannuoba region, NE-China): Petrogenetic implications from crystal chemistry of pyroxenes, olivine and Cr-spinel and trace element content of clinopyroxene. Lithos, 188: 3–14

Ringwood A E. 1990. Slab-mantle interactions: 3. Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. Chem Geol, 82: 187–207

Riter J C A, Smith D. 1996. Xenolith constraints on the thermal history of the mantle below the Colorado Plateau. Geology, 24: 267–270

Rüpke L H, Morgan J P, Hort M, Connolly J A D. 2002. Are the regional variations in Central American arc lavas due to differing basaltic versus peridotitic slab sources of fluids? Geology, 30: 1035–1038

Saal A E, Hauri E H, Langmuir C H, Perfit M R. 2002. Vapour undersaturation in primitive mid-ocean-ridge basalt and the volatile content of Earth's upper mantle. Nature, 419: 451–455

Sakuyama T, Tian W, Kimura J I, Fukao Y, Hirahara Y, Takahashi T, Senda R, Chang Q, Miyazaki T, Obayashi M, Kawabata H, Tatsumi Y. 2013. Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China. Chem Geol, 359: 32–48

Salters V J M, Stracke A. 2004. Composition of the depleted mantle. Geochem Geophy Geosy, 5: Q05B07

Schmädicke E, Gose J, Witt-Eickschen G, Brätz H. 2013. Olivine from spinel peridotite xenoliths: Hydroxyl incorporation and mineral composition. Am Mineral, 98: 1870–1880

Schmidt M W, Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. Earth Planet Sci Lett, 163: 361–379

Seaman C, Sherman S B, Garcia M O, Baker M B, Balta B, Stolper E. 2004. Volatiles in glasses from the HSDP2 drill core. Geochem Geophy Geosy, 5: Q09G16

Shaw A M, Hauri E H, Behn M D, Hilton D R, Macpherson C G, Sinton J M. 2012. Long-term preservation of slab signatures in the mantle inferred from hydrogen isotopes. Nat Geosci, 5: 224–228

Shaw A M, Hauri E H, Fischer T P, Hilton D R, Kelley K A. 2008. Hydrogen isotopes in Mariana arc melt inclusions: Implications for subduction dehydration and the deep-Earth water cycle. Earth Planet Sci Lett, 275: 138–145

Shilobreeva S, Martinez I, Busigny V, Agrinier P, Laverne C. 2011. Insights into C and H storage in the altered oceanic crust: Results from ODP/IODP Hole 1256D. Geochim Cosmochim Acta, 75: 2237–2255

Simons K, Dixon J, Schilling J G, Kingsley R, Poreda R. 2002. Volatiles in basaltic glasses from the Easter-Salas y Gomez Seamount Chain and easter microplate: Implications for geochemical cycling of volatile elements. Geochem Geophy Geosy, 3: 1039

Sisson T W, Layne G D. 1993. H_2O in basalt and basaltic andesite glass inclusions from four subduction-related volcanoes. Earth Planet Sci Lett, 117: 619–635

Smith D. 2000. Insights into the evolution of the uppermost continental mantle from xenolith localities on and near the Colorado Plateau and regional comparisons. J Geophys Res, 105: 16769–16781

Sobolev A V, Chaussidon M. 1996. H_2O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: Implications for H_2O storage and recycling in the mantle. Earth Planet Sci Lett, 137: 45–55

Spandler C, Pirard C. 2013. Element recycling from subducting slabs to arc crust: A review. Lithos, 170–171: 208–223

Stalder R, Behrens H. 2006. D/H exchange in pure and Cr-doped enstatite: Implications for hydrogen diffusivity. Phys Chem Miner, 33: 601–611

Stalder R, Purwin H, Skogby H. 2007. Influence of Fe on hydrogen diffusivity in orthopyroxene. Eur J Mineral, 19: 899–903

Stalder R, Skogby H. 2003. Hydrogen diffusion in natural and synthetic orthopyroxene. Phys Chem Miner, 30: 12–19

Stalder R, Skogby H. 2007. Dehydration mechanisms in synthetic

Fe-bearing enstatite. Eur J Mineral, 19: 201–216
Stern R J. 2002. Subduction Zones. Rev Geophys, 40: 1012
Stolper E, Newman S. 1994. The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas. Earth Planet Sci Lett, 121: 293–325
Sundvall R, Skogby H, Stalder R. 2009. Hydrogen diffusion in synthetic Fe-free diopside. Eur J Mineral, 21: 963–970
Tang Y J, Zhang H F, Ying J F, Zhang J, Liu X M. 2008. Refertilization of ancient lithospheric mantle beneath the central North China Ccraton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. Lithos, 101: 435–452
Tang Y J, Zhang H F, Nakamura E, Ying J F. 2011. Multistage melt/fluid-peridotite interactions in the refertilized lithospheric mantle beneath the North China craton: Constraints from the Li-Sr-Nd isotopic disequilibrium between minerals of peridotite xenoliths. Contrib Mineral Petrol, 161: 845–861
Taran Y A, Pokrovsky B G, Volynets O N. 1997. Hydrogen isotopes in hornblendes and biotites from quaternary volcanic rocks of the Kamchatka-Kurile arc. Geochem J, 31: 203–221
Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles; isotopic variation of C, H, and S. Rev Mineral Geochem, 16: 185–225
Tenner T, Hirschmann M, Withers A, Ardia P. 2012. H_2O storage capacity of olivine and low-Ca pyroxene from 10 to 13 GPa: Consequences for dehydration melting above the transition zone. Contrib Mineral Petrol, 163: 297–316
Tenner T J, Hirschmann M M, Withers A C, Hervig R L. 2009. Hydrogen partitioning between nominally anhydrous upper mantle minerals and melt between 3 and 5 GPa and applications to hydrous peridotite partial melting. Chem Geol, 262: 42–56
van Keken P E, Hacker B R, Syracuse E M, Abers G A. 2011. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H_2O from subducting slabs worldwide. J Geophys Res, 116: B01401
Wade J A, Plank T, Hauri E H, Kelley K A, Roggensack K, Zimmer M. 2008. Prediction of magmatic water contents via measurement of H_2O in clinopyroxene phenocrysts. Geology, 36: 799–802
Wallace P J, Anderson Jr A T. 1998. Effects of eruption and lava drainback on the H_2O contents of basaltic magmas at Kilauea Volcano. B Volcanol, 59: 327–344
Wallace P J. 2005. Volatiles in subduction zone magmas: Concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. J Volcanol Geoth Res, 140: 217–240
Walowski K J, Wallace P J, Hauri E H, Wada I, Clynne M A. 2015. Slab melting beneath the Cascade Arc driven by dehydration of altered oceanic peridotite. Nat Geosci, 8: 404–408
Wang Q, Bagdassarov N, Xia Q K, Zhu B. 2014. Water contents and electrical conductivity of peridotite xenoliths from the North China craton: Implications for water distribution in the upper mantle. Lithos, 189: 105–126
Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F, Zhang J J. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China. Lithos, 125: 940–955
Warren J M, Hauri E H. 2014. Pyroxenes as tracers of mantle water variations. J Geophys Res, 119: 1851–1881
West M, Ni J, Baldridge W S, Wilson D, Aster R, Gao W, Grand S. 2004. Crust and upper mantle shear wave structure of the southwest United States: Implications for rifting and support for high elevation. J Geophys Res, 109: B03309
Woods S C, Mackwell S, Dyar D. 2000. Hydrogen in diopside: Diffusion profiles. Am Mineral, 85: 480–487
Workman R K, Hart S R. 2005. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). Earth Planet Sci Lett, 231: 53–72
Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O, Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth Planet Sci Lett, 233: 103–119
Xia Q K, Dallai L, Deloule E. 2004. Oxygen and hydrogen isotope heterogeneity of clinopyroxene megacrysts from Nushan Volcano, SE China. Chem Geol, 209: 137–151
Xia Q K, Hao Y T, Li P, Deloule E, Coltorti M, Dallai L, Yang X Z, Feng M. 2010. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China craton. J Geophys Res, 115: B07207
Xia Q K, Hao Y T, Liu S C, Gu X Y, Feng M. 2013a. Water contents of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the western part of the North China craton: Peridotite xenolith constraints. Gondwana Res, 23: 108–118
Xia Q K, Liu J, Liu S C, Kovács I, Feng M, Dang L. 2013b. 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: 85–97
Xiao Y, Zhang H F, Fan W M, Ying J F, Zhang J, Zhao X M, Su B X. 2010. Evolution of lithospheric mantle beneath the Tan-Lu fault zone, eastern North China craton: Evidence from petrology and geochemistry of peridotite xenoliths. Lithos, 117: 229–246
Xu X, O'Reilly S Y, Zhou X, Griffin W L. 1996. A xenolith-derived geotherm and the crust-mantle boundary at Qilin, southeastern China. Lithos, 38: 41–62
Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M. 2000. Genesis of Young Lithospheric Mantle in Southeastern China: An LAM-ICPMS Trace Element Study. J Petrol, 41: 111–148
Xu Y G. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90~40 Ma basalts in North and Northeast China: Evidence, provenance and significance. Geochim Cosmochim Acta, 143: 49–67
Xu Y G, Sun M, Yan W, Liu Y, Huang X L, Chen X M. 2002. Xenolith evidence for polybaric melting and stratification of the upper mantle beneath South China. J Asian Earth Sci, 20: 937–954
Xu Y G, Zhang H H, Qiu H N, Ge W C, Wu F Y. 2012. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the mantle transition zone? Chem Geol, 328: 168–184

Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. Lithos, 146–147: 202–217

Xu Z, Zheng Y F, Zhao Z F, Gong B. 2014. The hydrous properties of subcontinental lithospheric mantle: Constraints from water content and hydrogen isotope composition of phenocrysts from Cenozoic continental basalt in North China. Geochim Cosmochim Acta, 143: 285–302

Yang X Z, Xia Q K, Deloule E, Dallai L, Fan Q C, Feng M. 2008. Water in minerals of the continental lithospheric mantle and overlying lower crust: A comparative study of peridotite and granulite xenoliths from the North China craton. Chem Geol, 256: 33–45

Ying J F, Zhang H F, Kita N, Morishita Y, Shimoda G. 2006. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jünan, Shandong Province, China. Earth Planet Sci Lett, 244: 622–638

Yu J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, Xu X, Zhang M, Zhou X. 2003. The thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the Leizhou Peninsula, South China. J Volcanol Geoth Res, 122: 165–189

Yu J H, O'Reilly S Y, Zhang M, Griffin W L, Xu X. 2006. Roles of Melting and Metasomatism in the Formation of the Lithospheric Mantle beneath the Leizhou Peninsula, South China. J Petrol, 47: 355–383

Yu Y, Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, Xia Q K. 2011. H_2O contents and their modification in the Cenozoic subcontinental lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. Lithos, 126: 182–197

Zhang H F, Sun M, Lu F X, Zhou X H, Zhou M F, Liu Y S, Zhang G-H. 2001. Geochemical significance of a garnet lherzolite from the Dahongshan kimberlite, Yangtze Craton, southern China. Geochem J, 35: 315–331

Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. Contrib Mineral Petrol, 144: 241–253

Zhang H F, Goldstein S, Zhou X H, Sun M, Zheng J P, Cai Y. 2008. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re-Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts. Contrib Mineral Petrol, 155: 271–293

Zhang J, Zhang H F, Kita N, Shimoda G, Morishita Y, Ying J F, Tang Y J. 2011. Secular evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern North China craton: Evidence from peridotitic xenoliths from Late Cretaceous mafic rocks in the Jiaodong region, east-central China. Int Geol Rev, 53: 182–211

Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. Lithos, 110: 305–326

Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yang J S, Zhang R Y. 2006. A refractory mantle protolith in younger continental crust, east-central China: Age and composition of zircon in the Sulu ultrahigh-pressure peridotite. Geology, 34: 705–708

Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhang M, Lu F, Liu G. 2004. Nature and evolution of Mesozoic-Cenozoic lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. Lithos, 74: 41–65

Zheng J P, Lee C T A, Lu J G, Zhao J H, Wu Y B, Xia B, Li X Y, Zhang J F, Liu Y S. 2015. Refertilization-driven destabilization of subcontinental mantle and the importance of initial lithospheric thickness for the fate of continents. Earth Planet Sci Lett, 409: 225–231

Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Lu F X, Zhang M, Pearson N J. 2001. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. Lithos, 57: 43–66

Zheng J P, Sun M, Zhou M F, Robinson P. 2005. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China craton. Geochim Cosmochim Acta, 69: 3401–3418

Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Yu C M, Zhang H F, Pearson N, Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. Geochim Cosmochim Acta, 71: 5203–5225

Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 328: 5–48

Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China. Gondwana Res, 23: 1189–1206

Zheng Y F, Hermann J. 2014. Geochemistry of continental subduction-zone fluids. Earth, Planets Space, 66: 93

Zhou X, Armstrong R L. 1982. Cenozoic volcanic rocks of eastern China—Secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. Earth Planet Sci Lett, 58: 301–329

Zhou X, Zhu B, Liu R, Chen W. 1988. Cenozoic basaltic rocks in Eastern China. Continental Flood Basalts. 311–330

Zou H B, Zindler A, Xu X S, Qi Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations, and tectonic significance. Chem Geol, 171: 33–47