

构造旋回与大地构造年表

任纪舜, 徐芹芹, 邓平, 肖黎微

中国地质科学院地质所, 北京 100037

摘要: 构造旋回的划分是大地构造研究的基础之一。但板块学说兴起以来, 一些学者基于均变论的哲学思想, 却试图抛弃构造旋回的概念。然而, 随着时间的推移, 地球系统科学的提出, 大规模、多学科地学观测, 人们已认识到突变与灾变的重要性, 认识到渐变与突变相结合的螺旋式向前发展的旋回演化论, 才是更全面、更深刻地认识地质规律的有力武器。

在大地构造研究中, 一些学者常用地层年表, 而不用构造旋回。然而, 以生物地层学为主要依据的显生宙地层年表与构造旋回和构造岩浆事件并不完全耦合。这是因为, 地层年表是在研究地球表生作用, 即岩石圈、水圈、大气圈、生物圈之间相互作用的基础上建立的; 而构造旋回则是地球内生作用, 即壳、幔、核以及壳、幔、核不同层次间多层圈相互作用的历史记录。一些学者在研究大地构造时, 只用同位素年龄表示的构造事件, 不使用构造旋回。然而, “事件”只是单个现象的呈现, 只是构造发展的片段, 旋回则阐明过程, 反映事物发展中各“事件”(片段)之间的内在联系, 反映事物演化的本质。事实上, 威尔逊旋回的建立, 已为构造旋回和构造事件之间的联系赋予了全新的科学内涵, 这也是地质科学发展过程中, 正确处理继承与创新关系的一个光辉范例。一些学者由于对全球造山运动是否是同时性的质疑, 认为建立全球统一构造年表是不可能的, 也是不必要的。可是, 地球作为一个整体, 其动态活动应该基本上同时的, 在受同一地球动力系统控制的一个大区域内, 构造运动在各地虽然不是完全同时, 但却大致是同时的。北美、欧洲、亚洲加里东、华力西旋回的各次构造运动基本上可以互相对比, 就是证明。既然如此, 我们就可以按照优先原则, 将早古生代的构造旋回称为加里东旋回, 将晚古生代的构造旋回称为华力西(海西)旋回。

超大陆和超大陆旋回的提出, 深化了构造旋回的研究, 同时也为建立构造年表开辟了道路。目前已初步提出古元古代哥伦比亚、中元古代罗丁尼亚、新元古代冈瓦纳和显生宙潘吉亚等几个超大陆旋回, 这样, 我们便可以用超大陆旋回作为构造年表中最大一级的时间单位, 每个超大陆旋回又可进一步分为几个旋回, 如潘吉亚旋回可分为加里东、华力西两个旋回。我们相信, 随着地质学、地球化学、地球物理学研究的深入, 随着对固体地球系统和全球地质构造更加深入、全面、系统的观测研究, 不久的将来我们将会像建立显生宙地层年表一样, 建立起大区域以至全球的构造年表。

关键词: 构造旋回; 构造年表; 超大陆旋回; 角度不整合; 造山运动

中图分类号: P541; P542 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2016.05.03

Tectonic Cycles and Tectonic Timescale

REN Ji-shun, XU Qin-qin, DENG Ping, XIAO Li-wei

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The subdivision of the tectonic or geological cycle affords a basis for research on geotectonic evolution. However, since the emergence of plate tectonics, some scholars who adopt the philosophy of uniformitarianism

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: 121201102000150009-01; 121201102000150009-02; 12120115070301)资助。

收稿日期: 2016-06-29; 改回日期: 2016-07-21。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 任纪舜, 男, 1935年生。研究员, 博士生导师, 中国科学院院士。主要从事大地构造和区域地质研究。

E-mail: renjishun@cags.ac.cn.

have tried to abandon the concept of tectonic cycle. Nevertheless, with the elapse of time, the appearance of earth system science, and the observations based on large-scale and multidisciplinary geoscience, people have got to know the importance of sudden and catastrophic changes in the course of crustal evolution, and recognized that the idea of cyclic evolution arguing that the structure of the earth crust develops cyclically and in a spiral-like manner with gradual and sudden changes in combination with each other is a powerful weapon for more comprehensive and profound understanding of the geological laws.

In the study of geotectonics, a number of geologists are inclined to substitute the stratigraphic timescale for the tectonic cycle. However, the Phanerozoic chronostratigraphic chart framed according to biological stratigraphy does not fully agree with tectonic cycle and tectonic-magmatic event. This is because the chronostratigraphic chart is established on the basis of the study of the earth's exogenesis characterized by the interaction between the lithosphere, hydrosphere, atmosphere and biosphere, whereas the tectonic cycle is the historical record of earth's endogenesis characterized by the multisphere interaction of the crust, mantle and core, as well as different layers within them. Some scholars have used tectonic (tectonic-magmatic) events represented by isotopic ages instead of tectonic cycles in studying the geotectonics. However, the "event" is just a display of a single phenomenon, and the "cycle" is the illumination of process, which reflects the internal links between "events" and the essence of the evolution. In fact, the establishing of the Wilson cycle has bestowed new scientific connotations on the connections between tectonic cycles and tectonic events, which can serve as a shining example of handling the relationship between inheritance and innovation properly. Doubting about the synchronicity of the global orogeny, some scholars consider that it is impossible and unnecessary to establish a unified global tectonic timescale. Nevertheless, the dynamic activities of the earth as a whole should be substantially simultaneous. Within a mega-region under the control of a unified geodynamic system, the tectonic movements did not take place exactly at the same time in different places, but they were roughly simultaneous. The tectonic movements of the Caledonian and Variscan cycles in North America, Europe and Asia are basically comparable with each other, which can serve as a convincing proof. It is therefore held that, in accordance with the principle of priority, the early and late Paleozoic cycles can be called the Caledonian and Variscan (Hercynian) cycles, respectively.

The emergence of the theory of the supercontinent and supercontinent cycle has not only deepened the study of tectonic cycles, but also paved the way for establishing tectonic timescale. Some proposed supercontinent cycles, such as the Paleoproterozoic Columbia, Mesoproterozoic Rodinia, Neoproterozoic Gondwana and the Phanerozoic Pangea, could be used as the first-order time unit for the tectonic timescale. Each supercontinent cycle can be further divided into several cycles, such as the Pangea with the subdivision of the Caledonian and Variscan cycles.

It is believed that, like the Phanerozoic chronostratigraphic chart, the mega-regional or even global tectonic timescale will be established in the near future with the deepening of geological, geochemical and geophysical research and the more comprehensive and systematic observation of the solid earth system.

Key words: tectonic cycle; tectonic timescale; supercontinent cycle; angular unconformity; orogeny

大地构造学研究中有两个重要的因子,一个是地球上各类地质构造单元,如大陆、海洋、山脉、盆地、裂谷带、造山带、克拉通等的三维空间展布,另一个是地球各类地质构造单元在时间维的发展演化。因此,建立大地构造演化的时间标尺,历来是大地构造学家首先必须关注的一个问题。历史上著名大地构造学家,从贝特兰(Macel Bertrand),阿尔冈(Emile Argand),斯蒂勒(Hans Stille)到黄汲清,都十分重视构造旋回或造山旋回的研究,并把它作为阐述大地构造演化时间维的标尺。Bertrand(1887)在研究欧洲大地构造时,提出加里东(Caledonian),海西(Hercynian)和阿尔卑斯(Alpine)三个构造旋回(造山旋回);Argand(1924)在研究亚洲大地构造时,认为贝特兰关于加里东、海西(华力西)、阿尔卑斯

旋回之划分适用于全球,并以它们为时间标尺,系统地论述了亚洲以至全球构造;Huang(1945)把加里东、华力西旋回用于中国,并根据东亚地质的实际情况,将阿尔卑斯旋回分为印支(Indosinian)、燕山(Yanshanian)和喜马拉雅(Himalayan)三个旋回(亚旋回),完成了中国大地构造研究的奠基之作。之后,任纪舜(1987)又从全球构造分析,论证了印支、燕山、喜马拉雅旋回的划分。

Hutton(1788)建立的地质旋回或构造旋回(Hutton, 1788年称为地转旋回(geostrophic cycle)),是现代地质学的基本概念之一(图1)。构造旋回或造山旋回的划分是研究大地构造历史演化的基础。随着地质科学的发展,人们对构造(造山)旋回的理解也已日益深化。从地球动力学角度看,构造运动可

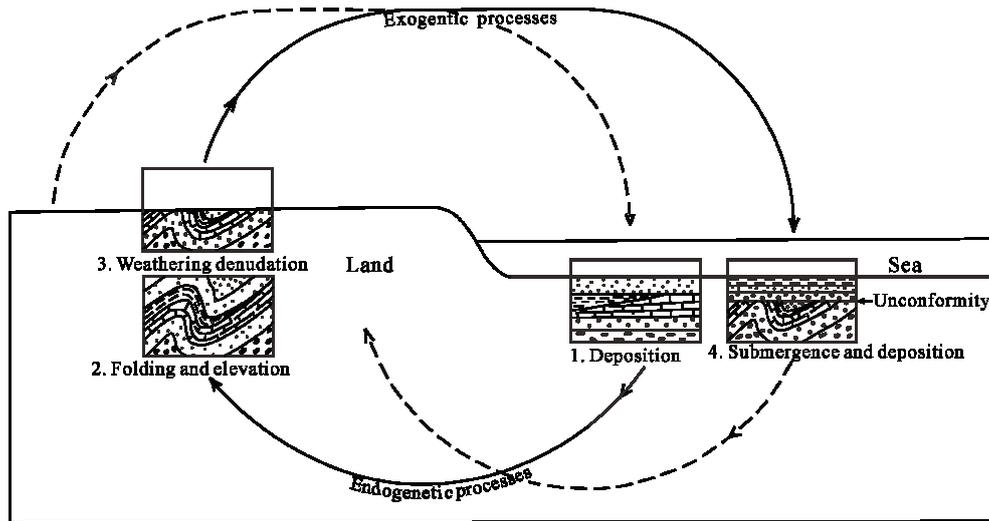


图1 Hutton的地转旋回(geostrophic cycle), 即地质旋回的示意图(据 Tomkeieff, 1962)

Fig. 1 Representation of the "geostrophic cycle" by Hutton, which is a simple diagram of geological cycle (after Tomkeieff, 1962)

分为挤压(造山)型、引张(裂隙)型和剪切型三种类型。造山作用(orogeny)和裂隙作用(taphrogeny)相对应,前者使地壳缩短,形成造山带等挤压型构造;后者使地壳拉伸,形成大洋裂谷带和大陆裂谷带等伸展型构造。剪切作用往往是与造山作用或裂隙作用同时伴生的一种构造作用,形成转换断层或走滑断层,在地壳遭受挤压或拉伸过程中起调节作用,一般不造成地壳的缩短或拉伸。

在地史发展过程中,从空间上讲,板块会聚地带的挤压、褶皱、隆起,必然伴随着板块裂离带的引张、伸展、裂隙,反之亦然,中、新生代大西洋半球的引张、裂隙、膨胀和太平洋半球的挤压、造山、收缩就是一个现实的例证。从时间上讲,相对缓慢的、渐进式发展的引张(或裂隙)作用往往与比较急剧的、突变式发生的挤压(造山)作用交替出现,从而造成依次向前发展的构造旋回。大区域的裂隙作用与大陆的分裂和大洋的打开相对应,而大区域的造山作用则与岩石圈板块间的挤压、碰撞作用密切相关。

1 地层年表与构造年表

地质旋回或构造旋回的发现,是18世纪以来地质科学最重要的成果之一,一直受到地学界的高度重视(Argand, 1924; 黄汲清和姜春发, 1962; 黄汲清等, 1977; 任纪舜等, 1980; Williams, 1981; 王鸿祯, 未发表)。但板块构造兴起以来,一些学者,在大地构造研究中,主要是基于均变论(uniformitarianism)的哲学思想,却试图抛弃造山旋回的概念。然而,随着时间的推移,科学事实的进一步积累,特别是地球系统科学(Earth System Science)思想的提出,对全球变化(Global Change)大规

模多学科观测研究,学者们已愈来愈认识到均变论思想的局限性,认识到不能孤立研究个别因子,必须研究地球系统,并把地球系统看作是在宇宙空间不时受到外界干扰的开放系统,认识到在地壳构造发展过程中,突变与灾变的重要性,认识到渐变与突变相结合的螺旋式向前发展的旋回演化论(cyclic evolution),才是更全面地认识地质规律的有力武器。

地质作用的旋回性已广泛应用于地学研究的各个领域,如米兰柯维奇旋回、侵蚀旋回、沉积旋回、岩浆旋回、造山旋回、成矿旋回、地球化学旋回、生物地球化学旋回以及气候旋回等等。但是,基于受造山旋回认识上某些偏见的影响,一些地质学家在研究大地构造演化时,却常用地层年表代替根据造山旋回建立的构造年表。但是,实际上,构造年表与地层年表并不同步,由板块离散和会聚形成的构造(造山)旋回,在时间上并不与以生物地层学研究为基础的地层年表一致,一些重要的造山运动并不恰好发生在地层年表的地层界线上,而往往发生在某一地质时代之内。如华力西旋回的各次造山运动,并不是发生在晚古生代各纪地层之间,而是发生在泥盆纪、石炭纪、二叠纪内,华力西造山旋回之结束也不是发生在二叠纪末,而是大致发生在中、晚二叠世之间,约260 Ma;中国著名的燕山造山旋回,主要造山运动不是发生在侏罗纪、白垩纪的某一地层界线上,燕山旋回之结束也不是在白垩纪末,而是在白垩世内部,晚白垩世地层往往与古近纪地层连续沉积(任纪舜, 1987; Ren et al., 1999)。

构造年表与地层年表的这种不一致或非耦合关系是显而易见的,究其根源,地层年表主要是以古生物学和沉积学研究为基础,生物化石带是确定

地层相对年代的基本手段。尽管随着同位素年代学的飞速发展,在各地层单位之间陆续都标出了相应的同位素年代,如寒武系底界为 541 Ma,三叠系底界为 252 Ma(Cohen et al., 2013),但地层划分仍然是以古生物化石的研究为其主要手段。这就是说,地层年表主要是在研究地球表生作用(exogenetic or surface processes),即岩石圈、水圈、大气圈、生物圈之间相互作用的基础上建立的。而构造年表,即构造旋回或构造-岩浆旋回的划分则是以生物地层学、构造地质学、岩石学、地球化学以至地球物理学等方面的多学科综合研究为基础,构造活动和岩浆活动过程之确立,是划分构造旋回,建立构造年表的主要依据。也就是说,构造年表主要是地球内生作用(endogenetic or internal processes),即固体地球各层圈壳、幔、核之间以及壳、幔、核不同层次之间,多层圈相互作用之历史纪录。当然,内生作用和表生作用之间亦相互作用、相互影响,即表生作用中有内生作用之叠加影响,内生作用中亦有表生作用的叠加影响。另外,地球作为宇宙的一员,地外天体运行对地球运行过程可能产生的影响,不论对构造年表还是地层年表的建立都是一个不可忽视的因素,所以,我们主张天地合一的地球动力观。目前,地质学家已经注意到大规模火山喷发和宇宙天体与地球碰撞可能是某一特定地质时间(如白垩纪末之恐龙灭绝)生物大灭绝的一个重要因素;构造旋回与银河年之间的可能联系等等(Williams, 1981; Rampino and Stothers, 1984)。但总的说来,目前在这方面的研究还很不深入,知识还很贫乏。

因此,我们认为在根据生物演化建立地层年表的同时,还应根据构造-岩浆演化建立构造年表。只用地层年表来阐述构造演化过程,是不符合客观事物本身的发展规律的,只有划分构造旋回,用构造年表作为构造演化的时间标尺,我们才能更科学、更客观地描述地球的构造演化过程。2014年,国际地科联公布的国际地层年表(International Chronostratigraphic Chart)实际上是地层年表与构造-岩浆年表之结合:显生宙主要是根据生物演化划分的,元古宙和太古宙基本上是根据构造-岩浆旋回划分的构造年表。

2 构造旋回与构造年表之建立

板块构造学说提出之初, Coney(1970)在 Geological Society of America Bulletin 发表“*The geotectonic cycle and the new global tectonics*”一文中,一方面正确地用当时刚刚起步的板块构造模型代替地槽学说的山脉形成模式,另一方面却不恰当地说要抛弃构造旋回这一术语。加之岩石、矿物同

位素测年技术的快速发展和普遍采用,因而使一些地质学家在大地构造研究中,只用同位素年龄表示的构造事件(event)或构造-岩浆事件,不使用构造发展的旋回性概念。然而,用年龄表示的“事件”只是单个现象之呈现,只是构造发展中的某一片段,旋回性则阐明过程,反映事物发展中各事件(片段)之间的内在联系,反映事物演化的本质。因此,我们说用板块学说代替地槽学说解释山脉之形成,并不能否定造山旋回概念的正确性,实际上,威尔逊旋回的建立已十分雄辩地说明了构造事件与构造旋回之间的关系。在板块活动的威尔逊旋回过程中,前期(相当于造山旋回的前造山阶段)是板块分裂、扩张,发育裂谷-被动边缘沉积序列,基性岩浆活动,在扩张过程中形成从超基性岩、基性岩、基性火山岩到放射虫硅质岩的大洋盆地序列;后期,是板块会聚、挤压造山(相当于造山旋回的造山阶段),形成复理石-磨拉斯序列,发育中酸性为主的钙碱性岩浆活动;在板块碰撞后,会聚作用晚期,即晚碰撞阶段(相当于造山旋回的后造山阶段),碱性或偏碱性以及双峰式岩浆活动则是一个重要的特点。再后,又进入一个新的威尔逊旋回演化过程。所以,我们说威尔逊旋回的建立已为构造旋回赋予了全新的科学内涵。这也是地质科学发展过程中正确处理创新与继承关系的一个光辉范例。

一些学者基于对构造运动全球同时性的质疑,认为建立全球统一的构造年表是不必要的,也是不可能的。但是,从全球构造和全球动力学观点来看,地球作为一个整体,其动力演化过程必然是受其统一的地球动力场控制的。在同一动力体系下,构造运动在各地发生的时间虽然不一定完全同时,但却大致是同时发生的,例如,从阿帕拉契亚经欧洲到亚洲的古生代造山带,它们都是在古大西洋—瑞克洋—古亚洲洋动力体系控制下形成的。因此,欧洲、亚洲、北美洲的加里东旋回的造山过程均起始于中奥陶世末期,结束于泥盆纪之前。不论北欧的加里东造山带,还是亚洲的祁连造山带或华南加里东造山带,志留系都是造山阶段的复理石沉积,志留纪与泥盆纪之间都有一个代表加里东造山过程已经结束的区域性角度不整合。欧洲和亚洲的华力西造山旋回也大致同步,重要的造山作用发生在晚泥盆世和早石炭世晚期;华力西旋回之结束都在晚二叠世之前(肖序常和汤耀庆, 1991; Ren et al., 1999; Nance, 2010; Nance et al., 2010)。既然处于同一动力体系下,各地的造山过程大体是同步的,我们就可以像建立地层年表一样,按照优先原则对全球的造山旋回进行统一命名,将早古生代的构造旋回称为加里东旋回,晚古生代的构造旋回称为华力西(海西)旋回,

中新生代的构造旋回称为阿尔卑斯旋回。

角度不整合被认为是认识和确定造山运动,划分造山旋回的重要标志之一,但并不是所有的角度不整合都能代表一次重要的造山运动,只有在地史发展过程中有重要作用的造山运动形成的区域性角度不整合,即在一个相当大的区域内普遍存在,能够识别出的角度不整合,才有大地构造意义,才有划分地史阶段和构造旋回的意义。如中朝准地台中元古代长城群之下的不整合,华南加里东褶皱带(造山带)泥盆系之下的不整合都是良好的例证。过去认为,一个区域性角度不整合代表一次造山运动,是挤压作用的标志,进一步观察研究则证明,不整合面以上的岩层,在多数情况下,一般并不是造山作用同时的沉积物,而是造山后伸展阶段或伸展后另一个大地构造阶段的产物,同造山之复理石-磨拉斯沉积往往是连续沉积,并位于不整合面之下。例如 Hutton(1788)发现的世界上第一个角度不整合(图 2),其下强烈褶皱的志留系复理石属同造山阶段沉积,其上的泥盆系老红砂岩早年曾被认为是加里东造山的磨拉斯沉积,但进一步工作后则发现它并不是同造山之磨拉斯沉积,而是造山后伸展盆地的沉积(Séguret et al., 1989),因此,这一不整合就具有双重构造意义,它既是志留系及更老地层遭受加里东造山运动之标志,也是加里东造山旋回后造山伸展作用的结果。华南加里东造山带与苏格兰加里东造山带的情况类似。分布于湘西、桂北等地的志留系复理石代表加里东同造山沉积,位于不整合面之下,不整合面之上的泥盆系莲花山-跳马洞砾岩、砂岩也不是同造山之磨拉斯,而是加里东后造山伸展作用之后的夷平面上的滨-浅海沉积(图 3)(Ren, 1991)。因此,这一不整合也具双重含义,既标志着华南加里东造山作用之结束,又代表华南一个新的构造旋回之开始。同理,中朝克拉通(准地台)长城群之下的不整合,一方面标志着中条(吕梁)造山旋回之结束,中朝克拉通(准地台)基底之最终形成,另一方面也代表地台沉积盖层发育的开始。

超大陆 (supercontinent) 和超大陆旋回 (supercontinental cycle)研究的兴起(Hoffman, 1991; Unrug, 1996; 王鸿祯, 未发表),深化了造山旋回的研究,同时也为建立构造年表开辟了道路。目前已初步提出古元古代的哥伦比亚超大陆旋回,中元古代的罗丁尼亚超大陆旋回,新元古代的冈瓦纳超大陆旋回和显生宙的潘吉亚超大陆旋回,其中 260 Ma 结束的潘吉亚(Pangea)超大陆旋回已为学者们所公认;其它的超大陆旋回还正在深入探索之中。这样,我们便可用超大陆旋回作为构造年表中最大一级的时间单位,称为巨旋回(megacycle);巨旋回之下,可进一步分为旋回(cycle),如潘吉亚巨旋回可分为加里东和华力西两个旋回;旋回又可以再分为亚旋回(subcycle),如阿尔卑斯旋回在东亚又分为印支、燕山、喜马拉雅三个旋回或亚旋回等。

大陆的分裂与聚合必然影响地球圈层结构的变化,影响地球上海与陆、活动带与稳定区的展布,影响海平面升降、洋流走向、海水中各种元素含量的变化等等。所以,构造旋回与海平面变化、海水化学成分变化、大气中和海水中氧含量变化,以

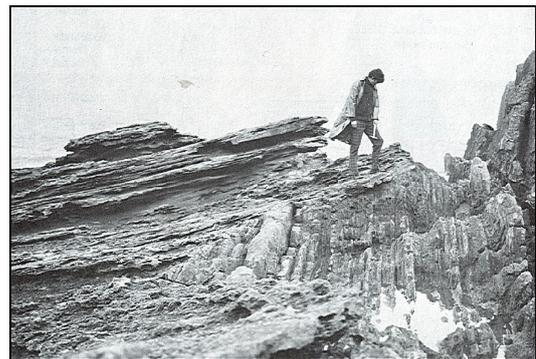


图 2 Hutton 发现的世界上第一个角度不整合 (照片源自 Press and Siever, 1982)

Fig. 2 The first angular unconformity in the world discovered by Hutton (photo from Press and Siever, 1982)
Hutton 于 1788 年,在苏格兰东海岸贝里克郡 Siccar Point 发现该不整合,泥盆纪的老红色砂岩覆盖在直立的志留纪杂砂岩之上
Hutton (1788) discovered the unconformity, where the Devonian Old Red Sandstone beds lie atop vertical Silurian graywackes at Siccar Point, Berwickshire, on the east coast of Scotland

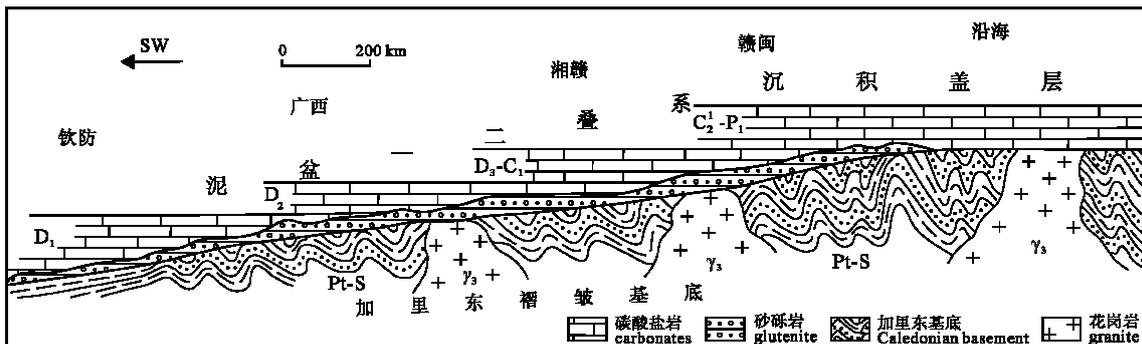


图 3 华南泥盆系—二叠系沉积示意剖面(据任纪舜, 1990)

Fig. 3 Sketch section showing the Devonian-Permian sedimentation in South China (after REN, 1990)

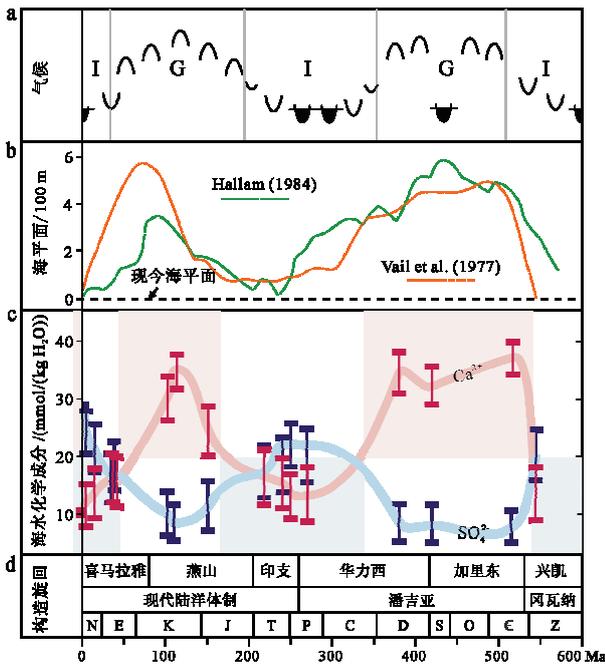


图 4 气候、海平面、海水中化学成分等变化与构造旋回之耦合关系(据 Ren et al., 1999; Lowenstein et al., 2003; Krause et al., 2004 修改)

Fig. 4 The coupling relationship of climate, sea level, and sea water chemistry variations to tectonic cycles (modified after Ren et al., 1999; Lowenstein et al., 2003; Krause et al., 2004)
 a-气候冷暖变化(据 Fischer, 1981; Krause et al., 2004), I-冰室; G-温室; b-显生宙海平面变化(据 Krause et al., 2004); c-显生宙海水中 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 浓度长期变化(据 Lowenstein et al., 2003); d-构造旋回划分(据 Ren et al., 1999)
 a-warm and cold climate fluctuations (after Fischer, 1981; Krause et al., 2004), I-icehouse; G-greenhouse;
 b-eustatic curves for the Phanerozoic (after Krause et al., 2004);
 c-secular variation in Ca^{2+} and SO_4^{2-} concentrations of seawater during Phanerozoic (after Lowenstein et al., 2003);
 d-tectonic cycle subdivision (after Ren et al., 1999)

及地球演化中气候湿热、寒冷时期的交替等方面之间存在一定的耦合关系(Ren et al., 1999; Lowenstein et al., 2003; Krause et al., 2004)(图 4)。通过地球科学的多学科观测, 人们已逐步意识到地球物质运动应该是受统一的地球动力系统之制约。一些看来似乎不相关的自然现象, 实际上往往是互相关联的, 它们在地球系统的物质运动中相互影响, 相互作用。

3 结语

“循环运动是宇宙间一切生命活动最本质的象征和模式”(布鲁诺, 意大利哲学家, 1548—1600 年), “循环运动是所有运动中最完美、最宏伟的运动”(亚里士多德, 古希腊哲学家, 公元前 384—322 年)。大至宇宙天体之螺旋式运动, 小至电子围绕原子核的旋转运动和 DNA 的双螺旋结构, 无不证明先哲们的深刻认识。在数学上, 圆形是最稳定的, 螺旋式运动是最省力、最完美的运动形式。因此, 生命及万物的演化, 必然是螺旋式向前发展的。我们相

信, 随着地质学、地球化学和地球物理学研究的深入, 随着对固体地球系统和全球地质构造更加深入、全面、系统的全球性观测研究, 随着地球科学各学科, 特别是同位素年代学和生物地层学的发展, 定年精度的不断提高, 不久的将来我们将会像建立地层年表一样, 建立起大区域以至全球的构造年表。

致谢: 在本文写作过程中, 关于螺旋式运动曾请教中国科学院著名数学家陶仁骥教授和中国地震局地球物理研究所地球物理学家吴庆举研究员, 使作者获益匪浅, 谨致衷心谢意!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 121201102000150009-01, 121201102000150009-02, and 12120115070301).

参考文献:

黄汲清, 姜春发. 1962. 从多旋回构造运动观点初步探讨地壳发展规律[J]. 地质学报, 42(2): 105-152.
 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 张之孟, 许志琴. 1977. 中国大地构造基本轮廓[J]. 地质学报, 51(2): 117-135.
 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社.
 任纪舜. 1987. 论华力西旋回后全球构造阶段之划分[J]. 地质学报, (1): 21-31.
 任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造[J]. 地质学报, (4): 275-288.
 肖序常, 汤耀庆. 1991. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化[M]. 北京: 北京科学技术出版社.

References:

ARGAND E. 1924. Tectonics of Asia[M]. Translated and edited by Carozzi A V. 1977. New York: Hafner Press.
 BERTRAND M. 1887. La Chaîne des Alpes et la formation du continent européen[J]. Bulletin de la Société Géologique de France, 15 (3): 423-447.
 COHEN K M, FINNEY S C, GIBBARD P L, FAN Jun-xuan. 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart[J]. Episodes, 36(3): 199-204.
 CONEY P J. 1970. The geotectonic cycle and the new global tectonics[J]. Geological Society of America Bulletin, 81(3): 739-747.
 FISCHER A G. 1981. Climatic oscillations in the biosphere[C] //NITECKI M H. Biotic Crises in Ecological and Evolutionary Time. New York: Academic Press, 103-131.
 HALLAM A. 1984. Pre-Quaternary sea level changes[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 12: 205-243.
 HOFFMAN P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gond-

- wanaland inside-out?[J]. *Science*, 252(5011): 1409-1412.
- HUANG T K, JIANG Chun-fa. 1962. Preliminary investigation on the evolution of the earth's crust from the point of view polycyclic tectonic movements[J]. *Acta Geological Sinica*, 42(2): 105-152(in Chinese with English abstract).
- HUANG T K, REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, CHANG Chih-meng, XU Zhi-qin. 1977. An outline of the tectonic characteristics of China[J]. *Acta Geological Sinica*, 51(2): 117-135 (in Chinese with English abstract).
- HUANG T K. 1945. On Major Tectonic Forms of China[J]. *Geological Memoirs (Ser. A)*, (20): 1-165.
- HUTTON J. 1788. Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the Globe[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1(2): 209-304.
- KRAUSE F F, SCOTESE C R, NIETO C, SAYEGH S G, HOPKINS J C, MEYER R O. 2004. Paleozoic stromatolites and zebra carbonate mud-mounds: global abundance and paleogeographic distribution[J]. *Geology*, 32(3): 181-184.
- LOWENSTEIN T K, HARDIE L A, TIMOFEEFF M N, DEMICCO R V. 2003. Secular variation in seawater chemistry and the origin of calcium chloride basinal brines[J]. *Geology*, 31(10): 857-860.
- NANCE R D, GUTIÉRREZ-ALONSO G, KEPPIE J D, LINNEMANN U, MURPHY J B, QUESADA C, STRACHAN R A, WOODCOCK N H. 2010. Evolution of the Rheic Ocean[J]. *Gondwana Research*, 17(2-3): 194-222.
- NANCE R D. 2010. The Rheic Ocean: Palaeozoic evolution from Gondwana and Laurussia to Pangaea—Introduction[J]. *Gondwana Research*, 17: 189-192.
- PRESS F, SIEVER R. 1982. *Earth (Third Edition)*[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company.
- RAMPINO M R, STOTHERS R B. 1984. Geological rhythms and cometary impacts[J]. *Sciences*, 1226(4681): 1427-1431.
- REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, ZHANG Zheng-kun, QIN De-yu. 1980. *The Geotectonic Evolution of China*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- REN Ji-shun, WANG Zuo-xun, CHEN Bing-wei, JIANG Chun-fa, NIU Bao-gui, LI Jin-yi, XIE Guang-lian, HE Zheng-jun, LIU Zhi-gang. 1999. *The Tectonics of China from a Global View—A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions*[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- REN Ji-shun. 1987. On the post-Variscan global tectonic stages[J]. *Acta Geological Sinica*, (1): 21-31 (in Chinese with English abstract).
- REN Ji-shun. 1991. On the geotectonics of southern China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 4(2): 111-130.
- SÉGURET M, SÉRANNE M, CHAUVET A, BRUNEL M. 1989. Collapse basin: a new type of extensional sedimentary basin from the Devonian of Norway[J]. *Geology*, 17(2):127-130.
- TOMKEIEFF S I. 1962. Unconformity—an historical study[J]. *Proceedings of the Geologists Association*, 73(4): 383-417.
- UNRUG R. 1996. The assembly of Gondwanaland: scientific results of IGCP project 288: Gondwanaland sutures and mobile belts[J]. *Episodes*, 19(1): 11-20.
- VAIL P R, MITCHUM R M JR, THOMPSON S III. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4: global cycles of relative sea level[C]//PAYTON C E. *Seismic Stratigraphy—Application to Hydrocarbon Exploration*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 26: 83-97.
- WILLIAMS G E. 1981. *Megacycles: Long-term Episodicity in Earth and Planetary History*[M]. Stroudsburg, Woods Hole: Hutchinson Ross Publishing Company.
- XIAO Xu-chang, TANG Yao-qing. 1991. *Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Paleo-Asian Composite Megasuture*[M]. Beijing: Scientific and Technical Publishing House(in Chinese).