

从地层记录的时空有序性解读地层学发展

王龙¹,张瑞¹,华柑霖²,张磊²

1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

2.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

摘要 自20世纪70年代以来,随着多重地层划分理论的提出和各种测试方法、手段的应用,一系列地层学分支学科开始出现。众多的地层学的分支学科极大地开阔了地层学研究领域,使地层学理论百家争鸣,向着多侧面、多层次和多尺度的方向发展,但较为专一的研究对象也使其趋向碎片化。因而,重新回顾地层学的发展历程,发现依据不同特征和属性建立的地层单位之间的关联,将趋向碎片化的地层学作为一个整体进行思考很有必要。就此从时空有序性的角度,系统总结和梳理了地层记录的不完备性、穿时性、旋回性、非渐变性和不可逆性。发现在地层记录中,尽管岩性变化、生物变化、物理变化和化学变化并不是严格地统一到时间变化中,但它们在时间和空间中的分布是有序和有规律的,是虽然不具备等时性但具备时间秩序性的沉积体。从下老上新的斯坦诺地层三定律,到空间上毗邻关系可以转化为时间上相随历史的瓦尔特相律,地层学不仅用上、下、左、右表达空间概念,也揭示其时间属性;不整合刚提出时仅仅是一个构造概念,是褶皱幕或造山幕导致的地层关系在空间上的不协调,但现今却包含了更多的时间属性,定义为地层记录的长时间缺失;地层旋回一开始是对地层重复性的描述,但随着第四纪米兰科维奇旋回的研究,证实它与沉积层序都是天文节律(时间)的产物。在复杂的地层记录中发现和恢复其有序的时空关系,揭示地层记录的时空有序性成为了地层学所有分支学科共同面临的主题,也使其相互交融。

关键词 地层记录;地层属性;沉积层序;穿时;时空秩序

第一作者简介 王龙,男,1990年出生,博士研究生,沉积学及油气地质学,E-mail:wanglong1127@163.com

中图分类号 P539 **文献标志码** A

0 引言

17世纪丹麦学者N. Steno提出的地层三定律和18世纪英国工程师Smith提出的生物层序律奠定了岩石和生物地层学的基本原理及研究方法,并厘定了最初的地层系统,使得第一张地层表在1799年诞生^[1-3]。几乎与Smith同时,法国地质学家Cuvier与Brongniart注意到地层记录中的沉积间断是普遍的和客观存在的,进一步推断地球经常遭受各种突如其来的灾难,有的规模很大甚至具有全球性,过去发生的事情与今天是很不相同的^[3-5]。这种“灾变论”的观点逐渐被Lyell^[6]的“均变论”所取代,他认为地球巨大的地貌变化是在看似微弱的流水、风和潮汐等地质作用的缓慢改造下形成的,强调“现在是认识过去的钥匙”^[7]。在此后的一个世纪里,“将今论古”的现实主义原理成为了地质学家的信条,并随着开始运用生物群而不仅仅依靠单个化石来划分和对比地层,“相”概念的引入,以及古地理学和古生态学的出现,地层学变得更加丰富和成熟,开始向综合研究的方向

发展^[1-2,6,8],最具标志性的事件之一是《地层学原理》于1913年的正式出版^[9]。这本巨著不仅包含地层学本身,而且还包含后来从地层学中独立出去的沉积学等学科,统一而无所不包的地层学研究是这个时期的主题和追求^[1-2,6-9]。

但地质学家慢慢发现,由于地层记录的复杂性和不完备性,很难用某一标准定义出放之四海而皆准的统⼀的地层单位,从而在上世纪70年代形成了以多重地层划分概念为核心的现代地层学理论^[2,8,10]。多重地层划分概念认为岩层是客观物质,拥有许多不同的特征和属性,依据它的不同特性,可以划分出不同的地层单位,各类单位的界线可以一致,也可以不一致^[1-3]。这种分类理念随着各种测试手段和方法的应用,以及板块构造学说的诞生和灾变论等地质思想的复兴,促使一系列地层学分支学科出现,除传统的年代地层学、岩石地层学和生物地层学外,磁性地层学、生态地层学、化学地层学、事件地层学、地震地层学、旋回地层学和层序地层学等新兴学科理论也蓬勃发展^[1,11-14]。

这些研究对象较为专一的地层学分支学科的出现和发展无疑有助于地层学研究的深入和细化,但我们也不禁疑问,根据不同特征和属性建立的地层单位之间是否存在关联?以及是否存在贯穿于这些地层学分支学科发展的主线,从而重新将趋向碎片化的地层学作为一个整体进行思考?回顾地层学发展史,尽管在地层记录中,岩性变化、生物变化、物理变化和化学变化并不是严格地统一到时间变化中,但是它们在时间和空间中的分布是有序和有规律的,这种对地层记录的时空有序性的揭示正是所有地层学分支学科共同面临的主题。因而,本文系统总结和梳理了地层记录的时空特性,并以建立了地质时间坐标的国际地层年代表和归因于天文节律的沉积旋回为例,阐述了地层学不同分支学科在揭示地层记录时空有序性的过程中如何相互影响并走向统一。实际上,地层学发展的历程就是对地层记录时空有序性认识不断深化的过程。

1 地层记录的时空特性

1.1 地层记录穿时的普遍性和对不整合的新认识

基于对意大利北部山脉的野外观察,丹麦学者 N. Steno 于 1669 年提出地层层序律(又称地层叠覆律),即年代较老的地层在下,年代较新的地层叠覆在上^[1-3],认为地层是呈“满天毛毛雨式”或“落雪式”地一点一点地垂向堆积而形成的(图 1a)。地层叠覆律阐述了一类重要的地层沉积作用方式——垂向加积作用,并为未经历重大构造变形的地区提供了一个确定相对地层年代的基本方法。但人们很快认识到,伴随着海侵—海退过程,沉积物更倾向于沿水平方向的侧翼堆积,一个砂体或者生物礁总要随着环境的变

化而产生横向迁移,这种迁移的普遍性造成了岩层穿时的普遍性^[15-18](图 1b)。事实上,在地层形成过程中,侧向加积作用和垂向加积作用往往密不可分,所有沉积的地层几乎都是两个堆积作用叠合的结果,最终导致了岩石地层单位穿时的普遍性^[15-19]。尽管地质学家很早就认识到地层因沉积作用导致的穿时性——即地质记录在时间上的不连续性或间断性,但直到“水下不整合面^[20-21]”这一概念的提出,才发现沉积穿时性的强度和多样性仍然被低估。

不整合最初专指褶皱作用导致的两套产状明显不同的地层之间的角度不整合,是一个构造概念。19 世纪后,化石开始普遍应用于确定岩层的地质年龄^[4],发现两套没有构造显示、相互平行的地层之间也可能存在上百万年甚至上亿年的沉积间断,并命名为平行不整合。平行不整合的命名让不整合面开始有了地层学的含义。虽然仍然认为其成因是构造主导的,即当区域遭受构造抬升时发生剥蚀作用,后期沉降后又开始接受沉积,从而形成不整合面。但对不整合的理解开始从地层关系在空间上的不协调,转变到在时间属性上的不连续,具体表现为地层记录的长时间间断或缺失。不整合本身就蕴含着穿时性的概念,这是地层的沉积方式所决定的。即便假定出极端的地质条件:某一区域在瞬间被整体抬升,形成暴露剥蚀面,然后再整体沉降接受沉积,形成的不整合面依然是穿时的。这是因为暴露剥蚀面不可能被“落雪式”的垂向加积所等时覆盖,只能在垂向加积和侧向加积的共同作用下形成一个穿时面。

有趣的是,虽然关于层序应用最广泛的定义是 Vail *et al.*^[22]提出的“由不整合面及其可对比的整合面所限定的单位”,但大家都明显忽视了不整合面作

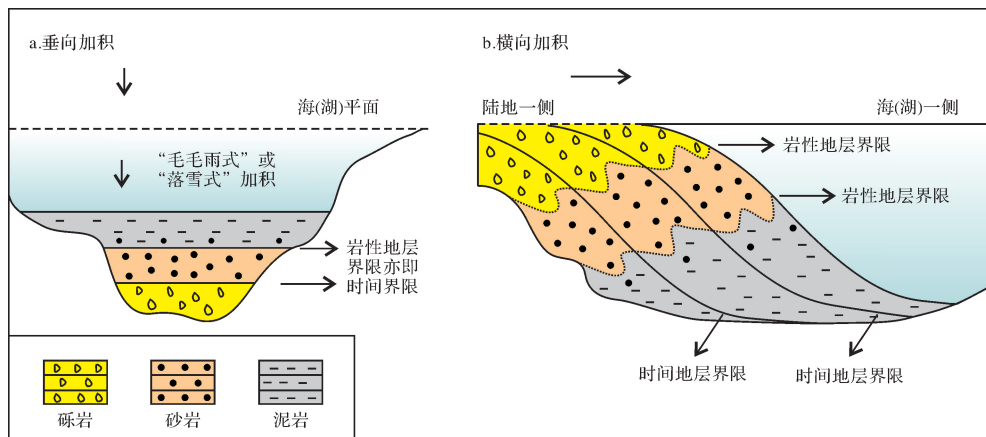


图 1 两种沉积模式示意图(修改自文献[17-18])

Fig.1 Two different depositional patterns (modified from reference [17-18])

为层序界面的穿时性,而强调“层序地层学建立了地层的等时格架”,这或许与层序地层学的发展历史有关。层序地层学是在地震沉积学的基础上发展起来的,地震沉积学假定^[23-24]:1)地震反射同相轴基本上是沉积等时面,而非宏观岩性界面的反映;2)各反射同相轴的系统中断面也具有一定的等时性,表示某一时刻的沉积间断,因而未加论证的认为依此建立的层序在时间属性上是一致的。实际上,不仅仅是层序界面,层序内部也包含了广泛的穿时性^[25]。如果我们把层序地层从空间域的分布转化为时间域的分布,就会发现每一个被解释出来的沉积体的边界均是穿时的(图2)。这些穿时的沉积体界面中有两个最大穿时面,分别为一系列地震反射轴上超的界面即陆相不整合面,和一系列地震反射轴下超的界面即最大海泛面(水下不整合面)^[20-21,25](图2)。如果把每一个地震反射轴看作近似等时的话,不难得到这两个面必然穿时的结论。虽然当时并未提到“水下不整合面”的问题,但自觉或不自觉的运用这两个不整合面建立了

两种层序地层学模式,即以陆上不整合面及可对比的整合面作为边界的 Vail 学派建立的 I 型和 II 型层序地层模式^[23-27],以及以水下不整合面(最大海泛面)及可对比的整合面作为层序边界的 Galloway 学派建立的成因层序地层模式^[26-27](图2)。

如果说陆上不整合面作为一个剥蚀作用或风化作用面,本身就明显表现出穿时性的话,那么由沉积物非补偿产生的饥饿性作用乃至非沉积作用形成的水下不整合面则更为隐秘。但结论是明显的:无论是侵蚀作用、非沉积作用,还是沉积作用(天然表现为侧向加积和垂向加积的叠加),都能造成地层的缺失与穿时,是地层记录不完备性和穿时性的具体表现。因而在对地质历史的记录者——地层的研究过程中,岩层体和界面(间断面)同等重要。岩层体以旋回的形式记录着地质历史的连续变化,界面(间断面)则确定这些岩层体的时间框架和归属。尽管地质作用过程繁复复杂,但依然可以根据地层记录恢复其时空秩序。

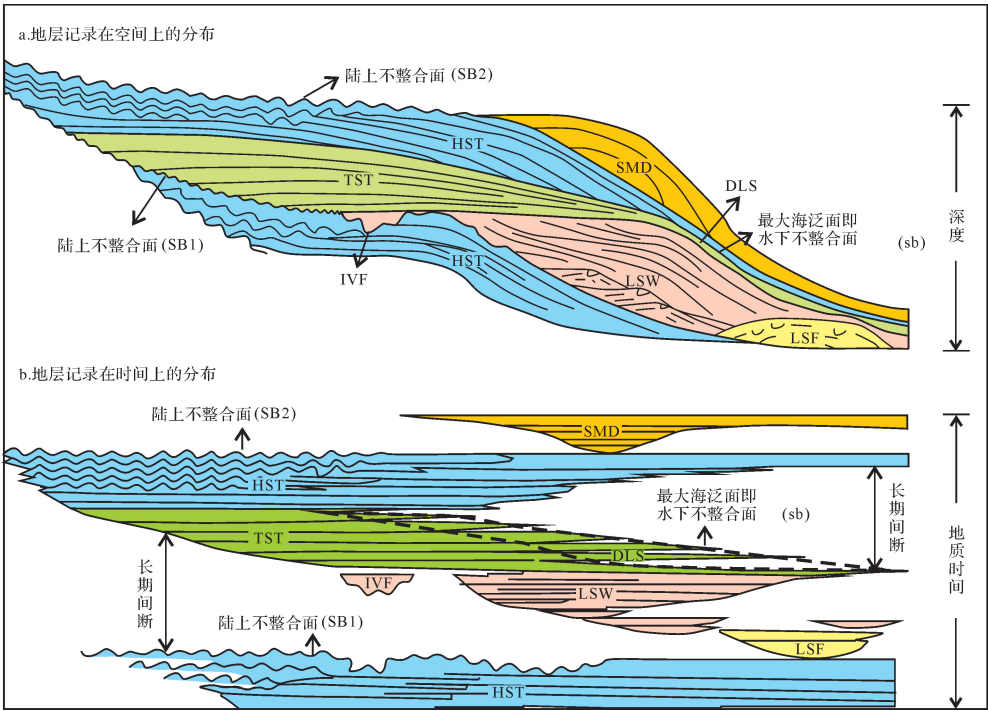


图2 层序界面及内部沉积体的穿时性和陆上、水下两种不整合面的示意图^[22-28]

LST 代表低水位体系域,包括低位扇(LSF)和低位楔状体(LSW);HST 为高水位体系域;TST 为海进体系域;SMD 表示陆架边缘沉积;IVF 表示下切谷;DLS 表示凝缩段沉积;SB1 为 Vail 定义的 I 型层序界面;SB2 为 Vail 定义的 II 型层序界面;sb 代表 Galloway 定义的成因层序界面

Fig.2 The diachronism in sedimentary sequence and two kinds of unconformities^[22-28]

LST represents lowstand systems tract, including lowstand fans (LSF) and lowstand wedges (LSW); HST is highstand systems tract; SMD is transgressive systems tract; SMD is continental margin sediments; IVF is incised valley; DLS represents condensed section; SB1 is sequence boundary of type I defined by Vail; SB2 is sequence boundary of type II defined by Vail; sb is genetic sequence boundary

1.2 地层记录的旋回性——归因于天文节律的沉积节律

在研究巴黎盆地第三纪化石时,Cuvier 和 Brongniart 发现了生物集群灭绝的现象,并于 1821 年提出灾变论的观点^[29],但逐渐被“现代地质学之父”Lyell 的均变论所取代。Lyell 强调“现在是认识过去的钥匙”,认为地球历史是长远且渐进的,地球表面的所有特征被看似“微弱”的、难以觉察的地质作用力(如风、河流、潮汐等)所塑造^[6-7]。“将今论古”的现实主义原则奠定了现代地质学的科学基础^[6-7],与瓦尔特相律(只有在横向上成因相近且紧密相邻而发育着的相,才能在垂向上依次叠覆出现而没有间断)一起,成为现代动力地层学分析和相分析的基础,反应了叠覆的地层和沉积相在空间上和时间上的有序性。

这种有序性的一个重要表现是幕式(周期性)的堆积过程。地质学家较早就注意到地层中发育一系列沉积旋回的现象,其中洛非尔旋回层就是典型代表,但由于成因机制得不到合理解释而被忽视。20 世纪 80 年代末,费希尔和其他地层学家根据米兰科维奇理论分析了沉积旋回与地球轨道效应旋回之间

的成因联系^[30](图 3a),将沉积旋回进一步定义为天文旋回,提出了旋回地层学。

在旋回地层学诞生之前,纹层(lamina)、层(bed/layer/stratification)、层束(bundle)、层束组(bundl-
eset)和超层束组(superbundl-
eset)是地层学中经常使用的描述性或记录性术语(图 3b)。纹层指成分、结构相对均一,厚度为毫米级(小于或等于 1 mm),肉眼可见的最小地层单元;层的厚度较大,为厘米级或厘米级以上,可以横向延伸几厘米至数千米;层束由 2 种或 2 种以上不同的纹层或层构成,通常成对出现;超层束组由多个层束组合而成,界面通常为显示度较高的自然层面,在空间上具有较稳定的延伸和较大范围的分布^[31]。而旋回地层学的诞生则赋予纹层、层、层束和层束组等术语解释性含义,认为这些纹层所代表的级序结构是时间循环性在地层记录中的具体表现。已被证实的第四纪米兰科维奇旋回中,单个旋回的周期大致是 10 万年,对应短偏心率变化周期;一般 4 个单旋回组成一个更大级别的大致 40 万年的旋回,对应长偏心率变化周期^[31-32](图 3)。

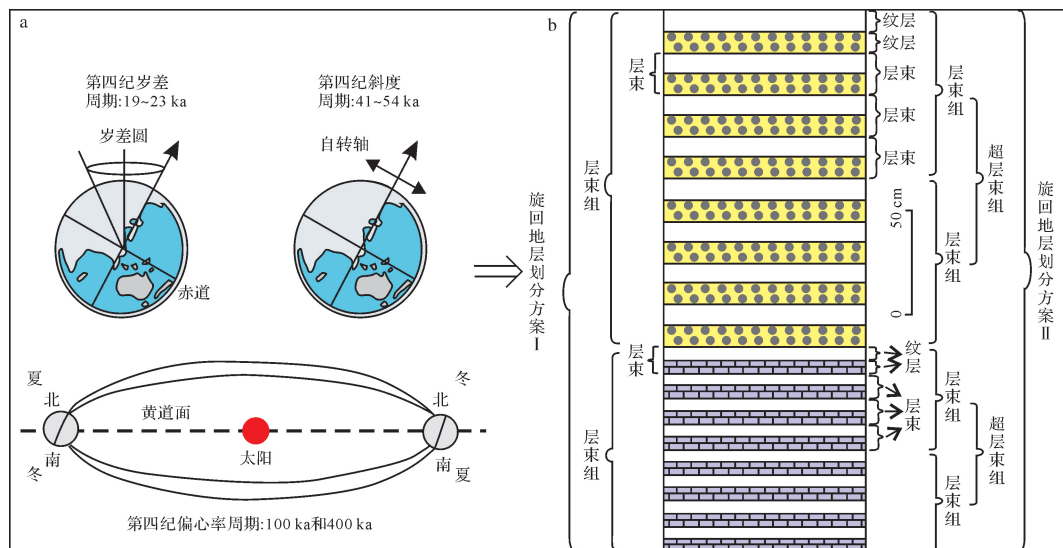


图 3 导致米兰科维奇旋回的地、月、日系统(a)及旋回地层的级序结构(b)^[31]

米兰科维奇旋回是指地球的 3 个轨道要素,偏心率、斜度(黄赤交角)和岁差发生周期性变化而使地球气候发生规律性变化的现象,这种周期性变化出自月球、木星等天体的影响。偏心率是地球绕太阳公转椭圆轨道的赤道半径与极半径之差与赤道半径之比,第四纪的变化周期为 10 万年;斜度是地球绕太阳公转的轨道平面(黄道面)与赤道面的夹角,第四纪的变化周期约为 4 万年;岁差是指地球自转轴的进动,春分点沿黄道面向西缓行,使回归年短于恒星年的现象,岁差周期在第四纪约 2 万年

Fig.3 The Milankovich cycle caused by earth-moon-sun system (a) and the hierarchical structures of cyclostratigraphy (b)^[31]
The Milankovich cycle is the periodic variations of the earth's climate caused by three orbit elements of the earth, eccentricity, obliquity (Huang Chi angle) and precession, influenced by the moon, Jupiter and other celestial bodies. Eccentricity is ratio between the difference (the equator radius minus the polar radius) and the equator radius of elliptical orbit that the earth goes around the sun, and the change period is 100 thousand years in Quaternary. The obliquity angle between the plane and the equator, and the change period is 40 thousand years in Quaternary. The precession is the variation of earth rotation axis, which ambles to west along ecliptic plane on the equinox. And the change period is 20 thousand years in Quaternary

第四纪米兰科维奇旋回周期和时长的确立,给更古老地层记录的解释提供了新的思路 and 认识。例如认为层纹石或纹理石的纹层反应沉积环境和气温的周年循环,分为年纹层和季纹层,从而根据这些层纹的韵律变化可近似得到地层的沉积周期和时长^[30-32]。第四纪米兰科维奇旋回的证实和天文节律的提出也让层序地层学逐渐摆脱了“构造海平面变化”的概念,将控制层序形成的海平面变化机制归因于天文旋回^[33]:一级层序旋回与银河年旋回对应;二级层序旋回与银道面旋回对应;三级层序旋回与奥尔特星系旋回对应;从而将地层各圈层复杂运动和响应机制纳入了天文旋回的框架。

1.3 地层记录的非渐变性和不可逆性

渐变论将地质科学带上了理性的轨道,但越来越多的证据表明“现在不一定是过去的钥匙”,地层记录的旋回性也经常被一些灾变事件所打破。例如在地层中找不到表明生物缓慢进化的连续化石,相反却在化石中经常发现有些物种突然出现,另一些物种又突然消失^[4-5],这是不能仅仅依靠地层记录的不完备性来解释的,何况地质历史上不乏大规模生物“集群

灭绝”的现象。这些证据让地质学家们重新思考,导致了“间断平衡论”等学说的提出^[34-35]。地层记录既不是“均变的”,也不是“灾变的”,而是非渐变的,是两者的结合。“将今论古”的现实主义原则奠定了现代地质学的基础,对建立地层记录的时空秩序予以科学的指导;而对地层记录中时不时出现的“不协调”的点——突变或者灾变事件的研究,形成了新的学科分支事件地层学,这些突变或灾变事件常表现为沉积间断、不整合、古生物演化系列中断和特殊的事件沉积层等,成为划分对比地层和建立等时格架的重要依据。

显生宙之前发生的最具标志的全球性事件是两次巨型氧化作用事件(GOE)^[36]。第一次大致发生在2.0~2.5 Ga 期间,地球大气圈经历了从缺氧到含氧的转变,对应的碳同位素值有较大的异常,并与同时代冰川作用即休伦冰期存在着重叠式发育的特点^[36-37](图4)。关于元古宙早期GOE的起因存在很多假说:如火山活动变弱和地幔温度下降使海洋中镍亏损,导致依赖于镍的产甲烷菌大量死亡,大气圈中的甲烷减少对氧气的破坏变弱,适应氧气这种“毒素”的产氧微生物增多,从而大气圈中的氧含量进一

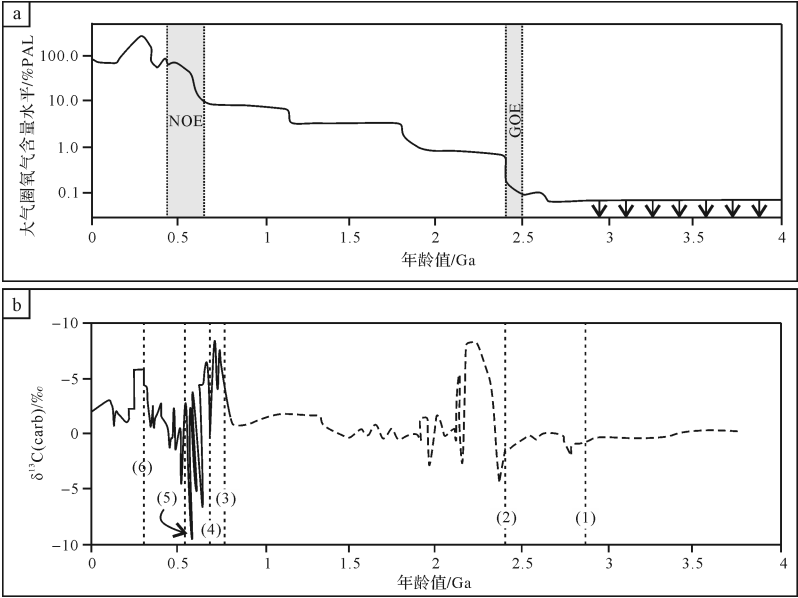


图4 地球的演化与非渐变和不可逆的地质过程

a.地球大气圈的氧气含量水平随时间的变化曲线^[36-37];b.海洋中碳同位素的变化和地球上的6次主要冰期事件:(1)地球上最古老的冰川作用,(2)休伦冰期,(3)Sturtian冰期,(4)Marinoan冰期,(5)Gaskiers冰期,(6)石炭系—二叠系冰期。箭头指代很低的氧气含量周期,虚线代表有限的资料^[36,38]

Fig.4 The geological evolution of Earth and its punctuated equilibrium and irreversibility

a.The change curve of oxygen level in the atmosphere over geological time^[36-37]; b.The change curve of carbon isotope in marine and the 6 main glacial events on Earth, (1) oldest glaciation, (2) Huronian glaciation, (3) Sturtian glaciation, (4) Marinoan glaciation, (5) Gaskiers glaciation, (6) Carboniferous-Permian glaciation. The arrow marks a very low oxygen content, and the dashed line represents the geological period with limited data^[36,38]

步提升^[37]。但这次事件的深远影响却是毋庸置疑的:一定量氧气的出现对地球地形和海岸的变化起到了促进作用,氧气侵蚀的岩石向海洋释放出大量的铁、磷等营养物质,又导致了蓝细菌和藻类生物的爆发,最终又导致光合作用的增强^[37,39]。

在大约 540~850 Ma 的前寒武纪—寒武纪过渡时期,被命名为新元古代氧化作用事件(NOE)^[36,38] 的第 2 次巨型氧化作用事件(GOE-II) 发生了。这段时期碳同位素异常值处于巨大的变化之中(图 4), 被称作“咆哮的 300 Ma^[36-40]”。NOE 也与其他一些事件密切相关,例如生物发生了重要的革新、罗迪尼亚大陆发生裂解和冈瓦纳大陆再次汇聚,它们以埃迪卡拉动物群和寒武纪“生命大爆发”为代表,如还有一个著名的影响即“雪球地球^[41]”事件。1992 年, Kirschvink^[41] 首先提出在新元古代(550~800 Ma) 曾经出现过几次“雪球地球”事件:极地冰盖扩展到赤道,整个地球被冻成一个大雪球,无数物种灭绝,仅有部分物种在深海地热口、冰盖下液态水坑等地方或以孢子休眠的方式幸存下来,火山喷发的二氧化碳因地球生物不能光合作用而逐步累积,最终形成的温室效应才使地球走出冰封。

而显生宙有大量化石记录以来,共发生了 5 次大家已经比较熟知的以大规模生物灭绝为标志的全球性事件^[42]: 1) 大约 440 Ma 奥陶纪末期发生的第一次物种大灭绝,推测全球气候变冷所致; 2) 大约 365 Ma 泥盆纪后期发生的第二次生物大灭绝,推测为全球变冷,海洋缺氧导致; 3) 大约 250 Ma 二叠纪末发生的第三次生物大灭绝,推测为气候突变、沙漠肆虐、火山喷发导致; 4) 大约 200 Ma 三叠纪晚期第四次生物大灭绝,推测海洋缺氧和酸化导致; 5) 大约 65 Ma 白垩纪第五次生物大灭绝,推测星星撞击,火山喷发所致。

这些事件表明地质历史不仅仅是旋回性量变的过程,还有质变的存在。现今的地球无论是大气圈构成、生命形式、气候条件,还是海水盐度和海平面变化等,都与地质历史时期差别巨大;虽然今天的地球大气圈由 21% 的氧气所组成,但在地球形成的最早期,大气圈是缺乏氧气的;地球最早期是缺乏生命的,出现生命后各个纪、世的主要生命形式又有很大不同;地球的气温是变化多端的,在冰室期和温室期之间来回转化;地球的磁场、海水的盐度、火山喷发的多寡等等都是不断变化着的参数。这些质变让地球历史成为一个不可逆的过程,对“将今论古”的现实主义原则构成巨大挑战,形成了一系列谜一样的问题:为什

么古生代及其以前的地层以白云岩为主,而中生代以来主要为灰岩沉积?为什么太古代和元古代有大量的微生物成因的岩石如叠层石,但极少有实体化石保存下来?……但与此同时,这些不同表现为一个个“地质事件”被记录和保存在地层中,给予我们恢复地层记录时空秩序的证据和可能性。

2 地质时间坐标下的时空秩序

时间是全球统一的度量,因而年代地层表的建立使各国地质学家得以在相同的时间界面上探讨具有全球意义的地质和生物事件。在地层记录中,生物变化、物理变化、化学变化并不是严格统一到时间变化中,这是一个最基本的事实。基于某一类标准划分的地层单位都非十全十美,但各类地层的划分对比方法都不断交融。年代地层最初的建立主要依靠化石,其理论依据是英国地质学家史密斯于 1796 年提出化石层序律:含有相同化石的地层其时代相同。但年代地层学和生物地层学有着本质的不同。一类生物化石从出现到消亡是一个时间段,根据地层中化石的组合内容、繁盛和延续时限,生物地层可划分为组合带、局限带和顶峰带等^[43-44],这些生物地层单位是穿时的。而年代地层的界限是一个时间点,是严格的等时界面。尽管年代地层的划分遇到了一些困难,比如“阶”的实际内容其实是生物带的归并,因而有人主张“阶”是生物地层单位^[43,45],并怀疑另立时间地层单位的必要性。但随着放射性同位素定年技术的发展,旋回地层学和事件地层学等的诞生,建立全球可对比的地层等时格架的任务沉舟侧畔,重启征程。

近 40 年来,年代地层学最主要的进展是在显生宇内建立“金钉子”,即国际一致的阶一级的全球标准层型剖面 and 点位(GSSP)。传统的“年代地层单位”是由单位层型定义的,这会造成地层(时间)的重复或者缺失(图 5)。因为单位层型定义了某一段剖面,有的剖面甚至是岩石地层单位转化而来的,这样的地层记录必然有着普遍的穿时性和不完备性。例如图 5 中建立在甲地的 A 阶地层单位的上界,与 B 阶地层单位的下界很可能有地层(时间)的缺失,这两条界线极有可能是不等时的;同样,立在甲地的 B 阶地层单位的上界,与 C 阶地层单位的下界也很可能有地层的重复或缺失;据此建立的全球年代地层必然是不连续和不完整的^[44-48]。而作为不同地质年代所形成的地层的全球唯一标准,“金钉子”不再定义某一个层型剖面,只采用界线层型定义一个年代地层

的底界,这个底界自动成为下伏单位的上界。也就是说,一个年代地层单位本身并无上界,它是借用上覆单位的底界作为它的上界,从而确保在不同地点所建立的年代地层单位叠加成一个整体后,不会出现地层重复或缺失的情况(图 5)。即在时间上是一个单向连续曲线,是一个完全连续的年代地层和地质年代框架,从而满足年代地层单位基本概念上要求的时间流逝的理论^[44]。金钉子可以用来确定和识别全球两个年代地层之间界线的精确位置。

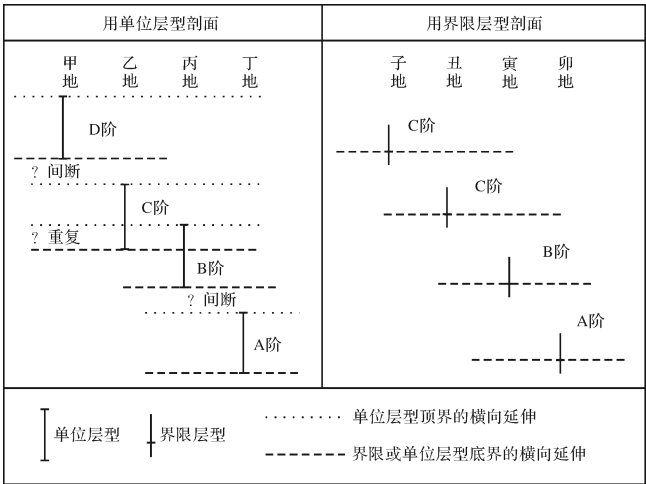


图 5 分别用界线层型和单位层型定义的年代地层框架示意图^[44]

Fig.5 Chronostratigraphic framework defined by boundary-and unit-stratotype respectively^[44]

在地层划分和对比过程中,事件地层学也取得了重要成果。新的年代地层划分原则不再要求同一地层年代的均分(如每个纪的持续时间可以有较大差别),而是让年代地层边界尽量靠近某一全球性事件^[49-50],将灾变事件的影响运用到地层对比当中,这种“自然主义年表^[50]”代表着未来国际年代地层学尤其是前寒武纪年代地层学的方向。王鸿祯院士^[51]早在 1986 年就提到过,选取分系的年龄值界限时,只能根据地质事件集中时期的年龄值,实际上地质时代和年代地层单位都不可能脱离层型而单独存在。地层学各分支学科的标准虽然不同,界线不大一致,但绝不是相互脱离而是相互促进。国际年代地层表就是地层学各分支学科交融发展的结果,最后体现为全球地质时间坐标的建立。

尽管年代地层表的建立让各国地质学家能够在相同的时间界面上探讨具有全球意义的地质和生物事件,但我们应该注意到,具体应用过程中若只以概

念性时间面作为地层界面,进行地层划分对比和恢复其时空秩序时会有很多不便之处和较大局限性,这是时间固有的抽象性所决定的。在这种情况下层序地层学应运而生。层序地层学被誉为地质学中最新的一次革命^[20],其理论不仅让地质学家对基础地质的研究重新进行了认识,更是广泛应用到石油地质勘探和区域地质调查中,表现出明显的实用性。但作为当前应用最为普遍的地层学分支,层序地层学的方法和术语还存在明显的混乱和各种各样的误解^[20-21]。

目前关于层序引用最多的概念是 Vail *et al.*^[22]所定义的“不整合面及其可对比的整合面所限定的沉积层序”,但对究竟什么是可以对比的整合面出现了不同理解及争论,造成了层序地层学发展历程中的三次误判。梅冥相^[20]将其简要归纳为:1) 1977 年的错误对比;2) 1988 年的错误假设;3) 1999 年的冗余修正。由于早期地震资料的垂直分辨率较低,Vail *et al.*^[22]将陆上不整合面与下超面(即最大海泛面)相连在一起,导致 1977 年的错误对比。随着地震资料的分辨率提高,发现两者并不会相连在一起,而只是在盆地边缘交错^[15,24],Jervey^[28]对这个错误予以修正,但同时又将层序界面错误假设成了一个概念性的等时面,认为“可对比的整合面”是海底基准面下降的刚开始(即下降拐点)所对应的时间面,这个面可以在深水沉积中予以追踪(如深水浊积岩沉积的底面),形成 I 型层序界面。也就是说,这个复合的层序界面在盆地侧翼为一个陆上不整合面,这个不整合面会继续延伸到水下最终到浊积岩沉积的底面^[20-23,28]。因为陆上不整合是在基准面下降结束期才达到最大程度,终止于盆地方向,而 Vail *et al.*^[22-23]所解释的延伸到水下的陆上不整合面发育在靠近基准面下降的开始,所以理论上这个层序界面是不可能的。对 II 型层序而言,陆上不整合面又作为盆地浅水部分的层序界面,形成于基准面开始上升的时间。因而两种层序类型的边界形成于基准面变化的不同阶段,是不协调的^[20-24]。基于 Jervey^[28,52]的前期工作,Posamentier *et al.*^[53]建议 I 型层序的“可对比的整合面”使用基准面下降开始的时间面,理由是这个时间面向陆地方向可以与陆上不整合面对比,而朝盆地方向的终止也可以得到较好的联结和对比。问题是,将层序界面置于海平面变化的最高点,反而加剧了经典层序地层模式概念体系的不协调;而且将形成于浅水域陆上的不整合面作为层序界面的话,盆地大部分不整合将位于层序的内部而不是界面之上^[20-21,54-55]。

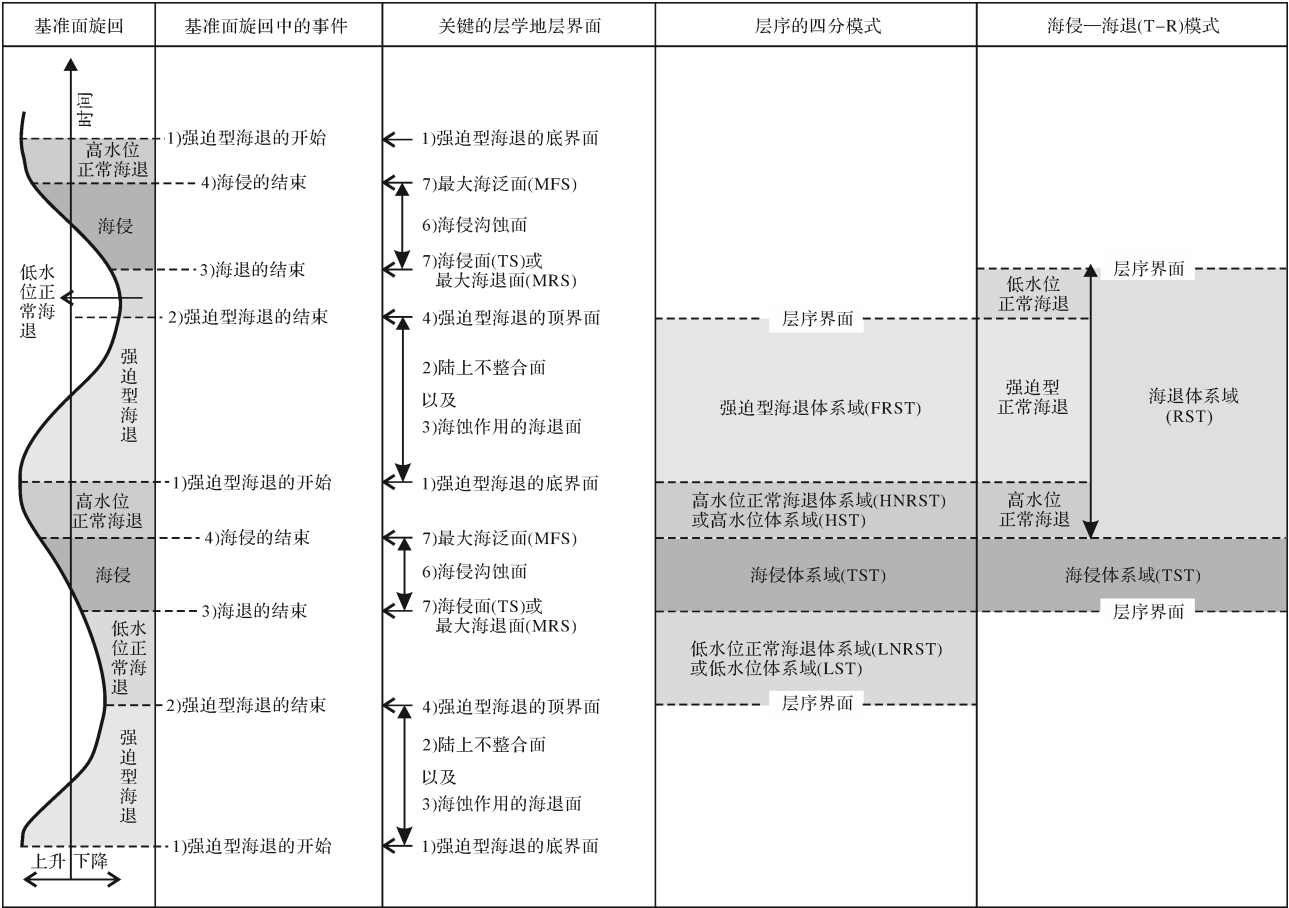


图 6 与基准面旋回事件相关的关键层序地层界面和两种可采用的层序地层模式^[20]

Fig.6 The key surfaces of sequence stratigraphy related to the events of the base-level cycle and two types of adoptable modes in sequence stratigraphy^[20]

针对这些问题,1992 年 Hunt *et al.*^[54] 对经典层序地层理论 (Exxon 层序地层) 进行了修正。一是将 I 型层序和 II 型层序体系域的术语统一定义,并给出了新的解释和限定范围:海平面变化的最低点和海侵面之间的范围定义为低位体系域 (LST),即 I 型层序的 LST 等同于 II 型层序 SMST;最大海泛面和海平面变化的最高点之间为高位体系域 (HST),海侵体系域 (TST) 的概念不变。二是新增了强迫型海退体系域 (FRST),这样,一个层序完整的构成为 LST+TST+HST+FRST (图 6)。Helland-Hansen *et al.*^[55-56] 认为这 4 个体系域构成层序模式是层序形成的 4 个过程,是客观存在的,不依赖于任何层序地层模式^[55-57]。在沉积物供应充分的条件下,海退过程中形成的体系域 (LST、HST 和 FRST) 很难进一步区分,只可以识别出海侵体系域 (TST) 和海退体系域 (RST),于是 Embry *et al.*^[58-59] 在这个四分模式的基础上又建立了层序地层的海进—海退二分模型 (T-R 模式,图 6)。由于沉

积作用的多种多样和沉积过程的复杂多变,学者们提出了多种层序地层模式,这些模式都是对基准面变化下不同沉积作用和响应机制的解释和分析,是对层序内部体系域的合理。但一个共同的方向是,用基准面变化周期替代海平面变化,并将层序的形成过程划分为海进、高位正常海退、强制海退和低位正常海退四个阶段,从而促进了层序地层的标准化进程^[20-22,55-57]。

早期在运用层序地层学恢复和分析地层记录时空秩序的过程中,往往将其当作等时格架,导致将层序地层学等同于年代地层学,最终造成了层序地层学中界面识别和单位定义有关的一系列问题,所以迄今为止层序地层学还没被正式作为具体的地层学分支纳入《国际地层指南》^[20-21]。而层序地层的标准化进程有助于结束其在研究方法和术语体系上的混乱,消除各种各样的误解,层序界面也摆脱了作为概念性时间面的影响。正如上文及在关于不整合的讨

论中提到的那样,层序界面具有广泛的穿时性,但并不是说沉积层序不具备任何时间含义。相反,在实际应用中,每一个体系域和沉积层序都可以当作由穿时界面所限定的相对的近似等时的沉积体,更准确地说虽然不具备等时性但具备时间秩序性的沉积体(图2)。层序地层学建立的这种穿时—等时的辨证的时空秩序极大地拓展了我们对地层记录的时空有序性的认识,并将对地质时间属性的分析延伸到沉积学领域。

此外,放射性同位素定年技术让地质时间坐标有了“绝对”的数字年龄,并将地质学的时间坐标单位精确到百万年。但古老地层年代的确定仍然存在较大的问题,地质时代越老,地层的放射性同位素定年误差就越大,生物成种速率变慢^[47],加上显生宙之前的化石记录极为缺乏,要划分出更为精细的地层需要新的思路。前文已经提到,天文节律影响着地层旋回。因此,从数量级上查明替代指标变化周期或频率与米兰柯维奇旋回周期或频率的一致性,就能用替代指标变化周期或频率确定地层的近似年限。而且,只需要选定特定的坐标单位谱(如岁差、斜度、偏心率周期等),建立与人类社会接轨的地质学时间坐标也成为可能^[15,31],从而满足我们对年代地层精确性、严谨性的不懈追求。

以位于湖南省桃源县瓦儿岗剖面的沈家湾组为例,该剖面是寒武系芙蓉统第十阶金钉子的备选剖面^[44,60],为中—深缓坡沉积环境^[61-64],主要发育薄层泥质灰岩、层纹石灰岩、均一石和结核状灰岩。因为沉积于中—深缓坡的灰岩水体越深泥质含量往往越高,所以凭借泥质含量的高低可以判断出水体深浅的相对变化。本组层纹石灰岩和均一石主要发育在每个沉积旋回的中上部,层纹石发育环境总体以潮下中部透光带环境为主,而均一石发育环境的水体要更浅一些。由头发丝般粗细的、延伸极远的纹层组成的层纹石(图7a,b)与不显颜色、结构变化的均一石(图7c,d)一起构成旋回。碳酸盐岩中这种极其细微的纹层不可能是水流作用的产物,加之碳酸盐岩本身更多的生物成因,两者很可能都是微生物膜或微生物席作用的产物^[65-68],这也与其总是出现在水下透光带环境是一致的。微生物膜/席在夏季繁盛而在冬季活动性减弱,作用形成的一个纹层对周期为一年^[65-69],每10~16个层纹对又构成1个小的旋回(图7a),于是这些小旋回的形成年限推测也就十几年。水体变浅的时候微生物膜的成层性被破坏,开始形成均一

石^[66-69]。随着海平面的震荡变化,层纹石与均一石就共同组成的一个大旋回(图7e)。层纹石小旋回一般在3到6个之间,所以推测每个大旋回形成年限不会超过一百年。虽然这些都属于推测性质,但是对于缺乏化石和没有定年的地层段,可以作为地质计年的重要依据^[70]。

这种推测的合理性需要更多时间和证据的检验,但无疑为我们思考地质现象和认识地质规律提供了新线索和新思路。由于天文节律对地球的影响在整个地史时期应该均有记录,而且具有全球统一性,因而运用旋回地层学分析化石记录稀少的显生宙之前的地层具有广泛前景。史晓颖(会议口头报告,2016)在研究华南新元古代五强溪组层纹石时发现,每10~12个纹层构成一个小旋回组,而每2个小旋回组又构成一个大旋回,这两种分别代表11年和22年的周期性旋回与太阳黑子活动的Schwabe和Hale周期正好对应,是地层记录时空有序性的具体写照。但不同地质历史时期地球轨道的系列参数并不相同,太阳黑子的活动周期也极为复杂,因而地层的旋回性不可能是简单的重复,更何况有地层记录的地质历史只是地球漫长岁月中的一页。就像桑德尔法则所言,地层记录的时间旋回性体现在空间旋回性中,但时间的旋回性一直都在而地层记录的旋回性却常常缺乏。

3 认识地层记录时空有序性的新挑战

地层学诞生以来的研究,基本上都是在史密斯地层三定律的框架下进行。对史密斯地层时空有序性的研究形成了一整套规范而系统的方法,促进了地层学各分支学科的蓬勃发展。但随着造山带地质研究的深入,沿袭了几百年的史密斯地层原则(层序叠加律、原始连续律、原始水平律、化石层序律及瓦尔特相律),对经历了强烈变形和变质作用的地层和混杂造山带的无序沉积—非沉积地层已不再适用^[71-72],非史密斯地层学方法应用而生。

目前非史密斯地层学尚不成熟,在命名、规范、研究方法等方面存在不少分歧,也取得了不少进展^[73]。非史密斯地层学(NSS)最早的概念是冯庆来^[74]于1993年提出:“非史密斯地层类型是指构造作用强烈,原始地层层序无法恢复的地层。”国外则是Isozaki *et al.*^[75]在1990年最早命名的洋板块地层学(OPS):“OPS泛指发育在造山带中的,于洋盆(包括边缘海盆)形成与闭合过程中形成的地层,即指海洋板块从它最初在洋中脊形成,一直到海沟发生俯冲作

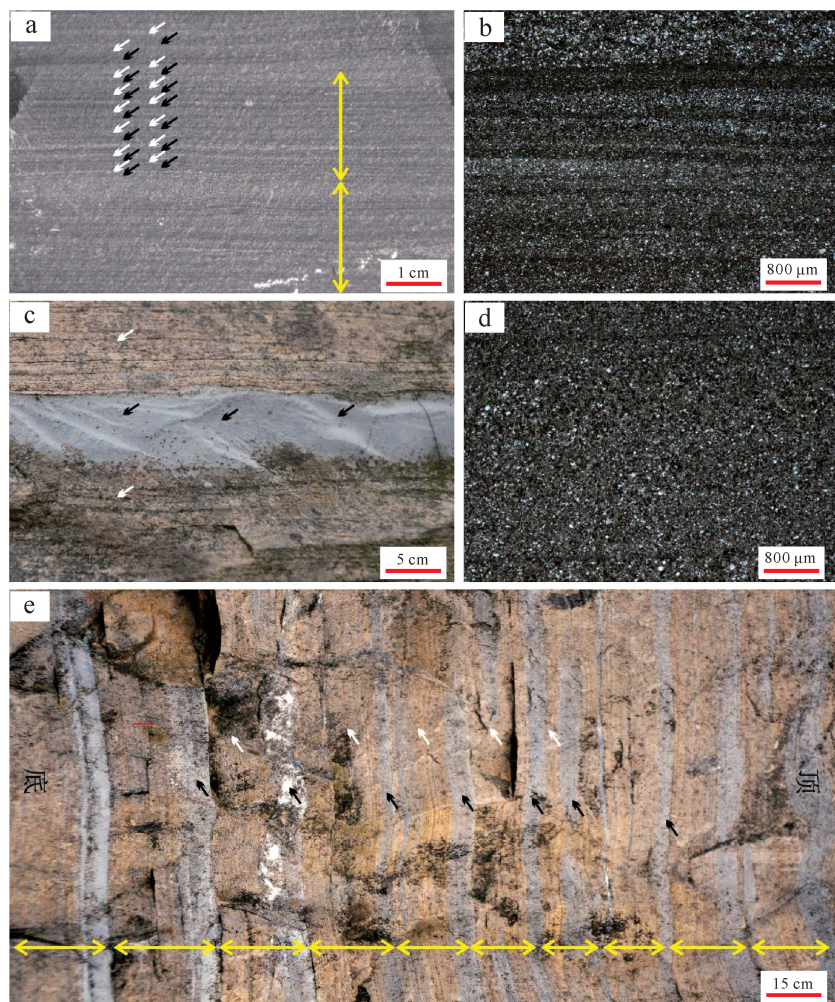


图7 对寒武系芙蓉统沈家湾组层纹石—均一石旋回形成时长的一个可能性解释

a,b.为层纹石,由灰白色纹层(亮纹层,白色箭头)和暗灰色纹层(暗纹层,黑色箭头)交互构成的纹层对所组成,纹层对稀疏的地方亮纹层厚,纹层对密集的地方亮纹层薄,其中a为野外照片,b为单偏光显微照片;c,d.为均一石(黑色箭头),内部结构极为均一,成分和颜色不显变化,其中c为野外照片,d为单偏光显微照片;e.由层纹石(白色箭头)和均一石(黑色箭头)组成的高频旋回;以上照片均来自湖南省桃源县瓦儿岗剖面

Fig.7 A possible explanation for the formation of laminites-leiolite cycles in Shenjiawan Formation

a,b. The laminites are composed by white (white arrows) and black (black arrows) layer-sets. The white layers are relatively thicker in the places with sparse layer-sets and thinner where layer-sets are dense. Note a is field photo and b is microphotograph under single polarized light. c,d. The leiolite is marked by black arrows and without any significant changes in composition and colours. Note c is a field photo and d is microphotograph under single polarized light. e. A high frequency cycle consisting of laminites and leiolites. All these samples are from Wa Ergang section, Taoyuan county, Hunan Province and in Shenjiawan Formation, Furongian Series, Cambrian

用而形成的增生杂岩”。这两者内涵基本相近但侧重略有不同(图8),前者强调属性而后者强调发育位置。再者,OPS的含义要比NSS稍微宽泛^[77],因为OPS不仅包括在造山带中的无序地层,还包含洋盆发育中被保存下来的有序地层。尽管造山带结构复杂多样,不同造山带的形成机制和演化历程更是千差万别,但OPS和NSS的提出,大大增加了我们对洋壳的认识和拓宽了对洋壳的识别标准^[72,75]。Kusky *et*

al.^[76]建立了地壳从大洋中脊开始到最终卷入增生楔的过程形成的OPS地层序列(图8b),并认为OPS地层序列记录了洋底从其形成到消亡过程中的地质演化历史,从而得以从洋盆沉积物中去识别洋壳。问题依然存在,洋板块俯冲消亡过程中会发生强烈的构造搬运和构造混杂^[75-77],存在于造山带演化历程中的地质记录的有序性也随之消亡,分析获得地层的原生时空结构依然困难重重。

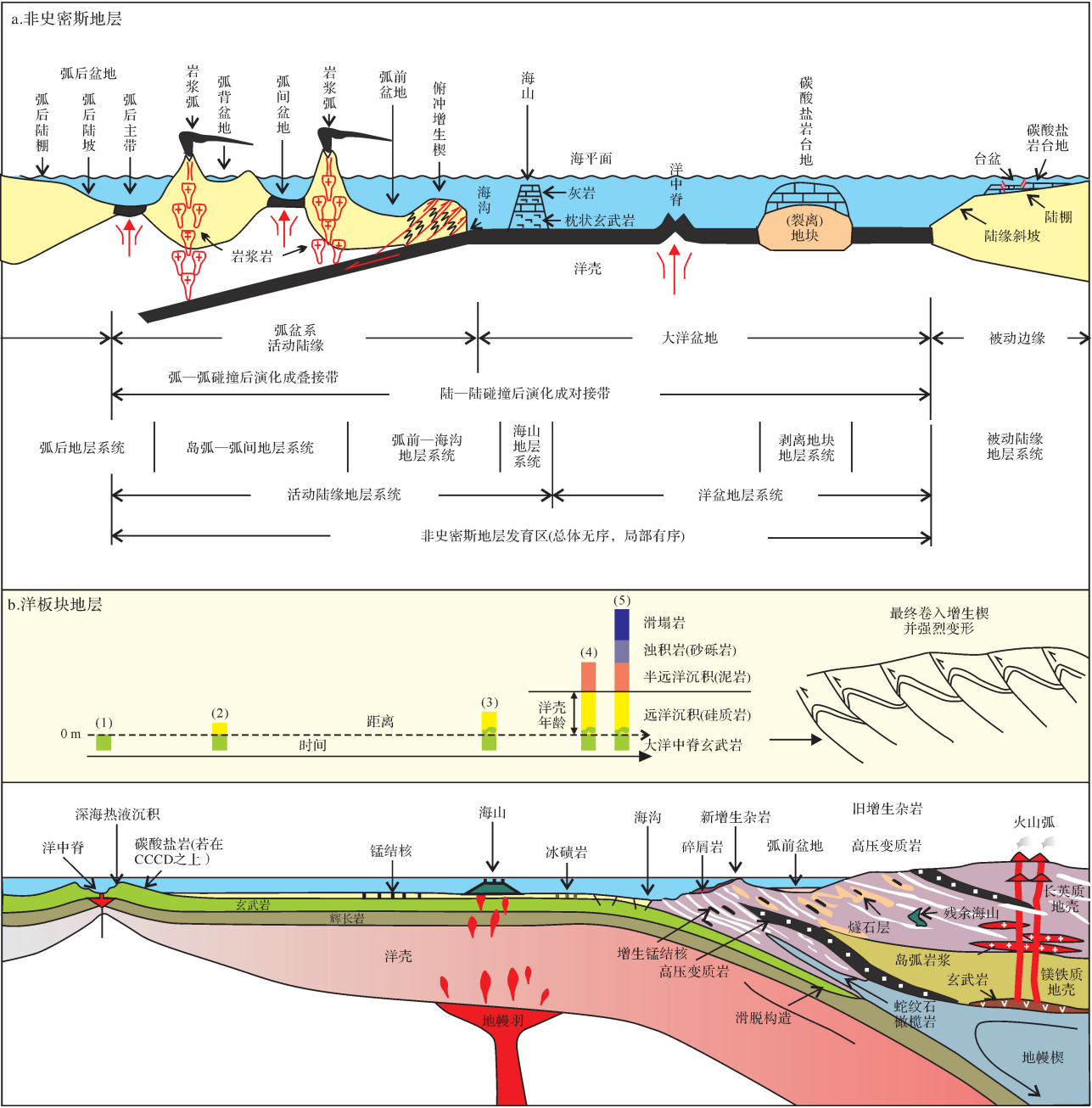


图8 非史密斯地层(a)^[72]和洋板块地层(b)^[76]

OPS 地层序列: (1)大洋中脊玄武岩; (2)大洋中脊玄武岩—远洋沉积(硅质岩); (3)大洋中脊玄武岩—洋岛玄武岩—洋岛碳酸盐岩; (4)大洋中脊玄武岩—远洋沉积(硅质岩)—半远洋沉积(泥岩); (5)大洋中脊玄武岩—远洋沉积(硅质岩)—半远洋沉积(泥岩)—浊积岩(砂砾岩)—混杂岩

Fig.8 Non-Smith Strata (a)^[72] and OPS (b)^[76]

OPS (Ocean Plate Stratigraphy) sequence: (1) MORB (mid-oceanic ridge Basalt); (2) MORB and pelagic sequence; (3) MORB, OIB (ocean island basalt) and OIC (ocean island carbonate); (4) MORB, pelagic sequence and hemipelagic sequence; (5) MORB, hemipelagic sequence, turbidite sequence and olistostromes

与稳定的陆块区相比,中国的造山带区分布面积比陆块大,且演化历史漫长而复杂,矿产资源丰富,灾害与环境地质问题突出^[77]。在造山带区识别出不同

构造环境下的地层类型,如洋脊、大洋盆地、剥离地块、弧后盆地等等地层系统,分析其变形、变位和变质标志,进而获得区域地层的原生时空结构并建立造山

带的地层格架与序列是我国地质研究的重中之重。因此,对非史密斯地层时空有序性的研究或者说恢复非史密斯地层的时空有序性是地层学研究深入的必然要求,是地层学所面临的新的挑战。

4 讨论

地层学的发展历程就是对地层记录时空有序性认识不断深化的过程。为了建立地层之间的时间关系,19世纪初期就形成了一些地层的基本概念,这些概念建立在地层是“毛毛雨式”或“落雪式”一层一层垂向沉积的印象上,所以简单的认为地层的时空结构就是老者在下,新者在上。后来在用化石建立统一的生物地层系统过程中,发现同一时期的地层经常具有不同的岩性,提出了岩相横变的概念。对其形成机理的研究过程中,另外一种沉积方式——侧向加积开始被认识,并初步有了海进—海退的概念。这时候进一步认识到空间上的毗邻关系可以转化为时间上的相随历史。早期的年代地层学与生物地层学密不可分,导致一些地质学家认为“阶”就是生物地层单位,并怀疑另立时间地层单位的必要性。放射性同位素测年和事件地层学的出现,以及用界线层型(剖面)取代单位层型(剖面)进行阶的划分,让年代地层学概念上更为精确和实际中更具操作性,最终建立国际年代地层表使各国地质学家得以在相同的时间界面上探讨具有全球意义的地质和生物事件。这是对地层记录时空有序性认识的里程碑:尽管在地层记录中,生物变化、物理变化、化学变化并不是严格统一到时间变化中,但是它在时间和空间中的分布是有序和有规律的。

与此同时,对地层记录的间断面——不整合面的认识也在不断深化之中。早期把海平面变化等同于构造抬升或沉降,并认为构造是形成不整合的唯一原因。即当构造隆升时(海退时),大陆表面暴露而遭受剥蚀,形成不整合。直到层序地层学概念体系的建立,和有关“不整合面及其可对比的整合面所限定的沉积层序”的争议导致的“水下不整合面”的提出,地质学家才发现地层记录的穿时性远远要比之前所认识的更为普遍,不整合实际上就是长期的穿时面。在这一过程中交叉出现的旋回地层学,同层序地层学一起,给予我们建立与人类社会接轨的时间单位谱和地质学时间坐标的可能性,例如用季节纹层、年纹层及其沉积旋回可以将地层的形成年限估算到一年或十几年,而不是地质年代表那样动辄上百万年。但层

序地层学关于地层记录时空关系的揭示需要我们进一步去理解。它所有被解释出来的沉积体的边界均是穿时的,但沉积体内部的地层又具有一定的近似等时的概念。换句话讲,它试图用穿时界面来限制出某一时期的相对等时的沉积体,更准确地说是虽然不具备等时性但具备时间秩序性的沉积体。如何理解这一概念,它究竟蕴含了怎样一种时空秩序,这需要我们进一步研究。此外,造山带混杂堆积的非史密斯属性,几乎打乱了地层记录的所有时空结构,它将地层的所有时间记录糅合到卷入增生楔的那一段时间中,如何在这种杂乱无章中抽离出规律性,建立它的时空有序性是我们面临的又一挑战。

地层就像一部万卷巨著,记录和保存了地球形成以来46亿年的发展和演化历史,也蕴藏了丰富的矿产及油气资源。而地层学则是解读这部巨著的密码和文字,用以研究地球历史过程中形成的岩层、界面(间断面)和相互关系,它是一切地质工作的基础。因而,从复杂的地层记录中发现和恢复其有序的时空关系,对地层学乃至地质学都有重要的意义,希望本文对地层记录时空有序性的解读和将地层学各分支学科作为整体的思考能起到抛砖引玉的作用。

5 结论

(1) 地层记录具有广泛的不完备性和穿时性,这为确定地层记录的时空有序性提供了框架和边界。无论是侵蚀作用、非沉积作用,还是沉积作用(天然表现为侧向加积和垂向加积的叠加),都能造成地层的缺失与穿时,不整合面就是这种长期穿时性的具体表现。如果说陆上不整合面作为一个剥蚀作用或风化作用面,本身就明显表现出穿时性的话,那么由沉积物非补偿产生的饥饿性作用乃至非沉积作用形成的水下不整合面则更为隐秘。在层序地层学发展过程中,虽然当时并未提到“水下不整合面”的问题,但自觉或不自觉地运用这两个不整合面建立了两种层序地层学模式,即以陆上不整合面及可对比的整合面作为边界的Vail学派的I型和II型层序地层模式,以及以水下不整合面(最大海泛面)及可对比的整合面作为层序边界的Galloway学派的成因层序地层模式。

(2) 地层记录时空有序性的另外一个重要表现是地层幕式(周期性)的堆积过程。第四纪米兰科维奇旋回的证实和天文节律的提出让沉积旋回的成因与地球轨道效应旋回相联系,也让层序地层学逐渐摆

脱了“构造海平面变化”的概念,而将控制层序形成的海平面变化机制归因于天文旋回。这种推测的合理性需要更多时间和证据的检验,但无疑给我们思考地质现象、认识地质规律的另一种思路,也给予我们建立与人类社会相接轨的时间单位谱和地质学时间坐标的可能性。

(3) 地层记录不仅仅是周期性、旋回性量变的过程,还有质变的存在,“雪球地球”等极端气候和生物大规模“集群灭绝”就是两个典型实例。现今地球的大气圈构成、生命形式、气候条件、海水盐度等与地质历史时期相比都差别巨大,因而在“将今论古”的同时,必须注意到“现在不一定是过去的钥匙”。地层记录的这种非渐变的和不可逆的特征给地质历史分析带来了很大困难,但与此同时,正是一个个被记录和保存在地层中的“地质事件”,使标定和恢复地层记录的时空秩序成为可能。

(4) 尽管在地层记录中,岩性变化、生物变化、物理变化和化学变化并不是严格地统一到时间变化中,但是它们在时间和空间中的分布是有序和有规律的,是虽然不具备等时性但具备时间秩序性的沉积体。如何依据上述地层记录的不完备性、穿时性、旋回性、渐变性和不可逆性,揭示地层记录的时空有序性成为地层学所有分支学科共同面临的主题,而地层学的发展历程也就是对地层记录时空有序性认识不断深化的过程。

参考文献 (References)

[1] Doyle P, Bennett M R, Baxter A N. The key to earth history: an introduction to stratigraphy[M]. Chichester, UK: Wiley, 1994.

[2] 曲淑琴,王雅春. 地层学概论[M]. 北京:石油工业出版社,2009. [Qu Shuqin, Wang Yachun. An overview of stratigraphy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.]

[3] Chlupáč I. Review of the recent International Stratigraphic Guide and divisions of the geological past[J]. Vestník Českeho Geologického Ústavu, 2000, 75(4): 361-370.

[4] Rudwick M. Cuvier and Brongniart, William Smith, and the reconstruction of geohistory[J]. Earth Sciences History, 1996, 15(1): 25-36.

[5] Miller F P, Vandome A F, Mcbrewhster J. Catastrophism[M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2010.

[6] Lyell C. Principles of geology: An attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation[M]. Cambridge University Press, 2009.

[7] Rudwick M J S. Lyell and the principles of geology[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1998, 143(1): 1-15.

[8] 龚一鸣,张克信. 地层学基础与前沿[M]. 2版. 武汉:中国地质

大学出版社,2016. [Gong Yiming, Zhang Kexin. Stratigraphic fundamentals and frontiers[M]. 2nd ed. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2016.]

[9] Grabau A W. Principles of stratigraphy[M]. New York: Seiler, 1913.

[10] 邓鸿斌,满玲,陈文,等. 多重地层划分理论及其在四川盆地寒武系底界划分中的应用[J]. 天然气勘探与开发,2013,36(1): 1-4,11. [Deng Hongbin, Man Ling, Chen Wen, et al. Multiple-stratigraphic division theory and its application to dividing Cambrian bottom boundary of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2013, 36(1): 1-4, 11.]

[11] 王鸿祯. 地层学的几个基本问题及中国地层学可能的发展趋势[J]. 地层学杂志,2006,30(2): 97-102. [Wang Hongzhen. Some fundamental problems of stratigraphy and the possible tendency of development of stratigraphy in China[J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(2): 97-102.]

[12] 谢树成,赖旭龙,黄咸雨,等. 分子地层学的原理、方法及应用实例[J]. 地层学杂志,2007,31(3): 209-221. [Xie Shucheng, Lai Xulong, Huang Xianyu, et al. Principles, methodology and application of molecular stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(3): 209-221.]

[13] 徐道一,韩延本,李国辉,等. 天文地层学的兴起[J]. 地层学杂志,2006,30(4): 323-326. [Xu Daoyi, Han Yanben, Li Guohui, et al. The rise of astrostratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(4): 323-326.]

[14] 吴和源. 朝向层序地层学标准化: 层序地层学研究的一个重要科学命题[J]. 沉积学报,2017,35(3): 425-435. [Wu Heyuan. Towards the standardization of sequence stratigraphy: An important scientific proposition of sequence stratigraphy[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(3): 425-435.]

[15] 龚一鸣,史晓颖. 关于时间、沉积与地层学的几点思考[J]. 地学前缘,2014,21(2): 27-35. [Gong Yiming, Shi Xiaoying. Thinking on time, sedimentation and stratigraphy[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 27-35.]

[16] 梅冥相,马永生. 从旋回层序的特征论地层记录的两种相变面及两种穿时性[J]. 地层学杂志,2001,25(2): 150-153. [Mei Mingxiang, Ma Yongsheng. On two kinds of facies-change surface and two kinds of diachronism in stratigraphical records according to the natures of cyclic-sequences[J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25(2): 150-153.]

[17] 姚华舟. 对穿时普遍性的解释[J]. 地球科学进展,1993,8(5): 81-87. [Yao Huazhou. On the nature of stratigraphic diachroneity[J]. Advance in Earth Sciences, 1993, 8(5): 81-87.]

[18] Sparks B W. Reviewed Work: time in stratigraphy by Alan B. Shaw[J]. The Geographical Journal, 1965, 131(3): 412.

[19] van Loon A J. Time and space in stratigraphy: the '3-m gap' story[J]. Proceedings of the Geologists' Association, 2012, 123(3): 394-396.

[20] 梅冥相. 层序地层学发展历程中的三个误判[J]. 地学前缘,2014,21(2): 67-80. [Mei Mingxiang. Three misreadings during the developing course of sequence stratigraphy[J]. Earth Science

- Frontiers, 2014, 21(2): 67-80.]
- [21] 梅冥相. 从不整合面复杂的地质涵义窥视层序地层学的诞生: 层序地层学重要的科学命题之一[J]. 地层学杂志, 2011, 35(2): 179-192. [Mei Mingxiang. Understanding the birth of sequence stratigraphy through the complex geological meanings of unconformity: the first important scientific problem in sequence stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2011, 35(2): 179-192.]
- [22] Vail P B, Mitchum Jr R M, Thompson III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap[M]//Payton C E. Seismic stratigraphy: application to hydrocarbon exploration. AAPG, 1977, Memoir 26:63-81
- [23] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure[M]//Bally A W. AAPG Studies in Geology #27, volume 1: Atlas of seismic stratigraphy. Tulsa, Okla: American Association of Petroleum Geologists, 1987: 1-10.
- [24] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Elsevier, 2006.
- [25] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125-142.
- [26] Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544-568.
- [27] van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definition//Sea-level changes: an integrated approach [C]. SEPM Special Publication No. 42. Washington DC: SEPM, 1988: 39-45.
- [28] Jervey M. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression[M]//Wilgus C, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea level changes: An integrated approach. SEPM Special Publication 42, 1988:47-69.
- [29] 杨兵. 地质学思想之争及其演化: 以灾变论渐变论为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009. [Yang Bing. Geology ideological struggle and evolution, taking catastrophe theory and gradient theory for example[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2009.]
- [30] 吴怀春, 房强, 张世红, 等. 新生代米兰科维奇旋回与天文地质年代代表[J]. 第四纪研究, 2016, 36(5): 1055-1074. [Wu Huai-chun, Fang Qiang, Zhang Shihong, et al. Cenozoic milankovitch cycles and astronomical time scale [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(5): 1055-1074.]
- [31] 龚一鸣, 杜远生, 童金南, 等. 旋回地层学: 地层学解读时间的第三里程碑[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(4): 443-457. [Gong Yiming, Du Yuansheng, Tong Jinnan, et al. Cyclostratigraphy: the third milestone of stratigraphy in understanding time[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(4): 443-457.]
- [32] 徐道一. 天文地质年代表与旋回地层学研究进展[J]. 地层学杂志, 2005, 29(增刊1): 635-640. [Xu Daoyi. Astro-geologic time scale and the advancements of cyclostratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(Suppl.1): 635-640.]
- [33] 梅冥相. 从沉积层序到海平面变化层序: 层序地层学一个新进展[J]. 地层学杂志, 2015, 39(1): 58-73. [Mei Mingxiang. Conceptual change from depositional sequences to eustatic sequences: An important development in sequence stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(1): 58-73.]
- [34] 殷鸿福, 徐道一, 吴瑞棠. 地质演化突变观[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. [Ying Hongfu, Xu Daoyi, Wu Ruitang. The concept of geological evolution[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988.]
- [35] 郭军. 新灾变论科学思想的哲学研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. [Guo Jun. The philosophy of research on scientific thinking of the neocatastrophism[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.]
- [36] 梅冥相. 地球历史中的巨型氧化作用事件: 了解古地理背景演变的重要线索[J]. 古地学报, 2016, 18(3): 315-334. [Mei Mingxiang. Great Oxidation Event in history of the Earth: An important clue for the further understanding of evolution of palaeogeographical background[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3): 315-334.]
- [37] Canfield D E. "The early history of atmospheric oxygen: homage to Robert M. Garrels" [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2005, 33(1): 1-36.
- [38] Campbell I H, Allen C M. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(8): 554-558.
- [39] Konhauser K O, Pecoits E, Lalonde S V, et al. Oceanic nickel depletion and a methanogen famine before the Great Oxidation Event [J]. Nature, 2009, 458(7239): 750-753.
- [40] Holland H D. Why the atmosphere became oxygenated: a proposal [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(18): 5241-5255.
- [41] Kirschvink J L. Late proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball earth [M]//Schopf J W, Klein C. The proterozoic biosphere: a multidisciplinary study. New York: Cambridge University Press, 1992.
- [42] 张立军, 赵翌, 龚一鸣. 遗迹化石对显生宙 5 大生物-环境事件的响应[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(2): 381-396. [Zhang Lijun, Zhao Zhao, Gong Yiming. Trace fossils as a proxy of the big 5 biotic and environmental events in the phanerozoic[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(2): 381-396.]
- [43] 李志宏, 陈孝红, 王传尚, 等. 湖北宜昌黄花场下奥陶统弗洛阶上部牙形刺生物地层分带及对比[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1647-1658. [Li Zhihong, Chen Xiaohong, Wang Chuanshang, et al. Conodont zonation and correlation of upper part of fuluoian of Lower Ordovician in Huanghuachang section, Yichang, Hubei[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1647-1658.]
- [44] 彭善池. 全球标准层型剖面 and 点位(“金钉子”)和中国的“金钉子”研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 8-26. [Peng Shanchi. Global standard stratotype-section and point (GSSP, "Golden

- Spike") and the GSSP research in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(2): 8-26.]
- [45] 胡世忠. 界线层型与事件地层学:年代地层学研究展望[J]. 范斯,译. 江苏地质,1988(1):3-8. [Hu Shizhong. The boundary-stratotype and eventational stratigraphy: prospecting chronostratigraphy[J]. Fan Si, Trans. Jiangsu Geology, 1988(1): 3-8.]
- [46] van Couvering J A. Reviewed work: international stratigraphic guide: a guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure by Amos Salvador[J]. *Micropaleontology*, 1976, 42(1): 64.
- [47] Hancock J M. The historic development of concepts of biostratigraphic correlation[M]//Kauffman E G, Hazel J E. Concepts and methods of biostratigraphy. Stroudsburg, PA: John Wiley & Sons Inc, 1977: 3-22.
- [48] Harland W B. Stratigraphic regulation and guidance: a critique of current tendencies in stratigraphic codes and guides[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104(10): 1231-1235.
- [49] 陈源仁,石和. 高分辨率事件地层学和高分辨率地层学[J]. 成都理工学院学报,2001,28(1):17-20. [Chen Yuanren, Shi He. Study of the high resolution event stratigraphy and the high resolution stratigraphy[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(1): 17-20.]
- [50] 苏文博. 2012年全球前寒武纪新年表与中国中元古代年代地层学研究[J]. 地学前缘,2014,21(2):119-138. [Su Wenbo. A review of the revised Precambrian Time Scale (GTS2012) and the research of the Mesoproterozoic chronostratigraphy of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(2): 119-138.]
- [51] 王鸿祯. 论中国前寒武纪地质时代及年代地层的划分[J]. 地球科学——武汉地质学院学报,1986,11(5):447-453. [Wang Hongzhen. Precambrian geochronologic and chronostratigraphic subdivision of China[J]. *Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology*, 1986, 11(5): 447-453.]
- [52] Jervey M T. Siliciclastic sequence development in foreland basins, with examples from the western Canada foreland basin[M]//Macqueen R, Leckie D A. Foreland basins and fold belts, AAPG Memoir 55. Washington DC: AAPG, 1992: 47-80.
- [53] Posamentier H W, Allen G P. Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications[C]. Washington DC: SEPM, 1999: 619-630.
- [54] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [55] Helland-Hansen W, Gjølberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92(1/2): 31-52.
- [56] Helland-Hansen W. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92(1/2/3/4): 95-97.
- [57] Catuneanu O, Bhattacharya J P, Blum M D, et al. Sequence stratigraphy: common ground after three decades of development[J]. *First Break*, 2010, 28(1): 21-34.
- [58] Embry A F, Johannessen E P. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada[J]. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 1993, 2: 121-146.
- [59] Embry A F. Transgressive-regressive (T-R) sequence stratigraphy [R]. Calgary, Alberta, Canada: Geological Survey of Canada, 2002: 151-172.
- [60] Peng S C, Babcock L, Robison R, et al. Global standard stratotype-section and point (GSSP) of the furongian series and paibian stage (Cambrian)[J]. *Lethaia*, 2004, 37(4): 365-379.
- [61] Peng S H, Babcock L E. Cambrian of the Hunan-Guizhou region, South China[C]. Nanjing Geological and Paleontological Institute of the Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [62] 彭善池. 扬子区地台相(滇东、峡东地区)与斜坡相(湘西、黔东)寒武系的对比//地层学与古生物学研究生华南野外实习指南[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2013:218-226. [Peng Shanchi, The contrast of Yangtze Platform (Diondong and Xidong) and slope facies (Xiangxi and Qiondong) in Cambrian//Field practice guide in southern China for graduate students of stratigraphy and paleontology [M]. Hefei: University of Science & Technology China press, 2013:218-226.]
- [63] 梁百和,朱素琳. 湘西吉首地区寒武系碳酸盐岩沉积环境的初步探讨[J]. 沉积学报,1992,10(2):39-44. [Liang Baihe, Zhu Sulin. Preliminary discussion on sedimentary environments of Cambrian carbonatite in Jishou district of western Hunan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(2): 39-44.]
- [64] 马宏彬,杨绍祥. 张家界地区中晚寒武世岩相古地理特征[J]. 湖南地质,2001,20(2):92-97. [Ma Hongbin, Yang Shaoxiang. The characteristics of lithofacies and paleogeography from middle to Late Cambrian period in Zhangjiajie, Hunan[J]. *Hunan Geology*, 2001, 20(2): 92-97.]
- [65] Riding R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(S1): 179-214.
- [66] Stolz J F. Structure of microbial mats and biofilms[M]//Riding R E, Awramik S M. Microbial Sediments. Berlin Heidelberg: Springer, 2000: 1-8.
- [67] 梅冥相. 微生物席的特征和属性:微生物席沉积学的理论基础[J]. 古地理论,2014,16(3):285-304. [Mei Mingxiang. Feature and nature of microbial-mat: theoretical basis of microbial-mat sedimentology[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 285-304.]
- [68] Gerdes G. What are microbial mats? [M]//Seckbach J, Oren A. Microbial mats. Dordrecht: Springer, 2010: 3-25.
- [69] 梅冥相. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展[J]. 地质科技情报,2007,26(6):1-9. [Mei Mingxiang. Discussion on advances of microbial carbonates from the terminological change of thrombolites[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 1-9.]
- [70] 汤冬杰,史晓颖,王新强,等. 中元古代碳酸盐岩生物纹层石对太阳黑子周期的响应[C]//第十三届全国古地理学及沉积学

- 学术会议论文摘要集. 北京:中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会,2014. [Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Wang Xinqiang, et al. Response of Mesoproterozoic microbial carbonate to sunspot cycle[C]//National symposium on palaeogeography and sedimentology. Beijing: 2014.]
- [71] 殷鸿福,张洪涛,其和日格,等. 关于“非史密斯地层”的若干问题讨论[J]. 中国地质,1999(6):24-29. [Yin Hongfu, Zhang Hongtao, Qi Herige, et al. Some discussion about Non-Smith Strata[J]. Chinese Geology, 1999(6): 24-29.]
- [72] 张克信,冯庆来,宋博文,等. 造山带非史密斯地层[J]. 地学前缘,2014,21(2):36-47. [Zhang Kexin, Feng Qinglai, Song Bowen, et al. Non-Smithian strata in the orogen[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 36-47.]
- [73] 张克信,殷鸿福,朱云海,等. 史密斯地层与非史密斯地层[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2003,28(4):361-369. [Zhang Kexin, Yin Hongfu, Zhu Yunhai, et al. Smith strata and non-Smith strata[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(4): 361-369.]
- [74] 冯庆来. 造山带区域地层学研究的思想和工作方法[J]. 地质科技情报,1993,12(3):51-56. [Feng Qinglai. Principles and methods for the regional stratigraphic studies of orogenic belts[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(3): 51-56.]
- [75] Isozaki Y, Maruyama S, Furuoka F. Accreted oceanic materials in Japan[J]. Tectonophysics, 1990, 181(1/2/3/4): 179-205.
- [76] Kusky T M, Windley B F, Safonova I, et al. Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through earth history: a record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion[J]. Gondwana Research, 2013, 24(2): 501-547.
- [77] 张克信,何卫红,徐亚东,等. 中国洋板块地层分布及构造演化[J]. 地学前缘,2016,23(6):24-30. [Zhang Kexin, He Weihong, Xu Yadong, et al. Palaeogeographic distribution and tectonic evolution of OPS in China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(6): 24-30.]

On Stratigraphy from Spatial and Temporal Perspectives: Review and Interpretation

WANG Long¹, ZHANG Rui¹, HUA GanLin², ZHANG Lei²

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: A series of branches of stratigraphy have formed since 1970's along with the development of multiple stratigraphic classification theory and the application of various testing methods and means, These stratigraphy branches have greatly extended their research fields, and made stratigraphic theories developed towards multi-laterals, multi-levels and multi-scales directions. However, the specific and simple research object has also made stratigraphy fragmented and narrowly-defined. Therefore, it is necessary to review the stratigraphic history and consider the different stratigraphic units based on independent characteristics and attributes as a whole. In this paper, from the philosophy of time and space, the incompleteness, cyclicity, punctuated equilibrium and irreversibility of stratigraphic records are systematically summarized and combed. It is found that although lithologic, biologic, physical and chemical changes are not strictly unified into temporal variations, the strata are distributed orderly and regularly in time and space. From the Steno's Laws stating that rocks laid down in vertical order with younger strata on the top of the older one to the Walther's Phase Law suggesting that the contiguous relation in space can be transformed into the chronological sequence in time, the stratigraphy not only expresses the concept of space by using concepts of top and bottom, left and right, but also reveals its time attribution. The unconformity, once supposed to be a tectonic-induced concept from the beginning, which represented its spatial incongruity caused by folds or orogeny, is now defined with the help of time attribute i.e. the prolonged absence of stratigraphic records. Similarly, the stratigraphic cycle, a term previously describing the repetition of strata, after the confirmation of the Quaternary Milankovitch cycle is redefined as the transgressive and regressive sequences bounded by unconformities in the stratigraphic record. The discovery and restoration of the spatial and temporal order in the complex stratigraphic record is therefore becoming the driving force in promoting the development and integration of all stratigraphy branches.

Key words: stratigraphic record; stratigraphic attributes; depositional sequence; diachronism; spatial and temporal order