

# 地球化学的基本观念与方法论

中国地质大学(武汉) 张本仁

近年来,我们在广泛吸收现代地球化学新思想与新成就的基础上,冲破了地球化学研究地壳中化学元素——原子历史及阐明控制各种元素分配规律的传统观念的局限,按地球化学研究地球系统中物质化学运动形式,或地球化学为地球系统的化学的构想,提出了地球化学系统观念、地球物质化学运动同地球物质力学(构造)、物理和生物运动相互制约相互转化观念、历史地球化学观念、物质(元素)再分配与再循环观念及各类地质体的地球化学特征与参数为地球物质化学运动记录的观念,并据之形成了以两个转化为核心的一套地球化学方法论。这里的两个转化是指:(1)将地质学性质的课题转化为地球化学性质的课题,以发挥地球化学学科的专长与优势;(2)对地质作用、因素、环境、条件同地球化学作用、因素、环境、条件实行相互转化,以利于研究寓于地球物质运动中的地球化学运动以及多学科研究成果的综合。在这些基本观念与方法论的指导下,我们已在勘查地球化学、成矿带地球化学、区域地球化学,其中包括区域岩石圈地球化学、区域构造地球化学及区域成矿地球化学等研究中初步形成了自己的理论体系与研究路线,同时相应地取得了一系列较高水平的研究成果。这里有必要首先介绍一下形成上述基本观点与方法论的地学哲学思想基础。

恩格斯最早提出的由物质基本运动形式来把握一门科学实质的观点,无疑直到今天仍然是正确的和具有重要意义的。但是地质运动,更确切地说应为地球系统的物质运动,究竟是什么性质的运动呢?自本世纪50年代以来,围绕地质运动是否作为一种独立的运动形式及什么是地质运动的物质承担者等问

题,在地学界与哲学界一直存在着争论。近年在国内有人提出:地质运动既不能归结为力学的、物理学的、化学的任何一种简单的运动形式,也不能归结为以上这些运动形式的简单总和,它是这几种运动形式相互作用形成的高级物质运动。同时认为地球物质客体应是地质运动的承担者,而地球物质客体是整个地球物质系统的各个相对独立的组成部分的总称,其内容包括矿物、岩石、地质体、地体、水体、气体、地域综合体等。这显然是地学哲学研究的重大进展。

然而,由于著者们对于现代地球科学探索领域的(也包括时间和空间上的)广度和深度以及所取得的重大成果认识与分析得不够充分,所以虽然论述中也提及“地壳运动不能代替地质运动,地质运动的形式是多样性的统一”,但是在实质性的讨论中仍然将研究范围局限于岩石圈各部分的相对运动和(或)大地构造运动的狭窄领域内,而未能做到对地球形成过程、各地圈分异形成、各地圈间的相互作用和物质交换循环等地球科学的重要研究内容进行应有的概括。事实表明,现代的地学哲学应建立于地球科学的更高层次基础之上,而不应局限于地质学的层次范围内。同时著者们又囿于过去按运动本体为无机物质和有机物质进行运动形式分类的传统观念,将地质运动视为无机物质的运动,而同以生命物质为承担者的生物运动完全对立起来。事实上,据目前通过宇航探测掌握的资料看,在太阳系诸行星中地球是唯一存在生命物质的行星。所以,生命物质当然属于地球物质客体的组成部分。它们是地球系统物质运动发展到一定阶段自然产生的,并逐渐发展形成了地球特有的生物圈。在生物和

生物圈形成发展的整个过程中,它们始终参与同水圈、大气圈和岩石圈的相互作用及物质交换和循环。这不仅表现为煤、石油和生源沉积岩的形成以及微生物和有机质在金属矿床形成方面的重要作用,而且还表现于通过绿色植物的光合作用不断地改变着大气圈的成分及水圈和地表的环境,使地球现今具有完全不同于太阳系其他行星的以氮、氧为主要成分的大气圈。这些事实有力地说明,生物运动形式应为地球物质运动的一个组成部分。

基于上述分析,我们认为地球物质运动(包括地质运动)应力学、物理学的、化学的和生物学的运动形式相互作用构成的综合、复杂和高层次的物质运动。这种运动的载体应为地球系统物质客体,后者包括地球系统中无机物质、有机物质和生命物质以及由它们组成的不同层次地质体。为了深入研究地球系统物质运动中含有的力学的、物理学的和化学的运动形式,目前已经分别形成了地球学科中三个基础学科——构造地质学、地球物理学和地球化学(含无机和有机地球化学)。虽然目前尚未建立起研究地球物质生物学运动形式的独立生物地质学,但是它的某些内容已经分散于有关学科,诸如地球化学(生物地球化学分支)、古生物学、矿床学(生物成矿作用)等中进行研究。同时,为了深化各层次地球物质运动及各层次地质问题的研究,包括从矿物、岩石和矿床的形成作用、岩石圈的物质运动至各地圈的形成演化和地球的形成,又需要多学科,尤其是地质学、地球物理学与地球化学的有机综合研究。科学的学科分异与综合是当代地球科学发展的辩证法。

根据上述地学哲学思想,就可较深刻地把握住地球化学研究地球系统物质化学运动,或地球系统的化学的学科本质。由于地球化学运动形式寓于地球系统各种层次物质运动之中,地球化学理所当然地应该,而且可能参与各类地球科学问题的探索与解决。

因此,现代地球化学已获得了一些新定义,诸如“地球化学是关于地球与太阳系的化学成分和化学演化的一门科学”;“地球化学包括组成太阳系的宇宙尘埃化学;地球、月球和行星化学;地壳、地幔和地核化学;岩石循环(包括剥蚀、搬运、沉积和抬升)的化学;海洋与大气的化学演化;岩石中有机质的化学”;“地球化学就是地球的化学,它是研究地球(也包括部分天体)的化学组成、化学作用及化学演化的学科”。这意味着以研究地球原子历史阐明元素分布、分配规律为主要内容的地球化学的时代的终结。

在总结现代地球化学各个领域研究的新思想和新成果的基础上,可以概括出5个基本地球化学观念及相应的地球化学方法论。

### 一、地球化学系统的观念

随着地球化学研究的深入发展,结合现代系统学科的启示,可以看出地球化学作用过程的性质和特征及化学元素的行为是同其所处的系统的组成和状态紧密相关的。例如,地球上存在生物圈及其同水圈、大气圈和岩石圈之间的物质交换,而不同于太阳系的其他行星,就是受地球这个独特的物理化学系统的物质组成和状态所制约决定的;各个区域产出的岩石和矿产类型与地球化学特征的差别(反映成岩和成矿作用性质与特征的不同)已证明是受各区域岩石圈组成和状态的不同决定的;而表生地球化学过程和元素的表生地球化学行为与内生地球化学过程和元素的内生地球化学行为的不同亦是同表生和内生地球化学系统物质组成和状态的差异有关的。因此,现在看来脱离具体的地球化学系统谈论地球化学过程的特征与元素的地球化学行为是没有意义的,地球化学系统(全球系统及其各个层次的子系统)的物质组成、结构和状态应该被视为制约其中化学过程性质和特征及元素地球化学行为的根本因素。甚至在某种意义上讲,运动的物质承担者可能不应归结为某些类型的物质(有机物质和

无机物质),而应为特定类型的物质系统(无机物质系统、有机物质系统、生命物质系统以及无机、有机和生命物质组成的综合系统)。

地球化学系统观念的方法论意义主要是:(1)要明确全球地球化学系统及其各层次子地球化学系统是地球化学研究的对象或客体;(2)要将各级地球化学系统化学组成与状态特征研究紧密地同其中各类地球化学过程的研究有机地结合起来;(3)要注意以地球化学系统化学组成与状态来制约系统中各类地球化学过程的性质与特征,即在分析具体地球化学过程特征和元素地球化学行为时,要注意联系所在地球化学系统的物质组成与状态。

## 二、地球化学运动同构造运动和物理运动相互制约和相互转化的观念

地球化学运动是地球物质运动(包括地质运动)的有机组成部分,它属于地质运动之中,并同构造运动、地球物理运动(有时还包括生物地质运动)处于相互依存、相互制约与相互转化之中。同一块岩石就同时具有特定的化学、物理学和力学性质,如果某种蚀变作用引起岩石化学成分的变化,同时就会引起岩石物理学和力学性质的变化;在区域性的层次上,常常是构造运动诱发沉积作用、岩浆作用和变质作用(其中包含各类地球化学过程)以及改变着地球物理场的特征。然而在全球的层次上或者更大区域的层次上,地球和岩石圈中热产元素(K、Th、U)丰度高低和时空分布(地球化学因素)本身就决定着地球与区域构造圈(岩石圈加软流圈)内的能量及热流的时空分布(地球物理学因素),而后者又是决定全球和区域构造发展与演化的因素(构造运动的驱动因素)。同时,在更局部的层次上,由于岩浆房中化学作用导致的挥发物质的聚集及压力的膨胀也可造成地壳岩层的破碎和产生裂隙(水爆裂隙)。地球物质运动中各种运动形式相互作

用、相互依存、相互制约、相互转化的事实生动地表明,不考虑其它运动形式的影响,而孤立地进行某种地球物质运动形式的研究是没有出路的。

依据这一基本观念,就要求地球化学在开展研究时采取以下方法原则:(1)注意密切联系地质构造、地球物理等其它学科的研究和资料;(2)要善于将地质性质的课题转化(剖析)为地球化学性质的课题来进行研究,以发挥地球化学学科的特长与优势;(3)善于将地质作用、因素、环境和条件转化(剖析)为地球化学作用、因素、环境和条件,并能赋予各类地球化学现象、因素、环境和有关的物理化学参数以地质意义。我们体会这种方法论就是善于运用地球化学观点和方法解决各类地质和地学问题的本质所在。这有利于将地球化学过程放置于地球的真实环境中来考查其能源(驱动力)、参加的物质、控制的条件与因素以及它同其物质运动形式相互作用的关系,从而能更深刻地揭示它所属于的地质运动和系统的本质与发展。

## 三、地球物质和元素再分配与再循环的观念

地球的形成是太阳系星云物质通过吸积作用向地球的分配过程。地球形成后,虽然同外部宇宙空间仍有一定的能量和物质交换,但总体规模甚小,故地球基本上可视为一个近似封闭体系。在其中除少数放射性同位素(核素)的原子数量因衰变而减少及相应的稳定子同位素(核素)的原子数在增加外,其余元素的原子总数量应是没有明显变化的。所以在地球存在的历史阶段中,地球物质的化学运动,如果不涉及其具体机制,则主要表现为元素和同位素呈各种物质形式在地球的不同层次系统(壳—幔—核与各地圈、不同区域与构造单元的岩石圈,各类地质作用系统及不同物相或矿物)间的再分配与再循环,并辅以少数放射性同位素的衰变过程。这种物质和元素的再分配和再循环过程反映

着地球内部物质的分异与混合的矛盾对立统一过程。

物质和元素的再分配与再循环总是通过和伴随各地圈的相互作用、构造运动与地质作用而进行的。大气圈、水圈、生物圈和岩石圈物质的相互作用造成了地球表层层圈间的物质交换与再循环；大洋板块的形成及尔后的俯冲消减是壳—幔物质的再分配与再循环；幔源岩浆和流体的上升是地幔物质向地壳再分配的重要途径；而壳源岩浆（主要为花岗质岩浆）、流体活动及变质—交代与风化—沉积作用则是壳内物质分异和元素再分配的过程。因此，只有认真研究地球物质的分配和循环规律，才能揭示各地圈的分异与演化、构造的性质和发展历史以及岩石和矿床的成因与时空分布。

#### 四、历史地球化学观念

地球形成以来，随着内部能量逐渐减小（因放射性同位素衰变减少），水圈、大气圈和生物圈的形成、发展和演化，幔—壳间和地壳内物质分异和再循环所引起的岩石圈各结构层组成变化等，各类地质—地球化学作用所处的物理化学条件与物源区分学成分均随地质历史发展而不断变化。加之，地球有时还遭受外来突发事件的影响。因此，虽然各个地质历史时期均发生着地球物质通过类似的地质—地球化学作用而进行的循环，但是，随着时间的推移，地质—地球化学作用及其产物（岩石、矿产等）的性质和特征均在发生着不可逆的变化。因此，地球的化学演化是螺旋式上升的，并伴随某些突变界面。为研究地球化学系统和作用过程在地质历史中的演化规律，已经形成了历史地球化学的学科分支。因此，在开展各类地球化学研究时，应以历史地球化学的理论和观点作为指导思想。

#### 五、各类地质体的地球化学特征与参数 为地球物质化学运动记录的观念

这里地质体的地球化学特征与参数包括元素和同位素组成、元素组合、比值、相关性、概率分布型式等参数以及元素的赋存形式和元素结合形成物相间的相平衡关系等。这些地球化学特征和参数记录着地质体所经历的各种地质—地球化学过程的特征、物理化学条件与发展演化历史。现代地球化学理论，尤其是微量元素在各类过程中分配演化的定量模型，同位素分馏和演化理论，化学热力学和动力学以及实验岩石学和实验地球化学成果等的应用，已为运用这些遗迹或记录来有效地追溯地球、地圈和地质—地球化学作用的演化历史、指示成岩和成矿作用的机制、源区和物理化学环境开辟了广阔的前景。

#### 六、地球化学方法论

基于上述地球化学的基本观念与方法论，结合区域地球化学研究的目的、任务和特定的条件，经三轮研究实践，我们初步形成了能基本适应现代地学和地球化学发展水平的下述理论格架和研究路线：区域地球化学研究应在全球岩石圈、全球构造新思想及历史地球化学理论和观点的指导下，以区域岩石圈为系统，以各类地质体的地球化学特征和参数为基础，以物质和元素（含同位素）通过各时代构造运动和地质作用而发生的再分配和再循环为主线，实行以区域岩石圈的组成和状态限制区域构造运动与成岩、成矿作用的性质和特征以及以导致物质分异与混合的区域构造运动和各类地质作用作为区域岩石圈发展、演化的过程或机制，并且善于将地质课题剖析为地球化学课题以及将地质现象、因素转化为地球化学现象、因素；首先开展区域岩石圈化学组成与热状态、区域地球化学分区、区域各类型岩石和矿床的地球化学特征、形成过程及构造环境等研究；

进而分析阐明区域岩石圈的演化特征、区域构造发展历史及区域成矿规律,为区域找矿和成矿远景预测提供依据。

迄今,在国际范围内区域岩石圈组成研究同区域构造及区域岩石和矿产形成的地球化学研究基本上是脱节的。实践证明,按上述区域地球化学理论构想与研究实践进行研究,就能较好地把握区域岩石圈系统同其中发生的构造运动与各类地质过程的研究有机地结合起来,收到深化区域岩石圈演化特征、构造发展历史和区域成矿规律认识的效果。

根据地球物质运动中化学运动形式同构造(力学)运动形式相互制约和相互转化的观念,在将岩石圈各结构层视为特定的物质库或物源区,并考虑机械能转化为热能、不同性质的构造运动应造成不同的热动力条件以及地球各层圈温度、压力的分布与各种供热方式(磨擦热、地幔对流对地壳加热、软流层上涌和热点、高温岩浆烘烤、地壳变厚增温)等的情况下,就可将构造运动与地球化学作用的相互制约关系概括为:在一定的地质历史阶段内(考虑构造体制随地质历史的发展),特定性质的构造运动或构造环境,甚至同一构造环境的不同部位,对于岩石和矿产形成的地球化学作用来说,就意味着为特定的物源、热源、物理化学和动力学条件以及尔后的发展环境。例如,洋中脊玄武岩,岩浆形成的热源为上隆的软流层加热,物源为洋壳下地幔岩石,岩浆形成于拉张的动力学条件中,后来又无陆壳的污染,只同海水在表层上发生相互作用,因此,必然具有特定的地球化学特征。然而产于大洋和大陆板块汇聚边缘俯冲带中的火山岩与侵入岩,其岩浆具有俯冲洋壳板片(洋壳玄武岩加远洋沉积物)、岩石圈地幔、甚至下地壳的物质混合来源;热源既包括板块俯冲磨擦热,又有上地幔与软流层的高地温;大洋板片随深度变质脱水有利于物质的活化迁移与形成高的水蒸气压( $P_{H_2O}$ )条件,后者促使在部分熔融时锆石、钛铁矿、榍石、磷灰石和石榴石

等稳定性的增大;加之随大洋板片下插深度增大,物质活化的温、压条件也在不断变化。因此,在这种俯冲带(大陆岛弧和活动大陆边缘)中,不仅成对地产出高压低温和低压高温的双变质带,显示出由海沟向陆内发生的岩石系列、类型及同类岩石化学成分(K、REE等亲石大离子元素含量与K/Na比值规律增大,谓之成分极性)等的规律变化,而且岩石一般具有贫Ti、Zr、Hf、Nb、Ta、Y高场强元素的特征。同样,产于大陆裂谷与拉张构造环境中的双峰式岩浆岩岩套,也因其岩浆形成与活动的热源、物源与热动力条件的特殊,而且有不同于其他构造环境中类似岩石的地球化学特征。

掌握了上述岩石地球化学同构造性质和构造环境之间的本质关系,就有可能不仅仅应用现有岩石地球化学判别标志和图解来确定岩石形成的构造环境,而且还能开创性地从对各类岩石物源、热源或动力学条件以及岩石形成作用(岩浆、沉积等作用)本身的特征与演化等研究来揭示构造的性质与发展。例如,我们曾通过南秦岭古生代盆地沉积岩物源变化的地球化学研究,为华北和扬子陆块对接的时代提供了重要的证据;火山岩和花岗岩类的成分极性以及玄武岩成分显示出岩浆源区含有再循环的洋壳沉积层物质,已经做为判断秦巴某些时代岛弧存在及洋壳俯冲方向的良好证据;熊耳群火山岩系不仅在 $SiO_2$ 含量的频率分布上显示双峰特征,而且中基性和中酸性岩石的岩浆也具有不同的源区及演化上的不连续性,因此应属于类似陆内裂谷的拉张构造环境岩浆活动的产物。

随着研究的深入,有时可以发现具有某种地球化学特征的岩石(例如,具有大洋拉斑玄武岩特征的岩石)可以产出于两种或两种以上的构造环境(例如,洋中脊、弧后盆地或边缘海槽),即岩石地球化学特征出现了多解性。这是由于两种或两种以上性质的构造可以影响岩石圈相同结构层及产生类似的

热动力条件而诱发形成岩浆所造成的。世界不同地区岩石圈组成的一定差异,有时也会影响应用岩石地球化学标志判别构造环境的效果。如何解决在大陆构造研究中所遇到的上述问题?通过试验,我们认为,只要能在充分考虑研究区内的岩石圈组成的特殊性的前提下,采取岩套内岩类配套及有关构造期的岩套(或建造)时、空配套岩石地球化学综合判别的途径,同时加强岩浆和沉积过程的物源、机制、分异和演化的深入研究,就能为地球化学参与区域构造和大地构造研究开创出广阔的道路。

从地球化学观点看,成矿的实质是:某些元素由在某地区岩石圈中分散的低浓度状态,经过各类地质作用(类似选矿和冶炼过程)的逐步浓集,而在局部地段浓度达到工业可以利用的水平的过程。地球化学研究区域成矿问题,就是研究元素在岩石圈中浓集的过程、机制及其控制因素。这就需要涉及原始成矿系统(岩石圈)和中间成矿系统(预富集系统——矿源层、含矿岩浆、成矿热液等)中元素的初始浓度、各类地质作用中含有的浓集或贫元素的机制及其浓集元素的效率和控制因素、诱发各类地质作用与控制它们空间分布和热动力条件的构造运动和构造环境以及各种元素达到矿石浓度水平所需的浓集倍数等因素。其中,原始和中间矿源系统中元素的初始浓度达到一定或较高水平,仅为成矿的必要条件和有利的因素;元素能在原有含量水平上继续浓集,才是成矿的充分条件和决定因素;元素从区域岩石圈初始浓度达到矿石品位水平所需浓集的倍数的大小,则决定着每种元素成矿的难易与所需浓集地质作用过程的多寡;而构造运动则至少是地球构造圈热动力状态不均衡性的集中表现,它们成为各类地质作用与成矿作用的驱动力,为地质作用和成矿作用提供活动的场所与物理化学条件。

对人类的选矿、冶炼过程及自然界元素分配过程的研究表明,元素的浓集与分散

(贫化)只能通过元素在不同相之间的不均一分配。这种过程使元素在一种相中浓集,而伴随着在另一种相中的贫化。各种地质作用中均含有元素在共存相间分配的多种过程,例如,岩浆作用中的部分熔融、分异结晶、不混溶与超临界水流体相自岩浆的分离等;表生作用中水与岩石的相互作用、无机化合物自水体(溶液)中析出沉淀、粘土和胶体与水体(溶液)的吸附与离子交换、生物与水体(溶液)的物质交换等。因此,各种地质作用均可视为元素浓集成矿的机制。现今地球化学已经有了评估地质作用中各类浓集元素过程效率的理论与方法(分配系数、部分熔融和分离结晶的定量模型、浓集系数等),这为半定量地分析区域成矿问题奠定了良好的基础。可以认为控制元素浓集成矿的主要因素:(1)在地质作用系统中控制由均一相产生两种或两种以上共存相的因素;(2)在活化搬运过程中控制元素在流体相中浓集的因素;(3)在沉积和沉淀过程中控制元素向固相(指固体矿产而言)浓集的过程。同时必须指出,上述控矿的直接因素基本是物理化学性质的,但它们又是通过控矿的地质环境和条件提供的,或者换一种说法,它们是寓于控矿的地质环境和条件之中的,因此必须使控矿物理化学因素地质化,才能利于矿床的成因分析与寻找。

成矿元素富集的地球化学省(尤其上地幔富该元素)、有利的预富集系统(矿源层等)、有利的构造环境及具有较强富集元素能力的地质作用等的空间分布,是控制金属矿成省和金属成矿带空间位置的主要因素。但对不同金属成矿省和成矿带分布说来,上述诸因素所起作用重要性的顺序是不同的,在不能特别强烈浓集成矿元素的地质作用的情况下,成矿元素富集的地球化学省往往就成为控制金属成矿省和成矿带的首要因素。

勘查地球化学研究在我国已经取得重大进展,并且获得了丰硕的找矿成果。然而它  
(下转第56页)

教授讲“新生代地质”笔记，参以较新的资料，对照欧洲情况，予以比较分析，完成了孙老师交给的任务。

袁老师一生正式发表的科研论文虽不甚多，但他早年的工作都是开创性的。他对科研工作的见解也往往是“一语破的”。我在昆明时期，发表了不少短文。有时请教袁老师，他说：“论文量不在多，但对所研究的具体问题和范围，必须有所发现，并有明确见解，使后人从事同一范围的研究时，必须加以“引用”(quote)，这就是成功的科研”。我在以后的工作中，时时以此自励。“虽不行至，心而往之”。

在西北考察的5年是袁老师一生中的大事，也是解放前几十年间，中外科学协作的一件盛事。在当时的条件下，做到了平等合作，所获科研成果，数十年间，共同发表，影响深远，这是非常不容易的。这也是与袁老师和其它中国学者当时的优异工作和优良学风分不开的。

袁老师在新疆辛勤采集的标本100余箱包括了大量脊椎动物和植物化石及石器、陶器等珍品。30年代只发表了少量的成果和图

件。抗战初期曾将其中一部分装箱南运，不幸丢失，大部分留存北平，幸无损失。直到50年代才由杨钟键教授、斯行健教授和考古工作者陆续研究发表，已是迟了20余年。更由于种种原因，长期以来，未能在袁老师周围形成一个稳定的研究环境，致使相当一部分宝贵资料未获整理和研究，实为憾事。由此使我想到：前辈学者以及当代学人往往历尽艰辛获得的学术资料不能得到充分利用，甚或泯灭无存。我们实在应该及时尽力，搜集这些在科学史上有意义的事迹和经历，使其不致尘没无闻。同时也使我想到：在当前开放的形势下，国际交流合作大量开展。但我们依然面临着科技水平和财力、物力与西方国家相比均有差距的局面。在这种情况下，我们必须做到在国际交流中平等互利和独立自主，在重要的方面还必须做到以我为主，不能在科研成果问题上形成主客易置，更不能以祖国的珍贵资料优势服务于部门或个人的利益。

我们现在敬怀前贤，缅怀师德，更应当以此自勉，以求无愧于前辈师长，无愧于当前的时代。

(上接第51页)

的研究至今未能根本改变就异常评异常的局面，妨碍着研究向更深层次的发展。如能遵循前述两个转化的观点，在加强成矿规律了解和研究的同时，善于将控矿的地质因素、环境和条件转化为地球化学因素、环境和条件，进而将后者转化为地球化学找矿的前提与标志，以数字化后做为评价指标，同原来常规由异常特征得出的评价指标一道形成综合评

价指标，以扩大成矿信息，提高评价效果，应不失为一种可行的途径。我们的实践已经肯定了这一点。

任何事物总是向前发展的，上述地球化学研究的初步理论框架也必须经过再实践与再认识而逐步充实与完善。

〔转载自《地质科学思维》，地震出版社〕