

## 编者按

克拉通(源于希腊语 Kratons,意为“强度”)是地球上最古老的大陆地壳,缺乏明显的火山活动和大地震,传统上被认为是稳定的。然而,位于我国境内的华北克拉通却并非如此,其形成于18亿年前,此后进入长期稳定的演化阶段,直到2亿年前,华北克拉通东部发生了大规模的火山活动和大地震,丧失了原有的稳定性。克拉通为什么会失去稳定性?这是经典板块构造理论无法解释的地质现象。针对这一难题,国家自然科学基金委员会2007年启动了“华北克拉通破坏”重大研究计划。

该重大研究计划以“克拉通”为核心科学问题,以观测和实验获取原始资料为先导,以地质构造、地球物理、岩石地化、实验模拟、资源环境灾害、学

科集成和战略研究为布局,对华北克拉通开展了地质、地球物理和地球化学多学科综合研究。中国科学家认识到大规模的岩浆活动和构造变形只是华北克拉通演化过程中的表现形式,其本质是深部岩石圈的物质组成与物理化学性质发生了根本性转变,导致克拉通固有的稳定性遭到破坏,由此提出了“克拉通破坏”新概念。同时,他们在揭示华北克拉通破坏的时空范围和动力学机制的基础上,建立了“克拉通破坏”理论体系,使华北克拉通破坏成为全球研究热点,提升了我国固体地球科学研究的国际地位。

本期基金版将总结该重大研究计划取得的经验和突破性进展。



该重大研究计划项目负责人孟庆任(左一)、专家组副组长张国伟(中)与专家组组长朱日祥在华北克拉通考察。

# “华北克拉通破坏”重大研究计划 有力提升我国固体地球科学国际地位

## 解决百年难题

大陆是人类生存和资源能源供给的主要场所,认识大陆演化不仅是地质学最基本的科学问题,更是解决人类生存与发展的根本所在。几十年来,人们对大陆的认识逐渐深入。上世纪60年代发展起来的板块构造理论是当今地球科学的基石,它是在“大陆漂移说”和“海底扩张说”的基础上提出来的,将人类的视野从局部拓展到全球。

板块构造理论成功地解释了大洋板块的形成与消亡、大陆漂移以及板块边缘为何会发生地震、岩浆活动和地壳变形等相关问题,却无法解释大陆内部发生的一系列地质现象。大陆由造山带与克拉通组成,其中克拉通占大陆面积的50%以上,保存了地球上最完整的地质记录。因此,要充分了解大陆内部的地质现象,则必须从克拉通入手。

与全球其他克拉通相比,位于我国境内的华北克拉通有独特的性质,吸引了全球地质学家的关注——它失去了稳定性,这被视为全球重大地质事件之一。

中科院院士、中科院地质与地球物理研究所研究员朱日祥向《中国科学报》记者介绍,除了少数来自地球深部的岩浆活动外,克拉通基本不发生岩石圈或地壳内部的构造变形、大规模岩浆活动和大地震。

然而,华北克拉通中生代以来不仅发生了大规模的构造变形和岩浆活动,还发生了一系列大地震,如1966年邢台地震、1975年海城地震、1976年唐山地震等。

早在20世纪初,地质学家翁文灏根据我国东部晚中生代构造—岩浆活动情况,提出了“燕山运动”的概念。随后,地质学家陈国达提出了“地壳活化”的观点。到上世纪90年代,中外学

## 大洋板块俯冲：克拉通破坏的驱动力

上世纪初起至90年代,经过几代科学家的努力,华北克拉通破坏已取得共识,但是,华北克拉通稳定性丧失的时空范围和动力学机制一直困扰着地球科学家。

在国家自然科学基金委员会“华北克拉通破坏”重大研究计划的资助下,多个研究团队围绕这一问题开展了系统工作,发现西太平洋板块俯冲导致了华北克拉通东部破坏,被列为该重大研究计划的重要成果之一。那么,这一发现的证据有哪些?破坏机制如何?是否具有全球意义?

该重大研究计划科学家、中科院院士徐义刚表示,这一成果来自于多个学科研究成果的综合。浅部构造地质方面的研究表明,华北克拉通东部在破坏期间拉仲方向发生了有规律的顺时针转变。这一变化规律与太平洋洋板块运动方向的变化相吻合。“这指示西太平洋板块俯冲控制着岩石圈拉张和克拉通破坏的进程。”徐义刚告诉《中国科学报》记者。

同时,对东亚大陆边缘晚中生代岩浆岩时空迁移规律的研究还发现,距今180百万年至140百万年,岩浆活动从海沟向内陆迁移,而自140百万年起,岩浆活动自内陆向海沟方向迁移。徐义刚指出,这两期岩浆活动分别代表了西太平洋板块前进俯冲和后退的响应。而西太平洋板块后退的时间与华北克拉通破坏的时间相吻合,再次说明西太平洋板块俯冲对华北克拉通破坏的控制。

对于克拉通的破坏机制,徐义刚表示:“这要从东亚大地幔楔结构说起。”全球地震层析成像显示,西太平洋板块沿日本—伊豆—小笠原—马里亚纳海沟向西向亚洲大陆俯冲,该俯冲并没有穿过地幔过渡带进入下地幔,而是平躺在地幔过渡带中,该平躺滞留大洋板块之上的上地幔被称为大地幔楔。由于在地幔过渡带形成滞留板块需要海沟的后撤,因此根据西太平洋板块后退的时间可以大致限定东亚大地幔楔的形成时间与华北克拉通破坏的峰期相当。

进一步的研究发现,东亚大地幔楔是一个规模巨大的碳库和水库,并含有大量再循环洋壳组分。中国东部这样的板内环境下的上地幔楔与岛弧环境下地幔楔差不多的含水量,这在世界上并不多见,很可能与滞留在地幔过渡带的太平洋俯冲板块的脱水和脱碳有关。西太平洋板块俯冲过程中释放大量水和碳酸盐熔体,引发大地幔楔发生部分熔融,促进深部流体向浅部岩石圈地幔的运移,从而导致华北克拉通岩石圈地幔的强烈水化和东部地幔对流系统失稳,上覆岩石圈被交代—熔融—弱化,最终导致岩石圈的减薄和克拉通的破坏。



中外科学家正在开展野外调查。

那么,这一发现的证据有哪些?破坏机制如何?是否具有全球意义?

该重大研究计划科学家、中科院院士徐义刚表示,这一成果来自于多个学科研究成果的综合。浅部构造地质方面的研究表明,华北克拉通东部在破坏期间拉仲方向发生了有规律的顺时针转变。这一变化规律与太平洋洋板块运动方向的变化相吻合。“这指示西太平洋板块俯冲控制着岩石圈拉张和克拉通破坏的进程。”徐义刚告诉《中国科学报》记者。

同时,对东亚大陆边缘晚中生代岩浆岩时空迁移规律的研究还发现,距今180百万年至140百万年,岩浆活动从海沟向内陆迁移,而自140百万年起,岩浆活动自内陆向海沟方向迁移。徐义刚指出,这两期岩浆活动分别代表了西太平洋板块前进俯冲和后退的响应。而西太平洋板块后退的时间与华北克拉通破坏的时间相吻合,再次说明西太平洋板块俯冲对华北克拉通破坏的控制。

对于克拉通的破坏机制,徐义刚表示:“这要从东亚大地幔楔结构说起。”全球地震层析成像显示,西太平洋板块沿日本—伊豆—小笠原—马里亚纳海沟向西向亚洲大陆俯冲,该俯冲并没有穿过地幔过渡带进入下地幔,而是平躺在地幔过渡带中,该平躺滞留大洋板块之上的上地幔被称为大地幔楔。由于在地幔过渡带形成滞留板块需要海沟的后撤,因此根据西太平洋板块后退的时间可以大致限定东亚大地幔楔的形成时间与华北克拉通破坏的峰期相当。

进一步的研究发现,东亚大地幔楔是一个规模巨大的碳库和水库,并含有大量再循环洋壳组分。中国东部这样的板内环境下的上地幔楔与岛弧环境下地幔楔差不多的含水量,这在世界上并不多见,很可能与滞留在地幔过渡带的太平洋俯冲板块的脱水和脱碳有关。西太平洋板块俯冲过程中释放大量水和碳酸盐熔体,引发大地幔楔发生部分熔融,促进深部流体向浅部岩石圈地幔的运移,从而导致华北克拉通岩石圈地幔的强烈水化和东部地幔对流系统失稳,上覆岩石圈被交代—熔融—弱化,最终导致岩石圈的减薄和克拉通的破坏。

最后,徐义刚总结道,早白垩世古太平洋板块俯冲作用是导致华北克拉通破坏的一级外部控制因素和驱动力。西太平洋板块俯冲过程在东亚形成的大地幔楔构造为克拉通岩石圈的改造和破坏提供了重要的深部背景。这种独特的深部构造在全球动力系统中的作用值得在今后研究中加以重视。

## 「湿」地幔为克拉通破坏创造前提条件

橄榄石、辉石和石榴石等矿物是地幔中的主要物质,它们的晶体结构中存在“水”。尽管这些“水”并不是游离存在,含量也不高,但是能显著地影响矿物的许多物理性质,例如黏滞度、电导率、弹性模量等,它们的含量和分布在很大程度上影响了大陆的稳定性与动力学过程。

在国家自然科学基金重大研究计划“华北克拉通破坏”的资助下,科学家们通过了解地幔内水的含量、分布和演化,理解克拉通破坏的机制和过程。

浙江大学地球科学学院教授夏群科告诉《中国科学报》记者,其中,岩石圈地幔的黏滞度是最重要的因素。已有大量研究显示,微量水能显著降低橄榄石、辉石等矿物的黏滞度。

例如,长期稳定的南非克拉通与低水含量有关,而正在减薄的科罗拉多高原岩石圈则具有高水含量。

因此,夏群科带领研究团队着眼于克拉通破坏与再稳定是否与水相关这一科学问题,开展了深入研究。他们对早白垩世、晚白垩世及新生代三个不同时期的岩石圈样品进行分析发现,早白垩世时的华北克拉通岩石圈富水。特别是地幔底部橄榄石的含水量为180ppm(百万分比浓度),黏滞度已经接近于软流圈。

由于早白垩世是华北克拉通破坏的峰期阶段,因此这一结果验证了多年来学界的推测,即稳定的克拉通之所以能够被破坏,是与其被强烈水化导致的强度显著降低密切相关的。

华北新生代岩石圈地幔的水含量很低,其对应的黏滞度已远高于软流圈,这表明华北克拉通岩石圈地幔在新生代是由于处于相对“干”的状态而得以稳定。

而对华北晚白垩世3个产地(青岛劈石口、山东莒南、胶州大西庄)橄榄岩的分析表明,晚白垩世岩石圈地幔相比于早白垩世岩石圈地幔含水量明显降低,介于早白垩世和新生代之间,具有过渡特征。这一现象被研究者解释为,克拉通破坏进行时,岩石圈地幔中的水由于软流圈热流持续的热烘烤而持续逸失,含水量不断降低,到了新生代,低水含量造成的高强度使得岩石圈不再被扰动,对应了克拉通破坏的结束。

一系列分析和反演结果表明,高水含量导致的黏滞度大幅降低为克拉通破坏创造了前提条件,而低水含量导致的黏滞度大幅升高则意味着大陆的稳定,从破坏状态到重新进入稳定状态对应着水含量的逐渐降低。



夏群科(左一)团队成员野外采集岩石圈样品。

因此,夏群科带领研究团队着眼于克拉通破坏与再稳定是否与水相关这一科学问题,开展了深入研究。他们对早白垩世、晚白垩世及新生代三个不同时期的岩石圈样品进行分析发现,早白垩世时的华北克拉通岩石圈富水。特别是地幔底部橄榄石的含水量为180ppm(百万分比浓度),黏滞度已经接近于软流圈。

由于早白垩世是华北克拉通破坏的峰期阶段,因此这一结果验证了多年来学界的推测,即稳定的克拉通之所以能够被破坏,是与其被强烈水化导致的强度显著降低密切相关的。

华北新生代岩石圈地幔的水含量很低,其对应的黏滞度已远高于软流圈,这表明华北克拉通岩石圈地幔在新生代是由于处于相对“干”的状态而得以稳定。

而对华北晚白垩世3个产地(青岛劈石口、山东莒南、胶州大西庄)橄榄岩的分析表明,晚白垩世岩石圈地幔相比于早白垩世岩石圈地幔含水量明显降低,介于早白垩世和新生代之间,具有过渡特征。这一现象被研究者解释为,克拉通破坏进行时,岩石圈地幔中的水由于软流圈热流持续的热烘烤而持续逸失,含水量不断降低,到了新生代,低水含量造成的高强度使得岩石圈不再被扰动,对应了克拉通破坏的结束。

一系列分析和反演结果表明,高水含量导致的黏滞度大幅降低为克拉通破坏创造了前提条件,而低水含量导致的黏滞度大幅升高则意味着大陆的稳定,从破坏状态到重新进入稳定状态对应着水含量的逐渐降低。

## 地震学探明华北克拉通破坏空间分布

华北克拉通破坏的空间分布,是深入研究该破坏作用动力学过程和机制的重要依据。而探索华北克拉通破坏的空间分布,必须深入了解华北及邻区的地壳、上地幔结构。地震学探测是获取这些结构信息最直接有效的手段。

在国家自然科学基金委员会“华北克拉通破坏”重大研究计划的资助下,中国科学院地质与地球物理研究所、中国地震局地球物理研究所、北京大学等的科研团队,对华北地区开展了大规模天然源和人工源地震探测研究。他们在整个华北克拉通及周缘共布设688个宽频带流动地震台站,组成8条线性观测台阵(总长6500km)和两个二维观测台阵,并完成了3条长观测距人工源地震宽角反射/折射观测剖面(3650km)和2条气枪源OBS深地震海沟联合观测剖面(860km)。

该重大研究计划在科学问题引导下的深部探测,已成为大陆深部结构研究的国际典范。

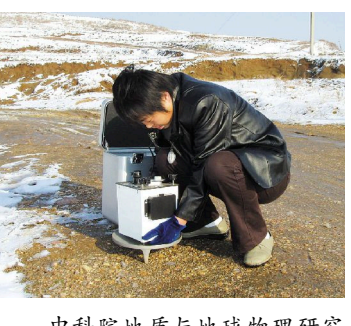
基于上述密集地震观测数据,发展和应用高精度地震成像新方法,科研人员获得了华北地区地壳和上地幔结构及变形等的详细信息。

研究结果显示,华北克拉通地壳与岩石圈地幔结构和性质存在显著东西差异。东部地壳普遍分布着薄的地壳(<35公里)和岩石圈(60-100公里),且变形较强,明显不同于典型克拉通型岩石圈结构。

研究人员表示,这与该地区岩石圈地幔年轻、易熔的特征和岩浆岩的广泛分布相符合,表明克拉通东部经历了岩石圈的强烈破坏;西部地壳主体较厚(厚约45公里)和岩石圈(厚达150-200公里)相对较厚、变形弱,具有典型克拉通的结构特征。同时,结合其缺乏岩浆、地震活动等地质特征,反映出西部主体仍保持克拉通整体稳定的属性,中部地壳和岩石圈厚度及结构都表现为强烈的横向非均匀性,这与该地区经历了复杂的局部改造过程相对应。

在研究人员看来,这些新的地震学成像研究结果从深部观测角度约束了华北克拉通破坏的空间分布,并证明克拉通破坏具有明显的空间差异性。

通过对不同区域、不同尺度和采用不同方法获得的地震成像结果进行整合,研究人员进一步建立了“华北地区地壳—上地幔地震波速结构模型”,简称华北结构模型(VMNC),目前已正式发布了2.0版本(VMNC v2.0)。这一模型和相应数据库的建立是“华北克拉通破坏”重大研究计划的学科集成成果,为深入研究中国大陆演化提供了基础数据。



中科院地质与地球物理研究所研究员凌波在野外安装地震仪。

该重大研究计划在科学问题引导下的深部探测,已成为大陆深部结构研究的国际典范。

基于上述密集地震观测数据,发展和应用高精度地震成像新方法,科研人员获得了华北地区地壳和上地幔结构及变形等的详细信息。

研究结果显示,华北克拉通地壳与岩石圈地幔结构和性质存在显著东西差异。东部地壳普遍分布着薄的地壳(<35公里)和岩石圈(60-100公里),且变形较强,明显不同于典型克拉通型岩石圈结构。

研究人员表示,这与该地区岩石圈地幔年轻、易熔的特征和岩浆岩的广泛分布相符合,表明克拉通东部经历了岩石圈的强烈破坏;西部地壳主体较厚(厚约45公里)和岩石圈(厚达150-200公里)相对较厚、变形弱,具有典型克拉通的结构特征。同时,结合其缺乏岩浆、地震活动等地质特征,反映出西部主体仍保持克拉通整体稳定的属性,中部地壳和岩石圈厚度及结构都表现为强烈的横向非均匀性,这与该地区经历了复杂的局部改造过程相对应。

在研究人员看来,这些新的地震学成像研究结果从深部观测角度约束了华北克拉通破坏的空间分布,并证明克拉通破坏具有明显的空间差异性。

通过对不同区域、不同尺度和采用不同方法获得的地震成像结果进行整合,研究人员进一步建立了“华北地区地壳—上地幔地震波速结构模型”,简称华北结构模型(VMNC),目前已正式发布了2.0版本(VMNC v2.0)。这一模型和相应数据库的建立是“华北克拉通破坏”重大研究计划的学科集成成果,为深入研究中国大陆演化提供了基础数据。