

华北克拉通破坏： 藏于大地深处的故事

地球是太阳系唯一具有板块运动的活跃行星。板块的演化，决定了火山、地震、地形地貌、矿产分布等种种现象。不过，经典的板块构造理论在解释大陆板块的演化时力有不逮，是一场尚未完成的科学革命。我国华北地区的大陆板块经历了从稳定克拉通到克拉通破坏的转变，是破解大陆演化之谜的钥匙。中国科学院院士朱日祥与合作者们总结了华北克拉通破坏的各种证据，提出了克拉通破坏的机制，为构筑大陆演化新理论打下了基础，并以此荣获 2020 年度陈嘉庚科学奖地球科学奖。

撰文 / 朱日祥

地球是太阳系中最具活力的一员，在持续的变动中度过了 46 亿年。今天，地球科学家们从各种角度探测人类赖以生存的地球，不断寻找她为何如此活跃的奥秘。目前，板块构造理论是关于地球运动最受认可的学说。大陆漂移假说和海底扩张模型启蒙了板块构造理论，海底磁异常条带为板块构造理论提供了最有力的观测证据。然而，从海底扩张到海洋板块俯冲这历时数亿年的大洋地壳循环，只是地球漫长演化史中的一个片段。

板块构造理论的核心有两点：一是认识到地球表面是由大洋板块和大陆板块构成，二是解释了大洋板块的形成与消亡以及大陆随之漂移的过程。然而令人遗憾的是，经典的板块构造理论无法解释大陆的演化，比如大陆改造或破坏、大陆增生和陆内成矿等基本问题。大陆虽然仅占地球表面的 1/3，却是人类主要的生存和资源能源供给场所。认识大陆演化不仅可以回答地球科学最基本的科学问题，还将有助于解决国家资源能源重大需求，并帮助人类更好地生存与发展。

古老大陆也在演化

大陆主要由“克拉通”和“造山带”^{*}组成，其中克拉通占大陆表面积的 50% 以上。那么，什么是克拉通呢？它是由英文“craton”直译而来的地球科学术语，源自于希腊语中“力量”(κράτος)一词。其含义为“地球上最古老的陆地板块，缺乏明显的火山活动或大地震的大陆”。克拉通又可进一步分为古老的基岩暴露在地表的“地盾”，以及基岩上覆盖着沉积岩的“地台”。

克拉通之所以能够得到大家的关注，是因为它有 3 个显著特点：形成时代老，通常年龄大于 25 亿年；具有厚达



朱日祥

本科毕业于山西大学物理系，于中国科学院地球物理研究所获硕士学位，于中国科学院地质研究所获博士学位，法国奥尔良大学荣誉博士。中国科学院院士，第三世界科学院院士，美国地球物理联合会会士。

长期从事地球科学基础理论和实验研究。在地磁极性倒转、地磁场与地球深部过程相关性、克拉通破坏以及全球构造等领域

取得了富有创新的成果。曾获首届法国科学院“法中奖”、第三世界科学院首届地球科学奖、中国科学院杰出科技成就奖、国家自然科学二等奖、何梁何利科技进步奖。因华北克拉通破坏的研究荣获 2020 年度陈嘉庚科学奖。

200 千米的岩石圈（由地壳和地幔顶部岩石共同组成），构造稳定，缺乏明显的火山活动和大地震；保存有地球上最完整的地质记录（最古老的矿物可以追溯到 44 亿年前）。因为这些特点，克拉通研究被认为是认识大陆演化的核心。传统理论认为，克拉通是稳定的。克拉通之所以能够长期稳定存在，主要是因为它有一个巨厚而且刚性的“岩石圈根”，即位于克拉通地壳之下的古老岩石圈地幔。

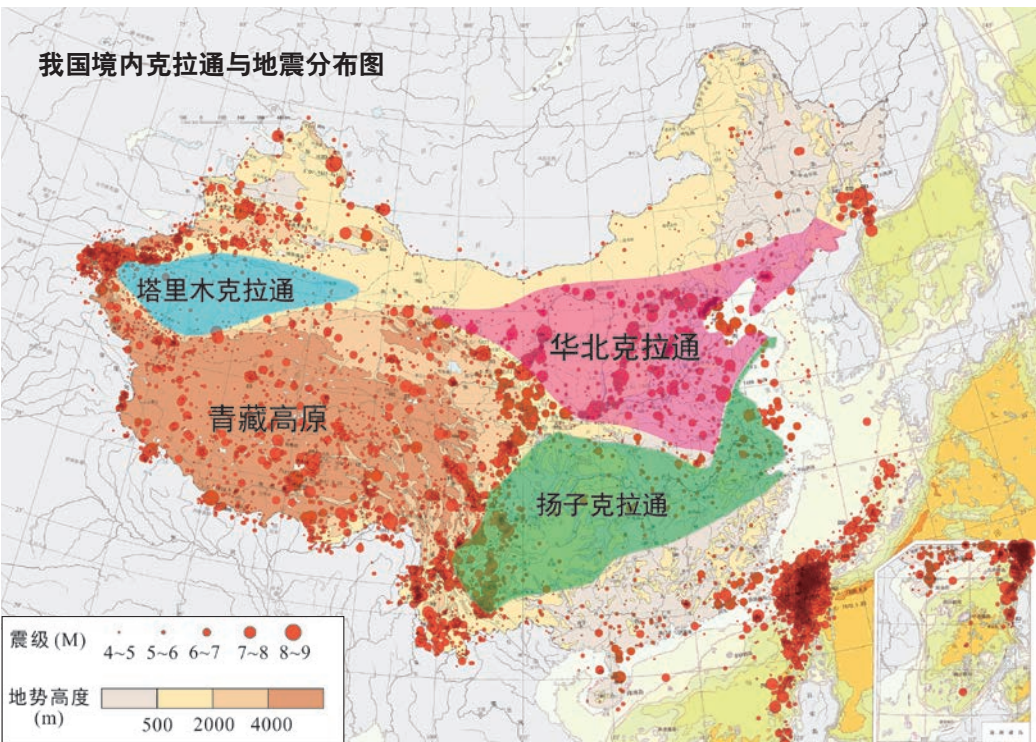
我国境内分布有 3 个克拉通，它们分别是华北克拉通、扬子克拉通和塔里木克拉通。与全球其他克拉通相比，华北克拉通是研究大陆演化的最佳切入点，这是因为它经历了非常复杂的演化过程。华北克拉通形成于 18 亿年前，由东西两个古老地块聚集而成，直到 2 亿年的中生代一直保

^{*} 造山带主要分布在克拉通的边界上，有强烈的构造变形与火山活动，地震较为频繁。相对于稳定的克拉通而言，造山带一般呈带状，又称为“褶皱带”或“构造活动带”，在地表通常呈现为隆起的山脉。

持稳定。但是，2 亿年以来却不稳定了，发生了强烈的地壳变形、大规模的岩浆活动和大地震，如我们熟知的 1966 年邢台地震、1975 年海城地震、1976 年唐山地震等。

长期稳定的华北克拉通变得不稳定了，这一特殊现象被国际学术界认为是全球重大地质事件之一。早在 1927 年，我国著名地质学家翁文灏先生就提出“燕山运动”来研究华北克拉通上发生的强烈地质构造运动；到 20 世纪 50 年代，陈国达先生创立“地台活化”理论，进一步论述华北克拉通的演化历史；20 世纪 80 年代以来，中国科学家基于对华北克拉通的地质观测和实验研究，提出了“岩石圈减薄”的概念。长久以来，关于华北克拉通失去稳定性的原因，一直是困扰全世界地球科学家的难题。

笔者研究团队对这一科学难题做了长期深入研究，发现了华北克拉通不仅仅是经历了岩石圈减薄，同时还伴随着岩石圈属性的转变。原本具有克拉通稳定属性的华北地壳发生了大规模韧性变形、岩浆活动和成矿作用，这说明华北克拉通原有的克拉通属性已不复存在。笔者将这种克拉通属性整体丧失的地质现象称为“克拉通破坏”。岩石圈减薄只是华北克拉通演化的表象之一，而克拉通破坏才是其演化的本质所在。这一研究不仅揭示了大陆演化的普遍规律，也改变了古老克拉通“一成不变”的传统认识。



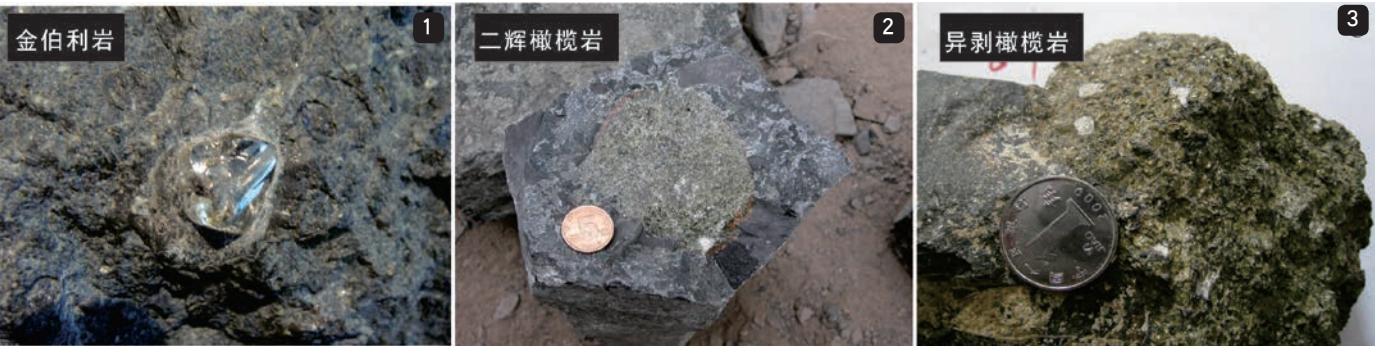
我国境内的 3 个克拉通包括从甘肃陕西到辽宁和朝鲜半岛的华北克拉通，从我国西南到长江中下游的扬子克拉通，以及新疆的塔里木克拉通。从图中可以明显看到，相比于扬子克拉通和塔里木克拉通，华北克拉通内部发生了数量更多的地震（包括 1976 年造成 24 万余人丧生的唐山大地震），这表明华北克拉通失去了稳定性。

华北克拉通破坏是什么？

克拉通岩石圈厚约 200 千米，而目前人类钻探的最大深度只有 12.3 千米，仅仅只是地球的表皮。“入地难于上青天”，地球科学家无法进入岩石圈内部直接观测或采集样品进行研究。好在地球本身的火山喷发或岩浆活动等过程，能够将深达数百千米的物质带到地表，正是这些天然的地球深部岩石样品，为科学家认识华北克拉通岩石圈的物质性质提供了重要的途径。

地球深部的岩石样品，主要是指来源于地球深部的火山或岩浆，以及它们在上升过程中携带的深部岩石圈的碎块，被称

来自地球深部的岩石样品



1 为山东蒙阴地区含有金刚石的古生代金伯利岩，2 和 3 为山东昌乐地区含有地幔橄榄岩包体的新生代玄武岩。金伯利岩是金刚石的母岩，而天然金刚石形成于地下大约 180 千米的深度。对金伯利岩的研究表明，华北克拉通破坏之前岩石圈的厚度大约有 200 千米。而对新生代玄武岩携带的地幔橄榄岩包体的研究表明，华北克拉通东部岩石圈的厚度在新生代仅有 60 ~ 80 千米。也就是说，中生代以来，华北克拉通东部岩石圈厚度减薄了上百千米。

为“深源包体”。这些来源于地球深部的样品以地幔橄榄岩包体为主，含有能够指示岩石圈厚度的矿物，如金刚石、石榴石和尖晶石等。通过对不同时代的包体中各种矿物特征和成分的对比研究，结合矿物的形成温度和压力条件，可以确定岩石圈的厚度、组成、物理化学性质及其长期的演化特征。

深源包体比较稀少，对于科学家而言弥足珍贵。为了从这些深源包体中提取岩石圈深处的信息，笔者研究团队采用新的实验方法和探测技术（例如原位微区分析技术，能够揭示微米尺度上矿物成分的变化特征）开展了系统研究。结果发现，2 亿年以来，华北克拉通东部岩石圈地幔的组成和性质都发生了重大改变。岩石圈地幔的年龄由古老变得年轻，岩石圈的厚度由原来的 200 千米变为 60 ~ 80 千米，也就是说，克拉通的岩石圈由厚变薄了。

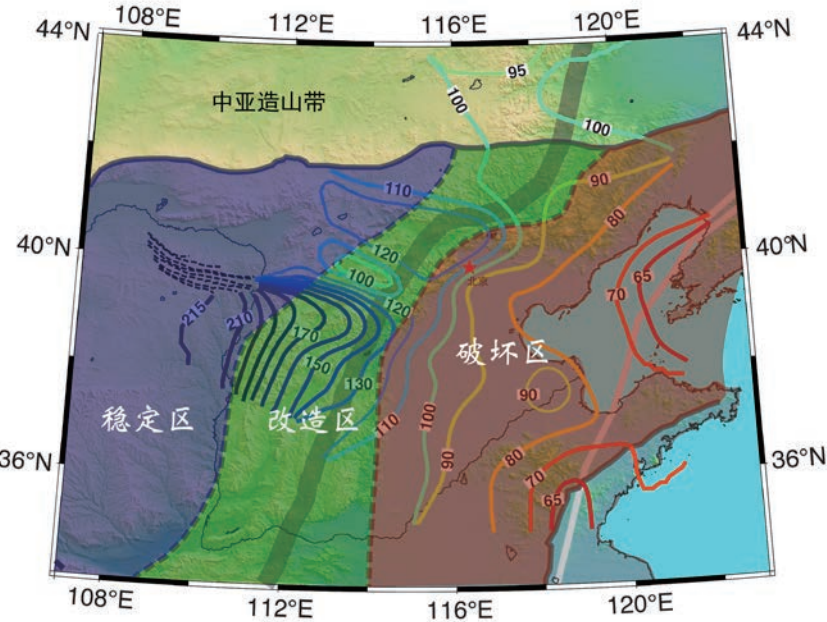
不仅如此，通过深源包体还能够推测出岩石圈地幔的演化过程。研究发现，由于外来物质进入了岩石圈地幔，并与地幔岩石发生了反应，改变了岩石圈地幔的组成和性质，导致岩石圈地幔的属性发生了转变，即由大陆克拉通型转变为类似于大洋型。将传统的地球化学研究方法与新兴的同位素示踪技术相结合，进一步的研究发现，改变岩石圈地幔组成的物质主要是来自软流圈和再循环地壳物质的熔融所产生的熔流体（炽热的熔流体）。通过全球对比研究，熔流体—岩石之间的相互作用导致岩石圈组成和性质发生改变是全球普适现象。正是由于岩石圈地幔属性的巨大变化，才导致华北克拉通变得不稳定。

不过，地表大部分地区是没有火山或岩浆活动的。比

如地处华北克拉通的北京城区与周边平原，这些被沉积物覆盖的地区是找不到火山岩的，也就无法通过研究深源包体来了解其下方岩石圈的性质。为了克服这一难题，笔者研究团队在华北克拉通地区开展了大规模宽频带流动地震台阵观测。所谓流动地震台阵，是在地表上相距 10 ~ 15 千米就布设一台地震仪，通过观测全球发生的地震，来判别地震仪布设区域地球深部的结构与性质。这与医院中开展的计算机断层扫描（CT）有着相似的原理，但难度上要大得多。

经过十多年的努力，我们最终通过对华北克拉通深部结构的密集流动地震台阵探测，获得了华北克拉通岩石圈高分辨率图像，从而确定了华北克拉通东部岩石圈薄，地壳变形强烈，属于克拉通严重破坏的区域；华北克拉通西部岩石圈较厚，无明显地壳变形，主体仍然保持着稳定的状态，属于稳定区；华北克拉通中部岩石圈厚度介于东部和西部之间，地壳发生了一定程度的变形，部分岩石圈地幔的组成和属性发生了改变，属于改造区。总之，从东到西，华北克拉通破坏的程度逐渐减弱，东部地区强烈破坏，中部地区仅部分破坏，西部地区基本没有破坏。

那么，华北克拉通破坏发生在什么时候呢？要回答这个问题，先要明确克拉通破坏的标志是什么。大规模的岩浆活动、地壳变形、成矿作用等是克拉通破坏的典型标志。采用新近发展起来的分析测试技术，对岩石（包括矿石）中挑选出来的矿物开展了高精度的同位素定年研究，我们确定克拉通破坏的诸多标志性事件都集中出现在 1.25 亿年前（白垩纪早期）左右。也就是说，华北克拉通破坏的高峰期为 1.25 亿年前。



地震探测获得的华北克拉通岩石圈厚度分布
朱日祥提出以流动地震台阵探测华北克拉通深部结构的研究思路，通过大规模天然地震观测，获得了华北克拉通岩石圈的高分辨率结构信息。发现了东部陆块岩石圈（厚约 60 ~ 100 千米）明显不同于典型克拉通型岩石圈结构，西部陆块岩石圈（厚达 210 千米）则保持典型克拉通的特征，而中部陆块地壳则介于东部和西部之间。图中等值线（单位为千米）表示岩石圈的厚度。

85

科学研究贵在创新

朱日祥院士因阐明“华北克拉通丧失稳定性的机制”这一困扰地球科学家近百年的难题而获得陈嘉庚科学奖地球科学奖。该研究在汤森路透发布的 2014 和 2015 研究前沿中，连续 2 年被评为由中国科学家主导的全球地学领域十大研究前沿，提升了我国固体地球科学研究的国际地位。本刊为此对他进行了专访，请他讲述研究生涯中的故事与见解。

从山村少年到地球科学家

您的少年时代是怎样度过的？您进入科学研究领域的契机是什么？

朱日祥：我出生在山西与内蒙古交界处的一个小山村，祖祖辈辈都是目不识丁的农民，小山村方圆几千米就是祖辈的全部世界。我生于 1955 年，很幸运出生在新中国，这使我有机会成为家族中的文化人。但要说从小最喜欢的，并不是科学，而是与小朋友上山抓鸟与打架。

回想我的小学时代，根本不懂科学为何物。好在有位充满爱心的老师，每天不知疲倦地教我们 1 到 6 年级的几十个顽童认字算数。尽管老师也不教我们汉语拼音，可能

老师也不会（笑），但凭借少年的记忆力，我们脱离了文盲的命运。

我的初中是在文革期间完成的，不记得学过什么，留下的印象很少。我的高中也是在文革中完成的，却非常幸运地进入了在山西久负盛名的大同一中，在那里遇到了影响我一生的数学老师王元达。他看我对数学有特殊的兴趣，就特别地对待我，使我第一次认识到数学的美妙。我热爱上了数学，梦想成为一名数学老师，当然并没想过成为数学家。但是，美好的梦想很快就破灭了，高中毕业后我只能回家务农。

从高中毕业到 1975 被推荐到山西大学成为工农兵学



朱日祥院士（中）在缅甸开展野外地质考察

员的近四年种地生涯里，我全身心投入到“改造地球的战斗”中。改天换地的艰苦劳动成就了我上大学的梦想，得以进入山西大学物理系学习。再后来，对数学的业余爱好又让我从一名工农兵学员成为中国科学院地球物理研究所的研究生，遇到了我的硕士研究生导师朱岗崑先生和刘椿老师。正是这两位先生的引导，使我逐步认识到探索未知的奥秘和乐趣。

您为什么会从物理学转而投身地球科学呢？地球科学领域如何吸引了您？

朱日祥：大学毕业后，我先是留校从事了几年理论物理的研究，但发觉要想在理论物理学领域有所突破实在太难了。因此，在1981年考研究生时，就选择了与自己知识结构相近的地球物理学。最初也不好说有多少兴趣与理想，主要还是以能考上研究生为主要目标。3年的硕士研究生经历，使我对地球物理学有了粗浅的认识，但也只是在懵懂中感觉到地质学对理解地球的物理现象非常重要，还谈不上有什么对地球科学的热爱与研究目标。这促使我从地球物理所硕士毕业之后，又考到中国科学院地质研究所攻读博士学位。

经过这么几次不同专业的折腾，我对科学研究有了一些自己视角的认识。自我感觉地球科学是一门未知无处不在，而且充满挑战的学科。比如海陆变迁的动力来自何处？生命从何起源？地球为什么是太阳系唯一适宜人类生存的星球？等等。回顾几十年来在地球科学领域求索的历程，我感到大学的物理学知识以及后几年在理论物理学形成的思维方式，始终潜移默化地影响着我。比如说我始终坚持“实验、观测、理论”三位一体的研究思路，重视实验和观测第一手资料的获取。这引导我在国内逐步建成了世界一流的“古地磁与岩石磁学实验室”，并在学术上取得了一定国际影响力的成就。

很多人会觉得地质学研究非常艰苦，您怎么看呢？

朱日祥：的确有不少人认为地质学很艰苦，不愿从事这一行业的研究或工作。这主要是受传统观念的影响。如果国家的基础设施比较落后，比如没有高速公路、更没有高铁和便捷的航空条件，那么从事地质学研究确实比较辛苦。比如我在20世纪80年代末，从北京到河北宣化泥河湾野外考察，路途上就需要一天时间。为了提高工作效率，只能住在当地老乡家里。可想而知，这样的生活和工作条件，是很难有太多人热爱的。而现在，同样是从北京到泥河湾，只需要两个小时。一天考察结束后，只需要半小时就可以回到县城有吃有住，不亦乐乎。

说实话，从探索未知和创造知识的角度来看，我认为地球科学是非常有趣和富有挑战的研究领域。因为未知无处不在，创新就在脚下。地学主要研究地球的演化过程，它与人类的生存和发展密切相关。如何合理有效地利用地球资源、维护人类生存的环境，已成为全球共同关注的问题。野外地质工作，既可以走进自然、领略大自然的鬼斧神工，又能揭示大自然的奥秘、为人类的可持续发展提供理论依据，同时也锻炼了身体，对我而言，实在是一件美差。

您认为地球科学对社会发展有何推动作用？

朱日祥：人类研究地球科学的历史非常早。人类祖先跨入文明的第一步就是从认识岩石特性入手，学会了制造石器；也是对岩石的深入了解，人类掌握了制铜和制铁技术，帮助人类从渔猎采集生活跨越到以种植、养殖为主的农业时代。

18世纪初，英国煤炭的发现与利用，极大地催生了第一次工业革命。蒸汽机的发明又促进了煤炭资源的需求，推动人类的能源，从木炭时代来到了煤时代。煤炭的利用极大地推动了人类社会的发展，但也给人类带来了环境污染等问题。为了寻找更洁净的能源，20世纪初，地球科学家开始利用地震勘探理论与技术，使石油天然气成为煤炭之后的新能源，使得汽车、飞机等现代交通工具成为可能，极大地改变了人们的生活方式。工业文明之后，能延续人类生存的文明应该是“生态文明”，与之呼应，地球科学也将进入“宜居地球”研究的新时代。

地球科学需要从多个学科出发去整体认识

您在地球科学研究涉及克拉通破坏、全球构造、地磁场等多个领域，这些不同领域之间是如何联系的？

朱日祥：地球本来就是一个整体。地球科学的问题，诸如大陆漂移和板块构造，以及人们所关注的资源能源和气候变化等都是全球性的问题。这就决定了地球科学是一门跨学科的系统科学。地球科学家在审视地球系统变化时，必须要以全球的视野，通过多学科交叉融合，比如地质学、地球物理学、地球化学和生物学等综合研究，认知地球的过去，从而预测地球的未来。

全球构造是从全球尺度上分析地球表面大陆和海洋的变迁，现代最流行的全球构造理论是板块构造学说。这个学说成功地解释了大陆漂移、海底扩张，以及发生在板块边缘的许多地质现象。然而，对于大陆内部，比如陆内成矿、克拉通破坏等重大科学问题，传统的板块构造理论无

法解释。而克拉通破坏的研究为上述问题的探讨提供了契机。通过多学科综合研究发现,造成华北克拉通破坏的根本原因是岩石圈地幔组成和属性的改变,即克拉通破坏。通过全球对比研究,发现了洋陆相互作用导致克拉通破坏与大陆增生是全球大陆演化的普遍规律,这些发现和认知为陆内造山与成矿提供了新的研究途径。

地球是一个巨大的磁体,地球磁场的强度和方向的变化与地球内部动力过程密切相关。而古地磁是指地质历史时期的地球所具有的磁场,不同地质时代的岩石都有一定的磁性,可指示其形成时期的磁极方向。以古地磁学为基础,结合地质学和年代学等综合研究,可以为板块构造理论的建立提供了最重要的观测证据。

克拉通破坏对华北地形地貌和生物演化有影响吗?

朱日祥:华北克拉通破坏引起大规模火山活动以及盆地—山岭地貌的形成,使区域地貌发生了巨大变化;频繁的火山活动造成区域甚至全球气候与生态环境的剧烈变化,增加了生命自然选择的压力;另一方面,火山喷发产生的火山灰为湖泊和生态系统提供了丰富的营养物质,而且也是燕辽和热河生物群得以完好保存的重要因素之一。

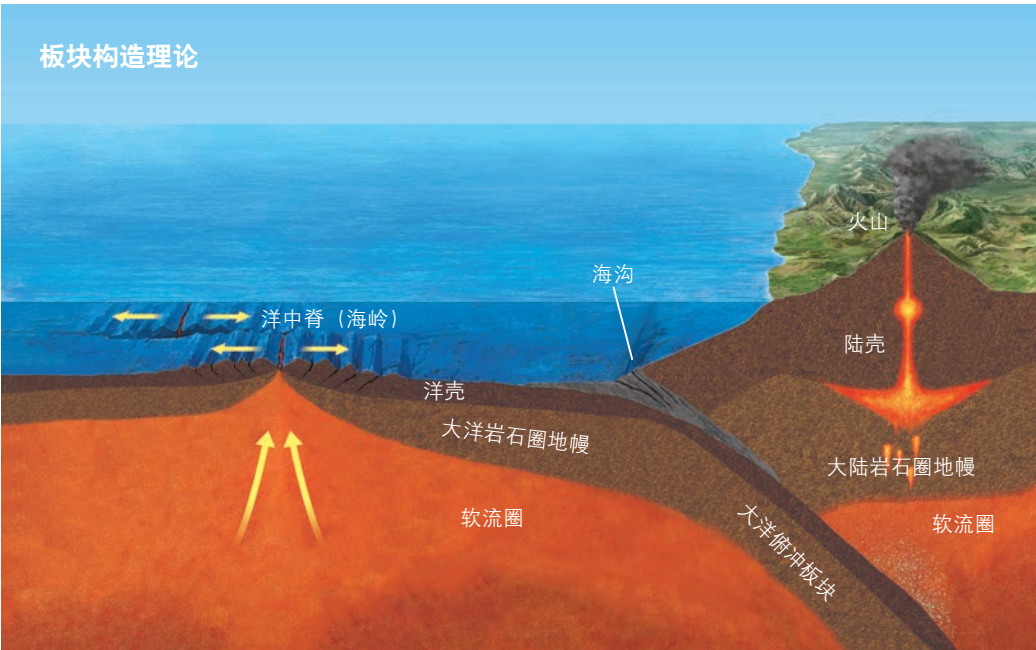
中国古生物学者在热河生物群发现了一系列重要陆生动物化石,比如早期鸟类化石燕都华夏鸟、三塔中国鸟、圣贤孔子鸟,早期哺乳动物化石五尖张和兽,早期被子植物辽宁古果,以及最著名的带羽毛恐龙原始中华龙鸟,等等。因此,华北克拉通破坏不仅对地貌产生了重大影响,而且与著名的燕辽和热河生物群演化及生物地理变迁密切相关。

传统生物演化研究通常将环境因素作为生物演化的背景来考虑,实际上,生物演化不仅是地球环境演变的一部分,而且在不同程度上也在改造地球环境,而不是简单地适应地球环境的演变。地球生命与环境的协同演化从根本上来讲是受地球深部动力学过程所控制,比如华北克拉通破坏对燕辽和热河生物群的影响,也就是说,地球内部动力过程控制了地球的宜居性,这是宜居星球最显著的特征。

华北克拉通破坏研究为什么能指导发现新的金矿?

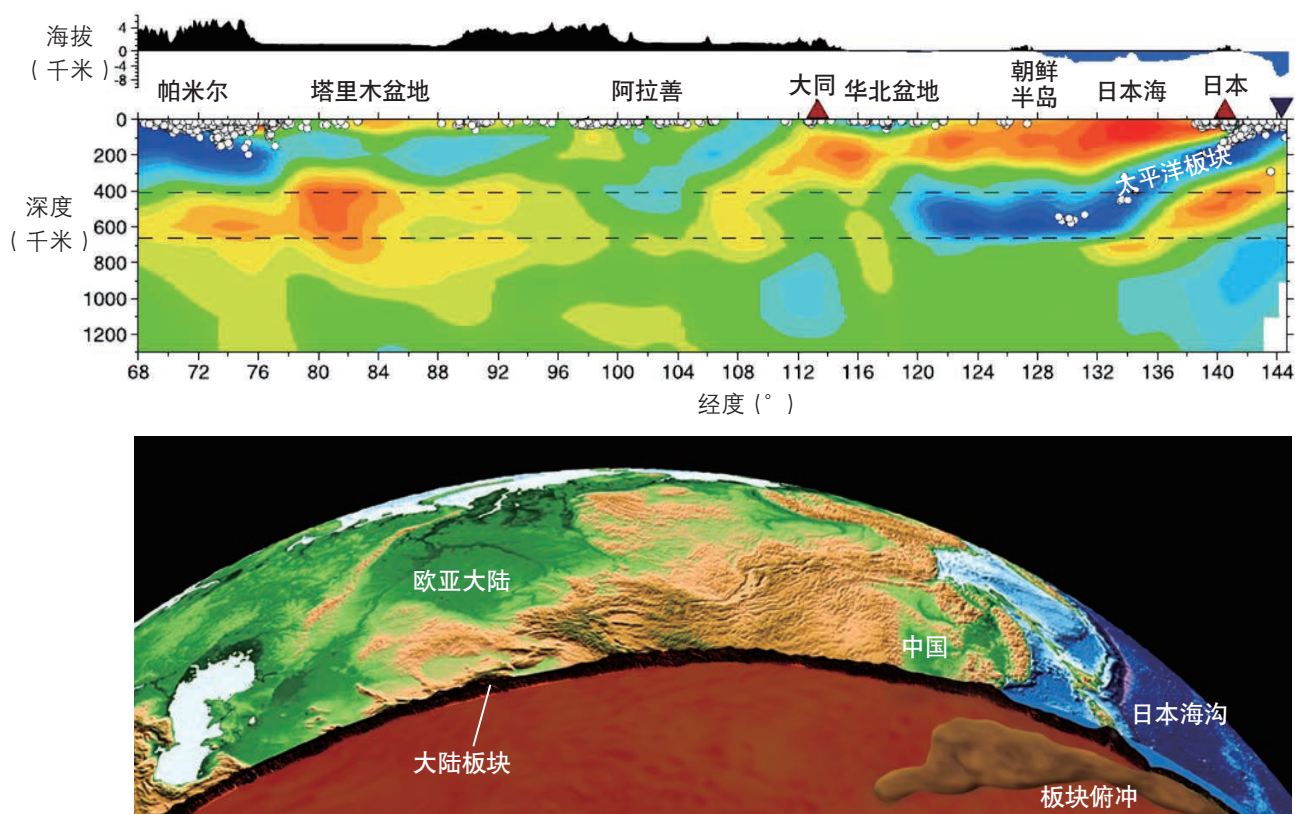
朱日祥:金矿多形成于不同古老大陆块体碰撞、拼合的缝合带中,即与克拉通形成的时代大致相同。如年产黄金85万盎司(约26吨)的澳大利亚著名的博丁顿(Boddington)金矿,就产生于27亿年前伊尔岗克拉通(Yilgarn Craton,位于澳大利亚西部)的形成时期。国际学者将这类金矿床称为“绿岩带金矿”或“造山带型金矿”。

我国黄金的重要产地主要分布于华北克拉通,探明储量占全国50%。特别是在面积只占国土面积千分之几的胶东地区,黄金探明储量占到全国的30%以上。但是,经过与合作者十余年的研究,我们却发现与世界上其他克拉通不同,在华北克拉通分布的金矿床形成于1.3亿~1.2亿年前,远远晚于华北克拉通的形成时代(大约18.5亿年前)。这一时间与华北克拉通破坏的峰期时代一致,且金矿床与克拉通破坏具有空间分布的一致性。二者时空的一致性,揭示了华北巨量金成矿与克拉通破坏的深部地球动力背景是相同的。金矿床是克拉通破坏的产物。在克拉通破坏过程中,地球深部岩浆上升到地壳浅部,脱水形成的成矿流体与广泛淋滤地壳岩石中金等成矿元素的地下水



板块构造理论认为,岩石圈(包括地壳和地幔顶部)是由板块形成的。由于地幔对流,大洋板块在洋中脊增生,到俯冲带(海沟)消亡。板块运动引发了地震、火山和各种构造运动。由于地磁每过若干年就会发生倒转,在洋中脊(海岭)两侧呈条带状对称分布且极性正负相间的海底磁异常条带,成为了海底扩张和板块构造理论的重要证据。传统的板块构造理论很好地解释了大洋板块从生成到消亡的演化循环(威尔逊旋回),但是缺少对大陆板块演化的诠释。科学家们正在试图建立新的大陆演化理论。

西太平洋板块俯冲深部结构与示意图



西太平洋板块的俯冲对东亚大陆板块的演化意义重大。通过地球物理方法（地震层析成像，上图中白点即地震震中），可以看到目前在东亚东部地下 500 千米左右，存在着长度约 2000 千米的板块俯冲形成的滞留板块。研究推测，在早白垩世时期，古西太平洋板块俯冲产生的滞留板块与之规模相当。

相互作用，沉淀而形成了金矿床。据此，我们提出了“克拉通破坏型金矿”的新理论。

黄金是国家战略资源和国家安全的重要保障，但我国的人均黄金储备远远低于欧美发达国家。所以寻找黄金资源也是我国地球科学工作者的重要使命之一。基于“克拉通破坏型金矿”成矿理论提供的理论支撑，我国学者在地质构造与胶东半岛相似的辽东地区进行了深入研究和深部黄金资源勘察，这里有望成为我国未来黄金资源的重要战略接替基地。

为创建大陆演化新理论而努力

您接下来的研究目标是什么？

朱日祥：科学研究的目的就是认识自然规律与服务人类社会需求。国家重大需求牵引下的科学研究是我们最重要的奋斗方向。认识地球深部过程对地表各种地质现象的控制作用，包括克拉通破坏与大规模金成矿，克拉通破坏与陆地生物演化之间的内在联系等，是我为之努力的目标和快乐所在。目前，对于这些目标已经取得了不少成果。

未来，我们的研究将主要集中在追溯西太平洋板块俯冲历史，探索西太平洋板块何时开始向东亚大陆俯冲、西太平洋板块初始俯冲带的位置、西太平洋俯冲板块如何演化等重要科学问题。这些问题与大陆演化新理论的建立密切相关，是全世界地球科学家面临的极具挑战性的研究领域。

近年来，国际上设立了一系列重大研究计划来探索大陆的形成和演化，试图建立新的大陆演化理论体系。我国得天独厚的地质条件为实现理论突破提供了难得的天然实验室。对我国大陆的长期研究，使我们具备了创建大陆演化新理论的基础。抓住这一机遇，我国地球科学将会在大陆演化领域引领国际地学的发展方向，使我国从地学大国成为地学强国。

您对有志于科学的年轻读者有何寄语？

朱日祥：科学研究贵在创新。没有创新，科技就不会成为第一生产力。创新需要严谨的科学态度和敢于对权威提出理性质疑的自信。

谢谢您！ 责任编辑 / 孙天任