



“金钉子”之后的国际年代地层表刍议

王训练

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

E-mail: wxl@cugb.edu.cn

国际年代地层表是地质学研究的一个纲领性文献, 为地质学研究提供了时间格架, 对现代地质学的诞生和发展作出了重要贡献。

关于用生物标志还是用事件标志定义年代地层界线的争议由来已久。20世纪70年代以前主要以“自然事件”作为年代地层单位的划分依据, 界线一般都选择在发生某些地质事件的位置上, 即“自然界线”或“发生过事件”的界线^[1,2]。这种方法注重自然界线, 重视各类地层单位之间的普遍联系和统一性。其不足之处在于忽视了事物普遍联系的多样性和不同类型地层单元界线之间的本质差别, 忽视了一些地质事件发生非等时性、分布的区域性和表现的多样性^[3], 不恰当地用代表时间间断的沉积不连续面等自然界线定义年代地层界线, 使年代地层界线和地质年代表无法稳定, 因而受到后来许多学者的强烈反对。

20世纪70年代以来, 确定年代地层界线的理论、方法、标准和程序都发生了重大变化。1965年成立的国际地层委员会主张采用全球界线层型剖面 and 点位(Global Standard Boundary Stratotype Section and Point, GSSP, 俗称“金钉子”)的概念与方法重新厘定古生代以来各个系和阶的定义, 用连续的、没有间断的地层序列反映连续的时间, 标定的界线是“没有发生过事件”的界线^[1,2]。界线层型强调用于定义年代地层界线的剖面的连续性, 对于稳定年代地层标准具有重要意义, 但忽视了自然界线和地层发展的阶段性, 把连续沉积与自然界线对立起来, 也淡化了事物普遍联系的统一性^[3]。

在国际地层委员会的不断努力下, 以“金钉子”概念和方法建立的全球统一、精确定义的国际年代地层表不断更新完善。目前已经完成了古生代以来102个阶^[4]中三分之二以上的阶底界的定义。界线层型以生物地层为主要依据定义年代地层界线, 界线的对比误差可以达到一个生物带, 最小时间单位为百万年(Ma)。

近年来地史时期重大地质事件和古气候变化引起了人们的高度重视。“深时”(Deep Time)古气候研究计划^[5,6]通过沉积记录研究前第四纪地质历史时期地球古气候变化, 试图为预测未来气候提供依据。地史时期古气候变化及其引起的生物和环境事件的持续时间通常仅为几万年至几十万年。以界线层型为基础提供的时间格架不能满足“深时”古气候研究计



王训练 中国地质大学(北京)教授, 博士生导师, 理学博士。主要从事珊瑚古生物、高分辨综合地层学、生物古地理学和历史大地构造学研究。

划对时间精度的需要, 迫切需要重建一个足够精确的地质年代格架, 从而推动了高分辨综合地层学^[7-12]的发展, 催生了“地时(Earth Time)”研究计划。“地时”研究计划的目标是建立一个定年误差达到0.1%的水平、地层年代学精度达到第四纪尺度(万年/十万年)的地质年代格架^[13,14]。地层划分和对比的时间分辨率从百万年级向万年级精度的提升, 使新一代地质年代表将具有前所未有的准确度、精度和分辨率, 必将极大地提高和深化人类对地球系统演化的认识。

在诸多年代地层单元界线的定义中, 以界和系的底界定义受到高度重视, 研究也最为深入。尽管如此, 这些年代地层界线定义确定之后, 几乎全部都存在一定程度的争议。志留系底界的定义已经被修改^[15], 开创了修改“金钉子”定义的先河, 影响深远。国际地层委员会泥盆系分会和石炭系分会已经成立了专门的工作组正在修改石炭系底界的定义与界线位置^[16-22]。国际地层委员会寒武系分会准备重新定义或修订寒武系底界界线层型剖面 and 点位^[23]。有学者提出重新定义奥陶系底界^[24-26]和二叠系底界^[27-29]的定义。泥盆系底界的两个辅助性标准化石首次出现的层位都与泥盆系底界发生了矛盾^[30-34]。被最为详细研究的三叠系底界随着新的标准化石不断发现, 层位屡次被下移^[35-37], 甚至有学者^[38]提出三叠系底界的标准分子在二叠纪就已经开始出现了。

以界线层型定义年代地层界线的研究已经进行了近半个世纪, 显生宙以来的年代地层界线定义已经完成了三分之二。中国利用本土得天独厚的地层发育优势和中国科学家的

不懈努力,为现行国际年代地层表作出了重大贡献,成为取得“金钉子”最多的国家之一。尽管如此,中国在这一领域却鲜有理论上的突破,主要工作是依据国际上已有的理论、规则、方法和程序确定了“金钉子”。由于各种原因,目前国际上使用的界线层型的理论、规则、方法和程序在当初设计与讨论的时候既缺乏中国的资料,也没有中国学者参加,是极大的缺憾。目前,完成显生宙所有年代地层界线“金钉子”指日可待。现有的国际年代地层表虽然尚未全部完成,其时间分辨率和对比精度已经不能完全满足地球系统科学研究对时空格架的要求。界线层型在实践中出现的问题,也说明需要重新审视界线层型确定地层界线的指导思想和研究方法。因此,充分利用中国地层发育的优势和雄厚的研究基础,探索构建“金钉子”之后的国际年代地层表,具有重要意义。

1 界线层型(“金钉子”)存在的问题及其原因

以界线层型(“金钉子”)为基础的国际年代地层表暴露的根本问题主要表现在以下五方面。

(1) 分辨率有限。目前使用的《国际地质年代表》中最小的可识别单元是生物带,使用的年龄单元为百万年(Ma)。这个时间分辨率无法满足重大地质事件和“深时”古气候研究计划对时间分辨率的要求。

(2) 识别标志不明显。目前年代地层界线的定义是以生物地层为主要依据建立的,生物地层界线与事件地层界线关系并不完全明确,导致界线标准的野外识别标志不明显,对比困难。

(3) 底界穿时。用于定义年代地层单元界线的生物带底界并不是严格等时的,无法进行精确对比。

(4) 不同相区几乎无法对比。以海相化石为依据建立的年代地层标准在非海相地层中通常很难使用。

(5) 不易进行多学科研究和相互检验。目前定义的地层界线是以生物地层为主要依据建立的,其他地层学标志都是辅助性的。因此,界线层型的多学科研究性和相互验证性都有待于进一步提高。

毫无疑问,半个世纪以来,国际地层委员会倡导的“金钉子”理念和建立“金钉子”程序对地层学作出了很大贡献。但应当指出的是,国际地层委员会关于“金钉子”的主张和理念并非没有缺陷。在具体实践上,几乎所有“金钉子”都不同程度地出现了问题,充分表明“金钉子”在理论和方法两方面都存在严重缺陷。界线层型产生问题的原因可以归纳为如下三方面。

(1) 界线层型强调了层型剖面上沉积的连续性和生物演化记录连续性,在实际操作中忽视了连续和不连续的对立与统一,没有将地层界线的定义与“地球历史演化重大的自然变化(自然间断)”密切结合起来。其指导思想上属于比较典型的均变论,与地质事件和多学科研究的现代地质学观点背道而驰。

(2) 界线定义的选择和层型剖面的选择都缺乏客观标准,采用投票的方式确定界线的定义和层型剖面及点位受到较多人为因素甚至地缘政治的干扰,缺乏科学性。

(3) 作为全球标准的年代地层界线所依托的界线层型(“金钉子”),主要以保存在岩石中的生物成种事件作为最好的识别标志^[39,40],即“金钉子”以生物地层为主要依据确定的。生物地层学是地层学的基础,但依然存在一些不足之处^[10-12]。首先是生物地层单元界线一般都有一定程度的穿时性,不易进行精确对比。其次,沉积环境不同引起的生态分异使不同相区地层几乎无法进行直接的生物地层对比。另外,生物地层单元的时间分辨率一般超过百万年,其对比误差也超过了百万年。“金钉子”确定的地层界线在对比中出现的所有问题几乎都是生物地层学的上述不足造成的。

另外,国际地层委员会一再坚持的建立“金钉子”的程序可能也有些过于繁琐,工作效率难免不高。事实上,对于近乎宗教式的“金钉子”的做法早就有人提出质疑。甚至有人呼吁“金钉子”的游戏不要再继续下去了^[41]。

2 国际年代地层表应着力解决的问题

基于前述认识,“金钉子”之后的国际年代地层表应主要着力解决下列问题。

(1) 提高分辨率。在地层单元上打破一个生物带的分辨率,在时间上打破百万年(Ma)的分辨率,使《地质年代表》提供与人类社会接轨的时间单位和地质时间坐标^[42]。

(2) 提高年代地层界线可识别性。界线层型是地层划分和对比的标准。不易识别的标准对比非常困难,其意义是有限的。新一代国际年代地层表应增强界线层型的可识别性,特别是要增强界线层型的野外可识别性,为区域地质制图服务。

(3) 提高地层界线对比的等时性。地层学研究的要义在于等时对比。界线层型作为地层划分标准,可用于等时对比是至关重要的。

(4) 使界线层型可用于不同沉积相区的精确对比。地球是一个多层圈相互作用的自然系统。陆地生态系统和海洋生态系统同在地球系统中不断的相互作用。层型作为地层划分的标准,不仅需要能在海相地层中进行对比,而且需要能在陆相地层中进行对比,有利于建立不同沉积相区地层对比等时面。

(5) 制定客观、可重复、可检验的定义和选择层型剖面的标准,使选择界线层型的定义和选择界线层型剖面有章可循,有所参考,最大限度地减少在定义选择和剖面选择方面的人为因素。

(6) 界线反映地球演化的历史阶段。地层界线是地球历史发展阶段的记录,是地球圈层作用的结果,反映了地球历史发展阶段的转折点。在这个转折点上,各种地质环境因素都会发生不同程度的变化。因此在地层界线上,一个因素的变化可能会引发其他因素发生相应变化,或者同一个成因会引

起各种地质因素发生变化。因此,地层界线标志应该可进行多学科研究和相互检验,以提高地层界线标准的精确性、可识别性和可对比性。

3 古生代国际年代地层表的研究动态

由于“金钉子”定义的界线在地层对比方面普遍出现了问题,地层学家在肯定“金钉子”的同时,积极探索运用地质事件及其地质记录定义地层界线。目前出现了两种明显的趋势:一是试图寻找与生物地层定义接近的事件地层标志对比地层;二是更加注重从综合地层学的角度对界线开展多学科研究。

全球埃迪卡拉系-寒武系过渡地层中普遍存在碳同位素负异常事件(Basal Cambrian Carbon Isotope Excursion, BACE)^[43]。朱茂炎等人^[44]认为,在没有化石的界线剖面上,碳同位素负异常事件(BACE)可以作为寒武系底界的识别标志,甚至认为,在生物地层标准无法达成共识的情况下,BACE应该作为识别寒武系底界的首选参考标志^[45]。在2012年国际年代地层总结时,国际地层委员会寒武纪地层分会和埃迪卡拉纪地层分会都将BACE作为寒武系底界标志^[44]。

关于奥陶系底界,Cooper等人^[46]展示的大部分牙形石和笔石标本以及碳氧同位素异常数据均并非来自界线层型剖面——加拿大纽芬兰绿岬(Green Point)剖面^[25,26]。因此,在奥陶系底界层型剖面上界线的生物地层定义与同位素之间的关系不得而知。Miller等人^[47]认为,在奥陶系底界全球辅助层型剖面(ASSP)——美国犹他州Lawson Cove剖面上,以*Iapetognathus fluctivagus*的首现层位为标志的奥陶系底界界线之下15 cm处有一个 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素正偏移峰值在界线对比中特别有价值。Wang等人^[48,49]认为在该界线另一个全球辅助层型剖面(ASSP)——中国吉林大阳岔小阳桥剖面上,奥陶系底界线与特征的碳同位素负漂移、稀土元素地球化学异常及磁性方向从正向转至负向的层位大致相当。由此可见,学者也在寻求用记录地质事件的同位素异常作为奥陶系底界的对比标志。

关于志留系底界,Underwood等人^[50]的研究表明,道布斯林(Dob's Linn)剖面上也可以得到清晰可辨的碳同位素化学地层记录。需要说明的是,在道布斯林剖面上,碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)明显的正漂移既不是发生在*Parakidograptus acuminatus*带底部,也不是发生在*Akidograptus ascensus*带底部,而是发生在奥陶纪末期比*A. ascensus*层位更低的*persculptus*带底部。这个界线也是一条非常明显的岩性突变面,岩性由生物扰动泥岩为主突然转化为以黑色页岩为主^[50]。Underwood等人^[50]认为,来自道布斯林剖面碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)明显的正漂移可能实现该剖面深水相区地层与同期浅海碳酸盐地层的高分辨划分和直接对比。Berry^[51]和Lespérance等人^[52]认为奥陶-志留系界线应置于笔石*Glyptograptus persculptus*带之底或与其相当的层位。王训练和苏文博^[11]指出,笔石*G. persculptus*带

底部有机界和无机界都发生了重大变化,具有明显的物理标志,是代表地球演化历史重大阶段的自然界线,其地层学意义远大于*P. acuminatus*带底界。他们提出奥陶-志留系界线应以*G. persculptus*带的底界作为标准。

虽然在泥盆系底界界线层型剖面上“金钉子”所在层位没有明显的事件发生^[31],但是在“金钉子”之下志留系最上部一个笔石带—*Monograptus transgrediens*带发生了一次缺氧事件,导致底栖生物绝灭^[53],并有 $\delta^{13}\text{C}$ 明显正异常^[53,54]。这个事件分别被称为志留-泥盆系界线事件^[55]、C4事件或者*transgrediens*事件^[56]和Klonk事件(Klonk Secundo-Unnamed Event)^[57]。Zhao等人^[58,59]将这个事件的地球化学记录用作华南泥盆系底界的对比标志。

早在1976年,吴祥和(贵州省地层古生物工作队地层组(吴祥和执笔)。贵州的石炭系。内刊,1976)就提出在黔南泥盆-石炭系界线附近存在较大的沉积间断,其上下沉积物和生物群之间都有较明显的差别,认为这个间断面就是泥盆系和石炭系的自然界线。国际泥盆系-石炭系工作组对全世界重要剖面的调查表明,在*Siphonodella praesulcata*向*S. sulcata*演化过程中,确实存在一个间断,缺乏中间环节。*S. praesulcata*带的最上部缺乏该带的命名分子,而是以浅海相牙形石*Protognathodus*动物群为代表,反映全球海平面下降事件。这个全球性的海平面下降事件不仅使浅海的生态系统遭到破坏,而且在远洋生物序列中也出现较为近岸的*Protognathodus*生物相^[60]。Walliser^[55]认为泥盆系-石炭系界线是典型的事件(泥盆纪-石炭纪界线事件,或者Hangenberg事件)界线,不仅表现为菊石、三叶虫、介形虫、牙形石动物群的大量灭亡,而且在岩性方面也有明显变化,德国著名的Hangenberg页岩则被认为是这一事件的反映。Walliser^[55]建议将石炭系界线置于Hangenberg事件开始的层位,即Hangenberg页岩底部,并建议国际地层委员会确定的界线(委员会界线)应与同全球事件相吻合的自然界线一致。王训练等人^[11,60]从综合地层学的观点出发提出将泥盆系-石炭系界线置于Hangenberg事件结束的层位,即Hangenberg页岩顶部,并认为这个界面是*S. sulcata*出现的最低层位,而且是一个层序的初始海泛面,标志明显,野外易于识别和追索。如果以这个界线作为泥盆-石炭系界线标志,不仅可以解决长期以来不同相区地层对比问题,还能大大提高地层的对比精度。在界线层型剖面上,这个界线位于84层(或85层)底部。

目前所知,*S. isolatus*的首次出现可能既不代表生物界演化的阶段性,也与无机界发展阶段性之间没有密切关系。在全球各地以*S. isolatus*首次出现为标志的石炭-二叠系界线的事件地层标志不明显,以*S. isolatus*为标志进行石炭-二叠系界线的识别和精确对比可能都是比较困难的^[27,28]。王训练等人^[27,28]认为,长远来看,可能需要重新选择石炭-二叠系界线的定义,重新确定石炭-二叠系界线全球层型剖面 and 点位(GSSP),把界线的定义选择与生物辐射事件或生物爆发事件

相一致的自然界线联系起来,使地层界线反映地球演化的自然阶段,才能解决石炭-二叠系界线的识别和精确对比问题。

三叠系底界(即印度阶底界)界线与显生宙最大的生物灭绝事件相伴随,为界线判别和对比提供了大量生物和非生物的事件标志^[61,62]。在煤山剖面上,以牙形石*Hindeodus parvus*标定的二叠系-三叠系界线位于27层灰岩的中部,即27c层之底^[63],而最主要的生物大灭绝界线位于25层(火山黏土岩)之底,低于依据牙形石确定的二叠系-三叠系界线18 cm^[64-66]。另一个显著的生物大灭绝界线位于28层(火山黏土岩)之底,高于依据牙形石确定的二叠系-三叠系界线8 cm^[66,67]。大灭绝界线位置在多数地区都能够借助各种手段识别出来。尤其是被称为“界线黏土岩”的25层黏土岩不仅含有一些特征性的碎屑物质,以及可能有别于其他火山黏土岩的特殊矿物和元素组分,而且与二叠纪末主灭绝界线相关联,是一个十分有效和可靠的地层界线识别标志^[61]。相当于煤山剖面25层之底的主灭绝界线,在多数剖面上都能够借助于生物灭绝事件或相关的环境事件沉积标志确定出来,从而可以比较准确地限定二叠系-三叠系界线的位置关系^[61]。在煤山剖面上,二叠纪-三叠纪之交碳同位素体现为两次显著的负向漂移^[68,69],其负异常峰值分别位于25和34层。前者与重大生物灭绝线和“界线黏土层”基本一致,通常作为二叠系-三叠系界线的重要划分和对比标志而得到广泛应用^[61]。

综上所述,由于以界层层型定义的年代地层界线在识别和对比中普遍出现了问题,地层对比中纷纷寻求使用与界层层型生物定义有密切联系的事件地层标志进行对比,既可以看作是地层学研究认识上的一个深化和飞跃,也可以理解为地层学研究学术指导思想的一个回归。

事实上,一些已经确定的年代地层界线定义(GSSP)并没有完全按照国际地层委员会和《国际地层指南》的要求将界线定义置于一个标准化石的首现点(first appearance datum, FAD)上,而是以地质事件的自然记录作为界线定义的标志。这些界线定义确定后不仅争议很少,而且在全球对比中取得了很大的成功,与以标准化石的首现点定义的界层层型剖面 and 点位形成明显的对比。埃迪卡拉系底界定义和古近系底界定义就是最好的实例。

埃迪卡拉系底界的层型剖面为澳大利亚南部弗林德斯山脉(Flinders Ranges)的依诺拉马沟剖面(Enorama Creek section),层型点位为直接覆盖于冰碛岩及其相关的沉积物之上的那卡林纳组(Nuccaleena Formation)盖帽碳酸盐岩的底界^[70]。白垩系与古近系之间的界线,即丹麦阶(Danian)底界的层型剖面为突尼斯的El Kef剖面,层型点位为界线黏土层的底部(the base of the boundary clay)^[71]。在这个界层层型剖面上存在许多对比标志,其中最有用是陨石撞击证据(铱异常、富镍尖晶石等)和浮游微体化石与超微化石的集群绝灭。这个事件与界层层型剖面 and 点位完全吻合。因此,白垩系与古近系之间的界线以陨石撞击地球的瞬间为精确标志。这就意味着

由陨石撞击形成的所有沉积物都属于丹麦阶(古近系)。这个定义很好地解决了界线的对比问题^[71]。

近年来,新生代年代地层表研究大量采用事件地层标志和综合地层学研究方法,确定地层界线层型和剖面点位。古气候事件^[72,73]、氧同位素偏移事件^[74]、碳同位素偏移事件^[75,76]、气候旋回事件^[77]和磁极反转事件^[78]的地质记录都被用来定义地层界线层型剖面 and 点位。还有一些新生界年代地层界线层型剖面 and 点位是以自然界线为标志,采用多指标的综合地层学方法确定的^[79-81]。与古生界相比,新生界年代地层系统中阶的时限更短,分辨率更高,对比更为精确,这也给亟须提高分辨率和对比精度的古生界年代地层系统研究带来极大的启示。

4 两类地层单元的划分、特征及其相互关系

Wang等人^[82]按地层单元界线穿时与否将地层学的分支学科大致分为两类。一类是生物地层学,其地层单元具有不可重复的性质,在建立地层序列和确定地层时代方面具有相对的独立性,是地层学的基础。生物地层学的不足之处在于生物地层单元界线一般都有一定程度的穿时性,不易进行精确对比,而且无法进行不同沉积相区地层的对比。另一类即现代地层学的一系列分支学科,包括事件地层学、层序地层学、生态地层学、磁性地层学,还有稳定同位素地层学和地震地层学等。这一类分支学科都以突发性瞬时事件的地质记录作为地层划分对比的依据,建立的地层单元界面一般都表现为自然界线。自然界线广泛存在于地层中,代表地层发育的阶段性和突变点,既可以表现为沉积不连续,同时也普遍存在于连续沉积中,不仅分布广,可识别性强,易于操作,而且在理论上都是严格等时的,可用于精确标定地层单元界线并进行跨相区大范围甚至全球性高精度地层对比。这就弥补了生物地层学方法难以进行精确对比的不足^[10-12]。在生物地层学建立的地层格架内,自然界线不仅可以作为详细划分精确对比地层的重要依据,还可能用于检验生物地层对比的准确性和对比精度。然而,这些地层单元界面都缺乏独立的年代标志,并可在地史时期重复出现,自身不仅无法确定时代和持续时间及速度,也无法确定发生的先后顺序,其时代和序列的确定只能依赖于生物地层学 and 同位素年代学。一般来说,只有在生物地层确定的地层序列格架内,其他地层学方法才能有效地用于高精度地层对比。所以单独使用事件地层标志定义年代地层界线是不可行的。

生物地层界线与现代地层界线存在着密切关系,甚至存在成因联系。现代地层学的一系列分支学科都具有事件地层的性质,它们确定的地层界线常常吻合,而且常与生物地层单位的上界一致。这是因为事件界线中某一突发事件的出现会触发其他事件,而且会因为地质事件引起环境发生巨变而导致生态系统被破坏,生物大量绝灭。白垩系与古近系之间的界线上发生了一系列物理事件和化学事件,也发生了重大

的生物集群绝灭事件。生物地层单位的下界线一般稍高于事件地层的顶界线^[83-85](图1)。从层序地层的观点来看,生物地层单位的下界一般至少高于事件地层单位顶界线一个低位体系域^[82,86,87]。事件地层界线底界面一般都是生物绝灭面,即生物地层单位的上界。地质事件发生后,生态环境恶化,生物进化进入残存期。在残存期,生态环境恶劣,生物进化缓慢,一般鲜有可以作为标准化石的物种形成。随着生态环境的好转,生物进化进入复苏甚至辐射期,产生一批可以用于生物地层划分对比的生物类群。因此,生物地层单位的下界一般至少高于事件地层单位底界一个低位体系域。生物地层单元底界与事件地层单元顶界之间的这种成因上的关系为探索将生物地层与事件地层结合起来定义年代地层界线成为可能(图1)。

综上所述,生物地层单元界线与现代地层单元界线各有特色,优势互补,而且在成因上具有密切的关系,为构建新一代年代地层表创造了条件。

5 选择年代地层界线定义需要考虑的重要因素

地层学的重要意义和生命力在于地层的对比,即等时界面的识别与建立。“金钉子”尽管在一个剖面上表现为一个点,

实质上在空间上代表一个等时面。这个等时面将下面的老地层与上面的新地层分开。“金钉子”(GSSP)的重要价值是以生物地层为主确定了地层界线的标准,为建立等时对比面奠定了基础,是建立等时界面的重要条件和先决条件,但还不是“等时界面”本身,并没有解决地层界线标准的精确对比问题。作为地层界线的划分标准,GSSP的确定应与地层对比结合起来,即与“等时界面”的建立结合起来,与野外区调和地质制图联系起来,提高GSSP的可识别性、对比潜力和以GSSP为标准建立等时界面的可操作性。只有这样,才可能真正使GSSP成为建立现代国际地层表的基础。

“金钉子”之后国际年代地层表中年代地层界线单元定义的选择,有下列几个重要因素需要考虑。

(1) 等时性。地层学研究的真正要义在于地层等时对比。因此,地层界线定义标志可否进行等时性对比是至关重要的。地层对比的等时性是相对的,以“金钉子”定义的年代地层单元界线对比的误差在极端情况下是一个生物带,绝对年龄单位是百万年(Ma)。在一个生物带的误差范围内“金钉子”的对比是等时的,在十万年甚至万年级精度上“金钉子”无法完成等时对比。即以“金钉子”定义的国际地质年代表无法为地球系统科学研究提供十万年甚至万年级精度的时间和空间格架。相比之下,生物地层格架内的事件地层界线的等时性要

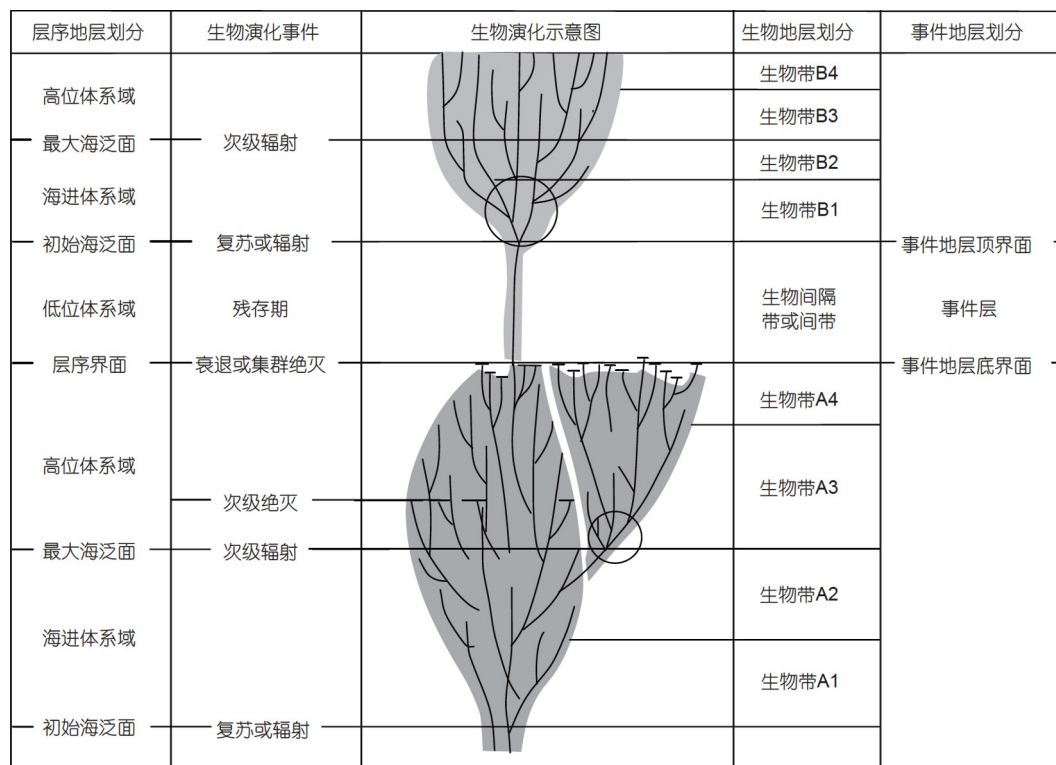


图1 生物演化事件、海平面变化、生物地层、层序地层、事件地层之间的关系。生物演化示意图据文献^[84]

Figure 1 Relationships among evolutionary events, sea level changes, biostratigraphy, sequence stratigraphy, and event stratigraphy. The biological evolution diagram is from Ref. [84]

明显优于单一的生物地层界线。

(2) 可识别性. 作为地层对比的标准, 地层界线定义的可识别性无疑是十分重要的. 如果地层界线标准不易识别, 则难于进行精确对比; 如果不易识别和精确对比, 地层界线标准的意义和实际作用就会受到明显的限制^[27]. 年代地层界线定义不仅要有生物标志和化学标志, 而且还要有明显的物理标志, 在野外易于识别, 可以用于区域地质填图. 从可识别性上来看, 事件地层界线明显优于生物地层界线。

(3) 多学科可研究性. 一个理想的年代地层界线应该反映“地球历史演化重大自然变化”. 这个重大变化应该在物理、化学和生物方面都有不同程度的反映, 可以用不同的方法识别并用于对比. 白垩-古近系之间的界线就是这方面最好的实例. 从适用于多学科研究方面来看, 事件地层界线明显优于生物地层界线。

(4) 普遍存在性. 用于定义年代地层界线的标志最好在地层中普遍存在. 生物带在地层中是普遍存在的, 但是生物带底界是穿时的, 而且无法跨相区对比. 狭义的地质事件及其地质记录虽有极强的等时性和可识别性, 但在地层中少见且分布不均匀, 不能系统地用于定义年代地层界线. 广义的事件地层界线, 即具有事件地层界线性质的地层界线, 如层序地层关键界面、磁性地层界面、元素地球化学地层界面、同位素地球化学地层界面、旋回地层界面在地层中都是普遍存在的, 可以作为辅助标志用于定义地层界线. 从普遍存在性方面看, 层序地层学中层序的关键界面(层序界面、初始海泛面和最大海泛面)、副层序界面和副层序组界面在地层中是普遍存在的, 旋回地层学中不同级别沉积旋回的界面在地层中也是普遍存在的。

(5) 不可重复性. 生物地层界线是不可重复的. 除了生物集群绝灭事件界线外, 其他具有事件地层界线性质的地层界线在地史时期都是可以重复出现的. 正因为如此, 具有事件地层界线性质的地层界线不能单独用于定义年代地层界线。

(6) 跨沉积相区广泛可对比性. 生物地层界线是穿时的, 而且无法用于不同沉积相区的对比. 事件地层类界线在理论上是等时的, 而且可以用于跨相区对比。

按照上述因素要求, 生物地层学与事件地层学都无法独立完成高分辨地质年代表的任务, 需要以辩证唯物主义为指导, 将生物地层与事件地层有机结合起来, 在生物地层构架内用事件地层标志定义年代地层界线. 两个指标共同使用, 缺一不可。

6 选择全球界线层型剖面 and 点位的参考标准

选择全球界线层型剖面 and 点位(GSSP)涉及两个问题: 一个是地层界线的生物地层定义, 另一个是如何确定定义地层界线的标准化石出现的最早位置. 目前学界对国际地层表中地层界线长期争论不休, 根本原因在于对上述两个问题的确定缺乏客观的标准, 在GSSP的选择上受到诸多非科学因素甚

至地缘政治的影响。

6.1 选择全球界线层型生物地层定义的参考标准

《国际地层指南》^[88,89]指出, 阶的界线层型必须选择在连续沉积(最好海相)序列之内, 而且其顶、底界的界线层型应当与作为等时面、能易于识别和长距离追索的生物带这样的明显标志面在一起. 《国际地层指南》^[88,89]一方面认为, 最坏的可能界线就是一个不整合, 因为它不但不代表时间上一个明显点, 而且倾向于侧向延伸年龄改变. 同时又指出: 如果地球历史演化重大的自然变化(自然间断)能与连续沉积序列中特殊的点一致, 这些点就可以构成合乎需要的阶的界线层型点. 这从一个侧面反映了在确定GSSP的方法上存在着强调单一岩性连续沉积和重视自然界线的两种不同观点和表达方式. 实际上, 这也充分说明界线层型和自然界线不仅是相互联系的, 而且它们之间应当是相互统一的。

国际地层委员会^[90-92]虽然也指出GSSP应与一些最具有对比潜力的标志性事件联系起来, 以利于对比, 但又要求“界线附近没有纵向相变”, 认为“岩相或生物相的变化反映了生态条件的变化, 可能控制了界线上某一特定种的出现. 岩性的突然变化可能与一个间断相对应. 一条明显的界线可能就有可疑之处”^[90-92]. 在这种思想指导下, 选择界线要求最大限度地避开自然事件的影响. 在具体实践中, 过分强调沉积的连续而相对忽视了地质事件及其形成的自然界面的重要意义, 方法上又较单纯地依靠生物地层方法, 强调了重要标志性化石属种首次出现的重要性. 因而所建立的年代地层界线的地质标志不明显, 在野外难于识别和对比, 在实际工作中不易操作. 由此导致GSSP的研究在标志点层位、标志化石和地点的选择上引起了许多争论^[55,83,93,94].

根据生物地层界线与广义的事件地层界线之间的成因关系, 王训练和苏文博^[11]提出事件地层单元的顶界面. 如层序地层中三级层序的初始海泛面, 可以作为选择全球界线层型剖面 and 点位的一个重要参考标准, 认为界线层型剖面 and 点位应选择的事件地层单元顶界面(三级层序的初始海泛面)之上第一个广泛分布的化石带底界, 如图1中的生物带B1底界. 这样可以弥补用单一生物地层学方法确定界线层型剖面 and 点位的不足, 消除由此产生的争议, 既满足了《国际地层指南》^[88,89]和国际地层委员会^[90-92]对界线层型剖面 and 点位的要求, 又可以最大限度地维护地质年代表的稳定性, 还大大提高了年代地层界线标准的可识别性, 有利于全球精确对比。

按照这个参考标准, 目前使用的泥盆-石炭系界线的定义和二叠-三叠系的定义是比较理想的. 它们都是以事件地层单元顶界面(三级层序的初始海泛面)之上第一个广泛分布的生物带定义的, 所以关于界线的定义争论比较少. 古生界其他系底界的定义与事件地层界线的关系不是十分明确, 因而关于界线定义的争论都比较大。

6.2 选择全球界线层型剖面的参考标准

年代地层界线定义确定之后的工作就是选择层型剖面。按照现在的做法,希望选择定义界线标准化石首现的剖面作为层型剖面。在现阶段技术水平下,一个化石在全球的首现点几乎是无法确定的,只能希望确定该化石出现最早的剖面。即使要确定标准化石出现最早的剖面,仅仅单纯的生物地层也是无法完成的,需要生物地层与事件地层结合完成。生物地层界线有一定程度的穿时性,各剖面上地层的沉积速率也不易确定。因此,难于确定标准分子出现的最早地区和最低层位。如图2所示,标准分子在A、B、C、D和E五个剖面上的出现并不是等时的。如前所述,生物地层单元下界通常不同程度地高于其下事件地层单元的顶界面(图2),或者与其下事件地层单元的顶界一致。假定在相同的沉积环境下各剖面上沉积速率是近乎相等,则与事件地层顶界面距离越短的化石出现的时间越早,即与事件地层顶界面距离最短的化石出现最早,其所在剖面应该作为界线层型剖面。在目前情况下,可以在同样沉积古地理背景(通常是大陆斜坡或半深海环境)下连续沉积序列中选择标准分子化石带底界和其下事件地层顶界面(如三级层序的初始海泛面)之间距离最短的剖面作为界线层型剖面,该剖面上标准分子首次出现的位置便是理想的GSSP(图2)。在图2中,假定A、B、C、D和E五个剖面沉积于大致相同的古地理背景,具有大致相同的沉积速率,在C剖面上标准化石带底界距离其下事件地层顶界面距离最短,可以认为与其他剖面相比,C剖面上标准化石出现的时间最早,应当作为界线层型剖面。

在几个曾作为二叠-三叠系界线的候选层型剖面上,标准分子 *H. parvus* 首次出现的位置均高于事件地层顶界面(表现为三级层序的初始海泛面)。*H. parvus* 带的底界在浙江长兴煤山剖面上高于事件地层顶界面8 cm^[95],在四川广元上寺剖面上高于事件地层顶界面22 cm^[36],在克什米尔Guryul谷剖面上高于事件地层顶界面约600 cm^[96]。3个剖面中,浙江煤山剖面上出现的 *H. parvus* 位置与其下事件地层顶界面距离最短。如果这几个剖面上的沉积相是一致的,具有大体一致的沉积

速率,在目前情况下,则可以认为浙江煤山剖面上的 *H. parvus* 出现最早。因此,以浙江长兴煤山剖面作为二叠-三叠系界线的GSSP无疑是最佳选择。

6.3 识别和对比年代地层界线的重要参考标志

目前仅在极少数剖面上发现定义年代地层界线的首要标准类群首次出现的位置与事件地层顶界面完全一致,大量的情况是首要标准类群首次出现的位置常不同程度地高于事件地层顶界面^[11](图2)。

从事件地层单元顶界面到首要标准类群首次出现这一段地层中没有标准类群化石出现,至少有几种可能的原因:(1)当时标准类群的生物物种没有形成,即标准类群物种的形成相对于事件地层单元顶界面稍微滞后;(2)标准类群的生物物种已经形成,但没有迁移到此地;(3)标准类群的生物物种已经形成也已经迁移到此地,但由于各种原因没有形成化石;(4)标准类群的生物物种已经形成也已经迁移到此地,并已经形成化石,但由于研究程度所限还没有找到它出现的最低层位。遗憾的是,地层学家和古生物学家目前还无法确定究竟是哪种原因造成标准类群首次出现的位置和事件地层单元顶界面位置的差异,因而一般也难于确定标准类群化石带的最低层位究竟在何处。同时,由于测年技术等方面的限制,尚不能精确地估算各剖面上的沉积速率。因此,目前还很难确定标准类群在哪个剖面上出现得最早。

大量研究表明,不论受到上述何种因素的影响,定义全球界线层型剖面和点位标准类群首次出现的位置均不低于其下事件地层单元顶界面,即事件地层单元顶界面是标准类群分布理论上的最低界线。因此可以把事件地层单元顶界面看成是定义全球界线层型剖面和点位标准类群首次出现的最低位置^[11](图2)。理论上,在地层连续地区同一三级层序初始海泛面(事件地层单元顶界面)是全球等时的,初始海泛面又有明显的生物标志和物理标志,在地层划分和对比上具有好的可操作性。因此可以将标准分子化石带底界之下的事件地层单元顶界面作为识别和对比年代地层界线的重要参考标志^[11]。

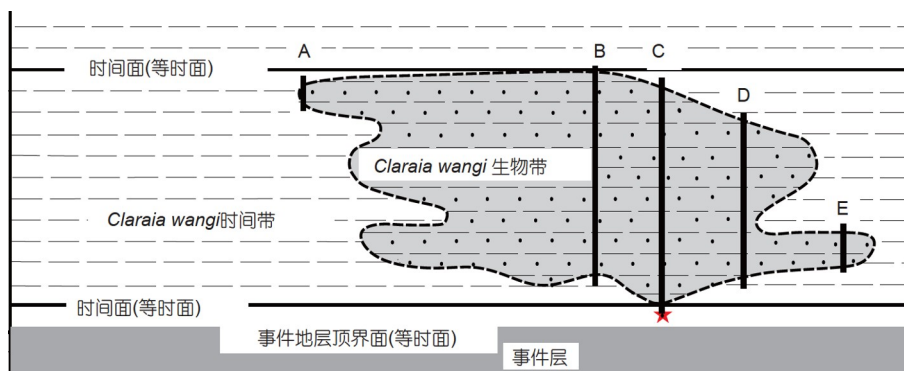


图2 时间带、生物带与事件地层界线之间的关系

Figure 2 Relationships among chronozone, biozone and event stratigraphic boundaries

王训练^[12]从综合地层学的观点出发, 讨论并提出了确定GSSP的步骤和方法, 补充和完善了现行确定GSSP方法. 采用补充完善后的这种方法确定GSSP, 不仅使地层界线更好地反映包括生物发展阶段性在内的“地球历史演化重大自然变化”, 而且使地层界线的识别和对比更具有可操作性, 还使地层界线标准的选择更具有客观性.

7 研究实例: 上泥盆统年代地层划分

泥盆系所有阶的定义和阶的GSSP已经被全部确定^[97,98]. 国际地层委员会泥盆系分会的工作重点已经转移到亚阶的建立^[99-101].

上泥盆统包括两个阶: 下部的弗拉阶(Frasnian)和上部的法门阶(Famennian). 进一步划分弗拉阶的意见基本趋于一致. 学者几乎都同意弗拉阶分为3个亚阶^[102]. 中弗拉亚阶的底界以牙形石*Palmatolepis punctata*的首次出现为标志, 上弗拉亚阶以牙形石*Palmatolepis semichatovae*的海进面为标准, 比下*rhenana*带稍高一点^[100]. 相比之下, 进一步划分法门阶的争论较大. 争论的焦点是三分还是四分. 2003年, 通过国际地层委员会泥盆系分会选举委员的最后投票, 法门阶四分方案已获通过^[101], 各亚阶生物地层的定义尚在争议之中.

Johnson等人^[103-105]在北美和欧洲晚泥盆世识别出7个具有全球一致性的海平面升降旋回(图3). 这7个海平面升降旋回所控制的7个三级层序在全球范围内的远距离对比也得到生物地层的有力支持. 在华南地区, 除了欧美地区Ile的第3个小规模海平面上升事件表现不明显外, 欧美地区晚泥盆世其余几个海平面上升在华南地区表现得相当清楚, 说明这些海平面变化旋回具有全球对比意义^[106,107]. 本文主张用海进事

件面(具体表现为三级层序中的初始海泛面)和其上第一个广泛分布的生物带底界确定亚阶的底界. 根据全球地质事件、海平面变化以及它们与生物地层的关系, 把弗拉阶划分为3个亚阶, 把法门阶划分为4个亚阶. 这7个亚阶的底界分别与上泥盆统7个海进事件面(层序的初始海泛面)之上第一个广泛分布的生物带底界一致, 晚泥盆世7个海平面变化旋回的海进面可以作为选择、定义、识别、对比这7个亚阶底界的重要参考标准(图3).

下弗拉亚阶底界, 即中、上泥盆统界线, 应置于*Mexotaxis falsiovalis*带底界或者最下*Palmatolepis asymmetricus*带底界, 较现在使用的中、上泥盆统界线标准下*Palmatolepis asymmetricus*带底界略低^[108]. 这条界线与全球海平面上升事件Iib一致^[103-105,109,110]. 中弗拉亚阶底界以牙形石*Palmatolepis punctata*的首次出现为标志. *Palmatolepis punctata*首次出现的层位下部是世界性的海侵事件Iic. 上弗拉亚阶底界与*Palmatolepis semichatovae*海进事件, 即海平面上升事件Iid的底界一致, 以*Palmatolepis semichatovae*的首次出现为标志, 略高于下*Palmatolepis rhenana*带的底界. *Palmatolepis semichatovae*海进事件是晚泥盆世、也是整个泥盆纪中最大的海进事件^[103-105], 是一条非常容易被生物地层学家在全球识别和使用的自然界线^[111].

法门期总体上是一个全球海平面下降期. 这个总体海平面下降期被4个海平面上升事件所中断, 构成4个海进-海退旋回^[103-105]. 其中Ile包括3个次级海进-海退旋回, IIf仅包括1个海进-海退旋回^[103-105]. 下法门亚阶的底界, 即弗拉阶与法门之间的界线, 置于中*Palmatolepis triangularis*带的底界, 与海平面升降旋回下Ile旋回(lower Ile)^[105]的底界一致, 高于现

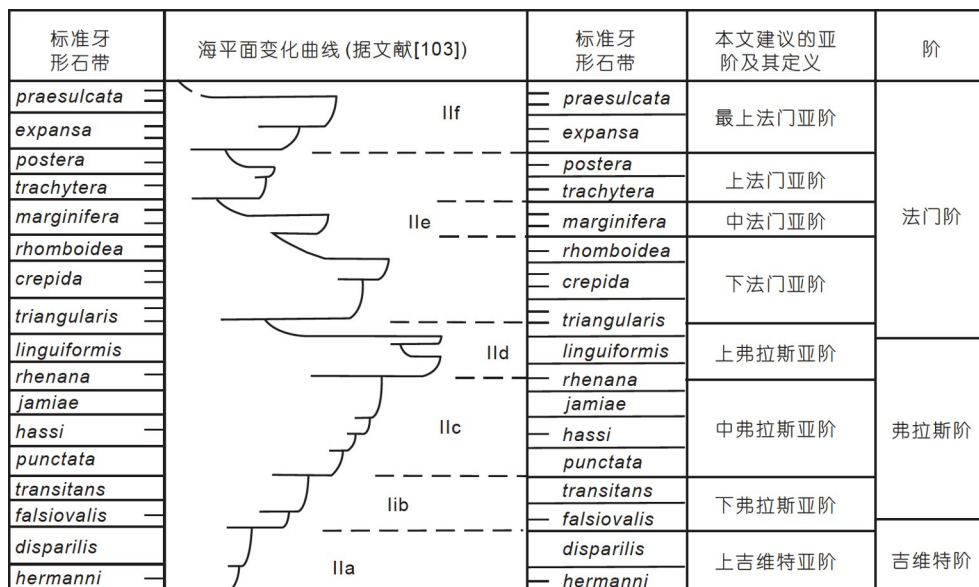


图3 本文建议的上泥盆统亚阶划分、定义及其与生物地层和事件地层之间的关系

Figure 3 Suggested division and definition of Upper Devonian substages and their relationship to biostratigraphy and event stratigraphy

在使用的下*Palmatolepis triangularis*带的底界,也高于弗拉阶-法门阶绝灭事件层的底界。中法门亚阶的底界以*Palmatolepis marginifera*带的底界为生物地层标志,与海平面升降旋回中Ile旋回(middle Ile)^[105]的底界一致。这个全球海平面上升事件在北美、西欧、俄罗斯亚洲部分、我国华南及澳大利亚西部都可以识别^[112]。上法门亚阶的底界以牙形石下*trachytera*带的底界为标志,与海平面变化旋回上Ile旋回(upper Ile)的底界一致。最上法门亚阶时间范围大致与传统的Strunian阶一致,其底界的定义为牙形石*Palmatolepis expansa*的首次出现。下*expansa*带之底界位置与重要的全球海平面上升事件IIf一致^[103~105,113,114]。

这个划分方案使上泥盆统阶和亚阶的划分与地球历史演化的自然节律相对应,阶和亚阶的界线与重大地质事件吻合。阶与亚阶的界线不仅是一个生物地层界线,而且有明显的事件地层标志,可能代表自然界线。

需要说明的是,Johnson等人^[103~105]在北美和欧洲晚泥盆世识别的7个海平面升降旋回中,上Ile海平面上升事件,即与下*trachytera*带底界一致的海平面上升事件,其幅度和影响范围都比较小。这个海平面变化旋回在华南的表现也不十分明

显^[106,107]。因此本文提出的以下*trachytera*带底界出现为标志的上法门亚阶的识别相对比较困难,不如其他几个亚阶明显。从亚阶的延续时限来看,中法门亚阶仅包含一个牙形石带,即*Palmatolepis marginifera*带,其明显偏短,也混淆了生物带和亚阶的区别。考虑到亚阶的可识别性、可对比性和亚阶与生物带的区别,或许把本文提出的中法门亚阶与上法门亚阶合并为一个亚阶,将法门阶划分为下、中、上3个亚阶,分别以*Palmatolepis marginifera*带的底界和下*expansa*带的底界作为中法门亚阶和上法门亚阶底界的定义,要比现在把法门阶分为下、中、上和最上4个亚阶更为合理。

进入21世纪以来,地球科学研究进入地球系统科学时代^[115],不仅为地层学研究提出了更高的要求和挑战,也为地层学研究带来了机遇。希望地层学研究的同行在科学研究与实际应用两方面用更加开阔和更加综合的观点研究地层学,以适应和满足地球系统科学时代对地层学的要求。同时,中国的地层学研究不仅要力争更多的“金钉子”落户中国,还应该充分利用自身的地层发育优势和研究优势,加强地层学理论与方法研究,力争有所突破,在国际地层学界研究规则的制订方面获得更大的话语权。

致谢 感谢中国地质调查局武汉地质调查中心汪啸风研究员、中国地质科学院地质研究所侯鸿飞研究员、中国地质大学(北京)景秀春副教授、沈阳副研究员提出的宝贵修改意见。感谢两位匿名审稿专家对拙作的建设性评论。感谢国家自然科学基金(42172037, 41702023)资助。

推荐阅读文献

- McLaren D J. The Silurian-Devonian Boundary Committee. A final report. In: Martinsson A, ed. The Silurian-Devonian Boundary. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1977, 5: 1-34
- Hou H F. The struggle between new and old ideas and methodology in stratigraphy, as viewed from the establishment of the Silurian\Devonian boundary in the world (in Chinese). Geol Rev, 1980, 26: 368-371 [侯鸿飞. 从国际志留-泥盆系界线的确定看地层学某些领域中新旧观念和方法之争. 地质评论, 1980, 26: 368-371]
- Wang X L, Su W B, Wang H Z. The "natural boundaries" in stratigraphy: Their position and significance (in Chinese). Geoscience, 1999, 2: 253-254 [王训练, 苏文博, 王鸿祯. "自然界线"在地层学中的地位与作用. 现代地质, 1999, 2: 253-254]
- Fan J X, Li C, Hou X D. The International Chronostratigraphic Chart (v 2018/08) (in Chinese). J Stratigr, 2018, 42: 365-368 [樊隽轩, 李超, 侯旭东. 国际年代地层表(2018/08版). 地层学杂志, 2018, 42: 365-368]
- Soreghan G L, Bralower T J, Chandler M A. GeoSystems: Probing Earth's deep-time climate & linked systems. In: A Report of the National Science Foundation's Geosystems Workshop, 2014
- Sun S, Wang C S. Deep time and sedimentology (in Chinese). Acta Sedimentol Sin, 2009, 27: 792-810 [孙枢, 王成善. 深时(Deep Time)研究与沉积学. 沉积学报, 2009, 27: 792-810]
- Brenner R L, Mchague T R. Integrative Stratigraphy. New Jersey: Prentice Hall, 1988. 1-385
- Jin Y G, Li C. On the integrated stratigraphy (in Chinese). Adv Earth Sci, 1991, 6: 6-12 [金玉珩, 李淳. 综合地层学的发展趋势. 地球科学进展, 1991, 6: 6-12]
- Yao H Z, Xie D F. On the systematic framework of integrative stratigraphy (in Chinese). J Stratigr, 1994, 18: 241-247 [姚华舟, 谢德凡. 综合地层学的系统层次结构. 地层学杂志, 1994, 18: 241-247]
- Wang X L. Integrated stratigraphy—An effective tool in high resolution correlation (in Chinese). In: Shi W, ed. Proceedings of the National Postdoctoral Science and Technology Achievements Exhibition and Talent Academic Exchange. Beijing: Xueyuan Publishing House, 1996. 1190-1196 [王训练. 综合地层学——高分辨、高精度地层划分对比的有效途径. 见: 石伟, 编. 全国博士后科技成果展示及人才学术交流

会学术论文集. 北京: 学苑出版社, 1996. 1190–1196]

- 11 Wang X L, Su W B. An important reference criterion for the selection of GSSP (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1999, 44: 2008–2016 [王训练, 苏文博. 选择全球界线层型剖面点(GSSP)的一个重要参考标准. 科学通报, 1999, 44: 2008–2016]
- 12 Wang X L. On steps and methods for the establishment of global boundary stratotype section and point (GSSP) from the viewpoint of integrated stratigraphy. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2002, 45: 1027–1041 [王训练. 从综合地层学的观点论确定全球界线层型剖面点(GSSP)的步骤和方法. 中国科学D辑: 地球科学, 2002, 32: 358–367]
- 13 Wu H C, Wang C S, Zhang S H, et al. “Earth Time” Project: Dating precision and temporal resolution in the “Deep Time” record (in Chinese). *Geoscience*, 2011, 25: 419–428 [吴怀春, 王成善, 张世红, 等. “地时(Earth Time)”研究计划: “深时(Deep Time)”记录的定年精度与时间分辨率. 现代地质, 2011, 25: 419–428]
- 14 Wan X Q, Wang C S, Wu H C, et al. From stratigraphy to Earth Time (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2014, 21: 1–7 [万晓樵, 王成善, 吴怀春, 等. 从地层到地时. 地学前缘, 2014, 21: 1–7]
- 15 Rong J, Melchin M, Williams S H, et al. Report of the restudy of the defined global stratotype of the base of the Silurian System. *Episodes*, 2008, 31: 315–318
- 16 Heckel P. Joint Task Group for reappraisal of the Devonian-Carboniferous Boundary GSSP. *Newsl Carbonif Stratigr*, 2008, 26: 3–4
- 17 Becker R T. SDS Annual Report to ICS 2008. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 2009, 24: 2–7
- 18 Richards B, Task Group. Report of the joint Devonian-Carboniferous boundary GSSP reappraisal task group. *Newsl Carbonif Stratigr*, 2010, 28: 26–30
- 19 Slavik L, Brett C E. Minutes of the annual SDS business meeting. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 2016, 31: 21–25
- 20 Spalletta C, Perri M C, Over D J, et al. Famennian (Upper Devonian) conodont zonation: Revised global standard. *Bull Geosci*, 2017, 92: 31–57
- 21 Aretz M, Task Group. Report of the Joint Devonian-Carboniferous boundary GSSP reappraisal task group. *Newsl Carbonif Stratigr*, 2018, 34: 12–13
- 22 Qie W K, Ma X P, Xu H H, et al. Devonian integrative stratigraphy and timescale of China. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 112–134 [鄯文昆, 马学平, 徐洪河, 等. 中国泥盆纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 115–138]
- 23 Babcock L E, Peng S, Zhu M, et al. Proposed reassessment of the Cambrian GSSP. *J Afr Earth Sci*, 2014, 98: 3–10
- 24 Terfelt F, Bagnoli G, Stouge S. Re-evaluation of the conodont *Iapetognathus* and implications for the base of the Ordovician System GSSP. *Lethaia*, 2012, 45: 227–237
- 25 Wang X F, Stouge S, Maletz J, et al. On the problem of global Ordovician lower boundary “golden spike” and Tremadocian subdivision and correlation in China (in Chinese). *Geol Surv China*, 2015, 2: 14–26 [汪啸风, Stouge S, Maletz J, 等. 全球奥陶系底界的“金钉子”问题及我国特马豆克阶(Tremadocian)的划分与对比. 中国地质调查, 2015, 2: 14–26]
- 26 Wang X F. Ordovician tectonic-paleogeography in South China and chrono- and bio-stratigraphic division and correlation (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2016, 23: 253–267 [汪啸风. 中国南方奥陶纪构造古地理及年代与生物地层的划分与对比. 地学前缘, 2016, 23: 253–267]
- 27 Wang X L, Gao J H, Zhang H J, et al. Recognition of the top and base boundaries of the Carboniferous System in the northern margin of the Qaidam Basin (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2002, 9: 65–72 [王训练, 高金汉, 张海军, 等. 柴达木盆地北缘石炭系顶、底界线再认识. 地学前缘, 2002, 9: 65–72]
- 28 Wang X L, Wang L, Zhang H J, et al. Integrated stratigraphy of the Carboniferous-Permian boundary section at Xikou, Zhen’an County, Shaanxi Province, Northwest China (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2006, 13: 291–302 [王训练, 王雷, 张海军, 等. 陕西镇安西口石炭系-二叠系界线剖面综合地层学研究. 地学前缘, 2006, 13: 291–302]
- 29 Lucas S G. We need a new GSSP for the base of the Permian. *Permophiles*, 2013, 58: 8–13
- 30 Chlupáč I, Kukal Z. The boundary stratotype at Klonk. In: Martinsson A, ed. *The Silurian-Devonian Boundary*. Stuttgart: E. Schweizerbart’sche Verlagsbuchhandlung, 1977, 5: 96–109
- 31 Chlupáč I, Jaeger H, Zikmundova J. The Silurian-Devonian boundary in the Barrabadian. *Bull Can Pet Geol*, 1972, 20: 104–174
- 32 Chlupáč I, František V. Thirty years of the first international stratotype: The Silurian-Devonian boundary at Klonk and its present status. *Episodes*, 2003, 26: 10–15
- 33 Jeppson L. Conodont biostratigraphy of the Silurian-Devonian boundary stratotype at Klonk, Czechoslovakia. *Geol Palaeont*, 1988, 22: 21–31
- 34 Carls P, Slavik L, Valenzuela-Rios J I. Revisions of conodont biostratigraphy across the Silurian-Devonian boundary. *Bull Geosci*, 2007, 82: 145–164
- 35 Lai X L, Jiang H S. Revised conodont zonation across the P/T boundary at Shangsi section, Sichuan, China. *Permophiles*, 2009, 53(Suppl 1): 27
- 36 Jiang H, Lai X, Yan C, et al. Revised conodont zonation and conodont evolution across the Permian-Triassic boundary at the Shangsi section, Guangyuan, Sichuan, South China. *Glob Planet Change*, 2011, 77: 103–115
- 37 Yuan D, Chen J, Zhang Y, et al. Changhsingian conodont succession and the end-Permian mass extinction event at the Daijiagou section in Chongqing, Southwest China. *J Asian Earth Sci*, 2015, 105: 234–251

- 38 Zhang Y, Zhang K X, Shi G R, et al. Restudy of conodont biostratigraphy of the Permian-Triassic boundary section in Zhongzhai, southwestern Guizhou Province, South China. *J Asian Earth Sci*, 2014, 80: 75–83
- 39 Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences. Global Standard Stratotype-Section and Point in China (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2013. 1–325 [中国科学院南京地质古生物研究所. 中国“金钉子”: 全球标准层型剖面 and 点位研究. 杭州: 浙江大学出版社, 2013. 1–325]
- 40 Peng S C. Global standard stratotype-section and point (GSSP, “golden spike”) and the GSSP research in China (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2014, 21: 8–26 [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. 地学前缘, 2014, 21: 8–26]
- 41 Talent J A, Feist R. Should SDS continue to play the “stratotype game”? *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 2001, 18: 14
- 42 Gong Y M, Zhang K X. Basics and Frontiers in Stratigraphy (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007. 1–310 [龚一鸣, 张克信. 地层学基础与前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007. 1–310]
- 43 Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. *Palaeoworld*, 2006, 15: 217–222
- 44 Zhu M Y, Yang A H, Yuan J L, et al. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 25–60 [朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 等. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 26–65]
- 45 Zhu M Y, Yang B, Ahn S Y, et al. Insight into the base of the Cambrian: New data from South China and Siberia. In: McIlroy G, ed. Abstract Volume of the International Symposium on the Ediacaran-Cambrian Transition, 2017. 135
- 46 Cooper R A, Nowlan G S, Williams S H. Global stratotype section and point for base of the Ordovician System. *Episodes*, 2000, 24: 19–28
- 47 Miller J F, Evans K R, Ethington R L, et al. Proposed auxiliary boundary stratigraphic section and point (ASSP) for the base of the Ordovician System at Lawson Cove, Utah, USA. *Stratigraphy*, 2015, 12: 219–236
- 48 Wang X F, Stouge S, Maletz J, et al. Correlating the global Cambrian-Ordovician boundary: Precise comparison of the Xiaoyangqiao section, Dayangcha, North China with the Green Point GSSP section, Newfoundland, Canada. *Palaeoworld*, 2019, 28: 243–275
- 49 Wang X F, Stouge S, Maletz J, et al. The Xiaoyangqiao section, Dayangcha, North China: The new global Auxiliary Boundary Stratotype Section and Point (ASSP) for the base of the Ordovician System. *Episodes*, 2021, 44: 359–383
- 50 Underwood C J, Crowley S F, Marshall J D, et al. High-resolution carbon isotope stratigraphy of the basal Silurian Stratotype (Dob’s Linn, Scotland) and its global correlation. *J Geol Soc*, 1997, 154: 709–718
- 51 Berry W B N. The Ordovician-Silurian boundary: New data, new concerns. *Lethaia*, 1987, 20: 209–216
- 52 Lespérance P J, Barnes C R, Berry W B N, et al. The Ordovician-Silurian boundary stratotype: Consequences of its approval by the IUGS. *Lethaia*, 1987, 20: 217–222
- 53 Manda Š, Frýda J. Silurian-Devonian boundary events and their influence on cephalopod evolution: Evolutionary significance of cephalopod egg size during mass extinctions. *Bull Geosci*, 2010, 85: 513–540
- 54 Buggisch W, Joachimski M M. Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of Central and Southern Europe. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 240: 68–88
- 55 Walliser O H. Natural boundaries and commission boundaries in the Devonian. *Cour Forsch Inst Senckenb*, 1985, 75: 401–408
- 56 Urbanek A. Biotic crises in the history of Upper Silurian graptoloids: A palaeobiological model. *Hist Biol*, 1993, 7: 29–50
- 57 Jeppsson L. Silurian oceanic events: Summary of general characteristic. *N Y State Mus Bull*, 1998, 491: 239–257
- 58 Zhao W, Jia G, Zhu M, et al. Geochemical and palaeontological evidence for the definition of the Silurian/Devonian boundary in the Changwantang Section, Guangxi, China. *Est J Earth Sci*, 2015, 64: 110–114
- 59 Zhao W, Wang N, Zhu M, et al. Geochemical stratigraphy and microvertebrate assemblage sequences across the Silurian/Devonian transition in South China. *Acta Geol Sin*, 2011, 85: 340–353
- 60 Wang X L. On the Devonian-Carboniferous boundary of neritic facies areas in South China from a synthetic stratigraphic viewpoint (in Chinese). *Geol Rev*, 1997, 43: 394–402 [王训练. 从综合地层学观点论华南浅海相泥盆系-石炭系的分界. 地质论评, 1997, 43: 394–402]
- 61 Tong J N, Huang Y F, Liang L. Early Triassic biological-environmental-chronological stratigraphy (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2014, 21: 144–156 [童金南, 黄云飞, 梁蕾. 早三叠世生物-环境-年代地层研究. 地学前缘, 2014, 21: 144–156]
- 62 Tong J N, Chu D L, Liang L, et al. Triassic integrative stratigraphy and timescale of China. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 189–222 [童金南, 楚道亮, 梁蕾, 等. 中国三叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 194–226]
- 63 Yin H F, Zhang K X, Tong J N, et al. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 2001, 24: 102–114
- 64 Jin Y G, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 2000, 289: 432–436
- 65 Shen S, Crowley J L, Wang Y, et al. Calibrating the end-Permian mass extinction. *Science*, 2011, 334: 1367–1372
- 66 Song H, Wignall P B, Tong J, et al. Two pulses of extinction during the Permian-Triassic crisis. *Nat Geosci*, 2013, 6: 52–56

- 67 Yin H, Feng Q, Lai X, et al. The protracted Permo-Triassic crisis and multi-episode extinction around the Permian-Triassic boundary. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 1–20
- 68 Xie S, Pancost R D, Huang J, et al. Changes in the global carbon cycle occurred as two episodes during the Permian-Triassic crisis. *Geology*, 2007, 35: 1083–1086
- 69 Zuo J X, Tong J N, Qiu H O, et al. Evolution of the carbon isotope composition of the Lower Triassic carbonates, Lower Yangtze Region, South China. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, 49: 225–241 [左景勋, 童金南, 邱海鸥, 等. 下扬子地区早三叠世碳酸盐岩碳同位素组成的演化特征. 中国科学D辑: 地球科学, 2006, 36: 109–122]
- 70 Knoll A, Walter M, Narbonne G, et al. The Ediacaran Period: A new addition to the geologic time scale. *Lethaia*, 2006, 39: 13–30
- 71 Molina E, Alegret L, Arenillas I, et al. The Global Boundary Stratotype Section and Point for the base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, Tertiary, Cenozoic) at El Kef, Tunisia—Original definition and revision. *Episodes*, 2006, 29: 263–273
- 72 Walker M, Head M J, Berkelhammer M, et al. Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): Two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries. *Episodes*, 2018, 41: 213–223
- 73 Walker M, Johnsen S, Rasmussen S O, et al. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period) in the NGRIP ice core. *Episodes*, 2008, 31: 264–267
- 74 Hilgen F J, Abels H A, Iaccarino S, et al. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Serravallian Stage (Middle Miocene). *Episodes*, 2009, 32: 152–166
- 75 Dupuis C. The Dababiya Quarry Section: Lithostratigraphy, clay mineralogy, geochemistry and paleontology. *Micropaleontology*, 2003, 49: 41–59
- 76 Aubry M P, Ouda K, Dupuis C, et al. The Global Standard Stratotype-section and Point (GSSP) for the base of the Eocene Series in the Dababiya section (Egypt). *Episodes*, 2007, 30: 271–286
- 77 Castradori D, Rio D, Hilgen F J, et al. The Global Standard Stratotype-section and Point (GSSP) of the Piacenzian Stage (Middle Pliocene). *Episodes*, 1998, 21: 88–93
- 78 Schmitz B, Pujalte V, Molina E, et al. The Global Stratotype Sections and Points for the bases of the Selandian (Middle Paleocene) and Thanetian (Upper Paleocene) stages at Zumaia, Spain. *Episodes*, 2011, 34: 220–243
- 79 Molina E, Alegret L, Apellaniz E, et al. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Lutetian Stage at the Gorronatxe section, Spain. *Episodes*, 2011, 34: 86–108
- 80 Agnini C, Backman J, Boscolo-Galazzo F, et al. Proposal for the Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Priabonian Stage (Eocene) at the Alano section (Italy). *Episodes*, 2021, 44: 151–173
- 81 Steininger F F, Aubry M P, Berggren W A, et al. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the Base of the Neogene. *Episodes*, 1997, 20: 23–28
- 82 Wang X L, Zhang S H, Xue X F. Devonian-Carboniferous boundary in neritic facies areas in South China from the viewpoint of integrative stratigraphy. In: Wang N W, Remane J, eds. *Stratigraphy*. Utrecht: VSP Publishers, 1997, 11: 121–131
- 83 Hou H F. Boundaries, boundary-stratotypes and geological events (in Chinese). In: Wu R T, Zhang S X, eds. *Modern Stratigraphy*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989. 169–177 [侯鸿飞. 界线、界线层型与事件. 见: 吴瑞棠, 张守信, 编. 现代地层学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 169–177]
- 84 Walliser O H. Patterns and causes of global events. In: Walliser O H, ed. *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin: Springer, 1995. 7–20
- 85 Yin H F, Tong J N. Relationship between sequence stratigraphical boundary and chronostratigraphical boundary (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1995, 40: 539–541 [殷鸿福, 童金南. 层序地层界面与年代地层界面的关系. 科学通报, 1995, 40: 539–541]
- 86 Wang X L. On the Devonian-Carboniferous boundary in neritic facies areas in South China: A viewpoint of integrated stratigraphy. *J China Univ Geosci*, 1995, 6: 184–191
- 87 Wang X L. Some fundamental problems in outcrop sequence stratigraphy. *Sci China Ser D Earth Sci*, 1999, 42: 636–645 [王训练. 露头层序地层学研究的几个基本理论问题. 中国科学D辑: 地球科学, 1999, 29: 22–30]
- 88 Hedberg H D. *International Stratigraphic Guide—A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure*. A Wiley Interscience Publication. New York: John Wiley and Sons, 1976. 1–200
- 89 Salvador A. *International Stratigraphic Guide—A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure*. 2nd ed. Boulder: The Geological Society of America, 1994. 1–214
- 90 Cowie J W. Guidelines for boundary stratotypes. *Episodes*, 1986, 9: 78–82
- 91 Cowie J W, Ziegler W, Boucot A J, et al. Guidelines and statutes of the International Commission on Stratigraphy (ISC). *Cour Forsch Inst Senckenb*, 1986, 83: 1–14
- 92 Remane J, Bassett M G, Cowie J W, et al. Revised guidelines for the establishment of global chronostratigraphic standards by the International

- Commission on Stratigraphy (ICS). *Episodes*, 1996, 19: 77–81
- 93 Walliser O H. Pleading for a natural D/C boundary. *Cour Forsch Inst Senckenb*, 1984, 67: 241–246
- 94 Wu R T. Event stratigraphy—A new challenge (in Chinese). *Geol Rev*, 1986, 32: 405–411 [吴瑞棠. 事件地层学——一个新的挑战. 地质论评, 1986, 32: 405–411]
- 95 Yin H F, Wu S B, Ding M H, et al. The Meishan section, candidate of the global stratotype section and point of Permian-Triassic boundary. In: Yin H F, ed. *The Palaeozoic-Mesozoic Boundary, Candidates of Global Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic Boundary*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996. 31–48
- 96 Kapoor H M. The Guryal Ravine section, candidate of the global stratotype section and point of the Permo-Triassic boundary. In: Yin H F, ed. *The Palaeozoic-Mesozoic Boundary, Candidates of Global Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic Boundary*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996. 99–110
- 97 Remane J. International Stratigraphic Chart, with Explanatory Note. In: 31st International Geological Congress, 2000. 1–16
- 98 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 2004, 27: 83–100
- 99 Wang C Y. Devonian substages—Current main works of SDS (ISC) (in Chinese). *J Stratigr*, 1999, 23: 316–320 [王成源. 泥盆系的亚阶——国际地层委员会泥盆系分会当前工作重点. 地层学杂志, 1999, 23: 316–320]
- 100 Wang C Y. Progress in the study of global Devonian substages (in Chinese). *J Stratigr*, 2003, 27: 77–79 [王成源. 国际泥盆系亚阶研究的新进展. 地层学杂志, 2003, 27: 77–79]
- 101 Wang C Y. Devonian Famennian Stage four-folded have got final conclusion (in Chinese). *J Stratigr*, 2004, 28: 185 [王成源. 泥盆系法门阶四分已成定局. 地层学杂志, 2004, 28: 185]
- 102 Jeffrey O D. News from the Frasnian substages working group. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 2000, 18: 42–44
- 103 Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica. *Geol Soc Am Bull*, 1985, 96: 567–587
- 104 Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Late Devonian eustatic cycles around margin of Old Red Sandstone Continent. *Ann Soc Géol Belg*, 1986, 103: 141–147
- 105 Johnson J G, Charles A, Sandberg C A. Devonian eustatic events in the western United States and their biostratigraphic responses. In: Mcmillan N J, Embry A F, Glass D J, eds. *Devonian of the World: Proceedings of the 2nd International Symposium on the Devonian System, Volume III: Paleontology, Paleocology and Biostratigraphy*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1988, 14: 171–178
- 106 Chen D Z, Chen Q Y. Devonian sedimentary evolution and transgression-regression in South China (in Chinese). *Sci Geol Sin*, 1994, 29: 246–255 [陈代钊, 陈其英. 华南泥盆纪沉积演化及海水进退规程. 地质科学, 1994, 29: 246–255]
- 107 Wang X L, Wang H Z. The evolution and palaeobiogeography of Late Devonian to Early Carboniferous rugose corals and their relationship to sea level change (in Chinese). In: Palaeontological Society of China, ed. *Abstracts Volume of the 20th Annual Conference of Paleontological Society of China—To Celebrate the 70th Anniversary of the Paleontological Society of China*, 1999. 43–46 [王训练, 王鸿祯. 晚泥盆世至早石炭世四射珊瑚演化、生物古地理及其与海平面变化的关系. 见: 中国古生物学会, 编. 中国古生物学会第20届学术年会论文摘要集——庆祝中国古生物学会成立70周年, 1999. 43–46]
- 108 Wang X L. Some fundamental problems in outcrop sequence stratigraphy. *Sci China Ser D Earth Sci*, 1999, 42: 636–645
- 109 Sandberg C A, Ziegler W, Morrow J R. Late Devonian events and mass extinctions. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 2000, 17: 55–56
- 110 Walliser O H. Global events in the Devonian and Carboniferous. In: Walliser O H, ed. *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin: Springer, 1996. 225–250
- 111 Becker R T, House M R. Proposals for an international substage subdivision of the Frasnian. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 1998, 15: 17–21
- 112 House M R, Ziegler W. On sea level fluctuations in the Devonian. *Cour Forsch Inst Senckenb*, 1997, 199: 1–140
- 113 Sandberg C A, Ziegler W. Comment on proposed Frasnian and Famennian substages. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 1998, 15: 43–46
- 114 Ziegler W, Sandberg C A. Utility of Palmatolepids and Icriodontids in recognizing Upper Devonian series, stage, and possible substage boundaries. *Cour Forsch Inst Senckenb*, 2000, 225: 335–347
- 115 Wang X L, Wu H C. High resolution integrated stratigraphy in the age of Earth system science (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2016, 23: 246–252 [王训练, 吴怀春. 地球系统科学时代的高分辨综合地层学. 地学前缘, 2016, 23: 246–252]

Summary for “‘金钉子’之后的国际年代地层表刍议”

Attempting discussion of the International Chronostratigraphic Chart after the Global Standard Boundary Stratotype Section and Point

Xunlian Wang

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

E-mail: wxl@cugb.edu.cn

To date, approximately two-thirds of the Phanerozoic chronostratigraphic boundaries have been defined in terms of the Global Standard Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) concept in the International Chronostratigraphic Chart. However, in practice, almost all definitions and correlations of these boundaries are controversial, and some of the definitions are indeed questionable. Consequently, the definitions of some boundaries for the standard of correlation become almost meaningless, and it is therefore necessary to reexamine the guiding ideology and research methods for determining stratigraphic boundaries. In addition, the current International Chronostratigraphic Chart is no longer able to meet the need for accuracy of the temporal and spatial framework for Earth system science. Therefore, it is necessary to establish a new generation of the International Chronostratigraphic Chart after the GSSP.

Given the problems encountered in the establishment and practice of the International Chronostratigraphic Chart, this paper proposes that the International Chronostratigraphic Chart after the GSSP should be developed to solve the following issues: (1) Improving the time resolution; (2) improving the identifiability of stratigraphic boundaries; (3) improving the isochronism of stratigraphic boundaries; (4) establishing a standard for chronostratigraphic boundaries that is suitable for accurate correlation of different sedimentary facies in different regions; (5) establishing objective, repeatable, and verifiable criteria for the definition and selection of GSSPs; and (6) ensuring that the chronostratigraphic boundaries reflect the historical stages of the evolution of Earth.

The present paper attempts to combine biostratigraphy and event stratigraphy to define chronostratigraphic boundaries, and takes the geological event surface as an important criterion for defining, selecting, and identifying GSSPs. In the specific approach, the speciation event of the first widely distributed species above the top surface of the event stratigraphic unit, that is, the base of the first widely distributed biozone above the top surface of the event stratigraphical unit, should be selected as the biostratigraphic definition of a chronostratigraphic boundary (the first criterion). The section with the shortest distance between the first appearance datum (FAD) of the index fossil selected to define a chronostratigraphic boundary and the top surface of the event stratum should be chosen as the boundary stratotype section (the second criterion), and the FAD of the index fossil in the section is the GSSP. The top surface of the event stratum below the index fossil, as the biostratigraphic definition of a chronostratigraphic boundary, is an important reference criterion for identification and correlation of chronostratigraphic boundaries. Within the framework of biostratigraphy, the records of all types of geologic events and other strictly isochronous natural boundaries are used for further division and more accurate correlation of deposits in detail, which may improve the resolution of the stratigraphic division and the identifiability of stratigraphic boundaries. This would allow a new generation of the International Chronostratigraphic Chart to reach the same time scale as the Quaternary (tens to hundreds of thousands of years) and improve the identifiability of chronostratigraphic boundaries in the field to benefit geological mapping.

International Chronostratigraphic Chart, geologic time scale, Global Standard Boundary Stratotype Section and Point (GSSP), golden spike, modern stratigraphy

doi: [10.1360/TB-2021-0795](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0795)