

地壳物质组分的共生组合法则

董申保

(北京大学地质学系,北京,100871)

摘要 自然界中地质作用进程代表着较高级的物质运动形式。它们占有广泛的空间和时间,其中的物质组分随着进程的变迁在时间的长河中描绘出一幅永恒的运动画卷。其经历过程表现为不同物质形式组成的一系列的有规律和有层次的共生组合。岩石共生组合主要反映出形成地质环境及其大地构造位置。矿物共生组合基本体现了自然界中所固有的热力学体系,并可用以探讨其形成时深部热流传递的机理。元素共生组合以元素的地球化学行为反映出地质作用中各源区的特征及经受作用后的迁移行为。同位素共生组合则以元素中的核子行为为基础用以计年和追踪其源区。它们之中虽各有不同,但又互有联系,形成一个有机整体,并成为近代地壳动力研究中的一个探讨动力行为的重要领域。

关键词 地质作用进程 地质作用对应于物理-化学作用 岩石、矿物、元素及同位素共生组合

CLC P59,P57

1 概述

地质作用进程主要是由地壳的物质组分运动时所产生的的一种自然作用,属于自发过程。根据地质作用进程的特点,地球的物质组分既有源区的控制,大的从地球各层、圈划分的元素组合,如亲铜、亲铁、亲石、亲气和亲生物的元素组合^[1],小的到由花岗岩的源区所形成S和I型花岗岩^[2]等。它们既受原始和某一作用的源区所支配,同时又受着各种地质作用的动力学行为,诸如岩浆、沉积、变质和构造作用以及它们次一级的作用如花岗岩浆的分离结晶等的约束。这些综合作用随着时间的变化发生于广泛的空间和时间中,形成一个五彩缤纷的永恒运动的画卷,而分析、归纳和阐述它们的相互关系和内在联系永远是地质科研中的一个重要课题。

从哲学抽象上看,地质作用进程代表着一类自然界中较高级的物质运动形式。除了以生物演化为主题的有机演化过程外,它们绝大部分属于无机方面。一般来说,这一物质运动形式不能简单看成是简单形式的物理-化学作用的再造,首先考虑的应是地质作用控制,在这一先决条件下,才能进一步从物理-化学作用控制来说明运动的固有本性。二者之间构成有机的整体,没有地质作用控制就失去这一运动形式的主要特征,不能体现出地质作用进程

收稿日期:1998-03-18

作者简介:董申保,男,1917年生,教授,中国科学院院士,岩石学专业。

的“惟一性”,甚至会迷失方向陷于地球一成不变的观点,而没有物理-化学作用控制则不能从地质作用的表象深入到本质上的探讨,而徘徊于歧途,止步不前。二者既不能相互替代,也不能逾越其范围。对于从地壳物质组分的运动观点来研究地质科学,应该具有全面的观点,以野外观察为主线的物质组分的表现—物质组分的共生组合—通过实验研究、计算和有关基础理论的验证,从而得出某些结论,然后用以反馈到自然,以期进一步探讨其内在的联系。这种往复的反馈是地质科学研究中的一种重要方法——逼近法(method of approximation),它能保证研究不断深入。

2 地壳物质组分的共生组合法则

由于地质作用进程的上述特征,尽管实验室研究、数学计算和基础理论验证成为近代研究中不可缺少的手段,但作为第一性的研究来说依然是野外观察,即把自然界中的地质作用进程看成是一个大实验室,通过它们残存的各个阶段的记载,再用近代测试和实验手段来验证和解析。受动力学行为所控制的地质作用进程的表象是多方面的,各有着自己的制约的法则。作为物质组分运动过程的研究,则主要是在整体地质历史的框架中,着重用“地壳的物质组分的共生组合法则”(rule of paragenetic association of constituents of Earth's crust)为工作原则来分析各种类型的物质组分的共生系列中不同组合的特征,并用实际数据和基础理论来阐述其形成过程及其演化历史。

自19世纪以来,地壳的物质组分按照地质作用形成有规律分布的现象已逐渐为人所知,Breithaupt^[3]即开始用“共生”一词来解释矿物的特征组合与其成因上的联系,并进一步指出它们的连续性以及后期变化与其矿物组合变化的关系。此后,在金属矿床学上得到广泛的承认。这一矿物的共生及其发展顺序与地质作用演化进程的关系可认为是地壳物质组分的共生组合法则的先驱。近代研究表明,大的如地球各个圈、层的物质组分的分布,小的到地质过程中微观世界的元素中的核子的变异都受着地质作用进程的控制,形成一系列的共生组合。这一规律可称为地壳(地球)的物质组分的共生组合法则。

地壳的物质组分随着它所处的源区及其地质作用进程的控制形成为一系列代表着不同层次的有规律的共生系列和它们的次一级组合,它们是自然界反映不同物质运动形式的见证者。历来,地质学中各种分支学科,如岩石学、矿物学、地球化学以及金属矿床学等的研究都以这项法则作为它们的工作原则,它的地位和其隐喻的涵义在地质学上可和地层学中的叠加原理(superposition principle)相比拟。

3 各类物质组分的共生组合的涵义

地质科学中有关研究物质组分的分支学科包括岩石学、矿物学、地球化学等,其主要研究方向大抵都是以各自对象的共生组合为基础,通过对它们的组合的成分及其相互关系的研究,并用实验和理论印证来研究其形成原因,并以此为依据追溯推断它们的地质演化过程,说明它们的大地构造环境及其变迁,从而阐明地壳演化的某些动力学,后者一般称之为岩石构造历史(petrotectonic history)。由于这些学科所研究的对象的分工侧重有所不同,它们的共生组合代表着不同层次的地质作用进程分别有着不同的涵义,如岩石建造、矿物共

生、元素组合、同位素组合等都各有其主要范围,但是它们都代表着总体的物质运动形式的一个侧面,彼此有时还有交叉和重叠,不能把它们割裂开。兹就不同范围的共生组合做一些扼要叙述。

3.1 岩石的共生组合

岩石有规律的组合一般称为岩石组合。早在 19 世纪上半叶, Lyell^[4]就曾提出建造这一名词,指出它代表任何一组岩石在成因、年代及组成上具有共同特征(any assemblage of rocks which have some character in common, whether of origin, age or composition)。目前,一般认为岩石共生组合是指岩石的有规律的组合。它们具有一定的时间和空间,相互之间或在组分、矿物和结构构造方面有着共同特征或密切联系。从物质运动形式上看,这一类共生组合有着多方面的控制,但其主要方面则是反映出地质环境的控制,并通过这一侧面来说明大地构造环境的变化。

岩石建造曾先见于沉积岩的研究中,沉积建造或沉积相在沉积岩石学的研究中居重要地位。它们主要是反映地表沉积时的沉积环境,部分联系到生物环境,并从这一基础出发,上则联系到它们形成时的大地构造位置以及与此有关的动力学行为,下则从地表形成时的物理-化学作用兼及它们的地球化学行为。在经典的地槽学说中就曾有过诸如冒地槽、优地槽的沉积建造的分类以及复理石和磨拉石建造对于地槽不同阶段的判别类型,而时至板块构造学说时,沉积建造的研究则进一步发展到诸如用大陆边缘的沉积岩组合来说明板块构造的特征^[5],不同板块构造所呈现的沉积建造^[6]以及某些重要的沉积类型,如复理石建造在不同的板块构造位置中的区分等^[7]。其中有关的讨论包括近代的沉积建造能否作为“指纹(finger print)”来鉴别古老的地槽带等是一个重要方面,并推动这一方面的发展。

自 1886 年, Judd^[8]就开始采用火成岩省来定义岩浆岩的共生组合。他指出:“有一些明确的岩浆岩省,在任何一个特殊的地质时代,其中喷发的岩石表现出明确的矿物组分和显微构造,马上即可用以与同时喷发的其它火成岩区的一般的类似的组合区分。”此后,在一个较短的时间内,岩浆岩组合的时间和空间分布的特点及其与它们形成时的大地构造环境的联系得到了充分的肯定,出现了各种与之有关的名称,如岩浆建造、同源系列、岩套和岩浆系列等。它们大都是从岩浆岩体的岩浆源和岩浆结晶分离作用出发来讨论其大地构造环境。其中,如经典地槽学说把岩浆岩组合分为前造山期蛇绿岩套,造山期花岗岩和安山岩系及造山期后溢流玄武岩和 A 型花岗岩系。板块构造学说中的蛇绿岩套和花岗岩拓扑学(granitic topology)^[9]在不同板块中位置的研究都说明岩浆岩共生组合和大地构造环境之间的联系。

与上述沉积岩和岩浆岩共生组合相比较,变质岩石共生组合的涵义的确则较晚。它们的共生组合首先表现为其野外观察的分类。自 Daubrée^[10]以来,局部变质和区域变质作用出现的不同变质带的分布,一般都被认为是与地质作用中有关的温度和应力有关,而作为以变质岩石共生组合为基础的区域变质作用类型^[11~12]的演化直到 20 世纪 80 年代才被确认与长期的热消散(secular dissipation of heat)有关。变质带^[13]和变质相^[14]所呈现的岩石共生组合,长期受静态观察的约束局限于深部过程的变化。只有在 20 世纪 60 年代以后,变质相系的建立^[15]才初步打破这一约束,开始与地壳深部热流传导机制相联系,并进一步阐明其与某些大地构造环境的关系,变质建造的概念虽在研究中所论及^[16~17],但它们在地质作用过程中的涵义仍需进一步阐明。

岩石共生组合是反映自然界中地质作用过程控制的产物,在岩石构造历史的研究中具

有重要的地位。一方面通过地质作用过程与形成的大地构造环境联系,另一方面,岩石共生组合内部的矿物、化学组分之间的特征及相互关系往往是物理-化学作用的前提,若缺少这些根据,则实验及所得的数据将不能从自然界中取得凭证,很难从中得出肯定性的理论假设,有时还可导致若干错误结论。只有实验条件适合于这些前提,所得出的理论假设方可成立。

3.2 矿物的共生组合

矿物的共生组合是岩石内部矿物之间有规律的共生组合。在结晶岩石中(包括岩浆岩、变质岩和部分沉积岩)。矿物之间在同一时间内出现的组合称为矿物共生,它们在相当众多的研究中被认为是自然界自发过程中趋向于热力学体系中的相(phase)相对应。尽管自然界中的热力学体系属于自发过程,与可逆过程不同,而且其中的矿物扩散效应研究不够,但由于它们的化学反应时间长,所形成的矿物共生在较广泛的时间和空间又都可以对比,因此,一般认为用矿物共生来模拟自然界中热力学体系的近似平衡或准平衡条件是可行的。

早在 20 世纪初期,通过金相学的相图研究,物理化学原理即开始被应用于岩浆结晶的岩石中^[18],用以说明矿物和岩石的形成及其分类。此后,以 Bowen 为首的 Carnegie 学派为物理化学原理应用于岩浆岩领域奠定了基础,从相图与矿物共生的联系和岩浆岩中的反应边结构的顺序建立了反应原理^[19]来说明岩浆分异作用。实验学派在 20 世纪下半叶得到了广泛的发展,一方面表现为基性岩浆的分熔和结晶分异作用与玄武质岩石的联系^[20~21],一方面表现为深熔作用产生的花岗质岩石的实验^[22~24]。如 Wyllie 所说:“实验岩石学提供了矿物共生的熔融和结晶的浓度,以及矿物、熔浆和蒸气之间的元素的交换。它们可以帮助我们识别可能和不可能存在的作用。”^[23]

变质岩中的矿物共生组合与平衡热力学的联系较与岩浆岩中的矿物共生组合的为晚。在变质带中的矿物共生的野外观察的基础上,Goldschmidt (1911)提出了“矿物相律”(mineralogical phase rule):“能同时稳定共存的固体矿物的最大数 n ”等于矿物中所含的单独的组分数 n ^[25]。变质相(Eskola, 1915)提出后,尽管在定义中的关于平衡的问题有不同看法^[26],但变质反应与变质相中矿物共生的联系的研究,自 20 世纪 40 年代以来,有着飞跃的发展。目前变质反应所及的范围包含去挥发组分到固体反应整个过程,从连续到不连续反应,从缓冲(buffer)到渗入反应(infiltration reactions)等各个方面,已能初步模拟出变质矿物共生组合所反映的整体温度-压力体制,并在变质反应实验的基础上发展出较为系统的地温压计学(geothermobarometry)。近代的变质矿物共生的研究开拓了变质矿物共生组合的研究,在化学反应动力学的前提下,通过系列的显微构造,包括反应边、反应构造、矿物包体系列等所区分的局部平衡域中的矿物共生,用数学解析的 Gibbs 方法为基础的相对地温压计方法^[27]来追索变质作用的 p - T - t 的轨迹。此外, Lasage^[28]还对比了同一薄片中的不同的矿物共生呈现的不同的温度差别。用化学元素扩散速度(kinetic rates of diffusion)来解释,并称之为地速率学的接近(geospeedometric approach)。

地壳动力学行为的一个重要侧面,是地壳内部和壳-幔相互作用所产生的热流的传递,在传输过程中经常表现为热扰动以及继之而来的热松弛,以达到新的热平衡。一般来说,热平衡到达需要一段数以百万年计的漫长时间。对于一个因热松弛而增温的化学反应来说,其产生的矿物共生往往可趋近热力学平衡,不同时、空出现的同一作用的矿物共生都可进行对比。同时,自然界的物化反应又都是不可逆的,其过程往往受环境与体系的相互作用形成

单向变化,其整体过程不能用可逆过程热力学来处理。但是,由于它们之中出现着缓慢的化学动力反应,残存的矿物共生部分能被保留于岩石中,并可通过它们的组构分析,诸如包体、反应边、反应结构、交代结构、退化变化、热液蚀变等,区分出不同的由矿物共生组成的平衡域和某些交代作用形成的局部平衡域,把其中的每一阶段用可逆过程热力学来处理是可行的,并由此来追踪它们的热流变化的历史。虽然,自然中残存的记录大部已被湮没,但这一方面仍不失为当今研究地壳动力学行为的一个重要方面。

3.3 元素的共生组合

元素的共生组合是地质作用进程中的一个重要表现。它们是以元素本身的电子排布所体现的地球化学行为与地质作用进程相结合而形成一系列的有规律的共生组合。早在20世纪初期,Goldschmidt等即发现了地壳、圈、层中元素分布的特性和矿物组合中的类质同相置换在地质研究中的重要性,此后,成为地球化学分支的基础。目前,一般认为元素的共生组合是地质作用进程中的基本运动形式,既存在于原始的地球的分化的圈、层和各个不同地质作用的起始源区中,又以粒子运动状态参与物理-化学作用。元素共生组合的一个重要方面是在各种地质作用中以示踪元素包括微量元素来追索它们的源区特征及其地质产状,并以此为出发点在相继发生的作用控制下,出现一系列的元素组合的变化。这不仅在岩浆源的研究上显得更为重要,例如玄武岩浆中的稀土元素分配和其岩源及以后的分异作用的联系,不相容元素在幔源岩石深熔作用的判别中的作用,S型和I型花岗岩对于判断其深熔的源岩等^[2],并且元素的某些地球化学行为在一些地质作用领域中的热力学平衡的应用也有其重要意义,如固体溶液对于变质反应、微量元素对于岩浆结晶时的平衡反应等,不相容元素在重熔作用中的表现也与晶体和熔浆的平衡反应有关。

元素共生组合在地质作用进程中主要反映出地质作用时的源岩特征,但在作用进程继续时,又不断出现新的元素组合,直至风化侵蚀作用。在地质历史中经过地质环境的变迁后,它们又可受新旋回的影响,发生重改造作用,并经受另一作用进程的控制。地壳往往在过去时期中出现过这种再旋回作用。因此,在考虑元素共生组合在地质作用进程中的地位,必须从地质环境的整体变化出发,考虑其应有的地位。

3.4 同位素的共生组合

同位素的共生组合是以矿物内部或岩石内部某些元素的核子变化为基础来反映地质作用进程,并用某一同位素体系中的同位素比值来表达这一行为。

自然界中导致同位素发生变化的主要原因是某些放射性元素的衰变和化学反应中出现的质量分离作用。一般称为放射性元素和稳定同位素,前者具有长期放射性行为,可通过一组衰变系列的同位素转化为另一组衰变系列的同位素,直至它们在温度冷却时,核子停止扩散而形成稳定同位素为止。因此,自然界中出现的这一类稳定同位素表现为它们的子同位素在温度冷却时的封闭年龄(closure time)。它们可作为计年用,其比值不随作用过程变化。后者的同位素母源是稳定的,非放射性的,它们的同位素比值受原有的核子所控制,而它们的化学行为由外壳电子排布所决定。因此,自然界中出现的这一类稳定同位素比值常与质量分离有关,能用于鉴别者,其原子量往往小于40。

同位素共生组合与地质作用进程一般可表现为:①地质年代学,即用某些代表封闭年龄的同位素比值来确定相当于这一热事件形成的时间;②同位素示踪,即用某些岩石中特定的同位素初始比值来鉴别其可能形成的源区或其环境,如用花岗岩中的 $\epsilon(\text{Sr})$ 和 $\epsilon(\text{Nd})$

值来鉴别其岩浆源,岩石中 $\delta^{18}\text{O}$ 值来判别其形成时的古环境。

同位素共生组合是以核子衰变为基础,用同位素比值通过计年和追踪其矿物或岩石形成时的地质作用进程相联系。其中尤以计年为特征。由于地质作用进程是自然界中的复杂进程,既受物质聚集的源的控制,也受物质组合迁移时作用过程的限制。因此,不以地质作用进程为前提,不考虑到岩石所处的地质环境变迁,单方面以同位素比值为主要依据来判断重要的地质事件是轻率的,并可能导致错误。如 Moorbath^[29]所说,一个同位素的封闭年龄只代表使核子停止扩散时的热事件的年龄,它与变质或岩浆作用的热事件常有一段的时间间隔,除非二者能面临正确的判别,否则这一分析数据的整个推理将会陷入一个精心设计的数字游戏(elaborate number game)的危险。花岗岩的 $N_i(^{87}\text{Sr})/N_i(^{86}\text{Sr})$ 小于 0.705 时,也可能产生混淆的结果,它既可以是由基性岩浆直接演化的,也可以是由基性岩结晶形成的地壳岩石的深熔,如下地壳,其形成原因各异。而下地壳本身又可因地质环境的变迁,转而为上地壳,其当时的岩浆储存库的环境及其结晶作用又与原始的下地壳环境有较大差异。以 $\delta^{18}\text{O}$ 来标志某些岩浆的成因既要考虑岩浆的控制,又要考虑受后期岩浆分异作用的因素,同时也还有地区性水循环的影响。对此,必须加以具体对待,因此,不清分同位素源在不同地质作用下的反映及其变化,用某些原始的数据,例如用某些原始的岩浆源以不依赖作用的化学特征的同位素比值^[30]来模拟某一花岗岩形成过程,而不考虑其形成时的地质作用进程控制,将会导致混淆或错误的结论。

4 结论和展望

地壳的物质组分在自然界地质作用进程中形成不同层次的以岩石、矿物、元素直至同位素的共生组合,称为物质组分共生组合法则。其中,元素共生组合是以元素的地球化学行为为特征来标志地质作用进程的基本状态,以原始源区通过不同的地质作用转变为各自的源区,并进一步通过作用体现出地球化学旋回;岩石共生组合总体反映出它们的形成环境及大地构造位置;同位素共生组合是在元素共生组合的前提下,通过元素内部核子的变化与地质作用进程密切结合,以示踪元素来识别有关各种源区和用某些放射性元素组合来确定某些地质事件的时间进程;而矿物共生组合则从自然界中自发过程出发,以平衡热力学及其实验为基础来逼近它们的热力学参数,并通过自然界中残存的信息,来追索热力学状态的变化,进一步试图与有关地质作用的热流传递过程相结合,以达到阐述某些动力学行为的目的。

研究地壳(地球)的物质组分运动的分支学科,其总体方向是共同的,即把这些共生组合看成是一个有机整体,分析它们的规律及其相互联系,从地壳动力学行为上来阐述其形成和演化的过程,并进一步从热流传递的角度和地质环境的迁移,阐述其大地构造环境。目前,这一方面的研究还存在着不少问题和误区,例如单一地用某一组合来标志其大地构造环境,蛇绿岩套用于洋壳,蓝闪石片岩带用于 B 型俯冲,用某一地球化学图解来确定玄武岩的大地构造环境,用某些示踪元素来确定花岗岩成因和用某些放射性元素确定变质作用或岩浆期等等,其中有些问题应该说是严重的。如何体现近代动力学的方向,在工作原则及思维方法上都有澄清的必要。同时,工作上也应具有严肃认真的态度,以野外观察为基础,结合全面的岩石、矿物、地球化学的室内研究,通过有关的理论分析,并结合大地地质环境变迁的实际观察,不断地反馈于自然,才有可能在这方面有所发展和前进。

参 考 文 献

- 1 Goldschmidt V M. *Geochemistry*. [s.l.]: Clarendon Press, 1954. 25
- 2 White A R T, Chappell B W. Ultrametamorphism and granitoid geneses. *Tectonophysics*, 1977, 43: 7~22
- 3 Breithaupt A. *Die Paragenesis der Mineralien*. Freiberg: Engelhardt, 1849. 1
- 4 Lyell C. *Elements of Geology*. London: Murray, 1938. 6
- 5 Fairbridge R W. Continental margin sedimentation. In: Schwab F L, ed. *Geosynclines, Concept and Place within Plate Tectonics*. Stroudsburg, Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 1982. 329~339
- 6 Mitchell A H, Reading H G. Continental margins, geosynclines, and oceanfloor spreading. In: Schwab F L, ed. *Geosynclines, Concepts and Place within Plate Tectonics*. Stroudsburg, Pennsylvania: Hutchinson Publishing Company, 1982. 248~265
- 7 Reading H G. Global tectonics and the genesis of flysch successions. In: Schwab F L, ed. *Geosynclines, Concepts and Place within Plate Tectonics*. Stroudsburg, Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 1982. 340~347
- 8 Judd J W. On the gabbros, dolerites, and basalts of Tertiary age in Scotland. *Quart Journ Geol Soc*, 1886, 54
- 9 Pitcher W S. Granite: typology, geological environment and melt relationships. In: Atherton, M P, Gribble C D, eds. *Migmatites, Melting and Metamorphism*. Nantwich cheohire: Shiva Publishing Limited, 1983. 277~285
- 10 Daubree A. Etudes et experiences synthetiques sur le metamorphisme et sur la formation des roches cristallines. *Mem Acad Sci Paris*, 1860, 17
- 11 Zwart H J. The duality of orogenic belts. *Geol en Mijnb*, 1967, 46(8): 283~309
- 12 Dong S B. Metamorphic and tectonic domains of China. *J Metamorphic Geol*, 1993, 11: 465~487
- 13 Barrow G. On the geology of Lower Dee-side and the southern Highland border. *Geologists Assoc Proc*, 1912, 23: 286~284
- 14 Eskola P. On the relation between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orjarvi region. *Bull Comm Geol Finlande*, 1915, 44: 109~145
- 15 Miyashiro A. Evolution of metamorphic belts. *J Petrol*, 1961, 2: 277~311
- 16 Sobolev V S, Sobolev N A, Dobretsov N L. *The Facies of Regional Metamorphism at High Pressure*. Canberra: University of Canberra, 1975. 249~277
- 17 董申保. 变质作用中原岩建造的地位及作用. 岩石矿物及测试, 1984, 3: 97~103
- 18 Vogt J H L. Über anchi-monomineralische und anchi-eutektische Eruptivgesteine. *Vidensk-Selsk Skr Kristiania*, 1908, 10: 1~104
- 19 Bowen N L. *The Evolution of Igneous Rocks*. Princeton N J: Princeton University Press, 1928. 54~62
- 20 Yoder H S Jr, Tilley C E. Origin of basaltic magmas, an experimental study of natural and synthetic rock systems. *J Petrol*, 1962, 3: 342~532
- 21 Green D H, Ringwood A E. The genesis of basaltic magmas. *Contrib Mineral and Petrol*, 1967, 15: 103~190
- 22 Winkler H G F. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. 4th ed. New York: Springer, 1976. 278~324
- 23 Wyllie P J. Experimental studies on biotite and muscovite-granite and crustal sources. In: Atherton M P, Gribble C D, eds. *Migmatites, Melting and Metamorphism*. Nantwich cheohire: Shiva Publishing Limited, 1983. 12~26
- 24 Johannes W. The significance of experimental studies for the formation of migmatites. In: Ashwartz, ed. *Migmatites*. Glasgow: Blackie, 1985. 36~85
- 25 Turner F J M, Fyfe W S, Verhoogen J. Metamorphic reactions and metamorphic facies. *Geol Soc Am Mem*, 1959, 73: 7
- 26 Lambert R St J. The metamorphic facies concept. *Mineral Mag*, 1965, 34: 283~391
- 27 Spear F S. Relative thermometry and metamorphic *p-T* paths. In: Daly J S, Cliff R A, Yardley B W D, eds. *Ex-*

lution of Metamorphic Belts. *Geol Soc Lond Special Publication*, 1989, 43: 63-81

- 28 Lasaga A C. Geospeedometry, and extension of geothermometry. In: Saxena S K, ed. *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*. New York: Springer-Verlag, 1983. 31-114
- 29 Moorbath S. Recent advances in the application of radiometric age data. *Earth Sci Rev*, 1967(3): 111-133
- 30 Kay R W. Elemental abundances relevant to identification of magma sources. *Phil Trans Roy Soc Lond*, 1984, A 310: 535-537

ON THE RULE OF PARAGENETIC ASSOCIATIONS OF CONSTITUENTS OF EARTH'S CRUST

Dong Shenbao

(Department of Geology, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract The evolving geological processes represent one of the advanced state of motion of matter that consists both the geological and physico-chemical constraints, neither of which can be ignored, nor be replaced. The motion of matter is uniquely characterized by the occupation of constituents of Earth's crust within an immense space and time in nature and forms a grand picture of eternal motion through long-run of flux of time. The progressive stages of motion can be expressed by a series of regular distribution of different modes of formation of constituent of Earth's crust that images the geological processes as a whole, and is named as the rule of paragenetic associations of constituents of Earth's crust which can be matched with the superposition principle in stratigraphy. There have been various modes of formation of paragenetic associations which can describe the different constraints of geological processes. The paragenetic association of rocks reflects the environment of its origin and its relevance to tectonic setting. The paragenetic association of minerals approximates the thermodynamic condition of geological processes, and tends to infer quantitatively the mechanism of heat flow transmission within the deeper crust. The paragenetic association of elements mainly images the source characteristics of various geological processes, and also traces the migration influenced by successive actions through geochemical behavior of elements. Finally, the paragenetic association of isotopes is intimately connected with geological constraints by means of age dating and tracing the source regions of geological processes by isotopic tracers. It is noted that all the paragenetic association are intimately interconnected, and must be treated as a whole in qualifying relevant geological process in order to avoid the misinterpretation of the results which are essential to the researches of modern crustal dynamics.

Key words evolving geological processes, advanced state of motion of matter—geological versus physico-chemical constraints, petrological mineralogical elemental and isotopic paragenetic associations